

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ И СЕЙСМОЛОГИИ ДВО РАН

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В СИСТЕМЕ ОСНОВНОЙ-УЛЬТРАОСНОВНОЙ
РАСПЛАВ–ШПИТЕЛЬ, ОЛИВИН, ОРТОПИРОКСЕН,
КЛИНОПИРОКСЕН, ПЛАГИОКЛАЗ
ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ**

геологическое приложение

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ И СЕЙСМОЛОГИИ ДВО РАН

Г.П. ПОНОМАРЕВ, М.Ю. ПУЗАНКОВ

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В СИСТЕМЕ ОСНОВНОЙ-УЛЬТРАОСНОВНОЙ
РАСПЛАВ–ШПИНЕЛЬ, ОЛИВИН, ОРТОПИРОКСЕН,
КЛИНОПИРОКСЕН, ПЛАГИОКЛАЗ
ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ**

геологическое приложение

Москва
2012

УДК 552.11
ББК 26.31
П56

Ответственный редактор:
Советник РАН, доктор геолого-минералогических наук *Б.В. Иванов*

Рецензенты:
Доктор геолого-минералогических наук *А.В. Колосков*
Кандидат геолого-минералогических наук *Г.Б. Флеров*

Пономарев Г.П., Пузанков М.Ю.

П56 Распределение породообразующих элементов в системе основной-ультраосновной расплав–шпинель, оливин, ортопироксен, клинопироксен, плагиоклаз по экспериментальным данным: геологическое приложение. – М: ИВиС ДВО РАН, 2012. – 668 с. Табл. 155. Ил. 685. Библиогр.: 831 назв.

ISBN 978-5-98604-314-2

В монографии представлены результаты исследований по двум взаимосвязанным направлениям. Результатами исследований по первому направлению являются ~600 уравнений, созданных на базе экспериментальных данных «ИНФОРЕКС». Эти уравнения позволяют рассчитывать концентрации элементов в расплаве, значения температуры и давления, оценивать равновесность фаз и расплавов. Многие из них в настоящее время аналогов не имеют, а используемые петрологами аналогичные уравнения имеют худшие статистические характеристики. Второе направление исследований – это использование полученных уравнений для уточнения и обобщения генетических особенностей геологических тел и массивов различной фациальной, формационной и геодинамической принадлежности, сложенных породами базит-гипербазитового ряда. Среди этих результатов наиболее существенными можно назвать: 1. переуровненность составов шпинель–оливиновой ассоциации в эффузивах основного-ультраосновного составов (исключением является этот парагенезис в базальтах из рифтовых долин СОХ); 2. ограниченность по глубине (менее 40–45 км, менее 15 кб) кристаллизации большинства магм основного-ультраосновного составов; 3. особенности поведения кальция в оливине; 4. немагматический генезис алмазов кимберлитов и т. д.

Для геологов, аспирантов и студентов геологических специальностей.

G.P. Ponomaryov, M.Yu. Puzankov

Distributions of rock forming elements in system basic-ultrabasic melt between melt and spinel, olivine, orthopyroxene, clinopyroxene, plagioclase. Geological application.

This monograph shows the results of two interrelated lines in scientific investigation. 600 equations based on experimental data «INFOREX» resulted from the first line of scientific investigation. These equations allow calculating concentration of elements in melt, values of temperature and pressure; estimating equilibrium of phases and melts. Many of them are unique and the analogous equations used by petrologists have worse statistical characteristics. The second line of the scientific investigation specifies and generalizes genetic peculiarities of bodies and massifs, composed of rocks of basite-hyperbasite series with different facial, formational and geodynamic characteristics by means of the obtained equations.

Among the results the most essential are re-equilibration of compositions of spinel–olivine associations in effusive rocks with basic-ultrabasic composition, except for paragenesis in basalts from the rift valley of the Mid-Ocean Ridge; limited depth of crystallization (not less than 15 kb, 40–45 km) of most magmas with basic-ultrabasic composition; characteristics of Ca behaviour in olivine; non-magmatic genesis of diamonds from kimberlites.

This monograph would be useful for geologists, PhD students and students of geological departments.

ISBN 978-5-98604-314-2

© Учреждение ИВиС ДВО РАН, 2012
© Пономарев Г.П., Пузанков М.Ю., 2012

Предисловие

В монографии представлены результаты более чем пятнадцатилетних исследований авторов по двум взаимосвязанным направлениям. С одной стороны, это создание различного рода инструментов (мелтометров, термометров, барометров и т. д.) для количественных и качественных оценок условий формирования магм с момента начала их кристаллизации. С другой стороны – использование этих инструментов для выяснения генезиса магм по образовавшимся из них породам в различных геодинамических обстановках. Эти исследования являются закономерным продолжением работ, начавшихся в 60-е годы прошедшего столетия в Институте вулканологии СО РАН, а затем ДВО по проблеме – вулканизм, как индикатор глубинных процессов. Результаты, достигнутые институтом за прошедший период в области петролого-геохимических исследований этой проблемы, нашли свое отражение в работах О.Н. Волынца (типизация вулканических серий в Курило-Камчатской островодужной системе), Г.П. Авдейко (данные по петрографии, петрохимии и геохимии продуктов подводного вулканизма и зональности Курильской островной дуги), Б.В. Иванова (справочник по петрохимическому и минеральному составам андезитов Камчатки) и А.В. Колоскова (исследование генетического родства ультраосновных ксенолитов и включающих их вулканитов с использованием различного рода дискриминантных диаграмм).

Появление в Институте вулканологии ДВО РАН в 80-е годы стабильно работающего микроанализатора, благодаря усилиям Г.П. Пономарева, а также коллег – В.В. Ананьева и В.М. Чубарова, привело к накоплению большого объема данных по минералогии различных отрядов и фациальных разностей магматических пород. В результате проведенной работы минералогия магматических пород Курило-Камчатского региона хорошо изучена, а полученные данные во многом определили успешность вышеназванных исследований.

Однако существовал ряд трудностей в использовании полученных аналитических данных для генетических построений. Например, по инициативе Г.П. Пономарева на коллекционном материале О.Н. Волынца и Г.П. Пономарева (N–Q вулканиты Курило-Камчатской складчатой области и ультраосновные включения в них) при участии Т.М. Философовой были исследованы особенности фазового состава минералов группы шпинели (самостоятельные кристаллы, включенные в минералы в виде вкрапленников и микролитов, продукты распада в области сольвуса и т. д.). Всего было исследовано порядка 100 образцов и выполнено ~10 000 анализов. В то время не было надежных способов (уравнений), с помощью которых можно было оценить равновесность исследованных фаз и рассчитать должным образом температуры и давления, при которых образовались данные минеральные фазы. Возникшие трудности продиктовали необходимость поисков и создания новой классификационной инструментальной базы.

Недостатки различного рода классификаций, в частности в петрографо-петрологическом направлении, вызывают поиски новых подходов и методов. Так, например, по мнению Б.Г. Лутца*, «петрохимический подход, основанный на силикатных анализах, в значительной мере себя исчерпал. В то же время привлечение геохимических данных (малые и микроэлементы, стабильные и радиоактивные изотопы – дополнение наше) открывает новые, исключительно результативные возможности для сравнительного анализа». Это направление исследований за последние несколько десятков лет вызвало лавинообразное накопление геохимической информации по магматическим и метаморфическим породам и привело к созданию ряда классификационных диаграмм, позволяющих выявлять ранее неизвестные особенности, что связано с высокой чувствительностью этих элементов, изотопных отношений элементов к условиям формирования и существования породы и с широкими диапазонами вариаций содержаний этих элементов, на несколько порядков превышающих вариации колебаний породообразующих элементов. Эти данные расширили масштабы моделей до границ мантия–ядро.

* Лутц Б.Г. Геохимия океанического и континентального магматизма. М.: Недра, 1980. 246 с.

Наши интересы были направлены на исследования фазового состава магматических горных пород основного и ультраосновного составов, являющихся производными мантийных магм и в силу этого несущих в себе специфический набор полезных ископаемых. Для них, как и для других отрядов магматических пород, наряду с широко используемыми геохимическими данными, позволяющими заглядывать в мантийные глубины, силикатные анализы различных фаз, слагающих эти породы и самих пород, по-прежнему остаются необходимыми характеристиками для решения вопросов об их классификационной и генетической принадлежности, рудной специализации и т. д. Именно данные по составам породообразующих минералов, различных включений в них и по валовым составам пород являются фактическим материалом для оценок температур и давлений, фугитивности кислорода, влияния летучих, реконструкций эволюции магматических расплавов в процессе их подъема к дневной поверхности или затвердевания интрузивного массива и т. д. В основе этих классификаций лежат исследования различных вариантов комбинаций равновесия расплав–минерал(ы). Для этих исследований используются уравнения, связывающие составы равновесных фаз с численными значениями температуры, давления и фугитивности кислорода.

Для создания подобных уравнений и в их исследованиях используются два подхода: термодинамический и эмпирический. В нашей стране термодинамический подход для решения генетических проблем магматических пород основного и ультраосновного составов представлен в работах А.А. Арискина, И.Д. Рябчикова и др., метаморфических пород – в работах Л.Л. Перчука, И.Д. Рябчикова, Т.В. Гери, О.В. Авченко и др. Из зарубежных исследователей, занимающихся проблемами магматической петрологии с использованием термодинамического подхода, известностью пользуются работы Г. Брея, М. Гиорсо, А. Киллинка, П. Нимиса, Р. Сака и др. Среди зарубежных исследователей проблем генезиса базит-гипербазитовых магм, использующих эмпирический подход, в настоящее время можно назвать К. Путирку. Параллельно и независимо с использованием эмпирического подхода велись аналогичные наши исследования; для термобарометрии в области солидуса применительно к мантийным породам представителем эмпирического подхода у нас в стране можно назвать И.В. Ащепкова.

Успешные исследования проблем генезиса и эволюции базит-гипербазитовых магм за последние 50 лет стали возможны благодаря трем составляющим: методам анализа, методам экспериментов и способам представления этих результатов. Использование микронзондового анализа для исследования экспериментальных результатов позволило получить составы фаз в экспериментах с контролируруемыми внешними параметрами исследуемых систем. С другой стороны, применение микронзондового анализа в исследованиях магматических пород привело к накоплению в публикациях очень значительного числа данных по фазовому составу и составам самих фаз – 1000 и более опубликованных анализов породообразующих минералов в разнообразных геологических таксонах (лавовый поток, интрузивное тело, пирокластическая толща, вулканическая постройка, серия, формация и т. д.). Развитие техники эксперимента позволяет проводить многочисленные исследования в широком диапазоне условий (Р вплоть до 200 кб и более) с участием летучих в контролируемых условиях и широком диапазоне исследуемых составов. Третьей составляющей успешных исследований генезиса магм и превращений их в породу в ее современном облике за последние годы является создание и использование различного рода баз данных (база «ИНФОРЕКС» А.А. Арискина и др. по составам фаз в экспериментальных контролируемых условиях включает информацию о более чем 10 000 опытах), электронных версий публикаций и выборок по природным данным, а также исследовательских программ, позволяющих рассчитывать температуру, давление и составы фаз, исследовать пути эволюции при кристаллизации многофазных систем. Примером такой программы может служить созданный А.А. Арискиным и др. комплекс «КО-МАГМАТ».

Выполненные нами исследования по генезису и эволюции базит-гипербазитовых магм разнесены в монографии по 4 главам. В главах 1 и 2 приводятся созданные нами две группы уравнений: 1. наиболее универсальные в настоящее время уравнения, позволяющие рассчитывать температуру и давление; 2. группа уравнений, фактически являющихся первыми в

своем роде, позволяющих вычислять равновесные–неравновесные содержания элементов в расплаве и оценивать целесообразность расчетов температур, давлений, составов расплава. Все эти уравнения представлены в различных формах для условий атмосферного и повышенного давления для «сухих» условий. В третьей главе обсуждаются особенности созданных уравнений, которые сравниваются с наиболее известными, опубликованными и используемыми для расчетов различными авторами разнообразными вариантами термометров и барометров, инструментов для оценки равновесия расплав–минерал и т. д. В четвертую главу сведены результаты использования полученных нами уравнений для магматических пород основного-ультраосновного составов различного генезиса. Применение созданных нами формул и зависимостей позволило выявить барическую границу начала кристаллизации основных-ультраосновных магм; оценить скорости подъема расплавов и особенности подъема их в зонах СОХ; присоединиться к представлениям о немагматическом генезисе алмазов кимберлитов и т. д.

Полученные нами результаты по созданию инструментов для исследований пород базит-гипербазитового ряда и уточнения их генезиса стали возможны именно благодаря указанным выше трем составляющим. Расчет уравнений для группы систем основной-ультраосновной расплав–шпинель–оливин–ортопироксен–клинопироксен–плаггиоклаз на базе максимального в настоящее время числа экспериментальных данных стал возможен только благодаря использованию регулярно пополняемой базе данных «ИНФОРЕКС», любезно предоставленной ее авторами. Первоначально мы пытались сами собирать экспериментальные данные, что отчасти удалось для системы шпинель–оливин–расплав, но в дальнейшем отказались от этого ввиду больших трудностей.

Если сбор данных по экспериментальным результатам замкнулся для нас на группе создателей базы «ИНФОРЕКС», то сбор данных по разнообразным породам базит-гипербазитового ряда (помимо доступных отечественных печатных изданий и электронных версий журналов издательств «Elsevier», «Springer» и т. д.) стал возможен в основном благодаря помощи как наших коллег из других академических организаций, так и зарубежных исследователей. Необходимо назвать А.Б. Перепелова, Ю.А. Мартынова, З.Г. Бадрединова, С.А. Щеку, И.А. Тарарина, М.В. Портнягина, Н.Л. Миронова, Дж. Ягодзински. Особую благодарность за помощь в оперативном сборе геологических данных из литературных источников нам хочется выразить сотрудникам библиотеки ИВиС ДВО РАН В.Г. Троицкой, Н.В. Борисенко, Н.К. Гавриловой, М.В. Мазнабиевой. Объединение этих разнообразных данных потребовало значительных усилий в техническом редактировании текста монографии, которое было сделано Т.Е. Пузанковой и Г.И. Вечкановой. Мы благодарны А.А. Арискину, О.В. Авченко, А.В. Колоскову, И.В. Мелекесцеву и Г.Б. Флерову, взявшим на себя труд ознакомиться с работой и предложившим ряд дополнений и исправлений.

Эта исследовательская работа, вылившаяся в создание монографии, в течение ряда лет финансово поддерживалась грантами ДВО РАН.

Введение

Исследования **фазового состава** магм и образовавшихся из них при затвердевании магматических пород является одним из методов решения широкого круга проблем как образования, так и эволюции магм. Академик Д.С. Коржинский указывал на то, что «анализ парагенезисов основан на применении к минеральным образованиям учения о термодинамическом равновесии» [8]. Такой подход позволяет получать количественные оценки условий образования и существования минеральных ассоциаций. Предлагаемая вниманию читателя работа – первая попытка создания на экспериментальной основе, по единой методике, системы уравнений для магматических парагенезисов (расплавно–минеральных и собственно минеральных), позволяющих различать **равновесные и неравновесные именно природные парагенезисы** и **фазы** применительно к магматическим системам; основываясь на этих различиях, вычислять **условия их образования** (состав равновесного расплава, P–T условия) и дальнейшего существования с помощью **созданных** нами наиболее **универсальных** на сегодня среди **подобных** уравнений.

В настоящее время исследования парагенезисов минералов (как метод) существенно приблизились по своему содержанию к кругу задач физико-химического анализа парагенезиса минералов, сформулированных Д.С. Коржинским: «задачей анализа парагенезисов минералов является установление наблюдаемых закономерностей ассоциаций минералов в горных породах и рудах и физико-химическая интерпретация этих закономерностей» [8]. Для породобразующих минеральных сообществ магматических пород физико-химическими условиями являются составы магм, флюидов и P–T условия образования того или иного минерального парагенезиса из магматического расплава. В рамках очерченных задач наши интересы ограничены исследованиями преимущественно парагенезисов породобразующих минералов, образовавшихся из магм основного и ультраосновного составов.

В исследованиях парагенезисов минералов существуют два взаимосвязанных направления: 1. исследования природных парагенезисов (составы, геологические условия образования); 2. получение и использование уравнений, систем уравнений, связующих составы фаз и условия их образования в закрытых и открытых системах.

Первой, и фактически базовой составляющей такого рода исследований, являются массовые данные по составам породобразующих минеральных фаз, их ассоциаций (именно на массовость, как основу для выбора физико-химических моделей, обращал внимание Д.С. Коржинский [8]) и петрохимические данные собственно по составам пород базит-гипербазитового ряда с набором определенных геологических характеристик. К числу этих обобщенных характеристик могут быть отнесены фациальная и формационная принадлежности, геодинамическая обстановка образования породы и ее возраст. Полноценными эти результаты стали благодаря широкому применению различных видов микрозондового анализа при петрографических исследованиях и появлению ряда сериальных и геолого-структурных классификационных схем на основании обобщения очень большого ряда геолого-геофизических данных по современным геодинамическим обстановкам, что позволяет реконструировать и сравнивать особенности магматизма в палеогеодинамических обстановках. Сейчас имеются десятки, а может быть и сотни тысяч анализов породобразующих минералов, представленных в электронном виде и рассредоточенным по различным базам данных. Если судить по опубликованным данным, к числу наиболее систематично изученных минералогически пород базит-гипербазитового ряда можно отнести ультраосновные ксенолиты, выносимые кимберлитовыми магмами, щелочные разности базальтов, а также собственно базальты, слагающие второй слой современной океанической коры. Хотя, конечно, объем этих данных не сравним с детальными исследованиями на рудных объектах. Примером могут служить микрозондовые исследования минералогии золоторудных объектов Камчатки, которые в большинстве своем остались в геологических отчетах. Еще более детальными, вероятно, являются исследования по минералогии на месторождениях алмазов, платиноидов, медно-никелевых и др., которые лишь частично попадают в открытую печать. В итоге можно

только констатировать, что в настоящем имеется очень большое число данных по составам природных парагенезисов из пород базит-гипербазитового ряда, но далеко не все они доступны широкому пользователю. Это большое число аналитических данных пока не привело к созданию общепринятой генетической классификации магматических пород основного-ультраосновного составов. Накопленные фактические данные по фазовому составу магматических пород, образовавшихся в различных геодинамических обстановках и различных фациальных условиях, а также испытавших разнообразные вторичные преобразования, породили ряд задач. Среди этих задач **одной из первых** можно назвать выявление равновесных с расплавом (т. е. пригодных для дальнейших расчетов) парагенезисов — расплав-минеральных и собственно минеральных, также равновесных с расплавом. При расчетах численных значений температуры, давления и т. д. необходимым условием является **равновесность с расплавом** используемых для расчетов природных фаз. Количественно установить это для фаз из числа порообразующих минералов (шпинель, оливин, ортопироксен, клинопироксен, плагиоклаз) позволяют только наши формулы. Использование формул для расчета равновесности-неравновесности того или иного парагенезиса (вместе с другими созданными нами формулами) позволяет решать следующие задачи:

1. условия начала кристаллизации и динамические характеристики (скорость подъема) магм основного-ультраосновного составов в различных современных геодинамических обстановках;
2. возможности реконструкции этих условий для палеоаналогов;
3. равновесность-неравновесность фаз в интрузивных массивах и реконструкция расплавов, их породивших;
4. равновесность-неравновесность минеральных фаз с расплавом гомеогенных включений и собственно ультраосновных ксенолитов и т. д.

Основная масса создаваемых и используемых сегодня классификаций основана на разграничениях по содержаниям и отношениям редких и рассеянных элементов, изотопов и изотопных отношений ряда элементов в породах. Важной проблемой в этих классификациях является положение границ, так как даже на диаграммах TAS магматических пород границы семейств для вулканических и интрузивных пород различаются [11]. Одной из возможных причин этих различий может быть термическая история этих классов магматических пород и продолжительность их открытости-закрытости, отражающиеся на условиях равновесия порообразующих минералов, что, в свою очередь, должно сказываться на их геохимических характеристиках. Используя данные по содержаниям порообразующих элементов в минералах различных генетических групп пород основного-ультраосновного составов, мы попытались с помощью полученных нами уравнений ответить на ряд перечисленных выше вопросов.

Второе направление, которое можно назвать методом изучения, позволяет количественно оценивать собственно условия образования минералов и их парагенезисов. В него входят геологические термометры, барометры, фугометры, спидометры (и т. д.) и способы их получения. Собственно родоначальниками исследований парагенезисов минералов можно назвать В.М. Гольдшмидта и П. Эскола. Пионерской работой в создании инструментов для оценки интенсивных параметров на базе парагенетического анализа можно назвать попытку создания геотермометра по результатам исследования минеральных парагенезисов кристаллических сланцев южного Прибайкалья Д.С. Коржинским [7]. Дальнейшее развитие это направление, основанное на привлечении законов химической термодинамики для описания минеральных равновесий, получило в работах Д.С. Коржинского, В.С. Соболева, Т. Барта, Г. Рамберга, Дж. Де Воре, Р. Гаррелса, В.А. Жарикова, А.А. Маракушева, Л.Л. Перчука, И.Д. Рябчикова, Х. Тейлора и их последователей.

В настоящее время исследования равновесий минеральных парагенезисов разделились на ряд отчасти самостоятельных направлений по объектам (парагенезисы минералов из пород, претерпевших метаморфические и метасоматические преобразования и парагенезисы магм и магматических пород) и способам изучения (термодинамический и эмпирический подходы

для создания физико-химических моделей). У нас в стране ведущее место в исследованиях пород, испытавших метаморфические и метасоматические изменения, путем создания термодинамических моделей принадлежит Д.С. Коржинскому, В.А. Жарикову, И.К. Карпову, Л.Л. Перчуку и их ученикам. Примерами эмпирического подхода исследований в области солидуса гранитоидов и мантийных перидотитов являются работы Г.Б. Ферштатер и И.В. Ащепкова и [13; 4]. Парагенетический анализ в понимании Д.С. Коржинского (путем создания физико-химических моделей на основе термодинамического подхода в исследованиях равновесной кристаллизации базальтовых магм) представлен в работах А.А. Арискина, М.Я. Френкеля, М. Гиорсоу, Р. Нильсена, А. Киллинга, Р. Сека, Я. Кармайкла и других. Термодинамический подход использован и в создании ряда уравнений, позволяющих рассчитывать численные значения температуры и давления, протестированных нами в главе 3 (см. список литературы к главе 3).

«Термодинамический подход». В этом подходе сегодня можно выделить условно два уровня. Задачей первого уровня является получение численных значений интенсивных параметров (температуры, давления) на основе термодинамических и термохимических исследований. Получаемые численные значения температуры и давления широко используется для оценок условий формирования магматических, метаморфических и метасоматических пород. Расчет этих численных значений осуществляется методом констант химического равновесия по стехиометрическим реакциям. В этих уравнениях связываются зависимостью энергия Гиббса реакции, активности компонентов, участвующих в реакции, и P – T условия равновесия. Для этих расчетов используются термохимические данные и термодинамические характеристики фаз переменного состава [9; 1] или термодинамически обработанные экспериментальные данные с подбором условий химического равновесия [2]. Для петрологических задач в случае неравновесных систем дополнительным условием может быть локальное или мозаичное равновесие по Д.С. Коржинскому. В настоящее время в магматической петрологии на основе таких уравнений для ряда систем расплав–породообразующий минерал созданы программы. Наиболее популярные из таких программ (уравнений) для систем основной–ультраосновной расплав–породообразующий минерал протестированы нами, результаты тестирования представлены в главе 3. В ЭВМ–моделях более высокого по своим возможностям уровня используется метод минимизации свободной энергии Гиббса для расчетов гетерогенных равновесий. Обоснование методов минимизации и возможностей метода (учет массопереноса – течение, конвекция, фильтрация, диффузия, образование и осаждение кристаллов, приводящее к кристаллизационной дифференциации и т. д.), а также результаты его использования подробно рассмотрены в работе И.К. Карпова и др. [5]. Использование этого метода для решения широкого круга петрологических и геохимических задач с помощью физико-химических моделей позволило создать большой ряд программ и широко известных программных комплексов: «Селектор – С» [6], «Комагат» [3], «MELTS» [14]. Для программ обоих уровней термодинамическое исследование систем магматический расплав–минерал(ы) связано со сложностями выбора компонентов и описания химических потенциалов компонентов в магматическом силикатном расплаве. В работе А.А. Арискин и Г.С. Барминой [3] обсуждаются различные способы преодоления этих трудностей: выбор моделей расплава, эмпирические подходы, привлечение экспериментальных данных, использование концентраций компонентов вместо активностей и так далее.

«Эмпирический подход». Этот способ вычислений P , T и фугитивности летучих лишь отчасти можно назвать эмпирическим, так как и его основой является закон действующих масс. Собственно эмпирическим в этом направлении можно назвать лишь способ создания уравнений, связывающих температуры, давления, фугитивности летучих и составы расплава и равновесных с ним минералов, так как не используются разного рода ограничения (связи), накладываемые законами химической термодинамики. Полагается идеальность растворов (коэффициент активности компонентов равен 1) как в минералах, так и в расплавах. Для расчетов используется или коэффициент распределения, или константа равновесия с учетом особенностей строения силикатного расплава. Вероятно, наиболее известной и удачной ра-

ботой, представляющей этот подход и породившей указанное направление, как таковое, является публикация результатов экспериментальных исследований П Редера и Р. Эмсли [15]. В этой работе были представлены 2 геотермометра (уравнения) на основе коэффициентов распределения для интервала температур 1150–1300 °С, полученные путем статистической обработки экспериментальных данных (27 опытов) по равновесному распределению концентраций (мольные доли) магния и железа между кристаллами оливина и базальтовым расплавом в условиях контролируемой фугитивности кислорода. Рассчитанные этими авторами зависимости имели в целом достаточно высокие коэффициенты корреляции: для MgO_{ol}/MgO_{liq} мол. % от температуры $R = 0.97$; для FeO_{ol}/FeO_{liq} от температуры $R = 0.8$. Эти геотермометры в последующем улучшались путем учета состава расплава. В дальнейшем учет состава (мольные доли, атом. %) расплава стал составной частью получаемых корреляционных уравнений для расчетов температуры, давления и т. д.

Этот подход, согласно А.А. Арискину и Г.С. Барминой [3] имеет как преимущества, так и слабые стороны в сравнении с термодинамическим подходом: результаты сравнительного тестирования термодинамических и эмпирических моделей указывают на преимущество последних (за прошедшее время картина принципиально не изменилась). Основным недостатком инструментов (термометров и барометров), построенных на использовании коэффициентов распределения, является то, что **указанная авторами точность для этих вычислений ограничена составами фаз, использованными для расчетов**. В случае использования констант равновесия **трудностью является выбор компонентов в расплаве для получения максимально линейных зависимостей** [3].

Термометрические и барометрические уравнения, а также уравнения для расчета фугитивности кислорода, созданные с помощью как термодинамического, так и эмпирического подходов, широко используются в петрологических исследованиях магматических систем. Для получения достоверных оценок рассчитываемых величин необходимым условием является **равновесность составов фаз** при данных P–T условиях. В экспериментальных исследованиях, служащих основанием для расчетов, это условие достигается соблюдением ряда правил [5], хотя, возможно, не в полной мере для случаев сверхвысоких давлений (более 200 кб). Для природных магматических парагенезисов ясных общепринятых критериев — правил для доказательства **равновесности данного минерала, минерального парагенезиса с магматическим расплавом** — до сих пор нет. Для минералов интрузивных пород, претерпевших переуравновешивание в солидусных условиях (не подвергшихся метаморфическим преобразованиям), геотермометрами (построенными на различных минеральных парагенезисах) фиксируются собственно температуры закрытия обменных реакций [12]. Возможно, в некоторых случаях пригодными для расчетов могут быть составы минералов из краевых фаций, претерпевших быстрое затвердевание и потому не испытывавших переуравновешивание химических составов. Пока же для петрологических моделей используются в основном данные по петрохимии пород краевой фации интрузивных массивов (как не испытывавших гравитационно-кристаллизационную дифференциацию), а также структурные взаимоотношения минералов и сведения о наборе первичных фаз. Для выделения пород краевой фации пригодных для расчетов в разноглубинных интрузивных телах, вероятно, могут быть полезными закономерности, выявленные для магматических тел по распределениям числа и размеров кристаллов [10]. Поэтому для оценок температур, давлений и особенностей составов магм, начиная с момента начала кристаллизации, пригодны только магматические породы эффузивной и пирокластической фаций, как **достигшие достаточно быстро земной поверхности** и испытывавшие закалку. В этом процессе можно выделить несколько этапов. После своего образования из расплава минерал или минеральный парагенезис может неопределенно долго находиться в магме, хотя для минерального парагенезиса это будут уже солидусные условия. Примером может служить парагенезис шпинель–оливин. Для основных-ультраосновных эффузивов этот парагенезис типичен в виде вкрапленников оливина, содержащих в себе большое количество мелких кристаллов шпинели. Для этой пары кристаллов (несмотря на то, что они находятся в расплаве) даже при незначительном охлаждении расплава (10–15 °С) отно-

сительно температуры кристаллизации оливина уже будут солидусные условия, что вызовет их переуравновешивание с учетом, естественно, продолжительности этого переуравновешивания. Но в некоторых случаях время от образования парагенезиса в магме до ее извержения на земную поверхность (с использованием полученных нами зависимостей) поддается количественному учету (см. главу 4). В магматических породах указанных фаций критериями одновременности и неизменности составов кристаллических фаз служат структурные взаимоотношения минералов, наличие общей фазовой границы и наличие или отсутствие зональности в них. Однако структурные взаимоотношения минералов в лучшем случае могут служить критерием **одновременности** их образования из расплава, но не являются автоматически критерием **равновесности** их составов. Забегая вперед, в качестве примера несоответствия составов и структурных взаимоотношений минералов укажем результаты наших исследований шпинель–оливинового парагенезиса в основных–ультраосновных эффузивах (см. главу 4). В петрологической практике пока имеется **единственный инструмент (численный критерий)** для оценки равновесия минерал–расплав. Этим инструментом является коэффициент распределения Fe^{2+} и Mg между основным–ультраосновным расплавом и оливином (K_D), равный ~0.3. Численное значение этой величины является предметом дискуссий. Предлагается использовать среднее значение, вычисленное по большому числу экспериментальных данных. Наши исследования (см. главу 3) показали, что распределение этой величины не соответствует функции Гаусса, следовательно использование среднего значения этой величины для расчетов некорректно. Для остальных парагенезисов основной–ультраосновной расплав–породообразующий минерал, или парагенезисов породообразующих минералов, равновесных с этими расплавами, подобные минералогические критерии **отсутствуют**.

В итоге, исходя из комплекса очерченных проблем, для достоверных определений физико-химических условий кристаллизации магматических расплавов (температуры, давления, состава расплава) инструменты — уравнения — должны обладать указанными ниже характеристиками. Напоминаем читателю, что речь идет только об основных–ультраосновных расплавах, хотя в будущем, вероятно, будут созданы универсальные уравнения без ограничений по составам. Уравнения должны быть **максимально универсальными**, то есть быть откалиброванными на максимально возможном используемом диапазоне составов расплавов и равновесных с ними минералов. С другой стороны, эти зависимости должны обладать **хорошими статистическими характеристиками** (коэффициент корреляции, среднее квадратичное отклонение). Кроме традиционных уравнений для расчетов численных значений температуры и давления по природным парагенезисам нужными являются уравнения для **расчетов содержаний элементов в расплаве**, равновесном с тем или иным природным магматическим минеральным парагенезисом (это поможет корректировать составы пород и расплавных включений, используемых для расчетов). Имеются единичные подобные опубликованные уравнения, например, по расчету содержания кальция в расплаве для условий атмосферного давления, которое было протестировано (см. главу 3). Необходимой составляющей к перечисленным уравнениям являются уравнения, позволяющие на количественной основе **выявлять равновесность–неравновесность** различных фаз: минералов, минеральных парагенезисов и собственно расплавов. Расчеты по уравнениям, позволяющим судить о равновесности–неравновесности изучаемого парагенезиса, **должны выполняться первыми**, т. к. они указывают на целесообразность дальнейших расчетов температур и давлений.

Список литературы

1. Авченко О.В., Чудненко К.В., Александров И.А. Основы физико-химического моделирования минеральных систем. М.: Наука. 2009. 229 с.
2. Аранович Л.Я. Минеральные равновесия многокомпонентных твердых растворов. М.: Наука, 1991. 253 с.
3. Арискин А.А., Бармина Г.С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: Наука, 2000. 362 с.
4. Ащепков И.В. Эмпирический гранатовый термобарометр для мантийных перидотитов // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 10. С. 1075–1089.
5. Граменицкий Е. Н., Котельников А. Р., Батанова А. М., Щекина Т. И., Плечов П. Ю. Экспериментальная и техническая петрология М. Научный мир, 2000. 416 с.
6. Карпов И.К., Чудненко К.В., Бычинский В.А., Кулик Д.А., Павлов А.Л., Третьяков Г.А., Кашик С.А. Минимизация свободной энергии при расчете гетерогенных равновесий // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 4. С. 3–21.
7. Коржинский Д.С. Парагенетический анализ кварцсодержащих бедных кальцием кристаллических сланцев архейского комплекса Южного Прибайкалья // Зап. ВМО. 1936. Ч. 65. Вып. 2. 163 с.
8. Коржинский Д.С. Теоретические основы анализа парагенезиса минералов. М.: Наука, 1973. 287 с.
9. Куретин В. А. Термодинамика минералов переменного состава и геологическая термобарометрия. Киев. Из-во Наукова Думка, 1981. 160 с.
10. Пономарев Г.П. Некоторые аспекты кристаллизации магматических пород // Вулканология и сейсмология. 1982. № 1. С. 95–98.
11. Скляр Е.В., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Иванов А.В., Летникова Е.Ф., Миронов А.Г., Барах И.Г., Буланов В.А., Сизых А.И. Интерпретация геохимических данных. М.: ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 2001. 288 с.
12. Уханов А.В., Рябчиков И.Д., Харькив А.Д. Литосферная мантия Якутской кимберлитовой провинции. М.: Наука, 1988. 286 с.
13. Ферштатер Г.Б. Распределение титана и натрия между минералами гранитоидов как геологический термометр // Геохимия. 1973. № 1. С. 74–83.
14. Ghiorso M.S., Sack R.O. Chemical mass transfer in magmatic processes. IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation of liquid–solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures // Contrib. Miner. and Petrol. 1995. Vol. 119. P. 197–212.
15. Roeder P.L., Emslie R.F. Olivine–liquid equilibrium // Contrib. Mineral. Petrol. 1970. Vol. 29. P. 275–289.

Методическая глава

Используемые данные, их обработка и методика расчета уравнений

Первичными данными для наших расчетов уравнений послужили результаты экспериментальных исследований. К настоящему времени число выполненных экспериментов лежит, вероятно, в окрестностях 30 тыс. опытов. Полноценное их использование возможно только с помощью электронных баз данных. Была использована база данных «ИНФОРЕКС» (внесены данные по 2007 г. включительно) [1], авторы ежегодно пополняют ее новыми экспериментальными результатами. Основу этой базы данных составляют следующие сведения: фазовой состав результатов эксперимента; химический состав образовавшихся фаз в этом эксперименте; данные по стартовому материалу: природный (земной, лунный, метеориты, коматииты, пикриты, базальты и т. д.); синтетический; по условиям проведения эксперимента (температура, давление, фугитивность кислорода, продолжительность опыта, летучие – насыщенные, ненасыщенные); тип контейнера; библиографическая информация о литературном источнике данного эксперимента. Также можно найти информацию о соотношениях Fe^{3+}/Fe^{2+} в закалочных стеклах. Управление этой базой позволяет формировать разнообразные выборки экспериментальных результатов: по условиям проведения эксперимента, по фазовому составу, по составам фаз и т. д. Эта база данных является уникальным инструментом, позволяющим использовать практически все выполненные полноценные экспериментальные результаты, полученные как зарубежными, так и отечественными исследователями. Она является, вероятно, наиболее **полной** среди подобных баз данных.

Получаемые в экспериментах результаты не всегда равнозначны по своему качеству. Результаты экспериментальных исследований во многом зависят и определяются аппаратурными возможностями и методическими приемами, используемыми для проведения эксперимента [5]. Особенно это касается экспериментов при высоких давлениях. В настоящее время проводятся исследования вещества, эквивалентного мантии, при давлениях более 200 кб, температурах выше 2000 °С и в ряде случаев с участием флюидной фазы [6; 16]. Несмотря на разнообразие приемов (аппаратура, методика), продолжительность в подобных экспериментальных исследованиях достигает уже десятков часов и получаемые результаты (фазовый состав и составы фаз, P–T условия) в этих исследованиях [2; 6; 13; 16; 17; 18; 20] считаются квазиравновесными. Это позволило нам использовать экспериментальные результаты, еще не вошедшие в базу данных, для обоснования поведения кальция в оливине в мантийных условиях с участием флюида (см. главу IV).

Для наших исследований из этой базы данных были сформированы две группы выборок: 1. по экспериментам, выполненным в условиях атмосферного давления; 2. по экспериментам, выполненным в условиях повышенного давления (до 175 кб). Была также сформирована группа выборок из экспериментов с участием летучих компонентов, которая частично обработана, но эти результаты в данной работе не представлены из-за резкого увеличения объема данных.

На первом этапе обработки экспериментальных данных по составам фаз были исключены составы стекол и минералов с суммами менее 98 % и более 102 % вес окисных %. Поэтому в указанное число экспериментов в таблицах 1.М и 2.М входят данные с составами фаз (минералов и стекол), лежащих в указанном интервале.

Группа выборок, сформированная по экспериментальным результатам при атмосферном давлении, представлена следующими парагенезисами (см. таблицу 1.М).

Таблица. 1.М. Выборки парагенезисов, образовавшихся в условиях атмосферного давления, сформированные по данным из базы «ИНФОРЕКС».

№ п/п	Парагенезисы	Число эксп-тов
1	Основной-ультраосновной расплав–шпинель	272
2	Основной-ультраосновной расплав–оливин	1033
3	Основной-ультраосновной расплав–ортопироксен	153
4	Основной-ультраосновной расплав–клинопироксен	528
5	Основной-ультраосновной расплав–плагиоклаз	777
6	Основной-ультраосновной расплав–шпинель–оливин	127
7	Основной-ультраосновной расплав–оливин–ортопироксен	54
8	Основной-ультраосновной расплав–оливин–клинопироксен	402
9	Основной-ультраосновной расплав–оливин–плагиоклаз	546
10	Основной-ультраосновной расплав–клинопироксен–плагиоклаз	399
11	Основной-ультраосновной расплав–оливин–клинопироксен–плагиоклаз	317

Кроме перечисленных в таблице 1 выборок в условиях атмосферного давления были дополнительно сформированы еще 2 выборки: для демонстрации особенностей содержаний двух- и трехвалентных форм железа в расплаве – 1687 экспериментов; для демонстрации равновесного соотношения элементов в расплаве, равновесного с кристаллической фазой (весь набор вариантов из числа вышеперечисленных минералов) – 1784 эксперимента.

Для условий повышенного давления (до 175 кб) был сформирован ряд выборок, представленных парагенезисами, указанными в таблице 2.М.

Таблица. 2.М. Выборки парагенезисов, образовавшихся в условиях повышенного давления, сформированные по данным из базы «ИНФОРЕКС».

№ п/п	Парагенезисы	Число эксп-тов
1	Основной-ультраосновной расплав–шпинель	221
2	Основной-ультраосновной расплав–оливин	756
3	Основной-ультраосновной расплав–ортопироксен	522
4	Основной-ультраосновной расплав–клинопироксен	552
5	Основной-ультраосновной расплав–плагиоклаз	259
6	Основной-ультраосновной расплав–шпинель–оливин	167
7	Основной-ультраосновной расплав–шпинель–ортопироксен	159
8	Основной-ультраосновной расплав–шпинель–клинопироксен	162
9	Основной-ультраосновной расплав–оливин–ортопироксен	369
10	Основной-ультраосновной расплав–оливин–клинопироксен	346
11	Основной-ультраосновной расплав–оливин–плагиоклаз	99
12	Основной-ультраосновной расплав–ортопироксен–клинопироксен	246
13	Основной-ультраосновной расплав–клинопироксен–плагиоклаз	138
14	Основной-ультраосновной расплав–оливин–ортопироксен–клинопироксен	214

Кроме указанных в таблице 2.М выборок была сформирована объединенная выборка вулканических стекол, равновесных с кристаллической фазой (весь набор вариантов из перечисленных в таблице минералов) в условиях повышенного давления – 1434 эксперимента.

Число возможных сочетаний парагенезисов расплав–минералы в каждой из групп выборок больше числа указанных в таблицах вариантов парагенезисов как для случая атмосферного давления, так и для условий повышенного давления (см. главу III). Из дальнейшей обработки были исключены выборки, содержащие менее 100 экспериментов для получения более достоверных оценок с использованием критерия Пирсона в связи с его зависимостью от числа степеней свободы [10]. Исключение составили выборка расплав–оливин–ортопироксен (атмосферное давление) для сравнения с подобной ей при повышенном давлении; выборка расплав–оливин–плаггиоклаз (повышенное давление) для сравнения с подобной ей при атмосферном давлении.

Обработка выбранных анализов

С целью создания уравнений для расчетов фугитивности кислорода на основе системы расплав–шпинель и определения величины $K_D Fe^{2+}/Mg$ отношения в системе расплав–оливин в составах стекол из выборок, сформированных по экспериментам в условиях атмосферного давления, были рассчитаны содержания Fe^{2+} и Fe^{3+} в расплаве (стекле). Для расчетов было использовано эмпирическое уравнение А.А. Борисова и А.И. Шапкина [3], связующее содержания разновалентных форм железа в расплаве с его составом, величиной фугитивности кислорода и температуры. Выбор этого уравнения был продиктован наилучшими результатами тестирования в сравнении с различными существующими уравнениями [9]. В стеклах, образовавшихся в экспериментах при повышенных давлениях, все железо в расплаве считалось двухвалентным. Это допущение основано на том, что во многих случаях высокобарические эксперименты проводились в сильно восстановительных условиях – в графитовых контейнерах.

Далее составы фаз в виде окисных весовых % для обеих групп выборок были пересчитаны на атомные количества и нормированы на 100 % без кислорода. Это позволяет отчасти избежать искажения коэффициента корреляции при поисках зависимостей между процентными величинами [11] для случая поисков зависимостей содержаний элементов в самих расплавах и поисков зависимостей содержаний элементов в шпинели и клинопироксене (см. главы I; II). Результаты составов фаз в виде атомных % были использованы нами для дальнейших расчетов.

Методика расчетов уравнений

Как указывалось выше, в случае эмпирического подхода используются 2 способа расчетов уравнений (например, геотермометров для системы расплав–минерал): или на основе температурной зависимости коэффициента распределения, или температурной зависимости константы равновесия кристаллизации. Эти получаемые статистические зависимости, с помощью метода наименьших квадратов, вполне удовлетворительно описываются уравнением вида $y = kx + b$ [1]. Нашей задачей было по **максимальному числу экспериментальных данных** создать **уравнения**, связующие температуры, давления, фугитивности кислорода, содержания элементов в расплаве с составами (атомные %) минеральных фаз, равновесных с этим расплавом (с учетом интенсивных параметров системы), **имеющие максимальные значения коэффициента корреляции и минимальную среднеквадратичную ошибку**. В качестве вида корреляционной связи искомой величины с составами минералов расплава, температурой и давлением, было выбрано уравнение вида $y = kx + b$. Выбор вида основывался на том, что многие геотермометры и барометры удовлетворительно описываются подобными уравнениями. Представление статистической зависимости в таком виде позволяет наиболее просто аппроксимировать прямую с помощью метода наименьших квадратов [12; 14], подбирая как влияющие величины, так и численные их значения. Искомой величиной (**y**) в этом уравнении может быть температура, давление, фугитивность кислорода (для случая атмосферного давления), концентрация элемента в расплаве, концентрация элемента в одной

из фаз равновесного парагенезиса и т. д. В случае термодинамического подхода при расчете подобных уравнений используется зависимость константы равновесия химической реакции от величины свободной энергии Гиббса, учитывающей накладываемые в этом случае термодинамические связи, так как она состоит из 3 составляющих: тепловой, барической и смешения. Эти же составляющие в виде концентраций элементов в минерале (влияние нестехиометрии, изоморфизма) и равновесном расплаве (влияние его состава и строения), температуры и давления учитывались в созданных нами уравнений в виде независимой величины (x), представленной полиномом.

Независимая величина (x) представляет собой алгебраический многочлен вида $(a_1z_1 \pm a_2z_2 \dots \pm a_jz_j \pm a_1'z_1' \pm a_2'z_2' \pm a_j'z_j' \pm a_jP \pm a_jT)$, где z_j, z_j' – концентрация элемента в минерале или расплаве, a_j, a_j' – численные коэффициенты. В ряде случаев для улучшения зависимости отдельные члены в полиноме или сам полином переводились в различные степенные формы (логарифм, экспонента). Задачами было – добиться линейности, максимальных значений коэффициента корреляции и минимальных значений среднеквадратичной ошибки. В ряде случаев при повышенном давлении (расплав–шпинель; расплав–оливин) не удалось одним уравнением описать весь массив данных. Поэтому используемые данные в этих выборках были разбиты на 2 группы, каждая из которых описывается собственным уравнением. Аппроксимация зависимости методом наименьших квадратов в случае криволинейных зависимостей может приводить к уравнениям, по которым вычислить коэффициенты ($y = kx + b$) крайне сложно, поэтому мы во всех случаях стремились преобразовать нелинейную связь в линейное соотношение, к которому можно применить способ аппроксимации методом наименьших квадратов.

При расчете уравнений одним из условий является использование для расчетов экспериментальных данных, в которых было достигнуто термодинамическое равновесие.

В качестве критерия равновесности системы расплав–минерал выступает продолжительность эксперимента [1]. Это условие хорошо проявляется на соотношении качества данных, полученных как при атмосферном, так и при повышенном давлении [1]. Для отдельного учета влияния условий экспериментов нами отдельно рассчитывались зависимости для экспериментов в условиях атмосферного и повышенного давления. В качестве критерия равновесности–неравновесности в том и другом случае использовалась величина 3 сигмы (трехкратная величина среднеквадратичной ошибки). Если результат эксперимента выбивается из общего ряда на эту величину, его можно признать «плохим» [12], не относящимся к данной совокупности (в нашем случае объем каждой используемой совокупности 100 и более точек), и считать **неравновесным**. Для этого расчеты статистических характеристик полученных зависимостей проводились 2 раза. После 1-го раза отбрасывались эксперименты, в которых рассчитанная величина и реальное значение этой величины в эксперименте различалось более чем на 3 значения среднеквадратичной ошибки. Основанием для этого отбрасывания является критерий Шовене [12]. Обычно число отброшенных данных лежит в пределах нескольких процентов. В числе статистических характеристик, указываемых для каждой из полученных формул (см. главы 1 и 2), приводится как число первоначальных данных (N_1), так и число использованных для расчета, оставшихся после отбрасывания неравновесных экспериментов (N_2). После этого расчеты повторялись вновь. Для каждой из полученных формул приводятся полученные статистические характеристики – коэффициент корреляции (R), величина среднеквадратичной ошибки (сигма), критерий Пирсона (χ^2) и еще некоторые характеристики. Критерий Пирсона служит дополнительной проверкой на равновесность, т. к. он позволяет судить о нормальности распределения среднеквадратичной ошибки. Те формулы, где величина этого критерия превышает критическое значение для вероятности 0.1 (90 %), мы поместили в разряд оценочных – расчеты по которым можно использовать только как приблизительную оценку (см. главу III). Использование критерия Пирсона было выбрано на основании того, что критерий Колмогорова по Е.С. Вентцелю [4] является менее строгим.

Полученные уравнения

В результате обработки экспериментальных данных, сгруппированных по указанным выше (см. таблицы 1.М и 2.М) парагенезисам было получено **~240 уравнений** для равновесных парагенезисов в условиях атмосферного давления и **~360 уравнений** для равновесных парагенезисов в условиях повышенного давления (до 175 кб). В эти количества включены и уравнения, связывающие содержания элементов в собственно равновесных расплавах и в составах равновесных кристаллов шпинели и авгита, соотношения разновалентных ионов в кристаллах, позволяющие дополнительно судить как о равновесности состава самого минерала, так и его равновесности с расплавом. Эти уравнения в аналитическом и графическом видах представлены в главе I (условия атмосферного давления) и главе II (условия повышенного давления до 175 кб). Каждое уравнение характеризуется рядом статистических параметров: коэффициентом корреляции (R), величиной среднеквадратичной ошибки (сигма), критерием Пирсона (χ^2), диапазоном содержаний искомой величины, величиной относительной ошибки в процентах, числом первоначально использованных экспериментов и числом оставшихся экспериментов после отбрасывания по критерию Шовене. Кроме того, для каждого парагенезиса в табличном виде представлены диапазоны составов фаз и на диаграмме TAS показаны составы стекол – расплавов, равновесных с данными минеральными фазами.

Традиционными среди полученных уравнений являются уравнения для расчетов численных значений величин температуры, давления и фугитивности кислорода в условиях атмосферного давления. Они отличаются от подобных уравнений, полученных как с использованием термодинамического, так и эмпирического подходов, **универсальностью** (максимально широкие диапазоны составов расплавов (стекол), минеральных фаз и P–T условий), так как для их расчетов было использовано максимально возможное число экспериментов. Кроме того, они имеют **наилучшие статистические характеристики** среди **подобных** уравнений, **наиболее используемых** для расчетов этих величин. Основанием для этого утверждения являются результаты тестирования наиболее известных и часто используемых для расчетов уравнений (см. главу III). Среднеквадратичная ошибка получаемых значений температуры в условиях атмосферного давления лежат в окрестностях 20 °С; в условиях повышенного давления – в окрестностях 25–40 °С. Среднеквадратичная ошибка расчетных значений давления лежит в окрестностях 2–3 кб. Кроме расчетов величин температуры и давления по составам парагенезисов расплав–минерал(ы) была создана еще группа уравнений для расчетов интенсивных параметров по составу самого равновесного расплава, часть из которых по своим статистическим характеристикам пригодна для расчетов численных значений этих параметров. Аналогичные уравнения, например геотермометры Ф. Альбаредо и Т. Сугувары [15; 19], были протестированы и показали более худшие результаты (см. главу III).

Проблема **несогласованности** различных геотермометров и геобарометров неоднократно обсуждалась в геологической литературе [1; 7 и др.]. Эта несогласованность отчетливо проявилась и по результатам тестирования (см. главу III). В числе причин называются: качество термометрических характеристик, аналитические ошибки, выборочность данных и т. д. Одним из способов преодоления этих расхождений при создании инструментов – уравнений, наряду с повышением качества термометрических и аналитических данных, является **использование по возможности максимального числа экспериментальных данных** с учетом их качества. В нашем случае это позволило создать наиболее **универсальные** (с точки зрения охвата составов фаз и интенсивных параметров) уравнения, точность расчетов по которым сопоставима, а во многих случаях и выше, чем по подобным уравнениям. Что и продемонстрировали результаты тестирования уравнений, созданных различными авторами, как на основе термодинамического, так и эмпирического подходов.

Нетрадиционными и не имеющими аналогов в настоящее время являются 2 группы созданных нами уравнений.

Первой является группа уравнений, позволяющих **рассчитывать содержания элементов в расплаве**. Используя составы равновесных фаз с учетом значений интенсивных параметров, была создана большая группа уравнений, позволяющих рассчитывать содержания порообразующих элементов (включая хром) в расплаве, равновесном с данным парагенезисом. Кроме того, аналогичные расчеты можно выполнять и для некоторых порообразующих элементов по составу самого равновесного расплава, что служит дополнительными критериями его равновесности с данным минеральным парагенезисом. Также как и в уравнениях для расчетов температуры и давления, для каждого уравнения этого типа приводятся его статистические характеристики, диапазон рассчитываемой величины относительной ошибки. Точность получаемых содержаний элементов в расплаве лежит в окрестностях от 2–3 до 50–60 относительных процентов, хотя, например, для титана, марганца и хрома, относительная ошибка может составлять 1000 % и более. Для наглядной демонстрации приемлемости получаемых результатов в главе III представлены графики полей реальных содержаний железа и магния в расплаве и наложенные на них поля расчетных содержаний железа и магния в расплаве для парагенезисов расплав–шпинель, расплав–оливин, расплав–клинопироксен, расплав–шпинель–оливин, расплав–оливин–клинопироксен, расплав–оливин–ортопироксен–клинопироксен.

Полученные уравнения могут быть использованы для корректировки составов расплавных включений в порообразующих минералах. В настоящее время это возможно только для расплавных включений в оливине с использованием величины $K_D\text{Fe-Mg}$ расплав–оливин.

Имеющиеся единичные уравнения, например, для расчета содержания кальция в расплаве, также были протестированы (см. главу III).

Несмотря на то, что при петрологических исследованиях природных магматических минеральных или расплавно–минеральных парагенезисов главный упор делается именно на **предполагаемую равновесность** этих парагенезисов, нет четких методов и аргументов в виде инструментов – уравнений, удостоверяющих это предположение, за исключением $K_D\text{Fe-Mg}$ расплав–оливин, который требует уточнения (см. главу III). Вторая группа уравнений предназначена именно для выяснения вопроса – **является ли данный природный парагенезис равновесным с расплавом**. Эти уравнения были созданы с использованием **составов равновесных минеральных парагенезисов** и позволяют после расчетов по ним полагать, что минералы, входящие в данный природный парагенезис **равновесны между собой и одновременно равновесны с расплавом**, или высказать противоположное мнение. Каждое из этих уравнение характеризуется вышеуказанным набором статистических характеристик. Как правило, создано несколько уравнений для каждого минерального парагенезиса с разными наборами элементов. Это продиктовано следующими обстоятельствами. Если не принимать пока во внимание переуравновешивание при метаморфических процессах, то основной причиной разбалансировки составов будет переуравновешивание в солидусных условиях или при повторном нагреве для данного минерального парагенезиса. Диффузионная подвижность разных элементов в решетках минералов различна, поэтому могут быть случаи, когда результаты расчетов по разным уравнениям будут различны (см. главу IV). Одним из условий подобных переуравновешиваний является общая фазовая граница. Аналогичные переуравновешивания могут происходить и с составами расплавных включений из переуравновешенных минералов, контактирующих между собой (например, включение одного минерала в другой и оба содержат расплавные включения, см. главу IV).

Наряду с указанными выше уравнениями созданы еще 2 разновидности уравнений для выявления равновесности–неравновесности: это группа уравнений для составов расплавов, равновесных с тем или иным природным минеральным парагенезисом и уравнения, связывающие соотношения разновалентных форм элементов в составах шпинели и авгита (см. главы I и II). Эти «внутренние» зависимости, ранее неизвестные, в составах этих минералов требуют дальнейшего изучения и понимания. Но эти уравнения также могут быть использо-

ваны для усиления тезиса или антитезиса, полученных на основании исследований минерального парагенезиса, расплава другими уравнениями.

Для зависимостей состав–температура, давление, состав в различных парагенезисах создано по несколько уравнений. Например, для расчета температуры в системе расплав–оливин в условиях атмосферного давления может быть использовано 6 уравнений. Вычисления содержания магния в расплаве в системе расплав–оливин–клинопироксен в условиях повышенного давления можно проводить с помощью 3 уравнений и т. д. Эти уравнения для расчета одной и той же величины отличаются друг от друга набором и числом членов в каждом из уравнений и могут, в свою очередь, быть использованы для проверки предположения о равновесности как между фазами, так и отдельных фаз. Расхождения в расчетах по группе таких уравнений также могут быть использованы для понимания условий формирования того или иного парагенезиса. Примером могут служить расчеты равновесной температуры для меймечитовой магмы, указавшие на присутствие части железа в расплаве в трехвалентной форме и позволившие рассчитать фугитивность кислорода (см. главу IV).

Список литературы

1. *Арискин А.А., Бармина Г.С.* Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: Наука, 2000. 362 с.
2. *Бобров А.В., Литвин Ю.А.* Перидотит–эклогит–карбонатитовые системы при 7.0–8.5 ГПа: Концентрационный барьер нуклеации алмаза и сингенезис его силикатных и карбонатных включений // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 12. С. 1571–1587.
3. *Борисов А.А., Шапкин А.И.* Новое эмпирическое уравнение зависимости отношения Fe^{3+}/Fe^{2+} в природных расплавах от их состава, летучести кислорода и температуры // Геохимия. 1989. № 6. С. 892–897.
4. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
5. Граменицкий Е.Н., Котельников А.Р., Батанова А.М., Щекина Т.И., Плечов П.Ю. Экспериментальная и техническая петрология. М.: из-во Научный мир, 2000. 416 с.
6. *Литасов К.Д., Шацкий А.Ф., Похиленко Н.П.* Фазовые соотношения и плавление в системах перидотит– H_2O – CO_2 и эклогит– H_2O – CO_2 при давлениях до 27 ГПа // ДАН. 2011. Т. 437. № 5. С. 669–674.
7. *Муравьева Н.С.* Оценка температур кристаллизации эффузивов (анализ и применение геотермометров к породам риолит–базальтовой ассоциации Исландии) // Геохимия. 1979. № 12. С. 1796–1810.
8. *Никитина Л.П.* Согласованная система термометров и барометров для основных и ультраосновных пород и реконструкция термальных режимов в мантии по ксенолитам в кимберлитах // ЗВМО. 1993. Т. 122. № 5. С. 6–19.
9. *Николаев Г.С., Борисов А.А., Арискин А.А.* Расчет соотношения Fe^{3+}/Fe^{2+} в магматических расплавах: тестирование и дополнительная калибровка эмпирических уравнений для различных петрохимических серий // Геохимия. 1996. № 8. С. 713–722.
10. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. Ленинград. Атомиздат, 1991. 304 с.
11. *Сарманов О.В., Вистелиус А.В.* О корреляции между процентными величинами // ДАН СССР. 1959. Т. 126. № 1. С. 22–25.
12. *Тейлор Дж.* Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985. 272 с.
13. *Федоров И.И., Чепурнов А.И., Сонин В.М., Чепурнов А.А., Логвинова А.М.* Экспериментальное и термодинамическое изучение кристаллизации алмаза и силикатов в металл–силикатно–углеродной системе // Геохимия. 2008. № 4. С. 376–386.
14. *Шиллинг Г.* Статистическая физика в примерах. М.: Мир, 1976. 431 с.
15. *Albarede F.* How deep do common basaltic magmas form and differentiate? // Journal of geophysical research. 1992. Vol. 97, N B7. P. 10997–11009.

16. *Girnis A.V., Bulatov V.K., Brey G.P.* Formation of primary kimberlite melt–constraints from experiment at 6–12GPa and variable CO₂/H₂O // *Lithos*. 2011. Vol. 127. P. 401–413.
17. *Hirose K.* Phase transitions in pyrolitic mantle around 670 km depth: implication for upwelling of plumes from lower mantle // *J. of Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, N B4. P. ecv. 3–1 – 3–12.
18. *Kesnav S., Gudfinnsson G.H., Presnall D.C.* Melting phase relations of simplified carbonated peridotite at 12–26 GPa in the systems CaO–Al₂O₃–SiO₂–CO₂: highly calcic magmas in the transition zone of the Earth // *Journal of Petrology*. 2011. Vol. 52, N. 11. P. 2265–2291.
19. *Sugawara T.* Empirical relationship between temperature, pressure, and MgO content in olivine and pyroxene saturated liquid // *Journal of geophysical research*. 2000. Vol. 105, N B4. P. 8457–8472.
20. *Tenner T.J., Hirschmann M.M., Withers A.C., Ardia P.* H₂O storage capacity of olivine and low-Ca pyroxene from 10 to 13 GPa: consequences for dehydration melting above the transition zone // *Contrib Mineral Petrol*. 2011. In press.

Часть I

**Уравнения, полученные по экспериментальным
результатам при атмосферном давлении**

Для идентификации полученных формул была использована следующая нумерация: Si – 1 (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l), Ti – 2, Al – 3, Fe³⁺ – 4, Fe²⁺ – 5, Mn – 6, Mg – 7, Ca – 8, Na – 9, K – 10, Cr – 11, sFe – 12, sAl – 13, Fe²⁺:Mg – 14, (сумма Fe):Mg – 15, Fe³⁺:Fe²⁺ – 16, K:Na – 17, T (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k), фугитивность f (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k), P (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k), R (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k) – формулы, описывающие равновесие внутри кристаллов при условии равновесия с расплавом и равновесие кристалл–расплав, равновесие кристалл–кристалл, находящихся в равновесии с расплавом. Нарушение в порядке следования в номерах формул связано с тем, что некоторые из созданных формул не вошли в текст.

Глава 1. Уравнения, полученные по системе расплав–минерал

В каждой выборке присутствует одна из следующих минеральных разностей: группы шпинелей, группы оливина, подгруппы ортопироксена, подгруппы клинопироксена (авгит), подгруппы плагиоклаза. В экспериментальных же результатах, служивших основой для этих выборок, в равновесии с указанным минералом могут присутствовать (или отсутствовать) и иные минеральные фазы, число которых может колебаться от 0 до 6 фаз.

1.1. Система расплав–шпинель

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [6; 12; 17; 18; 22; 28; 30; 31; 61; 73; 74; 75; 76; 77; 80; 81; 93; 97; 165; 171; 172; 189; 190; 194; 197; 333; 345].

Используемые данные: общее число точек (т.) – 324 парных анализа. После исключения анализов составов шпинелей и стекол с суммами окислов менее 98 % и более 102 % – 309 т. После исключения анализов, где отсутствовало железо в расплаве – 300 т. После исключения анализов составов шпинелей с содержаниями алюминия >50 % – 282 т. После удаления анализов с содержаниями в кристаллах шпинели хрома < 1 % – 272 т. Для расчетов зависимости титана в расплаве были отброшены точки со значениями менее 0.02 атомного процента в расплаве – 260 т. Для расчета содержания железа трехвалентного были использованы эксперименты с содержаниями его от 0.1 % и выше – 238 т. Для расчета содержаний хрома в расплаве были использованы расплавы с содержаниями > 0.01 % хрома и ненулевыми содержаниями хрома и железа трехвалентного в кристаллах шпинели – 227 т. Для расчета щелочности расплава (суммы щелочей) были отброшены экспериментальные точки, где значения суммы щелочей в расплаве равны

Таблица I.I.1.1 ср. Диапазоны составов стекол (расплавов) и шпинелей в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

<i>GSP</i>	Стекло	T °C	1111–1500	Шпинель		Mg#	16.77–82.26
SiO ₂	35.2–61.48	Si	35.2–58.52	SiO ₂	0.01–2.04	Si	0.01–2.1
TiO ₂	0.01–15	Ti	0.01–11.32	TiO ₂	0.01–26.6	Ti	0.01–22.51
Al ₂ O ₃	4.04–20.52	Al	4.7–21.86	Al ₂ O ₃	4.24–45.63	Al	5.96–49.51
FeO	3.46–23.92	Fe	2.71–20.31	FeO	6.95–59.76	Fe	6.01–55.82
MnO	0.04–0.85	Mn	0.03–0.71	MnO	0.04–0.54	Mn	0.03–0.52
MgO	2.74–25.6	Mg	3.68–33.2	MgO	4.02–20.58	Mg	6.89–29.7
CaO	5.56–15.38	Ca	5.48–15.95	CaO	0.04–0.89	Ca	0.05–0.97
Na ₂ O	0.05–6.38	Na	0.1–11.15	Na ₂ O	0.01–0.06	Na	0.02–0.11
K ₂ O	0.04–6.6	K	0.05–7.74	K ₂ O	0.01–0.06	K	0.01–0.08
Cr ₂ O ₃	0.01–1.43	Cr	0.01–1.08	Cr ₂ O ₃	1.85–60.09	Cr	1.66–50.31

нулю – 253 т. Для расчетов значений фугитивности и отношения разновалентных форм железа были использованы значения в диапазоне от 13.5 до 3.1 (238 т.). Для расчета соотношений элементов внутри кристаллов шпинели, равновесных с расплавом, были использованы эксперименты с содержаниями титана в кристаллах > 0.11 % (атом.) – 254 т.

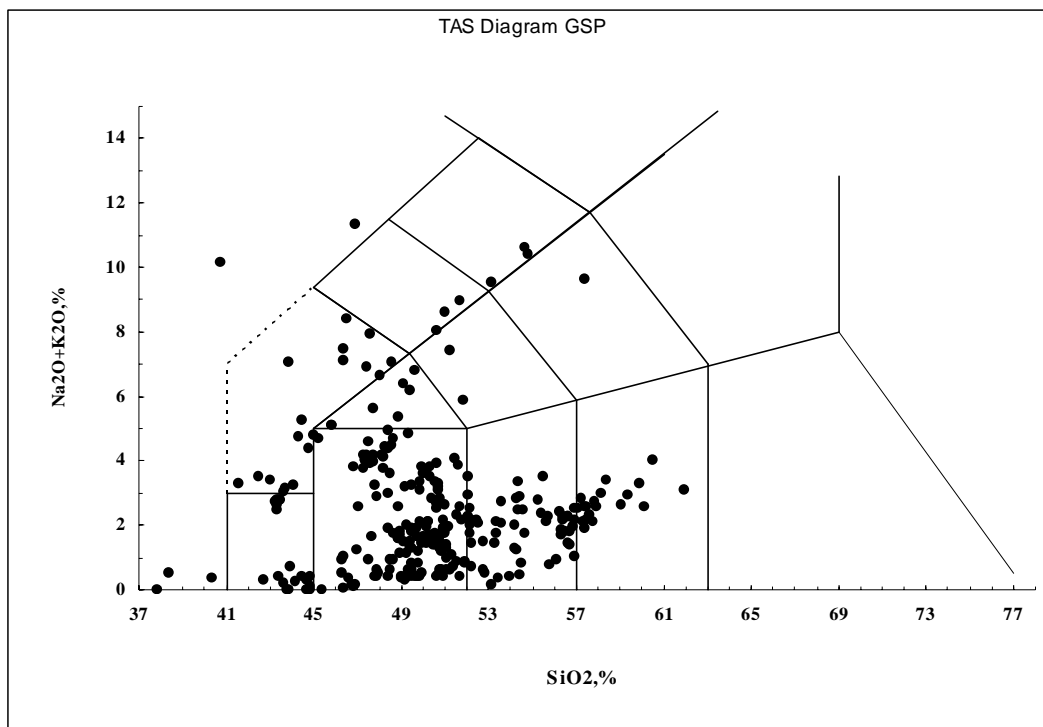


Рис. I.I.1.1 sp. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами шпинели, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчеты содержаний титана в расплаве

$$K_1 = (Ti/Fe^{2+})_{sp}$$

$$Ti_m = 13.91K_1 + 0.2(GSP2a)$$

Диапазон содержаний Ti 0.02–7.7 (атом. %)

Относительная ошибка 2200–6 %

$R = 0.92$; $N = 260$; $N_1 = 253$; $\sigma = 0.44$; $\chi^2 = 6.28$ (12)

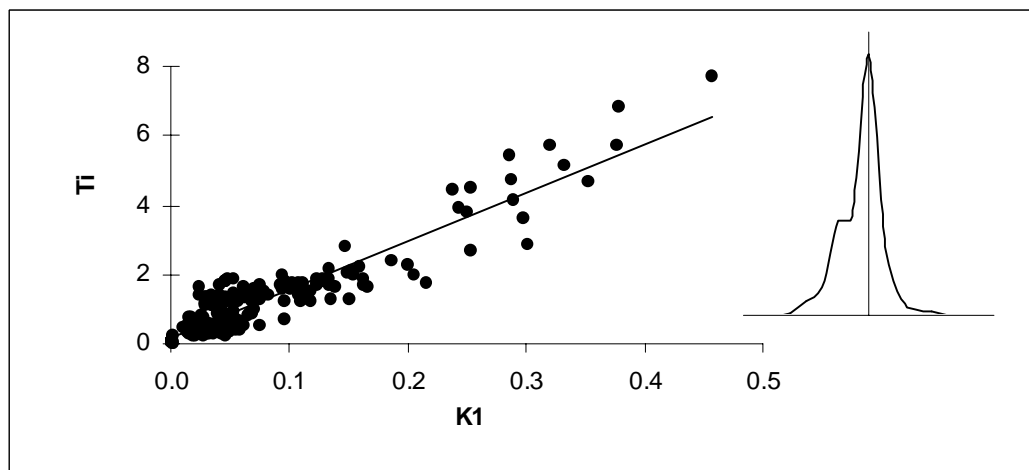


Рис. I.I.1.2 sp (формула **GSP2a**). Зависимость содержаний Ti_m от состава шпинели и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Ti_{sp}Mg_m:Fe^{2+}_{sp}$$

$$Ti_m = 1.08K_1 + 0.25(GSP2b)$$

Диапазон содержаний Ti 0.02–10.8 (атом. %)

Относительная ошибка 2750–5 %

R = 0.89; N = 260; N₁ = 256; сигма = 0.55; $\chi^2 = 1.34$ (12)

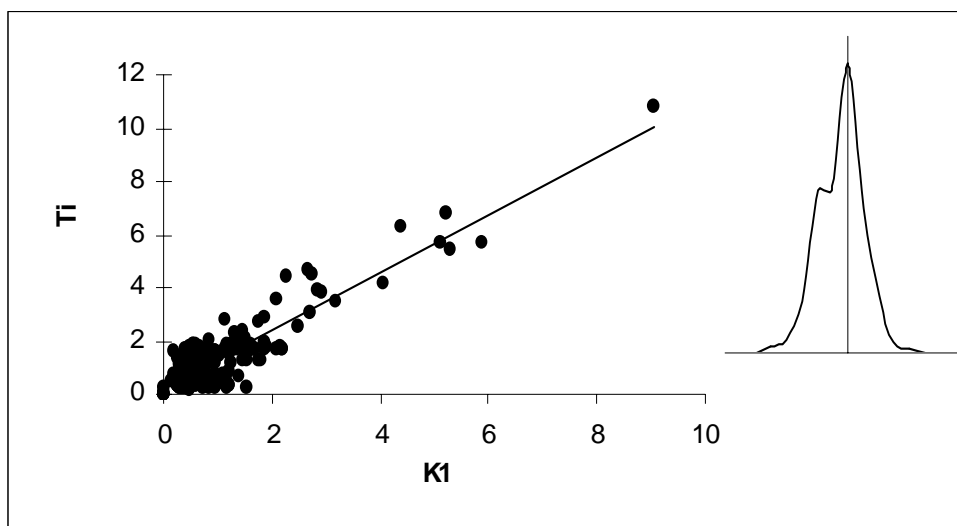


Рис. I.I.1.3 sp (формула GSP2b). Зависимость содержаний Ti_m от состава шпинели, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Ti_{sp}Ca_m:Fe^{2+}_{sp}$$

$$Ti_m = 1.08K_1 + 0.32(GSP2c)$$

Диапазон содержаний Ti 0.02–7.7 (атом. %)

Относительная ошибка 2750–5 %

R = 0.93; N = 260; N₁ = 256; сигма = 0.43; $\chi^2 = 5.02$ (12)

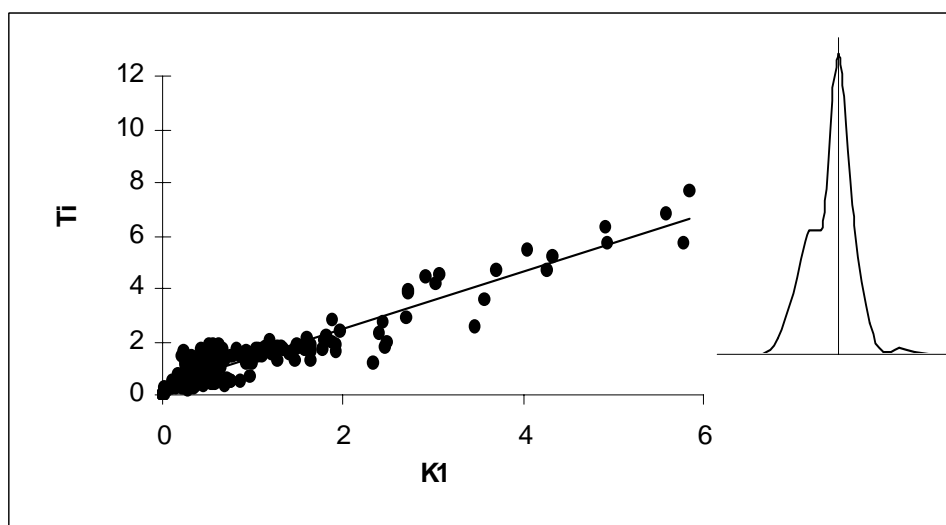


Рис. I.I.1.4 sp (формула GSP2c). Зависимость содержаний Ti_m от состава шпинели, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Ti_{sp}T:10Fe^{2+}_{sp}$$

$$Ti_m = 0,11K_1 + 0,18(GSP2d)$$

диапазон содержаний Ti 0.02–7.7 (атом. %)

Относительная ошибка 2150–6 %

$R = 0.91$; $N = 260$; $N_1 = 254$; $\sigma = 0.46$; $\chi^2 = 4.79$ (12)

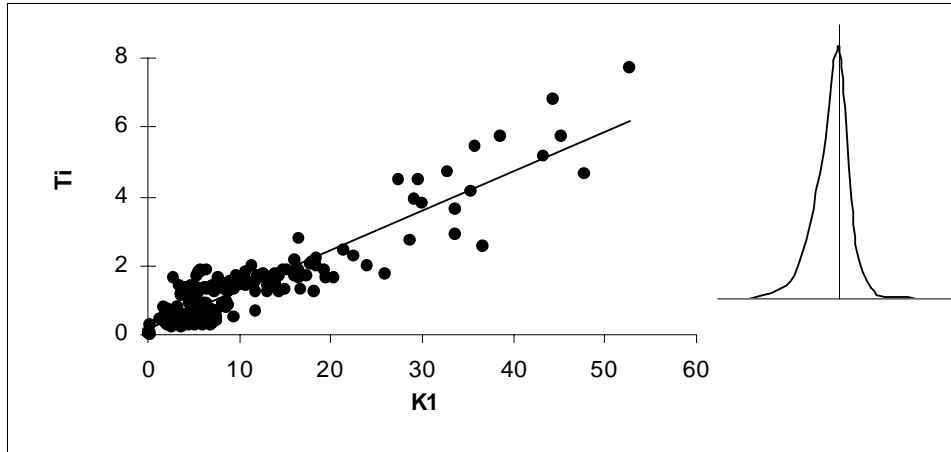


Рис. I.I.1.5 sp (формула GSP2d). Зависимость содержаний Ti_m от состава шпинели, температуры расплава и распределения среднеквадратичной ошибки.

Различия в значениях среднеквадратичного отклонения при расчетах по приведенным выше формулам лежат в интервале от 0.1 до 0.53 (меньше максимального GSP2b) и среднее арифметическое для них составляет 0.33.

Расчет содержания алюминия в расплаве

$$K_1 = Al_{sp}:Mg_m - (Fe^{2+}_m + Fe^{3+}_m):8$$

$$Al_m = 2.03K_1 + 13.78(GSP3a)$$

Диапазон содержаний Al 9–22 (атом. %)

Относительная ошибка 13–5 %

$R = 0.84$; $N = 272$; $N_1 = 268$; $\sigma = 1.2$; $\chi^2 = 1.7$ (12)

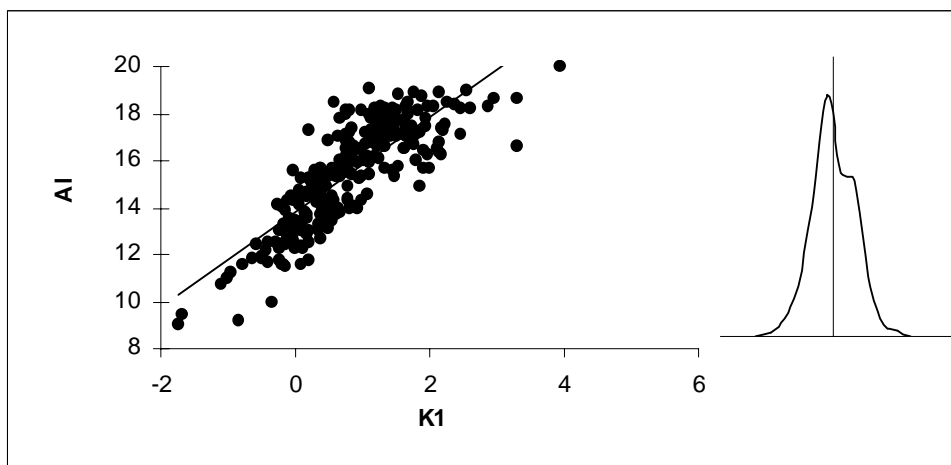


Рис. I.I.1.6 sp (формула GSP3a). Зависимость содержаний Al_m от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержания железа трехвалентного в расплаве

$$K_1 = 10Fe^{3+}_{sp} : Al_{sp} - Si_m : 15$$

$$Fe^{3+}_m = 0.17K_1 + 0.92(GSP4a)$$

Диапазон содержаний Fe^{3+} 0.1–4.5 (атом. %)

Относительная ошибка 320–7 %

$R = 0.86$; $N = 238$; $N_1 = 233$; сигма = 0.32; $\chi^2 = 4.1$ (12)

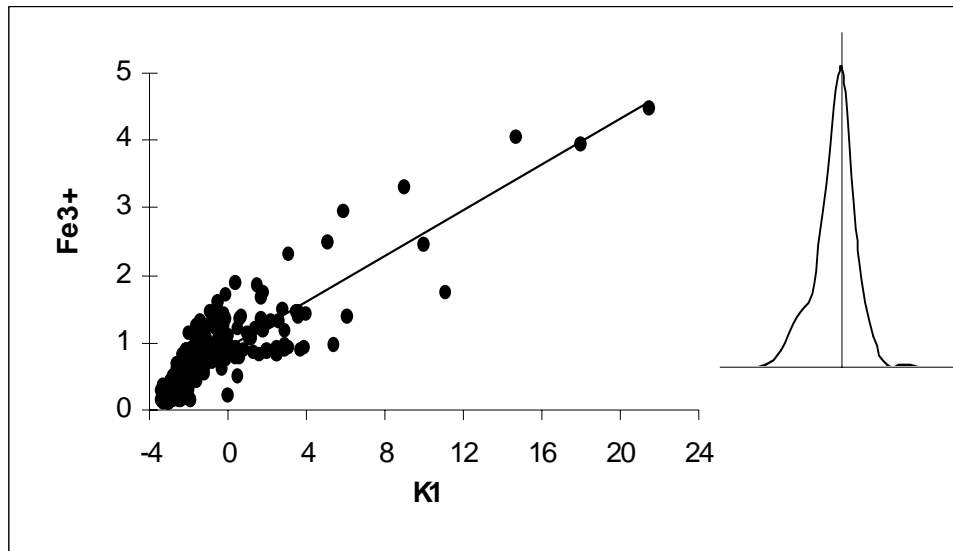


Рис. I.I.1.7 sp (формула GSP4a). Зависимость содержаний Fe^{3+}_m от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{3+}_{sp} + Na_m : 3 + T : 400$$

$$Fe^{3+}_m = 0.12K_1 - 0.24(GSP4b)$$

Диапазон содержаний Fe^{3+} 0.1–4.5 (атом. %)

Относительная ошибка 310–7 %

$R = 0.88$; $N = 238$; $N_1 = 235$; сигма = 0.31; $\chi^2 = 1.59$ (12)

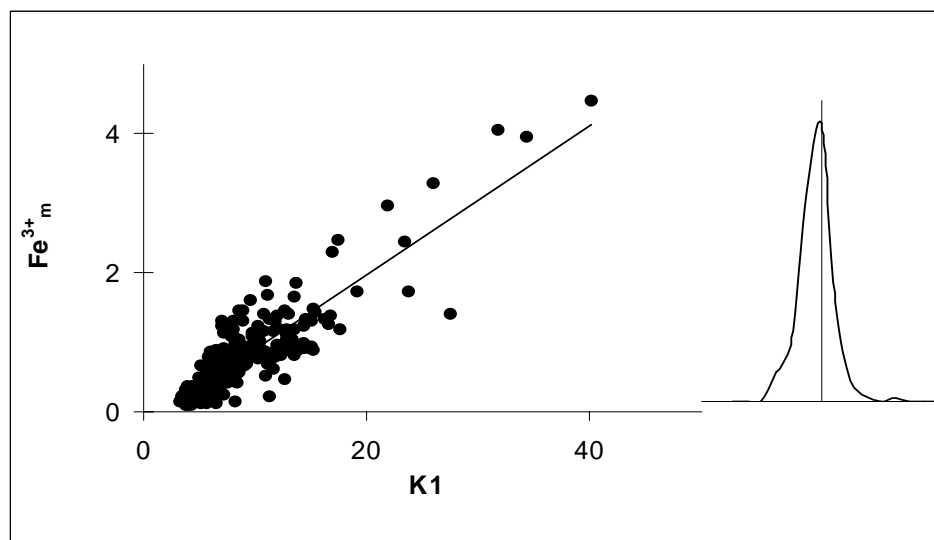


Рис. I.I.1.8 sp (формула GSP4b). Зависимость содержаний Fe^{3+}_m от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа двухвалентного в расплаве

$$K_1 = (Fe^{2+}/Mg)_{sp} - Al_m:10$$

$$Fe_m^{2+} = 3.67K_1 + 10.23(GSP5a)$$

Диапазон содержаний Fe^{2+} 1.92–20.3 (атом. %)

Относительная ошибка 75–7 %

$R = 0.9$; $N = 272$; $N_1 = 267$; сигма = 1.45; $\chi^2 = 1.18$ (12)

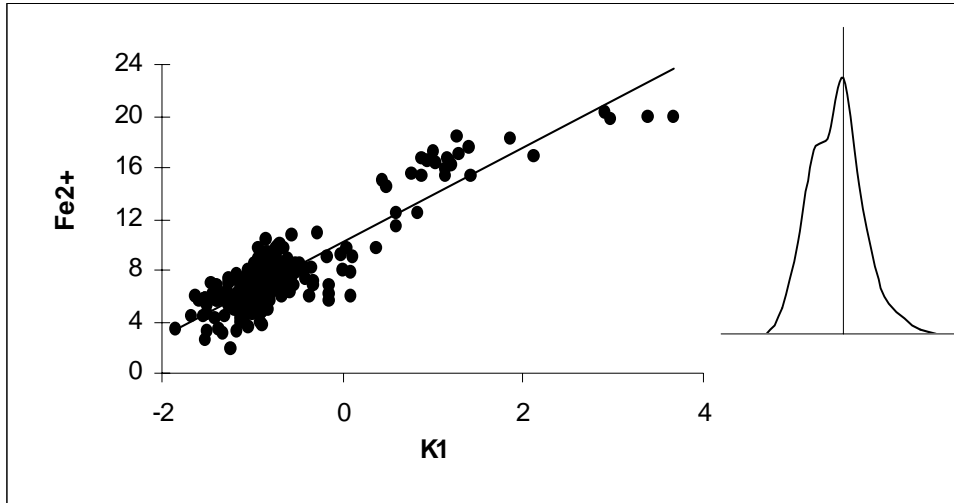


Рис. I.I.1.9 sp (формула GSP5a). Зависимость содержаний Fe_m^{2+} от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (Fe^{2+}/Mg)_{sp} - Si_m:20 - Al_m:10$$

$$Fe_m^{2+} = 3.61K_1 + 18.74(GSP5b)$$

Диапазон содержаний Fe^{2+} 1.92–20.3 (атом. %)

Относительная ошибка 71–7 %

$R = 0.91$; $N = 272$; $N_1 = 268$; сигма = 1.37; $\chi^2 = 1.34$ (12)

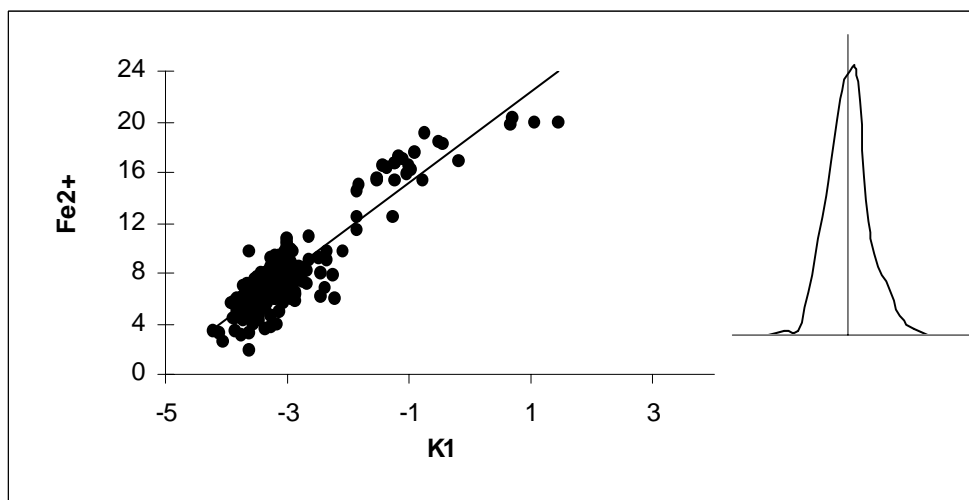


Рис. I.I.1.10 sp (формула GSP5b). Зависимость содержаний Fe_m^{2+} от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет сигма 0.59.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Mg_{sp}:Al_m$$

$$Mg_m = 11.05K_1 - 1.52(GSP7a)$$

Диапазон содержаний Mg 3.7–33.2 (атом. %)

Относительная ошибка 45–5 %

$R = 0.93$; $N = 272$; $N_1 = 270$; $\sigma = 1.68$; $\chi^2 = 0.81$ (12)

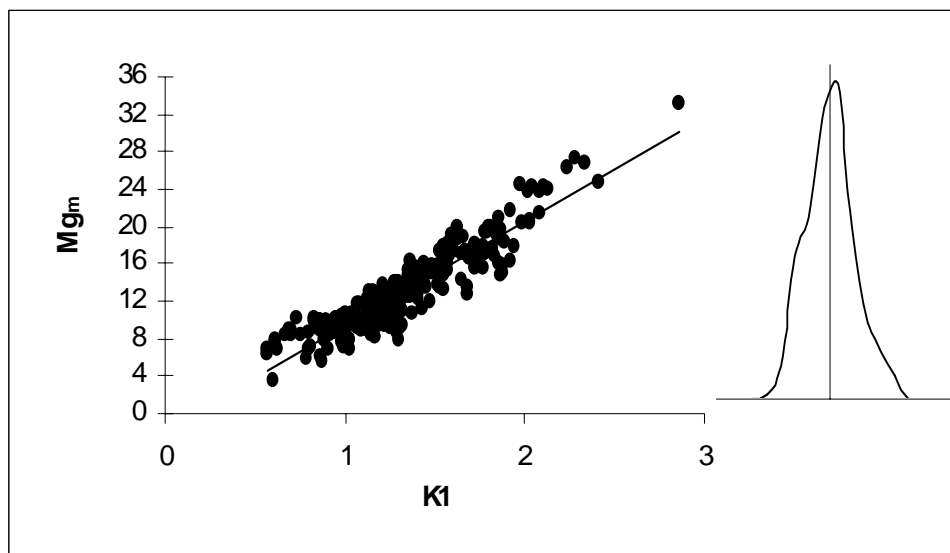


Рис. I.I.1.11 sp (формула GSP7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{sp}T:1000Al_m$$

$$Mg_m = 7.73K_1 + 0.15(GSP7b)$$

Диапазон содержаний Mg 3.7–33.2 (атом. %)

Относительная ошибка 38.6–4.3 %

$R = 0.95$; $N = 272$; $N_1 = 270$; $\sigma = 1.43$; $\chi^2 = 1.27$ (12)

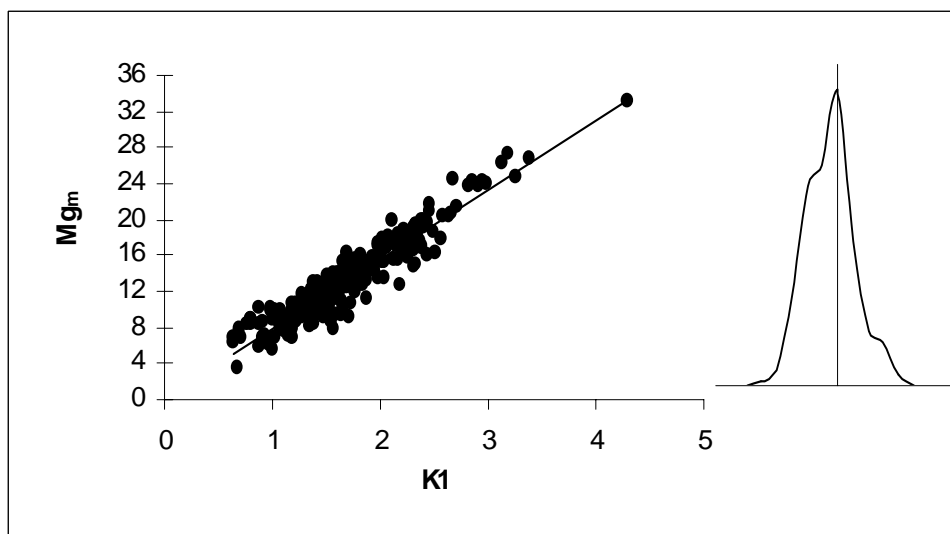


Рис. I.I.1.12 sp (формула GSP7b). Зависимость содержаний Mg_m от состава шпинели, температуры расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержания хрома в расплаве

$$K_1 = \text{Ln}(\text{Cr}_{\text{sp}} \text{Fe}^{3+}_{\text{sp}}) + \text{Al}_{\text{sp}}:8 + \text{Fe}^{2+}_{\text{sp}}:12 + (\text{K}_m + \text{Na}_m):6$$

$$\text{Cr}_m = 0.07K_1 + 0.75(\text{GSP11a})$$

Диапазон содержаний Cr 0.007–0.73 (атом. %)

Относительная ошибка 900–9 %

R = -0.82; N = 227; N₁ = 223; сигма = 0.064; $\chi^2 = 6.6$ (12)

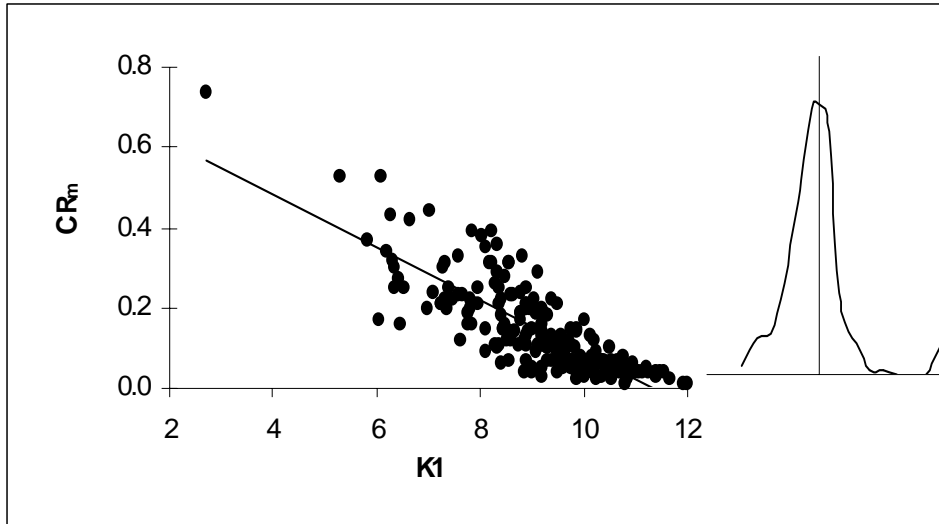


Рис. I.I.1.13 sp (формула GSP11a). Зависимость содержаний Cr_m от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет суммы щелочей в расплаве

$$K_1 = 12\text{Fe}^{3+}_{\text{sp}}:\text{Mg}_m + \text{Mg}_{\text{sp}}:3 + \text{Al}_m - \text{Mg}_m$$

$$(\text{Na}_m + \text{K}_m) = 0.18K_1 + 0.87(\text{GSP13a})$$

Диапазон содержаний (Na + K) 0.1–17 (атом. %)

Относительная ошибка 1600–10 %

R = 0.75; N = 263; N₁ = 258; сигма = 1.6; $\chi^2 = 2.19$ (12)

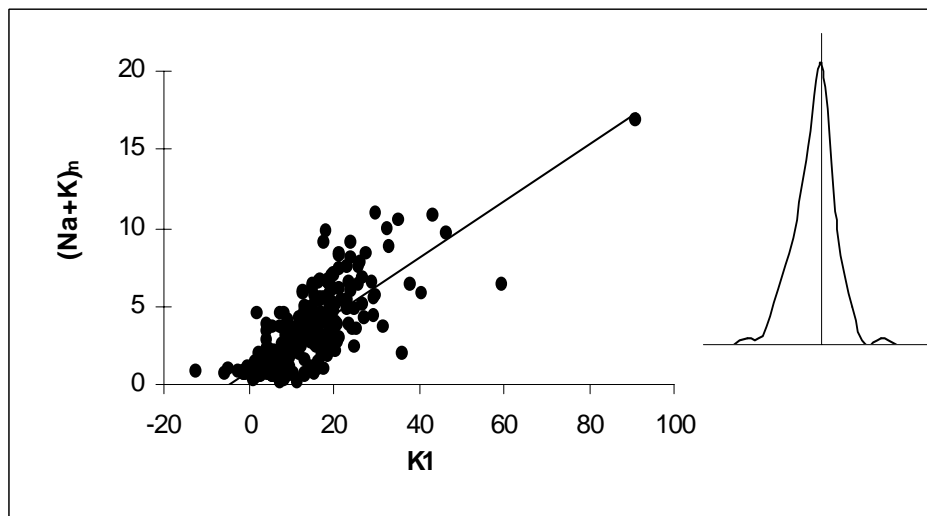


Рис. I.I.1.14 sp (формула GSP13a). Зависимость содержаний (Na_m + K_m) от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет Fe^{2+}/Mg отношения в расплаве

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{sp}}$$

$$(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}} = 0.61K_1 + 0.15(\text{GSP14a})$$

Диапазон значений $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})$ 0.16–3.1

Относительная ошибка 69–3.5 %

$R = 0.97$; $N = 272$; $N_1 = 267$; $\sigma = 0.11$; $\chi^2 = 4.55$ (12)

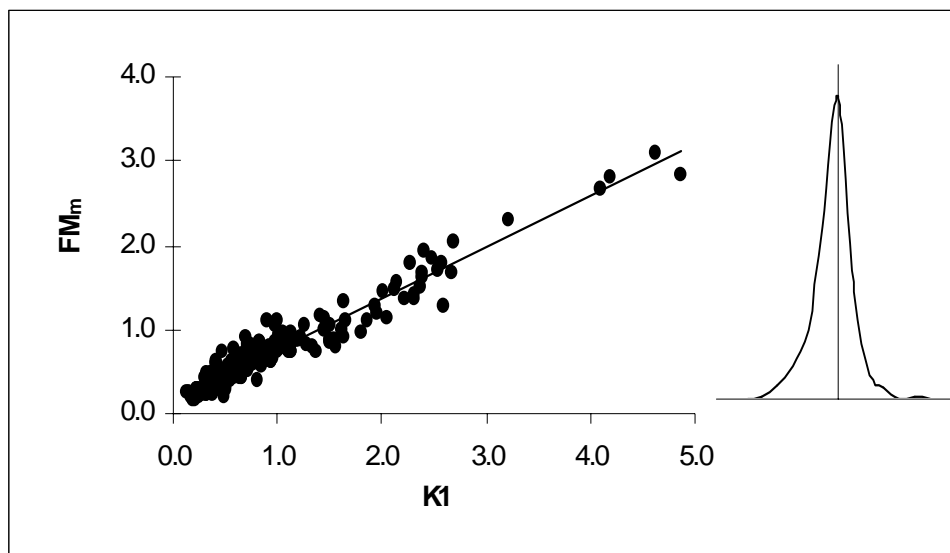


Рис. I.I.1.15 sp (формула GSP14a). Зависимость величины $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$ от состава шпинели и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}_{\text{sp}} - \text{Ti}_{\text{sp}}) : \text{Mg}_{\text{sp}}$$

$$(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}} = 0.74K_1 + 0.1(\text{GSP14b})$$

Диапазон значений $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})$ 0.16–3.1

Относительная ошибка 69–3.5 %

$R = 0.97$; $N = 272$; $N_1 = 266$; $\sigma = 0.11$; $\chi^2 = 3.51$ (12)

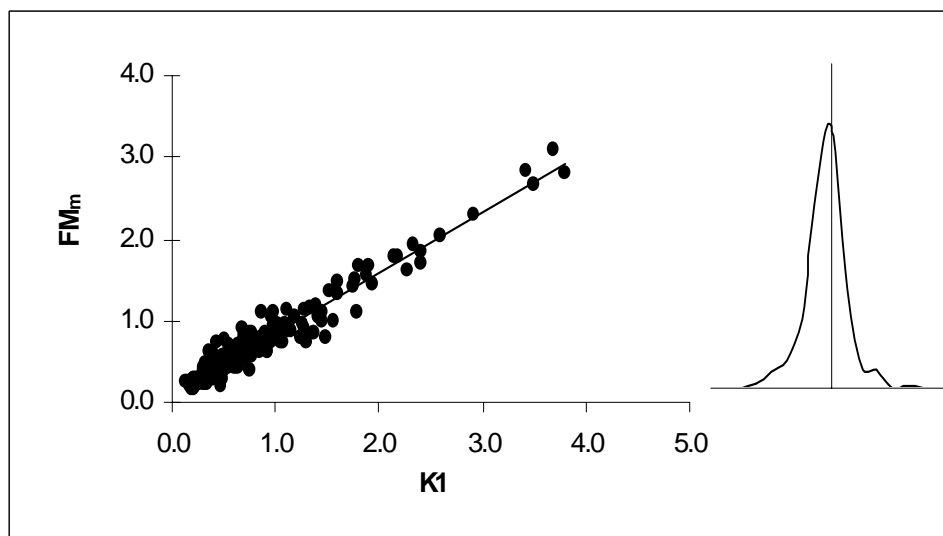


Рис. I.I.1.16 sp (формула GSP14b). Зависимость величины $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$ от состава шпинели и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет $(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})/\text{Mg}$ отношения в расплаве

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{sp}}$$

$$(\text{Fe}^{2+}_{\text{m}} + \text{Fe}^{3+}_{\text{m}})/\text{Mg}_{\text{m}} = 0.61K_1 + 0.21(\text{GSP15a})$$

Диапазон значений $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})$ 0.16–3.1

Относительная ошибка 75–3.8 %

$R = 0.96$; $N = 272$; $N_1 = 267$; $\sigma = 0.12$; $\chi^2 = 4.51$ (12)

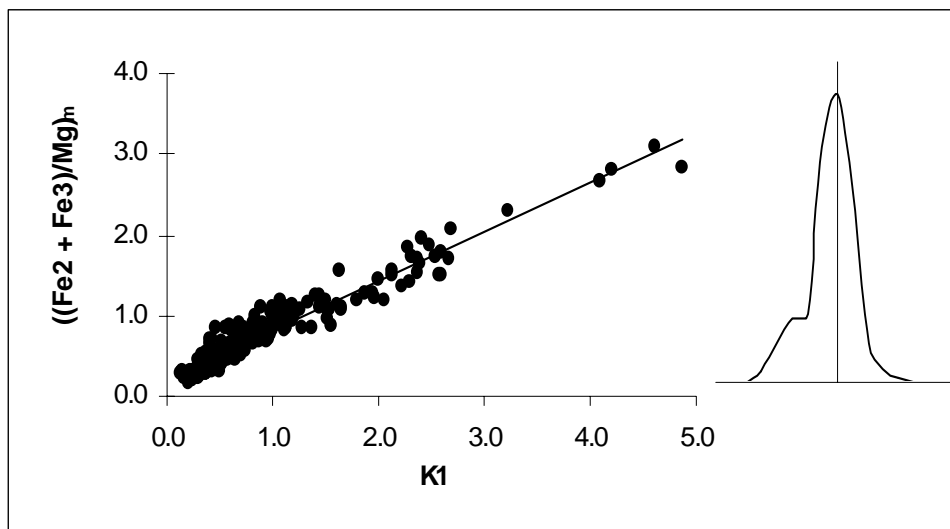


Рис. I.I.1.17 sp (формула GSP15a). Зависимость величины $(\text{Fe}^{2+}_{\text{m}} + \text{Fe}^{3+}_{\text{m}})/\text{Mg}_{\text{m}}$ от состава шпинели и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}_{\text{sp}} - \text{Ti}_{\text{sp}}) : \text{Mg}_{\text{sp}}$$

$$(\text{Fe}^{2+}_{\text{m}} + \text{Fe}^{3+}_{\text{m}})/\text{Mg}_{\text{m}} = 0.75K_1 + 0.16(\text{GSP15b})$$

Диапазон значений $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})$ 0.16–3.1

Относительная ошибка 69–3.5 %

$R = 0.97$; $N = 272$; $N_1 = 266$; $\sigma = 0.11$; $\chi^2 = 2.98$ (12)

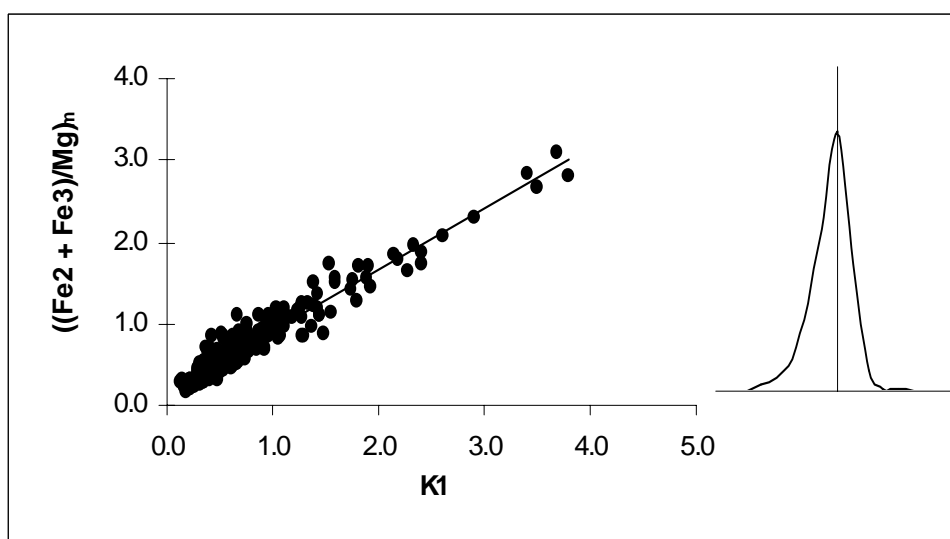


Рис. I.I.1.18 sp (формула GSP15b). Зависимость величины $(\text{Fe}^{2+}_{\text{m}} + \text{Fe}^{3+}_{\text{m}})/\text{Mg}_{\text{m}}$ от состава шпинели и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ отношения в расплаве

$$K_1 = 10(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+})_{\text{sp}} \text{Al}_{\text{sp}}$$

$$(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+})_{\text{m}} = 0.46K_1 + 0.04(\text{GSP16a})$$

Диапазон значений $(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+})$ 0.0097–1.03

Относительная ошибка 500–5 %

$R = 0.88$; $N = 238$; $N_1 = 233$; сигма = 0.05; $\chi^2 = 2.74$ (12)

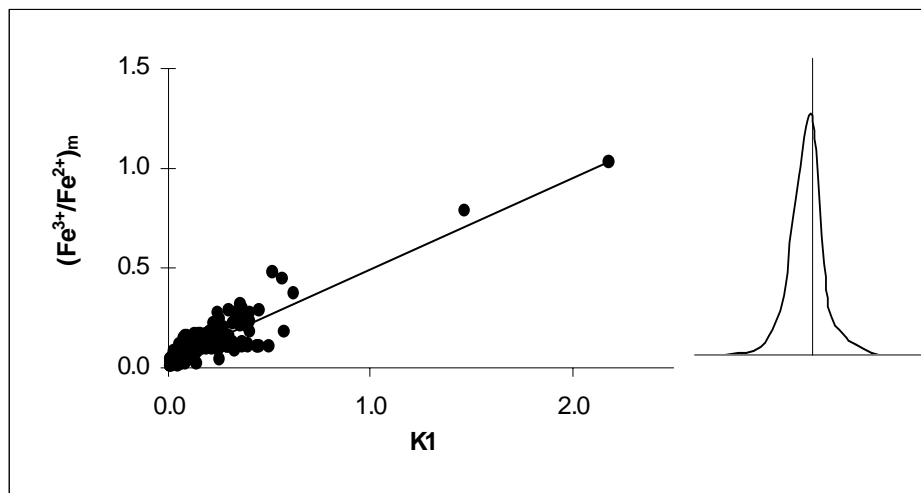


Рис. I.I.1.19 sp (формула GSP16a). Зависимость величины $(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+})_{\text{m}}$ от состава шпинели и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 10(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+})_{\text{sp}} \text{Mg}_{\text{sp}}$$

$$(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+})_{\text{m}} = 0.61K_1 + 0.01(\text{GSP16b})$$

Диапазон значений $(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+})$ 0.0097–1.03

Относительная ошибка 500–5 %

$R = 0.88$; $N = 238$; $N_1 = 234$; сигма = 0.05; $\chi^2 = 2.3$ (12)

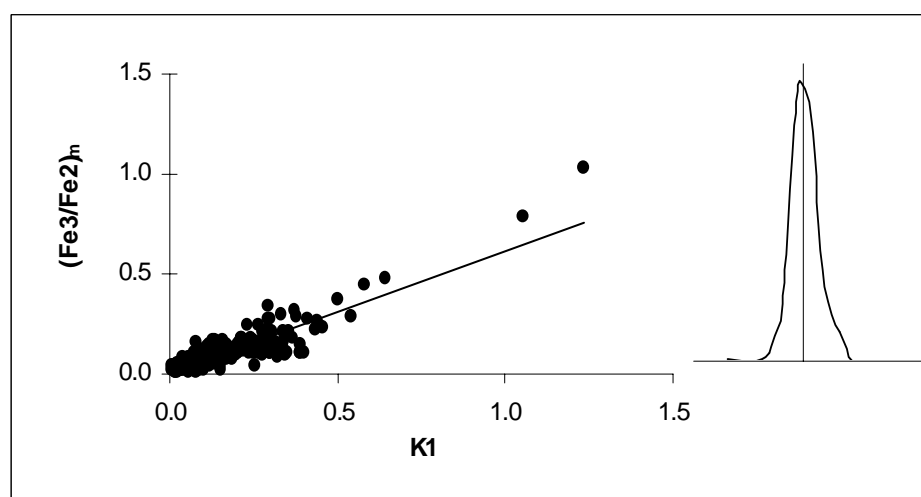


Рис. I.I.1.20 sp (формула GSP16b). Зависимость величины $(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+})_{\text{m}}$ от состава шпинели и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет сигма 0.04.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = Fe^{3+}_{sp}:4 + Cr_{sp}:6 - 2Fe^{2+}_{sp}:Mg_{sp} + Mg_m + Al_m:3 - Ca_m:2$$

$$T = 10.12K_1 + 1063.37(GSPTa)$$

Диапазон значений T 1111–1500 °C

Относительная ошибка 3.3–2.4 %

R = 0.85; N = 272; N₁ = 265; сигма = 36.8 °C; $\chi^2 = 5.92$ (12)

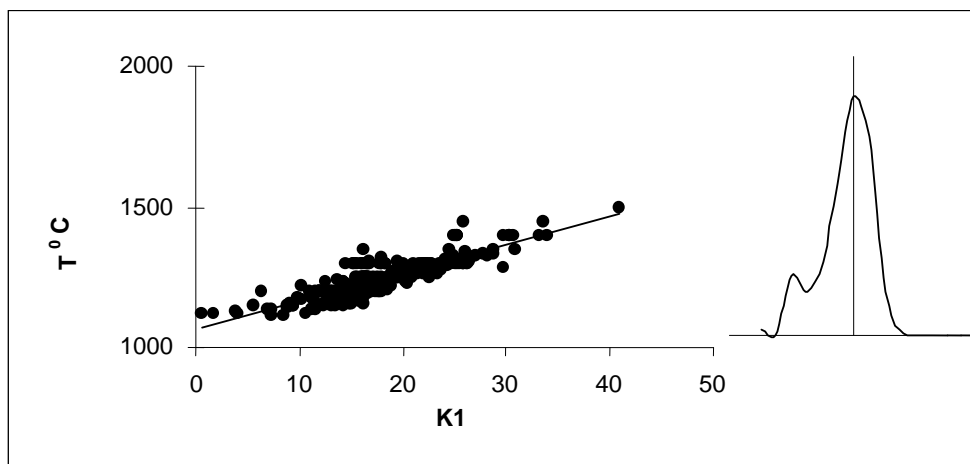


Рис. 1.1.1.21 sp (формула GSPTa). Зависимость значения T от состава шпинели, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{3+}_{sp}:4 + Cr_{sp}:4 - 3Fe^{2+}_{sp}:Mg_{sp} + Mg_m + 15Al_m:(Ca_m + Na_m + K_m) + Al_m:6 - Si_m:2$$

$$T = 7.89K_1 + 1121.83(GSPTb)$$

Диапазон значений T 1111–1500 °C

Относительная ошибка 3.4–2.5 %

R = 0.86; N = 272; N₁ = 268; сигма = 36.7 °C; $\chi^2 = 3.04$ (12)

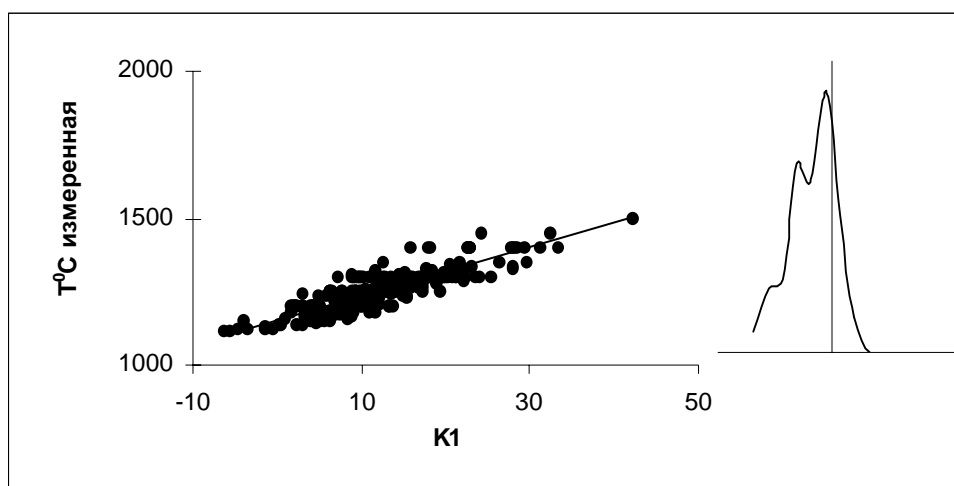


Рис. 1.1.1.22 sp (формула GSPTb). Зависимость значения T от состава шпинели, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Значение средноквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет сигма 18 °C.

Расчет значений фугитивности кислорода

$$K_1 = \text{Ln}[0.5 + (\text{Fe}^{3+}_{\text{sp}} - \text{Ti}_{\text{sp}}) : \text{Fe}^{2+}_{\text{sp}}] + \text{T} : 650 + \text{TSi}_m : 81000$$

$$f_{\text{O}_2} = 4.05K_1 - 18.15(\text{GSPfa})$$

Диапазон значений f_{O_2} -13.08...-3.3

Относительная ошибка 6–24 %

$R = 0.89$; $N = 238$; $N_1 = 234$; сигма = 0.79; $\chi^2 = 2.17$ (12)

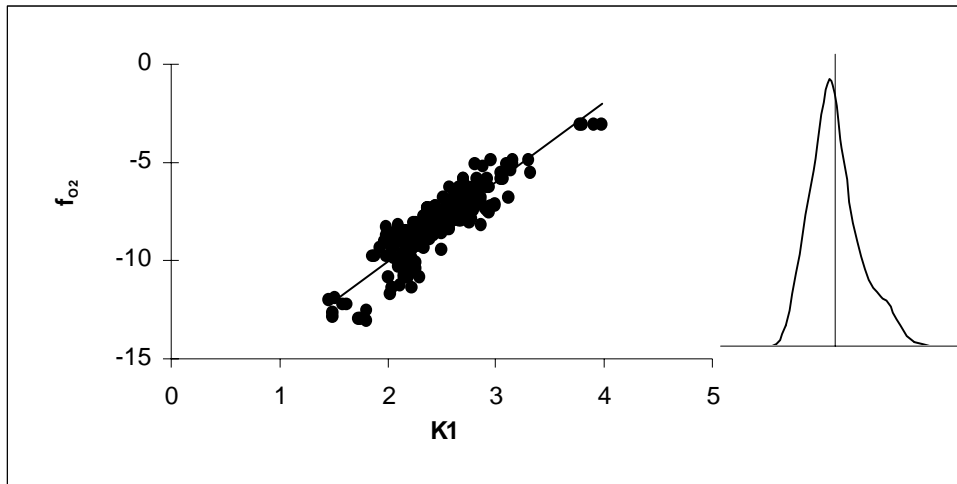


Рис. I.I.1.23 sp (формула GSPfa). Зависимость величины f_{O_2} от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Ln}(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+})_m + \text{T} : 450$$

$$f_{\text{O}_2} = 2.09K_1 - 9.05(\text{GSPfb})$$

Диапазон значений f_{O_2} -13.08...-3.3

Относительная ошибка 4–15 %

$R = 0.96$; $N = 238$; $N_1 = 232$; сигма = 0.48; $\chi^2 = 6.04$ (12)

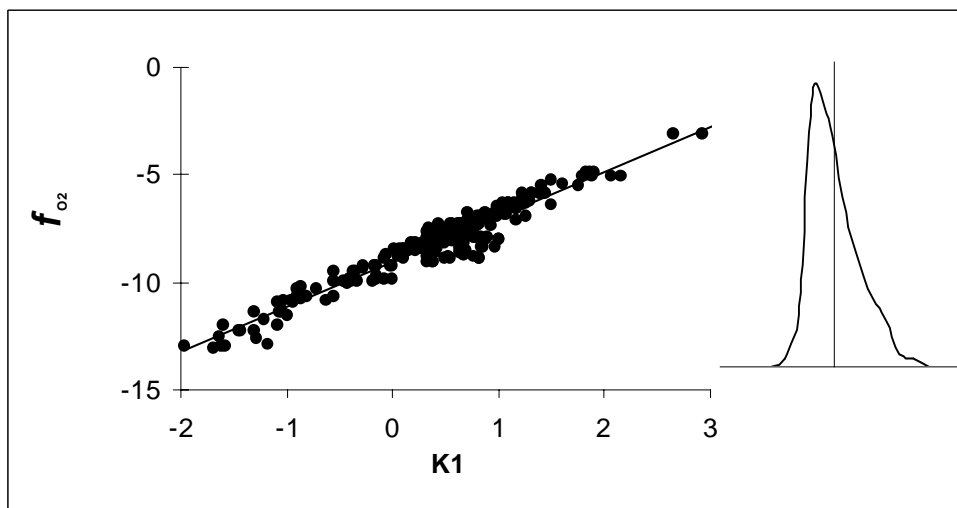


Рис. I.I.1.24 sp (формула GSPfb). Зависимость величины f_{O_2} от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет сигма 0.73 логарифмической единицы.

Соотношения элементов в кристаллах шпинели, равновесных с расплавом

$$K_1 = (Ti/Mg)_{sp}; K_2 = (Fe^{2+}/Al)_{sp}$$

$$K_2 = 2.11K_1 + 0.52(GSPR)$$

Диапазон значений K_2 0.11–4.2

Относительная ошибка 240–6 %

$R = 0.87$; $N = 254$; $N_1 = 252$; $\sigma = 0.26$; $\chi^2 = 3.45$ (12)

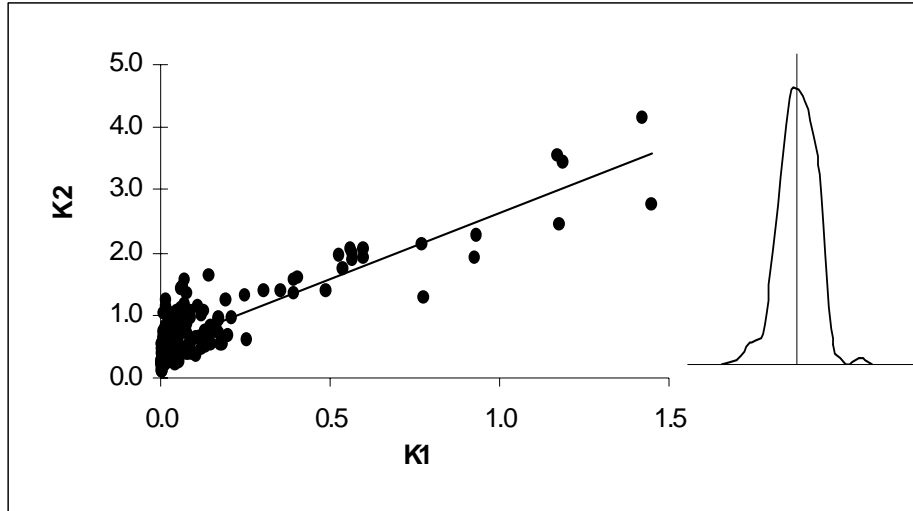


Рис. I.I.1.25 sp (формула GSPR). Зависимость значений K_2 и K_1 от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (Ti/Mg)_{sp}; K_2 = (Fe^{2+}/Al)_{sp}(1000:T)$$

$$K_2 = 1.87K_1 + 0.41(GSPRa)$$

Диапазон значений K_2 0.1–3.4

Относительная ошибка 220–7 %

$R = 0.89$; $N = 254$; $N_1 = 252$; $\sigma = 0.22$; $\chi^2 = 4.33$ (12)

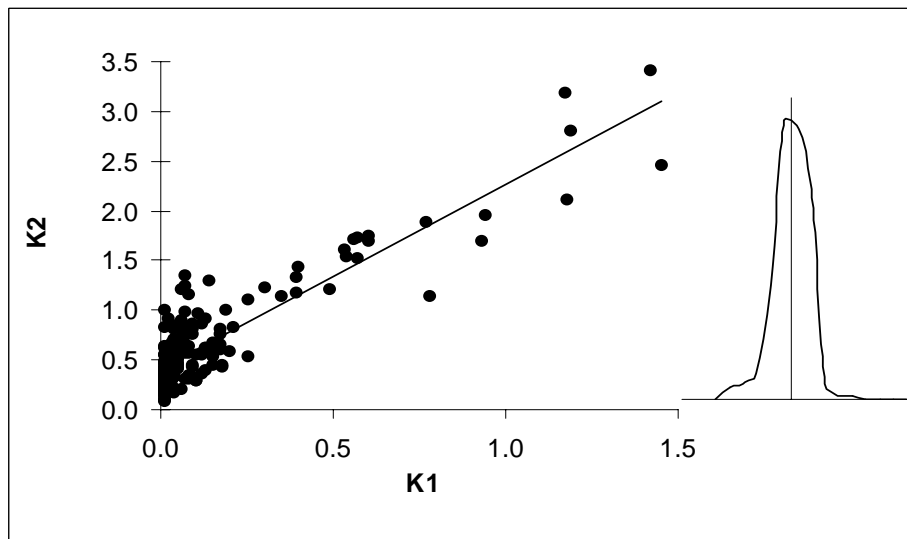


Рис. I.I.1.26 sp (формула GSPRa). Зависимость значений K_2 и K_1 от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

1.2. Система расплав–оливин

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [1; 2; 3; 4; 5; 6; 9; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 20; 22; 23; 24; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 41; 54; 63; 65; 67; 68; 69; 70; 71; 75; 76; 77; 80; 81; 82; 83; 86; 87; 88; 90; 91; 92; 98; 99; 100; 132; 165; 166; 167; 169; 171; 172; 173; 176; 177; 178; 189; 190; 193; 194; 197; 235; 236; 255; 258; 280; 281; 294; 305; 333; 345; 347; D1].

Используемые данные: общее число точек – 1161 парный анализ. После исключения анализов составов оливинов и стекол с суммами окислов менее 98 % и более 102 %, а также исключения анализов, где отсутствовало железо в расплаве – 1033 т. Для расчета зависимости содержаний титана в расплаве были использованы анализы с ненулевыми содержаниями титана в расплаве и оливине – 472 т. Для расчета зависимости содержаний

марганца в расплаве были использованы анализы с ненулевыми содержаниями марганца в оливине и расплаве – 722 т. Для расчета содержаний Fe^{2+} были использованы 886 т., где приводятся значения фугитивности. Для расчета содержаний кальция в расплаве были использованы эксперименты с содержаниями кальция в кристаллах оливина > 0.1 % (атом.) – 1000 т. Для расчета содержания хрома в расплаве были использованы эксперименты с ненулевыми содержаниями хрома в расплаве и оливине – 467 т. Для расчетов Fe^{2+}/Mg отношения использованы 886 т., где приводятся значения фугитивности. Для оценки зависимости величины K_D был использован массив данных (**GLOL14b**) – 1007 т., из которого были исключены 3 точки со значениями $K_D < 0.03$. Для расчета температуры по содержанию железа были исключены 3 точки с содержаниями железа в оливине < 1.3 % (атом.) – 1030 т.

Таблица I.I.2.1 ol. Диапазоны составов стекол (расплавов) и оливинов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

Расплав <i>GLOL</i>		T °C	1025–1525	Оливин		Fo	7.68–98.85
SiO ₂	34.2–65.71	Si	33.83–60.85	SiO ₂	29.2–43.25	Si	31.11–35.09
TiO ₂	0.23–15.3	Ti	0.16–11.54	TiO ₂	0.01–0.6	Ti	0.01–0.4
Al ₂ O ₃	3.16–24.3	Al	3.8–24.97	Al ₂ O ₃	0.01–1.45	Al	0.01–1.5
FeO	3.49–36	Fe	2.65–30.47	FeO	1.17–66.4	Fe	0.76–61.12
MnO	0.03–1.59	Mn	0.01–0.93	MnO	0.05–1.79	Mn	0.04–1.36
MgO	0.6–25.6	Mg	0.92–33.20	MgO	3.1–56.19	Mg	5.09–65.01
CaO	1.9–22.44	Ca	1.9–22.74	CaO	0.06–5.14	Ca	0.06–5.36
Na ₂ O	0.01–9.62	Na	0.02–16.43	Na ₂ O	0.01–0.63	Na	0.02–1.07
K ₂ O	0.01–7.88	K	0.01–9.35	K ₂ O	0.01–0.25	K	0.01–0.28
Cr ₂ O ₃	0.01–1.29	Cr	0.02–1.34	Cr ₂ O ₃	0.01–0.85	Cr	0.01–0.54

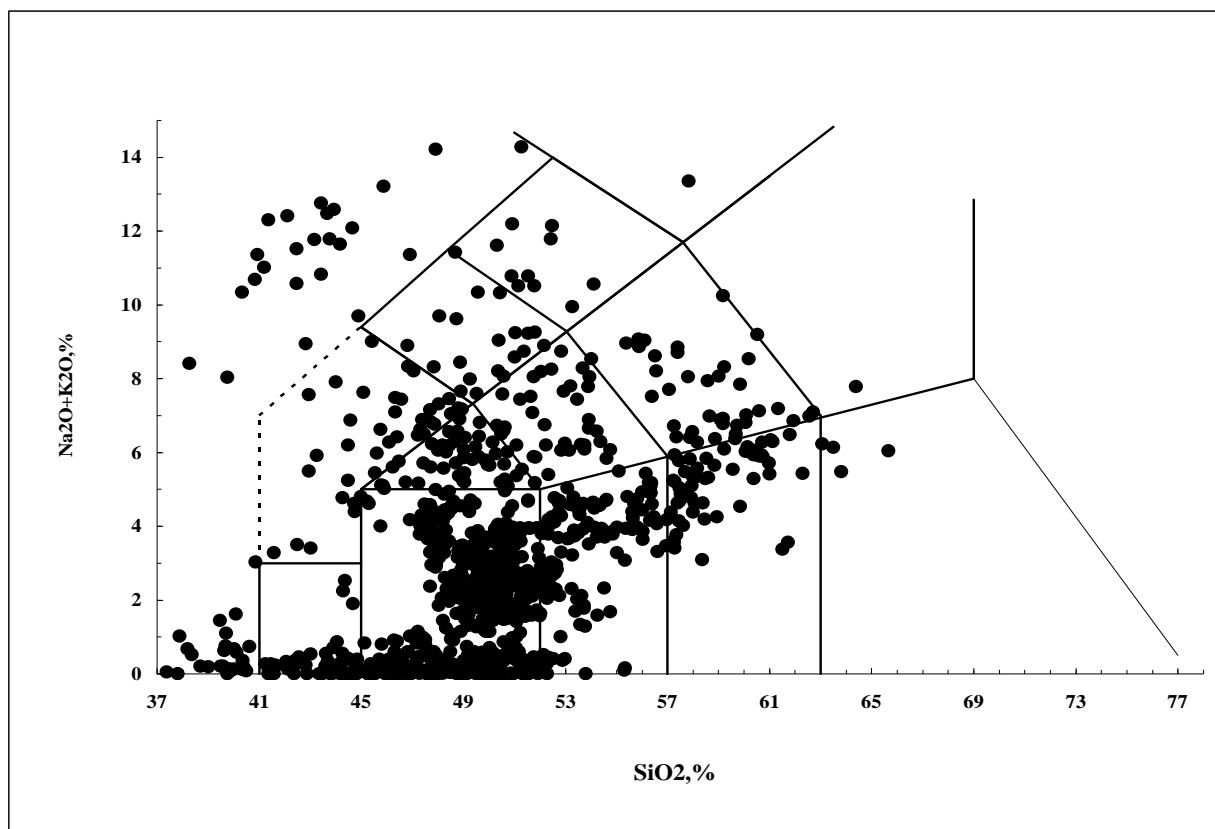


Рис. I.I.2.1 ol. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оли-
вина, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = 100Ti_{ol}Ca_m:Si_m - Al_m:9$$

$$Ti_m = 0.74K_1 + 2.1(GLOL2a)$$

Диапазон значений Ti 0.2–9.3 (атом. %)

Относительная ошибка 400–8.6 %

$R = 0.88$; $N = 472$; $N_1 = 467$; $\sigma = 0.8$; $\chi^2 = 3.89$ (12)

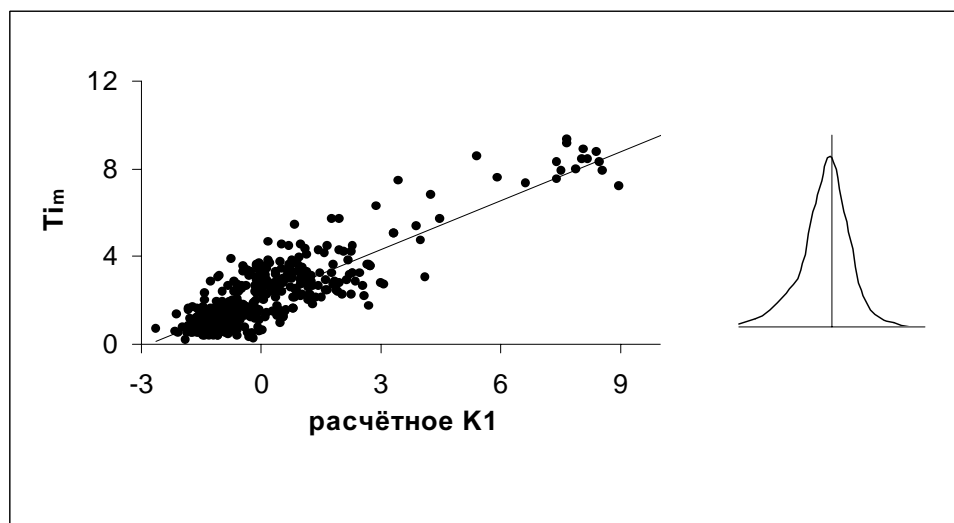


Рис. I.I.2.2 ol (формула **GLOL2a**). Зависимость содержаний Ti_m от состава оливина, распла-
ва и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100Ti_{ol}Mg_{ol}:Si_m - Al_m:2$$

$$Ti_m = 0.21K_1 + 2.1(GLOL2b)$$

Диапазон значений Ti 0.2–9.3 (атом. %)

Относительная ошибка 400–8.6 %

R = 0.89; N = 472; N₁ = 468; сигма = 0.8; $\chi^2 = 3.93$ (12)

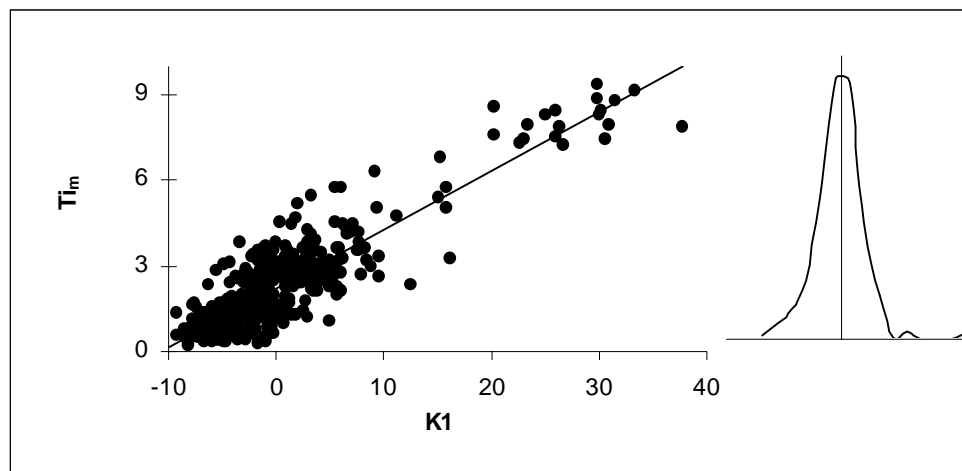


Рис. I.I.2.3 ol (формула GLOL2b). Зависимость содержаний Ti_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет сигма 0.4.

Расчет содержаний железа двухвалентного в расплаве

$$K_1 = 10Fe^{2+}_{ol}Mg_m:Mg_{ol}Si_m$$

$$Fe^{2+}_m = 11.7K_1 + 1.65(GLOL5a)$$

Диапазон значений Fe²⁺ 2.2–28 (атом. %)

Относительная ошибка 30–3 %

R = 0.99; N = 886; N₁ = 872; сигма = 0.66; $\chi^2 = 1156$ (16)

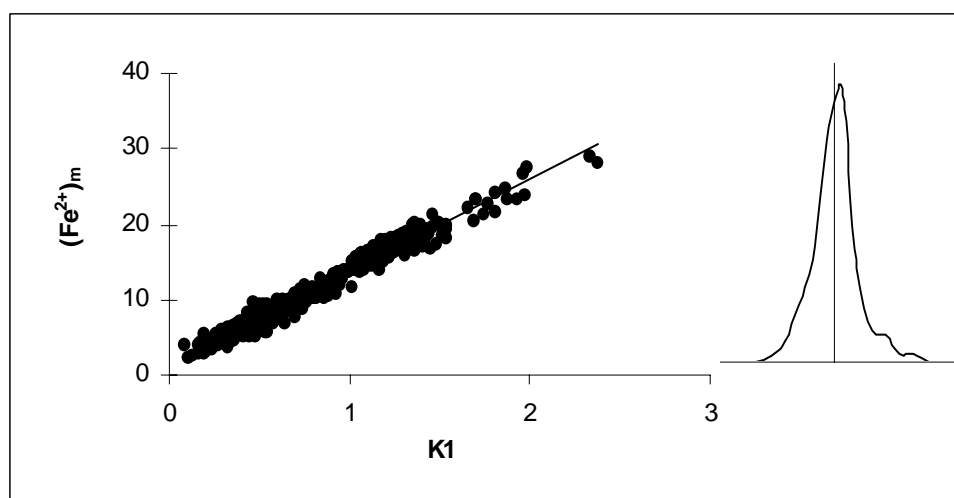


Рис. I.I.2.4 ol (формула GLOL5a). Зависимость содержаний Fe²⁺_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol}T^2:(10^5Si_m - Al_m:4) + Ca_m:4$$

$$Fe^{2+}_m = 1.43K_1 + 3.89(GLOL5b)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 2.2–28 (атом. %)

Относительная ошибка 77–6 %

$R = 0.93$; $N = 886$; $N_1 = 870$; $\sigma = 1.45$; $\chi^2 = 5.03$ (16)

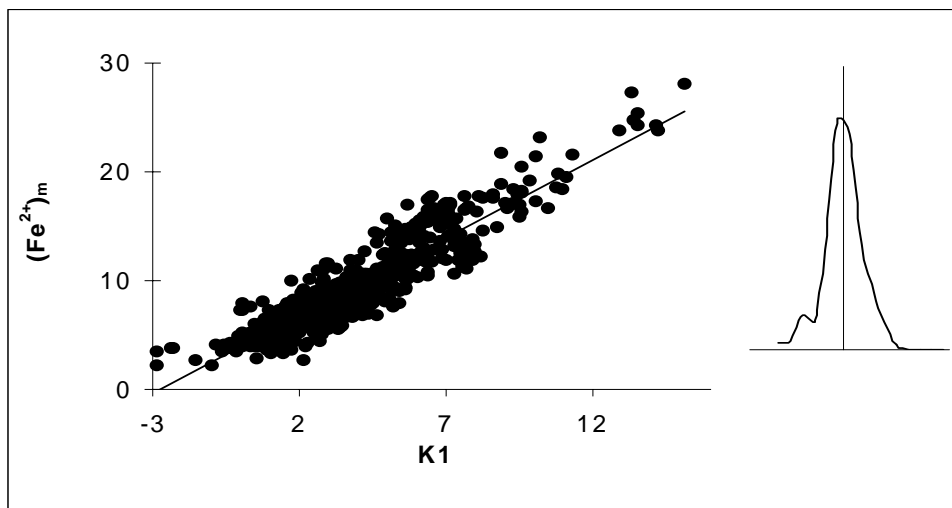


Рис. I.I.2.5 ol (формула GLOL5b). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет $\sigma = 1.2$.

Расчет содержаний марганца в расплаве

$$K_1 = Mn_{ol}Mg_m:5$$

$$Mn_m = 0.39K_1 + 0.01(GLOL6)$$

Диапазон значений Mn 0.05–1.3 (атом. %)

Относительная ошибка 80–3 %

$R = 0.93$; $N = 722$; $N_1 = 718$; $\sigma = 0.04$; $\chi^2 = 5.18$ (16)

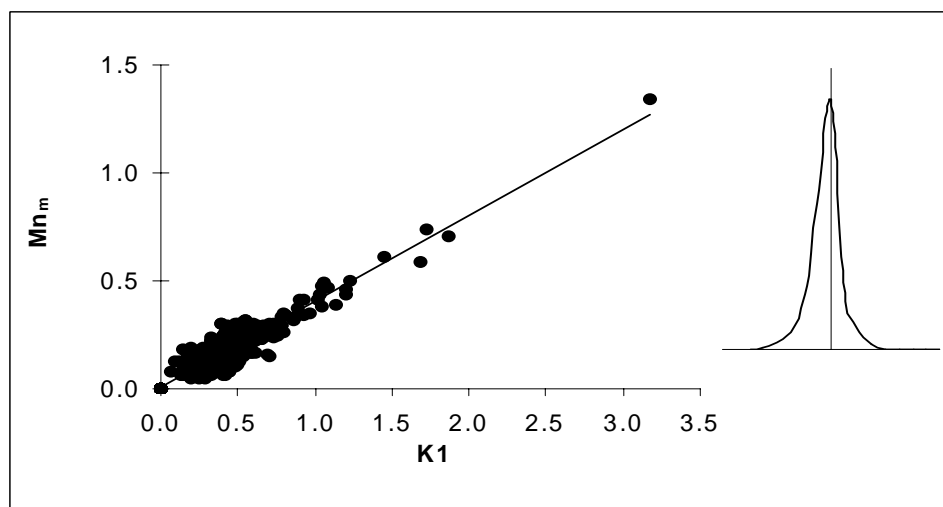


Рис. I.I.2.6 ol (формула GLOL6). Зависимость содержаний Mn_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Mg_{ol}T:1000 - Al_m:3 - Si_m:2$$

$$Mg_m = 0.3K_1 + 12.59(GLOL7a)$$

Диапазон значений Mg 0.9–31 (атом. %)

Относительная ошибка 180–5.2 %

$R = 0.93$; $N = 1033$; $N_1 = 1015$; $\sigma = 1.6$; $\chi^2 = 3.52$ (24)

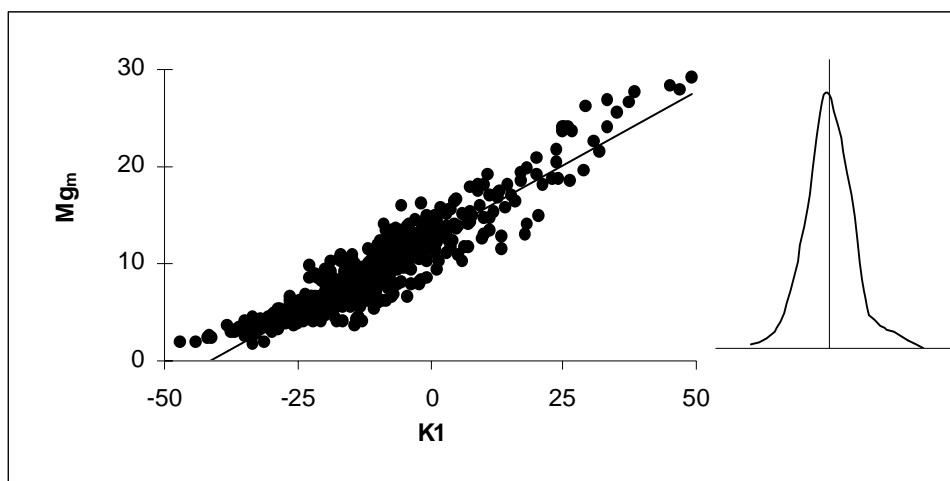


Рис. I.I.2.7 ol (формула GLOL7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{ol}Fe^{2+}_mSi_m:80Fe^{2+}_{ol}$$

$$Mg_m = 0.53K_1 + 0.18(GLOL7b)$$

Диапазон значений Mg 0.9–31 (атом. %)

Относительная ошибка 111–3.2 %

$R = 0.93$; $N = 1033$; $N_1 = 1010$; $\sigma = 1$; $\chi^2 = 2.93$ (24)

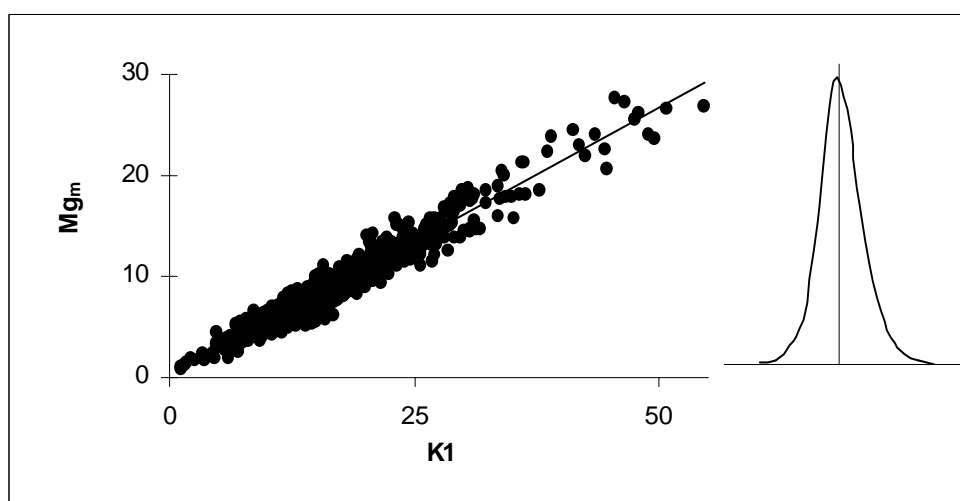


Рис. I.I.2.8 ol (формула GLOL7b). Зависимость содержаний Mg_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет $\sigma = 1.7$.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Ca_{ol}Mg_m - (K + Na)_m \cdot 4 - Si_m \cdot 7 - T \cdot 90$$

$$Ca_m = 0.87K_1 + 25.3(GLOL8)$$

Диапазон значений Ca 2.2–22.7 (атом. %)

Относительная ошибка 57–5.6 %

$R = 0.88$; $N = 1000$; $N_1 = 995$; $\sigma = 1.26$; $\chi^2 = 4.97$ (16)

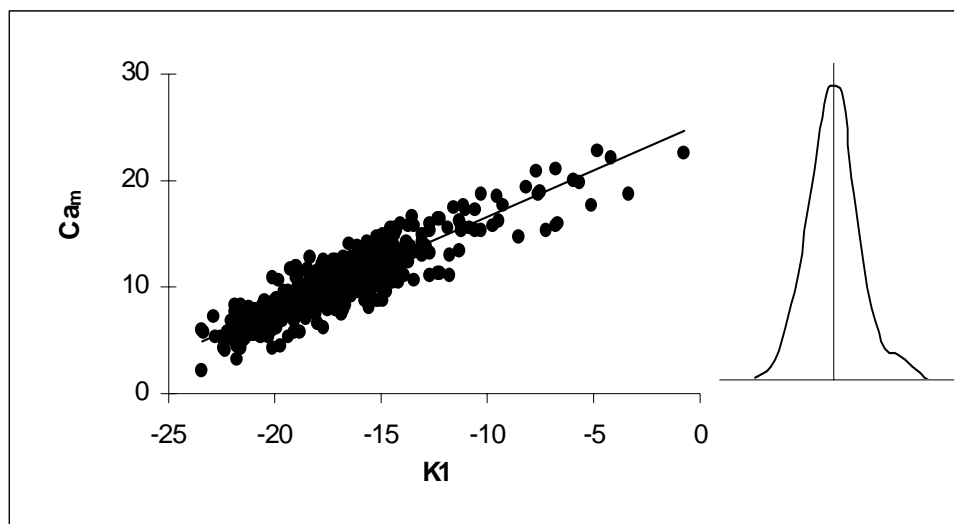


Рис. I.I.2.9 ol (формула GLOL8). Зависимость содержаний Ca_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний хрома в расплаве

$$K_1 = Cr_{ol}Mg_m : Mg_{ol}$$

$$Cr_m = 4.21K_1 + 0.01(GLOL11)$$

Диапазон значений Cr 0.007–0.93 (атом. %)

Относительная ошибка 715–5.4 %

$R = 0.95$; $N = 467$; $N_1 = 455$; $\sigma = 0.05$; $\chi^2 = 21.62$ (12)

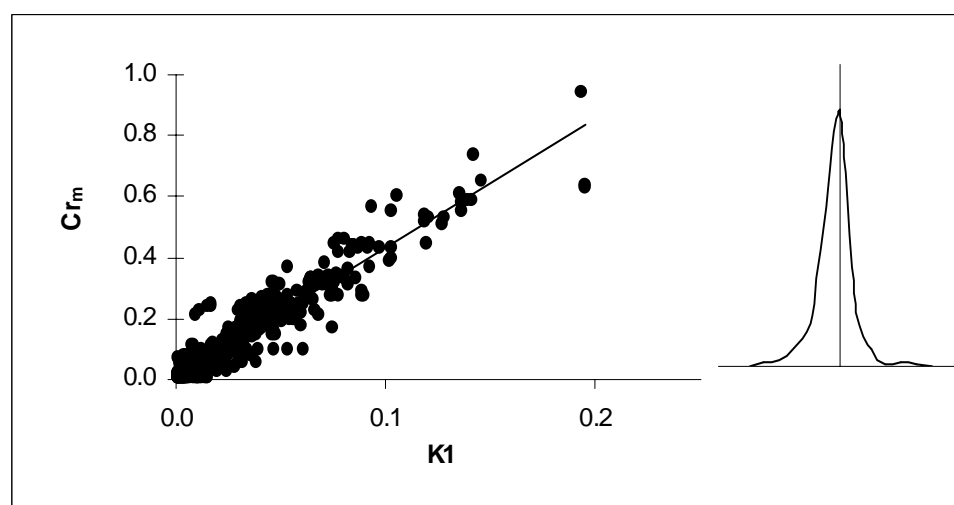


Рис. I.I.2.10 ol (формула GLOL11). Зависимость содержаний Cr_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет величины железо(+2)–магниевого отношения в расплаве

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{ol}}; K_2 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$$

$$K_2 = 2.19K_1 + 0.3(\text{GLOL14a})$$

Диапазон значений K_2 0.15–26

Относительная ошибка 100–1 %

$$R = 0.99; N = 886; N_1 = 881; \text{сигма} = 0.15; \chi^2 = 7.3 \text{ (16)}$$

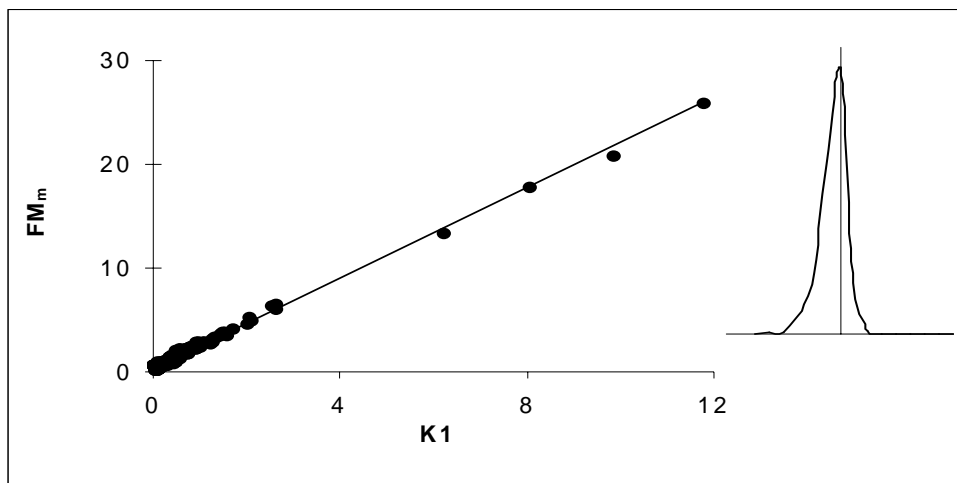


Рис. I.I.2.11 ol (формула GLOL14a). Зависимость величины $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$ от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Основная масса значений $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{ol}}$ и $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$, за исключением нескольких точек, лежит в интервалах 0.01–2.6 и 0.15–6.5, соответственно, и для этих диапазонов были вычислены вновь выше приводимые величины (879 т.).

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{ol}}; K_2 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$$

$$K_2 = 2.46K_1 + 0.2(\text{GLOL14b})$$

Диапазон значений K_2 0.14–6.5

Относительная ошибка 80–2 %

$$R = 0.98; N = 879; N_1 = 865; \text{сигма} = 0.12; \chi^2 = 10.2 \text{ (16)}$$

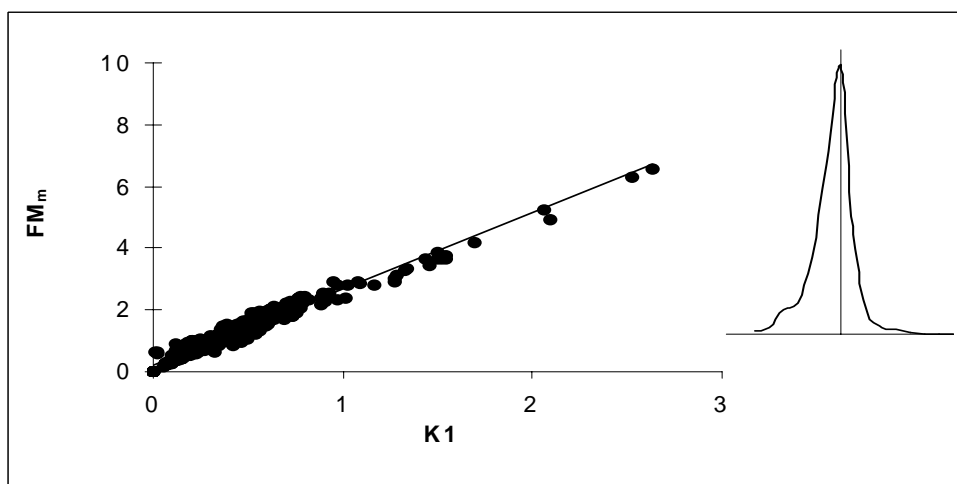


Рис. I.I.2.12 ol (формула GLOL14b). Зависимость величины $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$ от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Диапазон значений величины $K_D = (Fe^{2+}/Mg)_{ol}/(Fe^{2+}/Mg)_m$ лежит в интервале 0.02–0.5
 K_D (ср. арифм.) = 0.317; сигма 0.04. Коэффициент корреляции для K_D (модального) и K_D (рассчитанного) с использованием формулы (GLOL14b) равен 0.61, что указывает на целесообразность оценки влияния состава расплава на численное значение этой величины.

$$K_D = (Fe^{2+}/Mg)_{ol} : (Fe^{2+}/Mg)_m$$

$$K_1 = [Fe_{ol} + Si_m - Al_m - (Na + K)_m : 2] : 100$$

$$K_D = 0.3K_1 + 0.18(GLOL14c)$$

Диапазон значений K_D 0.14–0.45

Относительная ошибка 18–6 %

$R = 0.8$; $N = 879$; $N_1 = 860$; сигма = 0.02; $\chi^2 = 7.33$ (16)

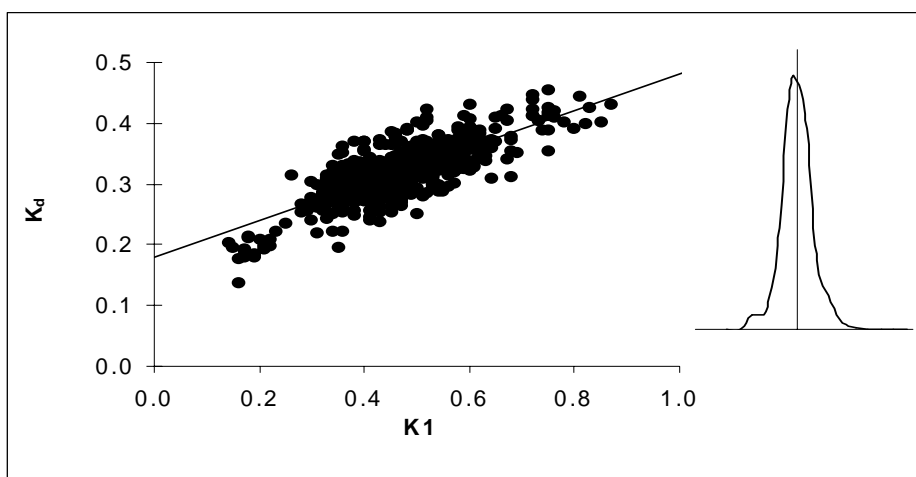


Рис. I.I.2.13 ol (формула GLOL14c). Зависимость величины K_D от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = 100Mg_m : Mg_{ol} + Mg_{ol} : 2 + Si_m : 5$$

$$T = 6.72K_1 + 817.83(GLOL14a)$$

Диапазон значений T 1025–1500 °C

Относительная ошибка 2.2–1.5 %

$R = 0.94$; $N = 1033$; $N_1 = 1024$; сигма = 22.7 °C; $\chi^2 = 3.95$ (24)

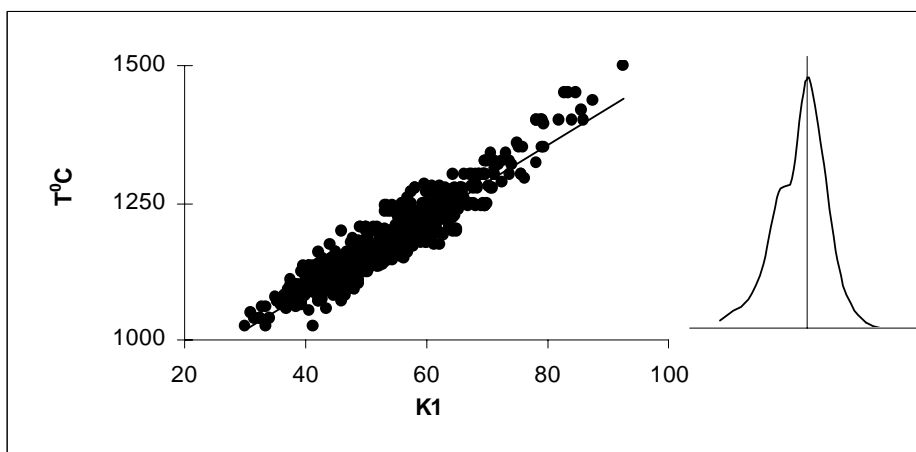


Рис. I.I.2.14 ol (формула GLOL14a). Зависимость значения T от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100Mg_m:Mg_{ol} + Mg_{ol}:3 - Ca_m:3 + (Na_m + K_m):5$$

$$T = 8.23K_1 + 902.6(GLOLTb)$$

Диапазон значений T 1025–1525 °C

Относительная ошибка 2–1.4 %

R = 0.95; N = 1033; N₁ = 1025; сигма = 21 °C; $\chi^2 = 2.54$ (24)

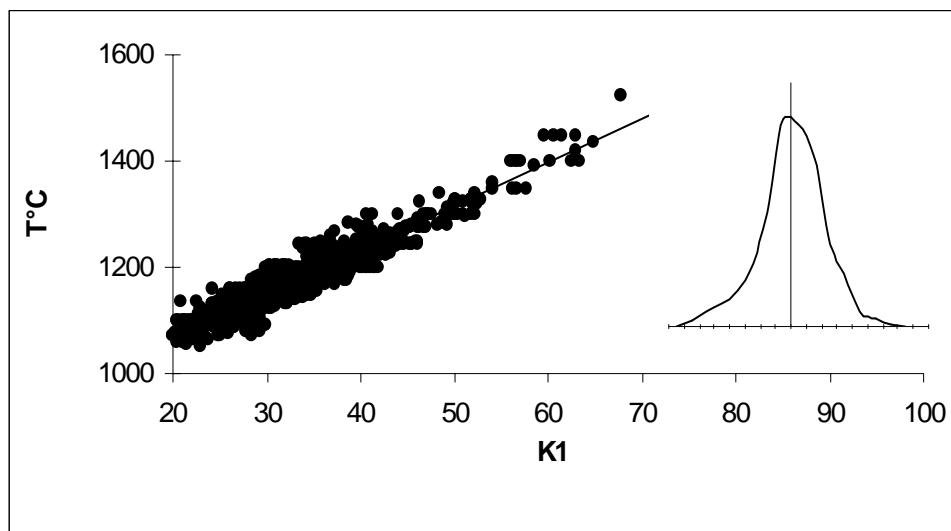


Рис. I.I.2.15 ol (формула GLOLTb). Зависимость значения T от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100Mg_m:Mg_{ol} + Mg_{ol}:3 - Ca_m:3 + (Na_m + K_m):6 + Mg_m:2 + Si_m:6 - Fe^{2+}_m:11 - Ti_m:7$$

$$T = 6.43K_1 + 889.24(GLOLTc)$$

Диапазон значений T 1025–1525 °C

Относительная ошибка 2–1.3 %

R = 0.95; N = 1033; N₁ = 1025; сигма = 20.5 °C; $\chi^2 = 4.45$ (24)

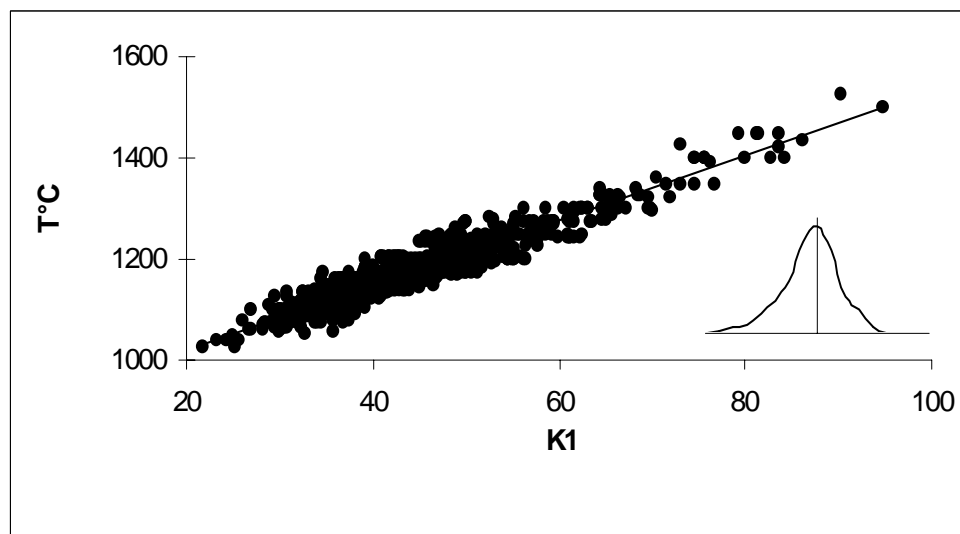


Рис. I.I.2.16 ol (формула GLOLTc). Зависимость значения T от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100Fe_m^{2+}:Fe_{ol}^{2+} - Fe_{ol}^{2+} + 2Si_m$$

$$T = 2.38K_1 + 845.52(\text{GLOLTd})$$

Диапазон значений T 1025–1450 °C

Относительная ошибка 2.4–1.7 %

R = 0.93; N = 1030; N₁ = 1019; сигма = 24 °C; $\chi^2 = 3.29$ (24)

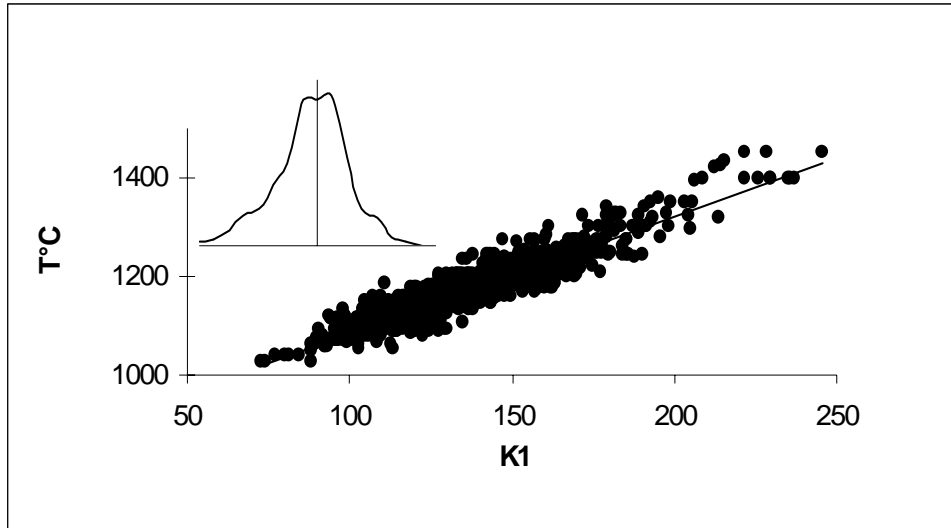


Рис. I.I.2.17 ol (формула GLOLTd). Зависимость значения T от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100Fe_m^{2+}:Fe_{ol}^{2+} + Mg_{ol} + Si_m - 2Ca_m - 3Ti_m$$

$$T = 2.36K_1 + 864.79(\text{GLOLTe})$$

Диапазон значений T 1025–1500 °C

Относительная ошибка 2.1–1.4 %

R = 0.95; N = 1030; N₁ = 1018; сигма = 21.5 °C; $\chi^2 = 3.81$ (24)

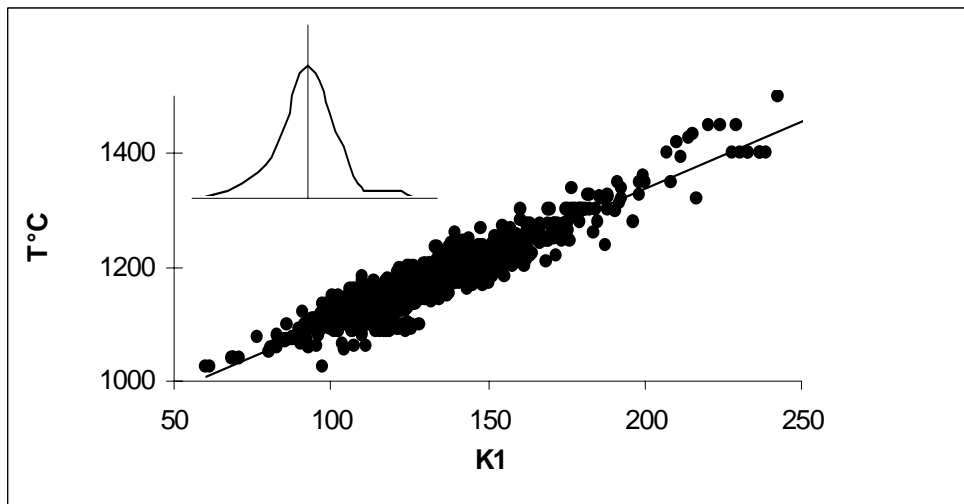


Рис. I.I.2.18 ol (формула GLOLTe). Зависимость значения T от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100Fe_m^{2+}:Fe_{ol}^{2+} + Mg_{ol} + Si_m - 2Ca_m - 3Ti_m - (Na_m + K_m):2$$

$$T = 2.36K_1 + 864.79(GLOLTf)$$

Диапазон значений T 1025–1500 °C

Относительная ошибка 2.1–1.4 %

R = 0.95; N = 1030; N₁ = 1020; сигма = 21.2 °C; $\chi^2 = 4.28$ (24)

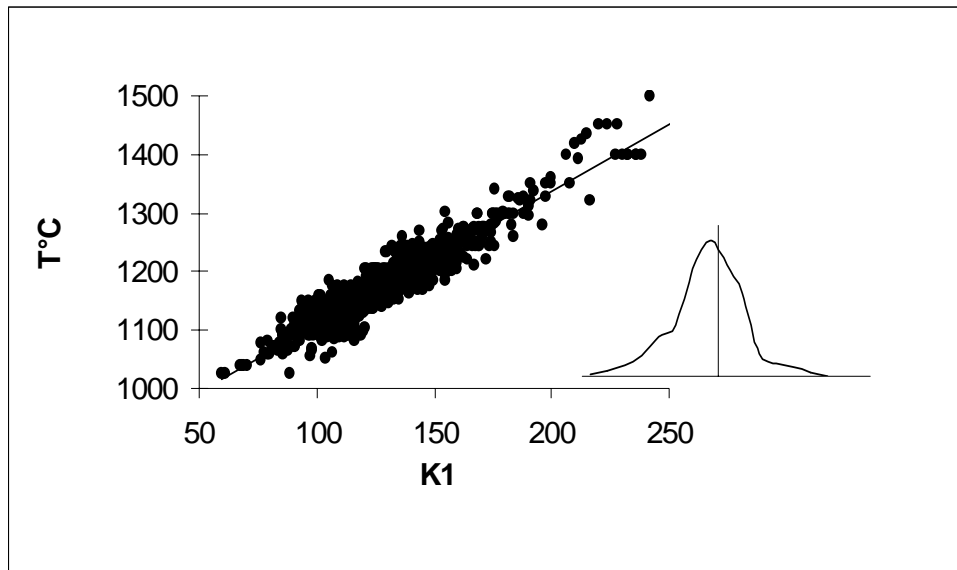


Рис. I.I.2.19 ol (формула GLOLTf). Зависимость значения T от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значения среднеквадратичного отклонения при попарном сравнении расчетов по шести выше приведенным формулам лежат в интервале от 3 до 24.4 °C.

1.3. Система расплав–ортопироксен

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [9; 15; 16; 20; 27; 54; 67; 70; 71; 73; 77; 88; 98; 126; 131; 166; 167; 177; 178; 201; 235; 255; 257; 263; 291].

Используемые данные: общее число точек – 157 парных анализов. После исключения анализов составов ортопироксенов и стекол с суммами окислов менее 98 % и более 102 % – 153 т. Для расчета содержания титана в расплаве были отброшены точки с нулевыми содержаниями титана в расплаве и ортопироксене – 115 т. Для расчета содержаний алюминия в расплаве были исключены точки с нулевыми содержаниями в ортопироксене – 150 т. Для расчета содержаний хрома в расплаве были отброшены точки с нулевыми концентрациями хрома в расплаве и ортопироксене – 106 т.

Таблица I.I.3.1 орх. Диапазоны составов стекол (расплавов) и ортопироксенов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

Расплав GLOP		T °C	1050–1390	Ортопироксен			
SiO ₂	47.6–69.43	Si	45.54–65.5	SiO ₂	51.7–58.3	Si	47.09–50.49
TiO ₂	0.01–6	Ti	0.01–4.32	TiO ₂	0.01–1.49	Ti	0.01–0.99
Al ₂ O ₃	0.3–18.2	Al	0.33–19.99	Al ₂ O ₃	0.02–5	Al	0.02–5.13
FeO	3.37–24.6	Fe	2.66–20.12	FeO	4.36–22	Fe	3.16–17.32
MnO	0.01–0.56	Mn	0.01–0.46	MnO	0.07–0.9	Mn	0.05–0.69
MgO	0.78–20.69	Mg	1.1–28.12	MgO	21.3–35.7	Mg	29.28–45.55
CaO	1.98–13.4	Ca	2.01–13.7	CaO	0.26–3.44	Ca	0.24–3.29
Na ₂ O	0.01–4.61	Na	0.02–8.28	Na ₂ O	0.01–0.44	Na	0.02–0.79
K ₂ O	0.1–6.53	K	0.12–7.69	K ₂ O	0.01–0.11	K	0.01–0.13
Cr ₂ O ₃	0.01–0.94	Cr	0.01–0.69	Cr ₂ O ₃	0.01–1.27	Cr	0.01–0.9

En 61.48–92.04 Wo 0.5–6.68 Fs 6.33–35.48

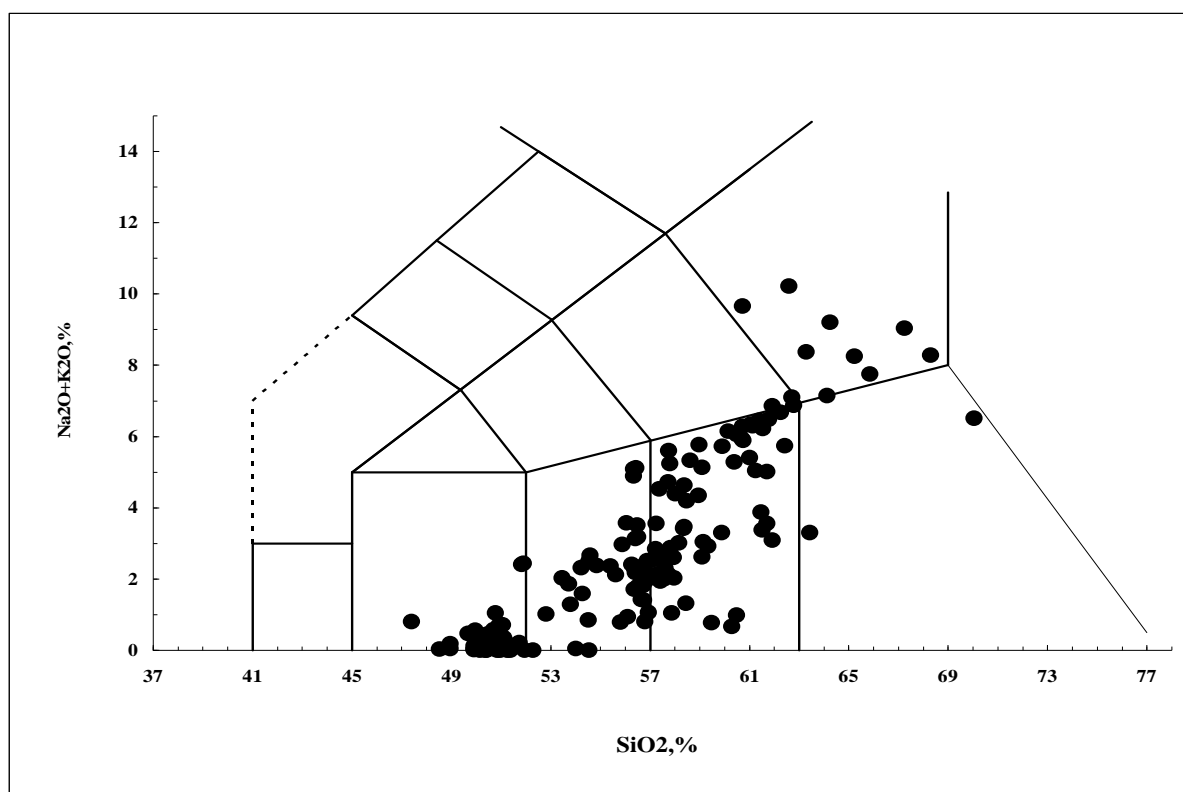


Рис. I.I.3.1 орх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами ортопироксена, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = 12 \ln(Mg_{op}:Mg_m) + 2Si_{op} - Al_m:2$$

$$Si_m = 0.54K_1 - 4.69(GLOP1a)$$

Диапазон значений Si 45.5–65.5 (атом. %)

Относительная ошибка 4–3 %

$R = 0.88$; $N = 153$; $N_1 = 153$; $\sigma = 1.9$; $\chi^2 = 0.71$ (12)

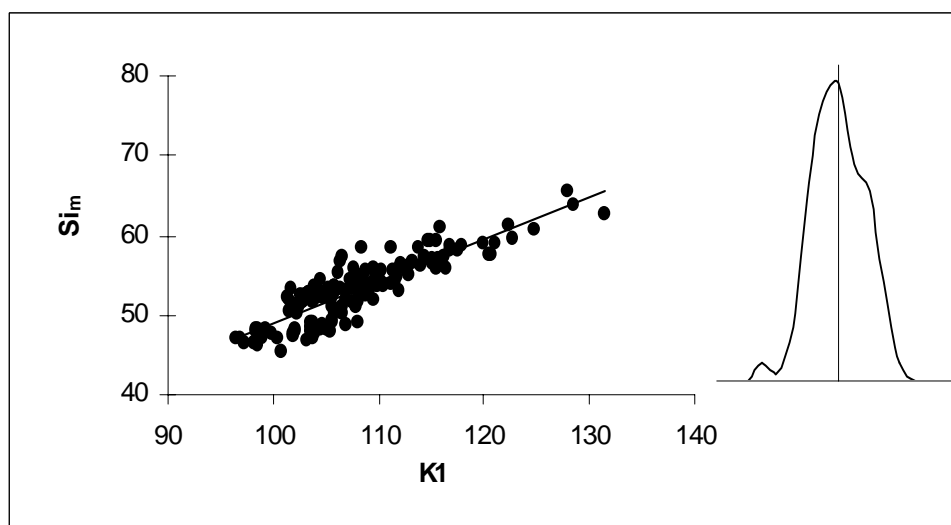


Рис. I.I.3.2 орх (формула **GLOP1a**). Зависимость содержаний Si_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 19\text{Ln}(\text{Fe}^{2+}_{\text{op}}:\text{Fe}^{2+}_{\text{m}}) + 2\text{Si}_{\text{op}} - \text{Al}_{\text{m}} - \text{Ca}_{\text{m}}$$

$$\text{Si}_{\text{m}} = 0.31K_1 + 28.38(\text{GLOP1b})$$

Диапазон значений Si 45.5–65.5 (атом. %)

Относительная ошибка 4–3 %

R = 0.86; N = 153; N₁ = 152; сигма = 2; $\chi^2 = 1.68$ (12)

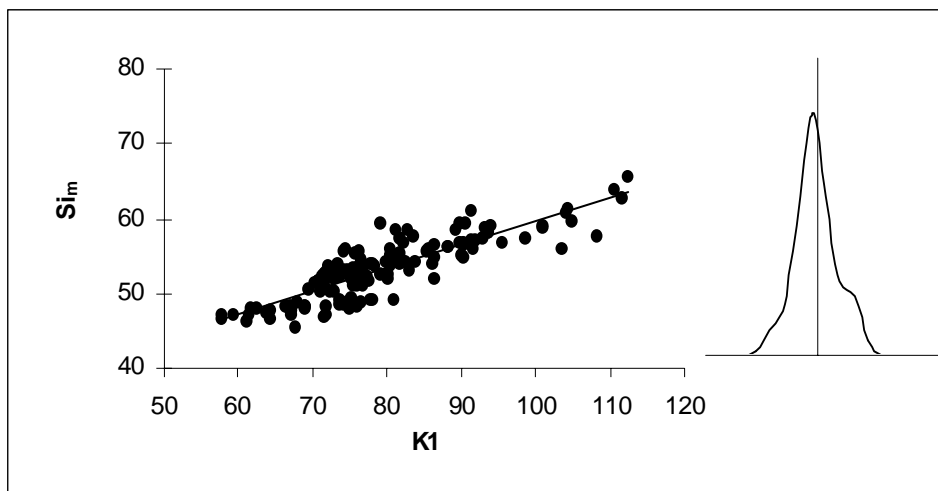


Рис. I.I.3.3 орх (формула GLOP1b). Зависимость содержаний Si_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет сигма 1.2.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = \text{Ti}_{\text{op}}\text{Mg}_{\text{op}}$$

$$\text{Ti}_{\text{m}} = 0.14K_1 + 0.1(\text{GLOP2})$$

Диапазон значений Ti 0.007–4.3 (атом. %)

Относительная ошибка 4000–6.5 %

R = 0.94; N = 115; N₁ = 112; сигма = 0.28; $\chi^2 = 1.91$ (12)

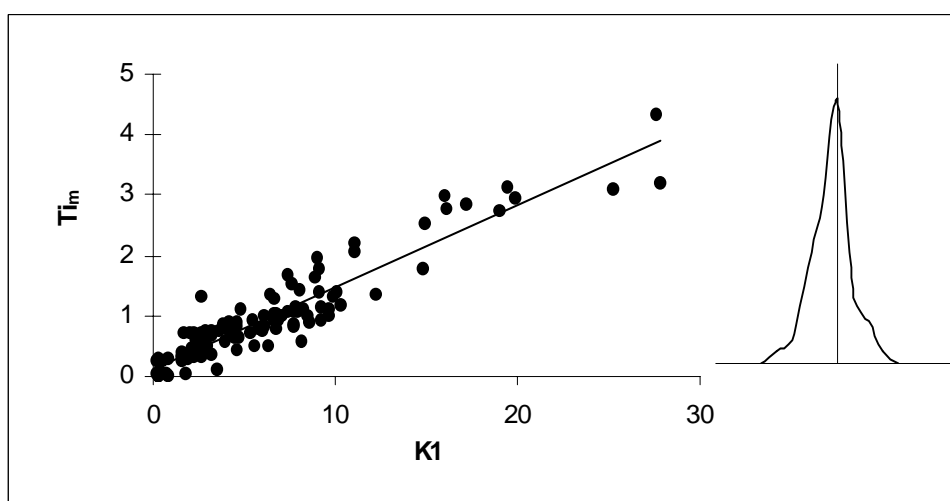


Рис. I.I.3.4 орх (формула GLOP2). Зависимость содержаний Ti_m от состава ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = 30Ln(Al_{op} + 0.3) + Si_m:2 - Mg_m$$

$$Al_m = 0.14K_1 + 11.11(GLOP3)$$

Диапазон значений Al 3–20 (атом. %)

Относительная ошибка 50–7.5 %

R = 0.83; N = 150; N₁ = 147; сигма = 1.5; $\chi^2 = 2.06$ (12)

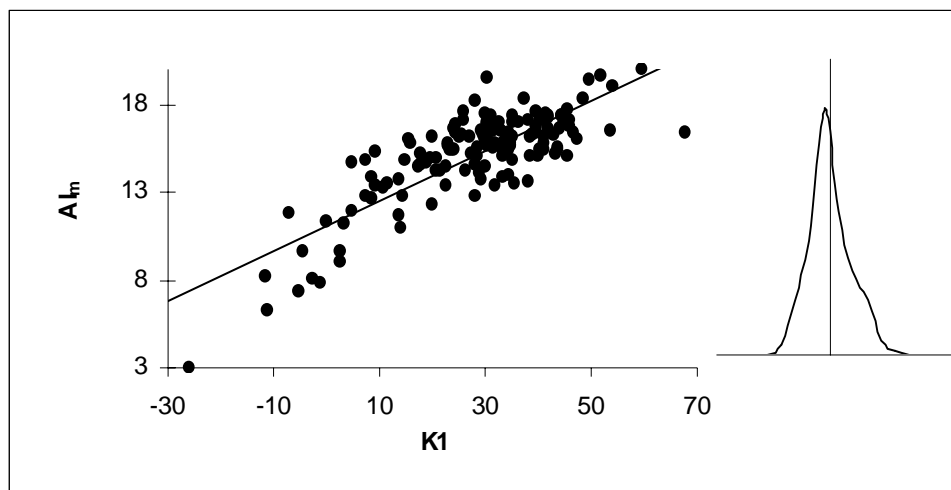


Рис. I.I.3.5 орх (формула GLOP3). Зависимость содержаний Al_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа двухвалентного в расплаве

$$K_1 = Fe^{2+}_{op}Mg_m:10$$

$$Fe^{2+}_m = 0.86K_1 + 0.21(GLOP5)$$

Диапазон значений Fe²⁺ 2.3–20 (атом. %)

Относительная ошибка 52–6 %

R = 0.94; N = 153; N₁ = 151; сигма = 1.2; $\chi^2 = 2.16$ (12)

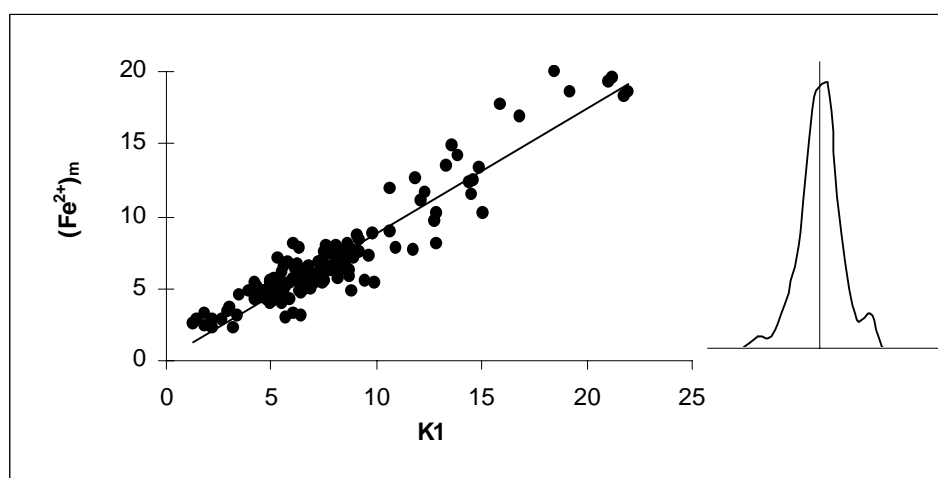


Рис. I.I.3.6 орх (формула GLOP5). Зависимость содержаний Fe²⁺_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = 20Mg_{op}:Si_m - Al_m:2$$

$$Mg_m = 1.81K_1 - 2.73(GLOP7a)$$

Диапазон значений Mg 1.1–28.11 (атом. %)

Относительная ошибка 200–7.8 %

R = 0.92; N = 153; N₁ = 153; сигма = 2.2; $\chi^2 = 1.57$ (12)

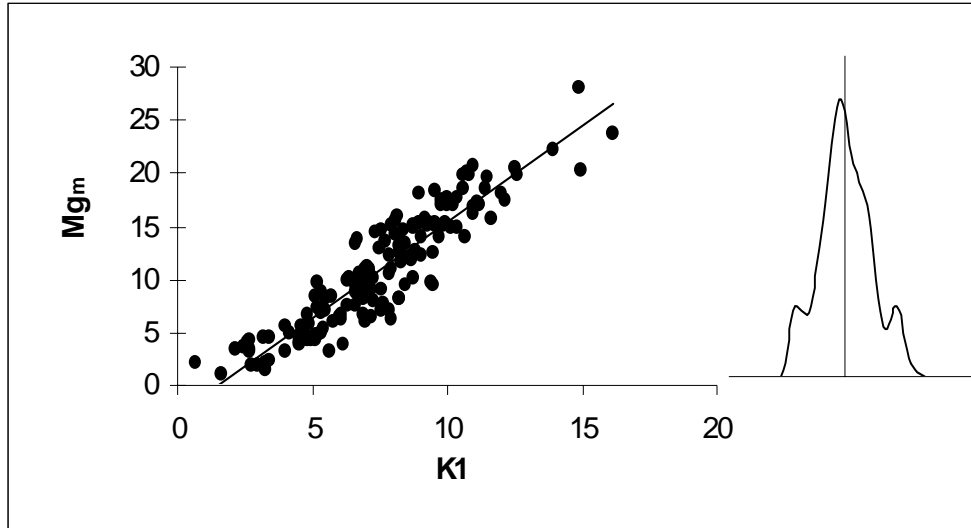


Рис. I.I.3.7 орх (формула GLOP7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{op}(Na_m + K_m):6 + 4Fe^{2+}_{op} + 20Cr_{op}$$

$$Mg_m = -0.18K_1 + 23.26(GLOP7b)$$

Диапазон значений Mg 1.1–24 (атом. %)

Относительная ошибка 210–9.6 %

R = -0.9; N = 153; N₁ = 152; сигма = 2.3; $\chi^2 = 3.24$ (12)

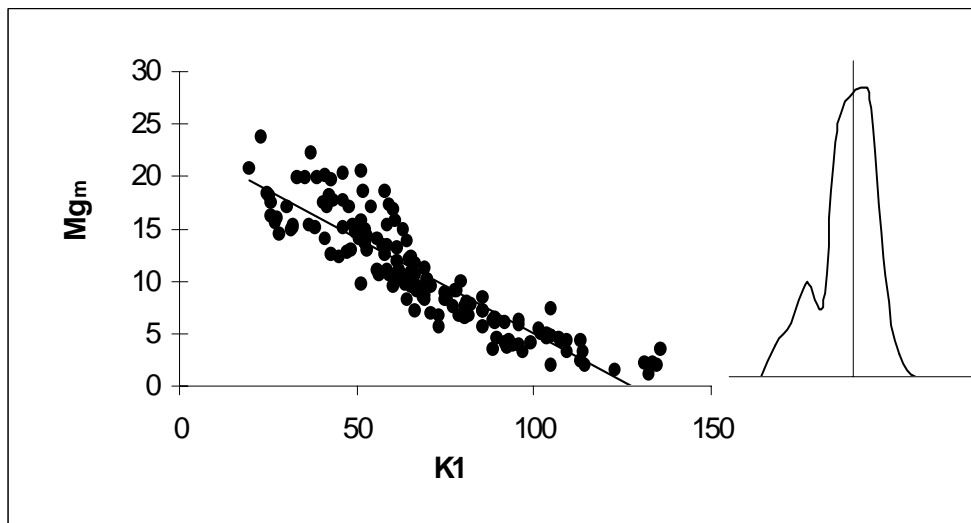


Рис. I.I.3.8 орх (формула GLOP7b). Зависимость содержаний Mg_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{op}T:900 + Fe^{2+}_{op}$$

$$Mg_m = 1.04K_1 - 52.39(GLOP7c)$$

Диапазон значений Mg 1.1–28.1 (атом. %)

Относительная ошибка 200–7.8 %

$R = 0.92$; $N = 153$; $N_1 = 152$; $\sigma = 2.1$; $\chi^2 = 1.57$ (12)

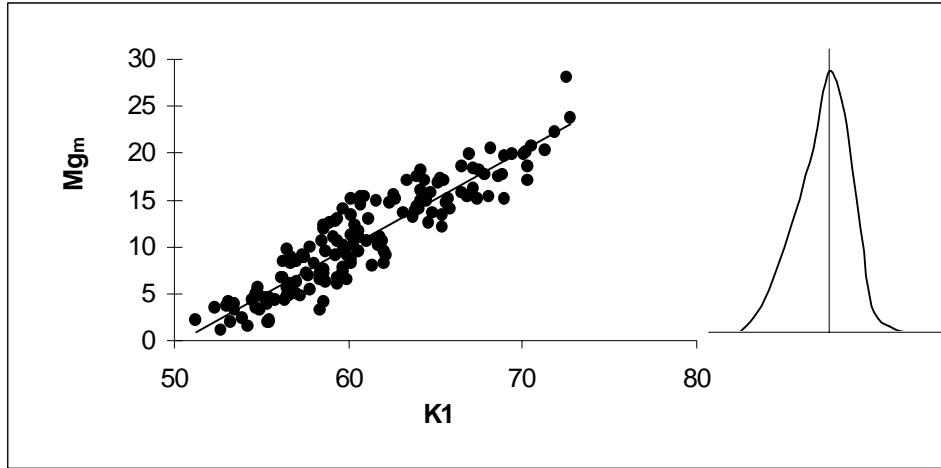


Рис. I.I.3.9 орх (формула GLOP7c). Зависимость содержаний Mg_m от состава ортопироксена, температуры расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Величина среднеквадратичного отклонения при расчетах содержания магния по трем выше приведенным формулам лежит в интервале 2.5–3.2, среднеарифметическая величина ошибки 2.8.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Mg_m:6 + (K_m + Na_m):3 + Si_m:3 + T:300 + Al_m:6 + Fe^{2+}_{op} + Mg_{op}:2 - Ca_{op}$$

$$Ca_m = -0.82K_1 + 52.39(GLOP8)$$

Диапазон значений Ca 2–13.7 (атом. %)

Относительная ошибка 55–8 %

$R = -0.9$; $N = 153$; $N_1 = 152$; $\sigma = 1.1$; $\chi^2 = 1.17$ (12)

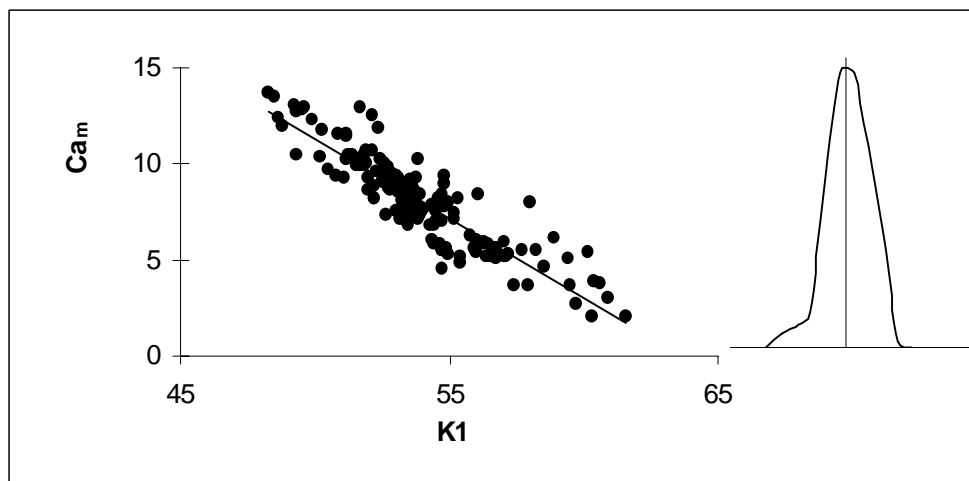


Рис. I.I.3.10 орх (формула GLOP8). Зависимость содержаний Ca_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний хрома в расплаве

$$K_1 = (Cr_{op}Mg_m T:1000 + Fe^{2+}_{op}:5 - Mg_{op}:3):10$$

$$Cr_m = 0.32K_1 + 0.35(GLOP11)$$

Диапазон значений Cr 0.007–0.69 (атом. %)

Относительная ошибка 1300–13 %

R = 0.85; N = 106; N₁ = 106; сигма = 0.09; $\chi^2 = 2.46$ (12)

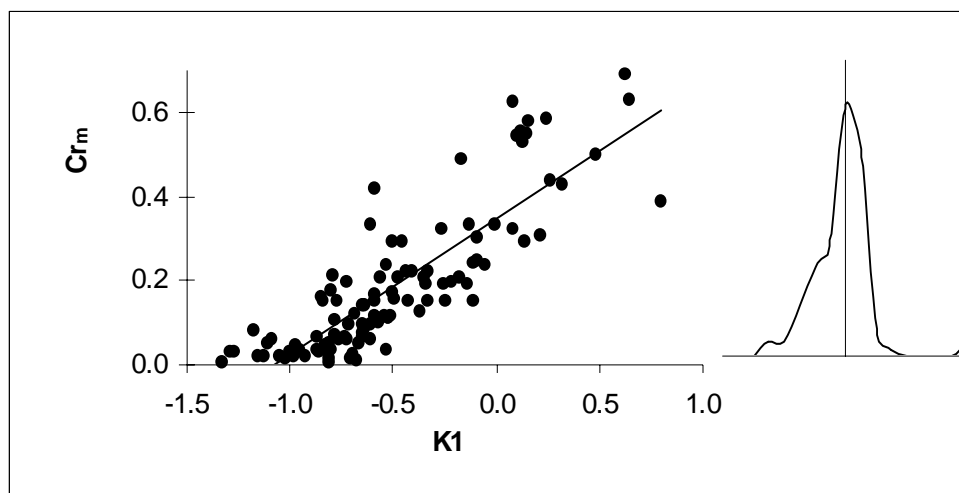


Рис. I.I.3.11 орх (формула GLOP11). Зависимость содержаний Cr_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет величины железо(2+)-магниевого отношения в расплаве

$$K_1 = (Fe^{2+}/Mg)_{op}; K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_m$$

$$K_2 = 3.49K_1 + 0.02(GLOP14a)$$

Диапазон значений K₂ 0.2–2.2

Относительная ошибка 70–6.4 %

R = 0.95; N = 153; N₁ = 149; сигма = 0.14; $\chi^2 = 8.09$ (12)

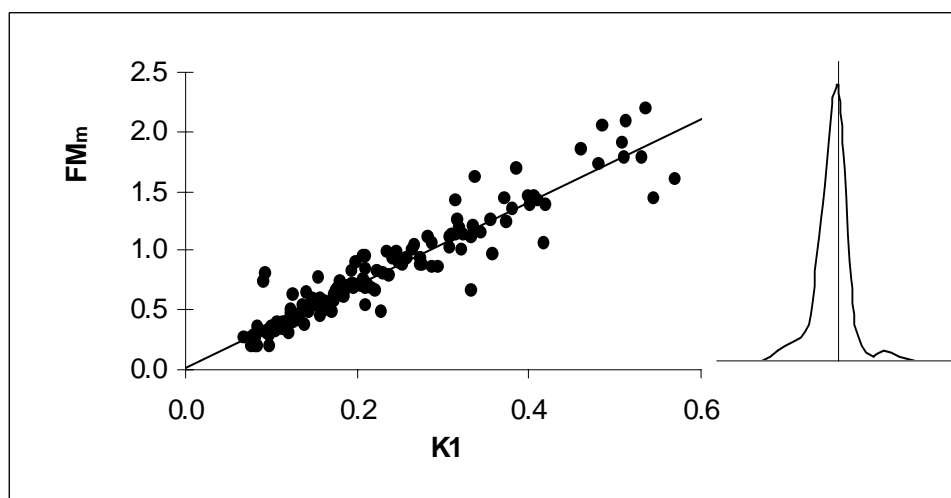


Рис. I.I.3.12 орх (формула GLOP14a). Зависимость величины $(Fe^{2+}/Mg)_m$ от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}_{\text{op}}\text{Si}_m:10\text{Mg}_{\text{op}})(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{op}}; K_2 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_m$$

$$K_2 = 0.63K_1 + 0.04(\text{GLOP14b})$$

Диапазон значений K_2 0.2–2.2

Относительная ошибка 60–5.5%

$$R = 0.96; N = 153; N_1 = 147; \text{сигма} = 0.12; \chi^2 = 5.58 \text{ (12)}$$

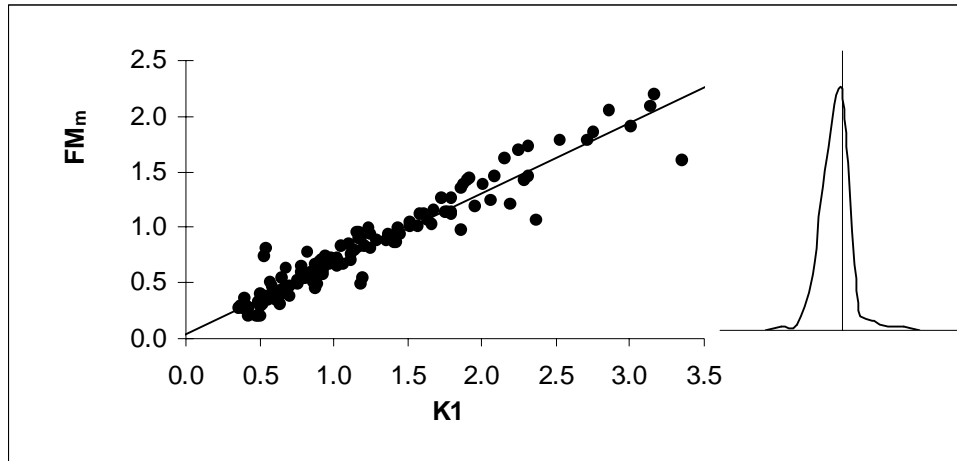


Рис. I.I.3.13 орх (формула GLOP14b). Зависимость величины $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_m$ от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{op}} + (K_m + \text{Na}_m):110; K_2 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_m$$

$$K_2 = 3.26K_1 - 0.06(\text{GLOP14c})$$

Диапазон значений K_2 0.2–2.2

Относительная ошибка 60–5.5 %

$$R = 0.96; N = 153; N_1 = 147; \text{сигма} = 0.12; \chi^2 = 2.11 \text{ (12)}$$

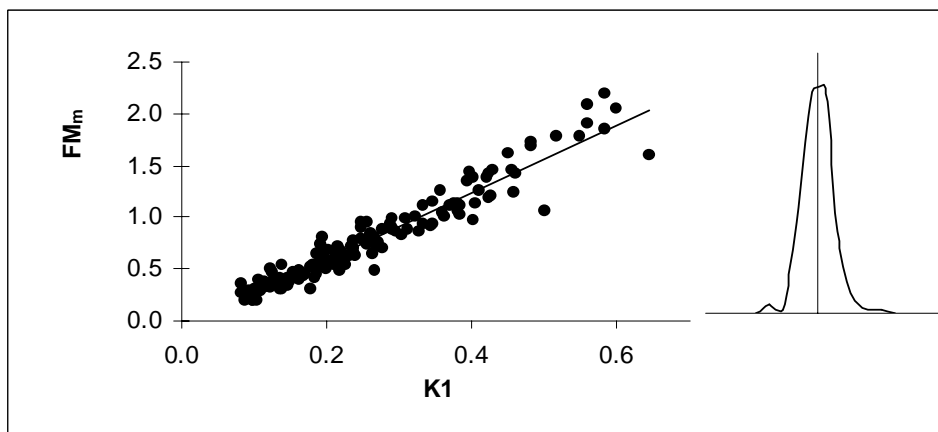


Рис. I.I.3.14 орх (формула GLOP14c). Зависимость величины $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_m$ от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Диапазон значений величины $K_D = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{ol}}:(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_m$ лежит в интервале 0.12–0.5 K_D (среднее арифметическое) = 0.29.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = 100Mg_m:Mg_{op}$$

$$T = 6.72K_1 + 817.83(GLOPTa)$$

Диапазон значений T 1050–1390 °C

Относительная ошибка 2.8–2 %

$R = 0.93$; $N = 153$; $N_1 = 152$; сигма = 29 °C; $\chi^2 = 1.23$ (12)

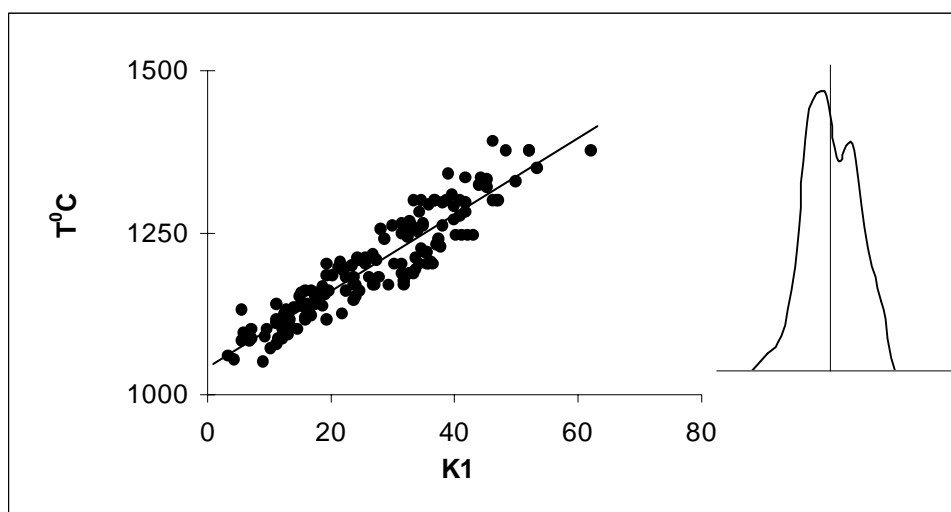


Рис. I.I.3.15 орх (формула GLOPTa). Зависимость значения T от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100Mg_m:[Mg_{op} + 3(Al_{op} + Ca_{op})]$$

$$T = 6.38K_1 + 1054.36(GLOPTb)$$

Диапазон значений T 1050–1390 °C

Относительная ошибка 2.3–1.8 %

$R = 0.95$; $N = 153$; $N_1 = 151$; сигма = 24.4 °C; $\chi^2 = 1.6$ (12)

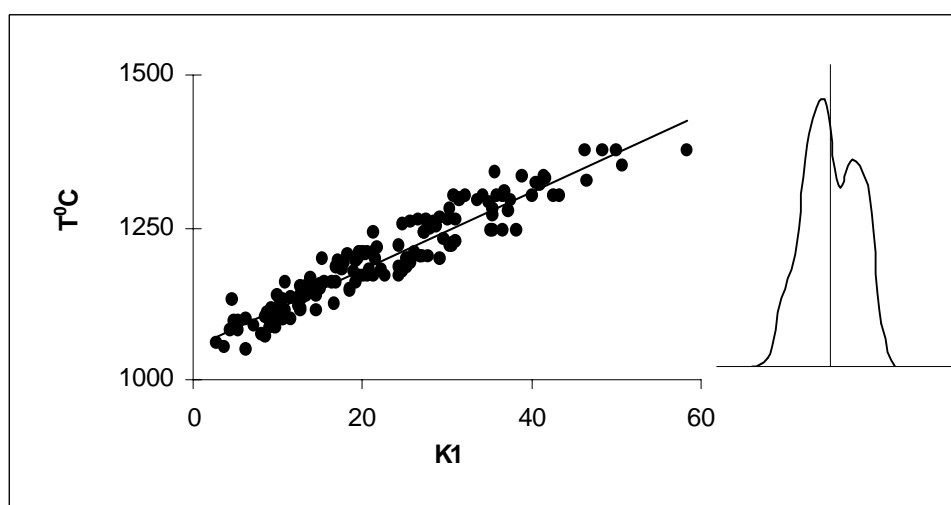


Рис. I.I.3.16 орх (формула GLOPTb). Зависимость значения T от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100Mg_m:[Mg_{op} + 3(Al_{op} + Ca_{op})] + Si_m \cdot 4$$

$$T = 6.75K_1 + 956.5(GLOPTc)$$

Диапазон значений T 1050–1375 °C

Относительная ошибка 2.2–1.7 %

R = 0.95; N = 153; N₁ = 151; сигма = 23.2 °C; $\chi^2 = 0.51$ (12)

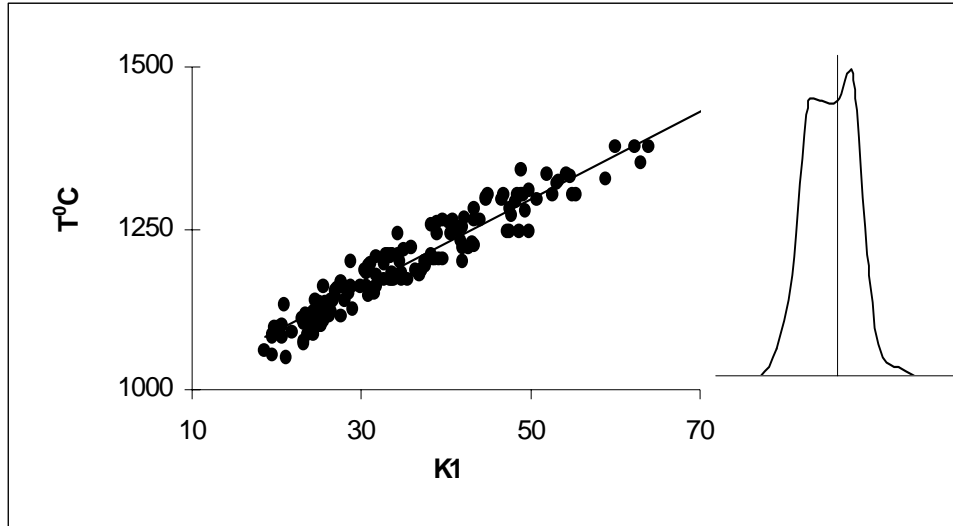


Рис. I.I.3.17 орх (формула GLOPTc). Зависимость значения T от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100Mg_m:[Mg_{op} + 3(Al_{op} + Ca_{op})] - Ti_m$$

$$T = 6.35K_1 + 1060.12(GLOPTd)$$

Диапазон значений T 1050–1375 °C

Относительная ошибка 2.1–1.6%

R = 0.96; N = 153; N₁ = 151; сигма = 21.8⁰C; $\chi^2 = 2$ (12)

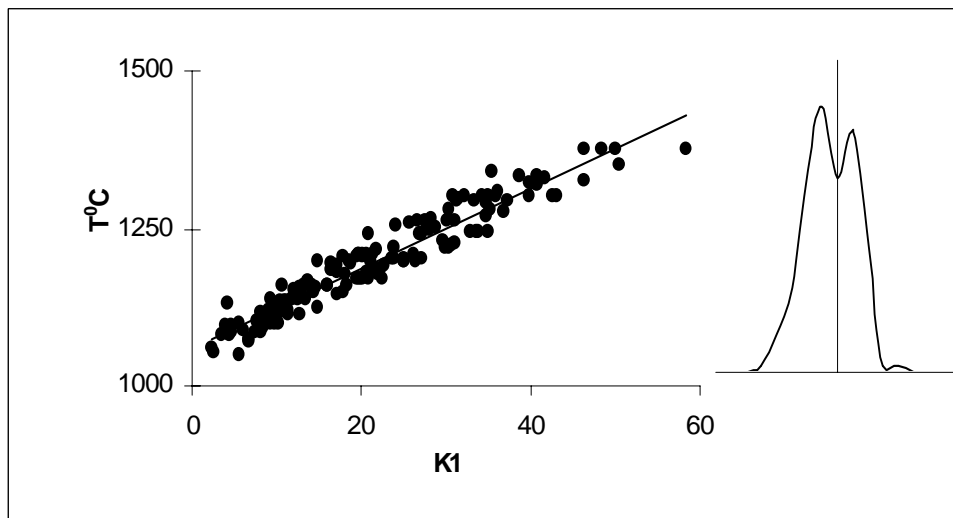


Рис. I.I.3.18 орх (формула GLOPTd). Зависимость значения T от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100Mg_m:[Mg_{op} + 3(Al_{op} + Ca_{op})] - (K_m + Na_m):2$$

$$T = 5.56K_1 + 1085.68 \text{ (GLOPTe)}$$

Диапазон значений T 1050–1375 °C

Относительная ошибка 2.5–1.9 %

R = 0.94; N = 153; N₁ = 151; сигма = 26.4 °C; $\chi^2 = 3.55$ (12)

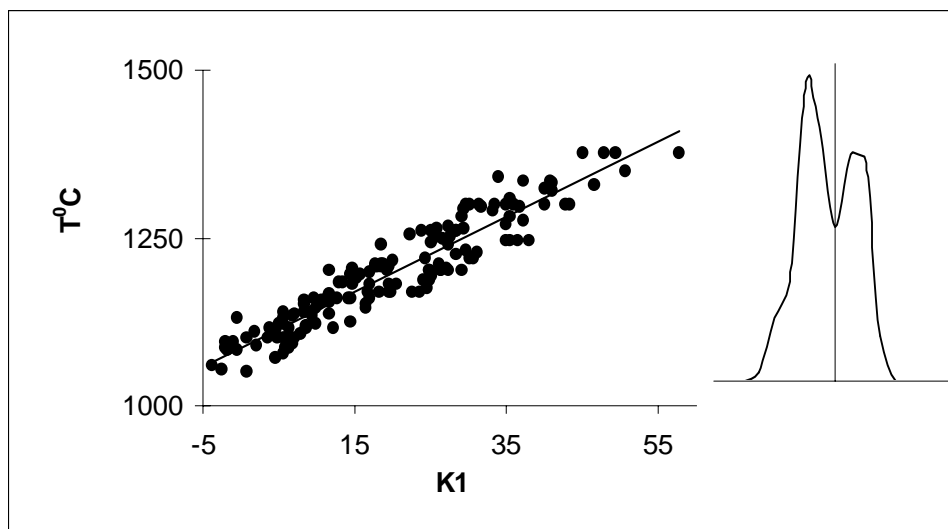


Рис. I.I.3.19 орх (формула GLOPTe). Зависимость значения T от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 10Fe^{2+}_m:(Fe^{2+}_{op} + 2Ti_{op})$$

$$T = 18.03K_1 + 1037.66 \text{ (GLOPTf)}$$

Диапазон значений T 1050–1390 °C

Относительная ошибка 3–2.3 %

R = 0.92; N = 153; N₁ = 149; сигма = 31.5 °C; $\chi^2 = 2$ (12)

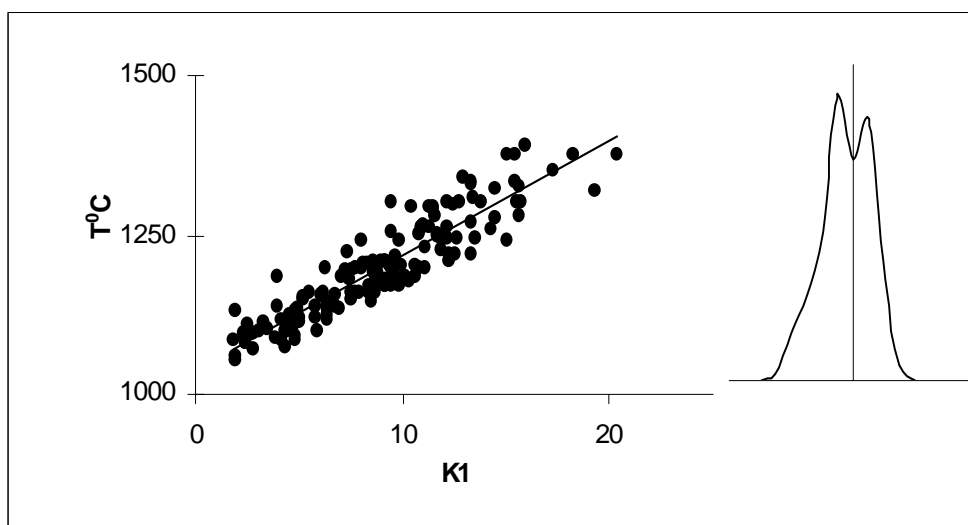


Рис. I.I.3.20 орх (формула GLOPTf). Зависимость значения T от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 10Fe_m^{2+}:(Fe_{op}^{2+} + 2Ti_{op}) + Si_{op}:4 + Mg_{op}:2 - Ti_m:2 - Al_m:3 - Ca_m:4$$

$$T = 12.68K_1 + 775.56(GLOPTh)$$

Диапазон значений T 1050–1375 °C

Относительная ошибка 2.3–1.7 %

$$R = 0.95; N = 153; N_1 = 150; \text{сигма} = 23.8 \text{ } ^\circ\text{C}; \chi^2 = 1.96 \text{ (12)}$$

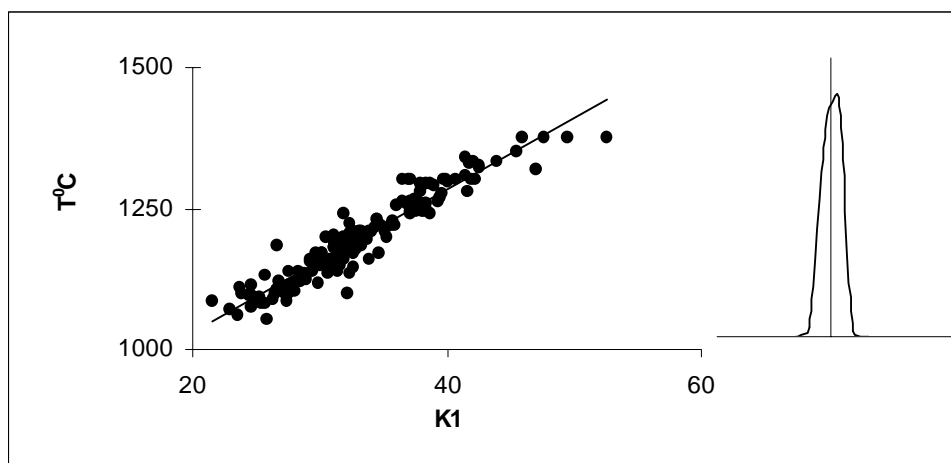


Рис. I.I.3.21 орх (формула GLOPTh). Зависимость значения T от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{op}:Fe_{op}^{2+} - 16Ti_{op} - 4Ca_{op} + 5Cr_{op}$$

$$T = 10.31K_1 + 1195.84(GLOPTi)$$

Диапазон значений T 1050–1390 °C

Относительная ошибка 3.4–2.6 %

$$R = 0.88; N = 153; N_1 = 149; \text{сигма} = 35.9 \text{ } ^\circ\text{C}; \chi^2 = 4.11 \text{ (12)}$$

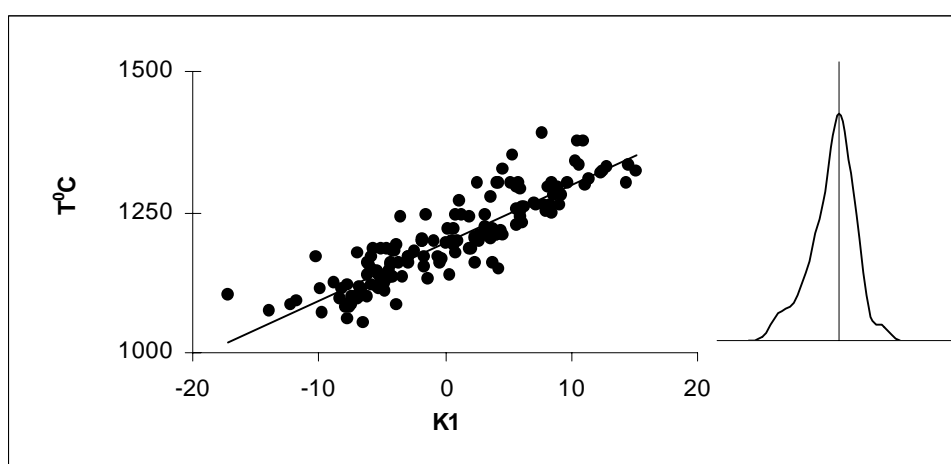


Рис. I.I.3.22 орх (формула GLOPTi). Зависимость значения T от состава ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по восьми выше приведенным формулам составляет сигма < 21 °C.

1.4. Система расплав–клинопироксен

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [2; 4; 5; 6; 8; 9; 12; 13; 14; 20; 24; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 48; 54; 65; 67; 68; 69; 70; 71; 77; 80; 81; 82; 83; 86; 87; 88; 90; 91; 92; 96; 98; 100; 131; 132; 169; 172; 173; 176; 177; 178; 189; 190; 193; 194; 236; 255; 261; 263; 280; 281; 282; 291; 294; 305; 332; 347; D1].

Используемые данные: общее число точек – 594 парных анализов. После исключения анализов составов авгитов и стекол с суммами окислов менее 98 % и более 102 % – 528 т. Для расчета содержания титана в расплаве были отброшены точки с нулевыми концентрациями его в расплаве и авгите – 457 т. Для расчета содержаний железа в расплаве были исключены точки с нулевыми содержаниями железа в расплаве – 511 т. Для расчета содержаний Fe^{2+} в расплаве было использовано 468 т., где приводятся значения фугитивности кислорода. Для расчета содержаний марганца в расплаве были исключены точки с нулевыми содержаниями марганца в расплаве и авгите – 308 т. Для расчета содержаний натрия были отброшены точки с нулевыми содержаниями элемента в расплаве и авгите – 476 т. Для расчета содержаний калия были отброшены точки с нулевыми содержаниями элемента в расплаве и авгите – 103 т. Для расчета содержаний хрома были отброшены точки с нулевыми значениями концентраций в расплаве и авгите – 175 т. Для расчета железо-магниевого отношения были отброшены точки с нулевыми значениями отношения – 511 т. Для расчета железо-магниевого отношения в традиционном диапазоне были исключены точки со значениями железо-магниевого отношения в расплаве в диапазоне 10–25, осталось 506 т. Для расчета железо-магниевого отношения в интервале 0.27–6.1, где приводятся оценки значений фугитивности кислорода, использовано 464 т. Для расчета равновесия внутри кристаллов были использованы 2 массива данных: первый – 528 т., второй – 523 т., в котором были отброшены эксперименты с авгитом, содержащим < 38 % (атом.) кремния.

Таблица I.I.4.1 срх. Диапазоны составов стекол (расплавов) и клинопироксенов (авгитов) в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

GLAV	Расплав	T °C	1025–1350	Авгит			
SiO ₂	37.66–69.86	Si	35.9–67.3	SiO ₂	32.65–56.4	Si	32.14–49.96
TiO ₂	0.12–9.8	Ti	0.08–7.55	TiO ₂	0.03–4.84	Ti	0.02–3.53
Al ₂ O ₃	3.9–25.66	Al	4.7–27.64	Al ₂ O ₃	0.4–15.13	Al	0.48–17.12
FeO	0.49–34.14	Fe	0.37–30.47	FeO	2.47–29.4	Fe	1.82–25.6
MnO	0.04–1.59	Mn	0.03–1.34	MnO	0.02–0.69	Mn	0.02–0.55
MgO	0.11–15.1	Mg	0.15–20.69	MgO	3.5–24	Mg	5.43–32.6
CaO	1.98–27.15	Ca	2.01–26.02	CaO	4.4–25.6	Ca	4.3–24.69
Na ₂ O	0.01–10.51	Na	0.02–17.39	Na ₂ O	0.01–0.87	Na	0.02–1.55
K ₂ O	0.01–7.88	K	0.01–9.35	K ₂ O	0.01–0.45	K	0.01–0.53
Cr ₂ O ₃	0.01–0.48	Cr	0.01–0.38	Cr ₂ O ₃	0.01–1.28	Cr	0.01–0.94

En 11.01–67.14 Wo 8.85–56.16 Fs 3.69–51.9

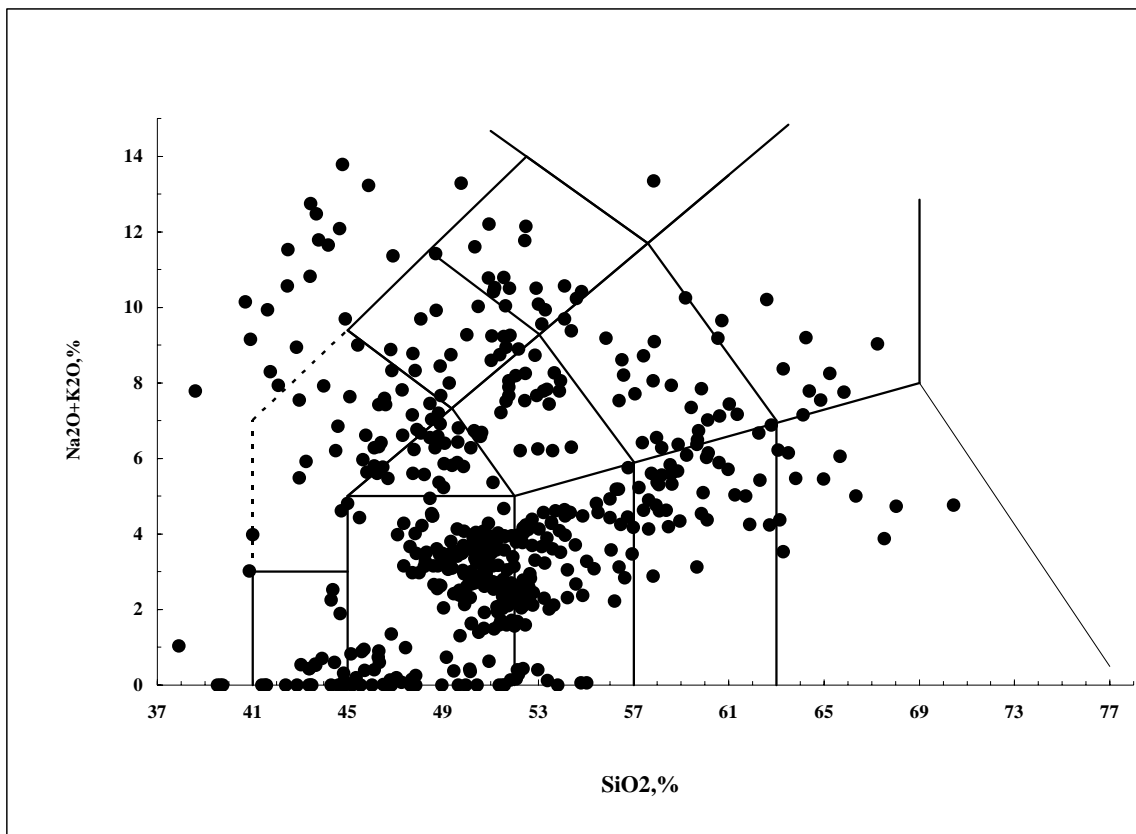


Рис. I.I.4.1 срх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами клинопироксена, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = \ln(2Ca_m + Ca_{av} + 2Al_{av} - Si_{av}:2 - Fe^{2+}_{av} + 2Fe^{2+}_m + Al_m)$$

$$Si_m = -13.97K_1 + 102.02(\text{GLAV1a})$$

Диапазон значений Si 36–65 (атом. %)

Относительная ошибка 5.5–3.1 %

$R = -0.91$; $N = 528$; $N_1 = 523$; $\sigma = 2$; $\chi^2 = 3.3$ (16)

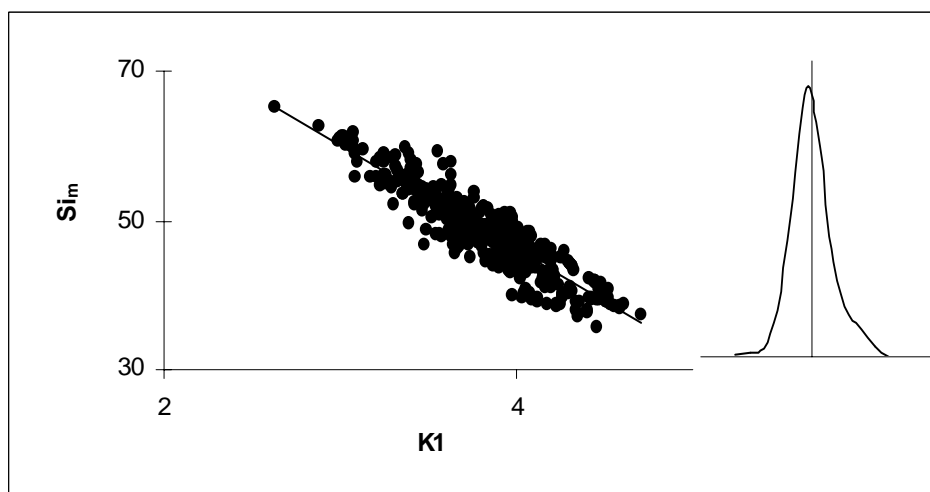


Рис. I.I.4.2 срх (формула **GLAV1a**). Зависимость содержаний Si_m от состава авгита, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Ln}(3\text{Ca}_m + \text{Ca}_{\text{av}} + 2\text{Al}_{\text{av}} - \text{Si}_{\text{av}}:6 - \text{Fe}^{2+}_{\text{av}}:3 - \text{Mg}_{\text{av}}:3 + 1)$$

$$\text{Si}_m = -11.98K_1 + 92.27(\text{GLAV1b})$$

Диапазон значений Si 36–65 (атом. %)

Относительная ошибка 6.1–3.4 %

$R = -0.89$; $N = 528$; $N_1 = 523$; $\sigma = 2.2$; $\chi^2 = 3.53$ (16)

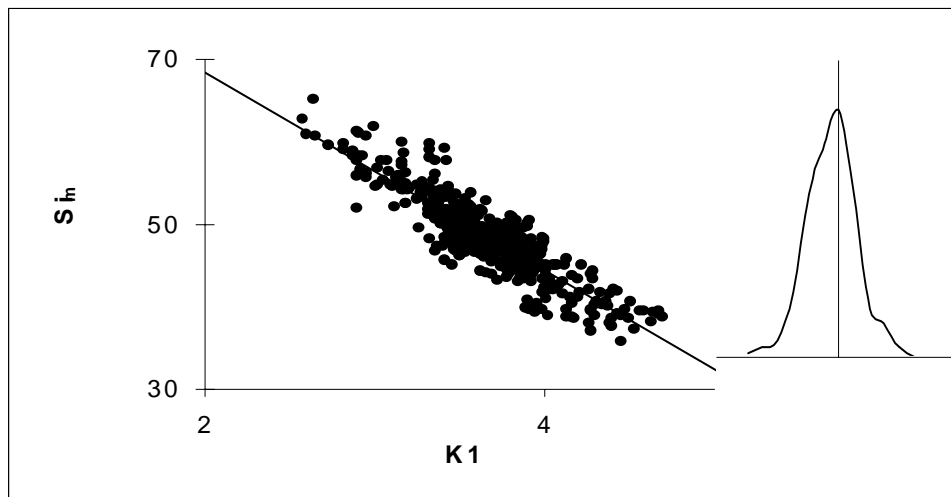


Рис. I.I.4.3 сrx (формула **GLAV1b**). Зависимость содержаний **Si_m** от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет $\sigma < 2$.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = \text{Ti}_{\text{av}}\text{T}:\text{Al}_{\text{av}}\text{Si}_m - (\text{Na}_m + \text{K}_m):5 - \text{Si}_m:6 + \text{Fe}^{2+}_m:7$$

$$\text{Ti}_m = 0.22K_1 + 2.48(\text{GLAV2a})$$

Диапазон значений Ti 0.1–6.7 (атом. %)

Относительная ошибка 600–9 %

$R = 0.83$; $N = 457$; $N_1 = 449$; $\sigma = 0.6$; $\chi^2 = 2.6$ (12)

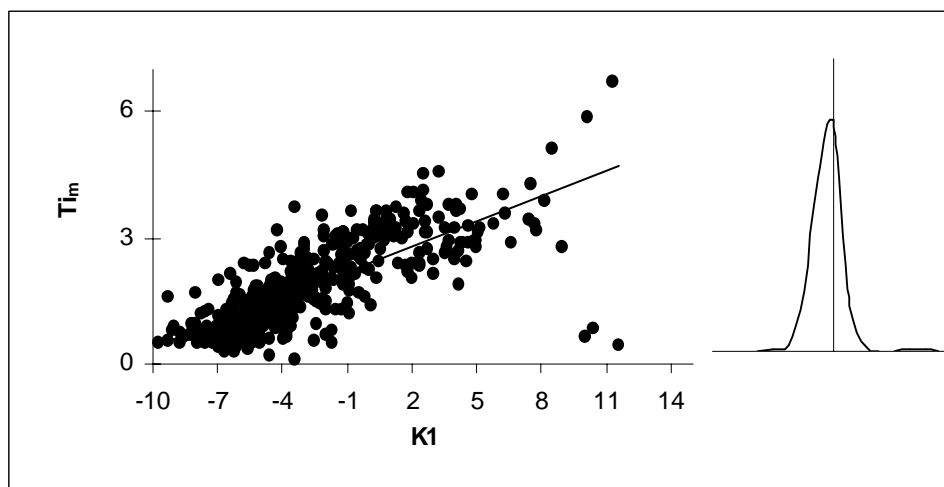


Рис. I.I.4.4 сrx (формула **GLAV2a**). Зависимость содержаний **Ti_m** от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Ti_{av}TMg_{av}:900 - 3Al_{av} + Fe^{2+}_{av}:2 - Si_m:2 + Fe^{2+}_m$$

$$Ti_m = 0.68K_1 + 2.07(GLAV2b)$$

Диапазон значений Ti_m 0.2–6.7 (атом. %)

Относительная ошибка 540–8 %

$R = 0.85$; $N = 457$; $N_1 = 450$; $\sigma = 0.54$; $\chi^2 = 3.28$ (12)

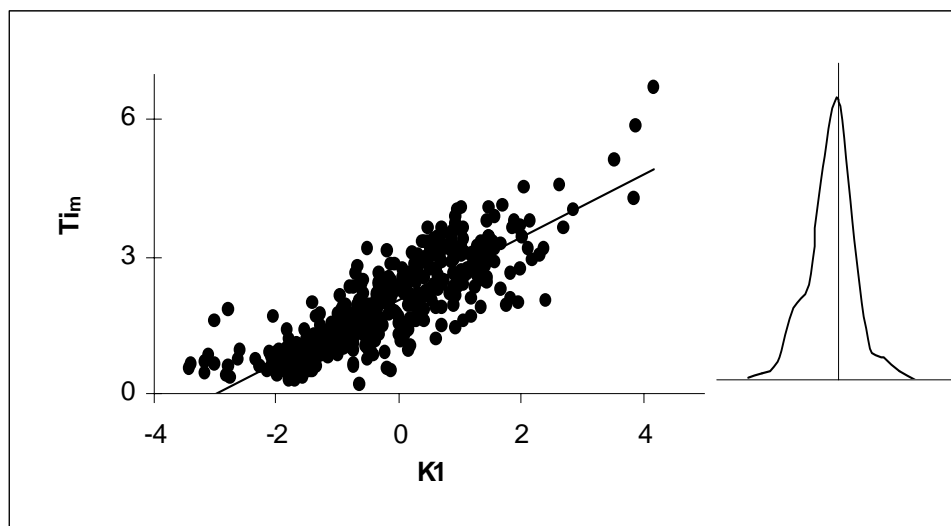


Рис. I.I.4.5 срх (формула GLAV2b). Зависимость содержаний Ti_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Fe^{2+}_{av}:3 + Mg_{av}:3 - Al_{av} + Fe^{2+}_m + Ti_m:2$$

$$Al_m = -0.36K_1 + 20.52(GLAV3a)$$

Диапазон значений Al_m 4.7–24 (атом. %)

Относительная ошибка 27.6–5.4 %

$R = -0.89$; $N = 528$; $N_1 = 518$; $\sigma = 1.3$; $\chi^2 = 2.69$ (16)

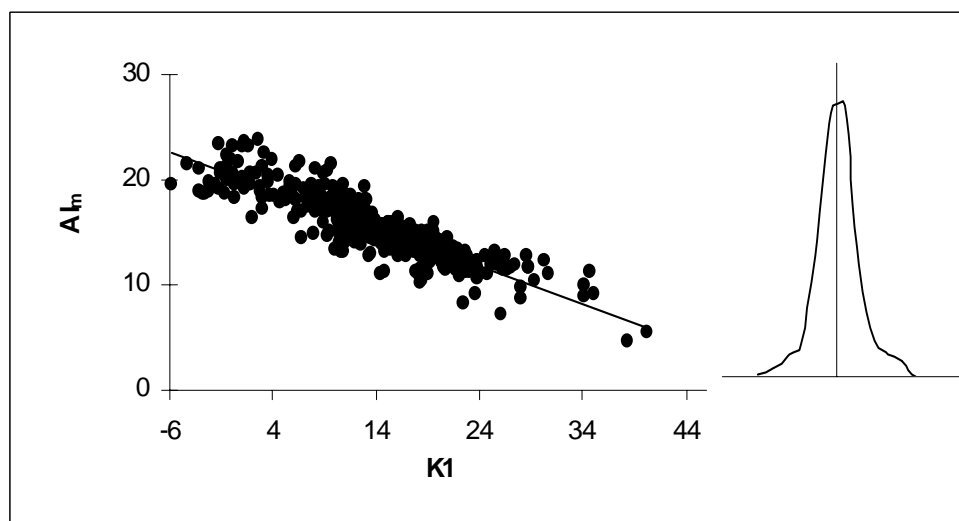


Рис. I.I.4.6 срх (формула GLAV3a). Зависимость содержаний Al_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe_{av}^{2+} - Al_{av} + Mg_m - Si_m \cdot 9$$

$$Al_m = -0.52K_1 + 17.84 \text{ (GLAV3b)}$$

Диапазон значений Al_m 4.7–24 (атом. %)

Относительная ошибка 32–6.3 %

$R = -0.86$; $N = 528$; $N_1 = 523$; сигма = 1.5; $\chi^2 = 5.15$ (16)

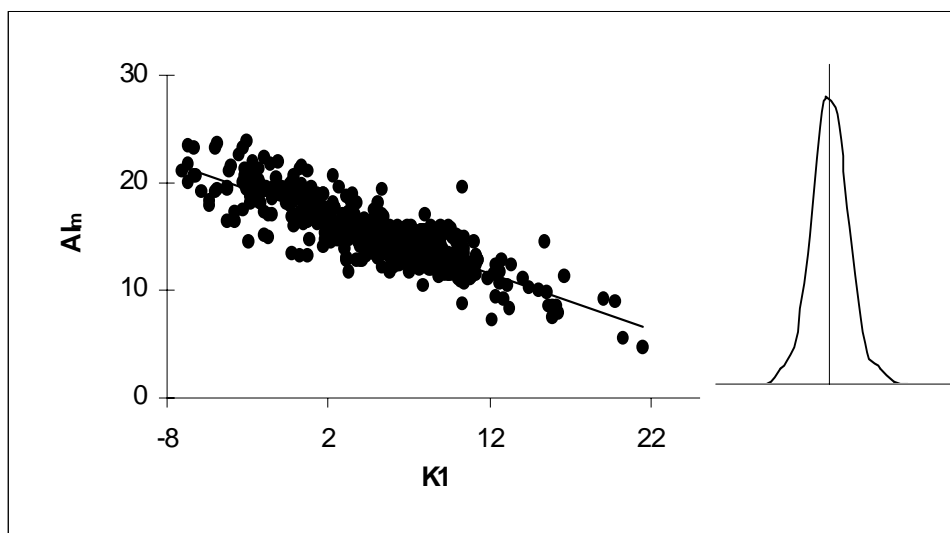


Рис. I.I.4.7 сrx (формула GLAV3b). Зависимость содержаний Al_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{av} \cdot 6 + Al_{av} - Fe_{av}^{2+} \cdot 2 - Ti_m \cdot 2 - Ca_m \cdot 2$$

$$Al_m = 0.73K_1 + 13.64 \text{ (GLAV3c)}$$

Диапазон значений Al_m 4.7–24 (атом. %)

Относительная ошибка 26.8–5.3 %

$R = 0.89$; $N = 528$; $N_1 = 517$; сигма = 1.26; $\chi^2 = 1.08$ (16)

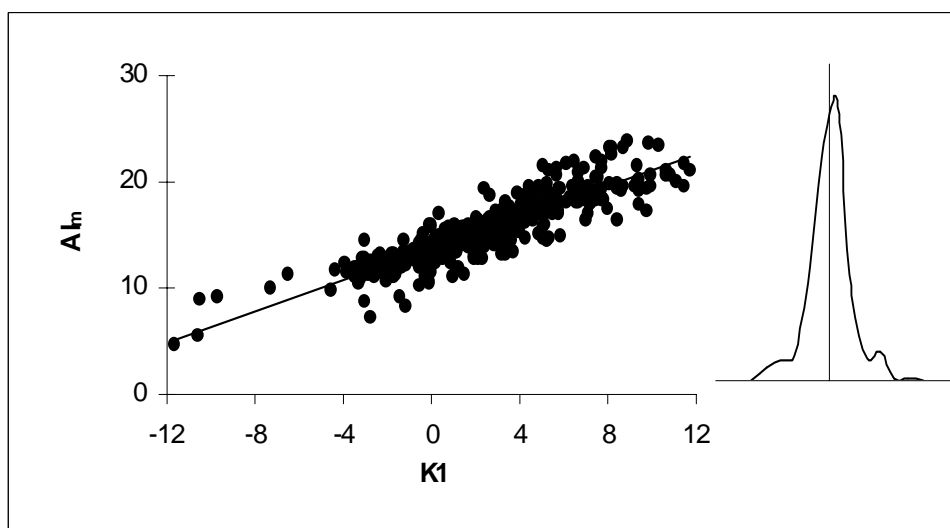


Рис. I.I.4.8 сrx (формула GLAV3c). Зависимость содержаний Al_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{av}:6 + Al_{av} - Fe^{2+}_{av}:2 - Ti_m:2 + (K_m + Na_m):2$$

$$Al_m = 0.52K_1 + 9.59(GLAV3d)$$

Диапазон значений Al_m 4.7–24 (атом. %)

Относительная ошибка 25.5–5 %

$R = 0.89$; $N = 528$; $N_1 = 517$; $\sigma = 1.2$; $\chi^2 = 5.45$ (16)

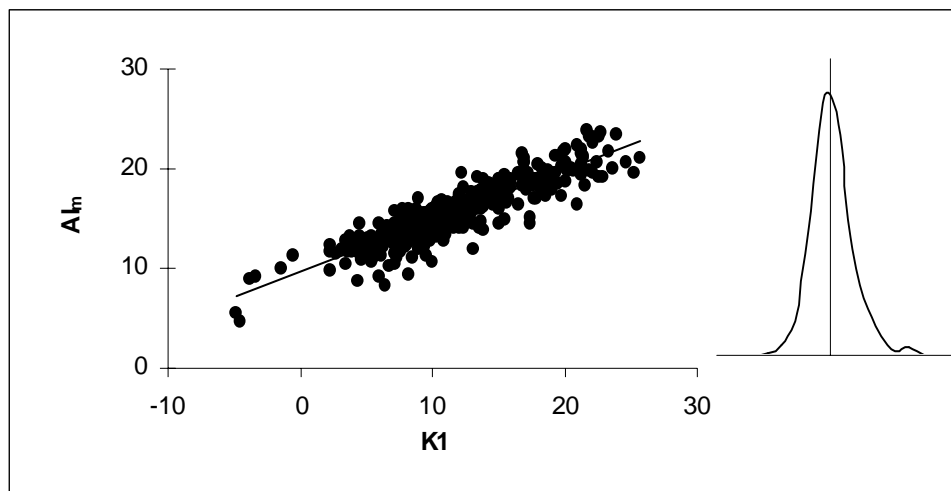


Рис. I.I.4.9 срх (формула GLAV3d). Зависимость содержаний Al_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по четырем выше приведенным формулам составляет $\sigma < 1$.

Расчет содержаний железа двухвалентного в расплаве

$$K_1 = Fe^{2+}_{av} + Si_{av} + Al_{av}:3 + 7Cr_{av} - Si_m:2 - Al_m:2$$

$$Fe^{2+}_m = 0.76K_1 - 10.43(GLAV5)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 0.35–28 (атом. %)

Относительная ошибка 490–6%

$R = 0.9$; $N = 511$; $N_1 = 502$; $\sigma = 1.7$; $\chi^2 = 1.59$ (16)

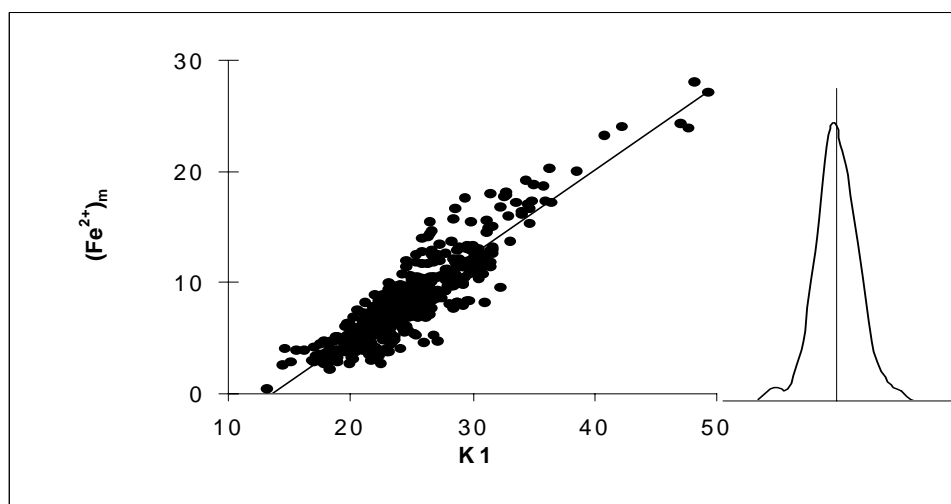


Рис. I.I.4.10 срх (формула GLAV5). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{av} + Si_{av} + Al_{av}:3 + 7Cr_{av} - Si_m:2 - Al_m:2$$

$$Fe^{2+}_m = 0.73K_1 - 9.68(\text{GLAV5a})$$

Диапазон значений Fe^{2+} 0.35–28 (атом. %)

Относительная ошибка 490–6%

$R = 0.9$; $N = 468$; $N_1 = 460$; сигма = 1.6; $\chi^2 = 4.27$ (12)

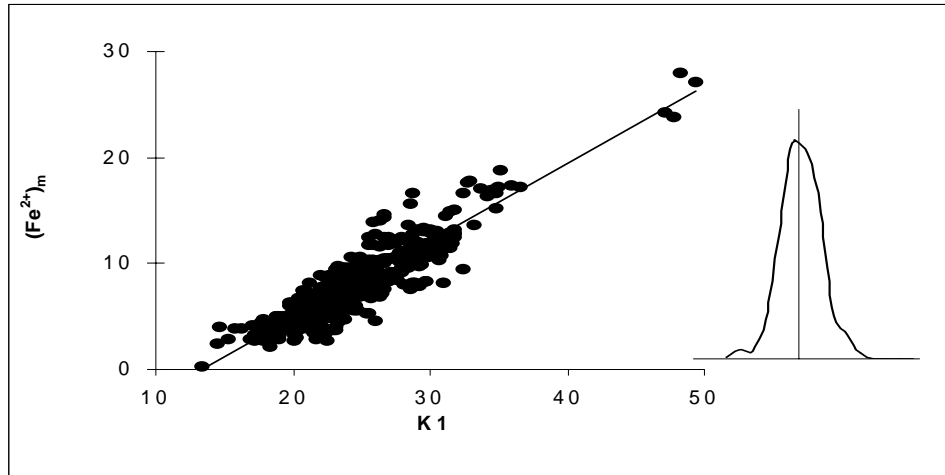


Рис. I.I.4.11 срх (формула **GLAV5a**). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Формула (**GLAV5a**) выведена для рассчитанных значений Fe^{2+}_m (эксперименты с контролируемыми значениями фугитивности, 468 т.) и практически идентична формуле (**GLAV5**), для расчета которой были исключены только точки с нулевыми значениями железомангниевого отношения в расплаве (511 т.).

Расчет содержаний марганца в расплаве

$$K_1 = Mn_{av}Ca_{av}Ca_m:20$$

$$Mn_m = 0.1K_1 + 0.03(\text{GLAV6})$$

Диапазон значений Mn 0.03–0.75 (атом. %)

Относительная ошибка 170–7 %

$R = 0.8$; $N = 308$; $N_1 = 305$; сигма = 0.05; $\chi^2 = 3.25$ (12)

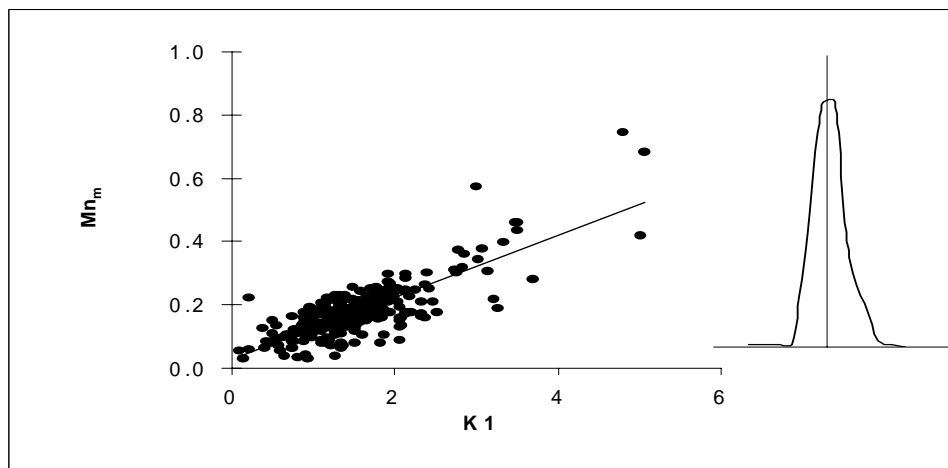


Рис. I.I.4.12 срх (формула **GLAV6**). Зависимость содержаний Mn_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Mg_{av}Ca_m \cdot 10 - Fe^{2+}_{av} \cdot 2 + T \cdot 30$$

$$Mg_m = 0.26K_1 - 7.51(GLAV7a)$$

Диапазон значений Mg 0.92–16.4 (атом. %)

Относительная ошибка 108–6.1 %

$R = 0.95$; $N = 528$; $N_1 = 516$; $\sigma = 1$; $\chi^2 = 4.05$ (16)

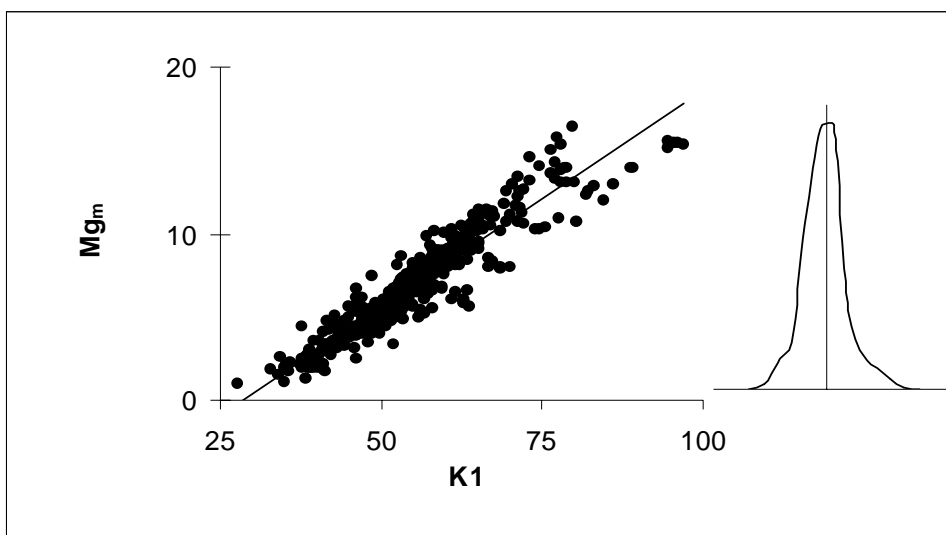


Рис. I.I.4.13 срх (формула GLAV7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава авгита, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{av}T \cdot 10Si_m - Al_m \cdot 2$$

$$Mg_m = 0.3K_1 - 5.51(GLAV7b)$$

Диапазон значений Mg 0.15–20.7 (атом. %)

Относительная ошибка 906–6.5 %

$R = 0.91$; $N = 528$; $N_1 = 524$; $\sigma = 1.36$; $\chi^2 = 2.83$ (16)

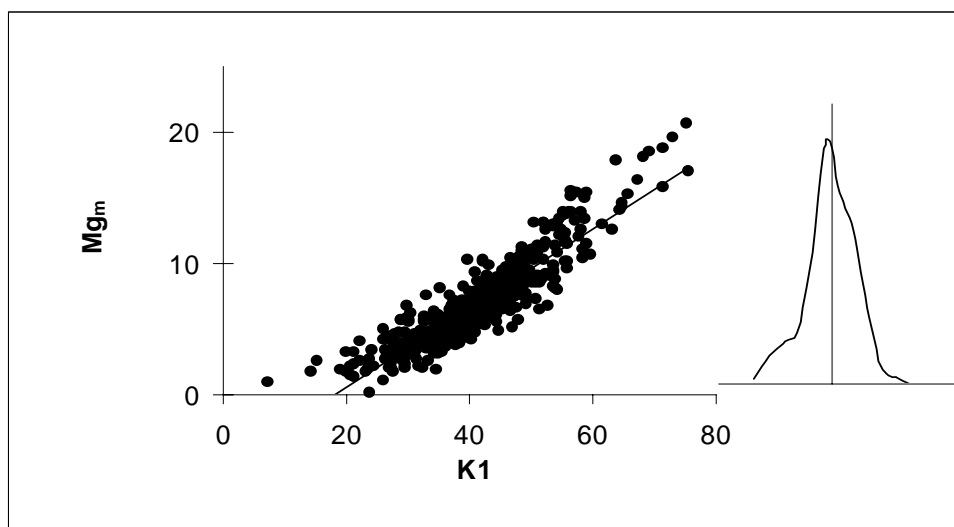


Рис. I.I.4.14 срх (формула GLAV7b). Зависимость содержаний Mg_m от состава авгита, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{av}T:10Si_m - (K_m + Na_m):2$$

$$Mg_m = 0.27K_1 - 5.21(GLAV7c)$$

Диапазон значений Mg 0.15–18.7 (атом. %)

Относительная ошибка 787–6.3 %

R = 0.93; N = 528; N₁ = 519; сигма = 1.18; $\chi^2 = 1.86$ (16)

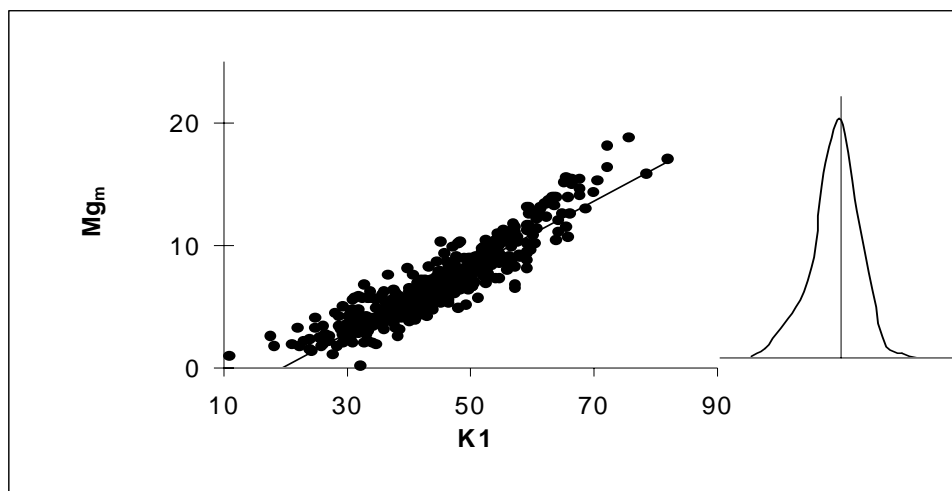


Рис. I.I.4.15 срх (формула GLAV7c). Зависимость содержаний Mg_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по трем выше приведенным формулам составляет сигма ~1.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Ln[Fe^{2+}_{av} - Ca_{av}:3 + 20(K_{av} + Na_{av}) + Si_m]$$

$$Ca_m = -19.58K_1 + 90.89(GLAV8a)$$

Диапазон значений Ca 2–26 (атом. %)

Относительная ошибка 75–5.8 %

R = -0.91; N = 528; N₁ = 522; сигма = 1.5; $\chi^2 = 3.98$ (16)

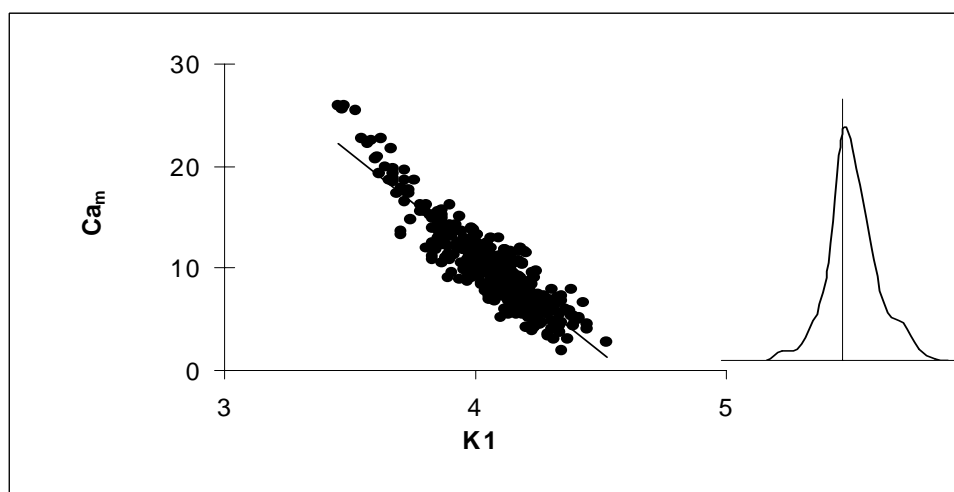


Рис. I.I.4.16 срх (формула GLAV8a). Зависимость содержаний Ca_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Ln}[\text{Fe}_{\text{av}}^{2+} - \text{Ca}_{\text{av}} \cdot 3 + 20(\text{K}_{\text{av}} + \text{Na}_{\text{av}}) + \text{Si}_{\text{m}} + (\text{K}_{\text{m}} + \text{Na}_{\text{m}}) \cdot 2]$$

$$\text{Ca}_{\text{m}} = -19.02K_1 + 88.59(\text{GLAV8b})$$

Диапазон значений Ca 2–26 (атом. %)

Относительная ошибка 62–4.8 %

$R = -0.94$; $N = 528$; $N_1 = 518$; $\text{сигма} = 1.24$; $\chi^2 = 4.51$ (16)

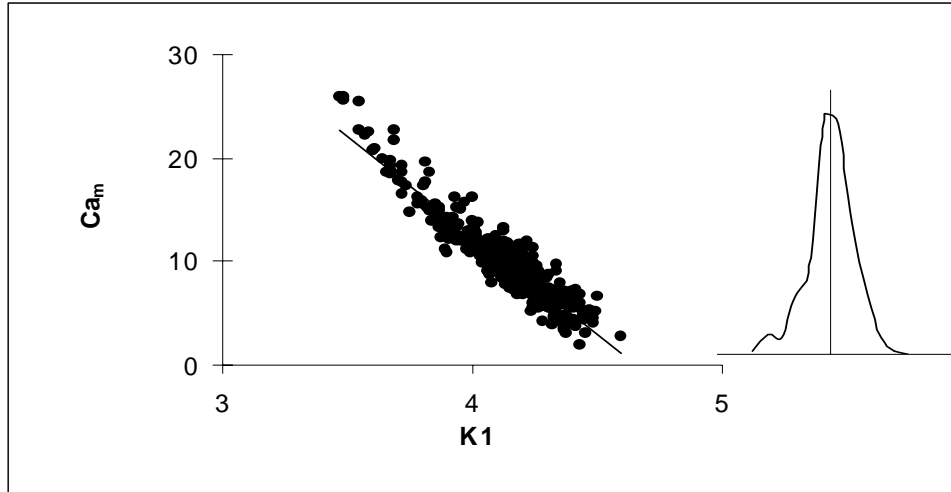


Рис. I.I.4.17 срх (формула GLAV8b). Зависимость содержаний Ca_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет сигма ~1.

Расчет содержаний натрия в расплаве

$$K_1 = \text{Na}_{\text{av}} \text{Ca}_{\text{av}} \cdot 2 + \text{Al}_{\text{m}} - \text{Ti}_{\text{m}} - \text{Mg}_{\text{m}}$$

$$\text{Na}_{\text{m}} = 0.3K_1 + 2.18(\text{GLAV9})$$

Диапазон значений Na 0.1–16.7 (атом. %)

Относительная ошибка 1530–9.2 %

$R = 0.81$; $N = 476$; $N_1 = 466$; $\text{сигма} = 1.53$; $\chi^2 = 4.9$ (12)

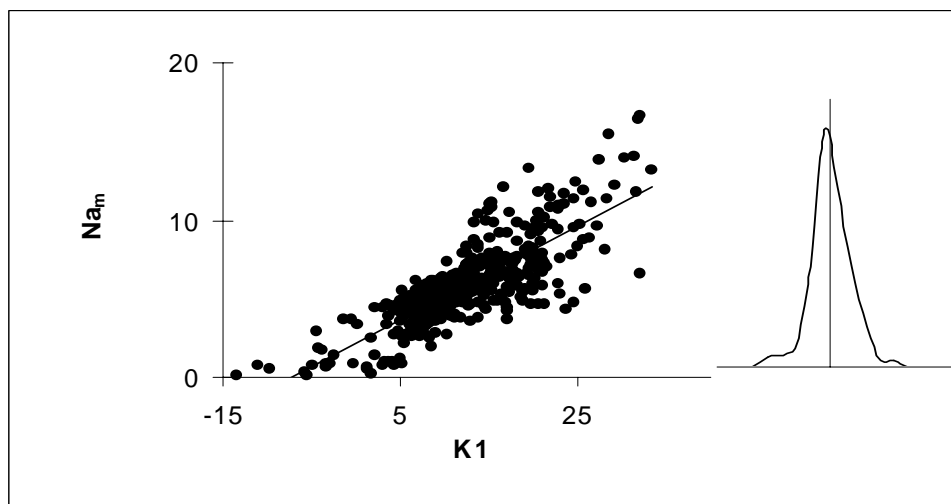


Рис. I.I.4.18 срх (формула GLAV9). Зависимость содержаний Na_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний калия в расплаве

$$K_1 = K_{av}Ca_{av}:2 + Al_m - Ti_m - Mg_m$$

$$Na_m = 0.43K_1 - 0.86(GLAV10)$$

Диапазон значений Na 0.5–7.9 (атом. %)

Относительная ошибка 190–12 %

R = 0.91; N = 103; N₁ = 101; сигма = 0.95; $\chi^2 = 0.79$ (12)

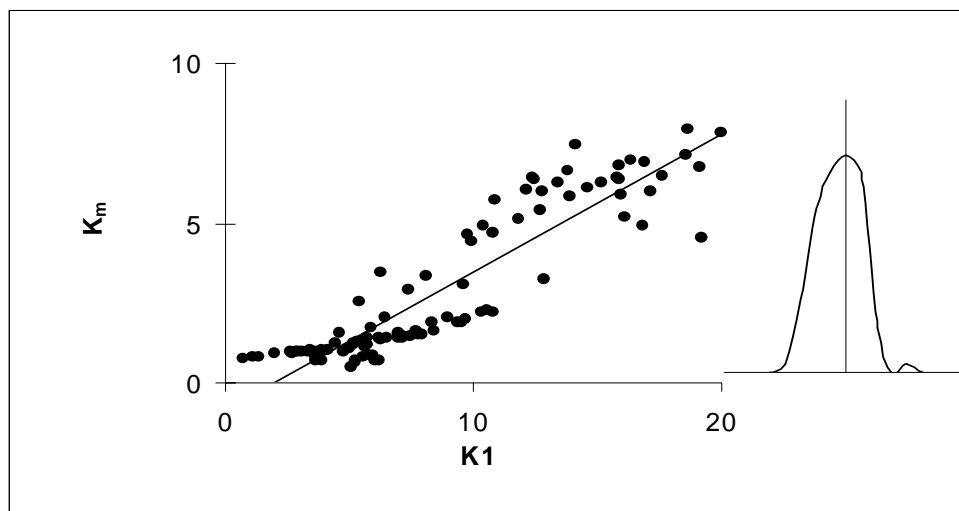


Рис. I.I.4.19 сrx (формула GLAV10). Зависимость содержаний K_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний хрома в расплаве

$$K_1 = Cr_{av}Ca_m:5Al_m - Ca_{av}:200$$

$$Cr_m = 0.69K_1 + 0.08(GLAV11)$$

Диапазон значений Cr 0.007–0.26 (атом. %)

Относительная ошибка 460–12.3 %

R = 0.78; N = 175; N₁ = 170; сигма = 0.032; $\chi^2 = 8.87$ (12)

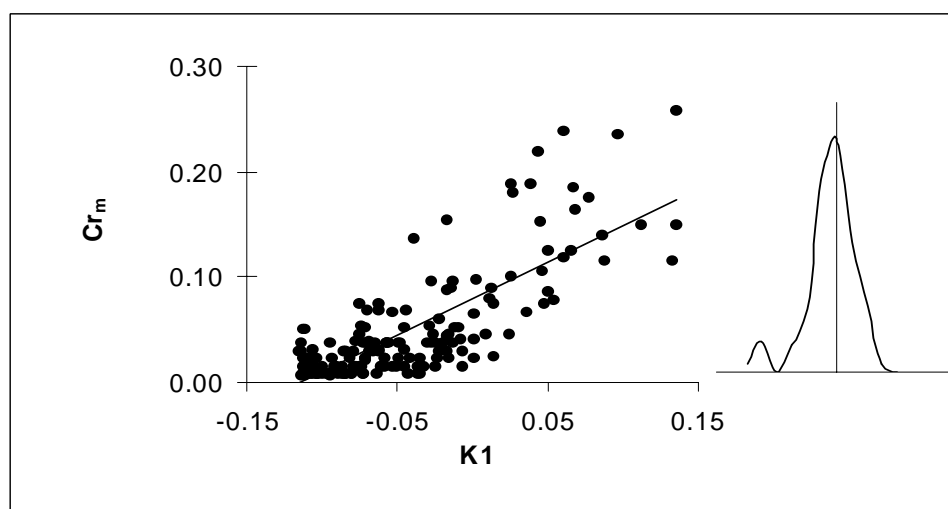


Рис. I.I.4.20 сrx (формула GLAV11). Зависимость содержаний Cr_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет железо-магниевого отношения в расплаве

$$K_1 = (Fe^{2+}_{av} - Ti_{av}):Mg_{av}; K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_m$$

$$K_2 = 4.81K_1 - 0.16(GLAV14a)$$

Диапазон значений K_2 0.2–13.3

Относительная ошибка 225–3.4 %

$R = 0.92$; $N = 511$; $N_1 = 503$; $\sigma = 0.45$; $\chi^2 = 12.72$ (16)

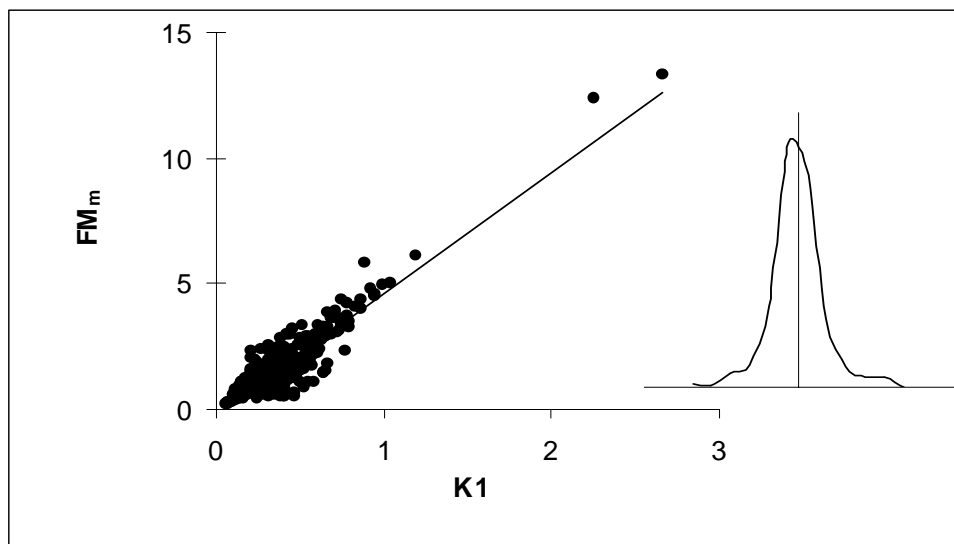


Рис. I.I.4.21 срх (формула **GLAV14a**). Зависимость значений K_2 от состава авгита и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = (Fe^{2+}_{av} - Ti_{av}):Mg_{av} + Si_{av}:40 + Al_{av}:50 - T:2000; K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_m$$

$$K_2 = 4.27K_1 - 4.22(GLAV14b)$$

Диапазон значений K_2 0.2–6.1

Относительная ошибка 190–6.2 %

$R = 0.9$; $N = 506$; $N_1 = 496$; $\sigma = 0.38$; $\chi^2 = 12.89$ (12)

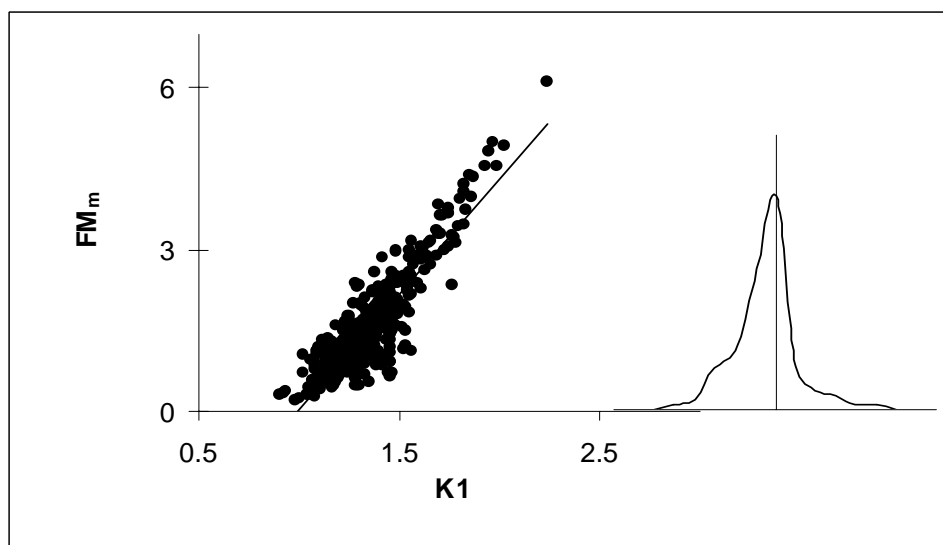


Рис. I.I.4.22 срх (формула **GLAV14b**). Зависимость значений K_2 от состава авгита и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}_{\text{av}} - \text{Ti}_{\text{av}}):30\text{Mg}_{\text{av}}; K_2 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$$

$$K_2 = 2.64K_1 + 0.02(\text{GLAV14c})$$

Диапазон значений K_2 0.27–6.1

Относительная ошибка 141–7%

$R = 0.87$; $N = 464$; $N_1 = 457$; сигма = 0.38; $\chi^2 = 7.84$ (12)

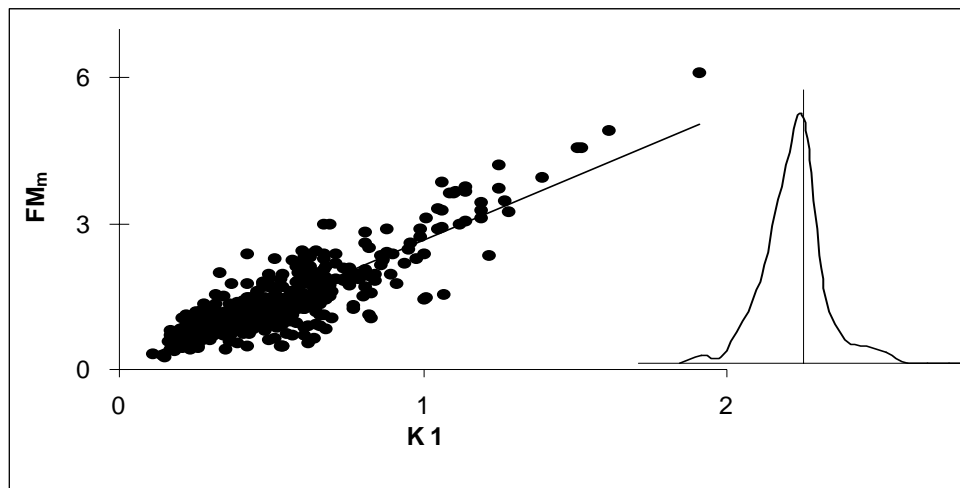


Рис. I.I.4.23 срх (формула GLAV14c). Зависимость значений K_2 от состава авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значения величины $K_D = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{av}}:(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$ для интервала значений железомagneйного отношения в расплаве 0.2–6 (массив из 496 т.) меньше 1, что говорит о более охотном вхождении магния в кристаллы авгита относительно расплава.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = \text{Mg}_{\text{av}} + \text{Ca}_{\text{av}}:2 + \text{Al}_{\text{av}}:2 - \text{Ti}_{\text{av}} - \text{Al}_{\text{m}}:3 - \text{Si}_{\text{m}}:7 + \text{Ca}_{\text{m}}:4$$

$$T = 10.05K_1 + 910.04(\text{GLAVTa})$$

Диапазон значений T 1025–1300 °C

Относительная ошибка 2.3–1.8 %

$R = 0.85$; $N = 528$; $N_1 = 520$; сигма = 23.8 °C; $\chi^2 = 1.27$ (16)

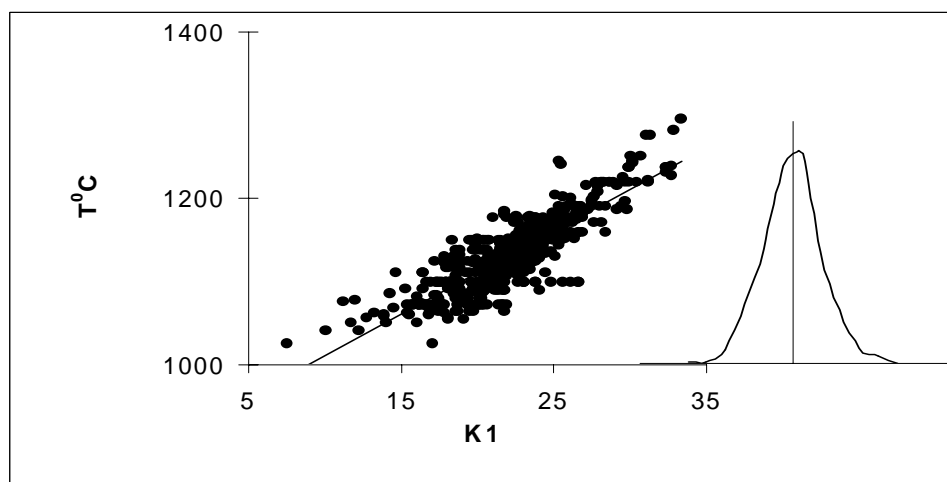


Рис. I.I.4.24 срх (формула GLAVTa). Зависимость значения T от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{av} + Ca_{av}:2 + Al_{av}:2 - Ti_{av} - Al_m:4 - Ti_m:2 + Mg_m$$

$$T = 6.62K_1 + 908.63(GLAVTb)$$

Диапазон значений T 1025–1300 °C

Относительная ошибка 1.8–1.5 %

R = 0.91; N = 528; N₁ = 520; сигма = 19 °C; $\chi^2 = 1.08$ (16)

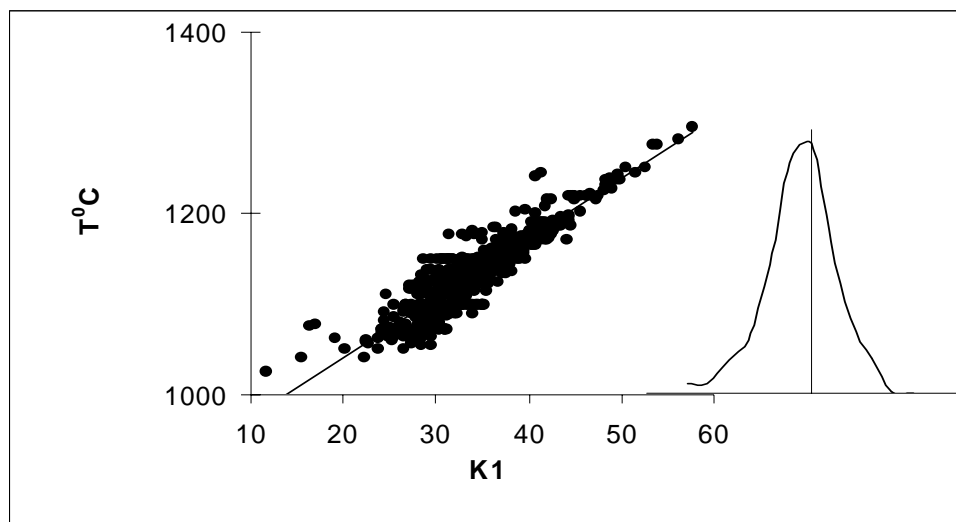


Рис. I.I.4.25 сrx (формула GLAVTb). Зависимость значения T от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{av}:2 - Mg_{av}:2 + Ti_{av} + Si_m:5 + Ti_m - Mg_m + (K_m + Na_m):3$$

$$T = -5.47K_1 + 1138.25(GLAVTc)$$

Диапазон значений T 1025–1300 °C

Относительная ошибка 1.9–1.5 %

R = -0.9; N = 528; N₁ = 521; сигма = 19.5 °C; $\chi^2 = 5.63$ (16)

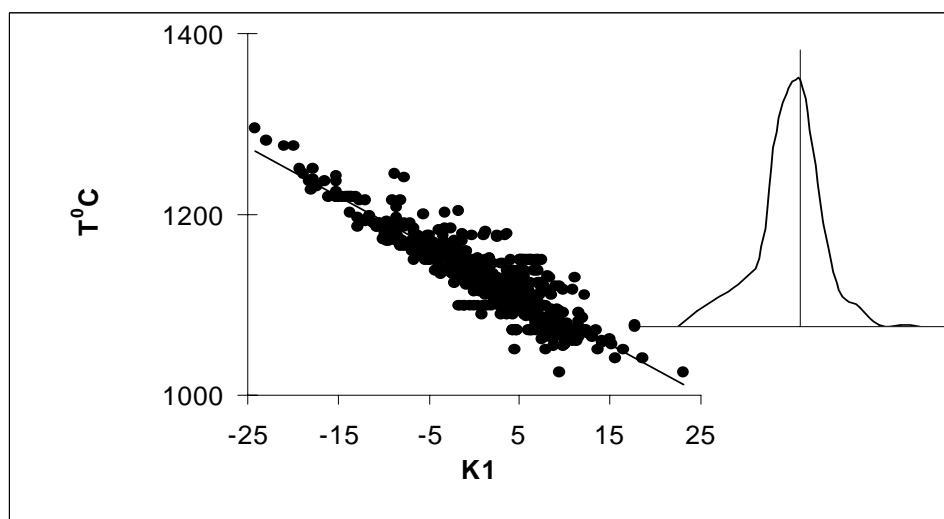


Рис. I.I.4.26 сrx (формула GLAVTc). Зависимость значения T от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по трем выше приведенным формулам составляет сигма ~16 °C.

Соотношения элементов в кристаллах авгита, равновесных с расплавом

$$K_1 = (2Ti_{av} + Al_{av}):Mg_{av}$$

$$Si_{av} = -8.72K_1 + 49.45(GLAVRa)$$

Диапазон значений Si 34–50 (атом. %)

Относительная ошибка 1.8–1.3 %

$R = -0.95$; $N = 528$; $N_1 = 514$; $\sigma = 0.63$; $\chi^2 = 3.61$ (16)

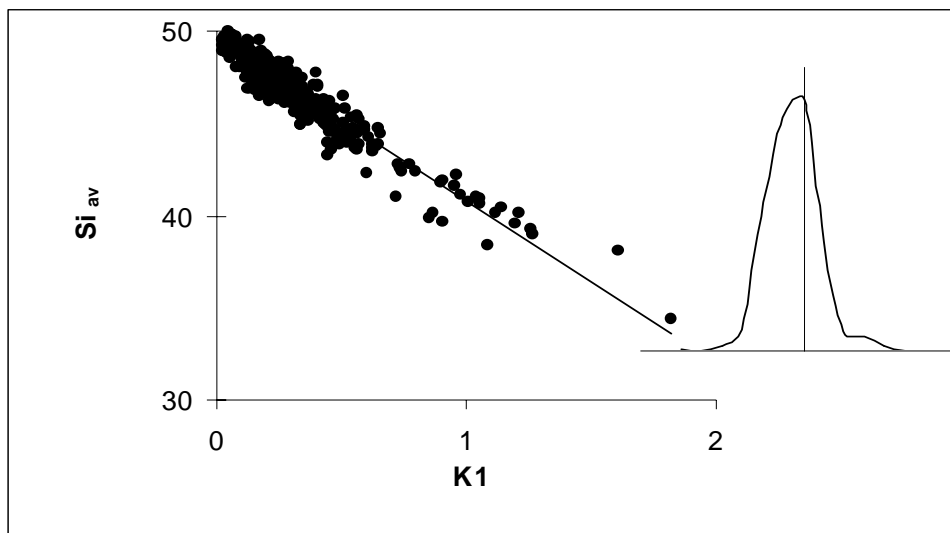


Рис. I.I.4.27 срх (формула **GLAVRa**). Зависимость содержаний Si_{av} от состава авгита и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = [2Ti_{av} + Al_{av} + 2(K_{av} + Na_{av})]:Mg_{av}$$

$$Si_{av} = -8.07K_1 + 49.65(GLAVRb)$$

Диапазон значений Si 34–50 (атом. %)

Относительная ошибка 1.8–1.3 %

$R = -0.95$; $N = 528$; $N_1 = 515$; $\sigma = 0.66$; $\chi^2 = 1.51$ (16)

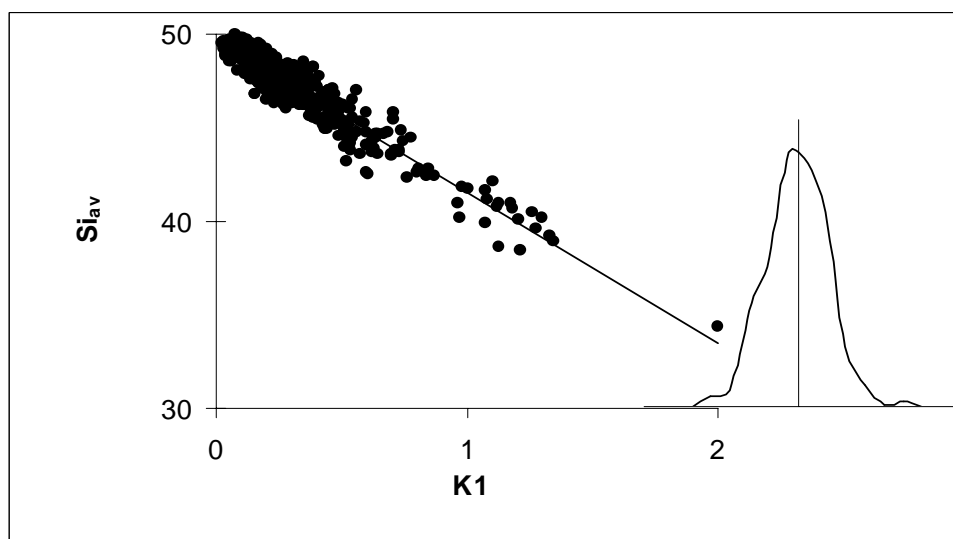


Рис. I.I.4.28 срх (формула **GLAVRb**). Зависимость содержаний Si_{av} от состава авгита и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = (2Ti_{av} + Al_{av} - 2Cr_{av}):Mg_{av}$$

$$Si_{av} = -8.07K_1 + 49.65(GLAVRc)$$

Диапазон значений Si 34–50 (атом. %)

Относительная ошибка 1.8–1.3 %

$R = -0.95$; $N = 528$; $N_1 = 515$; $\sigma = 0.68$; $\chi^2 = 3.93$ (16)

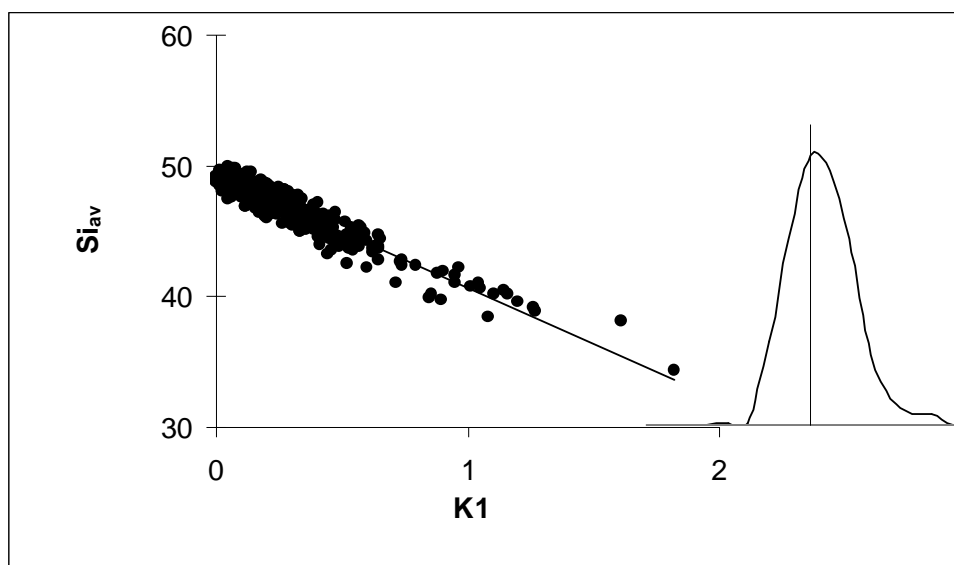


Рис. I.I.4.29 срх (формула **GLAVRc**). Зависимость содержаний Si_{av} от состава авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (2Ti_{av} + Al_{av}):Mg_{av}$$

$$Si_{av} = -8.99K_1 + 49.51(GLAVRd)$$

Диапазон значений Si 38–50 (атом. %)

Относительная ошибка 1.6–1.2 %

$R = -0.95$; $N = 523$; $N_1 = 512$; $\sigma = 0.61$; $\chi^2 = 1.73$ (16)

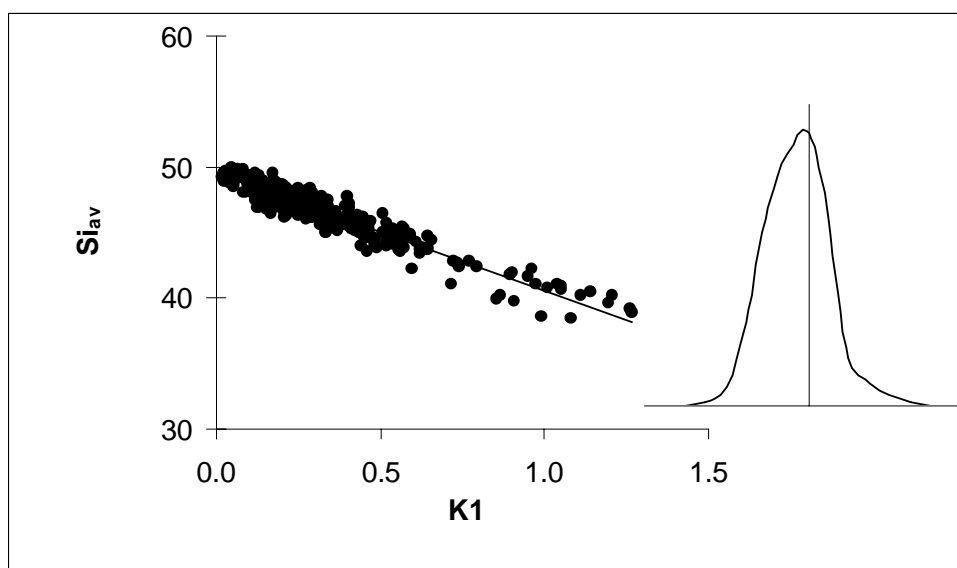


Рис. I.I.4.30 срх (формула **GLAVRd**). Зависимость содержаний Si_{av} от состава авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (2Ti_{av} + Al_{av}) : [Mg_{av} - 2(K_{av} + Na_{av})]$$

$$Si_{av} = -8.08K_1 + 49.41(GLAVRe)$$

Диапазон значений Si 38–50 (атом. %)

Относительная ошибка 1.6–1.2 %

R = -0.95; N = 523; N₁ = 513; сигма = 0.62; $\chi^2 = 0.65$ (16)

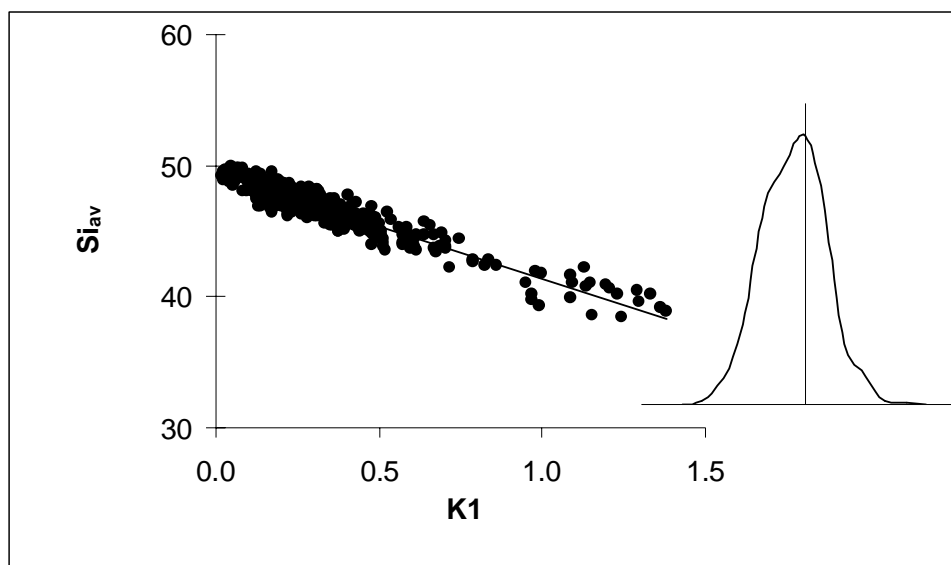


Рис. I.I.4.31 срх (формула **GLAVRe**). Зависимость содержаний **Si_{av}** от состава авгита и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = (2Ti_{av} + Al_{av}) : (Mg_{av} + 2Cr_{av})$$

$$Si_{av} = -9.1K_1 + 49.51(GLAVRf)$$

Диапазон значений Si 38–50 (атом. %)

Относительная ошибка 1.6–1.2 %

R = -0.95; N = 523; N₁ = 513; сигма = 0.62; $\chi^2 = 1.92$ (16)

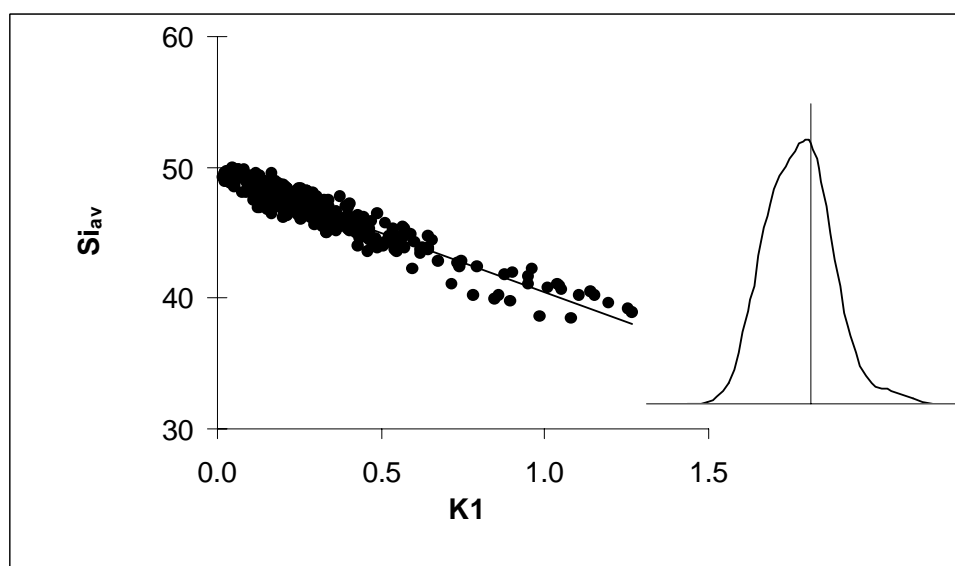


Рис. I.I.4.32 срх (формула **GLAVRf**). Зависимость содержаний **Si_{av}** от состава авгита и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = (2Ti_{av} + Al_{av} + Ca_{av}:6):Mg_{av}$$

$$Si_{av} = -7.9K_1 + 50.46(GLAVRg)$$

Диапазон значений Si 38–50 (атом. %)

Относительная ошибка 1.9–1.4 %

$R = -0.94$; $N = 523$; $N_1 = 515$; $\sigma = 0.72$; $\chi^2 = 4.07$ (16)

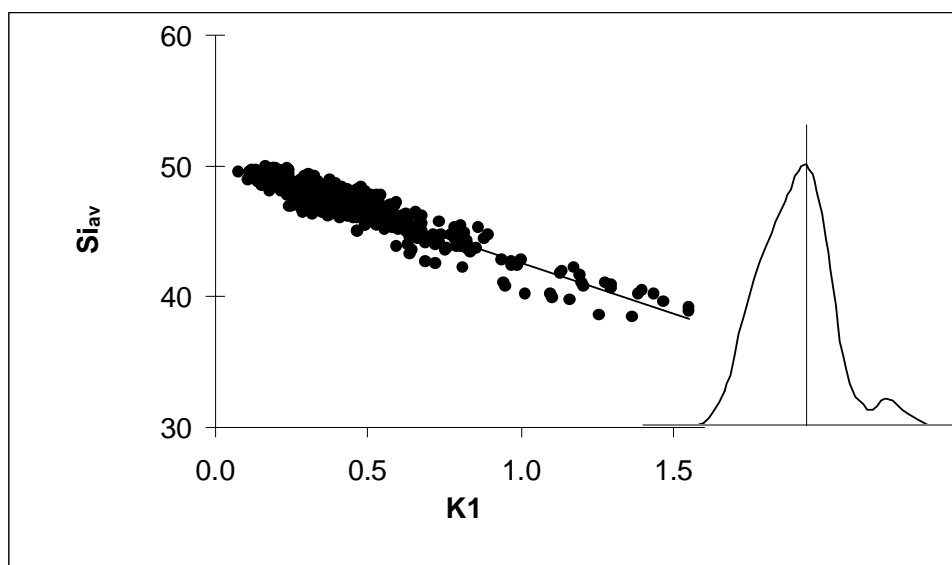


Рис. I.I.4.33 срх (формула **GLAVRg**). Зависимость содержаний **Si_{av}** от состава авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

1.5. Система расплав–плаггиоклаз

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [1; 2; 5; 6; 10; 13; 14; 15; 20; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 41; 48; 54; 65; 67; 69; 70; 71; 75; 79; 80; 81; 82; 83; 86; 87; 88; 90; 91; 92; 98; 100; 102; 131; 132; 165; 169; 171; 172; 173; 176; 177; 178; 189; 190; 193; 194; 197; 236; 255; 257; 258; 263; 280; 281; 305; 332; 333; 347; D1].

Используемые данные: общее число точек – 848 парных анализов. После исключения анализов стекол и кристаллов плаггиоклаза с суммами окислов менее 98 % и более 102 %, а также составов стекол с нулевыми содержаниями натрия и железа осталось 777 т. Для расчета содержаний калия были использованы анализы с содержаниями > 0.03 (атом. %) – 671 т. Для расчета отношения калия к натрию в расплаве были отброшены точки с отношением < 0.01 – 661 т.

Таблица I.I.5.1 pl. Диапазоны составов стекол (расплавов) и плаггиоклазов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

GLPL	Расплав	T °C	1026–1365	Плаггиоклаз			
SiO ₂	37.66–76.41	Si	37.33–70.41	SiO ₂	42.35–62.48	Si	39.09–55.48
TiO ₂	0.22–8.93	Ti	0.15–6.82	TiO ₂	0.01–0.4	Ti	0.01–0.28
Al ₂ O ₃	9.35–23.26	Al	10.92–25.66	Al ₂ O ₃	23.15–36.14	Al	24.45–39.31
FeO	0.39–28.15	Fe	0.3–23.38	FeO	0.04–4.24	Fe	0.03–3.35
MnO	0.03–0.83	Mn	0.02–0.7	MnO	0.01–0.09	Mn	0.01–0.07
MgO	0.19–11.61	Mg	0.26–15.67	MgO	0.01–1.6	Mg	0.01–2.19
CaO	0.9–20.51	Ca	0.89–21.78	CaO	6.11–20.16	Ca	5.92–20.02
Na ₂ O	0.03–9.62	Na	0.06–16.43	Na ₂ O	0.1–7.97	Na	0.18–13.73
K ₂ O	0.01–7.88	K	0.01–9.35	K ₂ O	0.01–2.48	K	0.01–2.9
Cr ₂ O ₃	0.01–0.43	Cr	0.01–0.32	Cr ₂ O ₃	0.01–0.08	Cr	0.01–0.06
		Ab	0.95–69.87	An	30.13–98.98	Or	0.06–15.35

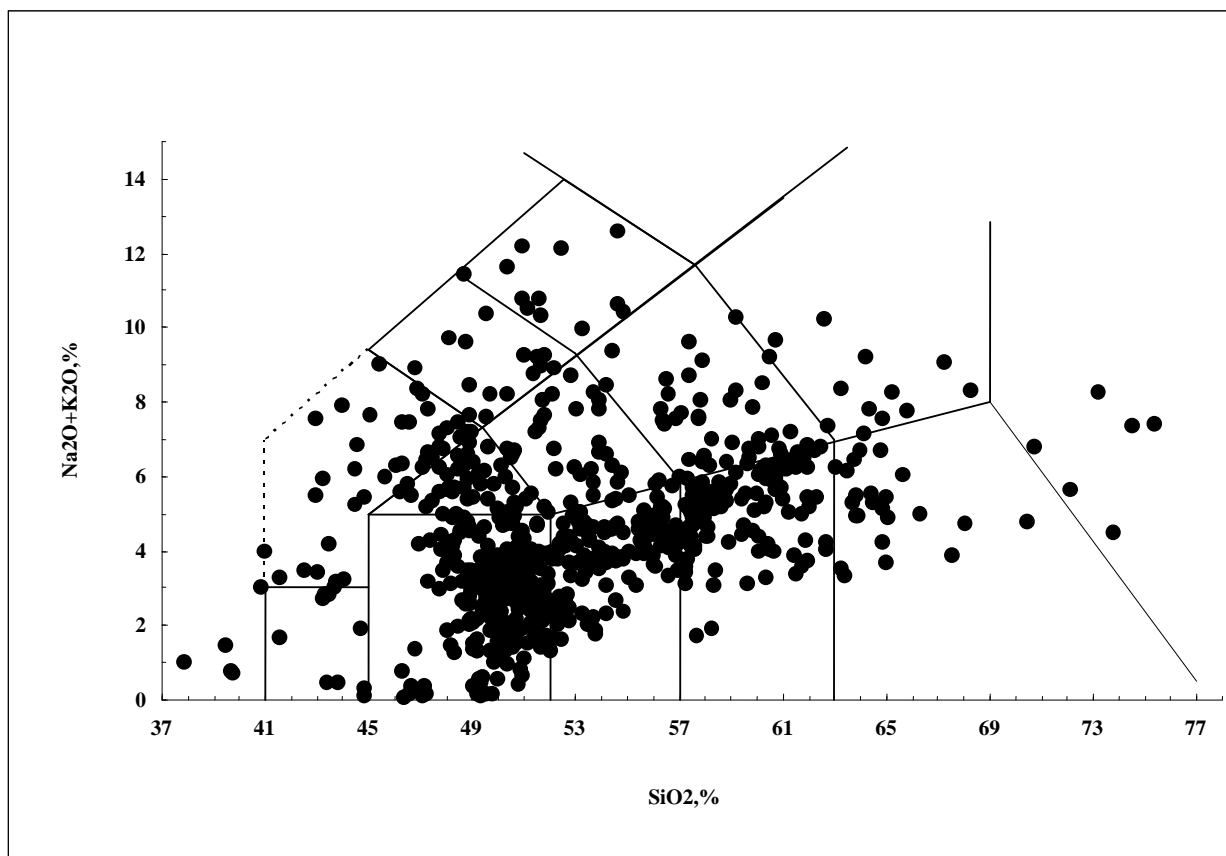


Рис. I.I.5.1 pl. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами плагио-оклаза, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = Si_{pl}:(Ca_m + Ti_m + Al_{pl}:2) + [(K_{pl} + Na_{pl}):2 - Ca_{pl}:2]$$

$$Si_m = 16.45K_1 + 16.32(GLPL1a)$$

Диапазон значений Si 37–70 (атом. %)

Относительная ошибка 6.2–3.3 %

$R = 0.88$; $N = 777$; $N_1 = 768$; $\sigma = 2.3$; $\chi^2 = 8$ (16)

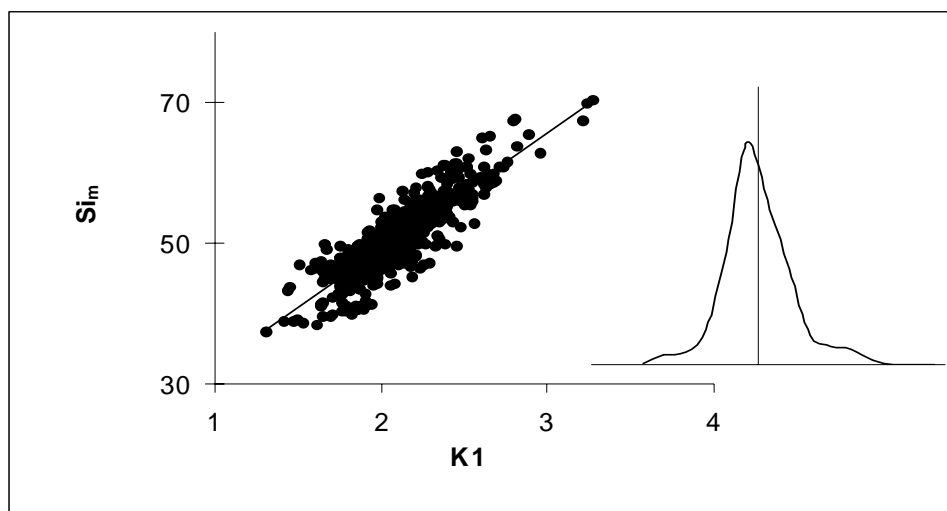


Рис. I.I.5.2 pl (формула **GLPL1a**). Зависимость содержаний Si_m от состава плагиооклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{pl}:[Ca_m + Ti_m + Al_m:2 + (K_{pl} + Na_{pl}):2 - Fe^{2+}_{pl}]$$

$$Si_m = 14.22K_1 + 17.6(GLPL1b)$$

Диапазон значений Si 37–70 (атом. %)

Относительная ошибка 5.4–2.8 %

$R = 0.92$; $N = 777$; $N_1 = 770$; $\sigma = 2$; $\chi^2 = 4.57$ (16)

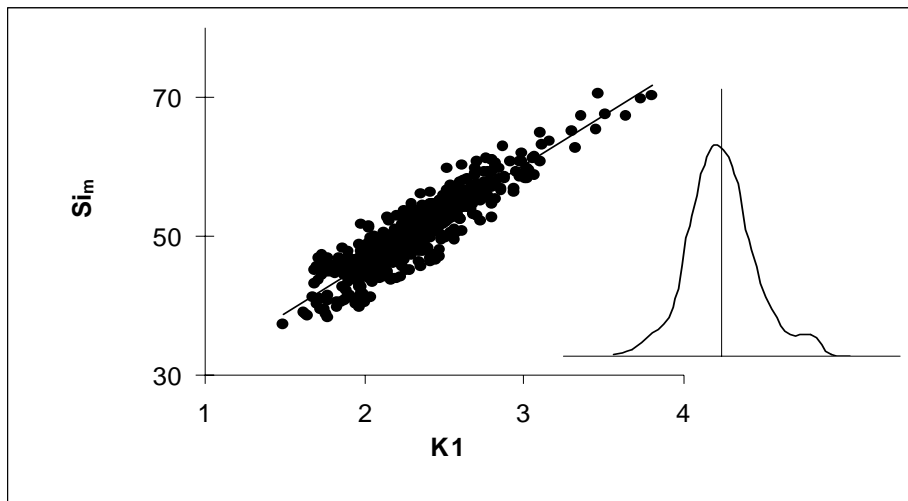


Рис. I.I.5.3 pl (формула GLPL1b). Зависимость содержаний Si_m от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет $\sigma < 2$.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Al_{pl} - Fe^{2+}_m + K_m + Na_m - Si_{pl}:4 + T:20$$

$$Al_m = 0.28K_1 - 5.66(GLPL3a)$$

Диапазон значений Al 11–25 (атом. %)

Относительная ошибка 8.2–3.6 %

$R = 0.91$; $N = 777$; $N_1 = 767$; $\sigma = 0.9$; $\chi^2 = 4.56$ (16)

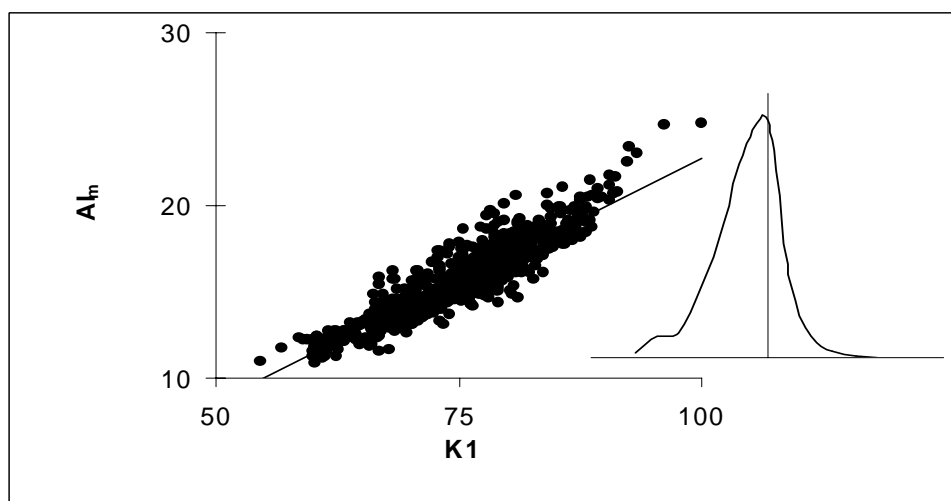


Рис. I.I.5.4 pl (формула GLPL3a). Зависимость содержаний Al_m от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{pl} - Fe^{2+}_m + (K_{pl} + Na_{pl}):3$$

$$Al_m = 0.46K_1 + 4.11(GLPL3b)$$

Диапазон значений Al 11–25 (атом.) %

Относительная ошибка 12.4–4.4 %

$R = 0.85$; $N = 777$; $N_1 = 765$; $\sigma = 1.1$; $\chi^2 = 3.78$ (16)

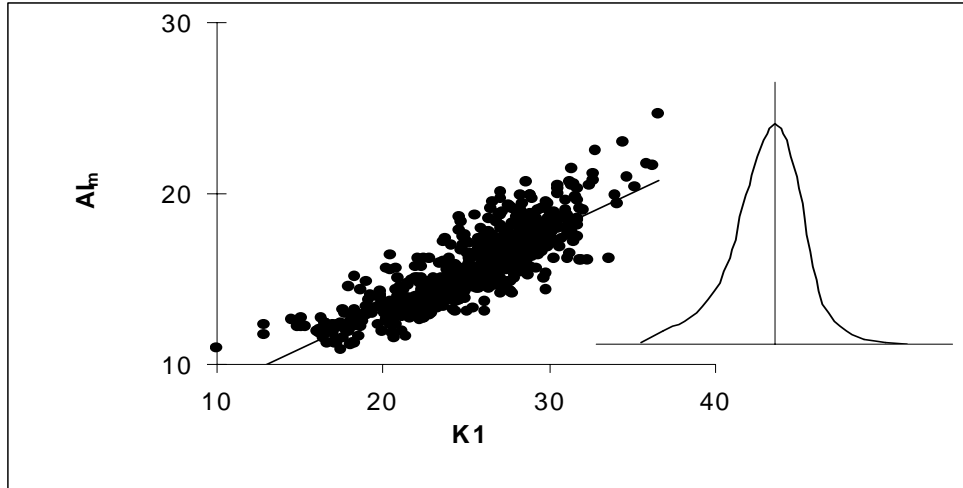


Рис. I.I.5.5 pl (формула GLPL3b). Зависимость содержаний Al_m от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет $\sigma < 1$.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Ca_{pl} + Si_{pl}:2 - Si_m:4$$

$$Ca_m = 1.05K_1 - 16.38(GLPL8a)$$

Диапазон значений Ca 0.9–19 (атом. %)

Относительная ошибка 125–5.9 %

$R = 0.9$; $N = 777$; $N_1 = 768$; $\sigma = 1.13$; $\chi^2 = 2.08$ (16)

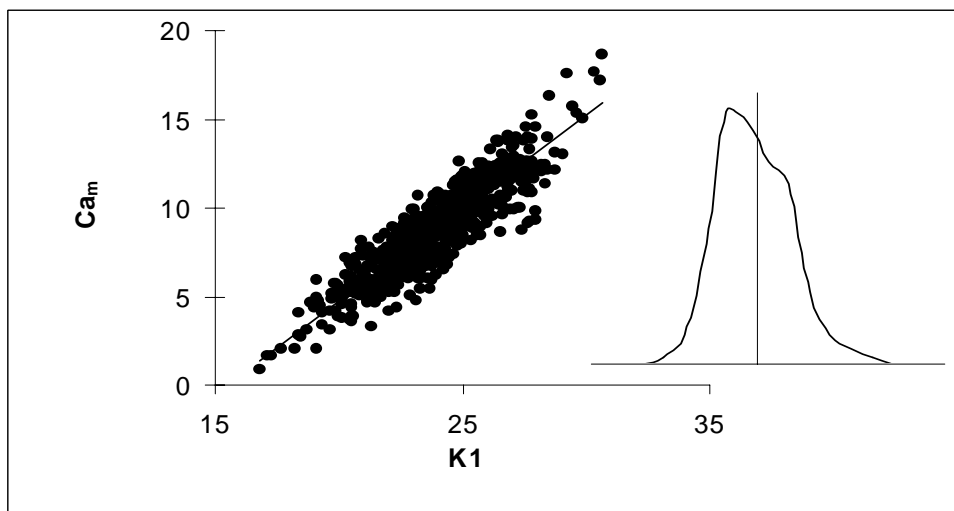


Рис. I.I.5.6 pl (формула GLPL8a). Зависимость содержаний Ca_m от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Ca_{pl} + Si_{pl}:2 - Al_{pl}:11 + Fe^{2+}_m:5 + Mg_m:4$$

$$Ca_m = 1.2K_1 - 35.45(GLPL8b)$$

Диапазон значений Ca 0.9–18 (атом. %)

Относительная ошибка 133–6.7 %

R = 0.88; N = 777; N₁ = 772; сигма = 1.2; $\chi^2 = 0.67$ (16)

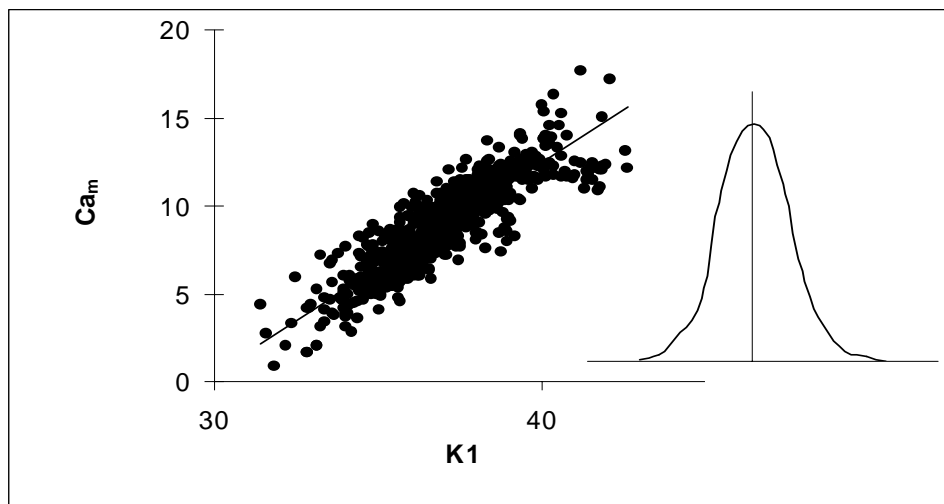


Рис. I.I.5.7 pl (формула GLPL8b). Зависимость содержаний Ca_m от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет сигма < 1.

Расчет содержаний натрия в расплаве

$$K_1 = Si_{pl}:5 + Al_{pl}:8 + Na_{pl} - Si_m:4 - Ti_m:2 + Al_m + Fe^{2+}_m:7 - Mg_m:2$$

$$Na_m = 0.55K_1 - 5.56(GLPL9)$$

Диапазон значений Na 0.06–14.2 (атом. %)

Относительная ошибка 1830–7.7 %

R = 0.85; N = 777; N₁ = 765; сигма = 1.1; $\chi^2 = 1.24$ (16)

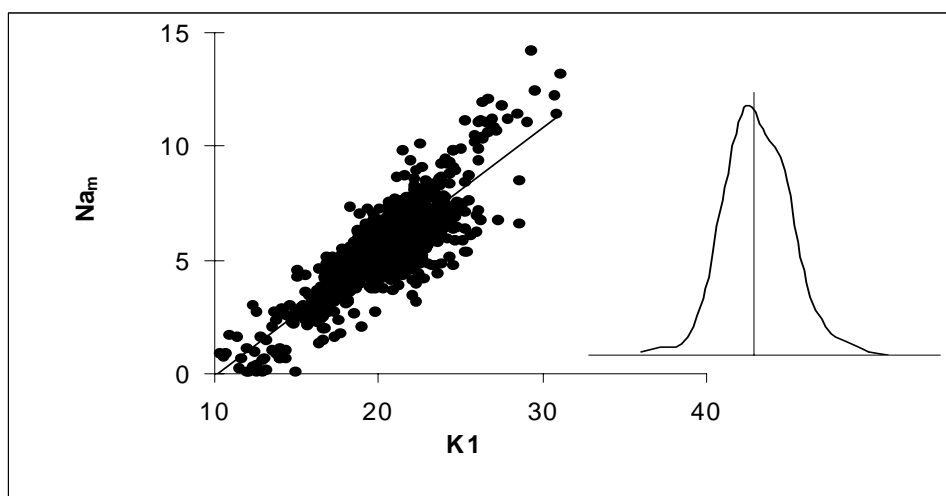


Рис. I.I.5.8 pl (формула GLPL9). Зависимость содержаний Na_m от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний калия в расплаве

$$K_1 = K_{pl}Ca_{pl} + Si_m:10 - Mg_m:5 - Fe^{2+}_m:7$$

$$K_m = 0.42K_1 - 0.83(GLPL10)$$

Диапазон значений К 0.04–8.5 (атом. %)

Относительная ошибка 1250–5.9 %

$R = 0.94$; $N = 671$; $N_1 = 660$; $\sigma = 0.50$; $\chi^2 = 12.09$ (16)

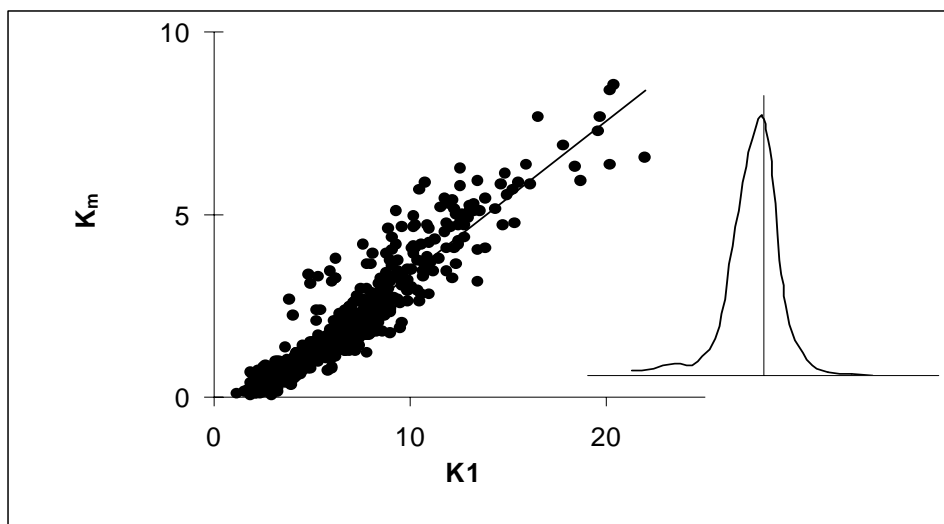


Рис. I.I.5.9 pl (формула GLPL10). Зависимость содержаний K_m от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет отношения калия к натрию в расплаве

$$K_1 = 10K_{pl}:Na_{pl} + Si_m:30$$

$$(K/Na)_m = 0.54K_1 - 0.85(GLPL17)$$

Диапазон значений (K/Na) 0.01–1.85

Относительная ошибка 1000–5.4 %

$R = 0.93$; $N = 661$; $N_1 = 652$; $\sigma = 0.1$; $\chi^2 = 10.81$ (16)

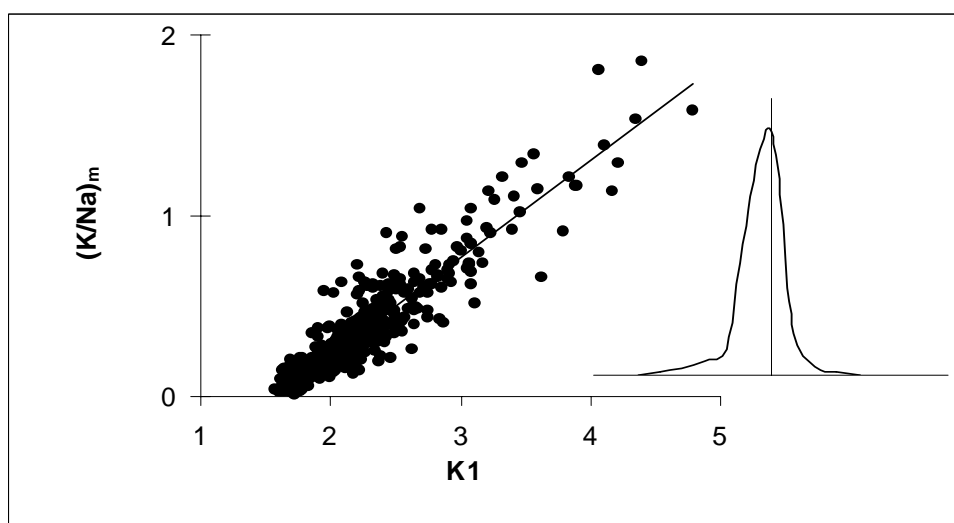


Рис. I.I.5.10 pl (формула GLPL17). Зависимость значения $(K/Na)_m$ от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = Al_{pl} + (K_{pl} + Na_{pl}):2 + Si_m:9 + Al_m + Mg_m$$

$$T = 8.18K_1 + 623.22(GLPLTa)$$

Диапазон значений T 1040–1290 °C

Относительная ошибка 2–1.6 %

R = 0.88; N = 777; N₁ = 764; сигма = 20.5 °C; $\chi^2 = 4.85$ (16)

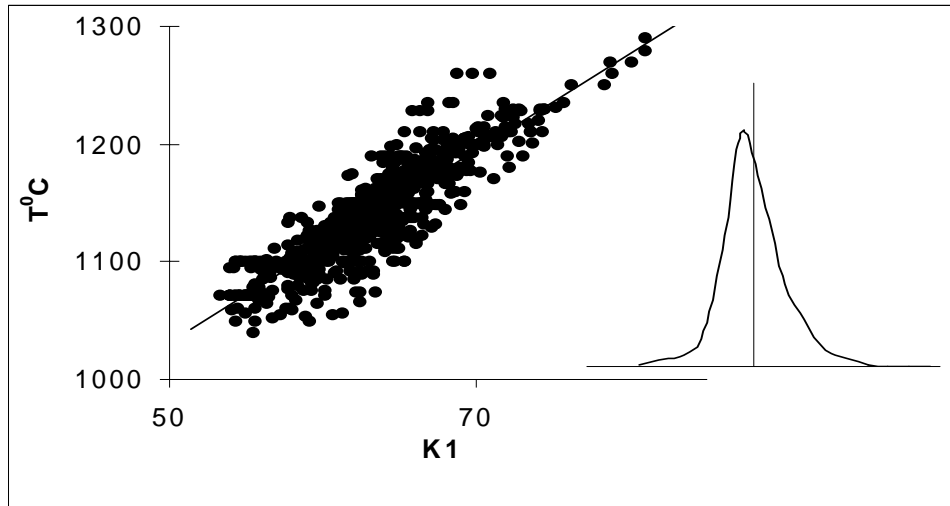


Рис. I.I.5.11 pl (формула GLPLTa). Зависимость значения T от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{pl} + Al_{pl}:2 - Si_m:9 + Ti_m - Al_m - Mg_m$$

$$T = -7.65K_1 + 1422.7(GLPLTb)$$

Диапазон значений T 1040–1290 °C

Относительная ошибка 1.9–1.5 %

R = -0.89; N = 777; N₁ = 762; сигма = 19.7 °C; $\chi^2 = 6.33$ (16)

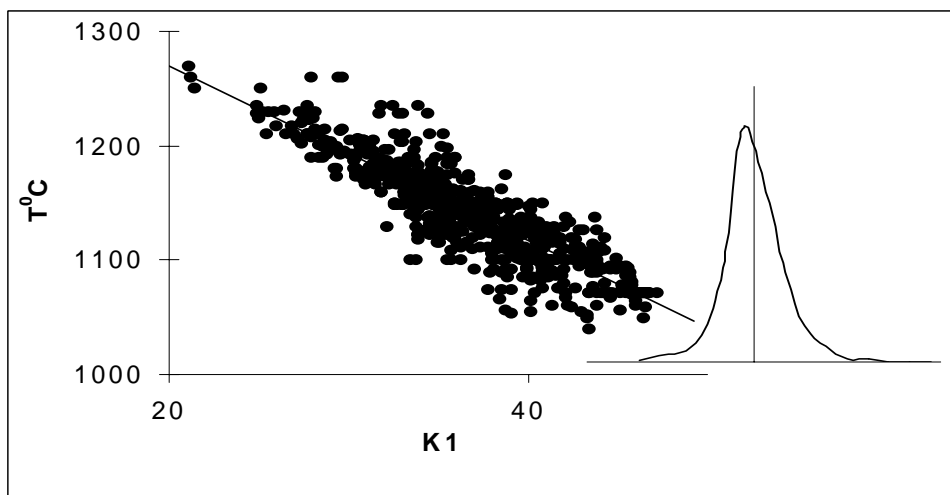


Рис. I.I.5.12 pl (формула GLPLTb). Зависимость значения T от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет сигма < 19 °C.

Глава 2. Уравнения, полученные по системе расплав–минеральный парагенезис (2–3 минерала)

Эти выборки (см. введение, табл. VI) представлены 10 вариантами сочетаний из 5 по 2 [5!:(5-2)!]. Пять из них практически не встречаются (< 50 т.) в экспериментах при атмосферном давлении: **sp–орх**, **sp–ав**, **sp–пл**, **орх–ав**, **орх–пл**. Выборки, представленные **sp–ол**, **ол–ав**, **ол–пл**, **ав–пл**, включают в себя от 100 до 500 т. Выборка **ол–орх** представлена 54 т. Все это указывает на плохую кристаллизационную способность ортопироксена при атмосферном давлении в широком диапазоне составов расплавов, соответствующих магматическим.

2.1. Система расплав–шпинель–оливин

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [6; 12; 17; 18; 22; 28; 30; 31; 75; 76; 77; 80; 81; 165; 171; 172; 189; 190; 194; 197; 333; 345].

Используемые данные: общее число точек – 135 т. тройных анализов. После исключения анализов составов шпинелей, оливинов и стекол с суммами окислов менее 97 % и более 102 % – 127 т. После исключения анализов с нулевыми содержаниями железа в стекле – 123 т. Для расчета Fe^{3+} в расплаве были отброшены точки с нулевыми его содержаниями в кристаллах шпинели – 109 т. Для расчета численного значения фугитивности кислорода были отброшены точки с нулевыми значениями Fe^{3+} в кристаллах шпинели – 109 т.

Таблица I.П.1.1 sp–ol. Диапазоны составов стекол (расплавов), шпинелей и оливинов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

SPOL	Расплав	T °C	1111–1500
SiO ₂	35.2–52.35	Si	35.2–49.49
TiO ₂	0.4–15	Ti	0.26–11.32
Al ₂ O ₃	4.04–20.52	Al	4.7–21.8
FeO	6.41–24.7	Fe	4.85–20.55
MnO	0.04–0.85	Mn	0.03–0.71
MgO	2.74–25.6	Mg	3.68–33.2
CaO	7–15.38	Ca	6.52–15.95
Na ₂ O	0.05–6.38	Na	0.1–11.15
K ₂ O	0.07–6.2	K	0.08–7.23
Cr ₂ O ₃	0.01–0.99	Cr	0.01–0.74

Продолжение таблицы I.П.1.1 sp–ol.

SPOL	Шпинель	Mg _#	16.77–88.31	Оливин	Fo	50.23–98.31	
SiO ₂	0.01–2.04	Si	0.01–2.1	SiO ₂	33.6–42.68	Si	31.11–34.19
TiO ₂	0.07–26.6	Ti	0.04–22.51	TiO ₂	0.01–0.27	Ti	0.01–0.19
Al ₂ O ₃	4.24–67.97	Al	5.96–65.15	Al ₂ O ₃	0.01–0.6	Al	0.01–0.58
FeO	5.81–55.81	Fe	3.94–60.67	FeO	1.69–40.8	Fe	1.11–33.06
MnO	0.04–0.52	Mn	0.03–0.48	MnO	0.09–0.95	Mn	0.06–0.72
MgO	4.02–24.62	Mg	6.89–30.32	MgO	22.9–55.02	Mg	32.59–64.58
CaO	0.04–0.89	Ca	0.05–0.97	CaO	0.15–0.9	Ca	0.14–0.81
Na ₂ O	0.01–0.03	Na	0.02–0.07	Na ₂ O	0.01–0.05	Na	0.02–0.09
K ₂ O	0–0	K	0–0	K ₂ O	0–0	K	0–0
Cr ₂ O ₃	0.02–52.03	Cr	0.02–47.25	Cr ₂ O ₃	0.01–0.71	Cr	0.01–0.51

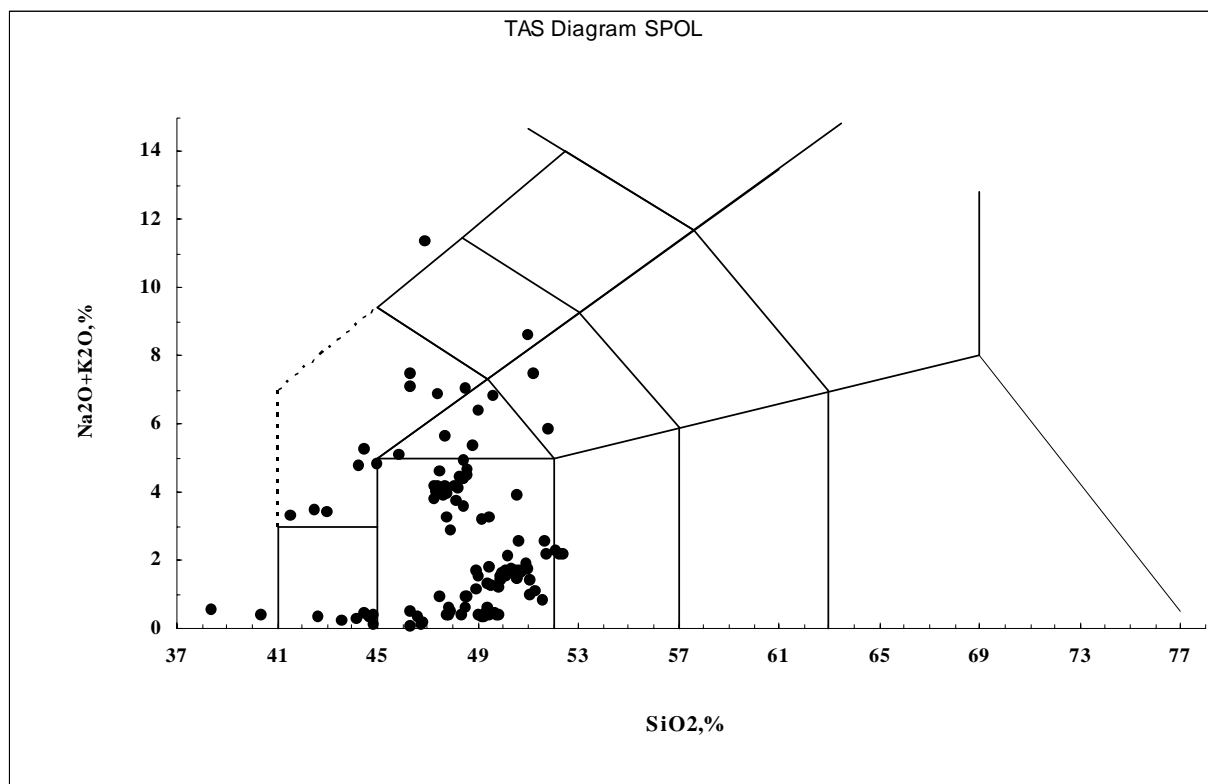


Рис. I.П.1.1 sp–ol. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами шпинели и оливина, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = Cr_{sp} - Ti_{sp} + Fe^{3+}_{sp} \cdot 3 + 2Si_{ol} - Mg_m - Ti_m$$

$$Si_m = 0.17K_1 + 30.65(SPOL1)$$

Диапазон значений Si 35–49 (атом. %)

Относительная ошибка 4.3–3.1 %

$R = 0.81$; $N = 123$; $N_1 = 122$; $\sigma = 1.5$; $\chi^2 = 0.39$ (12)

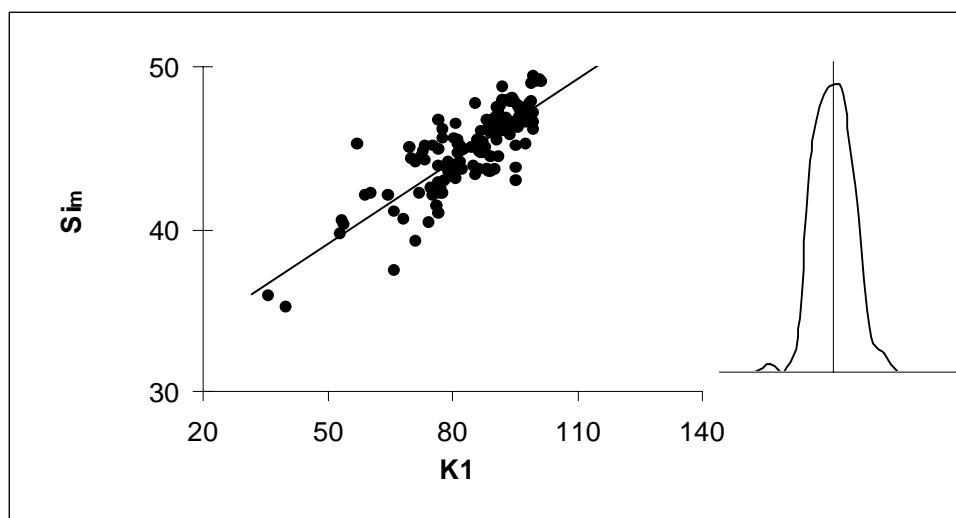


Рис. I.П.1.2 sp–ol (формула SPOL1). Зависимость содержаний Si_m от состава шпинели, оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = Ti_{sp} - Fe^{3+}_{sp} \cdot 2 - Fe^{2+}_{ol} \cdot 6 + 2Ca_{ol}$$

$$Ti_m = 0.43K_1 + 2.45(SPOL2)$$

Диапазон значений Ti 0.26–11.3 (атом. %)

Относительная ошибка 350–8 %

R = 0.89; N = 123; N₁ = 121; сигма = 0.9; $\chi^2 = 1.57$ (12)

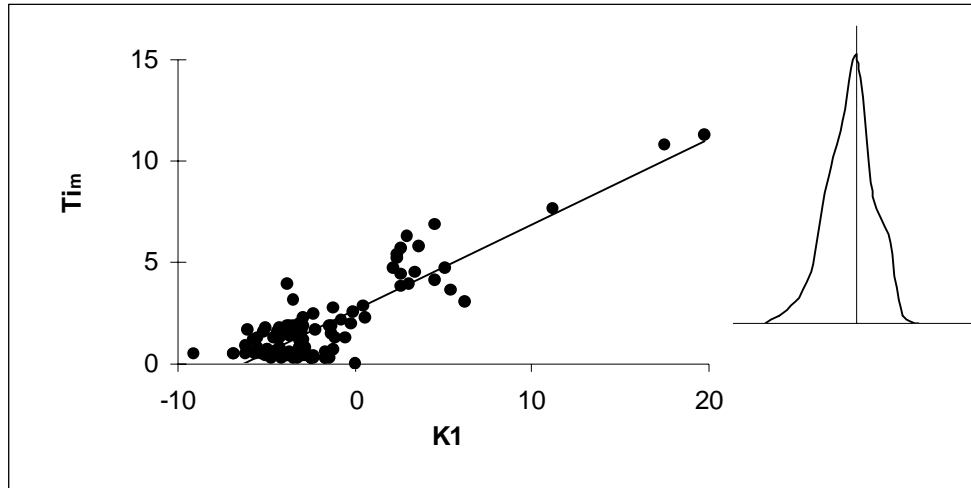


Рис. I.П.1.3 sp–ol (формула SPOL2). Зависимость содержаний Ti_m от состава шпинели, оливины, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа трехвалентного в расплаве

$$K_1 = Cr_{sp} \cdot 5 - Fe^{3+}_{sp} - Si_{ol} \cdot 4 - Ti_m \cdot 2 + Al_m \cdot 2 + Ca_m + K_m - f_{O_2} \cdot 5$$

$$Fe^{3+}_m = -0.1K_1 + 2.3(SPOL4)$$

Диапазон значений 0.1–2.4 (атом. %)

Относительная ошибка 260–11 %

R = -0.8; N = 109; N₁ = 105; сигма = 0.26; $\chi^2 = 1.29$ (12)

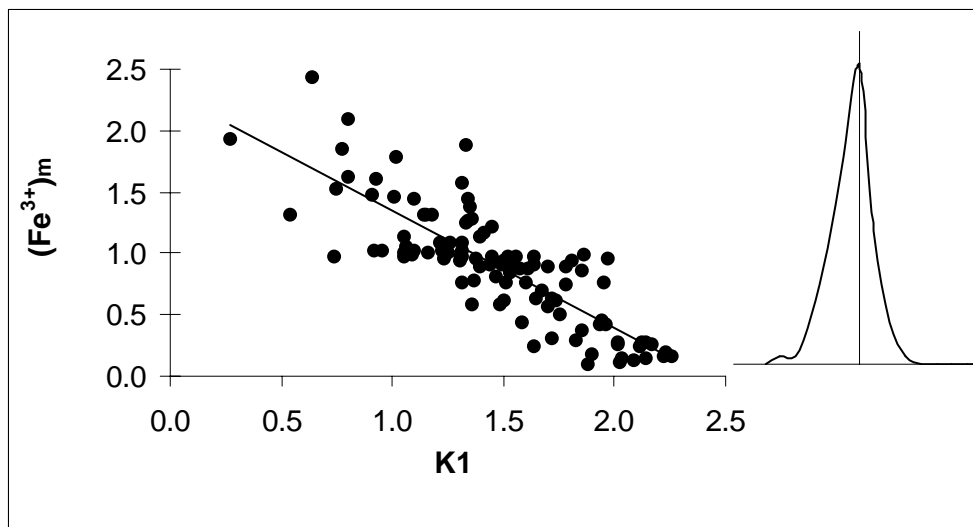


Рис. I.П.1.4 sp–ol (формула SPOL4). Зависимость содержаний Fe³⁺_m от состава шпинели, оливины, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа двухвалентного в расплаве

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol} - Fe^{3+}_{sp:4} + Ti_{sp:6} + Mg_{sp:5} - 5Ca_{ol}$$

$$Fe^{2+}_m = 0.64K_1 + 0.44(SPOL5)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 4.5–20 (атом. %)

Относительная ошибка 35–8 %

$R = 0.92$; $N = 123$; $N_1 = 121$; $\sigma = 1.6$; $\chi^2 = 2.18$ (12)

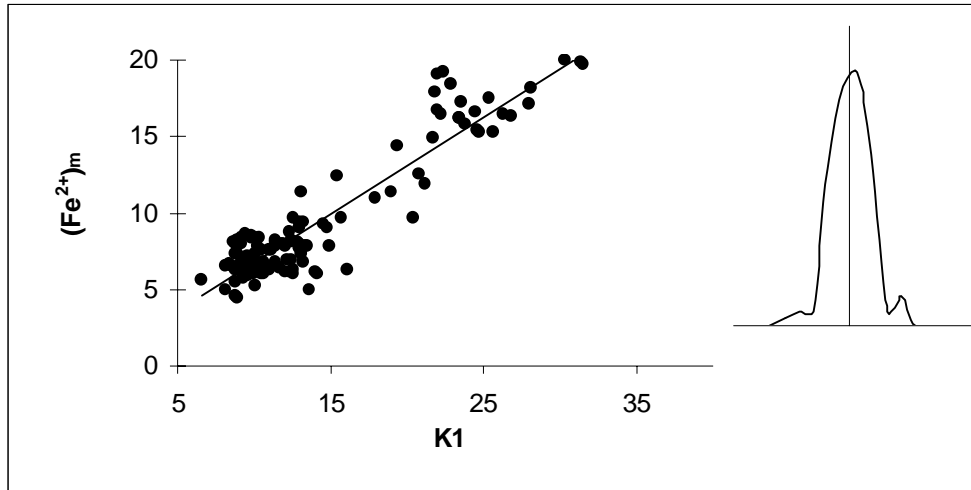


Рис. I.П.1.5 sp–ol (формула SPOL5). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава шпинели, оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = \text{Exp}[(Mg_{sp} + Cr_{sp:5} + Fe^{2+}_{sp:6} - Mg_{ol:5} - 6Ca_{ol}):10]$$

$$Mg_m = 2.17K_1 + 1.99(SPOL7)$$

Диапазон значений Mg 3.7–33 (атом. %)

Относительная ошибка 60–3 %

$R = 0.91$; $N = 123$; $N_1 = 122$; $\sigma = 2.17$; $\chi^2 = 0.92$ (12)

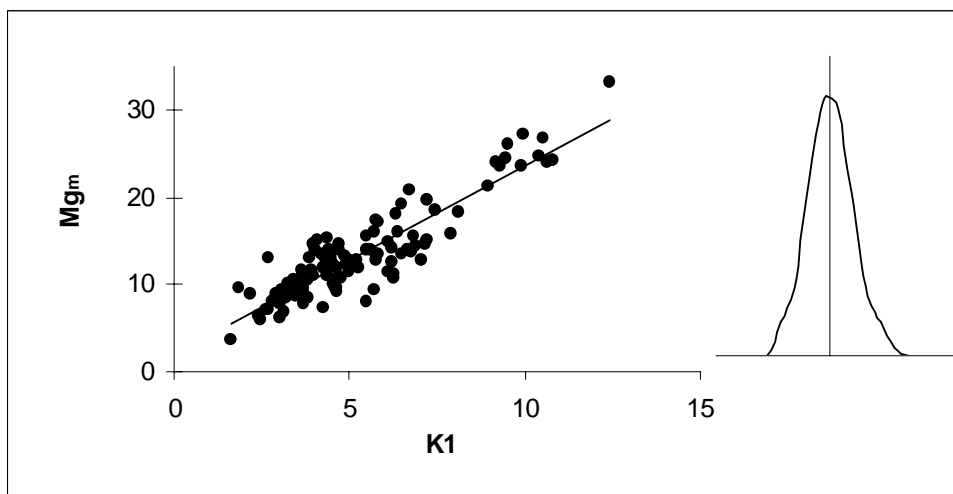


Рис. I.П.1.6 sp–ol (формула SPOL7). Зависимость содержаний Mg_m от состава шпинели, оливина и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет Fe^{2+}/Mg отношения в расплаве

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{ol}}; K_2 = (\text{Fe}^{2+}_{\text{sp}} - \text{Ti}_{\text{sp}}) : \text{Mg}_{\text{sp}}; K_3 = 5K_1 + K_2$$

$$(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}} = 0.32K_3 + 0.11(\text{SPOL14})$$

Диапазон значений: $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$ 0.2–3.1; K_1 0.1–1; K_2 0.1–3

Относительная ошибка 50–3.2 %

$R = 0.98$; $N = 123$; $N_1 = 118$; $\sigma = 0.1$; $\chi^2 = 3.79$ (12)

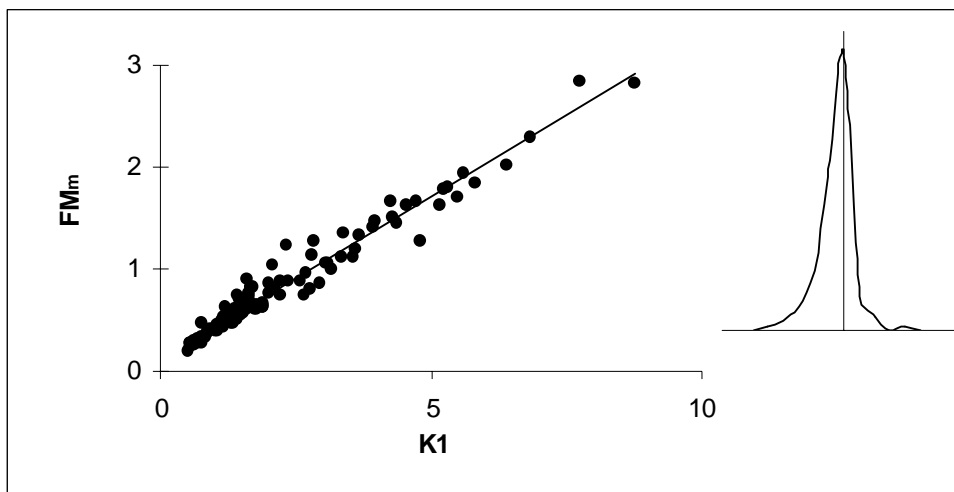


Рис. I.П.1.7 sp–ol (формула SPOL14). Зависимость значения $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$ от состава шпинели, оливина и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = (\text{Mg}_{\text{sp}} + \text{Cr}_{\text{sp}}) : (\text{Fe}^{2+}_{\text{ol}} + \text{Ti}_{\text{sp}} + 3\text{Ca}_{\text{ol}}) - \text{Mg}_{\text{ol}} : 7 - \text{Fe}^{2+}_{\text{sp}} : 9$$

$$T = 22.28K_1 + 1332.78(\text{SPOLTa})$$

Диапазон значений T 1111–1500 °C

Относительная ошибка 2.5–1.8 %

$R = 0.93$; $N = 123$; $N_1 = 120$; $\sigma = 27.6$ °C; $\chi^2 = 1.26$ (12)

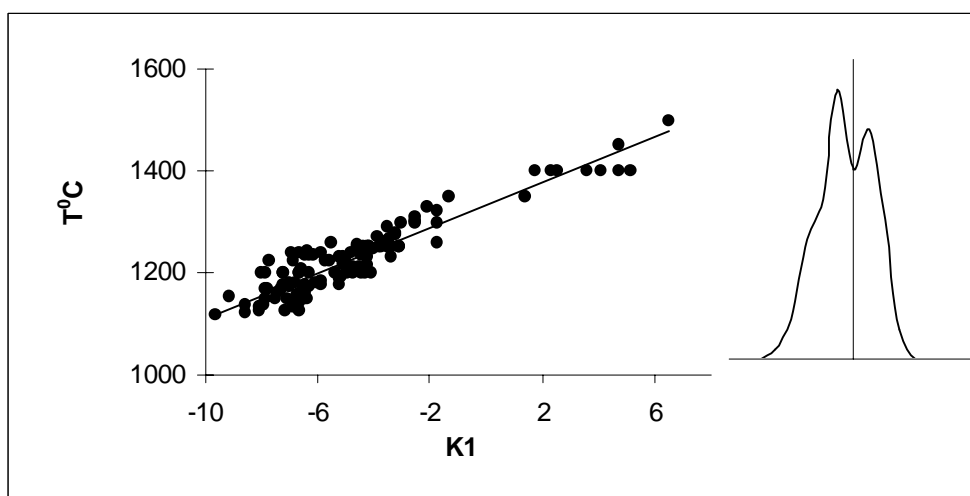


Рис. I.П.1.8 sp–ol (формула SPOLTa). Зависимость значения T от состава шпинели, оливина и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (Mg_{sp} + Cr_{sp}) : (Fe^{2+}_{ol} + Ti_{sp} + 3Ca_{ol}) - Mg_{ol}:7 - Fe^{2+}_{sp}:9 + Mg_m:4$$

$$T = 16.49K_1 + 1251.22(SPOLTb)$$

Диапазон значений T 1111–1500 °C

Относительная ошибка 2–1.5 %

R = 0.95; N = 123; N₁ = 120; сигма = 22.8 °C; $\chi^2 = 0.86$ (12)

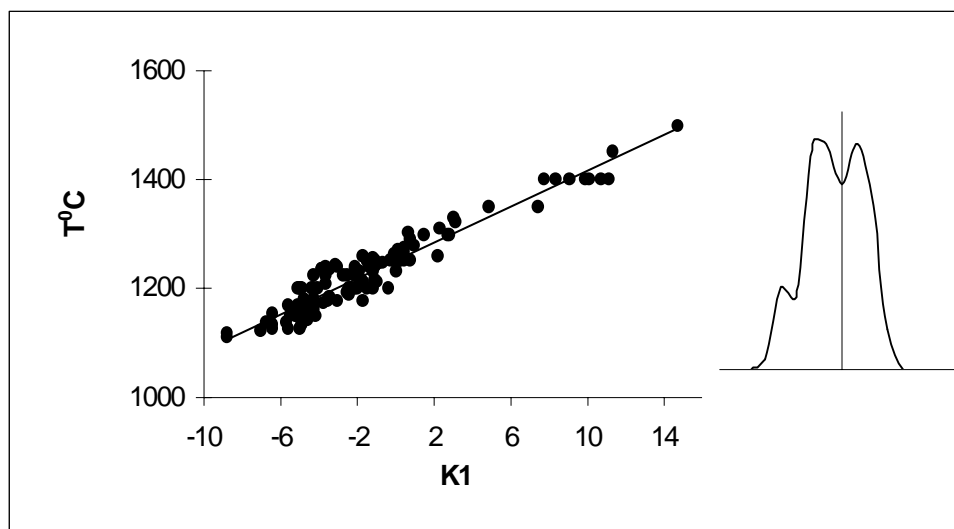


Рис. I.П.1.9 sp–ol (формула SPOLTb). Зависимость значения T от состава шпинели, оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (Mg_{sp} + Cr_{sp}) : (Fe^{2+}_{ol} + Ti_{sp} + 3Ca_{ol}) - Mg_{ol}:7 - Fe^{2+}_{sp}:9 + Mg_m:4 - Al_m:7$$

$$T = 15.79K_1 + 1284.48(SPOLTc)$$

Диапазон значений T 1111–1500 °C

Относительная ошибка 2.2–1.6 %

R = 0.95; N = 123; N₁ = 122; сигма = 24 °C; $\chi^2 = 1.28$ (12)

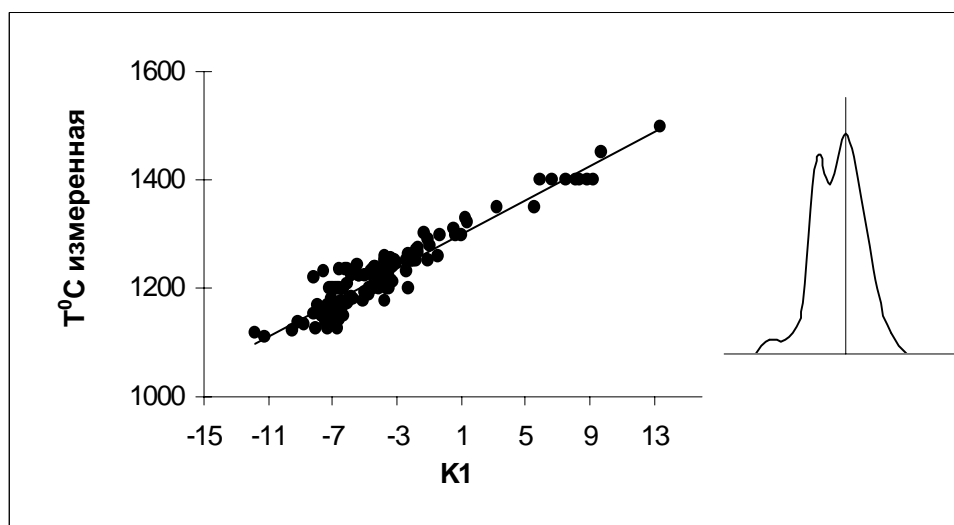


Рис. I.П.1.10 sp–ol (формула SPOLTc). Зависимость значения T от состава шпинели, оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (Mg_{sp} + Cr_{sp}) : (Fe^{2+}_{ol} + Ti_{sp} + 3Ca_{ol}) - Mg_{ol}:7 - Fe^{2+}_{sp}:9 + Mg_m:4 - Si_m:5$$

$$T = 16.14K_1 + 1396.93(SPOLTd)$$

Диапазон значений T 1111–1500 °C

Относительная ошибка 2–1.5 %

R = 0.95; N = 123; N₁ = 122; сигма = 22.8 °C; $\chi^2 = 0.96$ (12)

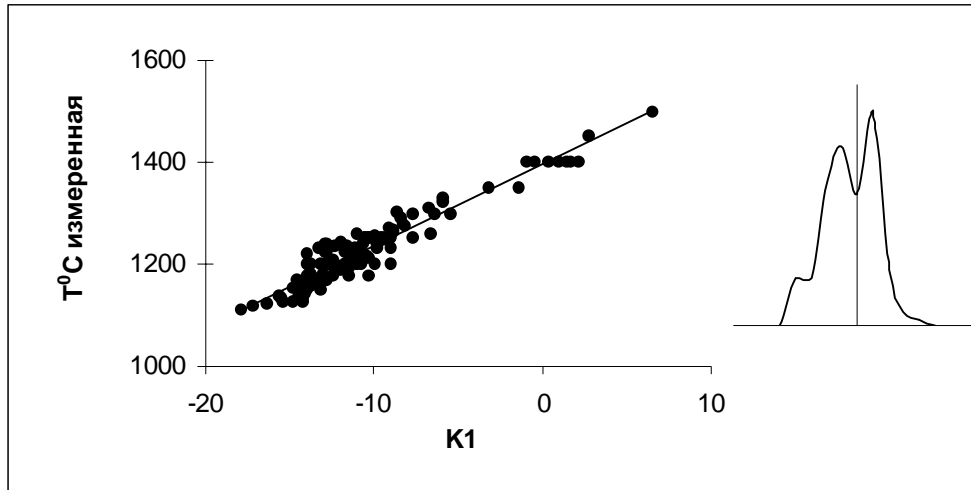


Рис. I.П.1.11 sp–ol (формула SPOLTd). Зависимость значения T от состава шпинели, оливины, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по четырем выше приведенным формулам составляет сигма < 21 °C.

Расчет значений фугитивности кислорода

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol} - Fe^{2+}_{sp}:6 - Fe^{3+}_{sp}:3 - Al_{sp}:7 - (K_m + Na_m):3 + 2Ti_m + Al_m:3$$

$$f_{O_2} = -0.26K_1 - 6.06(SPOLfa)$$

Диапазон значений f_{O_2} -5...-13.5

Относительная ошибка 16.6–6.1 %

R = -0.91; N = 109; N₁ = 108; сигма = 0.83; $\chi^2 = 2.21$ (12)

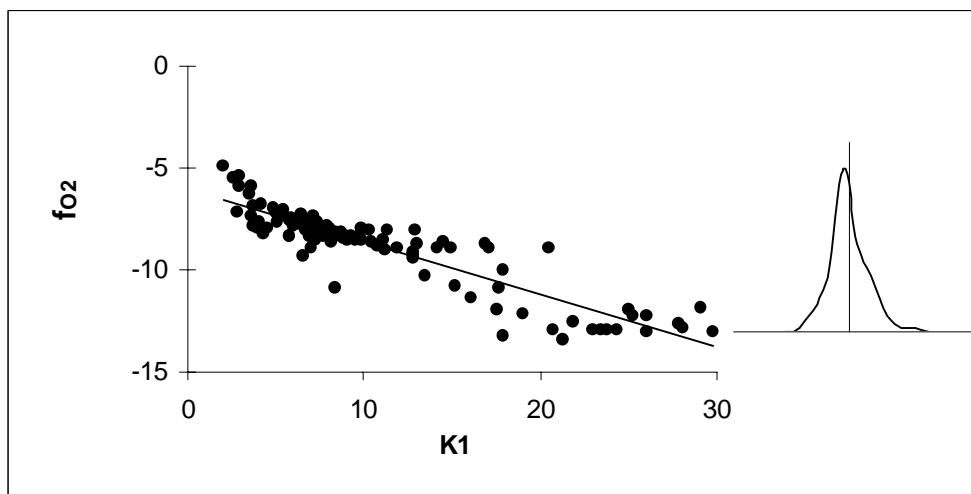


Рис. I.П.1.12 sp–ol (формула SPOLfa). Зависимость величины f_{O_2} от состава шпинели, оливины, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe_{m}^{2+} - Fe_{ol}^{2+} + Fe_{sp}^{3+} - Ti_{sp}:3 - Cr_{sp}:10 - Fe_{sp}^{2+}:8 - 6Ca_{ol}$$

$$f_{O_2} = 0.3K_1 - 7.22(SPOLFb)$$

Диапазон значений f_{O_2} -5...-13.5

Относительная ошибка 18.2–6.7 %

$R = 0.9$; $N = 109$; $N_1 = 109$; $\sigma = 0.91$; $\chi^2 = 3.32$ (12)

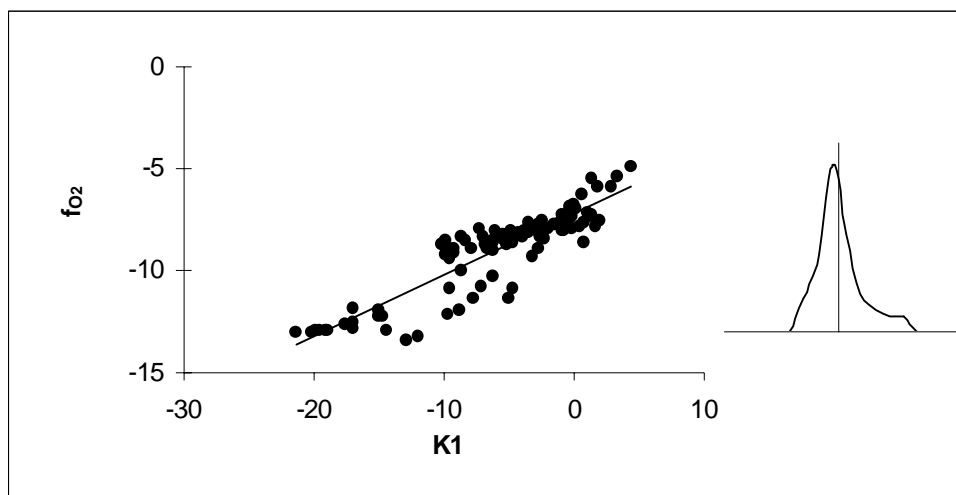


Рис. I.П.1.13 sp–ol (формула SPOLFb). Зависимость величины f_{O_2} от состава шпинели, оливины, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов между шпинелью и оливином

$$K_1 = Fe_{sp}^{2+} - Ti_{sp}; K_2 = LnFe_{ol}^{2+}$$

$$K_1 = 9.99K_2 - 9.76(SPOLRa)$$

Диапазон значений K_1 4.7–26.1

Относительная ошибка 33.2–6 %

$R = 0.96$; $N = 123$; $N_1 = 118$; $\sigma = 1.56$; $\chi^2 = 4.78$ (12)

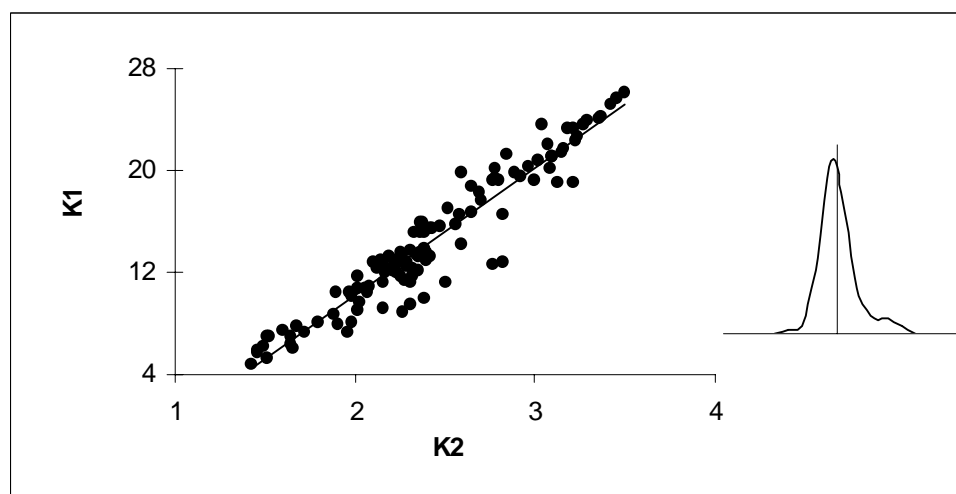


Рис. I.П.1.14 sp–ol (формула SPOLRa). Зависимость значения K_1 от K_2 и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = \ln(\text{Mg}_{\text{sp}} - \text{Al}_{\text{sp}}:7)$$

$$\text{Mg}_{\text{ol}} = 17.2K_1 + 7.62(\text{SPOLRb})$$

Диапазон значений Mg 32.6–62 (атом.%)

Относительная ошибка 3.5–1.8 %

$R = 0.99$; $N = 123$; $N_1 = 119$; $\sigma = 1.14$; $\chi^2 = 1.7$ (12)

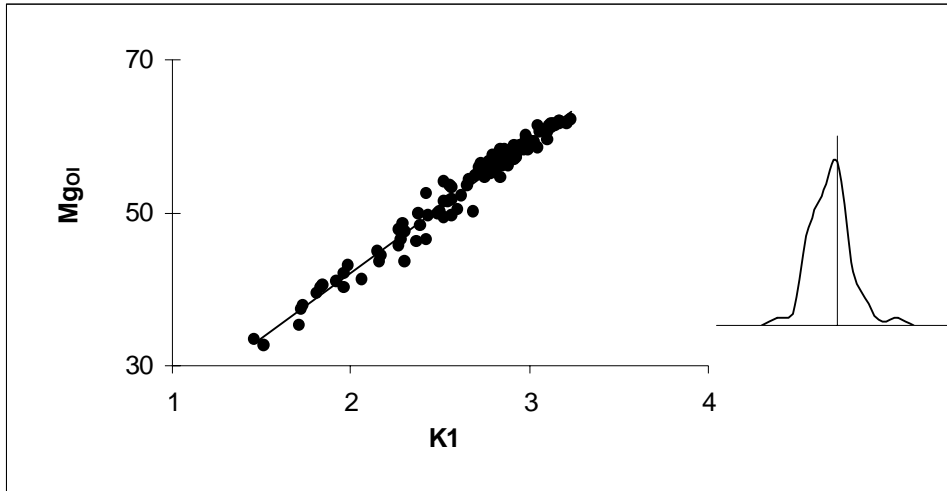


Рис. I.П.1.15 sp–ol (формула SPOLRb). Зависимость содержаний Mg_{ol} от K₁ и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{ol}}; K_2 = (\text{Fe}^{2+}_{\text{sp}} - \text{Ti}_{\text{sp}}) \cdot \text{Mg}_{\text{sp}}$$

$$K_2 = 3.72K_1 - 0.02(\text{SPOLRc})$$

Диапазон значений K₂ 0.1–3.8

Относительная ошибка 170–4.5 %

$R = 0.97$; $N = 123$; $N_1 = 118$; $\sigma = 0.17$; $\chi^2 = 2.02$ (12)

$$K_1 = 0.25K_2 + 0.02$$

Диапазон значений K₁ 0.06–1

Относительная ошибка 67–4 %; $\sigma = 0.04$

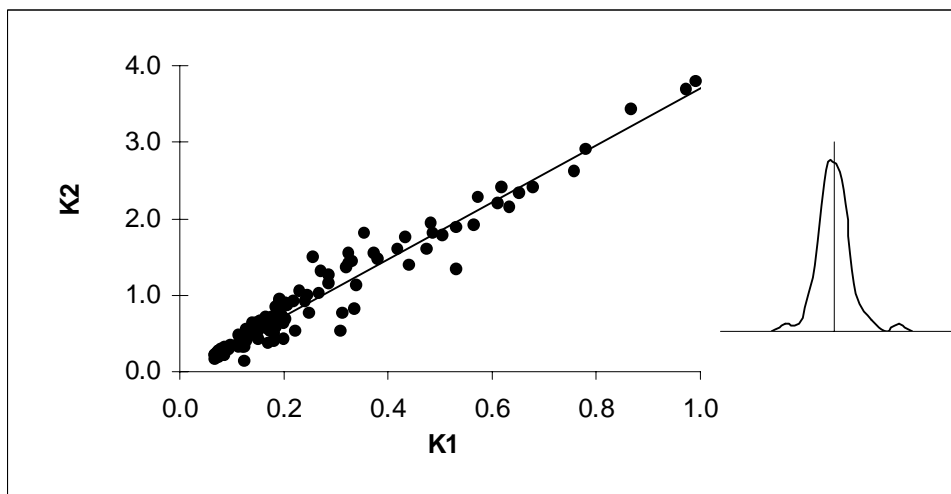


Рис. I.П.1.16 sp–ol (формула SPOLRc). Зависимость содержаний K₂ от K₁ и распределение среднеквадратичной ошибки.

2.2. Система расплав–оливин–ортопироксен

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [9; 15; 20; 27; 67; 70; 71; 77; 98; 166; 178; 255].

Используемые данные: общее число точек – 55 т. тройных анализов; была удалена одна точка с суммой анализа < 95 % – 54 т. Для расчета содержаний титана были отброшены 4 точки с нулевыми содержаниями в расплаве – 50 т. Для расчета содержаний железа двухвалентного и магния были отброшены точки с нулевыми содержаниями хрома в оливине – 45 т. Для расчета содержаний хрома были отброшены точки с нулевыми содержаниями его в расплаве – 41 т.

Таблица I.П.2.1 ол–орх. Диапазоны составов стекол (расплавов), оливинов и ортопироксенов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

OLOP	Расплав	T °C	1085–1350
SiO ₂	47.6–61.8	Si	45.54–59.29
TiO ₂	0.23–6	Ti	0.16–4.32
Al ₂ O ₃	5.64–16.5	Al	6.27–18.35
FeO	4.98–24.6	Fe	3.97–20.12
MnO	0.08–0.56	Mn	0.06–0.46
MgO	2.55–14.6	Mg	3.71–20.54
CaO	4.52–13.4	Ca	4.57–13.7
Na ₂ O	0.01–4.48	Na	0.02–8.06
K ₂ O	0.11–3.45	K	0.13–4.2
Cr ₂ O ₃	0.01–0.77	Cr	0.01–0.59

Продолжение таблицы I.П.2.1 ол–орх.

OLOP	Ортопироксен		Оливин		Fo	56.32–91.98	
SiO ₂	52.3–57.4	Si	47.35–50.4	SiO ₂	35.8–41	Si	32.19–33.93
TiO ₂	0.08–1.49	Ti	0.05–0.99	TiO ₂	0.01–0.24	Ti	0.01–0.17
Al ₂ O ₃	0.29–3.43	Al	0.3–3.55	Al ₂ O ₃	0.01–0.53	Al	0.01–0.58
FeO	4.6–20.9	Fe	3.37–16.3	FeO	7.87–36.5	Fe	5.34–28.39
MnO	0.16–0.52	Mn	0.12–0.41	MnO	0.14–0.62	Mn	0.1–0.49
MgO	21.9–33.4	Mg	30.44–43.63	MgO	26.4–50.6	Mg	36.6–61.15
CaO	0.4–2.9	Ca	0.38–2.87	CaO	0.12–0.5	Ca	0.11–0.45
Na ₂ O	0.01–0.07	Na	0.02–0.12	Na ₂ O	0.04–0.04	Na	0.07–0.07
K ₂ O	0.02–0.03	K	0.02–0.04	K ₂ O	0–0	K	0–0
Cr ₂ O ₃	0.03–1.25	Cr	0.02–0.85	Cr ₂ O ₃	0.01–0.54	Cr	0.01–0.37
En	61.48–89.66	Wo	0.77–5.81	Fs	6.9–33.17		

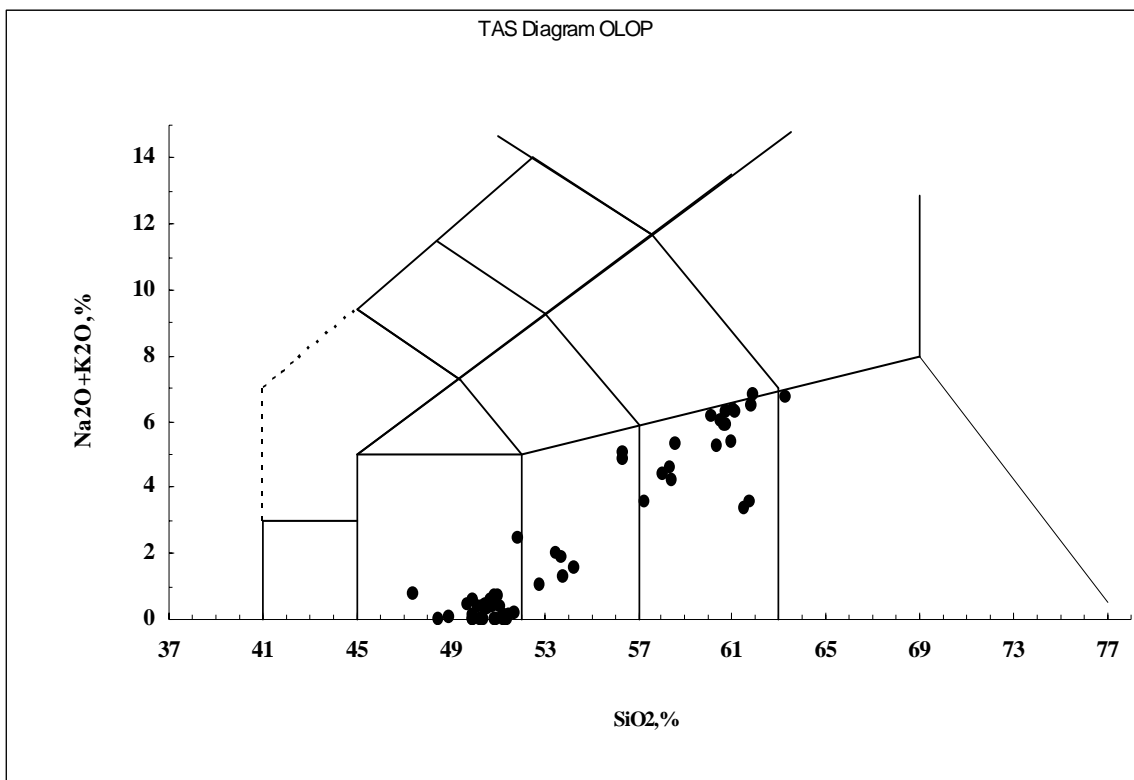


Рис. I.II.2.1 ol–орх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливина и ортопироксена, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = (Cr_{ol} + Cr_{op})Si_{op} + Mg_{ol} - 4(K_m + Na_m)$$

$$Si_m = -0.11K_1 + 57.6(OLOP1a)$$

Диапазон значений Si 45.5–59.2 (атом. %)

Относительная ошибка 3.7–2.9 %

$R = -0.91$; $N = 54$; $N_1 = 54$; $\sigma = 1.7$; $\chi^2 = 1.08$ (8)

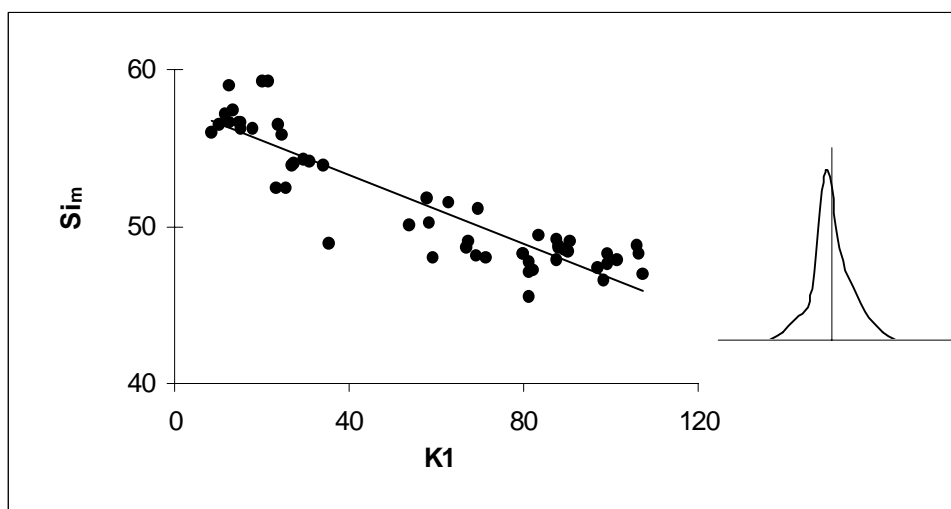


Рис. I.II.2.2 ol–орх (**формула OLOP1a**). Зависимость содержаний Si_m от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (Cr_{ol} + Cr_{op})Si_{op} + Mg_{ol} + 2Mg_m$$

$$Si_m = -0.13K_1 + 63.5(OLOP1b)$$

Диапазон значений Si 45.5–59.2 (атом. %)

Относительная ошибка 4.2–3.2 %

$R = -0.88$; $N = 54$; $N_1 = 54$; $\sigma = 1.9$; $\chi^2 = 1.06$ (8)

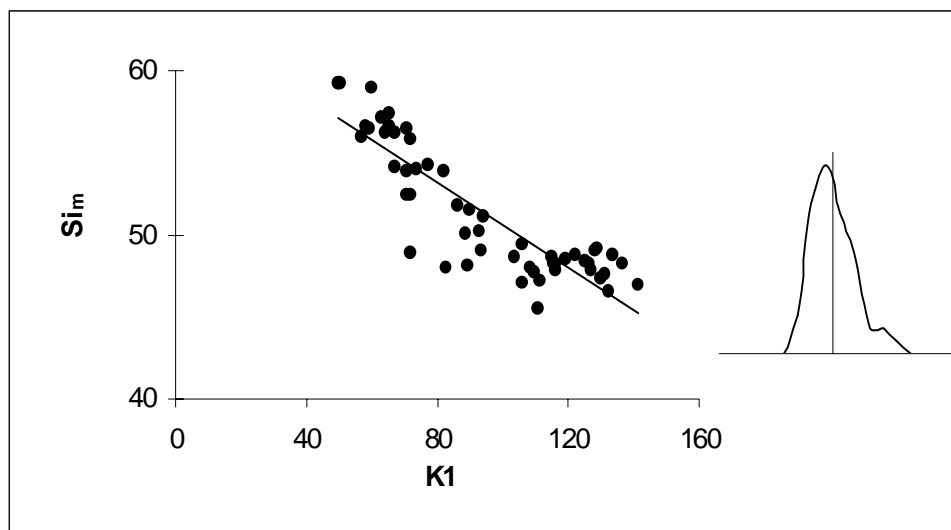


Рис. I.П.2.3 ol–орх (формула OLOP1b). Зависимость содержаний Si_m от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа двухвалентного в расплаве

$$K_1 = Cr_{ol}Fe^{2+}_{op}$$

$$Fe^{2+}_m = 3.11K_1 + 4.39(OLOP5)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 4.1–20 (атом. %)

Относительная ошибка 41–8.5 %

$R = 0.95$; $N = 45$; $N_1 = 45$; $\sigma = 1.7$; $\chi^2 = 0.12$ (8)

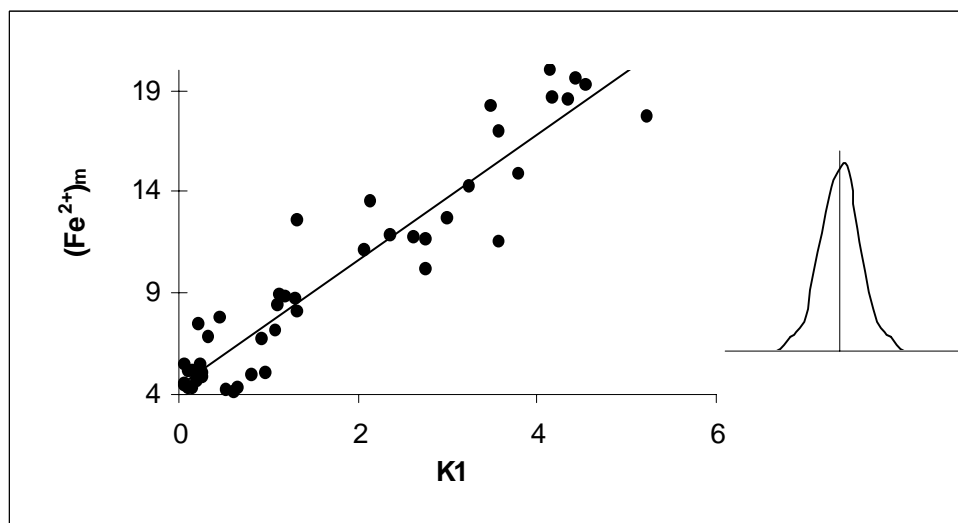


Рис. I.П.2.4 ol–орх (формула OLOP5). Зависимость содержаний Si_m от состава оливина, ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = \text{Ln}(\text{Cr}_{\text{ol}}\text{Mg}_{\text{ol}}:\text{Ca}_{\text{op}}) + \text{Mg}_{\text{op}}:5$$

$$\text{Mg}_m = 2.6K_1 - 11.68(\text{OLOP7})$$

Диапазон значений Mg 3.7–20.5 (атом. %)

Относительная ошибка 43–7.8 %

$R = 0.94$; $N = 45$; $N_1 = 45$; $\sigma = 1.6$; $\chi^2 = 0.94$ (8)

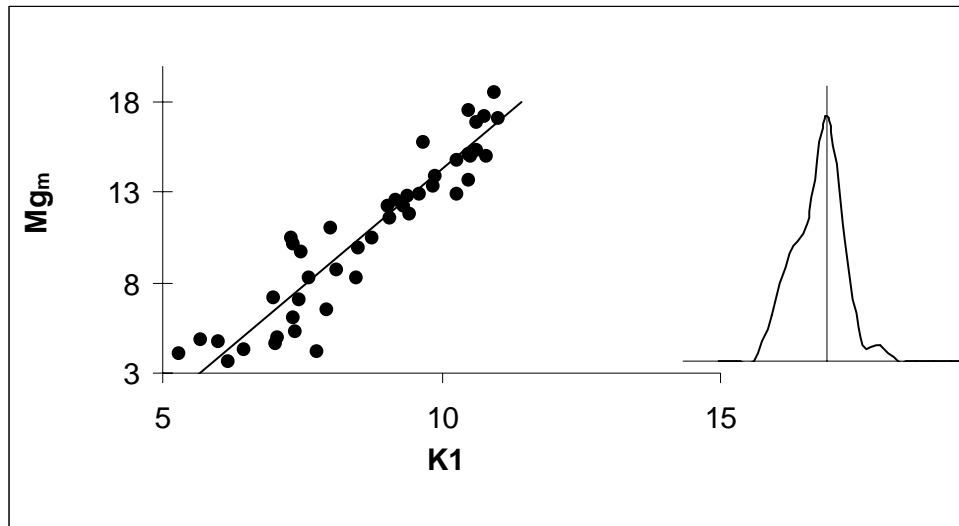


Рис. I.П.2.5 ol–орх (формула OLOP7). Зависимость содержаний Mg_m от состава оливина, ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = \text{Fe}^{2+}_{\text{ol}}\text{Si}_{\text{op}}:10\text{Mg}_m\text{Ca}_{\text{op}} - 3\text{Ca}_{\text{ol}}$$

$$\text{Ca}_m = -0.71K_1 + 11.94(\text{OLOP8})$$

Диапазон значений Ca 4.6–13.7 (атом. %)

Относительная ошибка 25.4–8.5 %

$R = -0.9$; $N = 54$; $N_1 = 53$; $\sigma = 1.17$; $\chi^2 = 1.76$ (8)

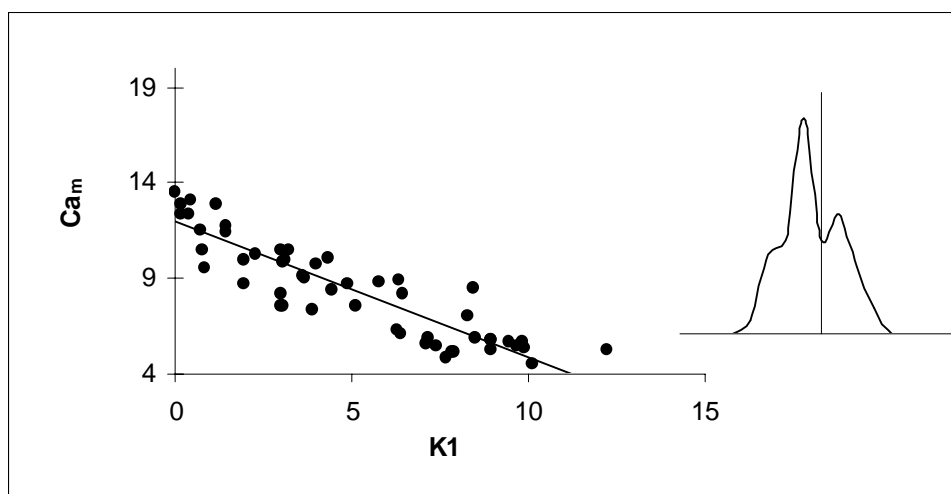


Рис. I.П.2.6 ol–орх (формула OLOP8). Зависимость содержаний Ca_m от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний хрома в расплаве

$$K_1 = (12Cr_{ol} - Ca_{op}):10$$

$$Cr_m = 0.81K_1 + 0.18(OLOP11)$$

Диапазон значений Cr 0.01–0.58 (атом. %)

Относительная ошибка 600–10.4 %

R = 0.92; N = 41; N₁ = 41; сигма = 0.06; $\chi^2 = 0.45$ (8)

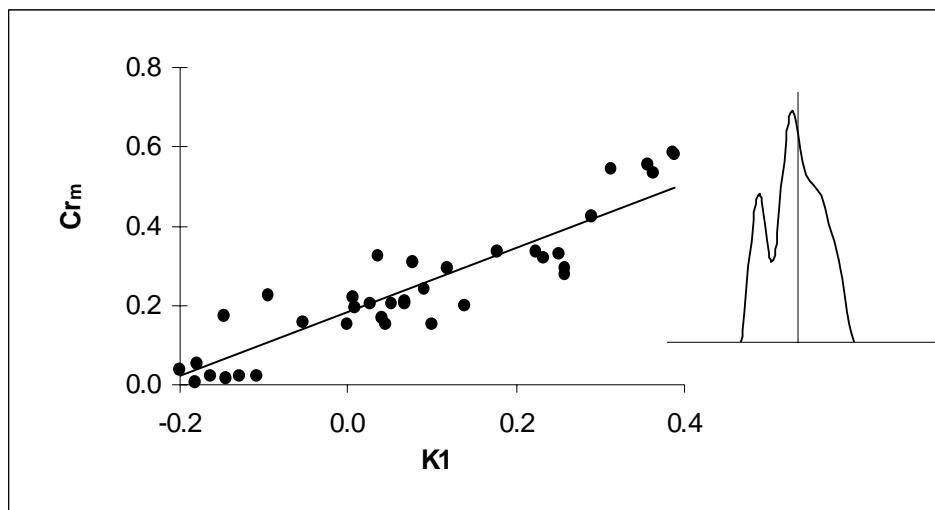


Рис. I.П.2.7 ol–орх (формула OLOP11). Зависимость содержаний Cr_m от состава оливина, ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = Ca_{ol} + Ca_{op} - Cr_{op} + Al_m:4 + Si_m:12$$

$$T = -37.14K_1 + 1541.72(OLOPTa)$$

Диапазон значений T 1085–1350 °C

Относительная ошибка 1.6–1.3 %

R = -0.9; N = 54; N₁ = 53; сигма = 17.7 °C; $\chi^2 = 0.48$ (8)

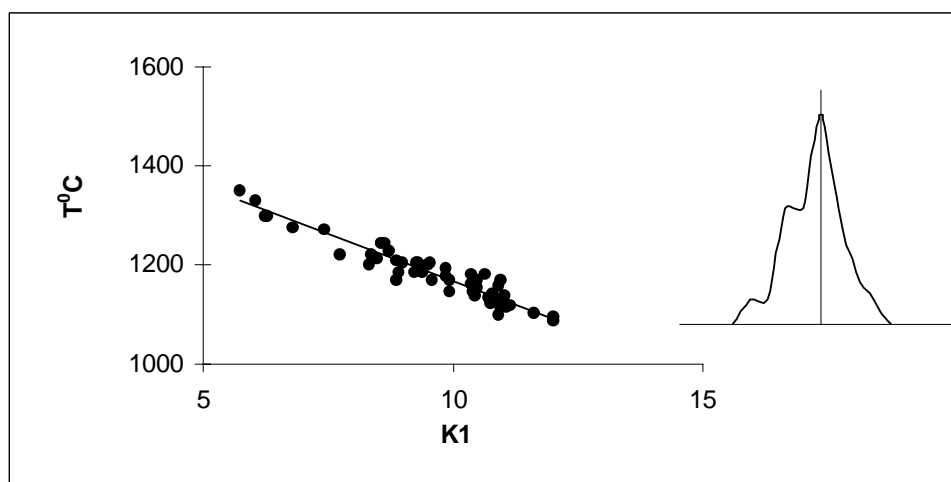


Рис. I.П.2.8 ol–орх (формула OLOPTa). Зависимость значения T от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Ca_{ol} + Ca_{op} - Cr_{op} + Al_m:4 + (K_m + Na_m):5$$

$$T = -29.88K_1 + 1364.76(\text{OLOPTb})$$

Диапазон значений T 1085–1350 °C

Относительная ошибка 1.6–1.3 %

R = -0.96; N = 54; N₁ = 53; сигма = 17.3 °C; $\chi^2 = 0.87$ (8)

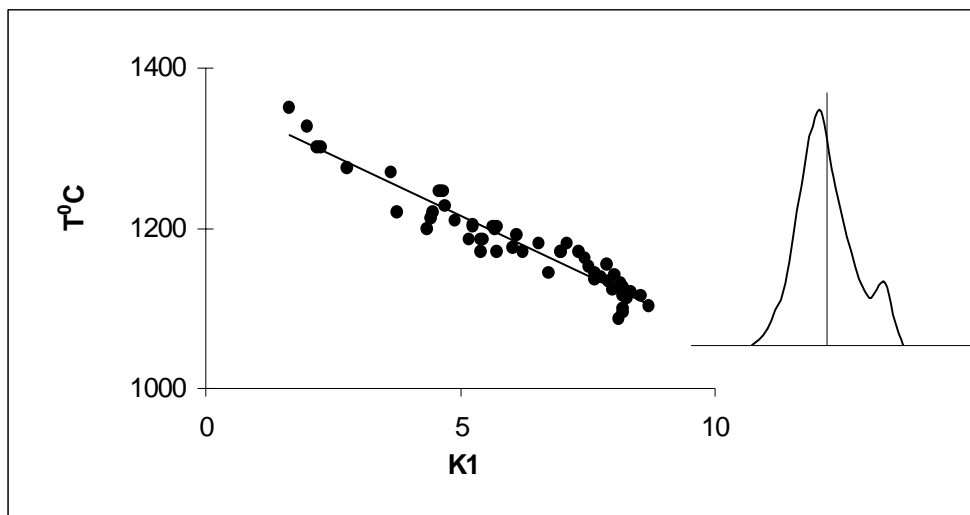


Рис. I.П.2.9 ol–орх (формула OLOPTb). Зависимость значения T от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Ca_{ol} + Ca_{op} - Cr_{op} + Al_m:4 - Ca_m:6.5$$

$$T = -42.04K_1 + 1351.76(\text{OLOPTc})$$

Диапазон значений T 1085–1350 °C

Относительная ошибка 1.5–1.2 %

R = -0.9; N = 54; N₁ = 53; сигма = 16.7 °C; $\chi^2 = 0.5$ (8)

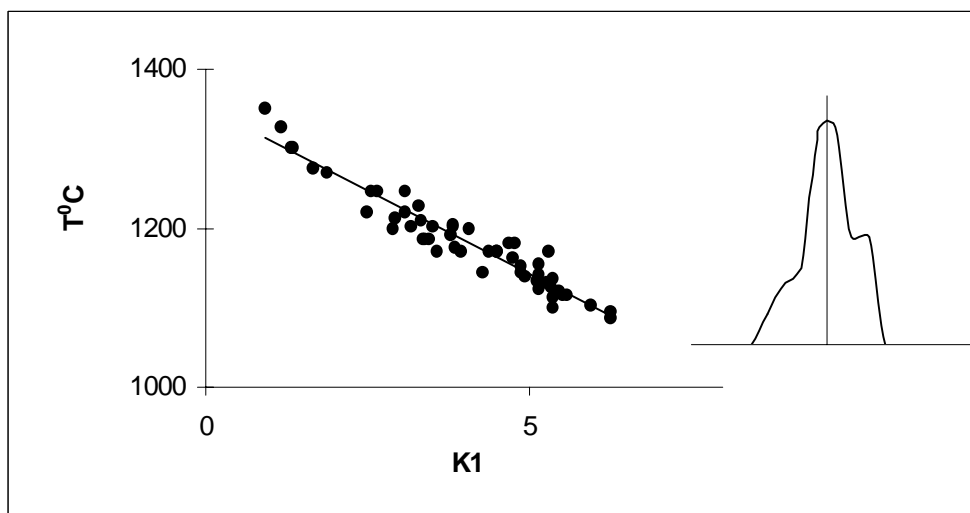


Рис. I.П.2.10 ol–орх (формула OLOPTc). Зависимость значения T от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по трем выше приведенным формулам составляет сигма < 16 °C.

Расчет значений фугитивности кислорода

$$K_1 = 10(Cr_{ol} + Cr_{op}) + 6Ca_{ol} - Mg_{op} : 5$$

$$f_{O_2} = -0.48K_1 - 11.52(OLOPf)$$

Диапазон значений f_{O_2} -5...-11.52

Относительная ошибка 22.4–8.3 %

$R = -0.84$; $N = 54$; $N_1 = 53$; $\sigma = 1.12$; $\chi^2 = 2.53$ (8)

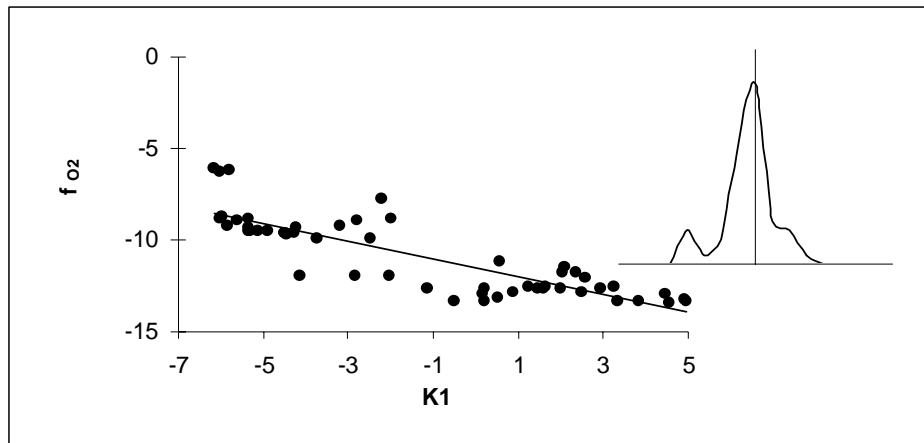


Рис. I.П.2.11 ol–орх (формула OLOPf). Зависимость величины f_{O_2} от состава оливина, ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов между оливином и ортопироксеном

$$K_1 = (Fe^{2+}/Mg)_{ol}; K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_{op}$$

$$K_2 = 0.73K_1 + 0.03(OLOPRa)$$

Диапазон значений K_2 0.08–0.53

Относительная ошибка 18.7–2.8 %

$R = 0.99$; $N = 54$; $N_1 = 52$; $\sigma = 0.015$; $\chi^2 = 3.56$ (8)

$$K_1 = 1.35K_2 - 0.04$$

Диапазон значений K_2 0.09–0.77

Относительная ошибка 22.2–2.6 %; $\sigma = 0.02$;

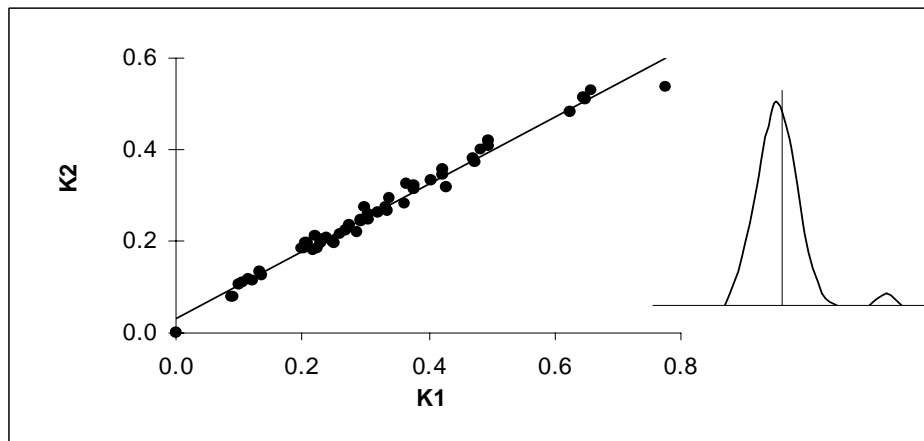


Рис. I.П.2.12 ol–орх (формула OLOPRa). Зависимость значений K_2 от K_1 , K_1 от K_2 и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Ln}(10\text{Cr}_{\text{ol}}\text{Al}_{\text{op}} + 0.1)$$

$$\text{Cr}_{\text{op}} = 0.2K_1 + 0.32(\text{OLOPRb})$$

Диапазон значений Cr 0.02–0.85

Относительная ошибка 500–11.8 %

$R = 0.91$; $N = 45$; $N_1 = 45$; $\sigma = 0.1$; $\chi^2 = 4.11$ (8)

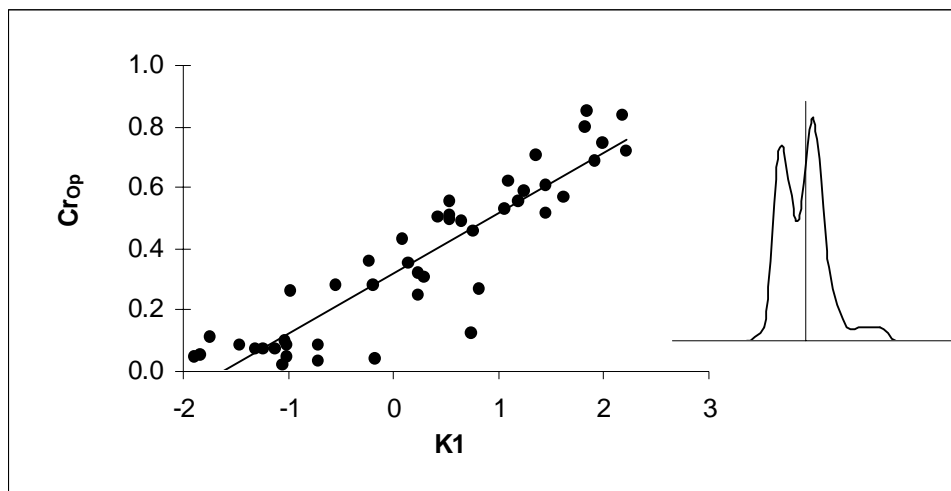


Рис. I.П.2.13 ol–орх (формула OLOPRb). Зависимость содержаний Cr_{op} от состава оливина, ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

2.3. Система расплав–оливин–клинопироксен

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [2; 4; 5; 6; 9; 12; 14; 20; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 54; 67; 68; 69; 70; 71; 77; 80; 81; 83; 86; 87; 88; 90; 91; 92; 98; 100; 132; 169; 172; 173; 176; 177; 178; 189; 190; 193; 194; 236; 255; 280; 281; 294; 305; 347; D1].

Используемые данные: общее число точек – 435 т. тройных анализов. Были удалены анализы стекол и минералов с суммами < 98 % и > 102 %, а также результаты экспериментов с отсутствием железа в расплаве – 402 т. Для расчета титана в расплаве были отброшены точки с нулевыми содержаниями его в расплаве – 348 т. Для расчета содержаний Fe^{2+} в расплаве были отброшены точки, в которых отсутствовал контроль фугитивности кислорода – 366 т. Для расчета содержаний натрия в расплаве были исключены точки с нулевыми концентрациями его в расплаве – 372 т. Для расчета содержаний хрома в расплаве были отброшены точки с нулевыми содержаниями его в расплаве – 140 т.

Таблица I.П.3.1 ol–срх. Диапазоны составов стекол (расплавов), оливинов и авгитов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

OLAV	Расплав	T °C	1025–1275
SiO ₂	37.66–65.71	Si	37.33–60.85
TiO ₂	0.12–7.97	Ti	0.08–6.15
Al ₂ O ₃	4.48–25.66	Al	5.63–27.64
FeO	0.49–34.14	Fe	0.37–30.47
MnO	0.04–1.59	Mn	0.03–1.34
MgO	0.11–13.3	Mg	0.15–18.74
CaO	2.26–22.44	Ca	2.2–22.74
Na ₂ O	0.01–9.62	Na	0.02–16.43
K ₂ O	0.01–7.88	K	0.01–9.35
Cr ₂ O ₃	0.01–0.48	Cr	0.01–0.38

Продолжение таблицы I.П.3.1 ol–срх.

OLAV	Авгит		Оливин		Fo	7.82–98.85	
SiO ₂	39.67–55.7	Si	37.37–49.96	SiO ₂	29.2–43.25	Si	31.55–35.09
TiO ₂	0.03–4.61	Ti	0.02–3.26	TiO ₂	0.01–0.41	Ti	0.01–0.3
Al ₂ O ₃	0.66–12.69	Al	0.79–13.94	Al ₂ O ₃	0.01–1.45	Al	0.01–1.5
FeO	2.86–29.4	Fe	2.23–25.6	FeO	1.17–65.1	Fe	0.76–61.02
MnO	0.02–0.65	Mn	0.02–0.52	MnO	0.11–1.79	Mn	0.07–1.37
MgO	3.5–24	Mg	5.43–32.6	MgO	3.1–56.19	Mg	5.18–65.01
CaO	4.4–24.79	Ca	4.3–24.69	CaO	0.09–5.14	Ca	0.08–5.36
Na ₂ O	0.01–0.84	Na	0.02–1.54	Na ₂ O	0.01–0.63	Na	0.02–1.07
K ₂ O	0.01–0.38	K	0.01–0.45	K ₂ O	0.01–0.25	K	0.01–0.28
Cr ₂ O ₃	0.01–1.35	Cr	0.01–0.99	Cr ₂ O ₃	0.01–0.37	Cr	0.01–0.26
En	11.01–67.14	Wo	8.85–55.09	Fs	4.68–51.9		

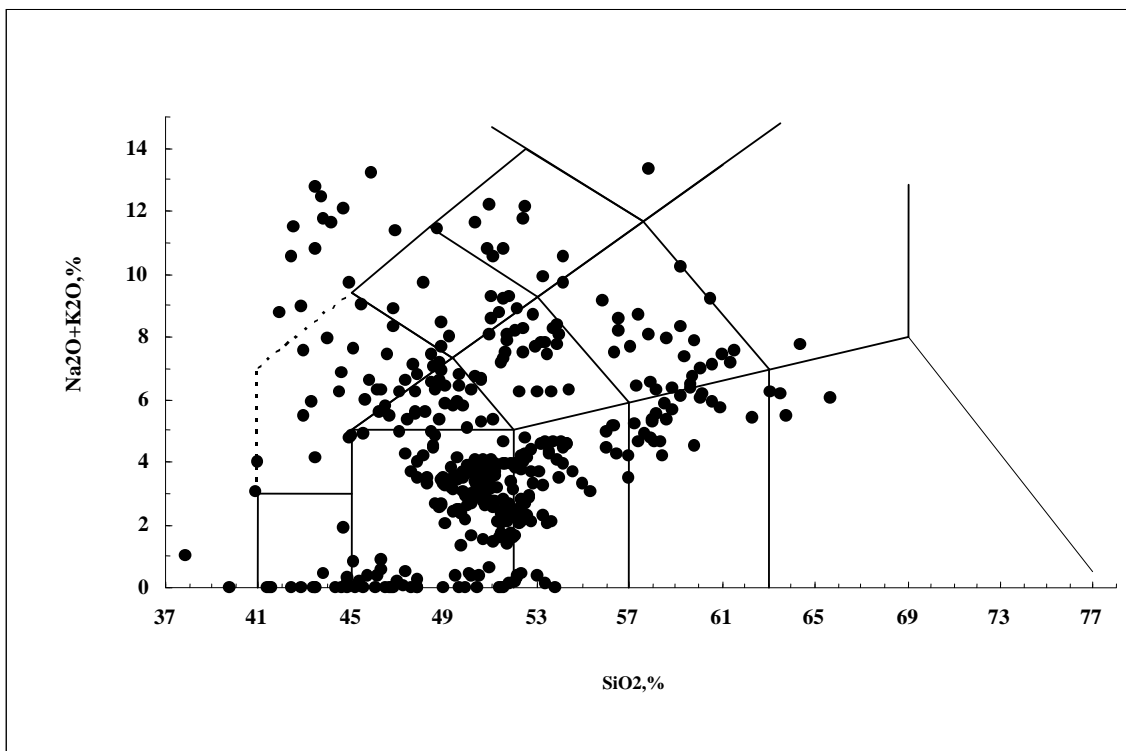


Рис. I.П.3.1 ol–срх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливина и клинопироксена, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = \text{Ln}(2\text{Ti}_{\text{av}} + 2\text{Al}_{\text{av}} + \text{Al}_{\text{av}}:4 + 5\text{Ca}_{\text{ol}} + 2\text{Ca}_{\text{m}})$$

$$\text{Si}_m = -14.85K_1 + 101.3(\text{OLAV1})$$

Диапазон значений Si 37–61 (атом. %)

Относительная ошибка 4.6–2.8 %

$R = -0.91$; $N = 402$; $N_1 = 398$; $\text{сигма} = 1.7$; $\chi^2 = 2.82$ (12)

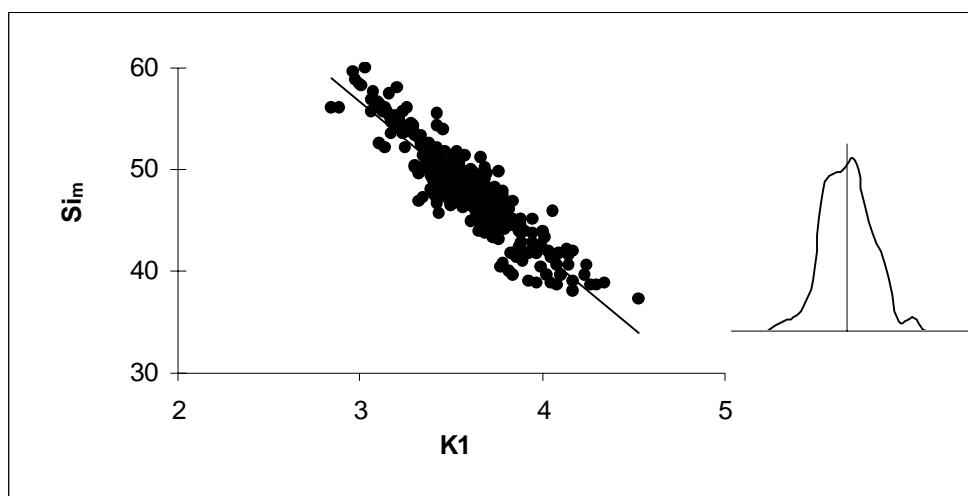


Рис. I.П.3.2 ol–срх (формула OLAV1). Зависимость содержаний Si_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = 7Ti_{av} - 4Ca_{ol} - Al_{av} - Fe^{2+}_{av} \cdot 4 - Ca_{av} \cdot 4 + Fe^{2+}_m \cdot 2 - Si_m \cdot 9$$

$$Ti_m = 0.24K_1 + 3.67(OLAV2)$$

Диапазон значений Ti 0.08–6.1 (атом. %)

Относительная ошибка 700–9.2 %

R = 0.83; N = 348; N₁ = 344; сигма = 0.57; $\chi^2 = 2.06$ (12)

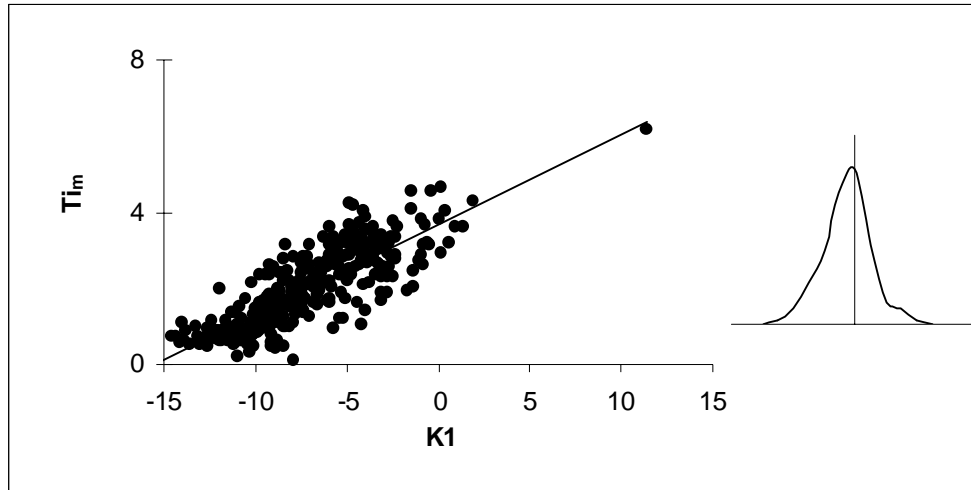


Рис. I.П.3.3 ol–срх (формула OLAV2). Зависимость содержаний Ti_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Al_{av} - Ti_{av} + Mg_{ol} \cdot 3 - 2Ca_{ol} + Ca_{av} \cdot 3 + 3(K_{av} + Na_{av}) + (K_m + Na_m)$$

$$Al_m = 0.28K_1 + 6.2(OLAV3a)$$

Диапазон значений Al 5.6–22.5 (атом. %)

Относительная ошибка 20–5 %

R = 0.89; N = 402; N₁ = 395; сигма = 1.12; $\chi^2 = 3.07$ (12)

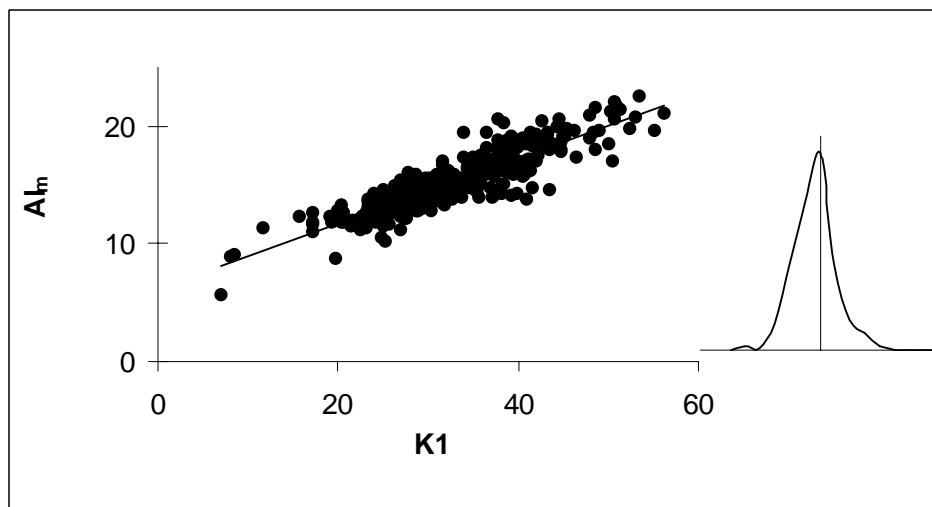


Рис. I.П.3.4 ol–срх (формула OLAV3a). Зависимость содержаний Al_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{av} - 2Ti_{av} + Mg_{ol} \cdot 3 - 2Ca_{ol} + Ca_{av} \cdot 4 + 2(K_{av} + Na_{av}) - Mg_m$$

$$Al_m = 0.52K_1 + 7.13(OLAV3b)$$

Диапазон значений Al 5.6–22.5 (атом. %)

Относительная ошибка 20–4.9 %

R = 0.9; N = 402; N₁ = 397; сигма = 1.1; $\chi^2 = 2.89$ (12)

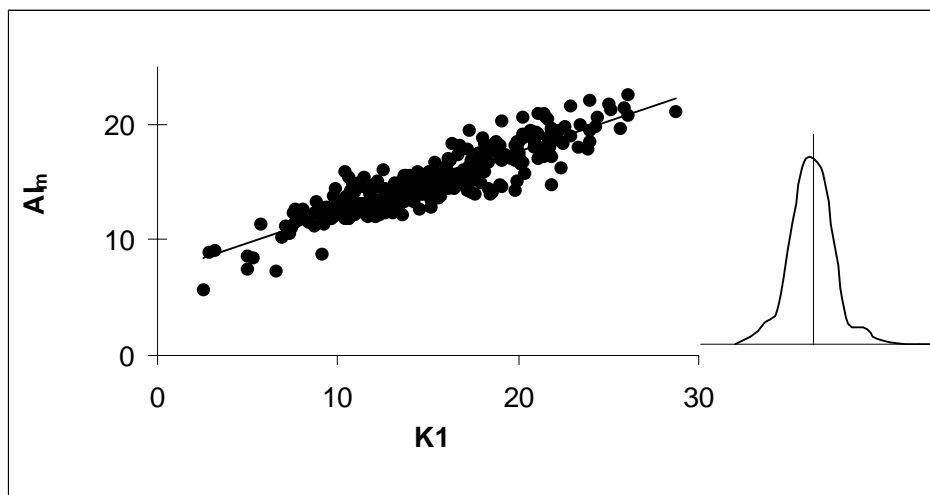


Рис. I.П.3.5 ol–срх (формула OLAV3b). Зависимость содержаний Al_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет сигма < 1.

Расчет содержаний железа двухвалентного в расплаве

$$K_1 = 9(Na_{av} + K_{av}) + 4Ti_{av} - Fe^{2+}_{ol} - 7Ca_{ol} + Si_m$$

$$Fe^{2+}_m = -0.3K_1 + 18.26(OLAV5a)$$

Диапазон значений Fe²⁺ 0.34–24.2 (атом. %)

Относительная ошибка 470–7 %

R = -0.88; N = 366; N₁ = 362; сигма = 1.6; $\chi^2 = 3.5$ (12)

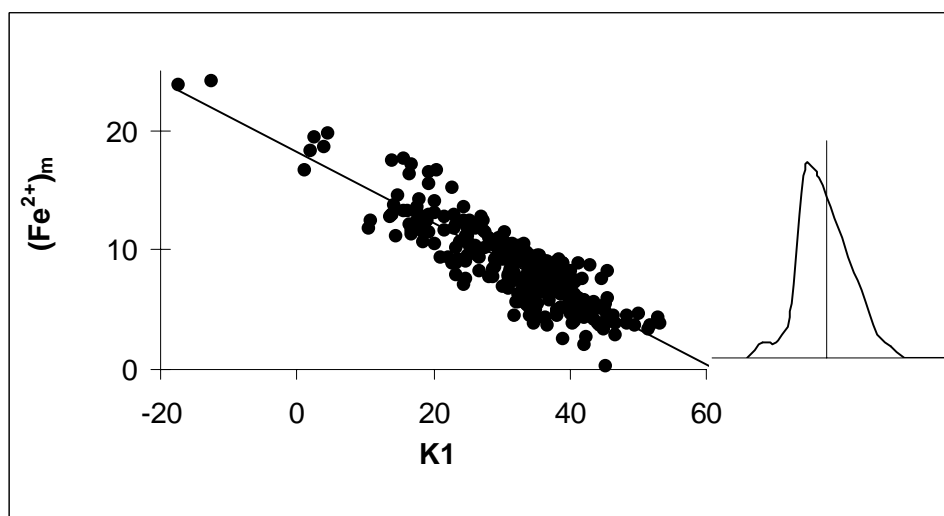


Рис. I.П.3.6 ol–срх (формула OLAV5a). Зависимость содержаний Fe²⁺_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 5(\text{Na}_{\text{av}} + \text{K}_{\text{av}}) + 4\text{Ti}_{\text{av}} - 1.2\text{Fe}_{\text{ol}}^{2+} - 6\text{Ca}_{\text{ol}} + 1.2\text{Si}_m + 1.5(\text{Na}_m + \text{K}_m)$$

$$\text{Fe}_m^{2+} = -0.23K_1 + 19.32(\text{OLAV5b})$$

Диапазон значений Fe^{2+} 2.2–24.2 (атом. %)

Относительная ошибка 50–5 %

$R = 0.95$; $N = 366$; $N_1 = 357$; $\sigma = 1.1$; $\chi^2 = 3.52$ (12)

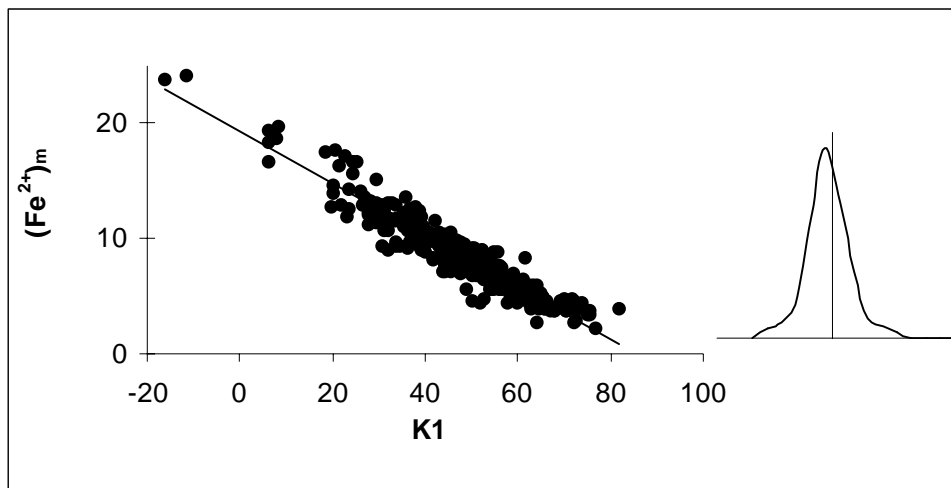


Рис. I.П.3.7 ol–срх (формула OLAV5b). Зависимость содержаний Fe_m^{2+} от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет $\sigma < 1$.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = \text{Exp}[(\text{Mg}_{\text{av}} + \text{Mg}_{\text{ol}:2} + \text{Si}_{\text{av}:3} + \text{Ca}_m):19]$$

$$\text{Mg}_m = 0.16K_1 + 0.45(\text{OLAV7a})$$

Диапазон значений Mg 0.9–18.7 (атом. %)

Относительная ошибка 122–5.9 %

$R = 0.93$; $N = 402$; $N_1 = 398$; $\sigma = 1.1$; $\chi^2 = 4.91$ (12)

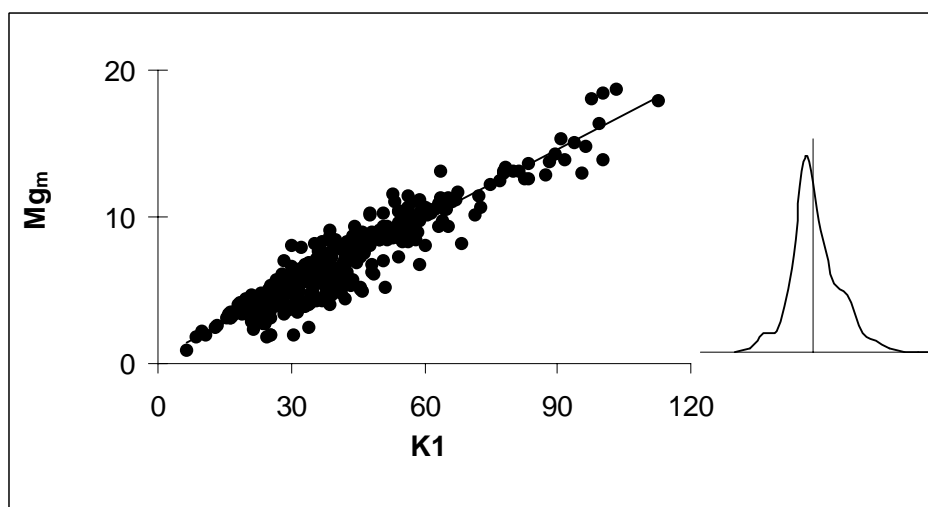


Рис. I. П.3.8 ol–срх (формула OLAV7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Exp}\{[\text{Mg}_{\text{av}} + \text{Mg}_{\text{ol}}:2 + \text{Si}_{\text{av}}:3 + 3\text{Ca}_{\text{ol}} - (\text{K}_{\text{m}} + \text{Na}_{\text{m}})]:21\}$$

$$\text{Mg}_{\text{m}} = 0.48K_1 + 0.31(\text{OLAV7b})$$

Диапазон значений Mg 0.9–18.7 (атом. %)

Относительная ошибка 112–5.3 %

$R = 0.94$; $N = 402$; $N_1 = 396$; $\sigma = 1$; $\chi^2 = 2.01$ (12)

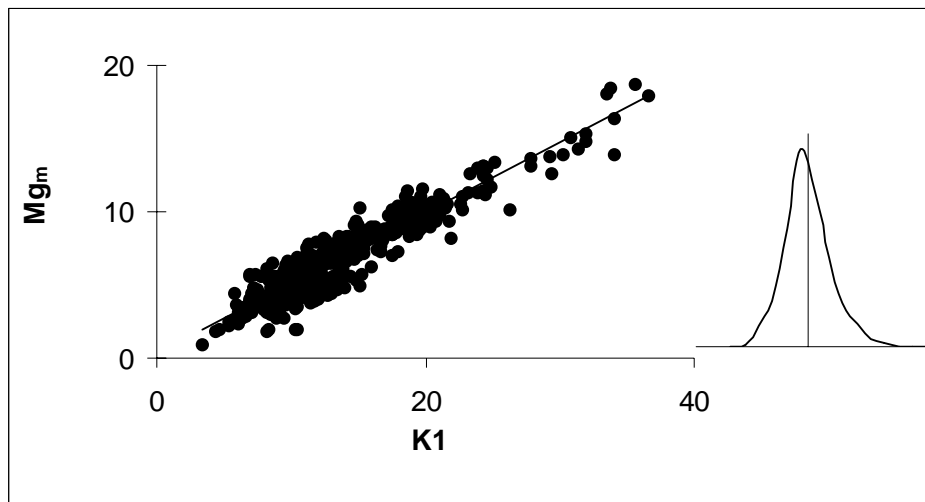


Рис. I.П.3.9 ol–срх (формула OLAV7b). Зависимость содержаний Mg_{m} от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет $\sigma < 1$.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = \text{Fe}^{2+}_{\text{ol}}:14 - \text{Ca}_{\text{ol}} + \text{Mg}_{\text{av}}:9 - \text{Ca}_{\text{av}}:11 + 4(\text{K}_{\text{av}} + \text{Na}_{\text{av}})$$

$$\text{Ca}_{\text{m}} = -2.24K_1 + 17.61(\text{OLAV8a})$$

Диапазон значений Ca 3.1–22.7 (атом. %)

Относительная ошибка 55–7.5 %

$R = -0.85$; $N = 402$; $N_1 = 398$; $\sigma = 1.7$; $\chi^2 = 5.89$ (12)

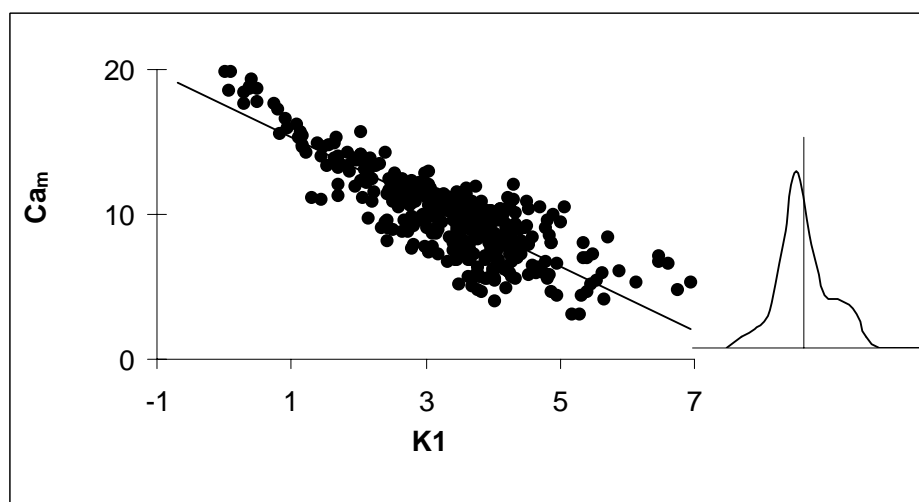


Рис. I.П.3.10 ol–срх (формула OLAV8a). Зависимость содержаний Ca_{m} от состава оливина, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 12Ca_{ol} + Al_{av}:3 + Mg_{av}:9 + Ca_{av}:5 + 1.4Mg_m - 0,8(K_m + Na_m)$$

$$Ca_m = 0.39K_1 + 3.07(OLAV8b)$$

Диапазон значений Ca 2.2–22.5 (атом. %)

Относительная ошибка 44–4.3 %

R = 0.95; N = 402; N₁ = 399; сигма = 0.97; $\chi^2 = 5.65$ (12)

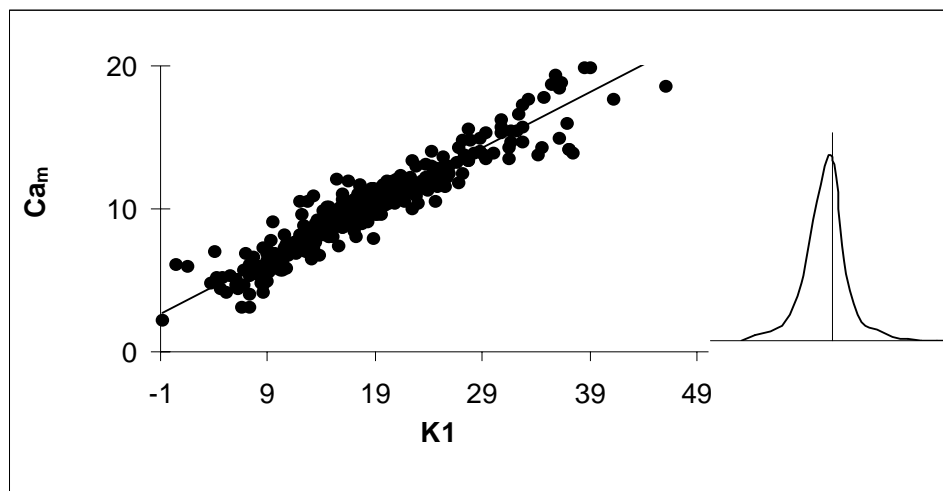


Рис. I.П.3.11 ol–срх (формула OLAV8b). Зависимость содержаний Ca_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет сигма < 1.2.

Расчет содержаний натрия в расплаве

$$K_1 = Al_{av}:2 + 9Na_{av} - Mg_{ol}:11 - Ti_m - Ca_m:2$$

$$Na_m = 0.55K_1 + 7.95(OLAV9)$$

Диапазон значений Na 0.13–13.2 (атом. %)

Относительная ошибка 1170–11.5 %

R = 0.8; N = 372; N₁ = 362; сигма = 1.52; $\chi^2 = 3.94$ (12)

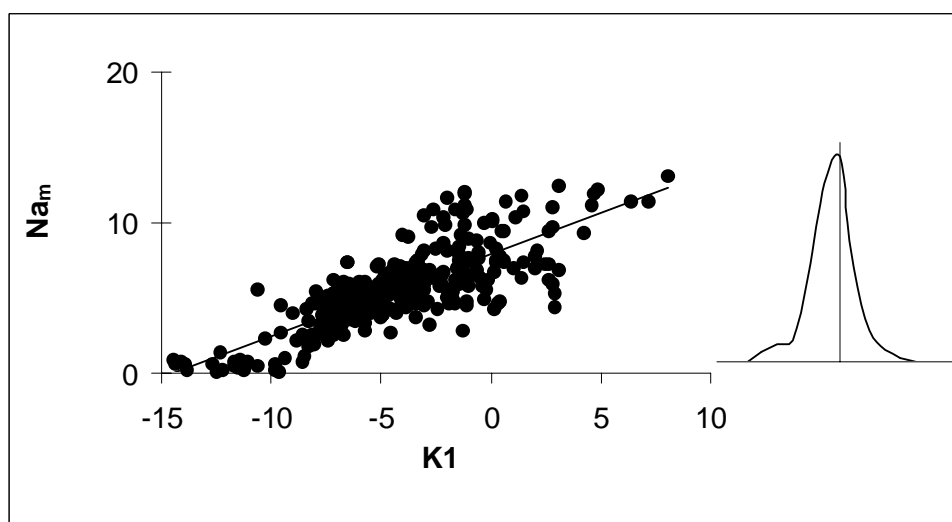


Рис. I.П.3.12 ol–срх (формула OLAV9). Зависимость содержаний Na_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний хрома в расплаве

$$K_1 = \{\text{Exp}[5(8\text{Cr}_{\text{ol}} + \text{Cr}_{\text{av}}) - 2(\text{K}_{\text{av}} + \text{Na}_{\text{av}}) - (\text{K}_{\text{m}} + \text{Na}_{\text{m}}):2]:10\}:10$$

$$\text{Cr}_m = 0.71K_1 - 0.03(\text{OLAV11})$$

Диапазон значений Cr 0.007–28 (атом. %)

Относительная ошибка 360–9 %

R = 0.88; N = 140; N₁ = 136; сигма = 0.03; $\chi^2 = 2.03$ (12)

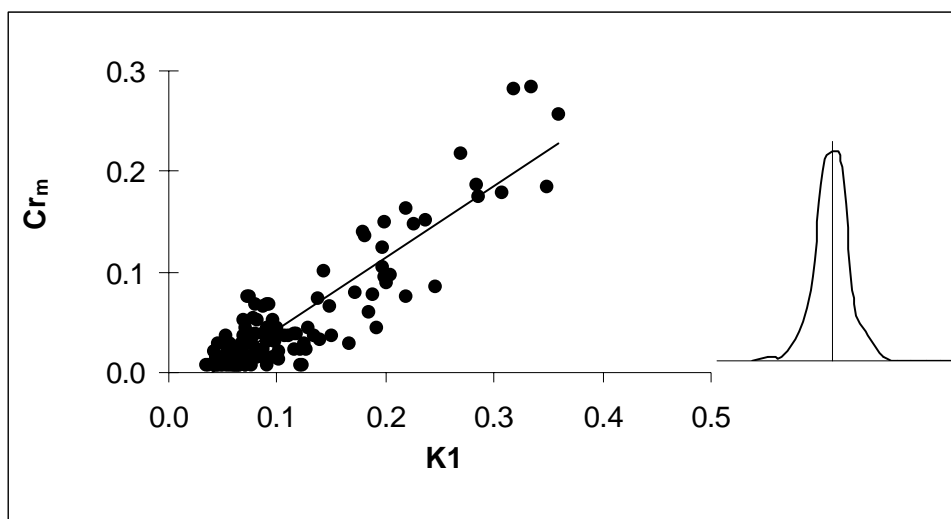


Рис. I.П.3.13 ol–срх (формула OLAV11). Зависимость содержаний Cr_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = \text{Mg}_{\text{ol}:2} + 3\text{Ca}_{\text{ol}} - 3\text{Ti}_{\text{av}} + \text{Al}_{\text{av}:2} + \text{Mg}_{\text{av}} - 6(\text{K}_{\text{av}} + \text{Na}_{\text{av}})$$

$$T = 4.45K_1 + 948.22(\text{OLAVTa})$$

Диапазон значений T 1025–1275 °C

Относительная ошибка 2.3–1.8 %

R = 0.82; N = 402; N₁ = 398; сигма = 23.5 °C; $\chi^2 = 2.66$ (12)

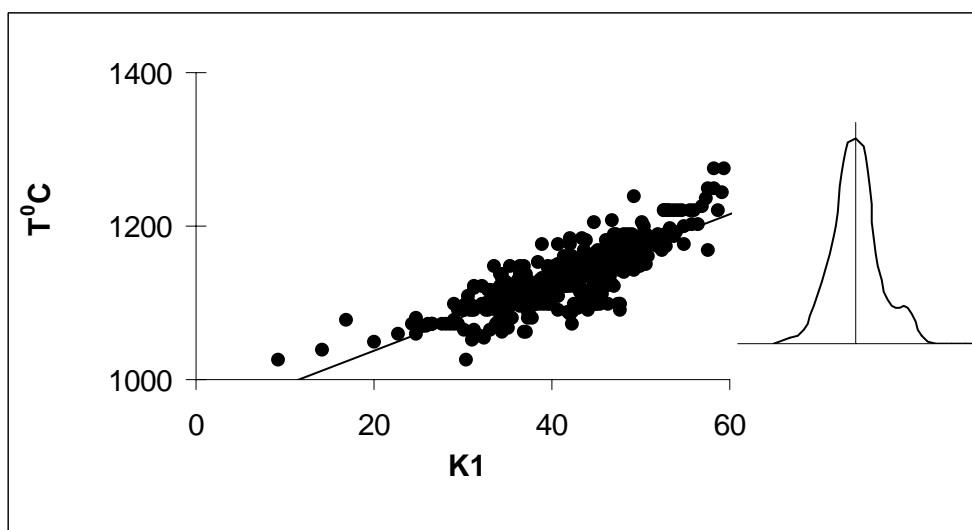


Рис. I.П.3.14 ol–срх (формула OLAVTa). Зависимость значения T от состава оливина, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{ol}:2 - 3Ti_{av} + Al_{av}:2 + Mg_{av} - 6(K_{av} + Na_{av}) + 1.4Ca_m$$

$$T = 3.4K_1 + 949.31(OLAVTb)$$

Диапазон значений T 1025–1275 °C

Относительная ошибка 1.8–1.5 %

R = 0.88; N = 402; N₁ = 395; сигма = 18.9 °C; $\chi^2 = 5.3$ (12)

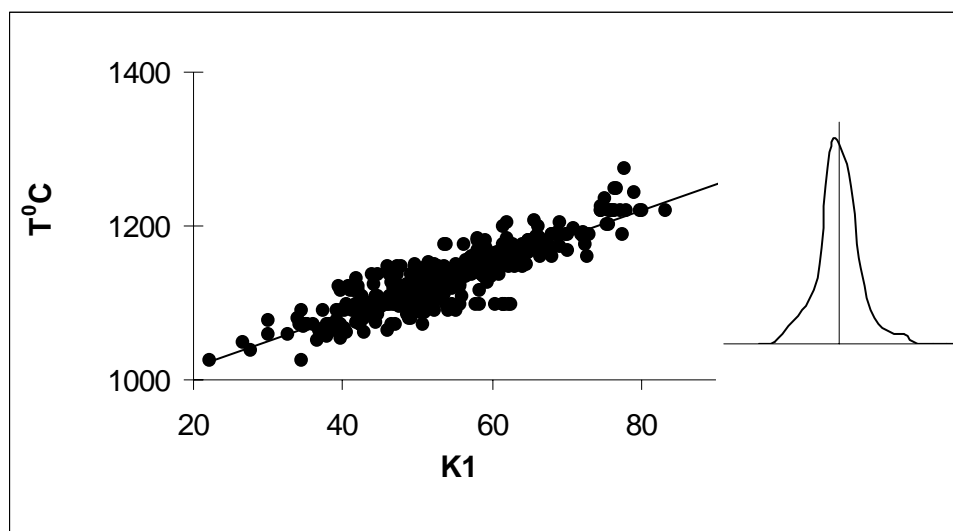


Рис. I.П.3.15 ol–срх (формула OLAVTb). Зависимость значения T от состава оливина, авгита, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol}:2 + 6Ca_{ol} + Ti_{av} - Al_{av}:3 - Mg_{av} + Al_m + Ti_m - 2Ca_m$$

$$T = -3.33K_1 + 1096.34(OLAVTc)$$

Диапазон значений T 1025–1275 °C

Относительная ошибка 1.7–1.3 %

R = -0.91; N = 402; N₁ = 399; сигма = 17.2 °C; $\chi^2 = 2.15$ (12)

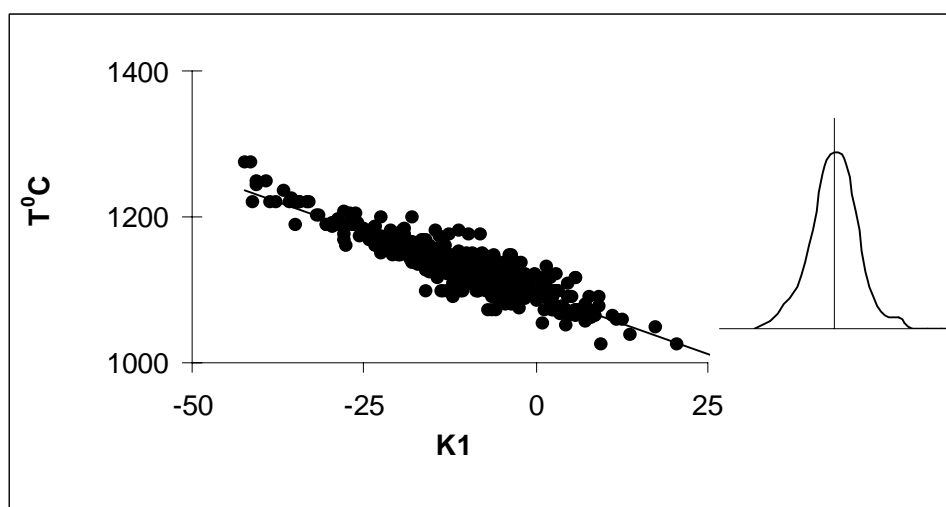


Рис. I. I.3.16 ol–срх (формула OLAVTc). Зависимость значения T от состава оливина, авгита, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Значение средноквадратичного отклонения при расчетах по трем выше приведенным формулам составляет сигма < 17 °C.

Равновесное распределение элементов между оливином и авгитом

$$K_1 = \text{Ln}(\text{Fe}_{\text{av}}^{2+} + \text{Ca}_{\text{av}} \cdot 3); K_2 = \text{Fe}_{\text{ol}}^{2+} - 3\text{Ca}_{\text{ol}} + 2\text{Ti}_{\text{av}}$$

$$K_2 = 43.83K_1 - 94.42(\text{OLAVRa})$$

Диапазон значений K_2 4.7–60; K_1 2.2–3.5

Относительная ошибка 70–5.5 %

$R = 0.92$; $N = 402$; $N_1 = 397$; сигма = 3.3; $\chi^2 = 10.58$ (12)

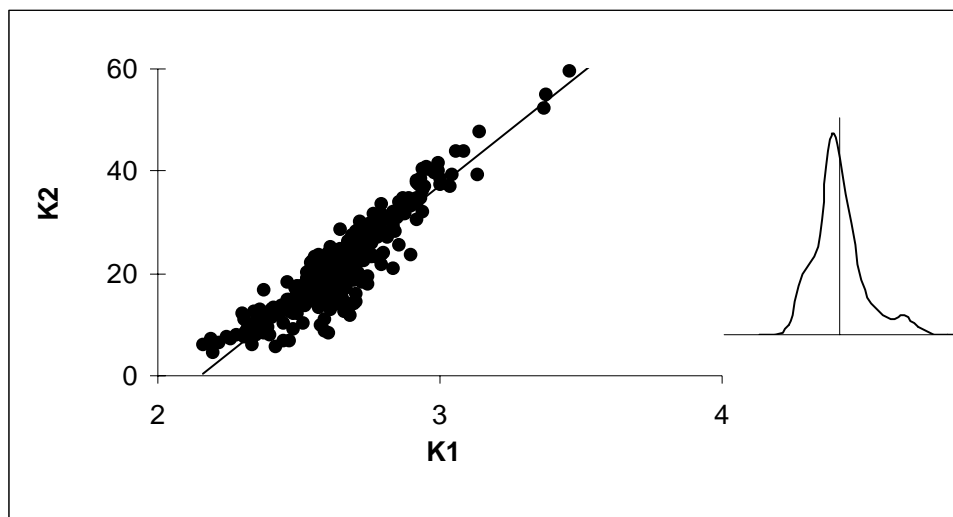


Рис. I.П.3.17 ol–срх (формула OLAVRa). Зависимость значения K_2 от состава оливина, авгита и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Mg}_{\text{av}} + \text{Ca}_{\text{av}} + \text{Al}_{\text{av}} \cdot 2 - 3\text{Ca}_{\text{ol}}$$

$$\text{Mg}_{\text{ol}} = 2.45K_1 - 53.92(\text{OLAVRb})$$

Диапазон значений Mg_{ol} 5.2–65 (атом. %); K_1 21.2–45.7

Относительная ошибка 63–5 %

$R = 0.93$; $N = 402$; $N_1 = 396$; сигма = 3.3; $\chi^2 = 4.01$ (12)

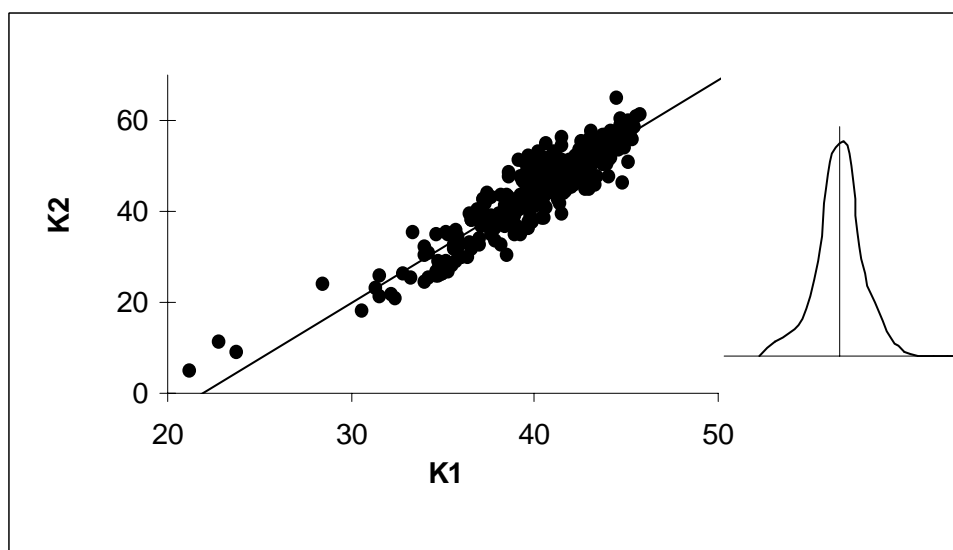


Рис. I.П.3.18 ol–срх (формула OLAVRb). Зависимость содержания Mg_{ol} от состава оливина, авгита и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = (Fe^{2+}/Mg)_{ol}; K_2 = Fe^{2+}_{av}:(Mg_{av} + Al_{av})$$

$$K_2 = 0.34K_1 + 0.14(OLAVRc)$$

Диапазон значений K_2 0.08–3.7; K_1 0.01–11.8
 $R = 0.96$; $N = 402$; сигма = 0.07; $\chi^2 = 3.68$ (12)

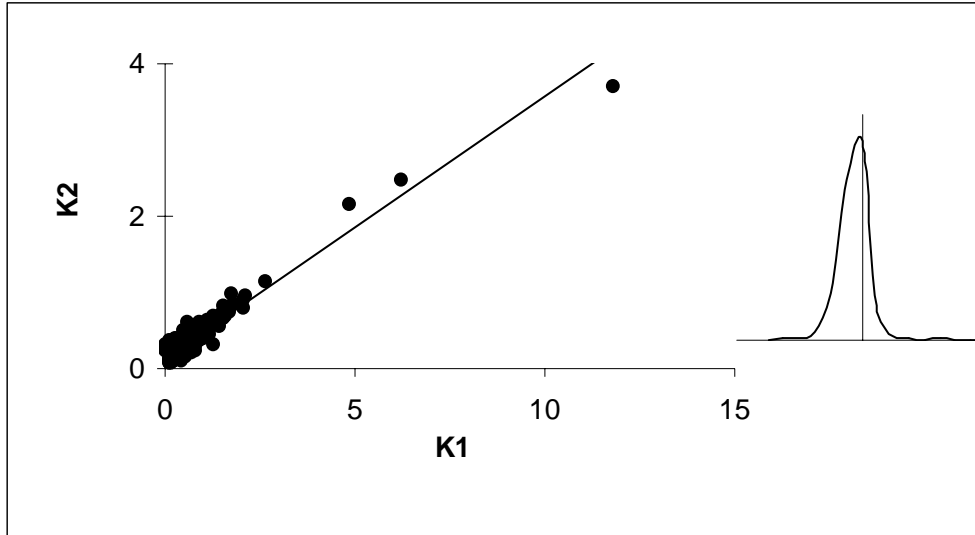


Рис. I.П.3.19 ol–срх (формула OLAVRc). Зависимость значения K_2 в авгите от значения K_1 в оливине и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (Fe^{2+}/Mg)_{ol}; K_2 = Fe^{2+}_{av}:(Mg_{av} + Al_{av})$$

$$K_2 = 0.4K_1 + 0.11(OLAVRd)$$

Диапазон значений K_2 0.08–1.1; K_1 0.01–2.6
 (отброшены 3 т. с наиболее железистыми оливинами)
 Относительная ошибка 63–5 %
 $R = 0.93$; $N = 399$; $N_1 = 395$; сигма = 0.06; $\chi^2 = 3.58$ (12)

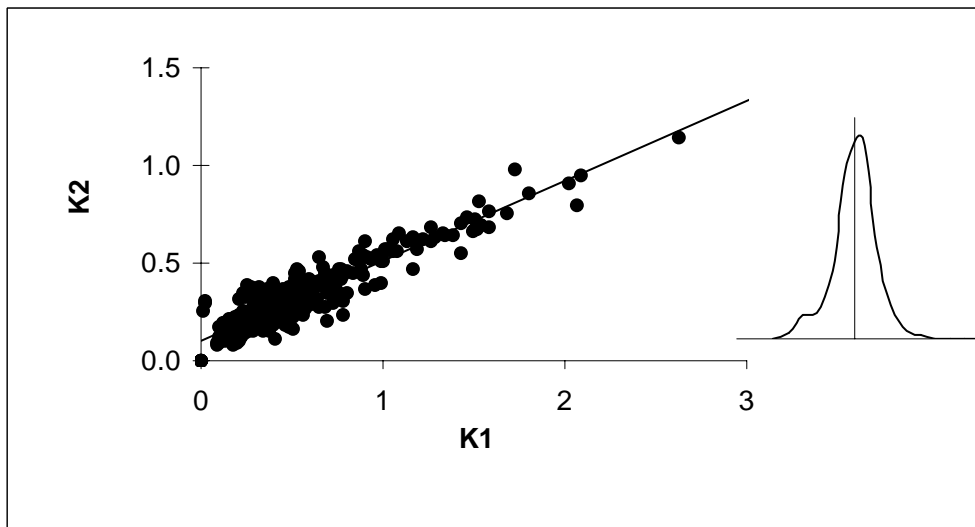


Рис. I.П.3.20 ol–срх (формула OLAVRd). Зависимость значения K_2 в авгите от значения K_1 в оливине и распределение среднеквадратичной ошибки.

2.4. Система расплав–оливин–плаггиоклаз

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [1; 2; 5; 6; 14; 15; 20; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 41; 54; 65; 67; 69; 70; 71; 75; 80; 81; 82; 83; 86; 87; 88; 90; 91; 92; 98; 100; 132; 165; 169; 171; 172; 173; 176; 177; 178; 189; 193; 194; 197; 236; 255; 258; 280; 281; 305; 333; 347; D1].

Используемые данные: общее число точек – 606 т. тройных анализов. Были удалены анализы стекол и минералов с суммами < 98 % и > 102 % – 546 т. При расчетах содержаний железа двухвалентного были отброшены точки с нулевыми содержаниями его в расплаве – 534 т. Для расчетов содержаний натрия в расплаве были отброшены точки с нулевыми содержаниями его в расплаве – 514 т. Для расчета содержаний калия в расплаве были отброшены точки с нулевыми содержаниями его в расплаве – 461 т. Для расчета равновесного распределения элементов по содержанию железа и магния в оливине были отброшены точки с нулевыми содержаниями железа в оливине – 534 т. Для расчета равновесного распределения элементов в системе расплав–оливин–плаггиоклаз были отброшены точки с нулевыми содержаниями железа в оливине и натрия в плаггиоклазе – 505 т.

Таблица I.П.4.1 ol–pl. Диапазоны составов стекол (расплавов), оливинов и плаггиоклазов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

OLPL	Расплав	T °C	1026–1280
SiO ₂	37.66–65.71	Si	37.33–60.85
TiO ₂	0.41–6.34	Ti	0.3–4.6
Al ₂ O ₃	9.36–23.39	Al	10.97–23.53
FeO	4.24–32.4	Fe	3.31–27.46
MnO	0.03–0.82	Mn	0.02–0.68
MgO	1.27–11.8	Mg	1.77–16.29
CaO	4.07–27.15	Ca	4.04–26.02
Na ₂ O	0.01–10.51	Na	0.02–17.39
K ₂ O	0.01–7.88	K	0.01–9.35
Cr ₂ O ₃	0.01–0.43	Cr	0.01–0.32
Оливин		Fo	27.53–100
SiO ₂	32.04–43.17	Si	31.93–35.09
TiO ₂	0.01–0.4	Ti	0.01–0.3
Al ₂ O ₃	0.01–1.45	Al	0.01–1.5
FeO	8.04–55.64	Fe	5.45–47.93
MnO	0.08–0.98	Mn	0.06–0.76
MgO	11.86–57.59	Mg	18.21–66.49
CaO	0.06–5.14	Ca	0.06–5.36
Na ₂ O	0.01–0.63	Na	0.02–1.07
K ₂ O	0.01–0.25	K	0.01–0.28
Cr ₂ O ₃	0.01–0.71	Cr	0.01–0.51
Плаггиоклаз			
SiO ₂	42.35–62.23	Si	39.09–55.31
TiO ₂	0.01–0.4	Ti	0.01–0.28
Al ₂ O ₃	23.15–36.25	Al	24.45–39.43
FeO	0.16–3.39	Fe	0.12–2.62
MnO	0.01–0.07	Mn	0.01–0.05
MgO	0.01–9.83	Mg	0.01–13.25
CaO	5.45–21.11	Ca	5.28–20.79
Na ₂ O	0.09–7.97	Na	0.16–13.73
K ₂ O	0.01–1.49	K	0.01–1.72
Cr ₂ O ₃	0.01–0.04	Cr	0.01–0.03
Ab	0.8–69.87	An	30.13–100
Or	0.06–8.74		

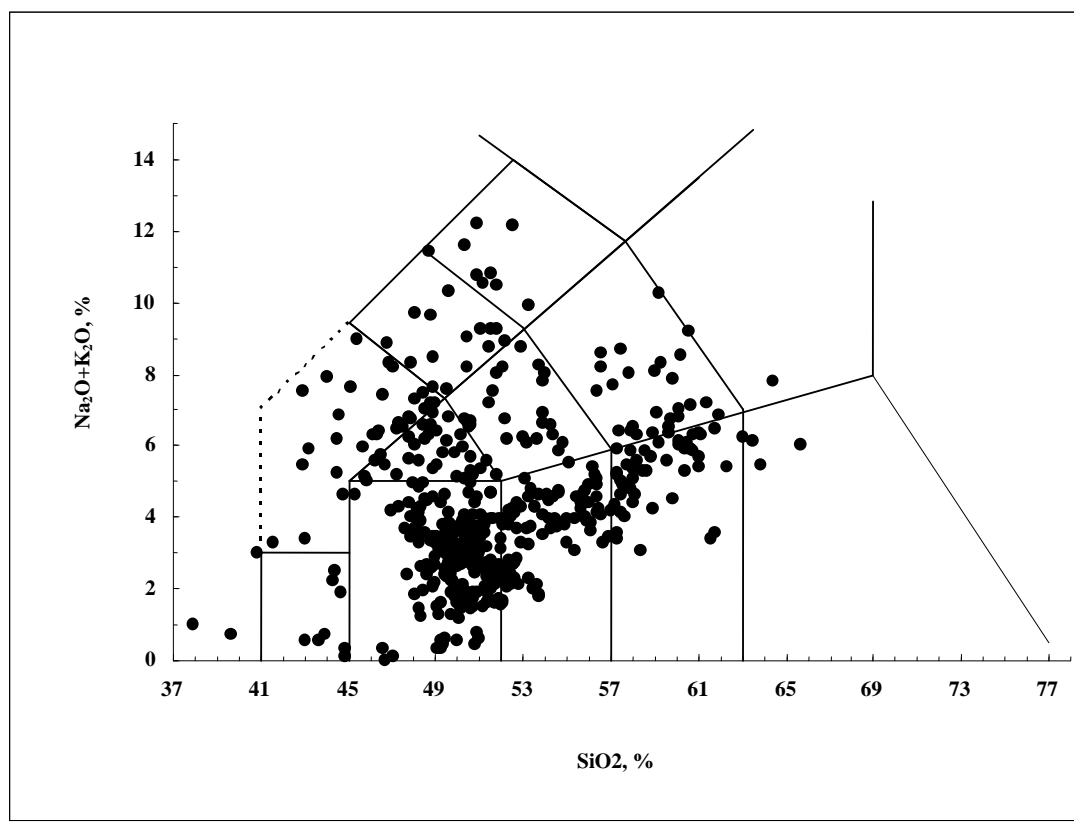


Рис. I.П.4.1 ol-pl. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливина и плагиоклаза, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = Si_{pl} - 2Ca_{ol} - Ti_m - (Na_m + K_m):4$$

$$Si_m = 1.25K_1 - 5.24(OLPL1a)$$

Диапазон значений Si 37.3–61 (атом. %)

Относительная ошибка 6.2–3.8 %

$R = 0.82$; $N = 546$; $N_1 = 544$; $\sigma = 2.3$; $\chi^2 = 1.94$ (16)

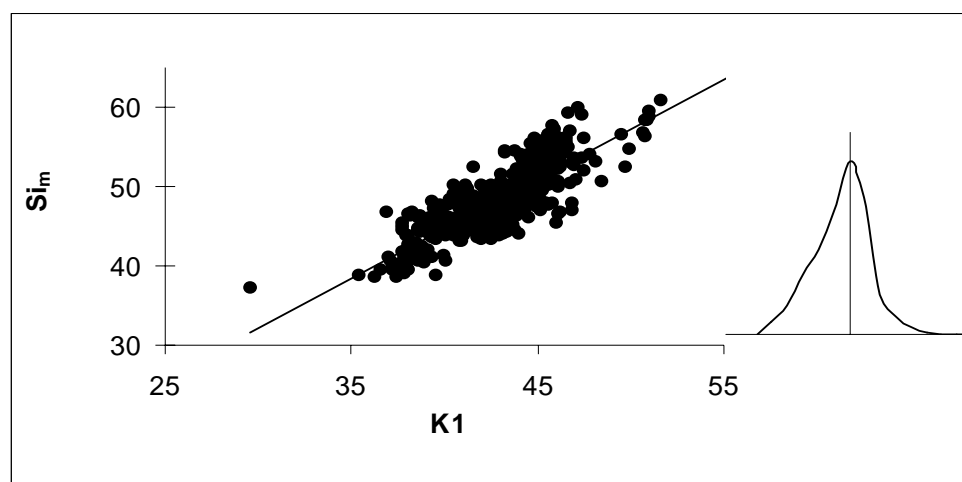


Рис. I.П.4.2 ol-pl (формула OLPL1a). Зависимость содержаний Si_m от состава оливина, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Ln}(\text{Al}_{\text{pl}}\text{Si}_{\text{ol}}:120 + \text{Ca}_{\text{ol}} + \text{Fe}^{2+}_{\text{pl}} + \text{Al}_{\text{m}}:3 + 5\text{Ca}_{\text{m}}:\text{Ca}_{\text{pl}})$$

$$\text{Si}_{\text{m}} = -47.51K_1 + 188.2(\text{OLPL1b})$$

Диапазон значений Si 37.3–61 (атом. %)

Относительная ошибка 5.9–3.6 %

$R = -0.84$; $N = 546$; $N_1 = 543$; $\sigma = 2.2$; $\chi^2 = 1.07$ (16)

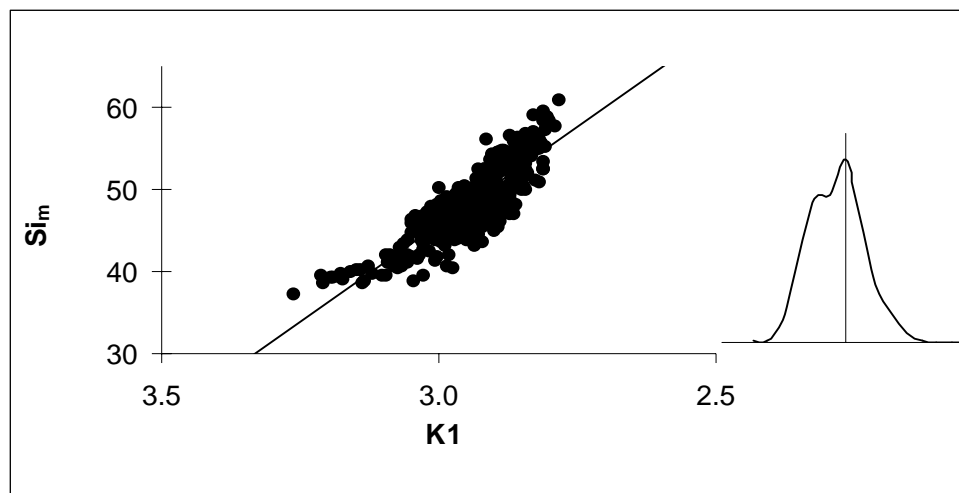


Рис. I.П.4.3 ol–pl (формула OLPL1b). Зависимость содержаний Si_{m} от состава оливина, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет $\sigma < 2$.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = \text{Fe}^{2+}_{\text{ol}} + \text{Si}_{\text{pl}}:3 + 9\text{Fe}^{2+}_{\text{pl}} + \text{Ca}_{\text{pl}}:5 - 2(K_{\text{m}} + \text{Na}_{\text{m}})$$

$$\text{Al}_{\text{m}} = -0.16K_1 + 20.38(\text{OLPL3})$$

Диапазон значений Al 11–23.5 (атом. %)

Относительная ошибка 8.8–4.1 %

$R = -0.89$; $N = 546$; $N_1 = 538$; $\sigma = 0.97$; $\chi^2 = 1.32$ (16)

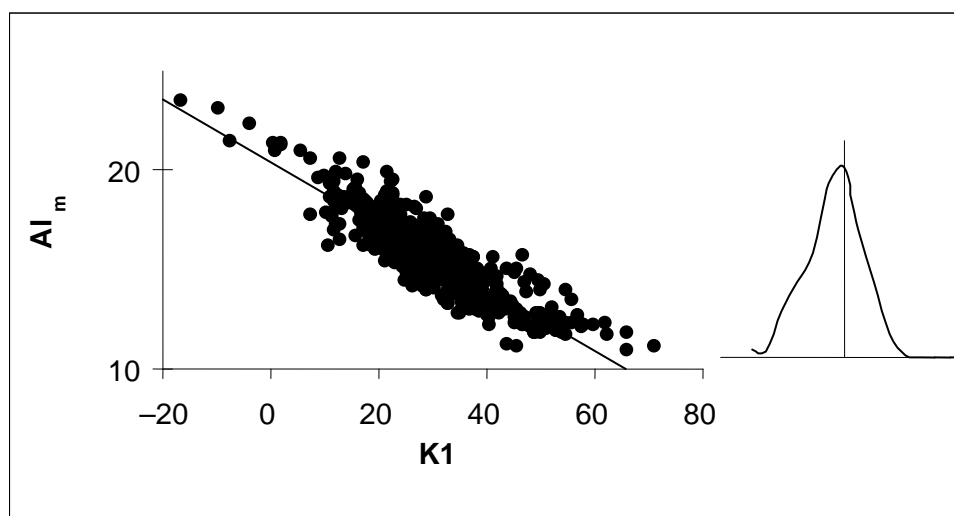


Рис. I.П.4.4 ol–pl (формула OLPL3). Зависимость содержаний Al_{m} от состава оливина, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний двухвалентного железа в расплаве

$$K_1 = Fe_{ol}^{2+}Ca_{pl}:20$$

$$Fe_m^{2+} = 0.6K_1 + 1.32(OLPL5)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 3–27.5 (атом. %)

Относительная ошибка 48.7–5.3 %

$R = 0.9$; $N = 534$; $N_1 = 529$; $\sigma = 1.46$; $\chi^2 = 5.2$ (16)

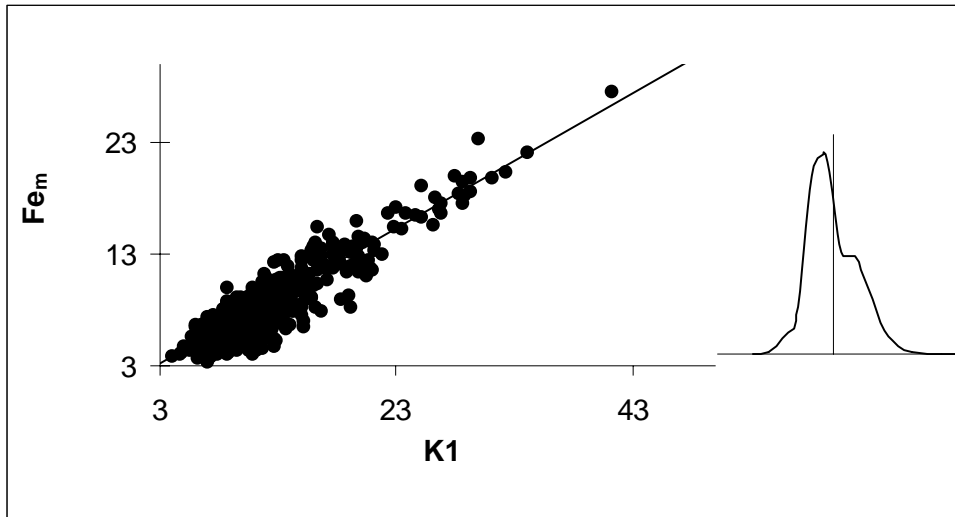


Рис. I.П.4.5 ol-pl (формула OLPL5). Зависимость содержаний Fe_m^{2+} от состава оливина, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Mg_{ol}:2.7 + Ca_{pl} - 7K_{pl}$$

$$Mg_m = 0.43K_1 - 5.09(OLPL7)$$

Диапазон значений Mg 1.8–15.5 (атом. %)

Относительная ошибка 65–7.5 %

$R = 0.91$; $N = 546$; $N_1 = 539$; $\sigma = 1.17$; $\chi^2 = 3.21$ (16)

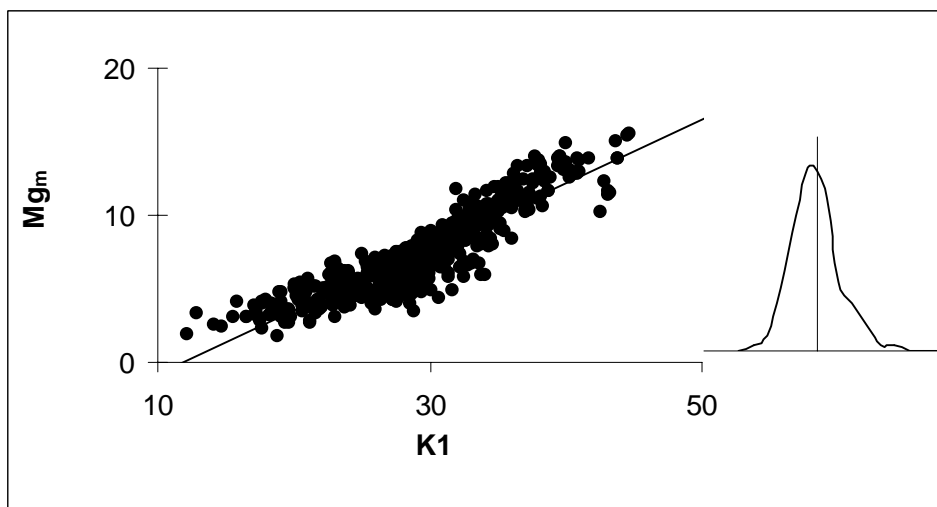


Рис. I.П.4.6 ol-pl (формула OLPL7). Зависимость содержаний Mg_m от состава оливина, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Ca_{pl} + 4Ca_{ol} - 3K_{pl}$$

$$Ca_m = 0.71K_1 - 0.34(OLPL8)$$

Диапазон значений Ca 4–22.5 (атом. %)

Относительная ошибка 33–5.9 %

R = 0.9; N = 546; N₁ = 539; сигма = 1.32; $\chi^2 = 2.05$ (16)

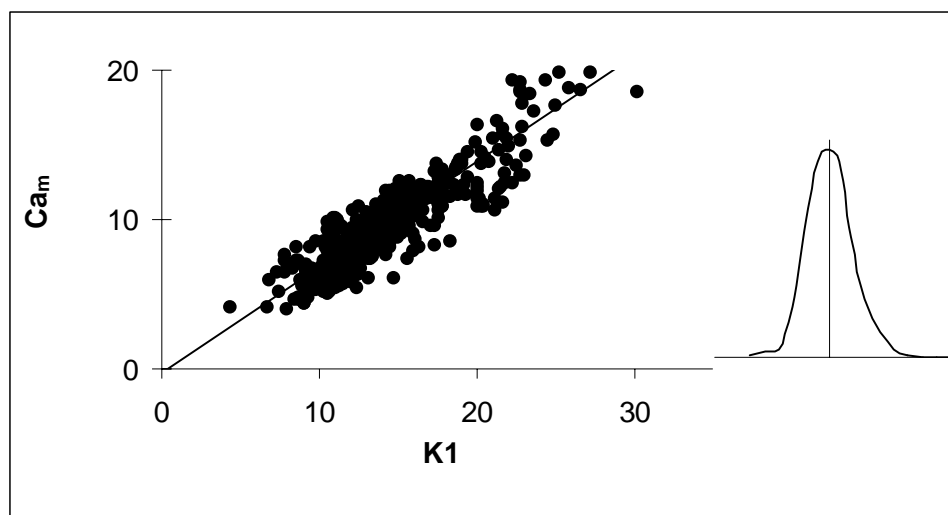


Рис. I.П.4.7 ol-pl (формула OLPL8). Зависимость содержаний Ca_m от состава оливина, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний натрия в расплаве

$$K_1 = Na_{pl} + Mg_{ol}:7 + 3Ca_{ol} - Si_m:4 + Al_m:2 - Mg_m:2$$

$$Na_m = 0.72K_1 + 0.83(OLPL9)$$

Диапазон значений Na 0.13–14.4 (атом. %)

Относительная ошибка 730–6.6 %

R = 0.9; N = 514; N₁ = 509; сигма = 0.95; $\chi^2 = 2.41$ (16)

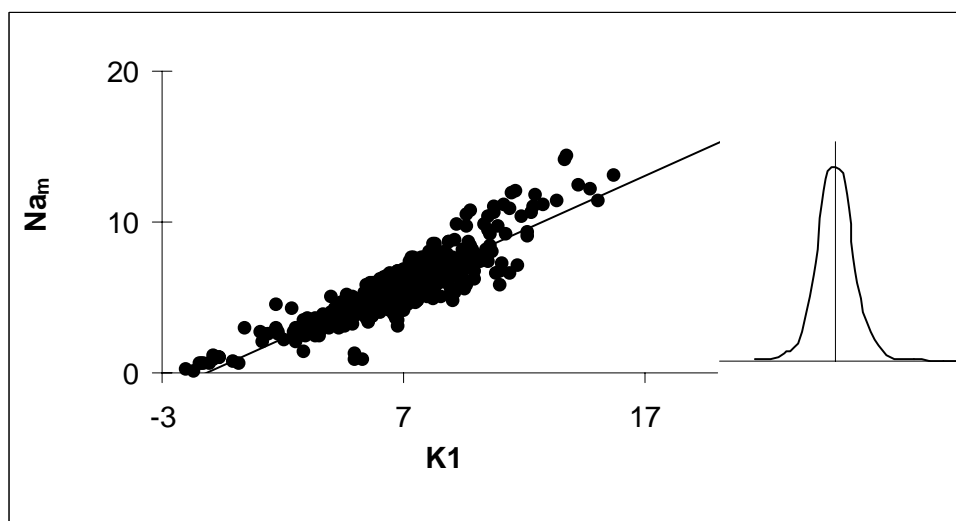


Рис. I.П.4.8 ol-pl (формула OLPL9). Зависимость содержаний Na_m от состава оливина, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний калия в расплаве

$$K_1 = 5K_{pl} - Si_{ol}:6 - Fe^{2+}_{m}:4 - Mg_m:7$$

$$K_m = 0.78K_1 + 7.19(OLPL10)$$

Диапазон значений K_1 0.04–6.9 (атом. %)

Относительная ошибка 1150–6.7%

$R = 0.95$; $N = 461$; $N_1 = 448$; $\sigma = 0.46$; $\chi^2 = 17.49$ (12)

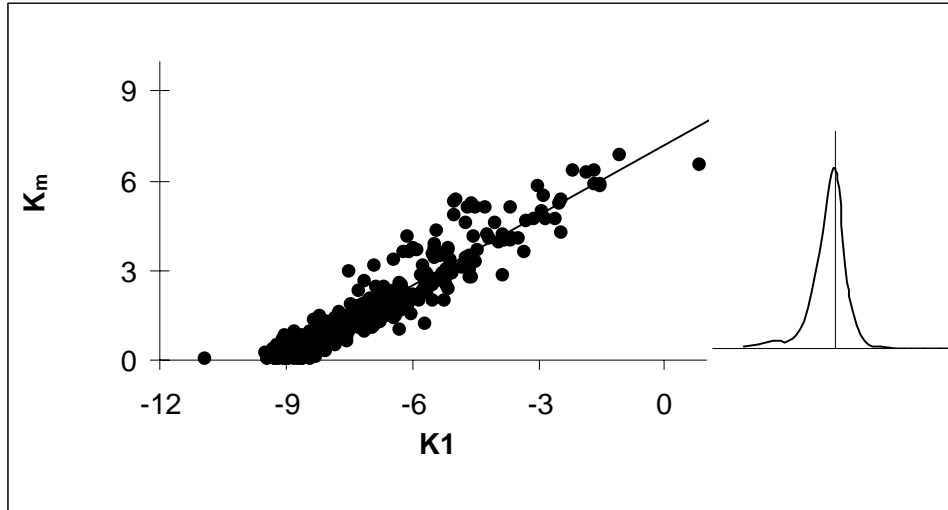


Рис. I.П.4.9 ol-pl (формула OLPL10). Зависимость содержаний K_m от состава оливина, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = Mg_{ol} + 6Mg_{ol}:Fe^{2+}_{ol} + Si_{pl} + 6(Al_{pl} - 3K_{pl})$$

$$T = 1.27K_1 + 762.89(OLPLTa)$$

Диапазон значений T 1026–1260 °C

Относительная ошибка 1.7–1.4 %

$R = 0.9$; $N = 546$; $N_1 = 537$; $\sigma = 17.5$ °C; $\chi^2 = 1.48$ (16)

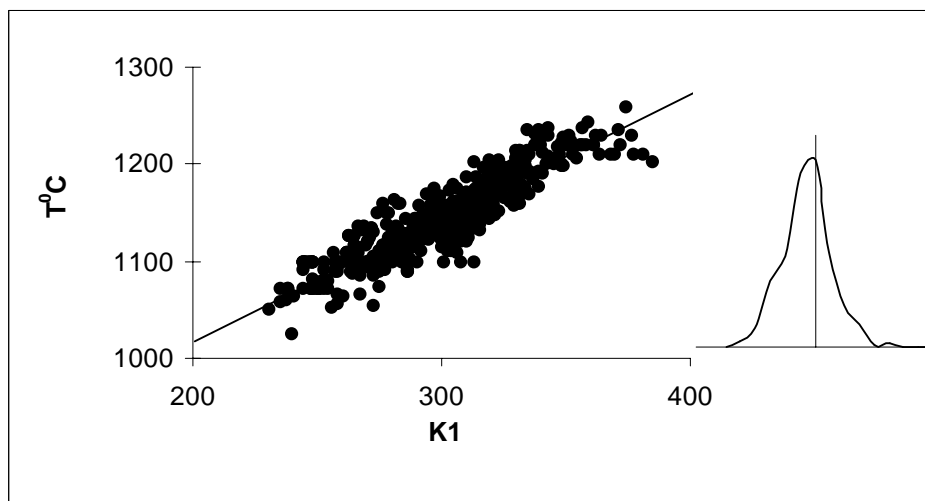


Рис. I.П.4.10 ol-pl (формула OLPLTa). Зависимость значений T от состава оливина, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol} - 2Mg_{ol} \cdot Fe^{2+}_{ol} + Na_{pl} \cdot 2 + 4K_{pl} + 3Ti_m - Al_m + 2(K_m + Na_m)$$

$$T = -2.12K_1 + 1185.78(OLPLTb)$$

Диапазон значений T 1050–1260 °C

Относительная ошибка 1.5–1.2 %

R = -0.92; N = 546; N₁ = 538; сигма = 15.4 °C; $\chi^2 = 2.61$ (16)

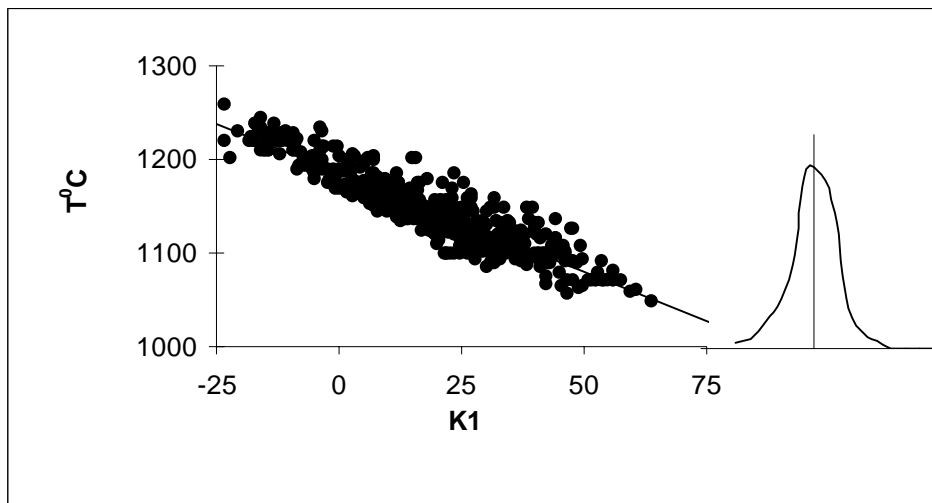


Рис. I.П.4.11 ol-pl (формула OLPLTb). Зависимость значений от состава оливина, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет сигма < 16 °C.

Равновесное распределение элементов между оливином и плагиоклазом

$$K_1 = Mg_{ol} + Al_{pl} - 5Ca_{ol}$$

$$Fe^{2+}_{ol} = -0.76K_1 + 76.89(OLPLRa)$$

Диапазон значений Fe^{2+}_{ol} 5.4–48 (атом. %)

Относительная ошибка 30–3.4%

R = -0.98; N = 534; N₁ = 524; сигма = 1.62; $\chi^2 = 1.76$ (16)

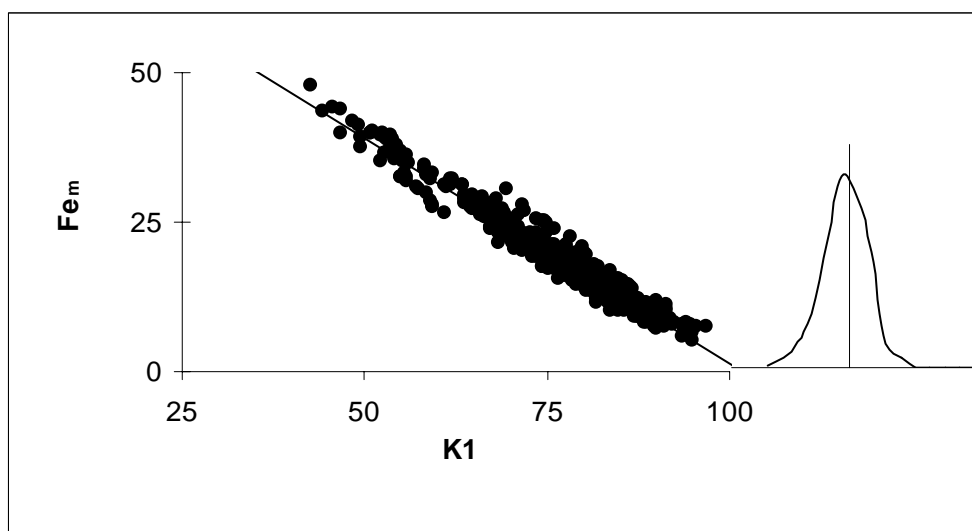


Рис. I.П.4.12 ol-pl (формула OLPLRa). Зависимость величины Fe^{2+}_{ol} от состава оливина, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}_{\text{ol}}:8 + \text{Na}_{\text{pl}}):(\text{Mg}_{\text{ol}}:6 + \text{Ca}_{\text{pl}}); K_2 = 8\text{Si}_{\text{pl}}:\text{Al}_{\text{pl}} - K_{\text{pl}} + \text{Ca}_{\text{ol}}$$

$$K_2 = 5.76K_1 + 9.57(\text{OLPLRc})$$

Диапазон значений K_2 8.3–18.6; K_1 0.03–1.43

Относительная ошибка 7.5–3.3 %

$R = 0.92$; $N = 505$; $N_1 = 502$; сигма = 0.63; $\chi^2 = 2.94$ (16)

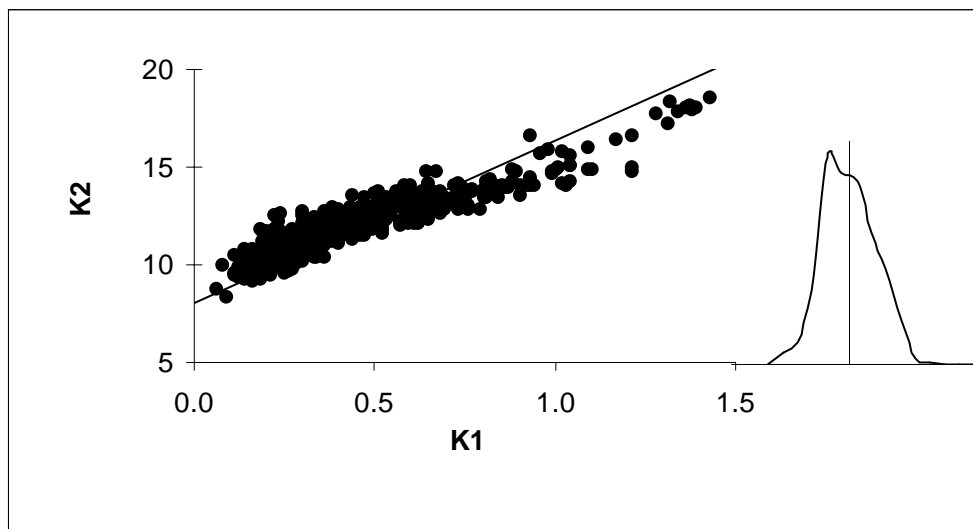


Рис. I.П.4.13 ol-pl (формула OLPLRc). Зависимость значения K_2 от состава оливина, плагиоклаза и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = (K_{\text{pl}} + \text{Na}_{\text{pl}}):\text{Mg}_{\text{ol}}; K_2 = (\text{Fe}_{\text{ol}} - 5\text{Ca}_{\text{ol}}):\text{Ca}_{\text{pl}}$$

$$K_2 = 10K_1 - 0.15(\text{OLPLRd})$$

Диапазон значений K_2 0.2–5.2; K_1 0.01–0.62

Относительная ошибка 135–6 %

$R = 0.95$; $N = 505$; $N_1 = 496$; сигма = 0.27; $\chi^2 = 5.66$ (12)

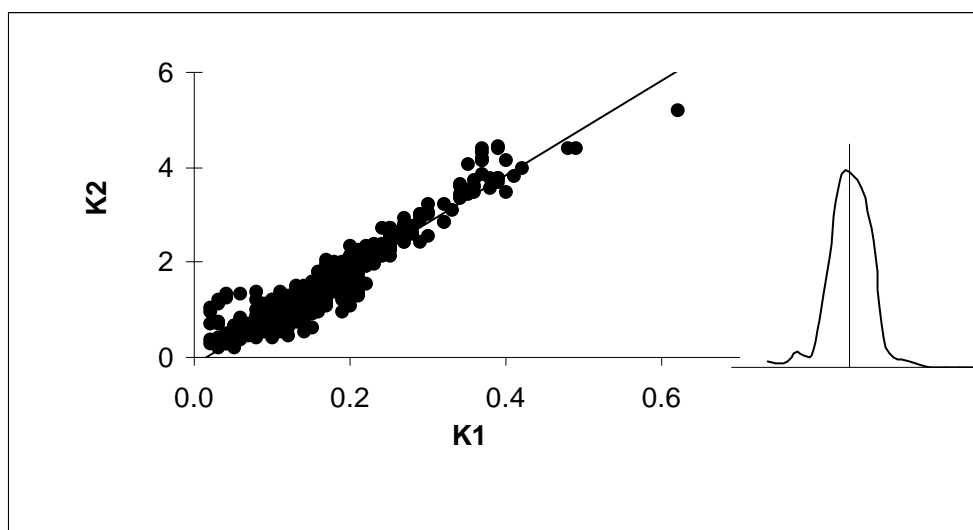


Рис. I.П.4.14 ol-pl (формула OLPLRd). Зависимость значения K_2 от состава оливина, плагиоклаза и распределение средноквадратичной ошибки.

2.5. Система расплав–клинопироксен–плаггиоклаз

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [2; 5; 6; 13; 14; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 48; 54; 65; 67; 69; 70; 71; 80; 81; 82; 83; 86; 87; 88; 90; 91; 92; 98; 100; 131; 132; 169; 172; 173; 176; 177; 178; 189; 190; 193; 194; 236; 255; 263; 280; 281; 305; 347; D1].

Используемые данные: общее число точек – 432 т. тройных анализов. Были удалены анализы стекол и минералов с суммами < 98 % и >102 %, а также с нулевыми содержаниями железа в расплаве – 399 т. Для расчета содержаний титана в расплаве были отброшены точки с нулевыми его содержаниями в расплаве – 345 т. Для расчетов содержаний натрия в расплаве были отброшены точки с нулевыми содержаниями его в расплаве – 373 т. Для расчетов содержаний калия были отброшены точки с нулевыми содержаниями его в расплаве – 342 т.

Таблица I.II.5.1 srx–pl. Диапазоны составов стекол (расплавов), авгитов и плаггиоклазов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

AVPL	Расплав	T °C	1026–1260
SiO ₂	37.66–69.86	Si	37.33–67.3
TiO ₂	0.41–5.6	Ti	0.3–4.09
Al ₂ O ₃	9.35–20.69	Al	10.92–21.48
FeO	4.24–28.15	Fe	3.31–23.38
MnO	0.04–0.82	Mn	0.03–0.68
MgO	0.78–9.96	Mg	1.1–13.96
CaO	1.98–22.44	Ca	2.01–22.74
Na ₂ O	0.53–9.62	Na	0.98–16.43
K ₂ O	0.02–7.88	K	0.02–9.35
Cr ₂ O ₃	0.01–0.12	Cr	0.01–0.09
авгит			
SiO ₂	40.67–54.9	Si	38.6–49.96
TiO ₂	0.03–4.61	Ti	0.02–3.26
Al ₂ O ₃	0.84–10.16	Al	0.93–11.36
FeO	2.93–21	Fe	2.24–16.9
MnO	0.02–0.69	Mn	0.02–0.55
MgO	9.22–24	Mg	13.42–32.6
CaO	4.4–24.79	Ca	4.3–24.69
Na ₂ O	0.02–0.85	Na	0.04–1.54
K ₂ O	0.01–0.14	K	0.01–0.17
Cr ₂ O ₃	0.01–1.08	Cr	0.01–0.78
En	27.48–67.14	Wo	8.85–53.22
Fs	4.78–34.6		
плаггиоклаз			
SiO ₂	43.39–62.23	Si	40.33–55.31
TiO ₂	0.01–0.4	Ti	0.01–0.28
Al ₂ O ₃	23.15–35.25	Al	24.45–38.34
FeO	0.22–2.64	Fe	0.16–1.99
MnO	0.01–0.09	Mn	0.01–0.07
MgO	0.01–1.2	Mg	0.01–1.64
CaO	6.22–21.11	Ca	5.92–20.79
Na ₂ O	0.25–7.97	Na	0.45–13.73
K ₂ O	0.01–1.96	K	0.01–2.23
Cr ₂ O ₃	0–0	Cr	0.01–0.03
Ab	2.19–69.87	An	30.13–100
Or	0.06–11.03		

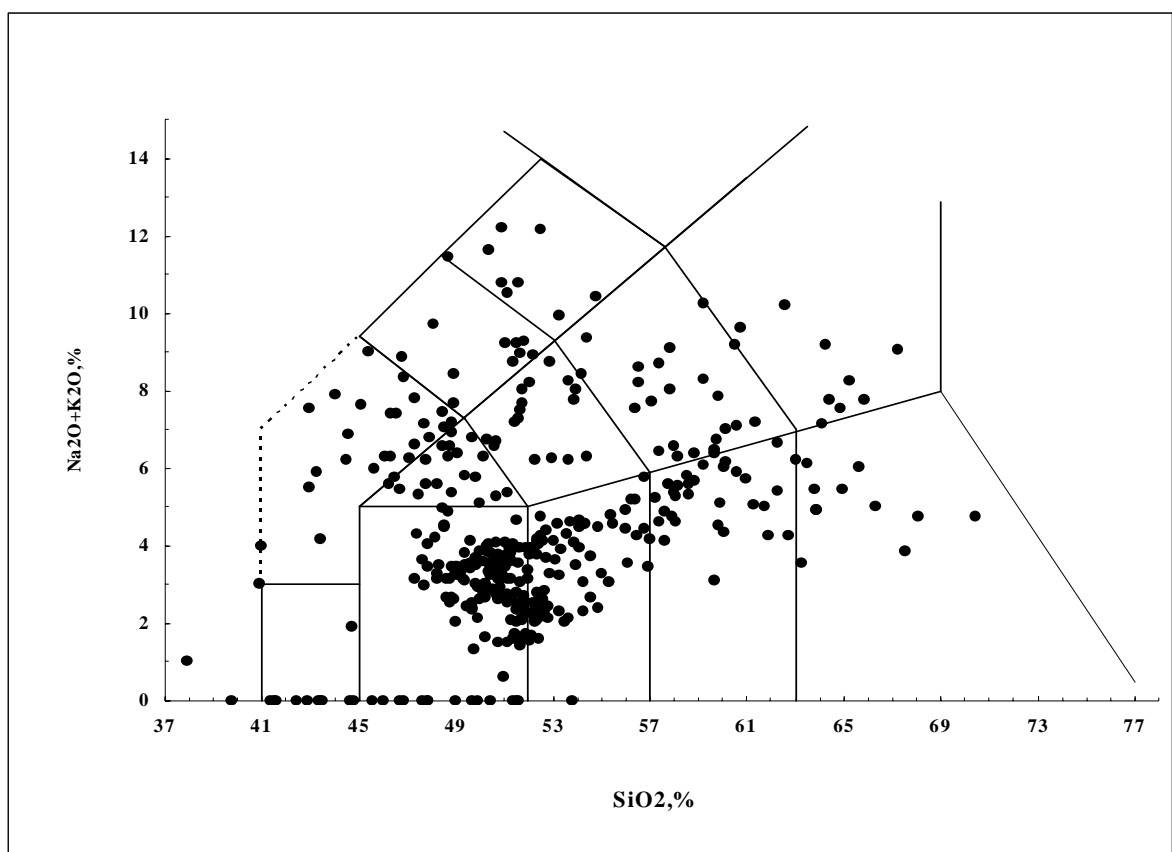


Рис. I.П.5.1 срх–рл. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами клинопироксена и плагиоклаза, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = \text{Exp}[(\text{Si}_{\text{pl}} + 3\text{Fe}^{2+}_{\text{pl}} - \text{Si}_{\text{av}}:2 - \text{Ti}_{\text{av}} - \text{Al}_{\text{av}} + \text{Fe}^{2+}_{\text{av}}:3 - \text{Fe}^{2+}_{\text{m}}:2):10]$$

$$\text{Si}_m = 1.09K_1 + 40.04(\text{AVPL1})$$

Диапазон значений Si 37.3–65 (атом. %)

Относительная ошибка 6.2–3.5 %

$R = 0.86$; $N = 399$; $N_1 = 395$; $\text{сигма} = 2.3$; $\chi^2 = 0.93$ (12)

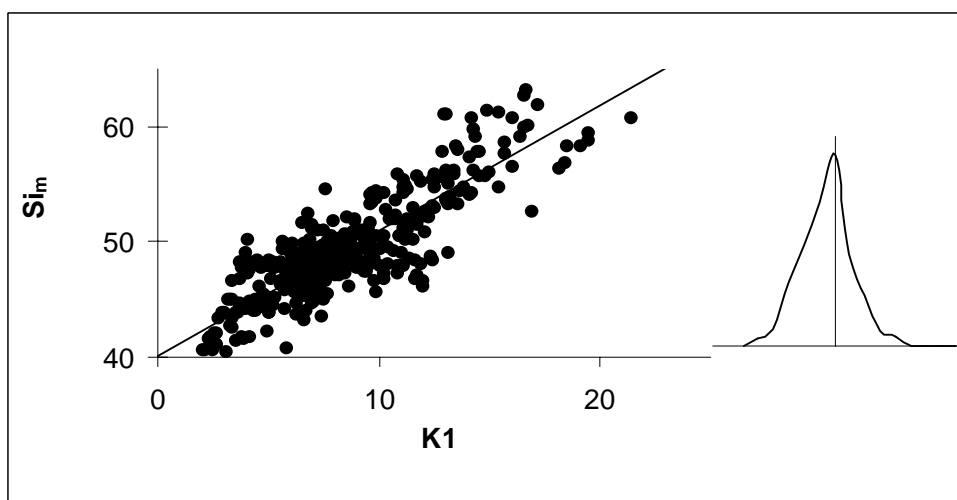


Рис. I.П.5.2 срх–рл (формула AVPL1). Зависимость содержаний Si_m от состава авгита, плагио-оклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = [4Ti_{av}Ca_{pl}:Al_{av} + 3(Na_{av} + K_{av}) + Si_{pl}:1.4 - Si_m:1.8 + Fe^{2+}_m]:10$$

$$Ti_m = 0.91K_1 - 0.68(AVPL2)$$

Диапазон значений Ti 0.3–4.1 (атом. %)

Относительная ошибка 160–11.7 %

R = 0.85; N = 345; N₁ = 344; сигма = 0.49; $\chi^2 = 1.1$ (12)

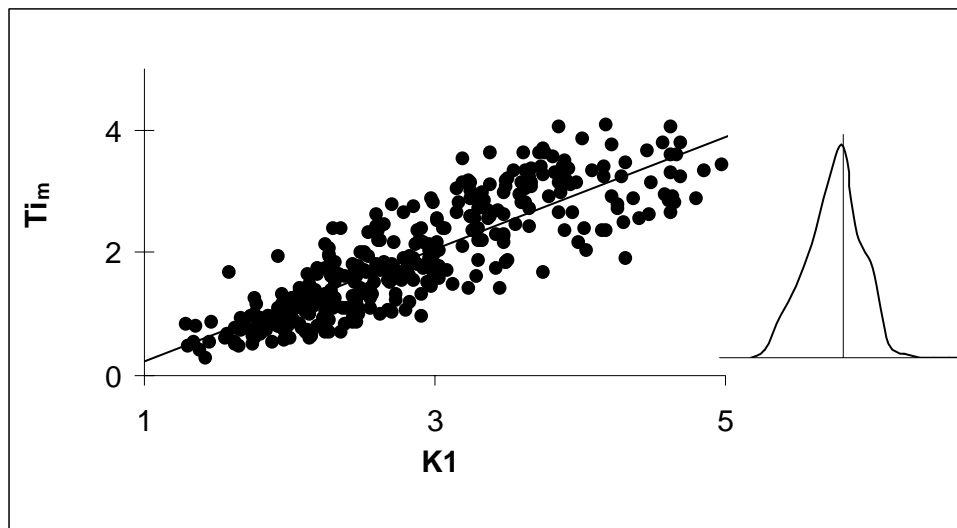


Рис. I.П.5.3 сrx–pl (формула AVPL2). Зависимость содержаний Ti_m от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Si_{av}:4 + Al_{av} - Fe^{2+}_{av}:1.9 + Mg_{av}:4 + 7(Na_{av} + K_{av}) - 2Fe^{2+}_{pl}$$

$$Al_m = 0.44K_1 + 6.83(AVPL3a)$$

Диапазон значений Al 11–21.5 (атом. %)

Относительная ошибка 11–5.6 %

R = 0.8; N = 399; N₁ = 397; сигма = 1.2; $\chi^2 = 1.38$ (12)

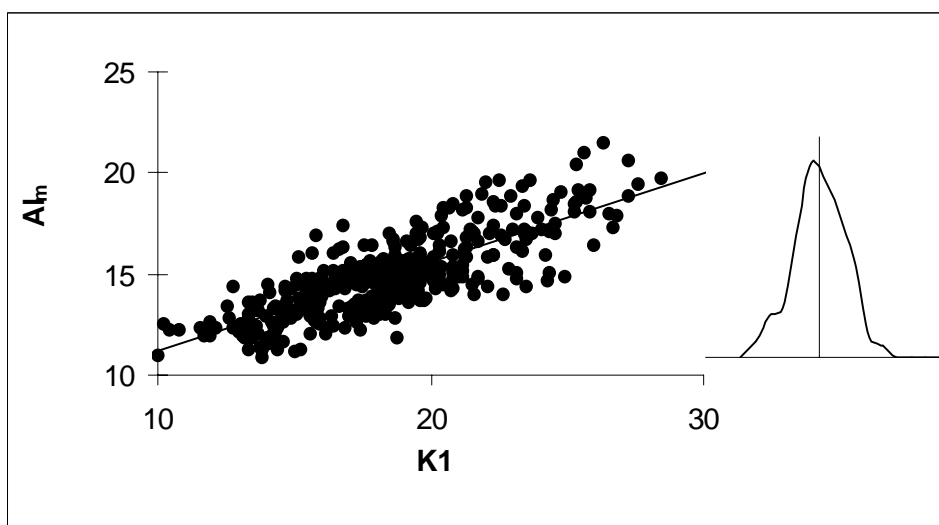


Рис. I.П.5.4 сrx–pl (формула AVPL3a). Зависимость содержаний Al_m от состава авгита, плагиоклаза и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{av}:4 + Al_{av} - Fe^{2+}_{av}:1.9 + Mg_{av}:4 + 7(Na_{av} + K_{av}) - 2Fe^{2+}_{pl} - Ti_m - Fe^{2+}_m:2 + (K + Na)_m:3$$

$$Al_m = 0.33K_1 + 10.1(AVPL3b)$$

Диапазон значений Al 11–21.5 (атом. %)

Относительная ошибка 7.3–3.8 %

R = 0.91; N = 399; N₁ = 394; сигма = 0.81; $\chi^2 = 2.78$ (12)

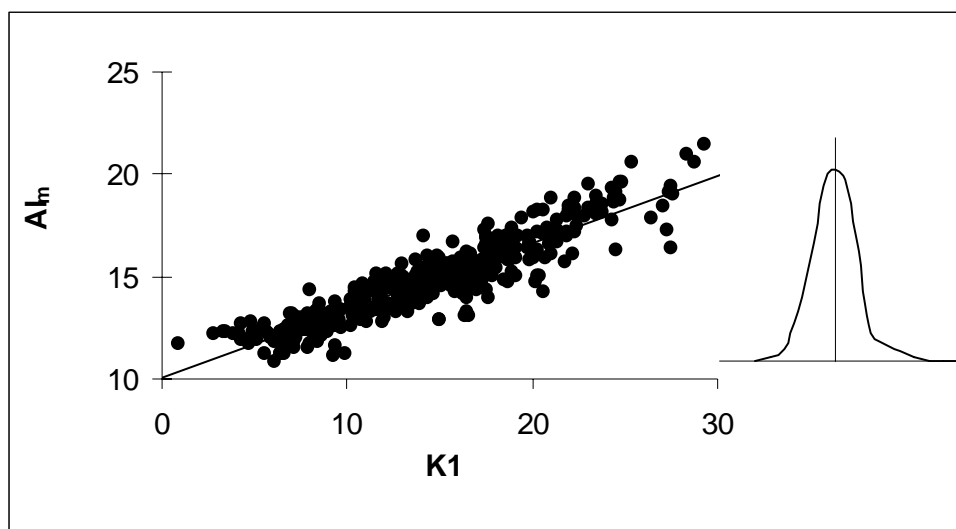


Рис. I.П.5.5 срх–pl (формула AVPL3b). Зависимость содержаний Al_m от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа двухвалентного в расплаве

$$K_1 = Si_{av}:2 + Fe^{2+}_{av} + Ca_{pl} - Mg_{av}:2 - 5(Na_{av} + K_{av}) - 4K_{pl} - Si_m:2 - Al_m:2 - Mg_m:2$$

$$Fe^{2+}_m = 0.49K_1 + 11.26(AVPL5)$$

Диапазон значений Fe²⁺ 2.7–22.1 (атом. %)

Относительная ошибка 55.5–6.8 %

R = 0.88; N = 399; N₁ = 365; сигма = 1.4; $\chi^2 = 3.89$ (12)

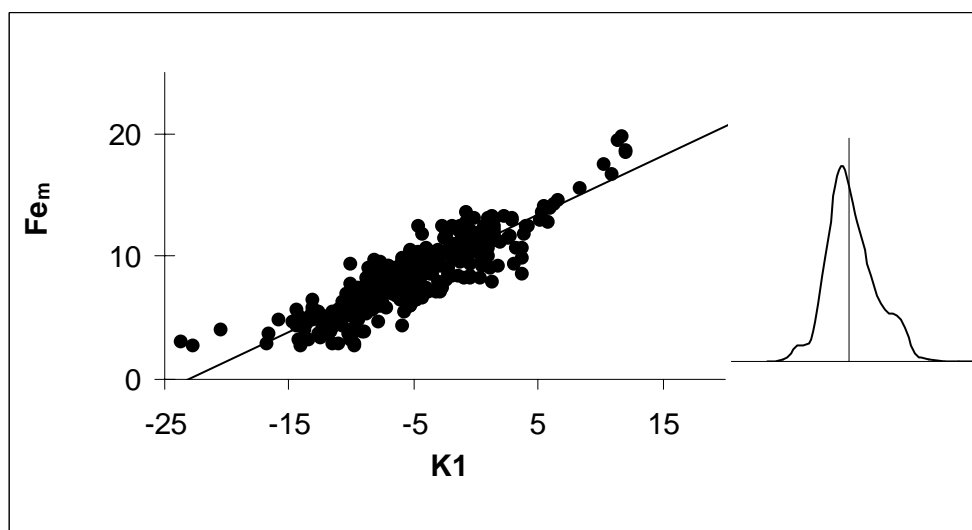


Рис. I.П.5.6 срх–pl (формула AVPL5). Зависимость содержаний Fe²⁺_m от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Si_{av}:9 - Al_{av}:5 - Fe^{2+}_{av}:2 - Ca_{av}:4 - 2(Na_{av} + K_{av}) - Si_{pl}:6 + Ca_{pl} + (Na_{pl} + K_{pl}):2$$

$$Mg_m = 0.75K_1 + 4.26(AVPL7a)$$

Диапазон значений Mg 1.1–14 (атом. %)

Относительная ошибка 127–10 %

R = 0.85; N = 399; N₁ = 398; сигма = 1.4; $\chi^2 = 3.53$ (12)

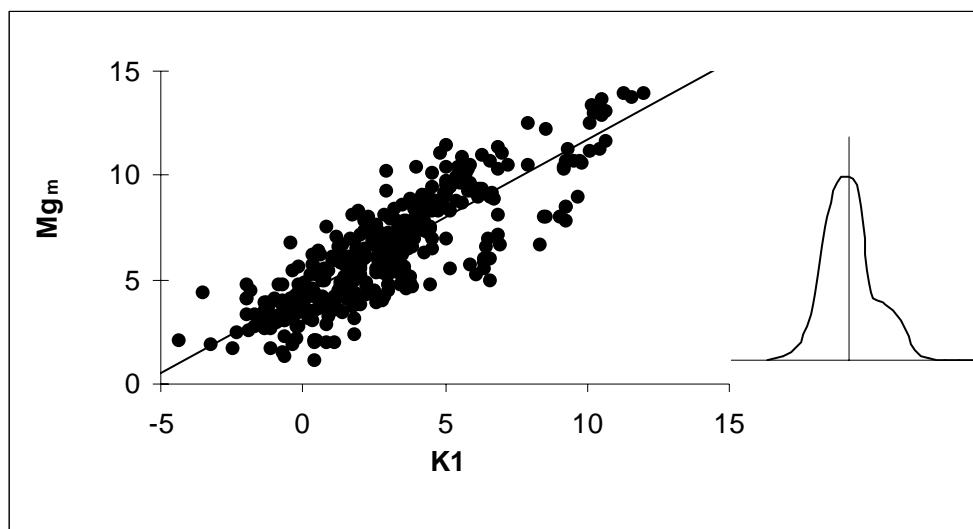


Рис. I.П.5.7 срх–pl (формула AVPL7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{av}:9 - Al_{av}:5 - Fe^{2+}_{av}:2 - Ca_{av}:4 - 2(Na_{av} + K_{av}) - Si_{pl}:6 + Ca_{pl} + (Na_{pl} + K_{pl}):2 + Ca_m:6 - (Na_m + K_m):2 - Si_m:5$$

$$Mg_m = 0.45K_1 + 10.55(AVPL7b)$$

Диапазон значений Mg 1.1–14 (атом. %)

Относительная ошибка 104–8.2 %

R = 0.9; N = 399; N₁ = 394; сигма = 1.15; $\chi^2 = 1.95$ (12)

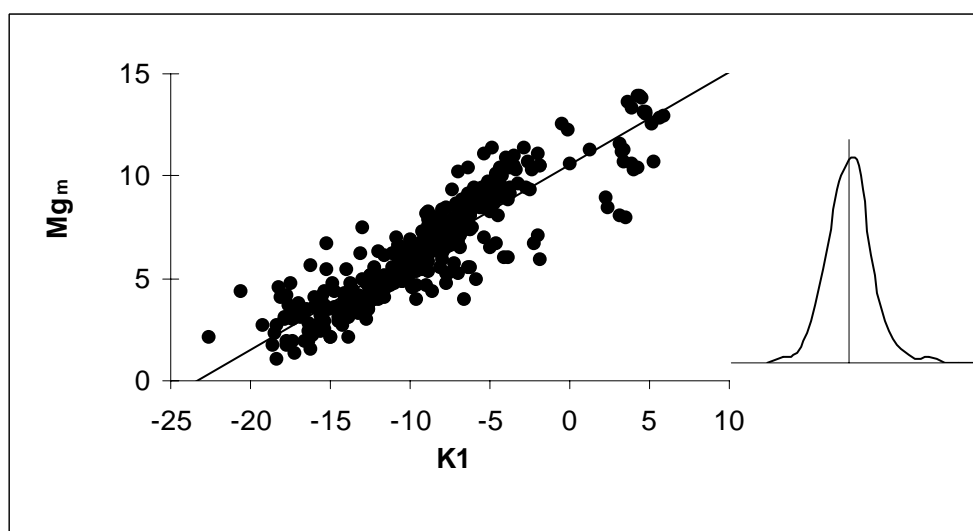


Рис. I.П.5.8 срх–pl (формула AVPL7b). Зависимость содержаний Mg_m от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Ca_{pl} + Si_{av}:4 - (Na_{av} + K_{av}) + Al_{pl}:5 - K_{pl}$$

$$Ca_m = 0.72K_1 - 12.11(AVPL8)$$

Диапазон значений Ca 2–21 (атом. %)

Относительная ошибка 73–7 %

R = 0.88; N = 399; N₁ = 394; сигма = 1.47; $\chi^2 = 1.87$ (12)

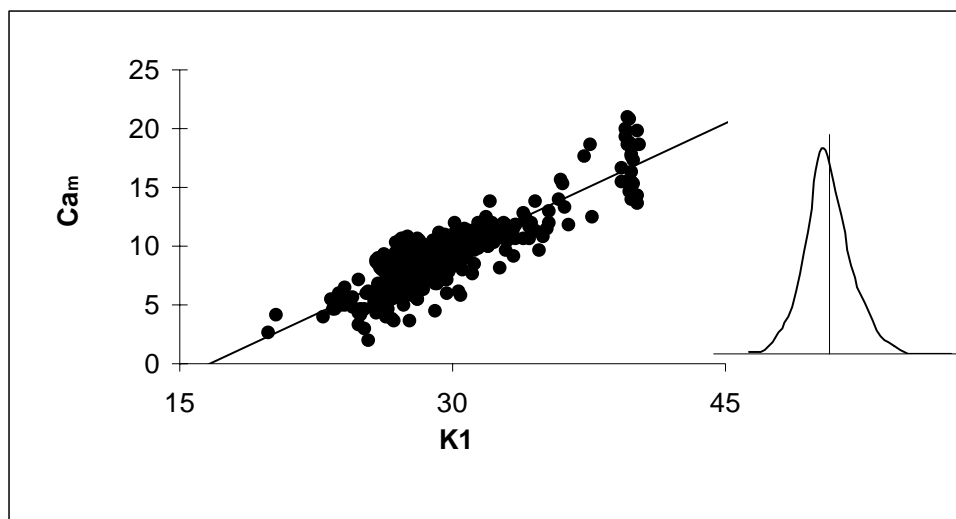


Рис. I.П.5.9 срх–рl (формула AVPL8). Зависимость содержаний Ca_m от состава авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний натрия в расплаве

$$K_1 = Al_{av}:3 + Mg_{av}:2 + 9Na_{av} + 2Na_{pl} - Si_m:3 - Ti_m + Al_m - Mg_m$$

$$Na_m = 0.28K_1 - 0.14(AVPL9)$$

Диапазон значений Na 0.98–14.2 (атом. %)

Относительная ошибка 91–6.3 %

R = 0.89; N = 373; N₁ = 362; сигма = 0.89; $\chi^2 = 4.29$ (12)

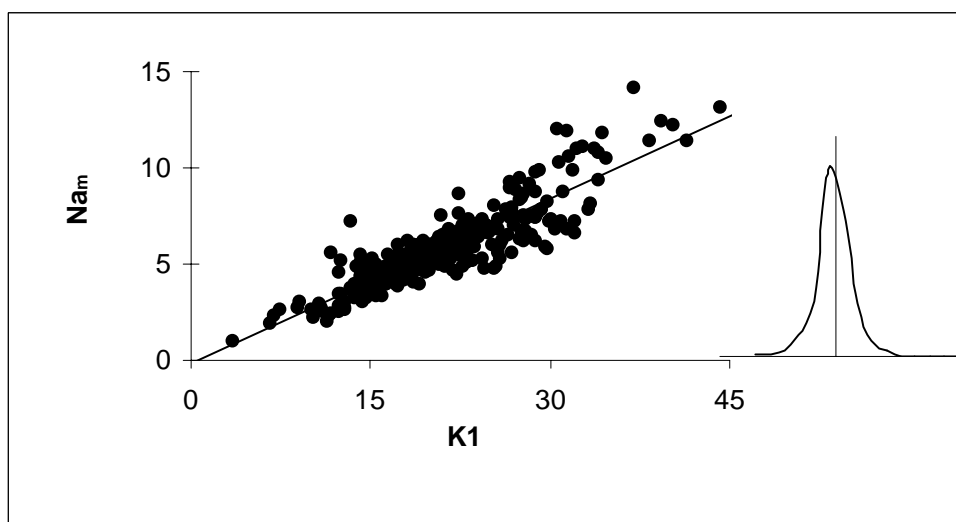


Рис. I.П.5.10 срх–рl (формула AVPL9). Зависимость содержаний Na_m от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний калия в расплаве

$$K_1 = 10(2K_{pl} + Na_{av}:2) + Al_{pl}:4 - Mg_{av}:4 - 4Fe^{2+}_{pl}$$

$$K_m = 0.21K_1 - 0.14(AVPL10)$$

Диапазон значений K_1 0.12–8.5 (атом. %)

Относительная ошибка 700–8.2 %

$R = 0.91$; $N = 342$; $N_1 = 334$; $\sigma = 0.7$; $\chi^2 = 9.11$ (12)

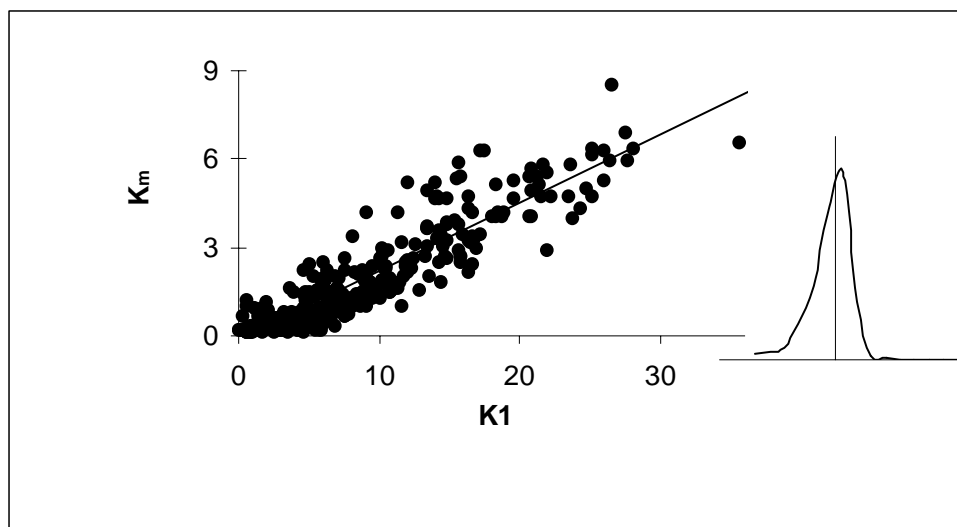


Рис. I.П.5.11 сrx-pl (формула AVPL10). Зависимость содержаний K_m от состава авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 8(2K_{pl} + Na_{av}:2) + Al_{pl}:3 - Mg_{av}:5 - 4Fe^{2+}_{pl} + Al_m:2 - Fe^{2+}_m:3 - Ca_m:2$$

$$K_m = 0.22K_1 - 0.49(AVPL10A)$$

Диапазон значений K_1 0.12–6.9 (атом. %)

Относительная ошибка 470–10 %

$R = 0.91$; $N = 342$; $N_1 = 333$; $\sigma = 0.56$; $\chi^2 = 7.12$ (12)

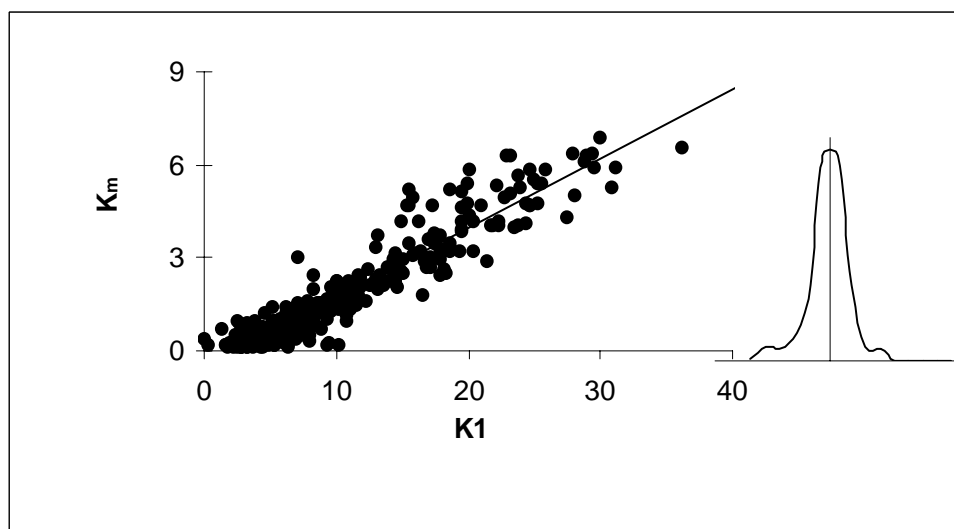


Рис. I.П.5.12 сrx-pl (формула AVPL10A). Зависимость содержаний K_m от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = Si_{pl} - Al_{pl}:2 - Ca_{pl}:4 + 5K_{pl} + 3Ti_{av} - Al_{av}:4 + Fe^{2+}_{av} - Mg_{av} - 4(K_{av} + Na_{av})$$

$$T = -3.77K_1 + 119162 \text{ (AVPLTa)}$$

Диапазон значений T 1026–1220 °C

Относительная ошибка 1.6–1.3 %

R = -0.9; N = 399; N₁ = 387; сигма = 16 °C; $\chi^2 = 1.58$ (12)

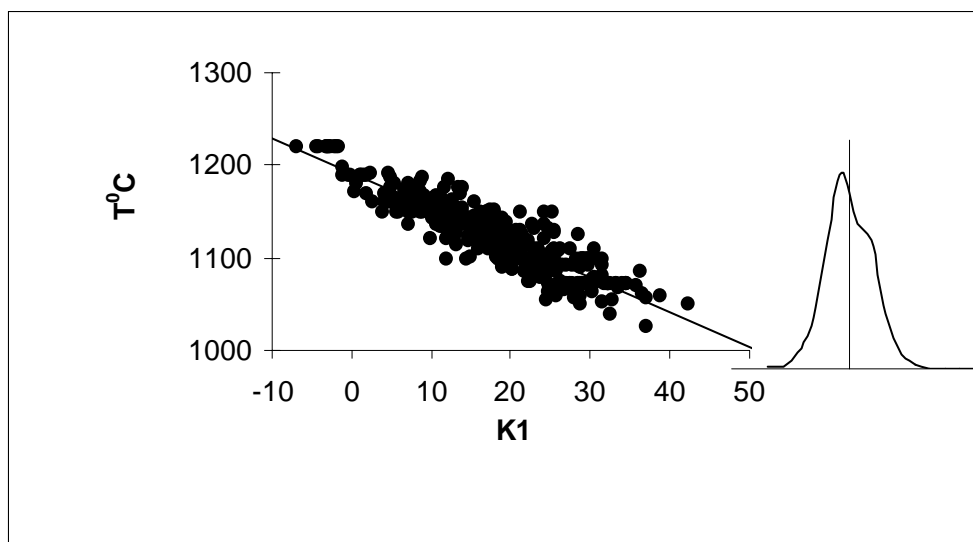


Рис. I.П.5.13 сrx–pl (формула AVPLTa). Зависимость значений T от состава авгита, плагиоклаза и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{pl}:5 + Na_{pl} + 3K_{pl} + 2Ti_{av} + Fe^{2+}_{av} - Mg_{av}:2$$

$$T = -4.93K_1 + 1206.98 \text{ (AVPLTb)}$$

Диапазон значений T 1026–1220 °C

Относительная ошибка 1.7–1.4 %

R = -0.89; N = 399; N₁ = 388; сигма = 17.5 °C; $\chi^2 = 2.63$ (12)

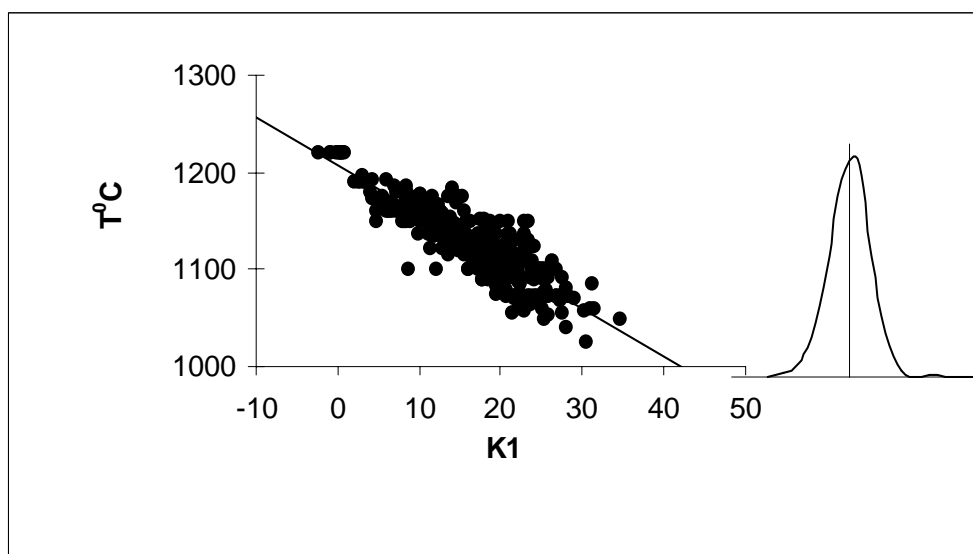


Рис. I.П.5.14 сrx–pl (формула AVPLTb). Зависимость значений T от состава авгита, плагиоклаза и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{pl} - Al_{pl}:2 - Ca_{pl}:4 + 5K_{pl} + 3Ti_{av} - Al_{av}:4 + Fe^{2+}_{av} - Mg_{av} - 4(K_{av} + Na_{av}) - 2Mg_m + 2Ti_m$$

$$T = -2.37K_1 + 1144.56(AVPLTc)$$

Диапазон значений T 1026–1220 °C

Относительная ошибка 1.4–1.2 %

$$R = -0.93; N = 399; N_1 = 388; \text{сигма} = 14.3 \text{ } ^\circ\text{C}; \chi^2 = 3.1 \text{ (12)}$$

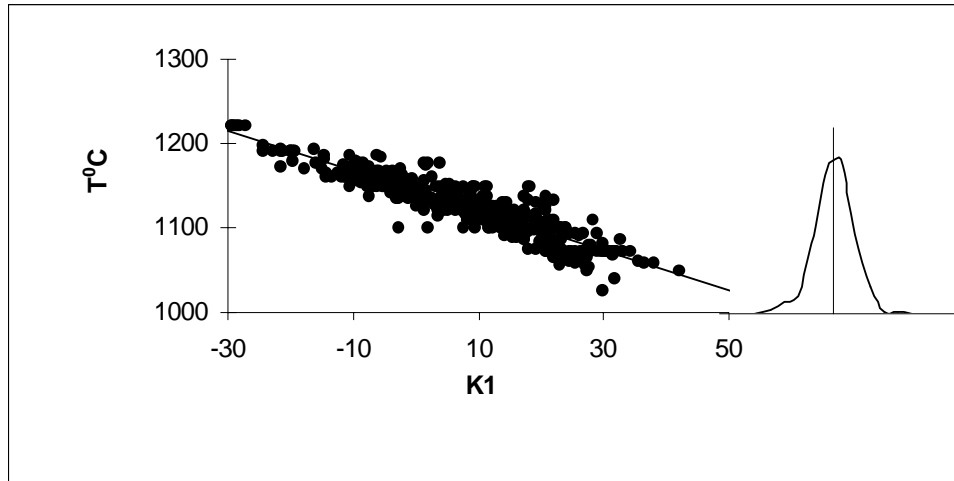


Рис. I.П.5.15 сrx-pl (формула AVPLTc). Зависимость значений от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по трем выше приведенным формулам составляет сигма < 14 °C.

Равновесное распределение элементов между авгитом и плагиоклазом

$$K_1 = Al_{av}:2 + Ca_{av} - 5(Na_{av} + K_{av}) + 2Fe^{2+}_{pl}; K_2 = Si_{av}:9 + Fe^{2+}_{av}:2 + Mg_{av} - Ca_{pl} + Al_{pl}:7$$

$$K_2 = -1.16K_1 + 44.92(AVPLRa)$$

Диапазон значений K₂ 8.5–38.5; K₁ 5.1–29.6

Относительная ошибка 18.8–4.2 %

$$R = -0.91; N = 399; N_1 = 398; \text{сигма} = 1.6; \chi^2 = 4.93 \text{ (12)}$$

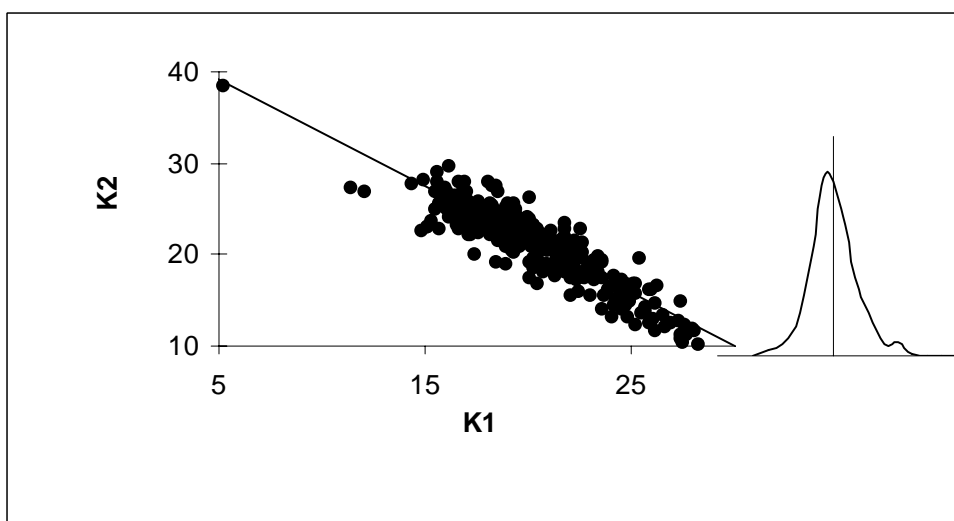


Рис. I.П.5.16 сrx-pl (формула AVPLRa). Зависимость значения K₂ от состава авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{av} \cdot 6 + Fe_{av}^{2+} + Mg_{av} + 7(Na_{av} + K_{av}); K_2 = Al_{pl} + Ca_{av}$$

$$K_2 = -1.32K_1 + 103.09(AVPLRb)$$

Диапазон значений K_2 34–62; K_1 30–54

Относительная ошибка 5.7–3.1 %

$R = -0.9$; $N = 399$; $N_1 = 397$; $\sigma = 1.95$; $\chi^2 = 2.36$ (12)

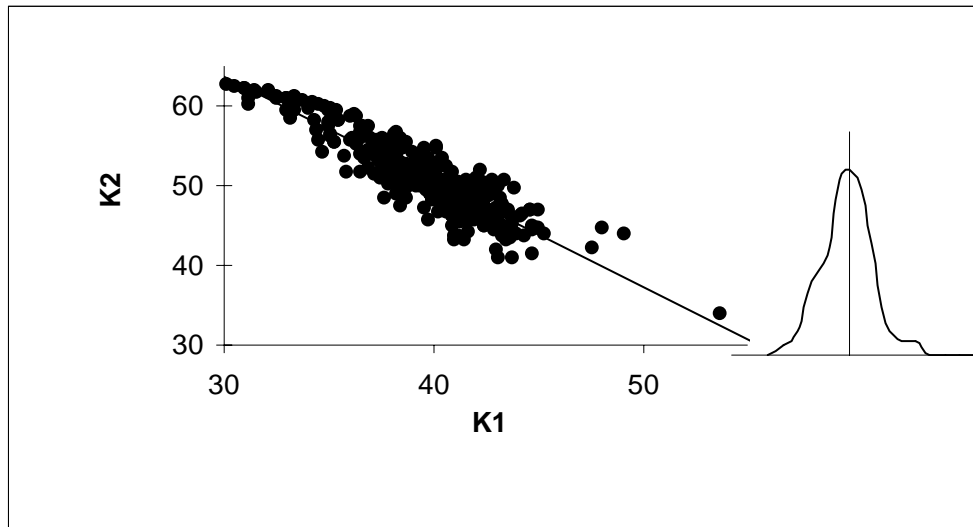


Рис. I.П.5.17 срх–р1 (формула AVPLRb). Зависимость значения K_2 от состава авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

2.6. Система расплав–оливин–клинопироксен–плаггиоклаз

Выборки (см. таблицу I) расплав – три минерала являются преимущественно незначительными по объемам (менее 50 точек). Исключение составляет парагенезис **ol–av–pl–gl**, представленный 348 точками. Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [2; 5; 6; 14; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 54; 67; 69; 70; 71; 80; 81; 83; 86; 87; 88; 90; 91; 92; 98; 100; 132; 169; 172; 173; 176; 177; 178; 189; 193; 194; 236; 255; 280; 281; 305; 347; D1].

После удаления точек с суммами результатов анализов минералов и стекол < 102 % и > 98 %, а также с экспериментами, в которых отсутствовало железо в расплаве, осталось 317 т. Для расчета содержаний натрия в расплаве были отброшены точки с нулевыми его концентрациями в расплаве – 291 т. Для расчета содержаний калия в расплаве были отброшены точки с нулевыми его концентрациями в расплаве – 262 т.

Таблица I.П.6.1 ol–срх–pl. Диапазоны составов стекол (расплавов), оливинов, авгитов и плаггиоклазов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

OLAP расплав		T °C	1026–1260	Оливин		Fo 27.53–91.03	
SiO ₂	37.66–65.71	Si	37.33–60.85	SiO ₂	32.04–41.28	Si	32.03–35.09
TiO ₂	0.41–5.6	Ti	0.3–4.09	TiO ₂	0.01–0.41	Ti	0.01–0.3
Al ₂ O ₃	9.37–20.69	Al	10.97–21.48	Al ₂ O ₃	0.01–1.45	Al	0.01–1.5
FeO	4.24–28.15	Fe	3.31–23.38	FeO	8.89–55.64	Fe	5.98–47.93
MnO	0.07–0.82	Mn	0.06–0.68	MnO	0.11–0.98	Mn	0.07–0.76
MgO	1.27–9.96	Mg	1.77–13.96	MgO	11.86–50.59	Mg	18.21–60.64
CaO	4.07–22.44	Ca	4.04–22.74	CaO	0.09–5.14	Ca	0.08–5.36
Na ₂ O	0.53–9.62	Na	0.98–16.43	Na ₂ O	0.01–0.63	Na	0.02–1.07
K ₂ O	0.02–7.88	K	0.02–9.35	K ₂ O	0.01–0.25	K	0.01–0.28
Cr ₂ O ₃	0.01–0.12	Cr	0.01–0.09	Cr ₂ O ₃	0.01–0.25	Cr	0.01–0.17
Авгит				Плаггиоклаз			
SiO ₂	43.4–54.9	Si	40.75–49.96	SiO ₂	43.39–62.23	Si	40.33–55.31
TiO ₂	0.03–4.61	Ti	0.02–3.26	TiO ₂	0.01–0.4	Ti	0.01–0.28
Al ₂ O ₃	0.84–10.14	Al	0.93–11.16	Al ₂ O ₃	23.15–35.25	Al	24.45–38.34
FeO	2.93–20.69	Fe	2.24–16.9	FeO	0.22–2.13	Fe	0.16–1.62
MnO	0.02–0.65	Mn	0.02–0.52	MnO	0.01–0.05	Mn	0.01–0.04
MgO	9.22–24	Mg	13.42–32.6	MgO	0.01–1.09	Mg	0.01–1.51
CaO	4.4–24.79	Ca	4.3–24.69	CaO	6.22–21.11	Ca	5.92–20.79
Na ₂ O	0.02–0.84	Na	0.04–1.54	Na ₂ O	0.25–7.97	Na	0.45–13.73
K ₂ O	0.01–0.14	K	0.01–0.17	K ₂ O	0.01–1.49	K	0.01–1.72
Cr ₂ O ₃	0.01–1.08	Cr	0.01–0.78	Cr ₂ O ₃	0.01–0.04	Cr	0.01–0.03
En	27.48–67.14	Wo	8.85–53.22	Ab	2.19–69.87	An	30.13–100
Fs	4.78–34.6			Or	0.06–8.74		

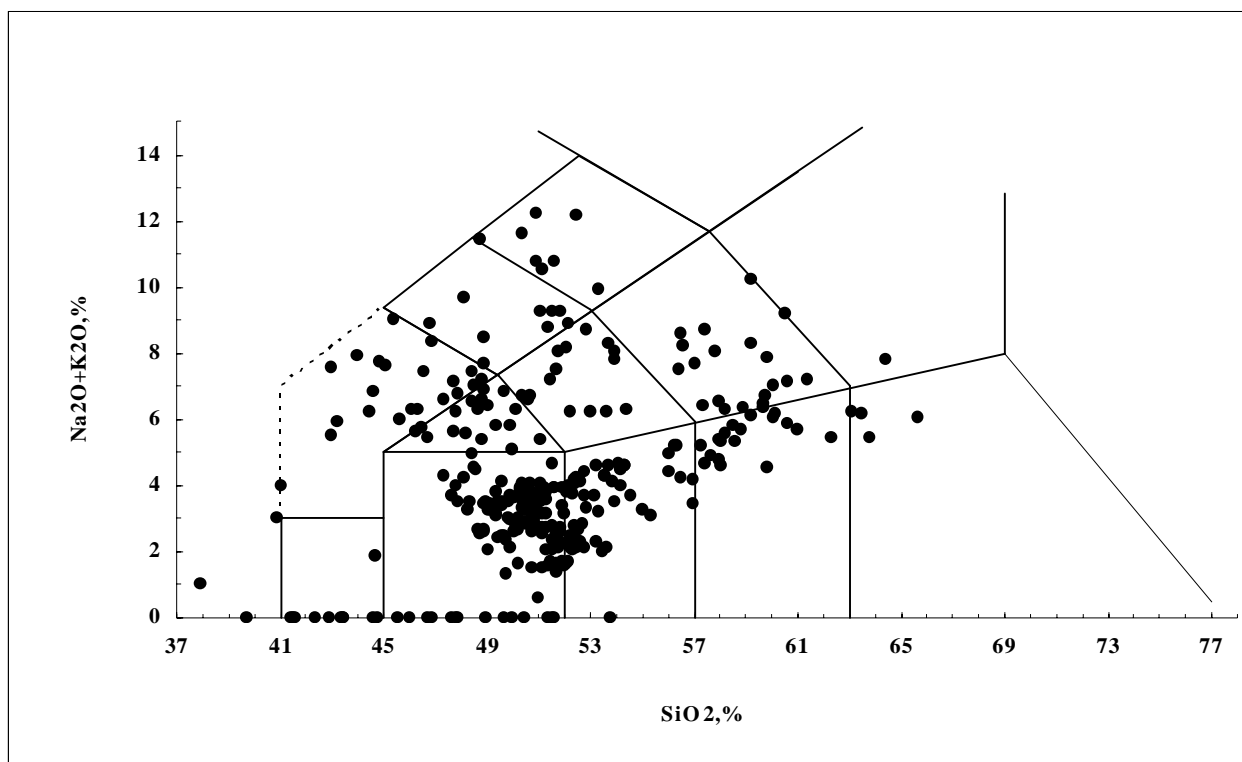


Рис. I.П.6.1 ol–срх–pl. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливина, клинопироксена и плагиоклаза по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = Si_{pl} - Ti_{av} - Al_{av} - Ca_{av} \cdot 4 - 3Ca_{ol}$$

$$Si_m = 0.63K_1 + 25.53(OLAP1)$$

Диапазон значений Si 37.3–61 (атом. %)

Относительная ошибка 5.6–3.4 %

$R = 0.84$; $N = 317$; $N_1 = 315$; $\sigma = 2.1$; $\chi^2 = 1.53$ (12)

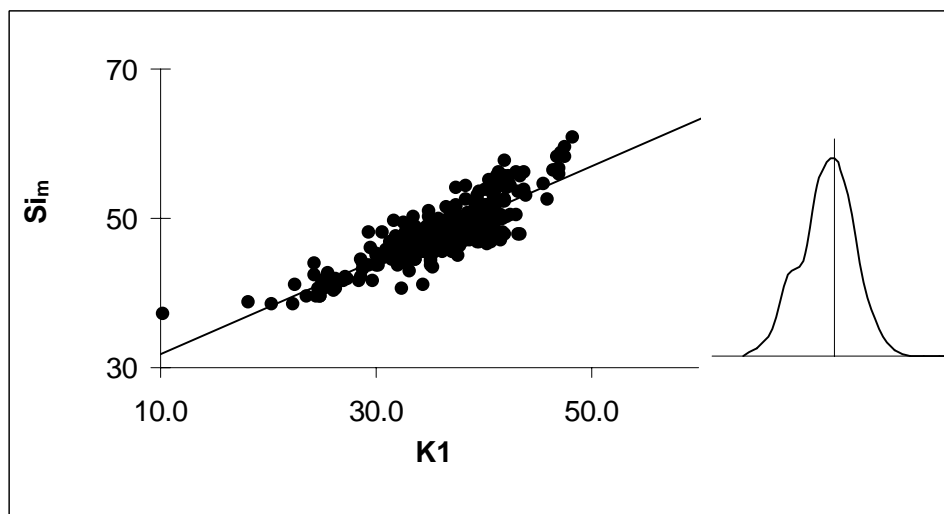


Рис. I.П.6.2 ol–срх–pl (формула **OLAP1**). Зависимость содержаний Si_m от состава оливина, авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Al_{av} - 2Ti_{av} + 4(Na_{av} + K_{av}) - Fe^{2+}_{ol}:3 - Al_{pl}:5 + 4K_{pl}$$

$$Al_m = 0.41K_1 + 18.3(OLAP3)$$

Диапазон значений Al 11–21.5 (атом. %)

Относительная ошибка 9–4.8 %

R = 0.85; N = 317; N₁ = 314; сигма = 1; $\chi^2 = 3.39$ (12)

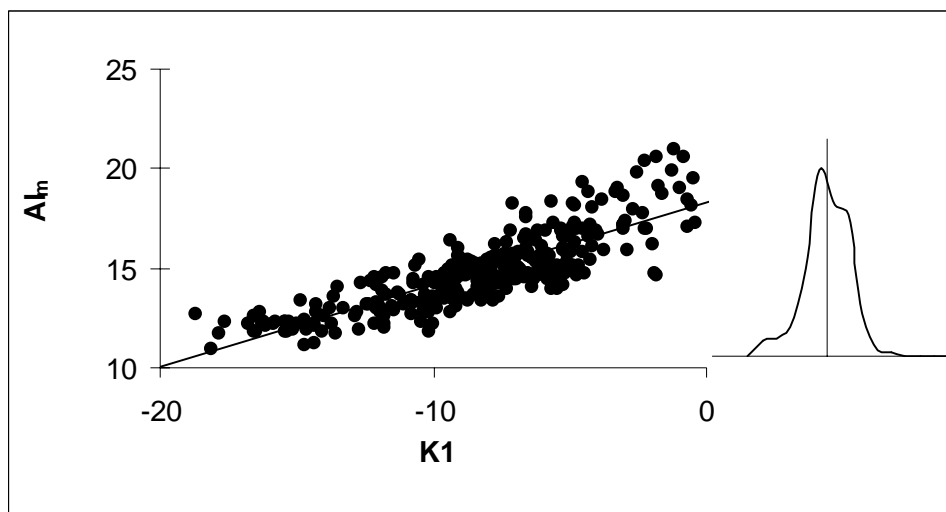


Рис. I.П.6.3 ol–срх–pl (формула OLAP3). Зависимость содержаний Al_m от состава оливина, авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа двухвалентного в расплаве

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol} - 2Ti_{av} - Fe^{2+}_{av} + Mg_{av}:4 - 3(Na_{av} + K_{av}) + Al_{pl} + 4Fe^{2+}_{pl} - 5K_{pl}$$

$$Fe^{2+}_m = 0.44K_1 - 12.62(OLAP5)$$

Диапазон значений Fe²⁺ 2.7–23.4 (атом. %)

Относительная ошибка 55.5–6.4 %

R = 0.89; N = 317; N₁ = 314; сигма = 1.5; $\chi^2 = 1.38$ (12)

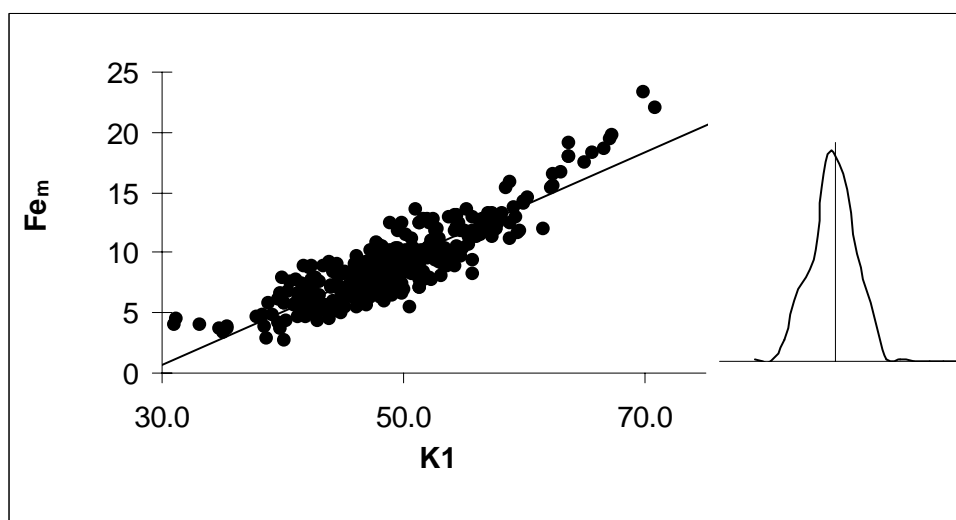


Рис. I.П.6.4 ol–срх–pl (формула OLAP5). Зависимость содержаний Fe²⁺_m от состава оливина, авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Mg_{ol} - Al_{av} + Mg_{av} - 8(Na_{av} + K_{av}) + 3Ca_{pl} - 9K_{pl}$$

$$Mg_m = 0.13K_1 - 5.88(OLAP7)$$

Диапазон значений Mg 1.8–14 (атом. %)

Относительная ошибка 55–7.1 %

R = 0.92; N = 317; N₁ = 311; сигма = 1; $\chi^2 = 4.39$ (12)

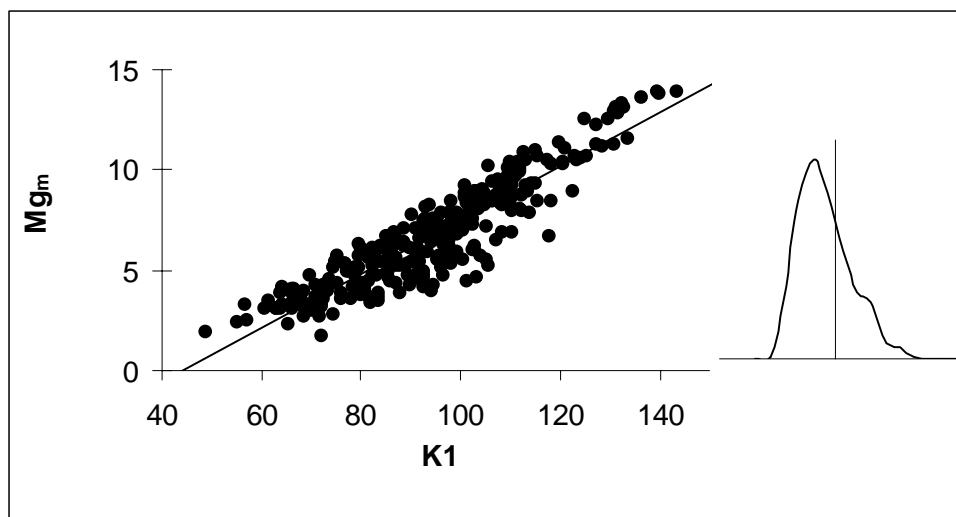


Рис. I.П.6.5 ol–срх–pl (формула OLAP7). Зависимость содержаний **Mg_m** от состава оливина, авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Ca_{pl} - 3(Na_{av} + K_{av}) + 2Ca_{ol}$$

$$Ca_m = 0.75K_1 + 0.49(OLAP8)$$

Диапазон значений Ca 4–22.5 (атом. %)

Относительная ошибка 32–5.7 %

R = 0.92; N = 317; N₁ = 314; сигма = 1.28; $\chi^2 = 3.28$ (12)

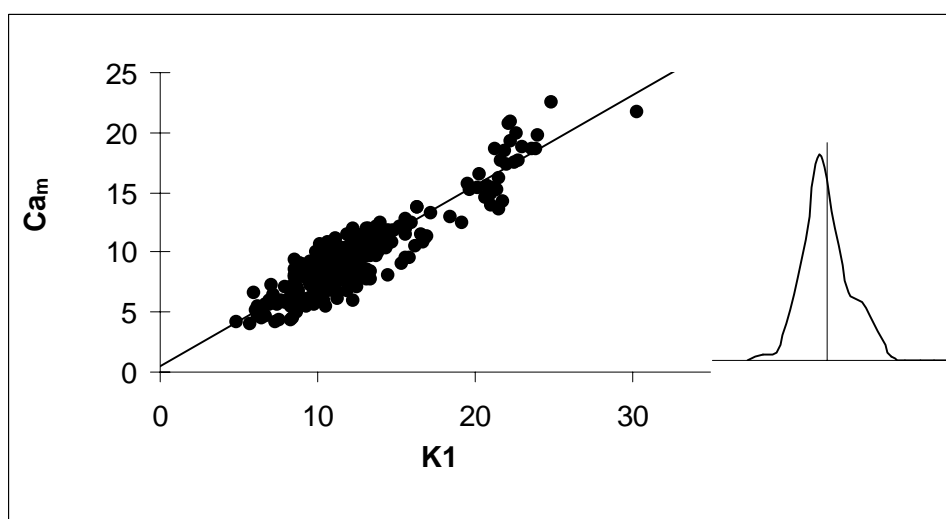


Рис. I.П.6.6 ol–срх–pl (формула OLAP8). Зависимость содержаний **Ca_m** от состава оливина, авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний натрия в расплаве

$$K_1 = Al_{av}:4 - Fe^{2+}_{av}:4 + 3Na_{av} + 2Ca_{ol} + Na_{pl} + Al_m:2 - Mg_m:4$$

$$Na_m = 0.65K_1 - 3.5(OLAP9)$$

Диапазон значений Na 0.98–14.2 (атом. %)

Относительная ошибка 100–6.8 %

R = 0.89; N = 291; N₁ = 282; сигма = 0.97; $\chi^2 = 3.21$ (12)

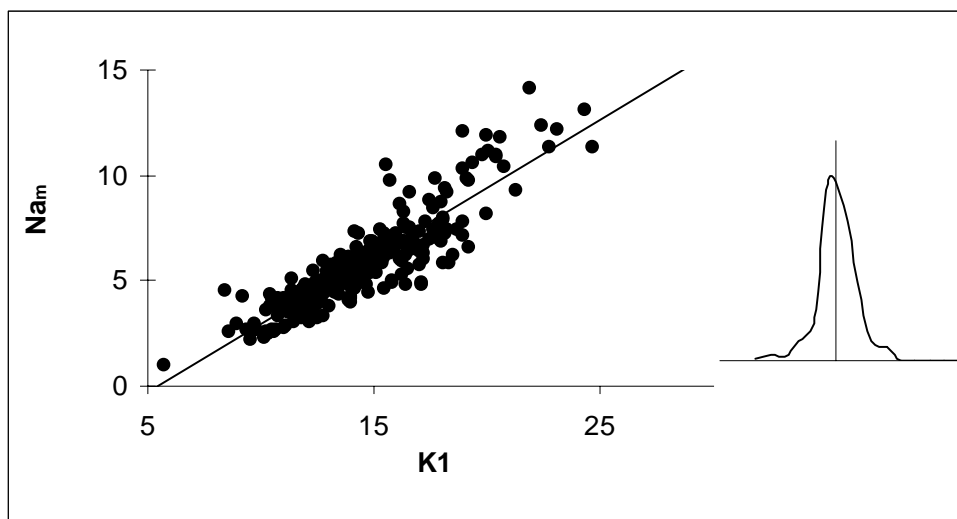


Рис. I.П.6.7 ol–срх–pl (формула OLAP9). Зависимость содержаний Na_m от состава оливина, авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний калия в расплаве

$$K_1 = Al_{pl}:7 - 2Fe^{2+}_{pl} + 7K_{pl} + 2Na_{av} - Ti_m - Mg_m:5$$

$$K_m = 0.56K_1 + 0.18(OLAP10)$$

Диапазон значений K₁ 0.1–6.9 (атом. %)

Относительная ошибка 690–10 %

R = 0.92; N = 262; N₁ = 257; сигма = 0.69; $\chi^2 = 4.8$ (12)

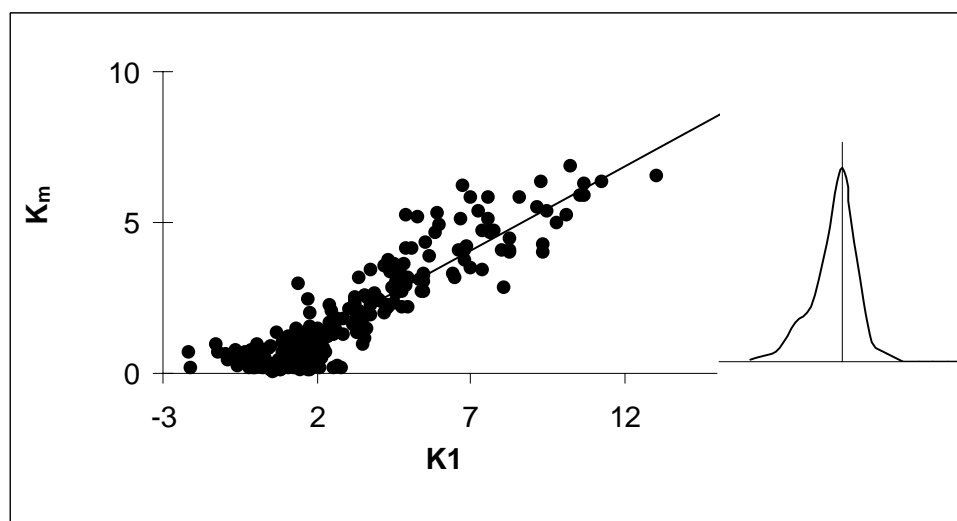


Рис. I.П.6.8 ol–срх–pl (формула OLAP10). Зависимость содержаний K_m от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = Mg_{ol} + 2.6Ca_{pl} - 2K_{pl} - 3Ti_{av} - 2Al_a$$

$$T = 2.4K_1 + 965.84(OLAPTa)$$

Диапазон значений T 1026–1220 °C

Относительная ошибка 1.5–1.2 %

$R = 0.91$; $N = 317$; $N_1 = 312$; $\sigma = 15.3$ °C; $\chi^2 = 3.64$ (12)

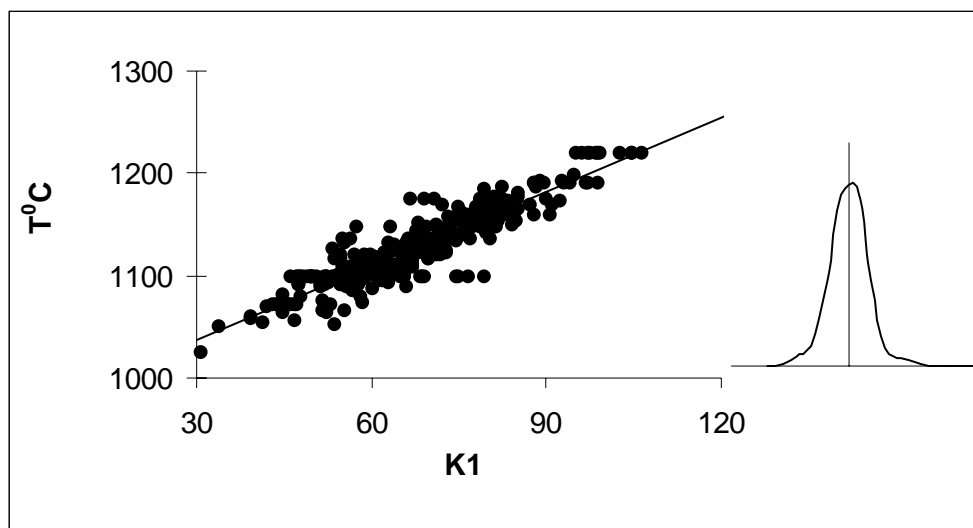


Рис. I.П.6.9 ol–срх–pl (формула OLAPTa). Зависимость значения T от состава оливина, авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{ol} + 2Ca_{pl} - 3K_{pl} - 3Ti_{av} - Al_{av} + 3Mg_m$$

$$T = 1.71K_1 + 986.14(OLAP Tb)$$

Диапазон значений T 1026–1220 °C

Относительная ошибка 1.3–1.1 %

$R = 0.93$; $N = 317$; $N_1 = 313$; $\sigma = 13.9$ °C; $\chi^2 = 348$ (12)

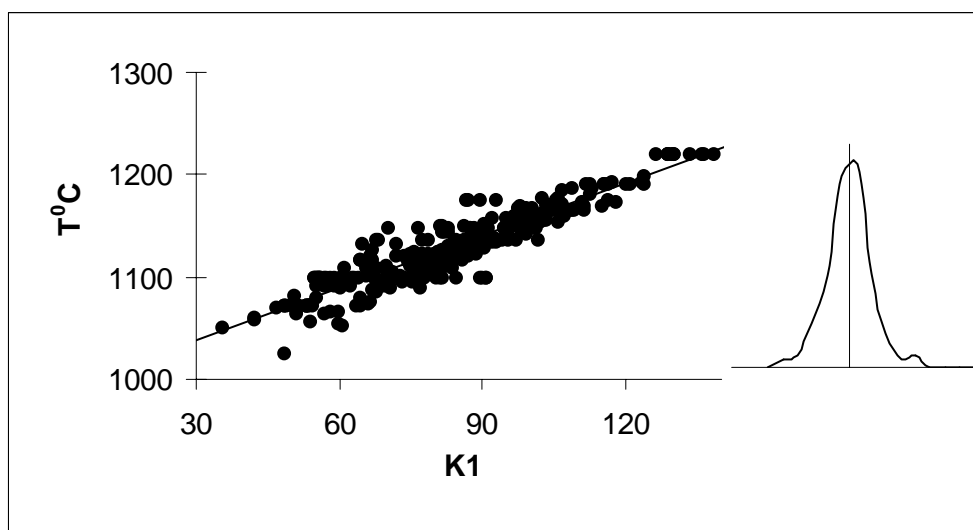


Рис. I.П.6.10 ol–срх–pl (формула OLAP Tb). Зависимость значения T от состава оливина, авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol} + 2Ca_{ol} + 2.4Si_{pl} + 3K_{pl} - 2Si_{av}$$

$$T = -2.53K_1 + 1238.5(OLAPTc)$$

Диапазон значений T 1026–1220 °C

Относительная ошибка 1.5–1.3 %

R = -0.9; N = 317; N₁ = 313; сигма = 15.8 °C; $\chi^2 = 2.99$ (12)

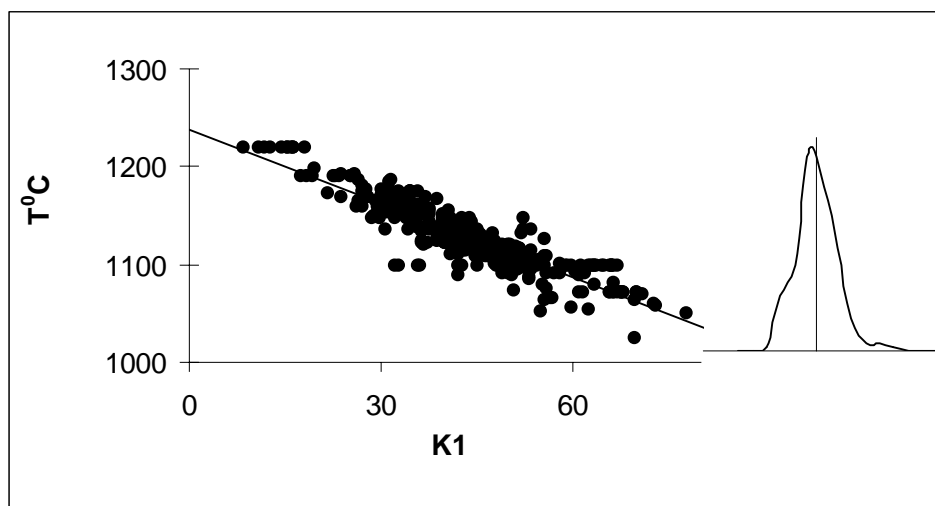


Рис. I.П.6.11 ol–срх–pl (формула OLAPTc). Зависимость значения T от состава оливина, авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol} + 2Ca_{ol} + 2Si_{pl} + 3K_{pl} - 2Si_{av} - 3Mg_m$$

$$T = -1.76K_1 + 1136.49(OLAPTd)$$

Диапазон значений T 1026–1220 °C

Относительная ошибка 1.3–1.1 %

R = -0.93; N = 317; N₁ = 313; сигма = 13.9 °C; $\chi^2 = 2.31$ (12)

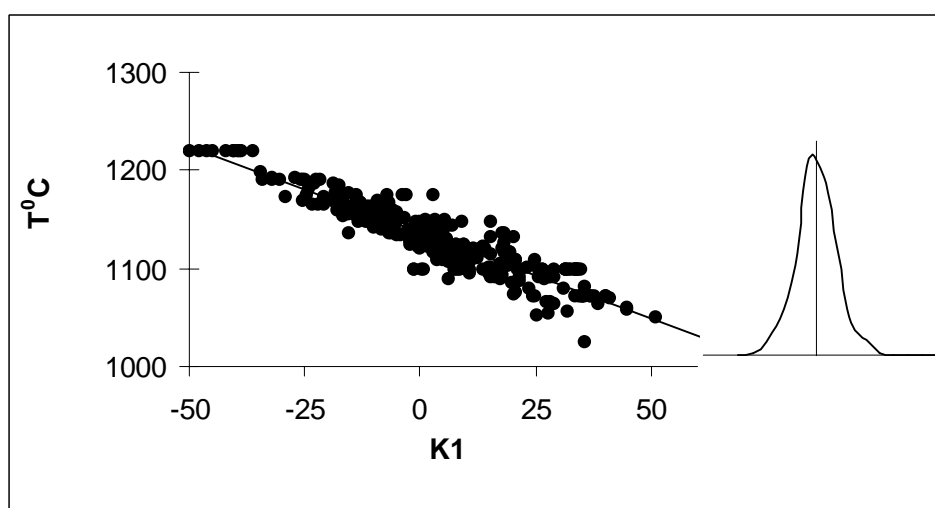


Рис. I.П.6.12 ol–срх–pl (формула OLAPTd). Зависимость значения T от состава оливина, авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по четырем выше приведенным формулам составляет сигма < 13 °C.

Равновесное распределение элементов между оливином, авгитом и плагиоклазом

$$K_1 = Al_{pl} - Fe^{2+}_{ol} + 4Ca_{ol} + Ca_{av} - Ti_{av}$$

$$Fe^{2+}_{av} = -0.23K_1 + 14.81(OLAPR)$$

Диапазон значений Fe^{2+}_{av} 2.2–16.9

Относительная ошибка 45.5–5.9 %

$R = -0.93$; $N = 317$; $N_1 = 316$; $\sigma = 1$; $\chi^2 = 1.93$ (12)

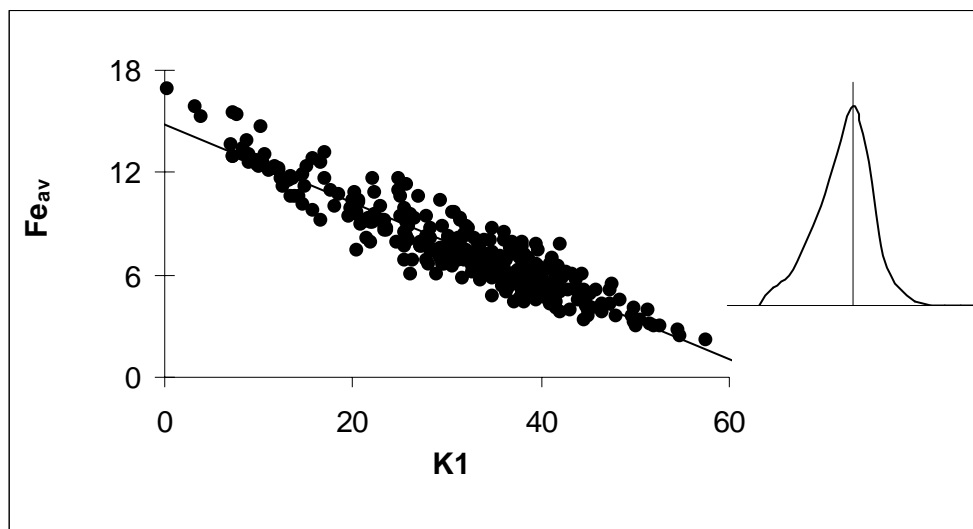


Рис. I.П.6.13 ol–срх–pl (формула OLAPR). Зависимость величины Fe^{2+}_{av} от состава оливина, авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

Глава 3. Уравнения, полученные с учетом температуры по составам расплавов

Эти выборки ограничены составами квазиравновесных расплавов (стекол) в системах расплав–кристаллическая фаза, где кристаллическая фаза может быть представлена различными наборами минералов и различными их количествами. Собственно минеральные фазы представлены следующими группами: шпинели; оливина; ортопироксена; плагиоклаза; клинопироксена (авгит и пижонит). Расчеты для пижонита по вышеприведенной схеме не проводились, но составы стекол для этой выборки были использованы. Поэтому нельзя с полной уверенностью утверждать, что приводимые ниже соотношения элементов, свидетельствующие о стехиометрии природных магматических расплавов, являются универсальными. Эти данные в дальнейшем будут дополнены экспериментальными результатами для амфиболов, магнетита, граната и т.д.

3.1. Расчет содержаний Fe^{2+} и Fe^{3+} форм железа в расплаве

Этот массив данных был сформирован из экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [1; 4; 5; 8; 9; 11; 12; 13; 15; 16; 17; 20; 22; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 35; 41; 52; 54; 57; 61; 63; 64; 65; 67; 68; 69; 70; 71; 73; 74; 75; 76; 77; 79; 80; 81; 82; 83; 86; 87; 88; 90; 92; 93; 94; 96; 97; 98; 99; 100; 101; 102; 104; 105; 106; 107; 126; 131; 132; 147; 148; 149; 150; 151; 152; 153; 163; 164; 165; 166; 169; 174; 176; 177; 178; 179; 189; 190; 192; 193; 194; 197; 198; 199; 201; 203; 205; 206; 235; 236; 255; 257; 261; 263; 280; 281; 282; 294; 305; 313; 332; 333; 345; 347; D1].

Выборка представлена 1821 точкой. После выбраковки результатов с суммами < 98 % и > 102 % – 1701 т. После отбрасывания точек с нулевыми содержаниями железа – 1687 т.

Расчет содержаний двух- и трехвалентных форм железа в расплаве проводился по методике А.А. Борисова и А.И. Шапкина*, являющейся наиболее универсальной в настоящее время. Эти данные в молекулярной форме были пересчитаны на содержания в виде атомных количеств в процентах и приняты за первичные. Для расчета содержаний трехвалентного железа были использованы экспериментальные точки со значениями f_{O_2} в интервале -14.4...-3.1 – 1642 т.

Таблица I.Ш.1.1 gl. Составы стекол (расплавов), равновесных с кристаллической фазой в экспериментах с контролируемой фугитивностью кислорода.

Стекло		SGLFE	
$Lg f_{O_2}$	-0.68...-14.4	T °C	980–1525
SiO ₂	34.2–76.41	Si	33.83–72.94
TiO ₂	0.01–11.8	Ti	0.01–9.04
Al ₂ O ₃	0.3–26.63	Al	0.33–28.53
Fe ₂ O ₃	0.01–5.94	Fe ³⁺	0.01–4.33
FeO	0.182–36.30	Fe ²⁺	0.14–30.96
MnO	0.01–1.59	Mn	0.01–1.34
MgO	0.11–25.6	Mg	0.15–33.2
CaO	0.9–22.98	Ca	0.89–23.77
Na ₂ O	0.01–13.72	Na	0.02–22.61
K ₂ O	0.01–8.63	K	0.01–10.31
Cr ₂ O ₃	0.01–1.43	Cr	0.01–1.08

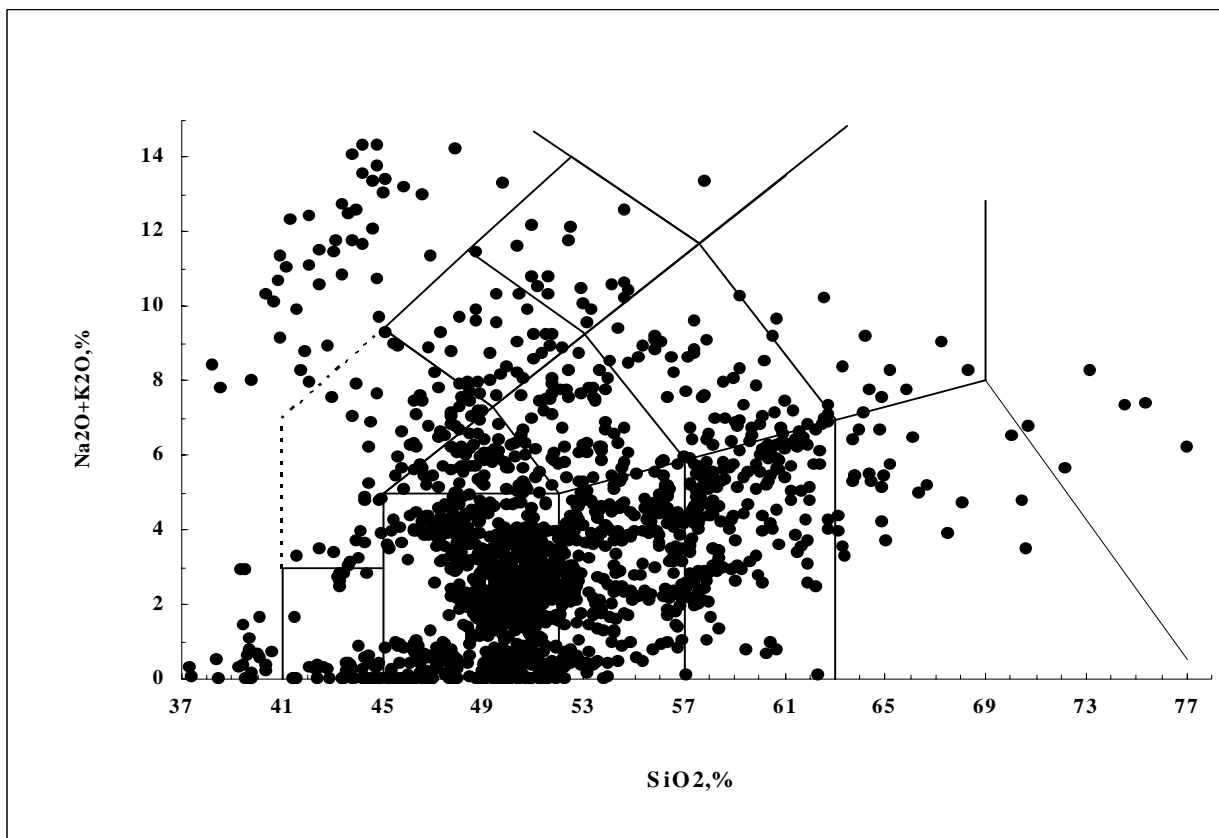


Рис. I.III.1.1 gl. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллической фазой, в экспериментах с контролируемой фугитивностью кислорода по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

$$K_1 = (Fe^{2+}_m + Fe^{3+}_m) + T:400$$

$$Fe^{2+}_m = 0.96K_1 - 3.66(SGLFE2)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 0.14–31 (атом. %)

Относительная ошибка 600–2.6 %

$R = 0.98$; $N = 1687$; $N_1 = 1653$; $\sigma = 0.83$; $\chi^2 = 28.38$ (24)

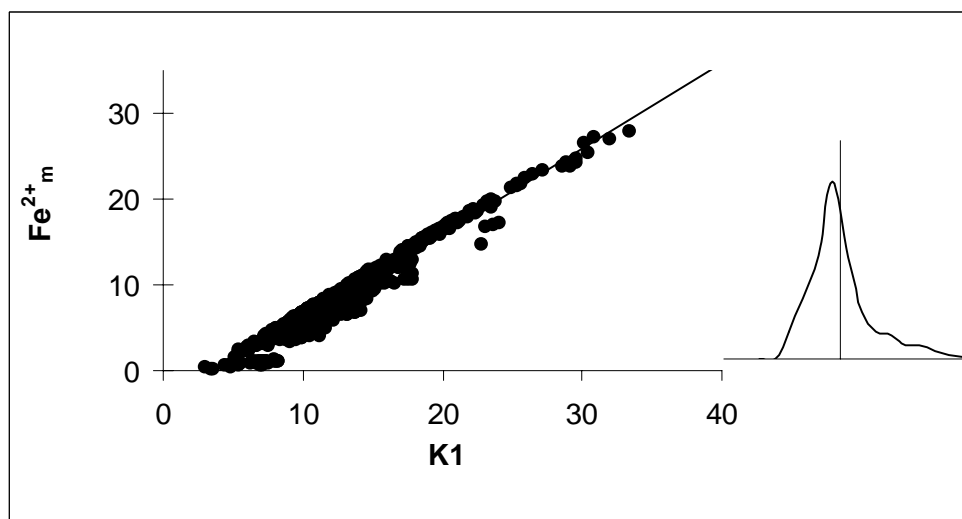


Рис. I.III.1.2 gl (формула SGLFE2). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от величины K_1 и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Exp}[(\text{Fe}^{2+}_m + \text{Fe}^{3+}_m)(1300\text{Na}_m:\text{T} + \text{Ti}_m:2 + \text{Si}_m:9 + \text{K}_m:2):(-1f_{\text{O}_2}):10]$$

$$\text{Fe}^{3+}_m = 0.49K_1 - 0.5(\text{SGLFE3})$$

Диапазон значений Fe^{3+} 0.01–4.7 (атом. %)

Относительная ошибка 3700–7.8 %

$R = 0.9$; $N = 1642$; $N_1 = 1618$; сигма = 0.37; $\chi^2 = 16.43$ (24)

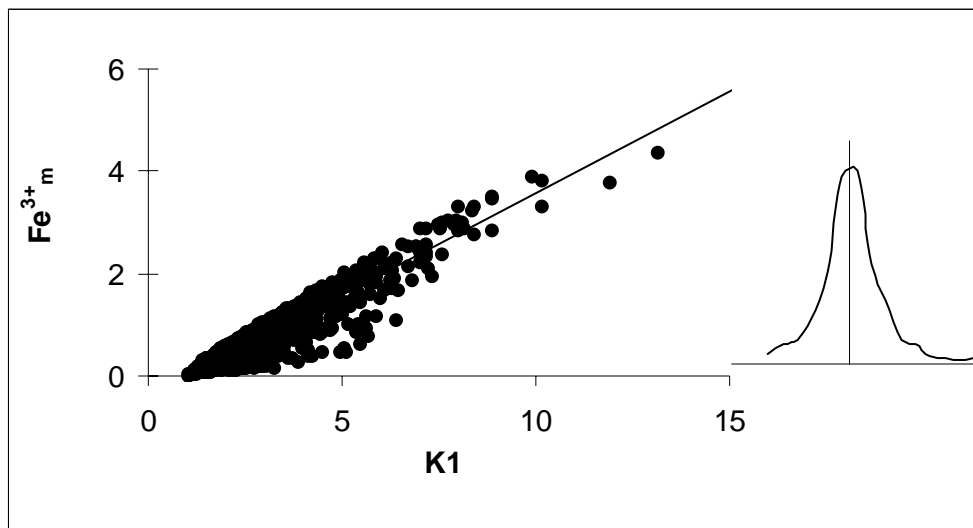


Рис. I.П.1.3 gl (формула SGLFE3). Зависимость содержаний Fe^{3+}_m от величины K_1 и распределение среднеквадратичной ошибки.

3.2. Соотношение элементов в расплаве, равновесном с кристаллической фазой

Эта выборка была сформирована путем объединения выборок из части I с исключением повторов экспериментальных точек в случаях равновесия расплава с несколькими минеральными фазами. Выборка представлена 2130 т. После выбраковки результатов с суммами < 98 % и > 102 % и удаления точек с нулевыми содержаниями элементов – 1784 т.

Таблица I.Ш.2.1 гл. Составы стекол, равновесных с кристаллической фазой при атмосферном давлении

SRAS	Стекло	T°C	980–1525
SiO ₂	34.2–76.41	Si	33.83–72.94
TiO ₂	0.01–10.7	Ti	0.01–8.13
Al ₂ O ₃	3.16–26.63	Al	3.8–28.54
FeO	0.34–37.5	Fe	0.27–31.98
MnO	0–1.59	Mn	0–1.34
MgO	0.11–25.6	Mg	0.15–33.2
CaO	0.9–18.17	Ca	0.89–18.2
Na ₂ O	0–13.72	Na	0–22.61
K ₂ O	0–8.63	K	0–10.31
Cr ₂ O ₃	0–1.82	Cr	0–1.3

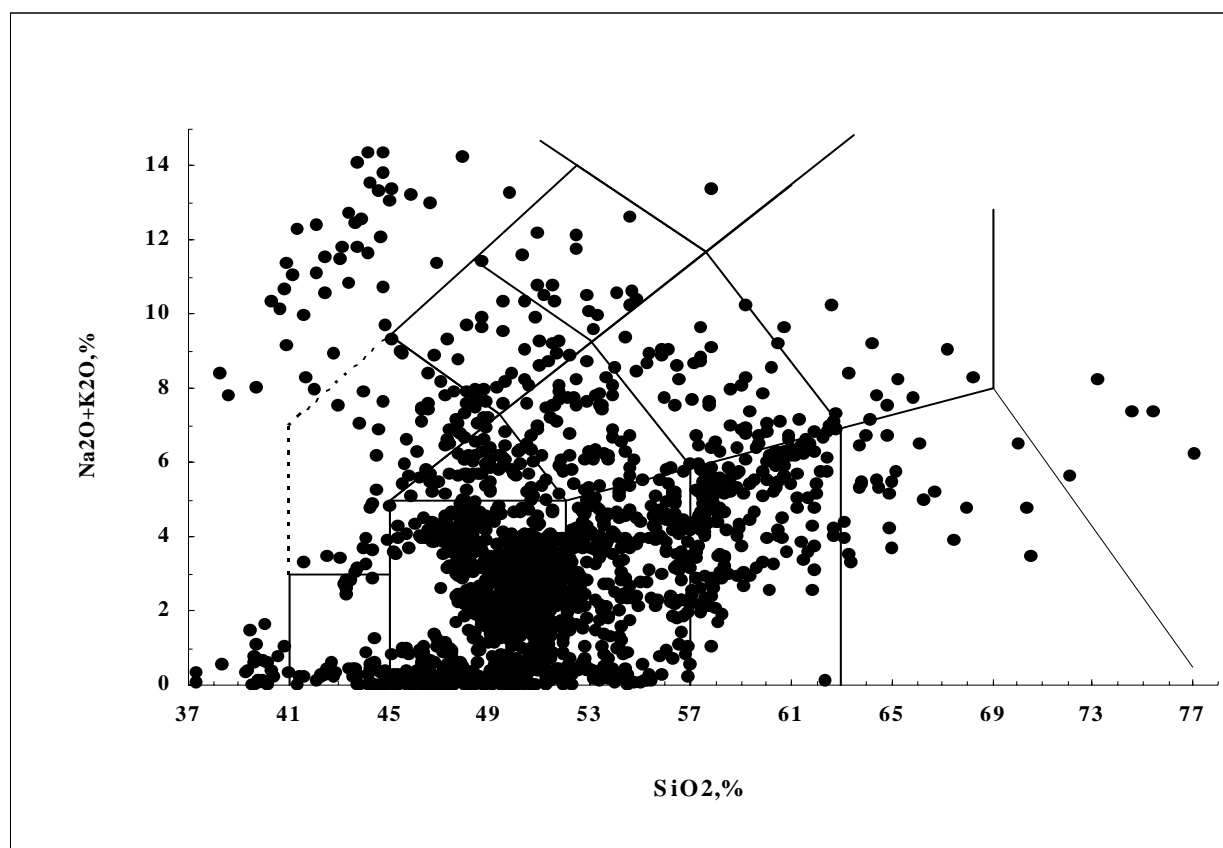


Рис. I.Ш.2.1 гл. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллической фазой, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

$$K_1 = 2000Al_m:T + Si_m:1.3 - T:50; K_2 = T(Fe^{2+}_m + Fe^{3+}_m):1100 + Mg_m + 600Ti_m:T$$

$$K_2 = -0.89K_1 + 55.73(SRAS1a)$$

Диапазон значений K_2 2–44; K_1 13–61.5

Относительная ошибка 120–5 %

$$R = -0.93; N = 1784; N_1 = 1764; \text{сигма} = 2.4 \chi^2 = 6.16 (24)$$

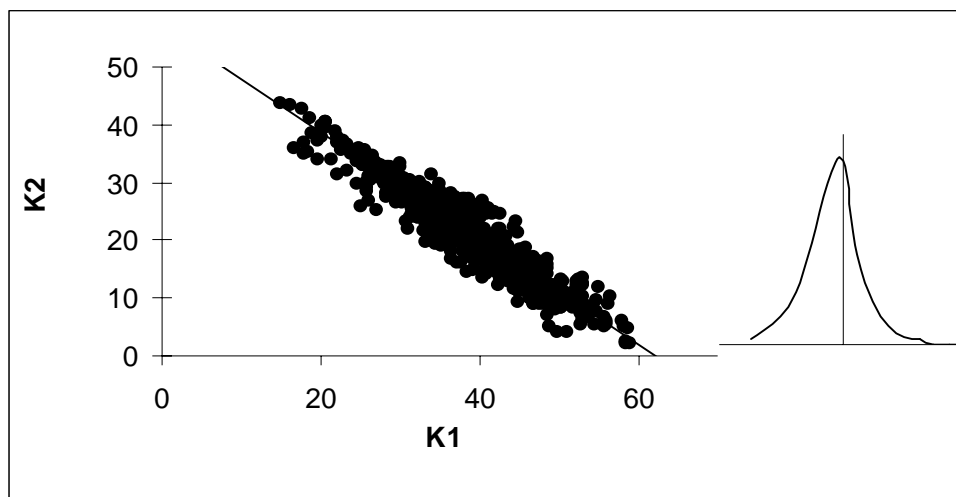


Рис. I.III.2.2 г1 (формула SRAS1a). Зависимость величины K_2 от K_1 и распределение средне-квадратичной ошибки.

$$K_1 = 1200Na_m:T + K_m + Si_m; K_2 = (Fe^{2+}_m + Fe^{3+}_m):4 + Ca_m + T:60$$

$$K_2 = -0.46K_1 + 56.67(SRAS1b)$$

Диапазон значений K_2 19.6–41.2; K_1 33.8–82.6

Относительная ошибка 6.1–2.9 %

$$R = -0.93; N = 1784; N_1 = 1756; \text{сигма} = 1.2 \chi^2 = 7.61 (24)$$

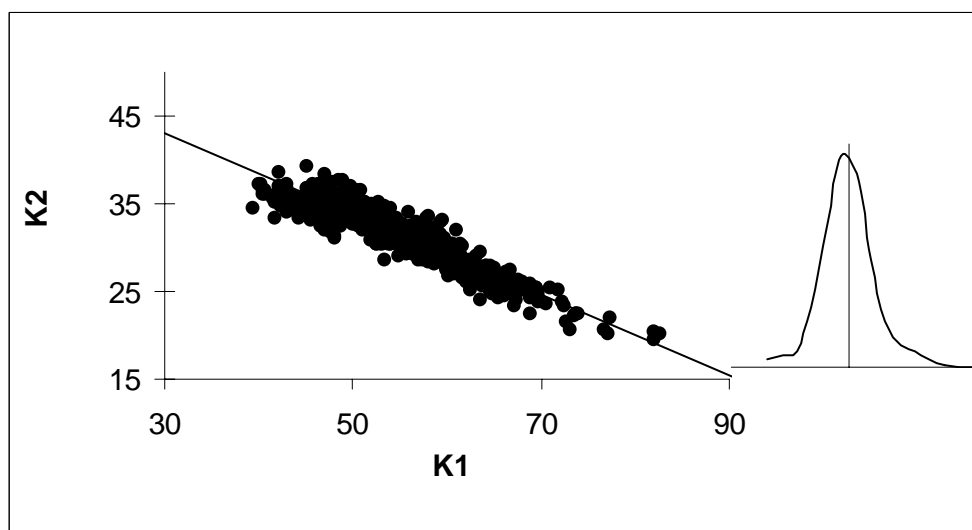


Рис. I.III.2.3 г1 (формула SRAS1b). Зависимость величины K_2 от K_1 и распределение средне-квадратичной ошибки.

3.3. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном со шпинелью

Эта выборка представлена 272 точками (см. Часть I, раздел 1). Используются те же анализы стекол, что и для системы расплав–шпинель. Это условие распространяется и на другие выборки расплавов, равновесных с различными вариантами наборов минеральных фаз, представленные ниже. В разделах, приводимых ниже, это условие больше не оговаривается. Для расчета численного значения величины фугитивности кислорода были отброшены точки с нулевыми содержаниями трехвалентного железа и установлен диапазон значений фугитивности $-3.1 \dots -13.5 - 250$ т.

Таблица I.Ш.3.1 gl. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных со шпинелью.

SRSSR	Стекло	T °C	1111–1500
SiO ₂	35.2–61.48	Si	35.2–58.52
TiO ₂	0.01–15	Ti	0.01–11.32
Al ₂ O ₃	4.04–20.52	Al	4.7–21.86
FeO	3.46–23.92	Fe	2.71–20.31
MnO	0.04–0.85	Mn	0.03–0.71
MgO	2.74–25.6	Mg	3.68–33.2
CaO	5.56–15.38	Ca	5.48–15.95
Na ₂ O	0.05–6.38	Na	0.1–11.15
K ₂ O	0.04–6.6	K	0.05–7.74
Cr ₂ O ₃	0.01–1.43	Cr	0.01–1.08

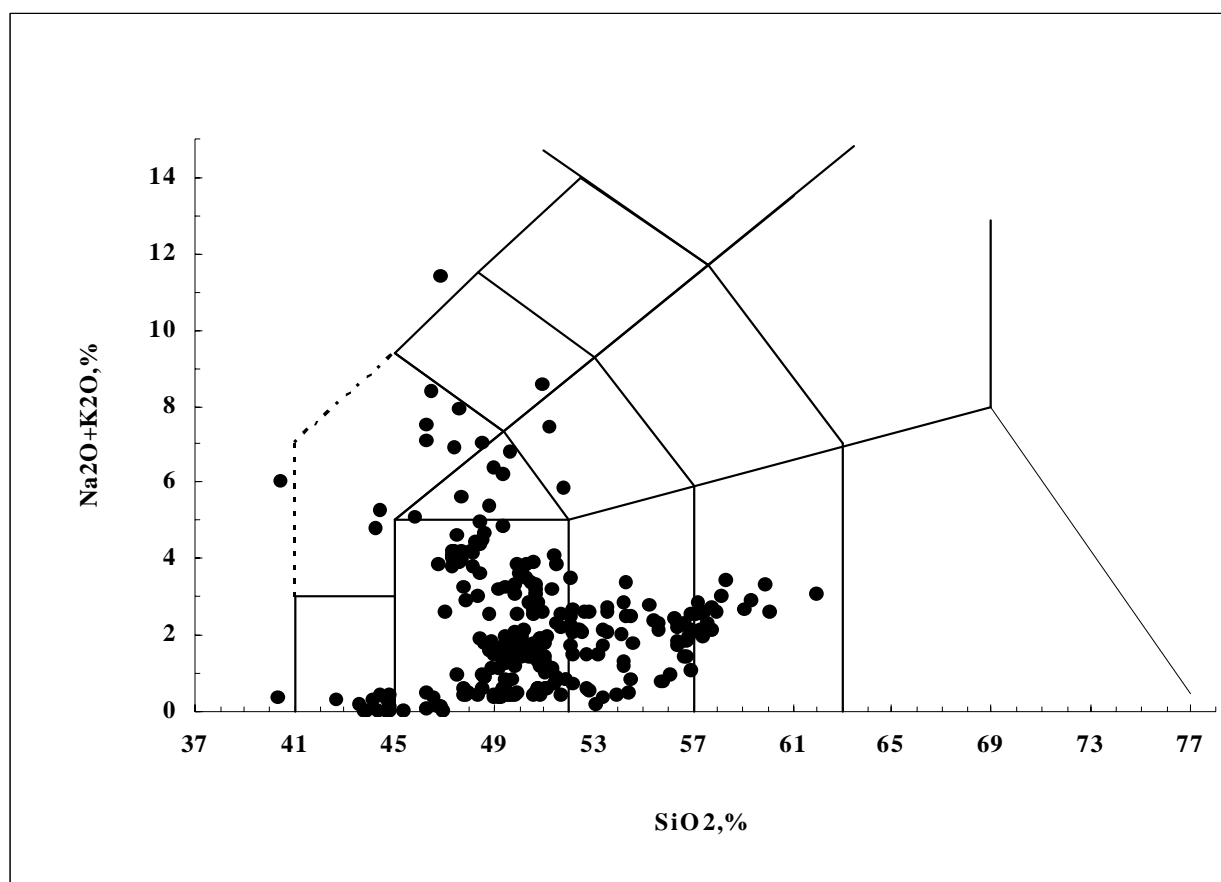


Рис. I.Ш.3.1 gl. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами шпинели, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

$$K_1 = 1000(\text{Fe}^{2+}_m + \text{Fe}^{3+}_m + \text{Mg}_m + \text{Ti}_m:2 + \text{Si}_m:4):T$$

$$\text{Al}_m = -0.58K_1 + 31.35(\text{SRSSR1})$$

Диапазон значений Al_m 9–22 (атом. %)

Относительная ошибка 12.5–5.1 %

$R = -0.86$; $N = 272$; $N_1 = 269$; сигма = 1.13; $\chi^2 = 2.42$ (12)

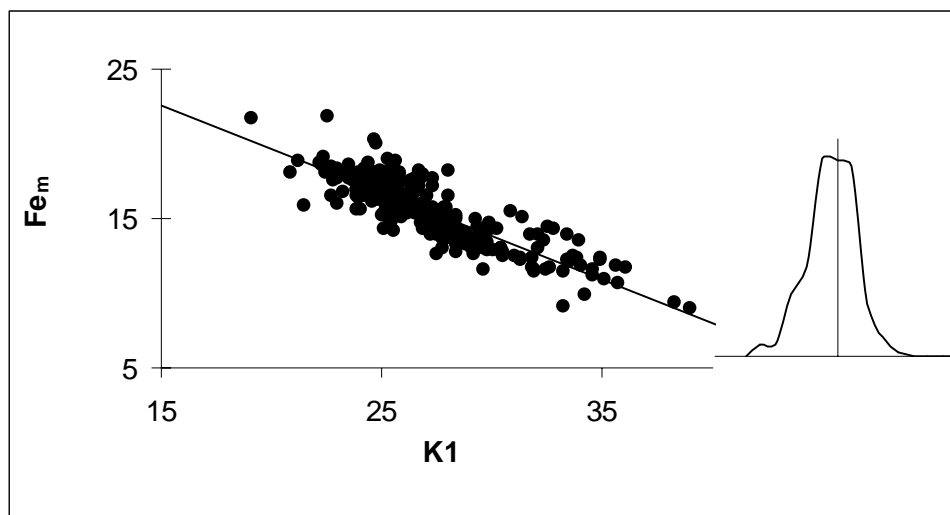


Рис. I.III.3.2 gl–sp (формула SRSSR1). Зависимость содержаний Al_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = T:33 - \text{Al}_m - (\text{Na}_m + \text{K}_m):3 - (\text{Fe}^{2+}_m + \text{Fe}^{3+}_m):2 + \text{Ca}_m:3$$

$$\text{Mg}_m = 1K_1 - 7.48(\text{SRSSR2})$$

Диапазон значений Mg_m 3.6–27.3 (атом. %)

Относительная ошибка 52.8–7 %

$R = 0.9$; $N = 272$; $N_1 = 270$; сигма = 1.9; $\chi^2 = 2.58$ (12)

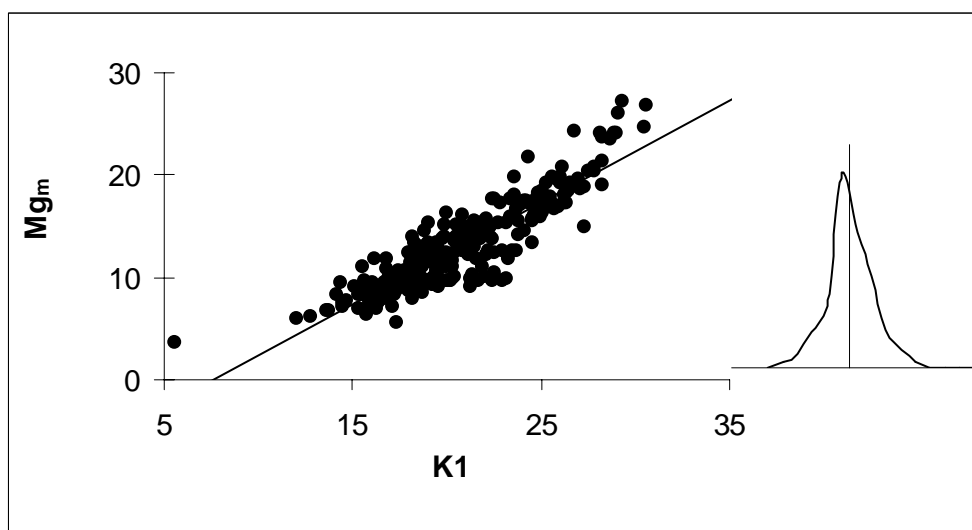


Рис. I.III.3.3 gl–sp (формула SRSSR2). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_m + Al_m:2 - Ca_m + (Fe^{2+}_m + Fe^{3+}_m):6$$

$$T = 13.07K_1 + 1097.5(SRSSR3)$$

Диапазон значений T 1111–1500 °C

Относительная ошибка 3.5–2.6 %

$R = 0.83$; $N = 272$; $N_1 = 265$; сигма = 38.5 °C; $\chi^2 = 7.03$ (12)

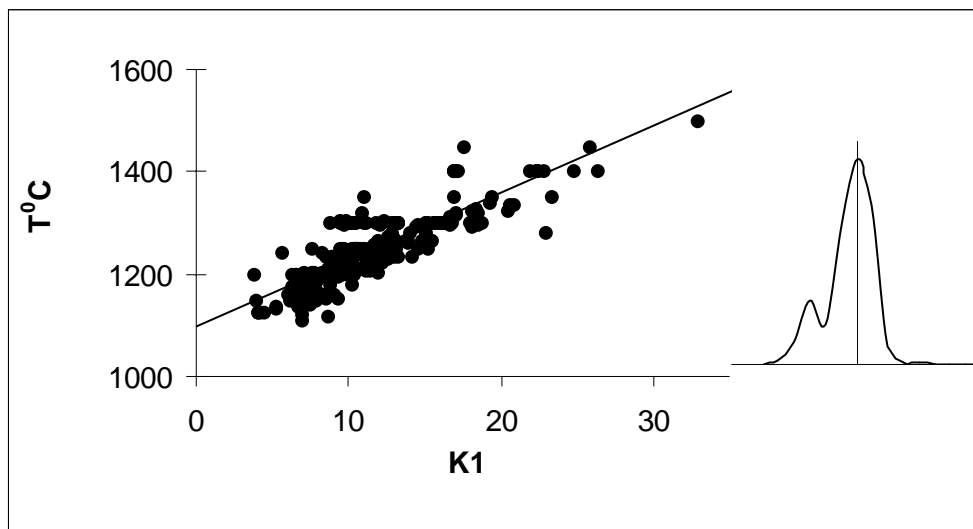


Рис. I.III.3.4 gl–sp (формула SRSSR3). Зависимость значения T от состава расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = \ln[(Fe^{2+}_m/Fe^{3+}_m) + 2Ti_m + Ca_m:2 + 2(K_m + Na_m)]$$

$$f_{O_2} = -3.95K_1 + 4.71(SRSSR4)$$

Диапазон значений f_{O_2} -3.4...-13.5

Относительная ошибка 19.7–5%

$R = -0.93$; $N = 250$; $N_1 = 247$; сигма = 0.67(лог. ед.); $\chi^2 = 4.12$ (12)

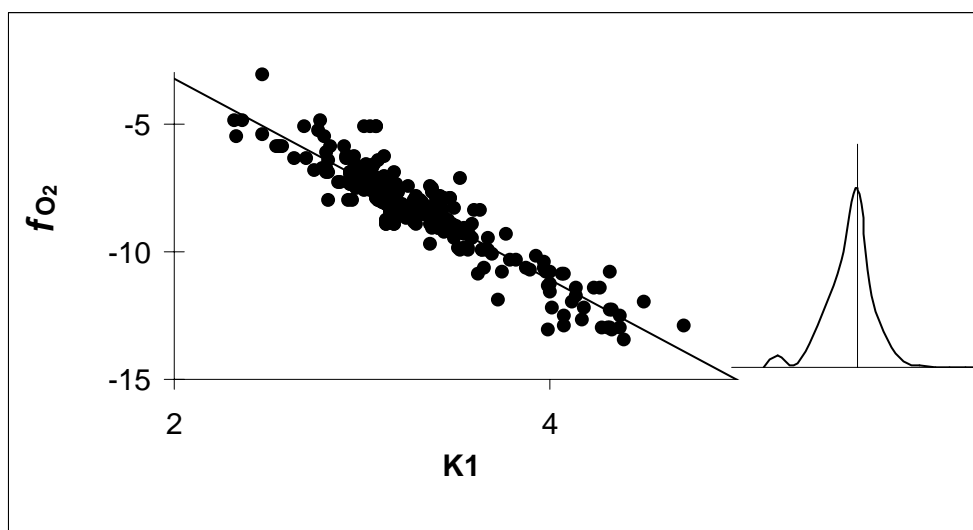


Рис. I.III.3.5 gl–sp (формула SRSSR4). Зависимость величины f_{O_2} от состава расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

3.4. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с оливином

Эта выборка содержит 1033 точки.

Таблица I.Ш.4.1 gl. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с оливином.

<i>SROLR</i>	Стекло	T °C	1025–1525
SiO ₂	35.2–65.71	Si	35.07–60.85
TiO ₂	0.23–15.3	Ti	0.16–11.55
Al ₂ O ₃	3.16–24.3	Al	3.8–24.97
FeO	3.49–34.14	Fe	2.65–30.47
MnO	0.03–1.59	Mn	0.02–1.34
MgO	0.6–25.6	Mg	0.92–33.2
CaO	1.9–22.44	Ca	1.9–22.74
Na ₂ O	0.01–9.62	Na	0.02–16.43
K ₂ O	0.01–7.88	K	0.01–9.35
Cr ₂ O ₃	0.01–1.29	Cr	0.01–0.94

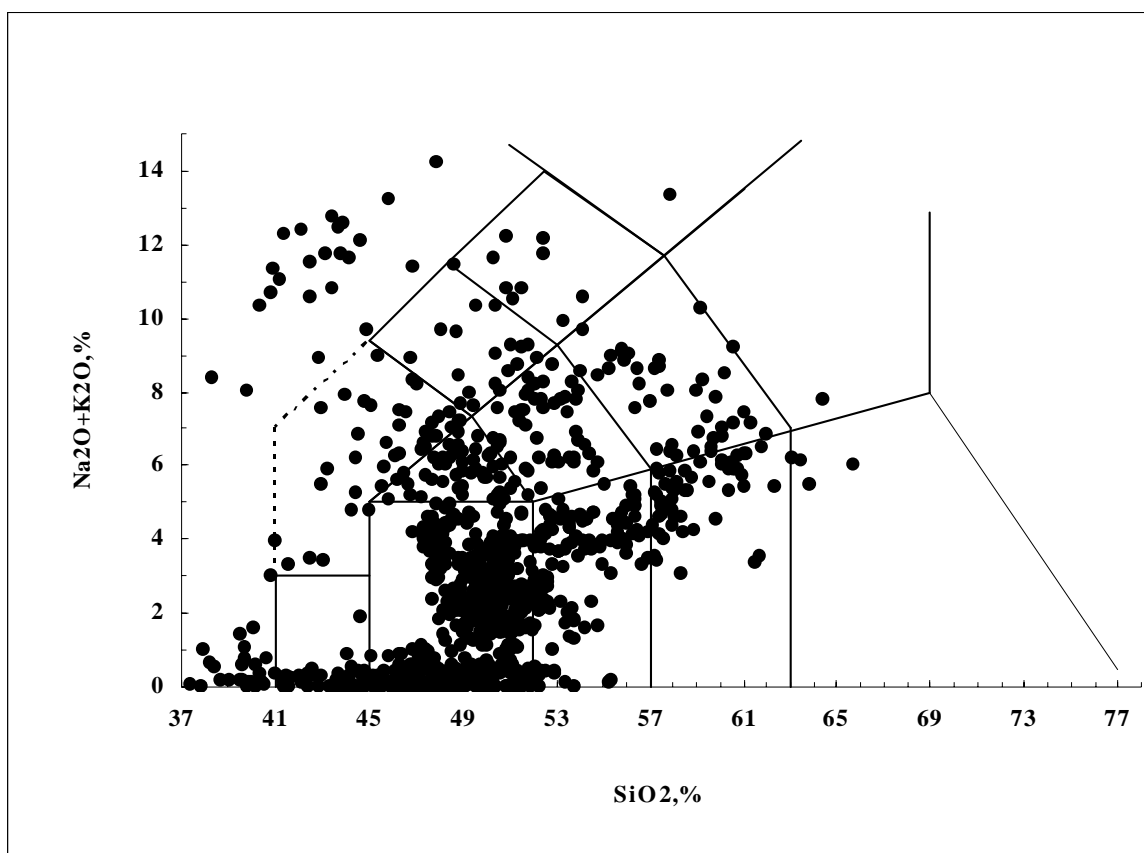


Рис. I.Ш.4.1 gl. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливины, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

$$K_1 = Al_m + Na_m + K_m; K_2 = 400(Mg_m + Fe^{2+}_m + Fe^{3+}_m):T$$

$$K_2 = -0.26K_1 + 12.12(\text{SOLR1})$$

Диапазон значений K_2 3.4–13.5; K_1 3.8–45.3

Относительная ошибка 45.2–6.2 %

$R = -0.91$; $N = 1033$; $N_1 = 1027$; $\sigma = 0.77$; $\chi^2 = 3.21$ (24)

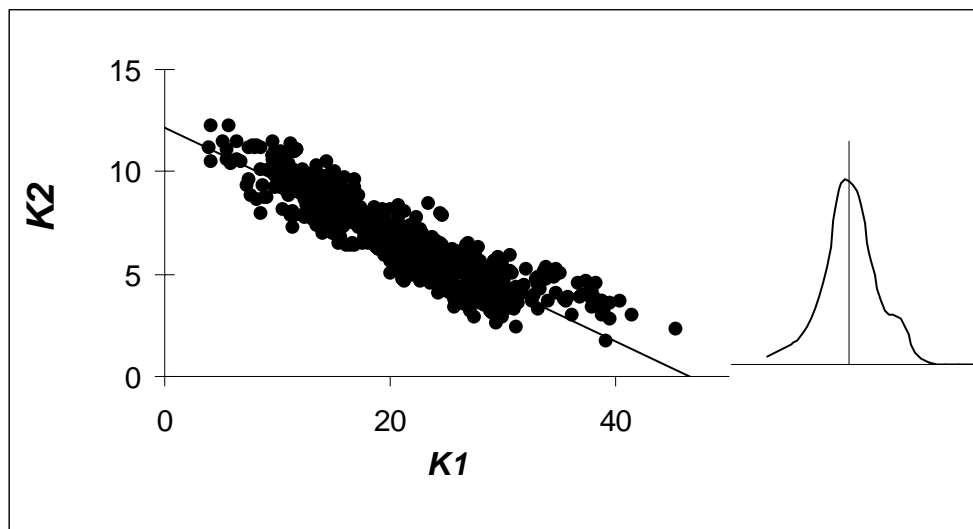


Рис. I.III.4.2 gl–ol (формула SOLR1). Зависимость величины K_2 от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$T = 13.76Mg_m + 1042.6(\text{SROLR2})$$

Диапазон значений T 1025–1525 °C; Mg 1–33 (атом. %)

Относительная ошибка 2.2–1.5 %

$R = 0.94$; $N = 1033$; $N_1 = 1020$; $\sigma = 22.8$ °C; $\chi^2 = 2.42$ (24)

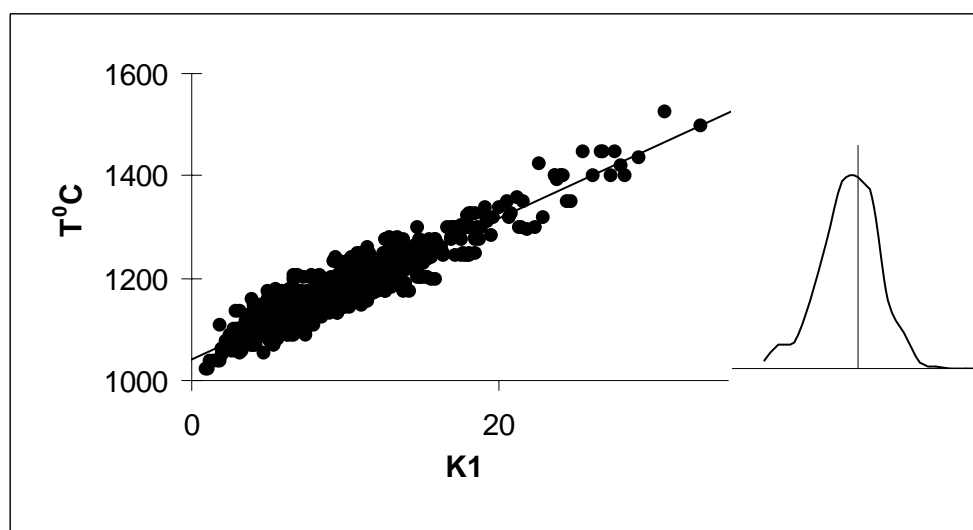


Рис. I.III.4.3 gl–ol (формула SROLR2). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_m - Ca_m \cdot 6 + Al_m \cdot 8$$

$$T = 14.72K_1 + 1031.7(SROL P3)$$

Диапазон значений T 1025–1525 °C;

Относительная ошибка 2–1.4 %

$R = 0.95$; $N = 1033$; $N_1 = 1022$; сигма = 21.2 °C; $\chi^2 = 3.58$ (24)

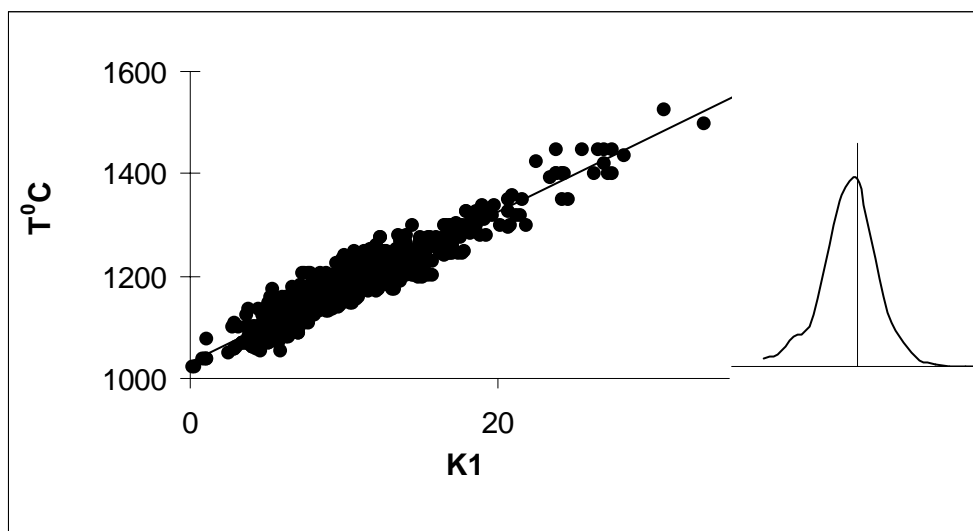


Рис. I.Ш.4.4 gl–ol (формула SROL P3). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_m + (K_m + Na_m) \cdot 4$$

$$T = 15.85K_1 + 1003.0(SROL R4)$$

Диапазон значений T 1025–1525 °C;

Относительная ошибка 2–1.4 %

$R = 0.95$; $N = 1033$; $N_1 = 1017$; сигма = 21.7 °C; $\chi^2 = 3.73$ (24)

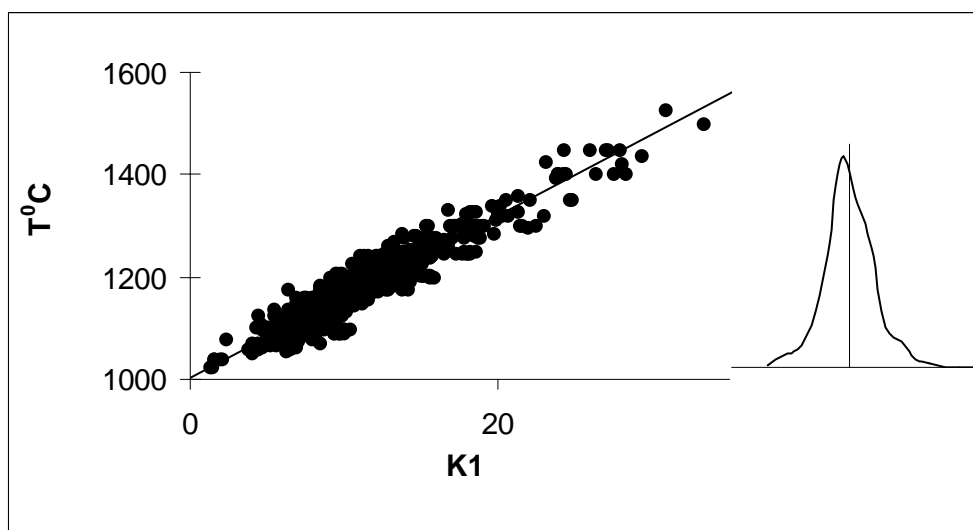


Рис. I.Ш.4.5 gl–ol (формула SROL R4). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = T:100$$

$$Mg_m = 6.42K_1 - 65.83(\text{SROLR5})$$

Диапазон содержаний Mg 0.9–33.1 (атом. %); T 1025–1525 °C

Относительная ошибка 170–4.7 %

R = 0.94; N = 1033; N₁ = 1020; сигма = 1.56; $\chi^2 = 3.28$ (24)

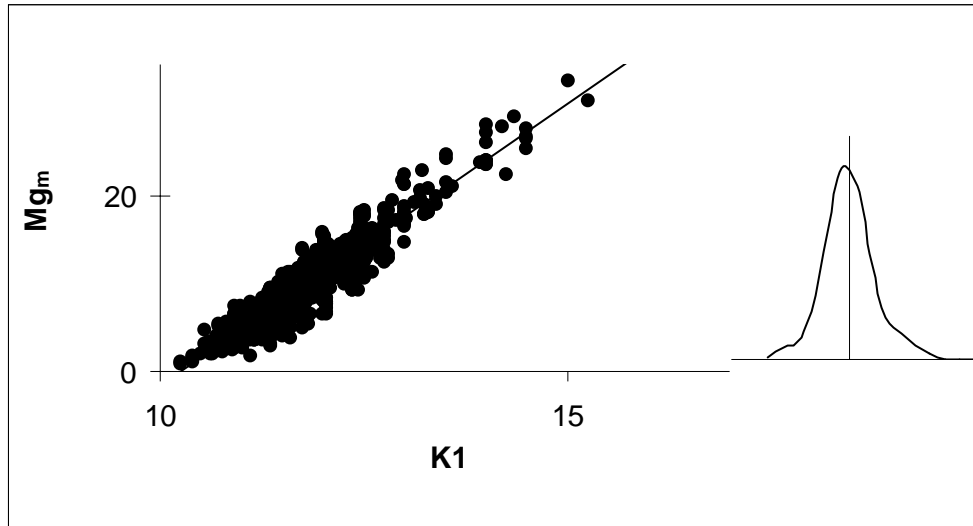


Рис. I.Ш.4.6 gl–ol (формула SROLR5). Зависимость содержаний Mg_m от температуры расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

3.5. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с ортопироксеном

Эта выборка представлена 153 т. Для расчета равновесия по формуле (**SROPRI**) были отброшены точки с нулевыми содержаниями натрия и титана в расплаве – 149 т.

Таблица I.III.5.1 gl. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с ортопироксеном.

<i>SROPRI</i>	Стекло	T °C	1050–1390
SiO ₂	47.6–69.43	Si	45.54–65.5
TiO ₂	0.01–6	Ti	0.01–4.32
Al ₂ O ₃	0.3–18.2	Al	0.33–19.99
FeO	3.37–24.6	Fe	2.66–20.12
MnO	0.01–0.56	Mn	0.01–0.46
MgO	0.78–20.69	Mg	1.1–28.12
CaO	1.98–13.4	Ca	2.01–13.7
Na ₂ O	0.01–4.61	Na	0.02–8.28
K ₂ O	0.1–6.53	K	0.12–7.69
Cr ₂ O ₃	0.01–0.94	Cr	0.01–0.69

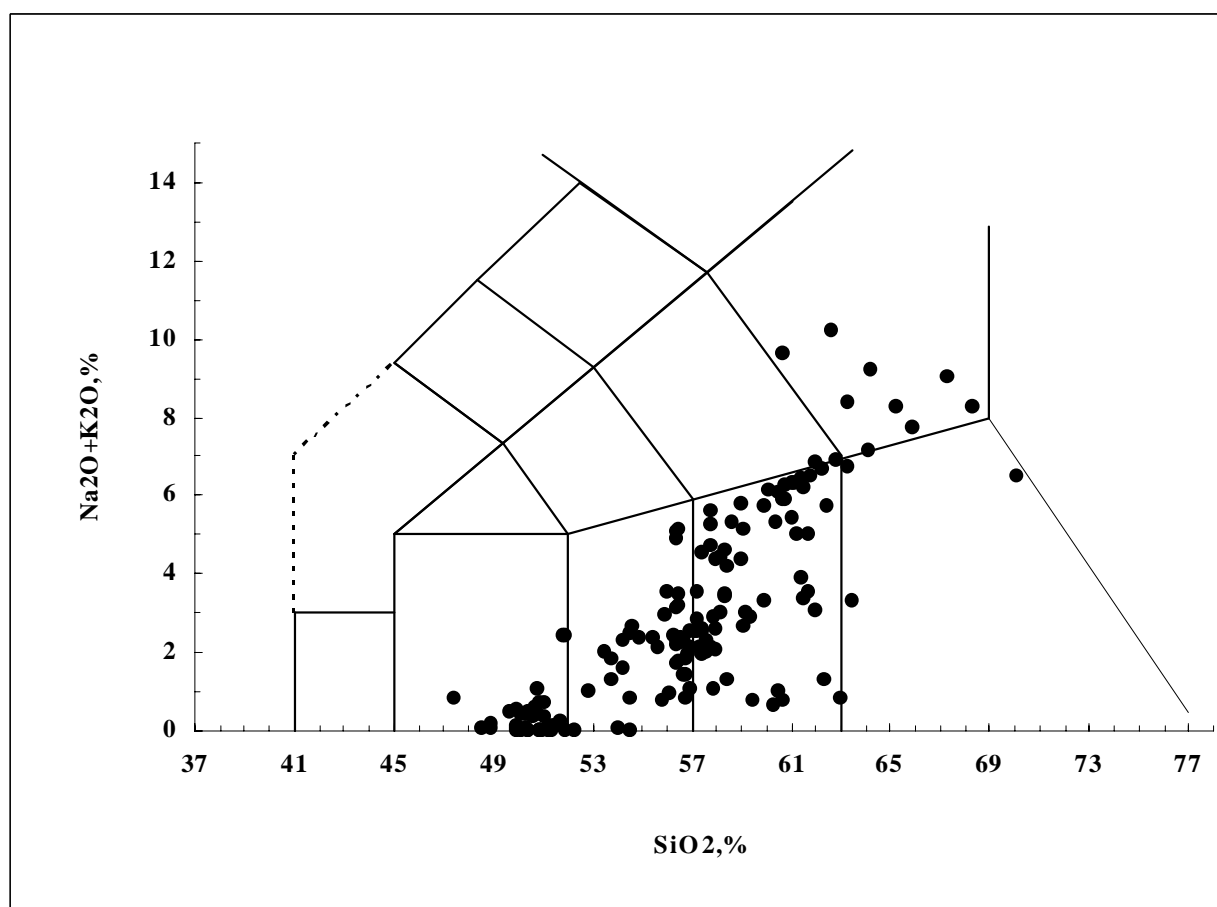


Рис. I.III.5.1 gl. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами ортопироксена, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

$$K_1 = Si_m - Mg_m - (Fe^{2+}_m + Fe^{3+}_m):4; K_2 = Na_m + K_m + Ti_m:2$$

$$K_2 = 0.37K_1 - 9.79(SROP1)$$

Диапазон значений K_2 0.1–14.5; K_1 24–63

Относительная ошибка 1600–11 %

$R = 0.9$; $N = 149$; $N_1 = 148$; сигма = 1.6; $\chi^2 = 0.95$ (12)

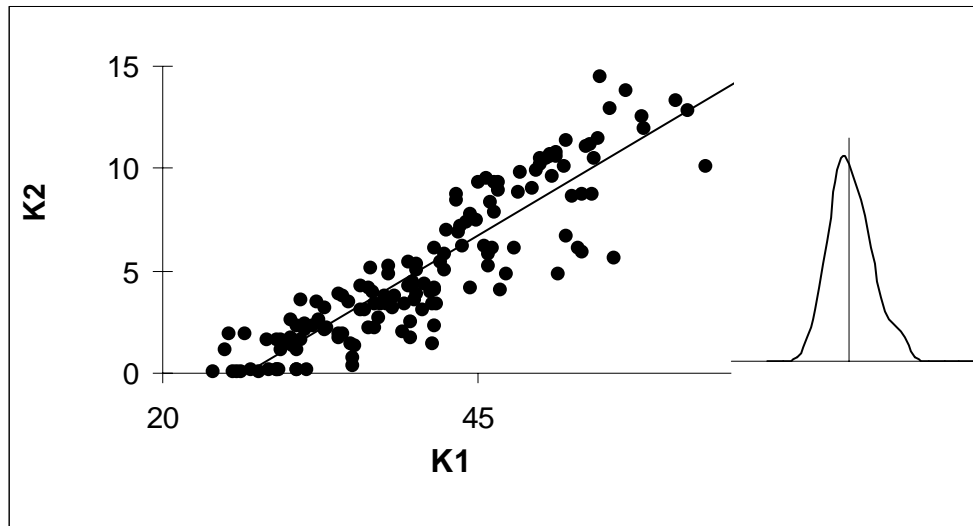


Рис. I.П.5.2 gl-орх (формула SROP1). Зависимость величины K_2 от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$T = 13.55Mg_m + 1052.5(SROP2)$$

Диапазон значений T 1050–1390 °C

Относительная ошибка 2.5–1.8 %

$R = 0.95$; $N = 153$; $N_1 = 152$; сигма = 22.5°C; $\chi^2 = 2.05$ (12)

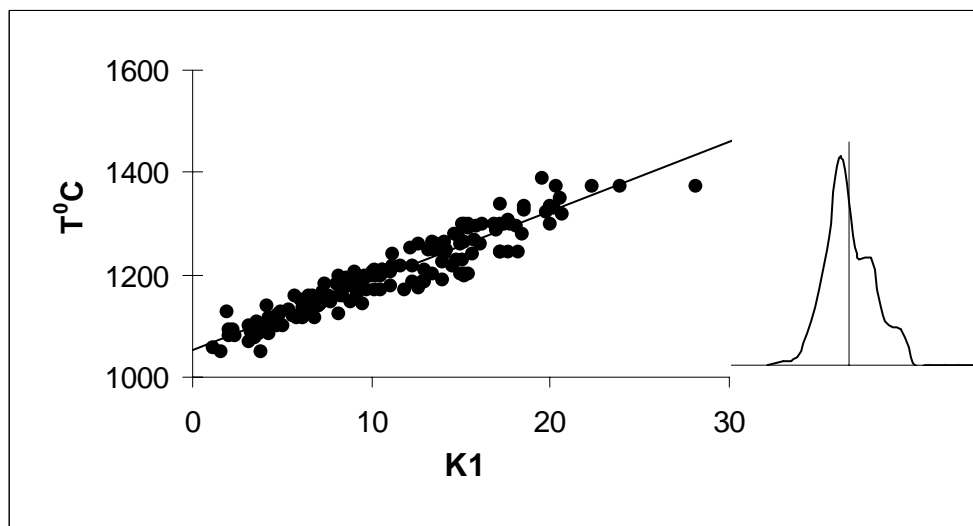


Рис. I.П.5.3 gl-орх (формула SROP2). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет значения температуры по формуле (SROLR2) расплава, равновесного с оливином, и вышеприведенной (SROP2) дает величину сигмы 1.2 °C.

$$\text{Mg} = (6.61\text{T}:100) - 68.5(\text{SROPR3})$$

Диапазон значений Mg 1.1–28.1 (атом. %)

Относительная ошибка 2.5–1.8 %

$R = 0.95$; $N = 153$; $N_1 = 152$; $\sigma = 1.8$; $\chi^2 = 3.12$ (12)

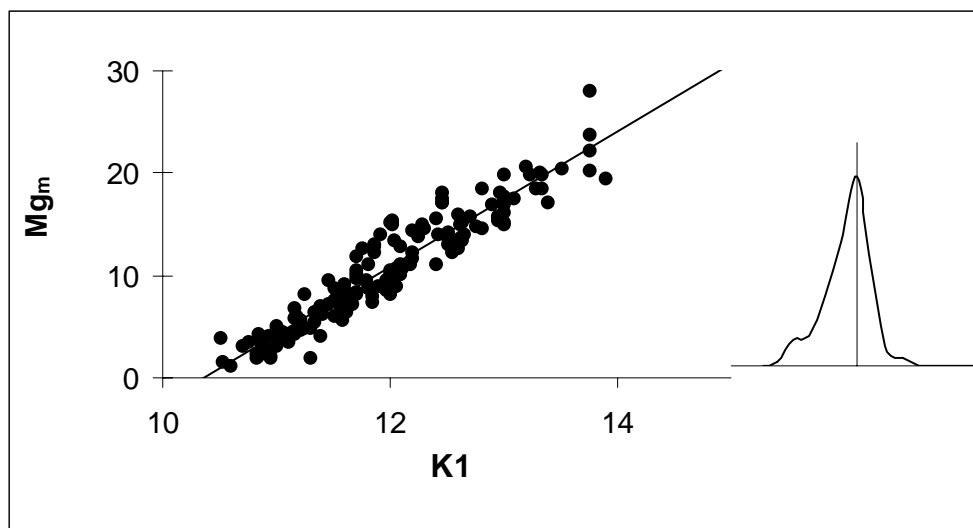


Рис. I.П.5.4 gl–орх (формула SROPR3). Зависимость содержаний Mg от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

3.6. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с клинопироксеном

Эта выборка представлена 528 точками.

Таблица I.Ш.6.1 gl. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с клинопироксеном.

<i>SRAVR</i>	стекло	T °C	1025–1350
SiO ₂	37.66–69.86	Si	35.9–67.3
TiO ₂	0.12–9.8	Ti	0.08–7.55
Al ₂ O ₃	3.9–25.66	Al	4.7–27.64
FeO	0.49–34.14	Fe	0.37–30.47
MnO	0.04–1.59	Mn	0.03–1.34
MgO	0.11–15.1	Mg	0.15–20.69
CaO	1.98–27.15	Ca	2.01–26.02
Na ₂ O	0.01–10.51	Na	0.02–17.39
K ₂ O	0.01–7.88	K	0.01–9.35
Cr ₂ O ₃	0.01–0.48	Cr	0.01–0.38

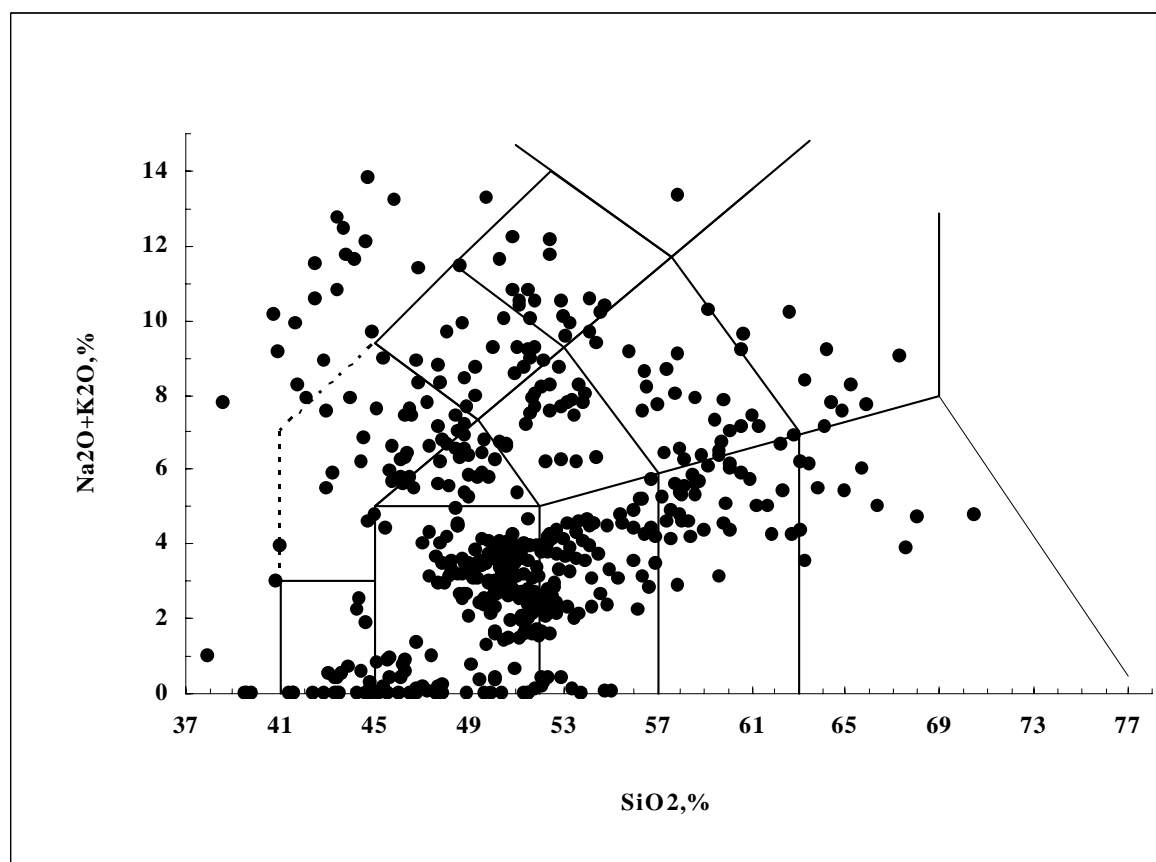


Рис. I.Ш.6.1 gl. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами клинопироксена по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

$$K_1 = T(\text{LnCa}_m):100; K_2 = \text{Si}_m - 1.7\text{Mg}_m + 0.4\text{Ti}_m + (\text{Na}_m + K_m):2$$

$$K_2 = -2K_1 + 92.1(\text{SRAVR1})$$

Диапазон значений K_2 13–70; K_1 11–40

Относительная ошибка 21–3.8 %

$R = -0.96$; $N = 528$; $N_1 = 524$; $\text{сигма} = 2.7$; $\chi^2 = 3.87$ (16)

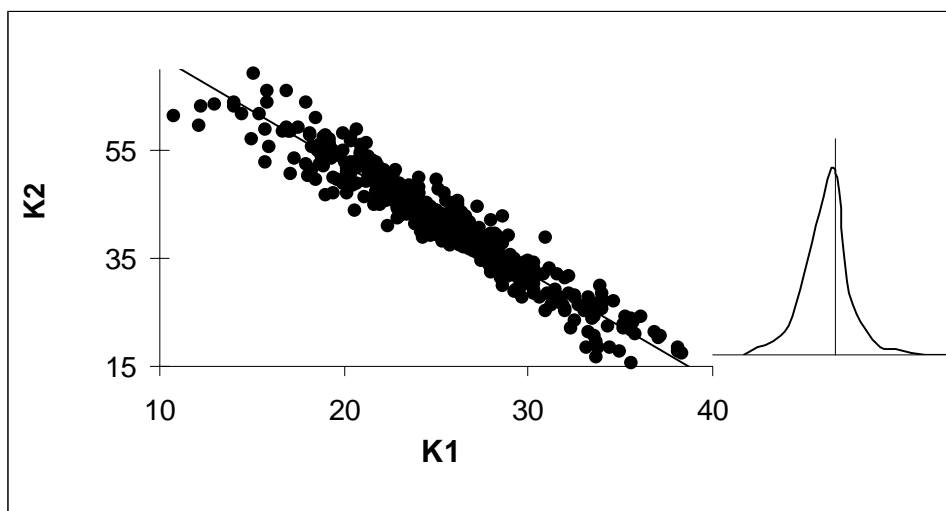


Рис. I.Ш.6.2 gl–срх (формула SRAVR1). Зависимость величины K_2 от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Al}_m - 750\text{Ca}_m:T; K_2 = \text{Fe}^{2+}_m + \text{Fe}^{3+}_m + \text{Mg}_m$$

$$K_2 = -1.23K_1 + 27.49(\text{SRAVR2})$$

Диапазон значений K_2 0.5–33; K_1 -5.2–22.7

Относительная ошибка 390–6 %

$R = -0.93$; $N = 528$; $N_1 = 516$; $\text{сигма} = 1.94$; $\chi^2 = 4.89$ (16)

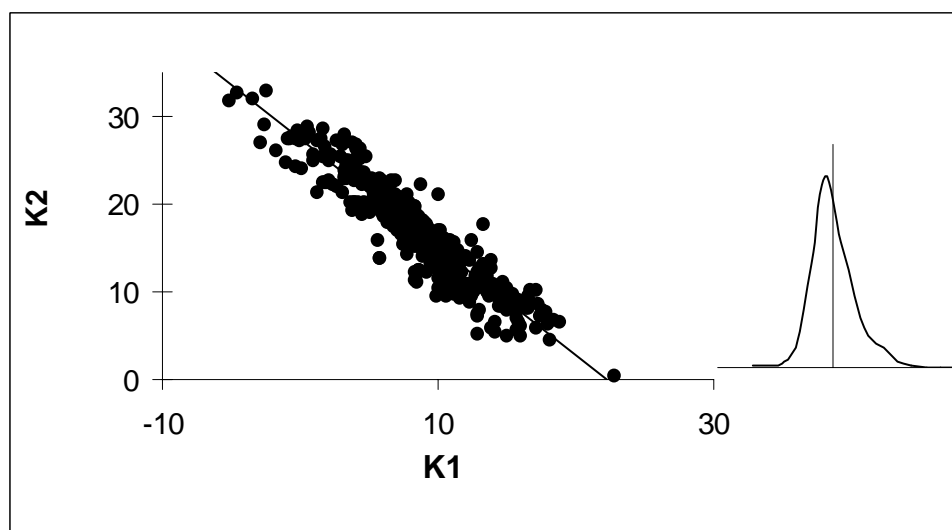


Рис. I.Ш.6.3 gl–срх (формула SRAVR2). Зависимость величины K_2 от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_m + Al_m:7 - Ti_m:4 + LnSi_m$$

$$T = 12.83K_1 + 971.9(SRAVR3)$$

Диапазон значений T 1025–1300 °C

Относительная ошибка 1.7–1%

R = 0.92; N = 528; N₁ = 523; сигма = 17.7 °C; $\chi^2 = 2.1$ (16)

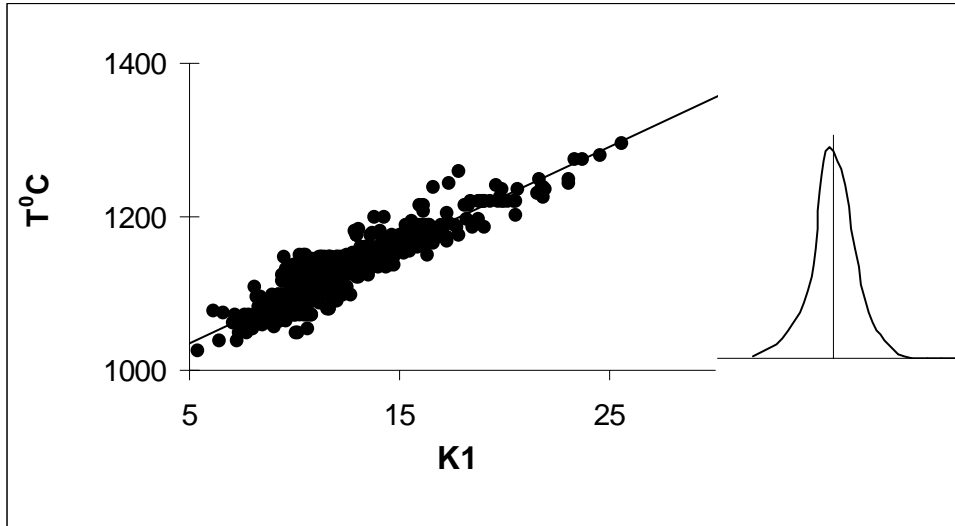


Рис. I.III.6.4 gl–срх (формула SRAVR3). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = T:50 - 2LnSi_m - Al_m:10$$

$$Mg_m = 2.87K_1 - 31.58(SRAVR4)$$

Диапазон значений Mg 0.15–21 (атом. %)

Относительная ошибка 820–6 %

R = 0.93; N = 528; N₁ = 523; сигма = 1.23; $\chi^2 = 1.61$ (16)

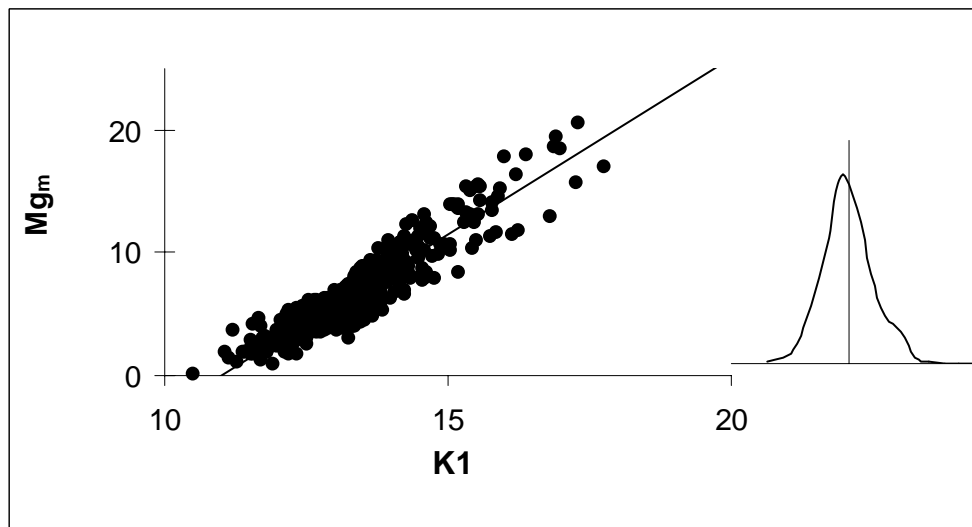


Рис. I.III.6.5 gl–срх (формула SRAVR4). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

3.7. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с плагиоклазом

Эта выборка представлена 777 точками.

Таблица I.Ш.7.1 гл. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с плагиоклазом.

<i>SRPLR</i>	Стекло	T °C	1026–1365
SiO ₂	37.66–76.41	Si	37.33–70.41
TiO ₂	0.22–8.93	Ti	0.15–6.82
Al ₂ O ₃	9.35–23.26	Al	10.92–25.66
FeO	0.39–28.15	Fe	0.3–23.38
MnO	0.03–0.83	Mn	0.02–0.7
MgO	0.19–11.61	Mg	0.26–15.67
CaO	0.9–20.51	Ca	0.89–21.78
Na ₂ O	0.03–9.62	Na	0.06–16.43
K ₂ O	0.01–7.88	K	0.01–9.35
Cr ₂ O ₃	0.01–0.43	Cr	0.01–0.32

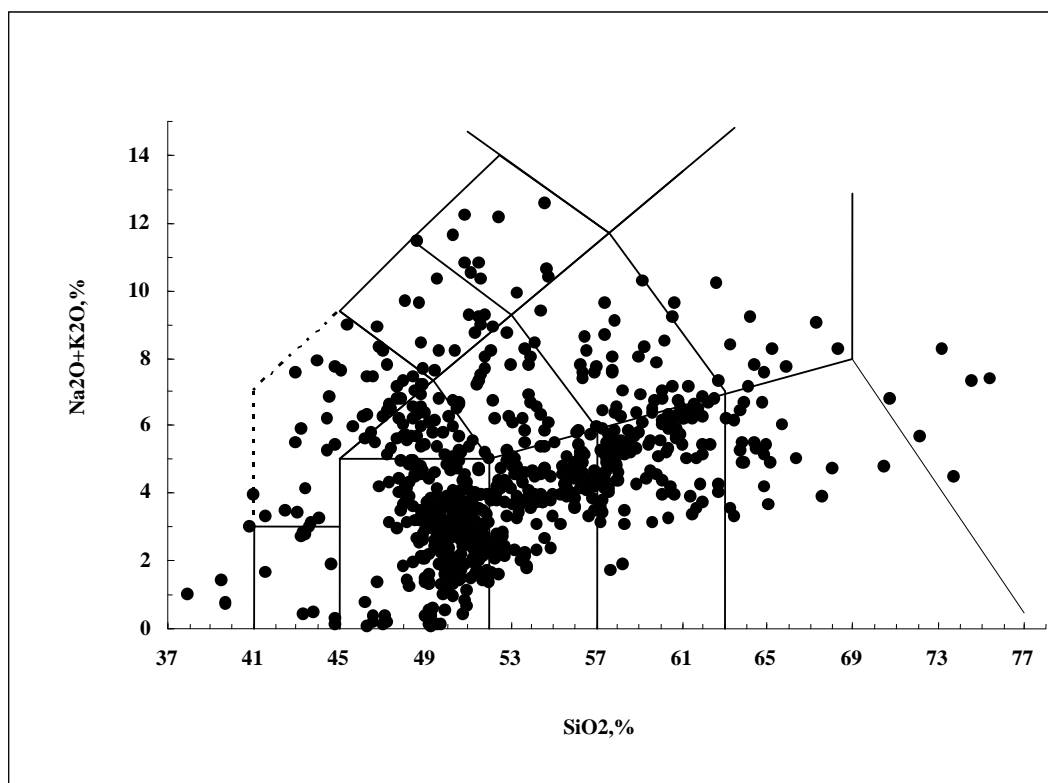


Рис. I.Ш.7.1 гл. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами плагиоклаза, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

$$K_1 = Si_m:6 + (K_m + Na_m):2 - 800Ca_m:T; K_2 = Mg_m + (Fe^{2+}_m + Fe^{3+}_m):2$$

$$K_2 = -0.86K_1 + 16.35(SRPLR1)$$

Диапазон значений K_2 1.2–18; K_1 -5–17.3

Относительная ошибка 82–5.4 %

$R = -0.95$; $N = 777$; $N_1 = 760$; сигма = 0.98; $\chi^2 = 5.46$ (16)

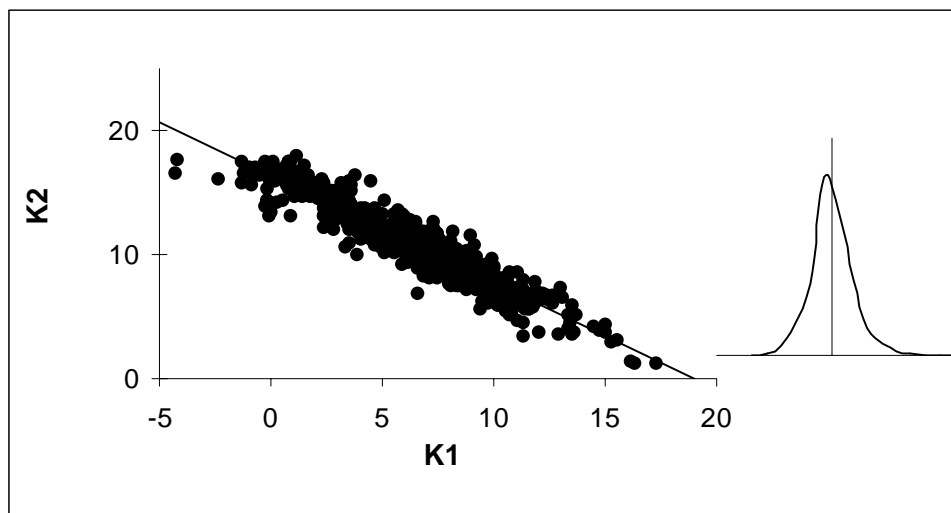


Рис. I.III.7.2 gl-pl (формула SRPLR1). Зависимость величины K_2 от состава расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_m:11 + Al_m + Mg_m - (K_m + Na_m):5$$

$$T = 10.22K_1 + 877(SRPLR2)$$

Диапазон значений T 1040–1300 °C

Относительная ошибка 1.8–1.4 %

$R = 0.91$; $N = 777$; $N_1 = 764$; сигма = 18.3 °C; $\chi^2 = 4.81$ (16)

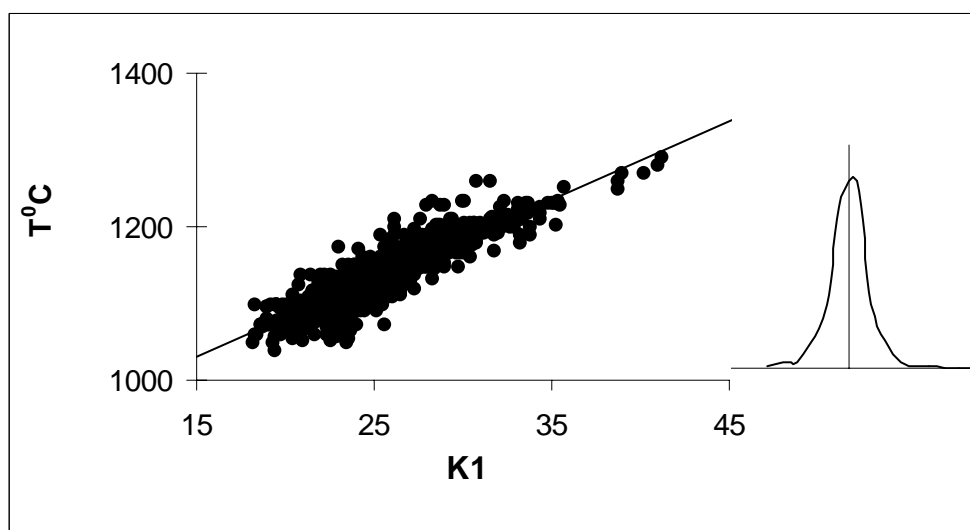


Рис. I.III.7.3 gl-pl (формула SRPLR2). Зависимость значения T от состава расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = 1000 [Ca_m + Ti_m + Al_m:2 + (K_m + Na_m):7]:T$$

$$Si_m = -2.2K_1 + 87.62(SRPLR3)$$

Диапазон значений Si 38.2–70.4 (атом. %)

Относительная ошибка 5.2–2.8 %

$R = -0.91$; $N = 777$; $N_1 = 766$; $\sigma = 2$; $\chi^2 = 2.65$ (16)

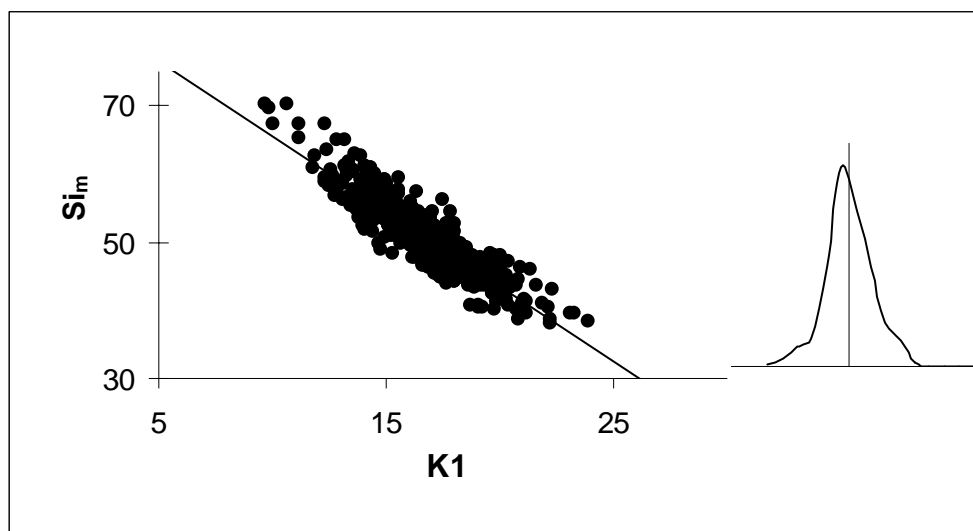


Рис. I.III.7.4 gl–pl (формула SRPLR3). Зависимость значений Si_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = T:10 - Si_m:10 + Ca_m:2 - (K_m + Na_m):2$$

$$Mg_m = 0.4K_1 - 37.32(SRPLR4)$$

Диапазон значений Mg 0.3–15.7 (атом. %)

Относительная ошибка 330–6.4 %

$R = 0.93$; $N = 777$; $N_1 = 766$; $\sigma = 1$; $\chi^2 = 2.27$ (16)

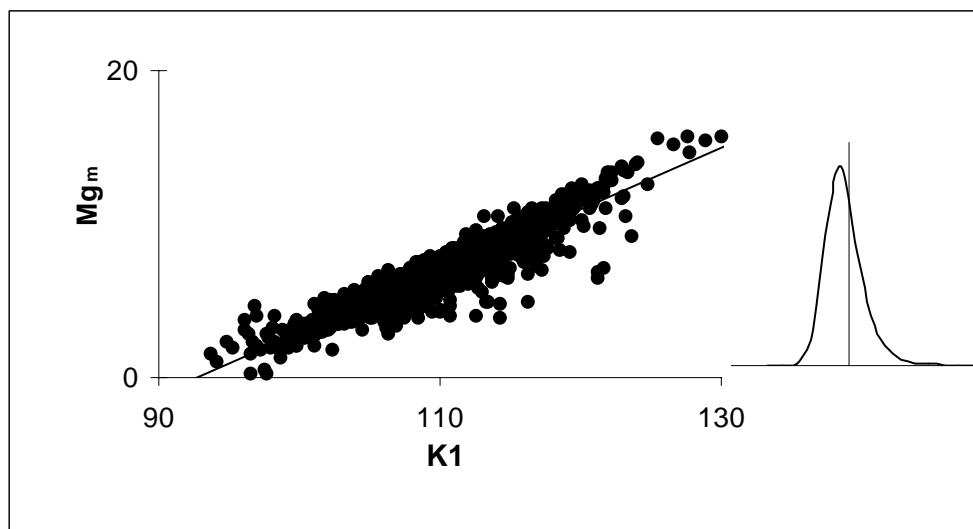


Рис. I.III.7.5 gl–pl (формула SRPLR4). Зависимость значений Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

3.8. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом шпинель–оливин

Эта выборка представлена 123 точками.

Таблица I.Ш.8.1 gl. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с парагенезисом шпинель–оливин.

<i>SRSOR</i>	Стекло	T °C	1111–1500
SiO ₂	35.2–52.35	Si	35.2–49.49
TiO ₂	0.4–15	Ti	0.26–11.32
Al ₂ O ₃	4.04–20.52	Al	4.7–21.8
FeO	6.41–23.92	Fe	4.85–19.99
MnO	0.04–0.85	Mn	0.03–0.71
MgO	2.74–25.6	Mg	3.68–33.2
CaO	7–15.38	Ca	6.52–15.95
Na ₂ O	0.05–6.38	Na	0.1–11.15
K ₂ O	0.07–6.2	K	0.08–7.23
Cr ₂ O ₃	0.01–0.99	Cr	0.01–0.74

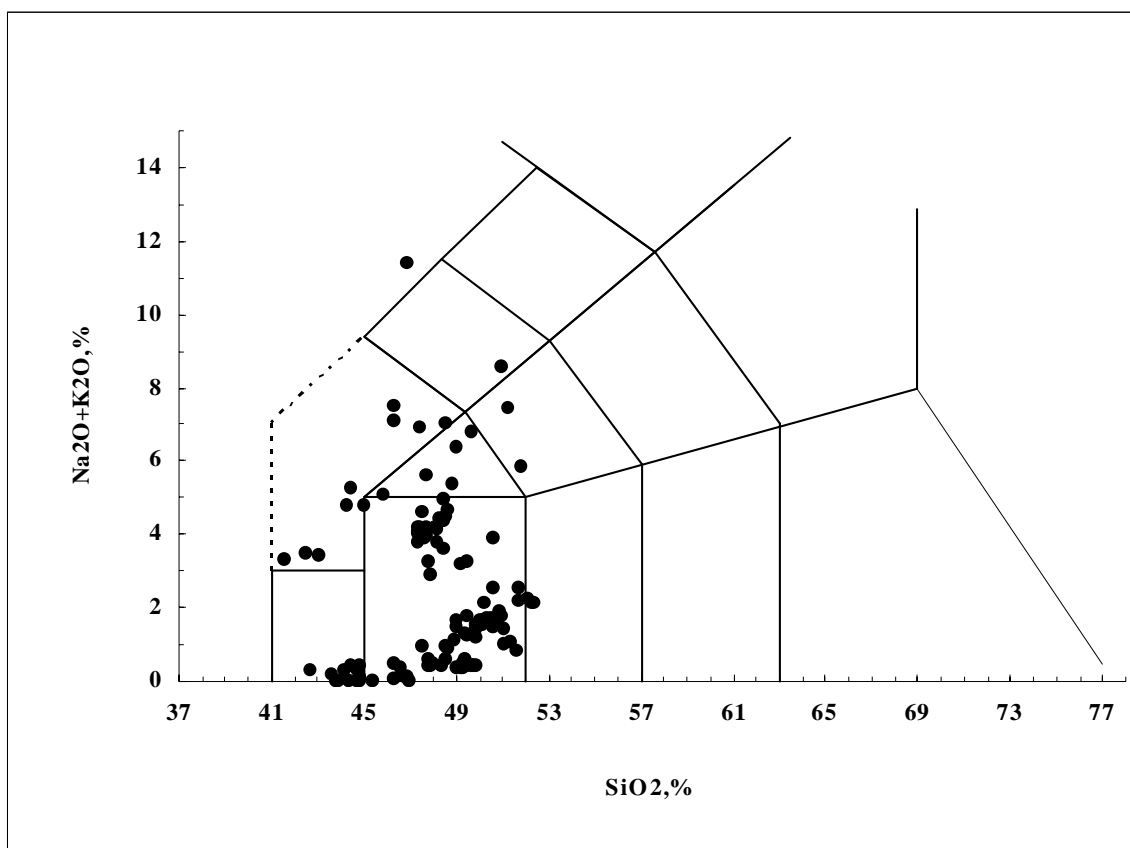


Рис. I.Ш.8.1 gl. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами шпинели и оливина по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

$$K_1 = TSi_m:900 + 0.7Al_m + (Fe^{2+}_m + Fe^{3+}_m):5 - Mg_m:6$$

$$Ti_m = -0.48K_1 + 36.17(\text{SRSOR1})$$

Диапазон значений Ti 0.26–11.3 (атом. %)

Относительная ошибка 311–7.2 %

$R = -0.92$; $N = 123$; $N_1 = 121$; $\sigma = 0.81$; $\chi^2 = 2.74$ (12)

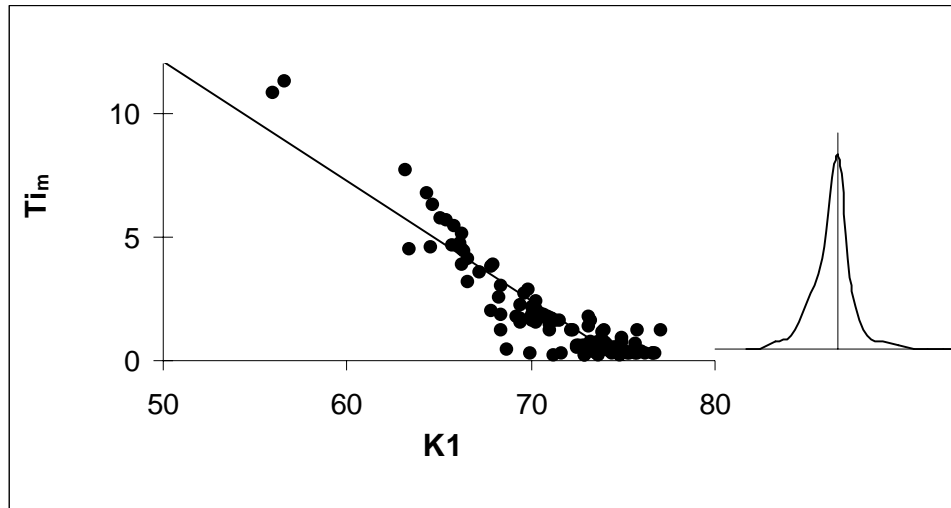


Рис. I.Ш.8.2 gl–sp–ol (формула **SRSOR1**). Зависимость значений Ti_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

3.9. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–ортопироксен

Эта выборка представлена 54 точками. В этом расплаве соотношение кремний–сумма щелочей имеет $R = 0.9$, что типично для боуэновского пути эволюции. Расчеты соотношений элементов не проводились из-за незначительного объема выборки.

3.10. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–клинопироксен

Эта выборка представлена 402 точками.

Таблица I.Ш.9.1 gl. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с парагенезисом оливин–клинопироксен (авгит).

<i>SROAR</i>	Стекло	T °C	1025–1260
SiO ₂	37.66–65.71	Si	37.33–60.85
TiO ₂	0.32–7.97	Ti	0.21–6.15
Al ₂ O ₃	4.48–21.58	Al	5.63–22.56
FeO	3.49–34.14	Fe	2.65–30.47
MnO	0.04–1.59	Mn	0.03–1.34
MgO	0.6–11.7	Mg	0.92–16.41
CaO	2.26–22.44	Ca	2.2–22.74
Na ₂ O	0.01–9.62	Na	0.02–16.43
K ₂ O	0.01–7.88	K	0.01–9.35
Cr ₂ O ₃	0.01–0.48	Cr	0.01–0.38

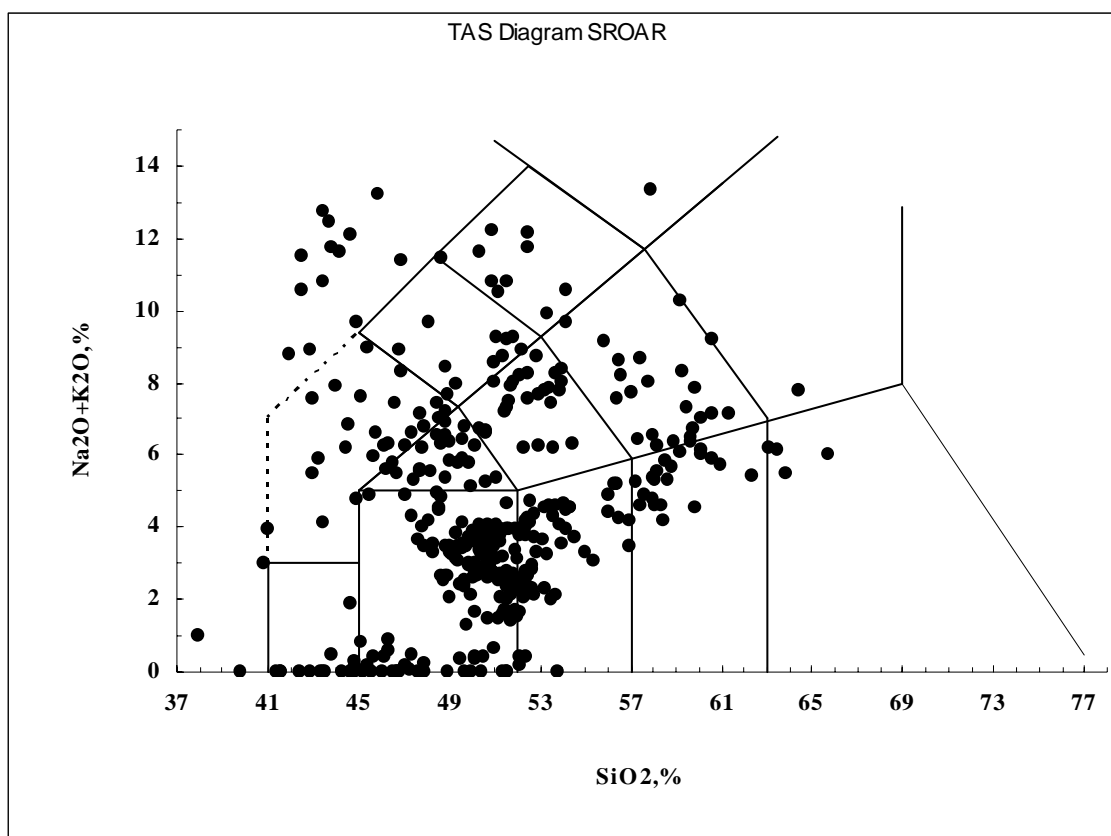


Рис. I.Ш.9.1 gl. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливина и клинопироксена, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

$$K_1 = Si_m:3 + 2000(K_m + Na_m):T - (Fe^{2+}_m + Fe^{3+}_m) + Ti_m:2; K_2 = Ca_m - 1700Al_m:T$$

$$K_2 = -0.51K_1 - 2.87 \text{ (SROAR1)}$$

Диапазон значений K_2 -29.2–5.7; K_1 -13.6–5.2

Относительная ошибка 7.2–36.8 %

$R = -0.94$; $N = 402$; $N_1 = 394$; $\sigma = 2.1$; $\chi^2 = 7.56$ (12)

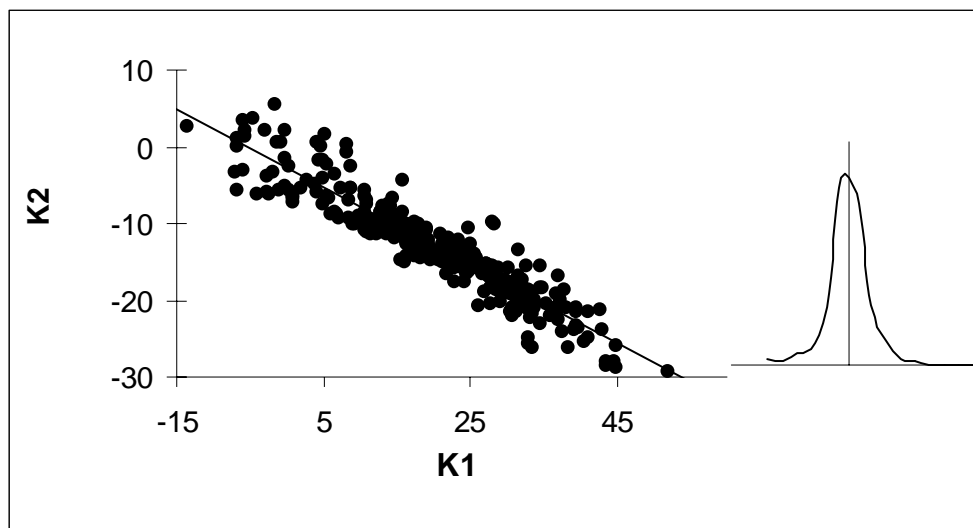


Рис. I.П.9.2 gl-ol-срх (формула SROAR1). Зависимость величины K_2 от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

3.11. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–плагиоклаз

Эта выборка представлена 546 точками.

Таблица I.Ш.10.1 гл. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с парагенезисом оливин–плагиоклаз.

<i>SRPOR</i>	стекло	T °C	1050–1280
SiO ₂	37.66–65.71	Si	37.33–60.85
TiO ₂	0.41–5.67	Ti	0.3–4.25
Al ₂ O ₃	9.36–23.39	Al	10.97–23.53
FeO	5.28–32.4	Fe	4.19–27.46
MnO	0.03–0.82	Mn	0.02–0.68
MgO	1.34–11.61	Mg	1.94–15.54
CaO	4.07–27.15	Ca	4.04–26.02
Na ₂ O	0.01–10.51	Na	0.02–17.39
K ₂ O	0.01–7.88	K	0.01–9.35
Cr ₂ O ₃	0.01–0.43	Cr	0.01–0.32

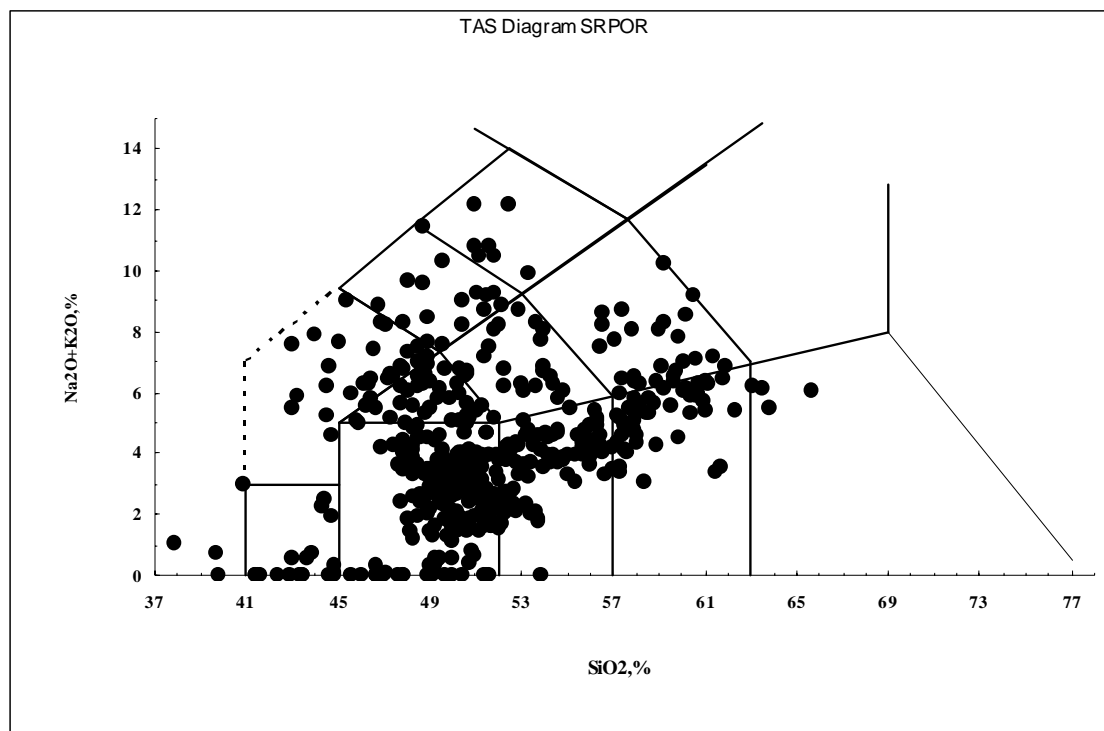


Рис. I.Ш.10.1 гл. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливина и плагиоклаза, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

$$K_1 = Si_m - Mg_m + 0,8(K_m + Na_m); K_2 = (LnCa_m)T:100$$

$$K_2 = -0.52K_1 + 50.19(SRPOR1)$$

Диапазон значений K_2 15.3–40.3; K_1 24–67

Относительная ошибка 7.3–2.8 %

$R = -0.96$; $N = 546$; $N_1 = 536$; $\sigma = 1.12$; $\chi^2 = 5.02$ (16)

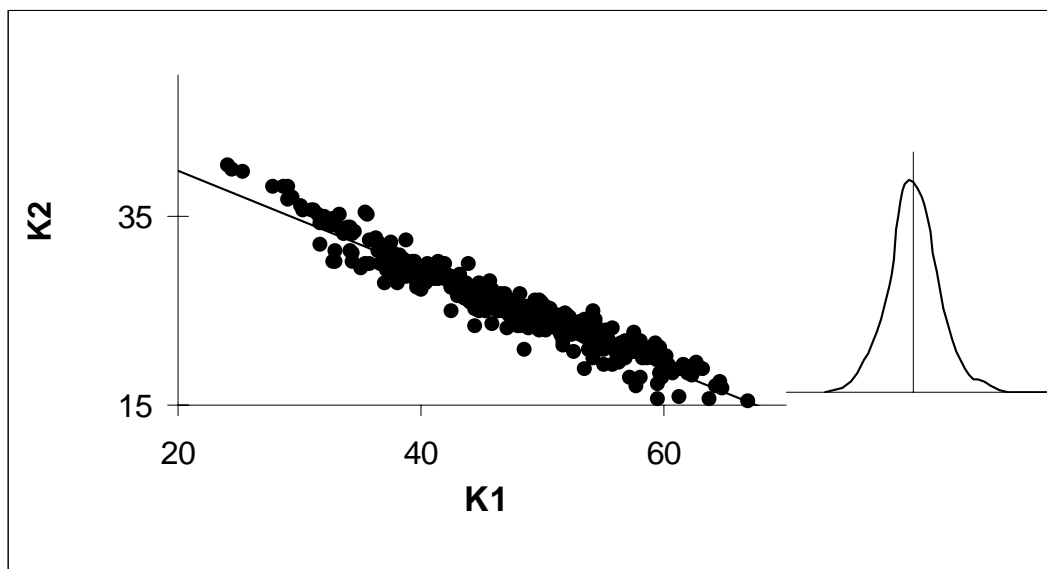


Рис. I.П.10.2 gl-ol-pl (формула SRPOR1). Зависимость величины K_2 от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

3.12. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом клинопироксен–плагиоклаз

Эта выборка представлена 399 точками.

Таблица I.Ш.11.1 гл. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с парагенезисом клинопироксен (авгит)–плагиоклаз.

SRAPR		Стекло	T °C	1026–1260
SiO ₂		37.66–69.86	Si	37.33–67.3
TiO ₂		0.41–5.6	Ti	0.3–4.09
Al ₂ O ₃		9.35–20.69	Al	10.92–21.48
FeO		4.24–28.15	Fe	3.31–23.38
MnO		0.04–0.82	Mn	0.03–0.68
MgO		0.78–9.96	Mg	1.1–13.96
CaO		1.98–22.44	Ca	2.01–22.74
Na ₂ O		0.53–9.62	Na	0.98–16.43
K ₂ O		0.02–7.88	K	0.02–9.35
Cr ₂ O ₃		0.01–0.12	Cr	0.01–0.09

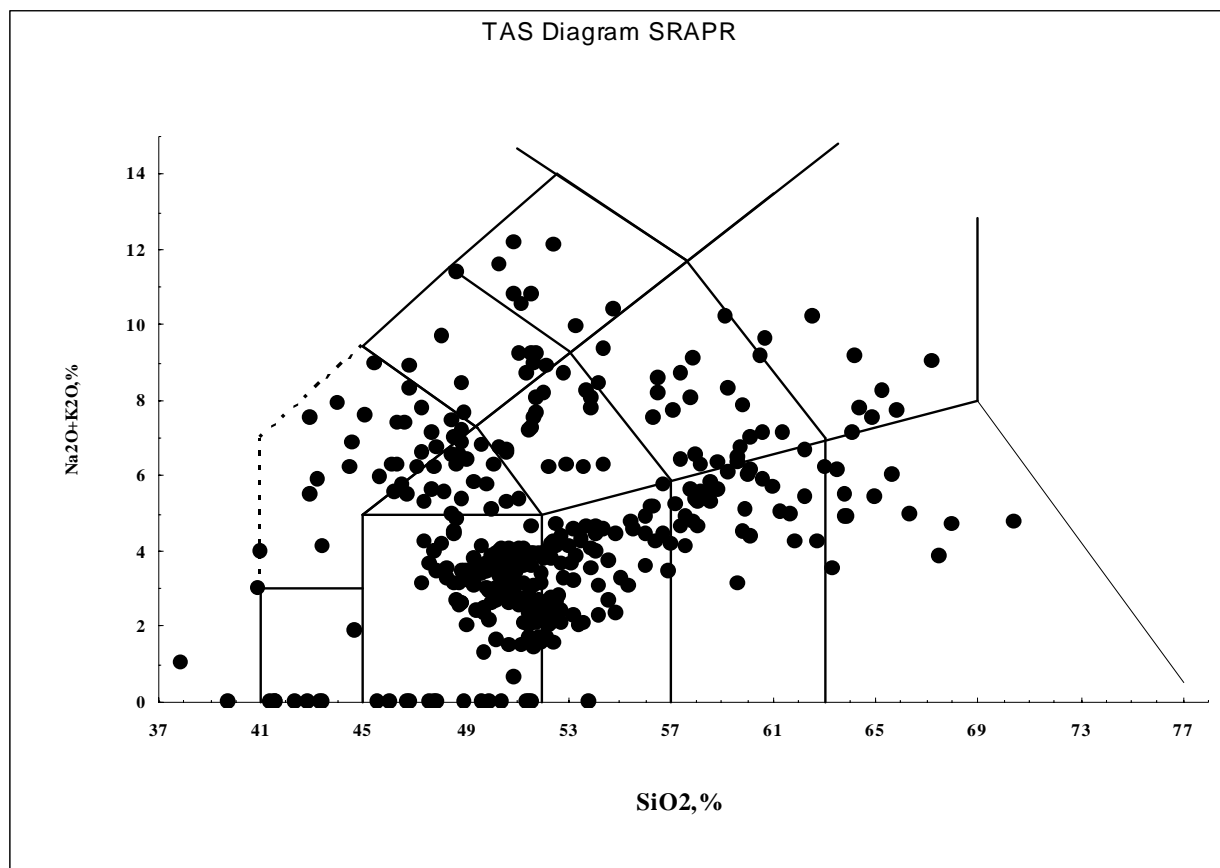


Рис. I.Ш.11.1 гл. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами клинопироксена и плагиоклаза, по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

$$K_1 = Si_m - Mg_m + (K_m + Na_m); K_2 = (LnCa_m)T:100$$

$$K_2 = -0.49K_1 + 49.63(SRAPR1)$$

Диапазон значений K_2 12.2–38; K_1 28–74

Относительная ошибка 8.2–2.6 %

$R = -0.97$; $N = 399$; $N_1 = 395$; сигма = 1; $\chi^2 = 1.34$ (12)

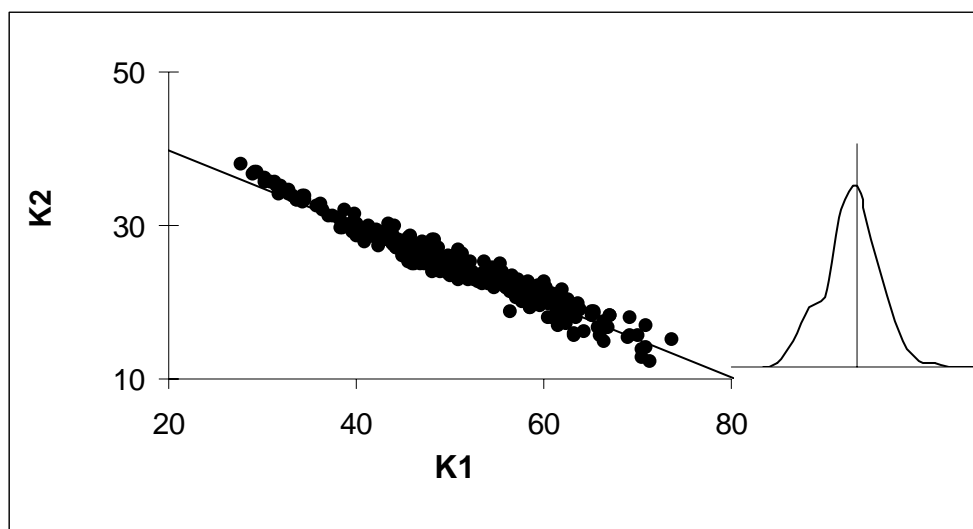


Рис. I.Ш.11.2 gl–срх–pl (формула SRAPR1). Зависимость величины K_2 от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Ln(Al_m T); K_2 = 600(Fe^{2+}_m + Fe^{3+}_m)T + Si_m:4 + Ti_m:3$$

$$K_2 = -12.74K_1 + 142.25(SRAPR2)$$

Диапазон значений K_2 14–24; K_1 9.4–10

Относительная ошибка 4.5–2.6 %

$R = -0.95$; $N = 399$; $N_1 = 394$; сигма = 0.63; $\chi^2 = 3.57$ (12)

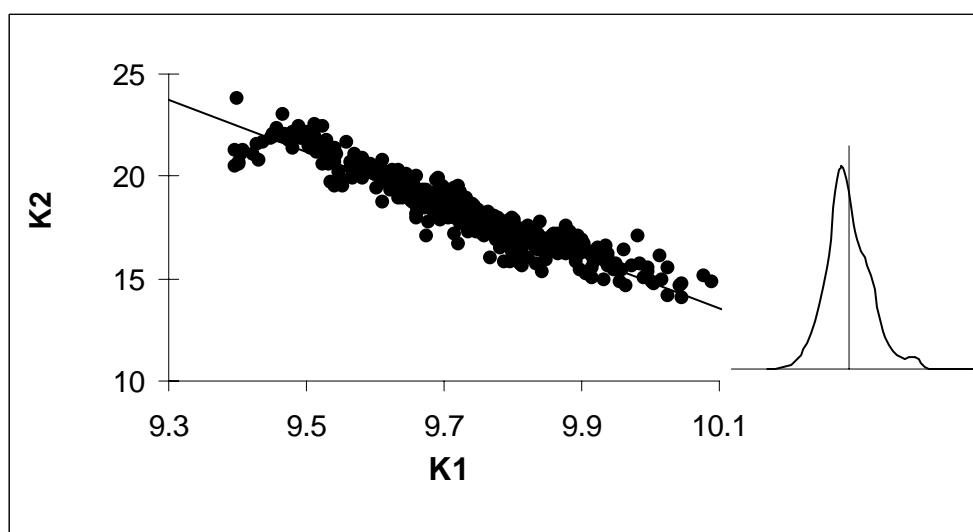


Рис. I.Ш.11.3 gl–срх–pl (формула SRAPR2). Зависимость величины K_2 от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

3.13. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–клинопироксен–плаггиоклаз

Эта выборка представлена 317 точками. Проверка этой выборки по формуле (SRAPR1, срх-рl) дала зависимость 0.97. Новых корреляций обнаружить не удалось.

* *Борисов А.А., Шапкин А.И.* Новое эмпирическое уравнение зависимости отношения $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ в природных расплавах от их состава, летучести кислорода и температуры // *Геохимия*. 1989. № 6. С. 892–897.

Список литературы

Перечень источников экспериментальных данных, выбранных из базы данных «ИНФО-РЕКС» с сохранением первичной нумерации и вида. Русскоязычные статьи в базе данных набраны латинским шрифтом и идут в порядке общей нумерации:

1. Stolper E. Experimental petrology of eucritic meteorites // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1977, V. 41, P. 587-611.
2. Grove T.L., Vaniman D.T. Experimental petrology of very low-Ti (VLT) basalts // In: "Mare Crisium: the view from Luna-24". Pergamon Press: 1978, P. 445-471.
3. Walker D., Kirkpatrick R.J., Longhi J., Hays J.F. Crystalization history of lunar picritic basalt sample 12002: phase equilibria and cooling-rate studies//*Geol.Soc.Amer.Bull.*, 1976, V. 87, N 5, P. 646-656.
4. Biggar G.M., O'Hara M.J., Peckett A., Humphries D.J. Lunar lavas and the achondrites: petrogenesis of protohypersthene basalts in the maria lava lakes // In: *Proc. Sec. Lunar Sci. Conf. The Mit Press*: 1971, V. 1, P. 617-643.
5. Donaldson C.H., Usselman T.M., Williams R.J., Lofgren G.E. Experimental modeling of the cooling history of Apollo 12 olivine basalts // In: *Proc. Lunar Sci. Conf. 6th. Pergamon Press*: 1975, V. 1, P. 843-869.
6. Walker D., Longhi J., Lasaga A.C., Stolper E.M., Grove T.L., Hays J.F. Slowly cooled microgabbros 15555 and 15065 // In: *Proc. Lunar Sci. Conf. 8th. Pergamon Press*: 1977, V. 2, P. 1521-1547.
7. Grove T.L., Bence A.E. Experimental study of pyroxene-liquid interaction in quartz-normative basalt 15597 // In: *Proc. Lunar. Sci. Conf. 8th. Pergamon Press*: 1977, V. 2, P. 1549-1579.
8. Akella J., Boyd F.R. Partitioning of Ti and Al between coexisting silicates, oxides and liquids // In: *Proc. Lunar Sci. Conf. 4th. Pergamon Press*: 1973, V. 1, P. 1049-1959.
9. Huebner J.S., Lipin B.R., Wiggins L.B. Partitioning of chromium between silicate crystals and melts. // In: *Proc. Lunar Sci. Conf. 7th. Pergamon Press*: 1976, V. 2, P. 1195-1220.
10. Grove T.L., Raudsepp M. Effect of kinetics on the crystallization of quartz normative basalt 15597: an experimental study // In: *Proc.Lunar Planet. Sci. Conf. 9th. Pergamon Press*: 1978, V. 1, P. 585-599.
11. Hess P.C., Rutherford M.J., Campbell H.W. Ilmenite crystallization in nonmare basalt: genesis of krep and high-Ti mare basalt // In: *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th. Pergamon Press*: 1978, V. 1, P. 705-724.
12. Rhodes J.M., Lofgren G.E., Smith D.P. One atmosphere melting experiments on ilmenite basalt 12008 // In: *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 10th. Pergamon Press*: 1979, V. 1, P. 407-422.
13. Grove T.L., Beatty D.W. Classification, experimental petrology and possible volcanic histories of the Apollo 11 high-k basalts // In: *Proc.Lunar Planet.Sci.Conf.11th. Pergamon Press*: 1980, V. 1, P. 149-177.

14. O'Hara M.J., Biggar G.M., Hill P.G., Jefferies B., Humphries D.J. Plagioclase saturation in lunar high titanium basalt // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1974, V. 21, N 3, P. 253-268.
15. Weill D.F., McKay G.A. The partitioning of Mg, Fe, Sr, Ce, Sm, Eu and Yb in lunar igneous systems and a possible origin of creep by equilibrium partial melting // In: *Proc. Lunar Sci. Conf. 6th.* Pergamon Press: 1975, V. 1, P. 1143-1158.
16. Biggar G. Chemistry of protopyroxene, orthopyroxene and pigeonite, crystallised from liquids to chondrule composition // *Bull. Miner.*, 1986, V. 109, P. 529-541.
17. Irving A.I., Merrill R.B., Singleton D.E. Experimental partitioning of rare earth elements and scandium among armalcolite, ilmenite, olivine and mare basalt liquid // In: *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th.* Pergamon Press: 1978, V. 1, P. 601-612.
18. Delano J.W. Chemistry and liquidus phase relations of Apollo 15 red glass: implications for the deep lunar interior // In: *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 11th.* Pergamon Press: 1980, V. 1, P. 251-288.
20. Longhi J., Pan V. A reconnaissance study of phase boundaries in low-alkali basaltic liquids // *J. Petrol.*, 1988, V. 29, Part 1, P. 115-147.
22. Akella J., Williams R.J., Mullins O. Solubility of Cr, Ti and Al in co-existing olivine, spinel and liquid at 1 atm // In: *Proc. Lunar. Sci. Conf. 7th.* Pergamon Press: 1976, V. 2, P. 1179-1194.
23. Longhi J., Walker D., Hays J.F. The distribution of Fe and Mg between olivine and lunar basaltic liquid // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1978, V. 42, N 10, P. 1545-1558.
24. Nielsen R.L., Davidson P.M., Grove T.L. Pyroxene-melt equilibria: an updated model // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1988, V. 100, N 3, P. 361-373.
25. Drake M.J. Plagioclase-melt equilibria // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1976, V. 40, N 5, P. 457-465.
26. Walker D., Shibata T., Delong S.E. Abyssal tholeiites from the Oceanographer Fracture Zone II. Phase equilibria and mixing // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1979, V. 70, N 2, P. 111-125.
27. Grove T.L., Gerlach D.C., Sando T.W. Origin of calc-alkaline series lavas at Medicine Lake volcano by fractionation, assimilation and mixing // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1982, V. 80, N 2, P. 160-182.
28. Grove T.L., Bryan W.B. Fractionation of pyroxene-phyric morb at low pressure: an experimental study // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1983, V. 84, N 4, P. 293-309.
29. Mahood G.A., Baker D.R. Experimental constraints on depths of fractionation of midly alkalic basalts and associated felsic rocks: Pantelleria, strait of Sicily // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1986, V. 93, N 2, P. 251-264.
30. Tormey D.R., Grove T.L., Bryan W.B. Experimental petrology of normal MORB near the Kane Fracture Zone: 22-25 N, Mid-Atlantic Ridge // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1987, V. 96, N 2, P. 121-139.

31. Sack R.O., Walker D., Carmichael I.S.E. Experimental petrology of alkalic lavas: constraints on cotectics of multiple saturation in natural basic liquids // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1987, V. 96, N 1, P. 1-23.
35. Takahashi E. Melting of a dry peridotite KLB-1 up to 14GPa: implications on the origin of peridotitic upper mantle // *J. Geophys. Res.*, 1986, V. 91B, N 9, P. 9367-9382.
41. Bender J.F., Hodges F.N., Bence A.E. Petrogenesis of basalts from the Project Famous Area: experimental study from 0 to 15 kbars // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1978, V. 41, N 3, P. 277-302.
48. Duncan R.A., Green D.H. The genesis of refractory melts in the formation of oceanic crust // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1987, V. 96, N 3, P. 326-342.
52. Gust D.A., Perfit M.R. Phase relations of a high-Mg basalt from the Aleutian island arc: implications for primary island arc basalts and high-Al basalts // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1987, V. 97, N 1, P. 7-18.
54. Baker D.R., Eggler D.H. Compositions of anhydrous and hydrous melts coexisting with plagioclase, augite, and olivine or low-Ca pyroxene from 1 atm to 8 kbar: application to the Aleutian volcanic centre of Atka // *Amer. Miner.*, 1987, V. 72, N 1/2, P. 12-28.
57. Spulber S.D., Rutherford M.J. The origin of rhyolite and plagiogranite in oceanic crust: an experimental study // *J. Petrol.*, 1983, V. 24, Part 1, P. 1-25.
61. Stolper E. Crystallization sequences of Ca-Al-rich inclusions from Allende: an experimental study // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1982, V. 46, N 11, P. 2159-2180.
63. Arndt N.T. Partitioning of nickel between olivine and ultrabasic and basic komatiite liquids // *Ann. Rept Dir. Geophys. Lab. 1976/1977*, Washington D.C., 1977, P. 553-557.
64. Roeder P.L. Activity of iron and olivine solubility in basaltic liquids // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1974, V. 23, N 3, P. 397-410.
65. Lukanin O.A., Kadik A.A., Biggar G.M., Fedotov S.A. Physical-chemical conditions of crystallization of 1975-1976 BTTI basalts // *Volcanology and Seismology*, 1980, N 3, P. 16-50 (in Russian).
67. Grove T.L., Juster T.C. Experimental investigations of low-Ca pyroxene stability and olivine-pyroxene-liquid equilibria at 1-atm in natural basaltic and andesitic liquids // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1989, V. 103, N 3, P. 287-305.
68. Gee L.L., Sack R.O. Experimental petrology of melilite nephelinites // *J. Petrol.*, 1988, V. 29, Part 6, P. 1233-1255.
69. Kinzler R.J., Grove T.L. Crystallization and differentiation of Archean komatiite lavas from north-east Ontario: phase equilibrium and kinetic studies // *Amer. Miner.*, 1985, V. 70, N 1/2, P. 40-51.
70. Ussler III W., Glazner A.F. Phase equilibria along a basalt-rhyolite mixing line: implications for the origin of calc-alkaline intermediate magmas // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1989, V. 101, N 2, P. 232-244.

71. Juster T.C., Grove T.L. Experimental constraints on the generation of the FeTi basalts, andesites, and rhyodacites at the Galapagos Spreading Center, 85 W and 95 W // *J. Geophys. Res.*, 1989, V. 94B, N 7, P. 9251-9274.
72. Biggar G.M. The composition of diopside solid solutions, and of liquids,
73. Barnes S.J. The distribution of chromium among orthopyroxene, spinel and silicate liquid at atmospheric pressure // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1986, V. 50, N 9, P. 1889-1909.
74. Fisk M.R. and Bence A.E. Experimental crystallization of chrome spinel in FAMOUS Basalt 527-1-1 // *Earth and Planet Sci. Lett.*, 1980, V. 48, N 1, P. 111-123.
75. Bartels K.S., Grove T.L. High-pressure experiments on magnesian eucrite compositions: constraints on magmatic processes in the eucrite parent body // In: *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 21th*, 1991, P. 351-365.
76. Murck B.W., Campbell I.H. The effects of temperature, oxygen fugacity and melt composition on the behaviour of chromium in basic and ultrabasic melts // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1986, V. 50, N 9, P. 1871-1887.
77. Longhi J., Pan V. The parent magmas of the SNC meteorites // In: *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 19th*. Cambridge Univ. Press: 1989, P. 451-464. *Planet. Sci. Conf. 19th*. Cambridge University Press: 1989, P. 451-464.
79. T. Sekine. Liquidus temperature of plagioclase and pyroxene in andesitic melts at one atmosphere // *Geochem. J.*, 1986, V. 20, N 6, P. 287-296.
80. Thy P. High and low pressure phase equilibria of a mildly alkalic lava from the 1965 Surtsey eruption: Experimental results // *Lithos*, 1991, V. 26, P. 223-243.
81. Thy P., Lofgren G.E., Imsland P. Melting relations and the evolution of the Jan Mayen magma system // *J. Petrol.*, 1991, V. 32, Part 2, P. 303-332.
82. Fram M.S., Longhi J. Phase equilibria of dikes associated with Proterozoic anorthosite complexes // *Amer. Miner.*, 1992, V. 77, N 5/6, P. 605-616.
83. Snyder D., Carmichael I.S.E., Wiebe R.A. Experimental study of liquid evolution in an Fe-rich, layered mafic intrusion: Constraints of Fe-Ti oxide precipitation on the T-f_{O2} and T-p paths of tholeiitic magmas // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1992, V. 113, N 1, P. 73-86.
84. Grove T.L., Kinzler R.J., Bryan W.B. Fractionation of mid-ocean ridge basalt. In *RIDGE Summer Institute Volume*, AGU Special Publication (in press).
86. Draper D.S., Johnston A.D. Experimental generation of arc-like high-alumina basalt from anhydrous, primitive olivine tholeiite: An experimental study from 1 atm to 20 kbar // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1992, V. 112, N 4, P. 501-519.
87. Meen J.K. Elevation of potassium content of basaltic magmas by fractional crystallization: the effect of pressure // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1990, V. 104, N 3, p. 309-331.

88. Meen J.K. Formation of shoshonites from calcalkaline basalt magmas: geochemical and experimental constraints from the type locality // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1987, V. 97, N 3, P. 333-351.
90. Shi P., Libourel G. The effect of FeO on the system CMAS at low pressure and implications for basalt crystallization processes // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1991, V. 108, N 1/2, P. 129-145.
91. Bartels K.S., Kinzler R.J., Grove T.L. High pressure phase relations of primitive high-alumina basalts from Medicine Lake volcano, northern California // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1991, V. 108, N 3, P. 253-270.
92. Grove T.L., Kinzler R.J., Bryan W.B. 2. Natural and experimental phase relations of lavas from Serocki volcano // *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 1990, V. 106/109, P. 9-17.
93. Roeder P.L., Reynolds I. Crystallization of chromite and chromium solubility in basaltic melts // *J. Petrol.*, 1991, V. 32, Part 5, P. 909-934.
94. Ryerson F.J., Weed H.C., Piwinski A.J. Pheology of subliquidus magmas 1. Picritic compositions // *J. Geophys. Res.*, 1988, V. 93B, N 4, P. 3421-3436.
96. Thy P., Lofgren G.E. Experimental constraints on the low-pressure evolution of transitional and mildly alkalic basalts: multisaturated liquids and coexisting augites // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1992, V. 112, N 2/3, P. 196-202.
97. Forsythe L.M., Fisk M.R. Comparison of experimentally crystallized and natural spinels from leg 135 // In: *Proc. ODP Sci. Results. Leg 135: College Station, TX* (submitted 1992).
98. Gaetani G.A., Grove T.L., Bryan W.B. Experimental phase relations of basaltic andesite from hole 839B under hydrous and anhydrous conditions // In: *Proc. ODP Sci. Results*, 1994, V. 135, P. 557-563.
99. Walker D., Jurewicz S., Watson E.B. Adcumulus dunite growth in a laboratory thermal gradient // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1988, V. 99, N 3, P. 306-319.
100. Kilinc A., Mehmet Z.C. Experimental study of low pressure mineral-melt equilibria in alkaline lavas (unpublished data, 1989).
101. Fisk M.R., Schilling J.-G., Sigurdsson H. An experimental investigation of Iceland and Reykjanes ridge tholeiites: 1. phase relations // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1980, V. 74, N ??, P. 361-374 (+ unpublished data).
102. Nielsen R.L. Experimental study of high temperature plagioclase-melt equilibria in high magnesium tholeiitic system (unpublished data, 1992).
104. Houghton D.R., Roeder P.L., Scinner B.J. Solubility of sulfur in mafic magmas // *Econ. Geol.*, 1974, V. 69, N 4, P. 451-467.
105. Shima H., Naldrett A.J. Solubility of sulfur in an ultramafic melt the relevance of the system Fe-S-O // *Econ. Geol.*, 1975, V. 70, N ??, P. 960-967.

106. Buchanan D.L., Nolan J. Solubility of sulfur and sulfide immiscibility in synthetic tholeiitic melts and their relevance to Bushveld-complex rocks // *Can. Mineral.*, 1979, V. 17, N ??, P. 483-494.
107. Buchanan D.L., Nolan J., Wilkinson N., de Villiers J.P.R. An experimental investigation of sulfur solubility as a function of temperature in synthetic silicate melts // *Geol. Soc. S. Afr., Spec. Publ.*, 1983, V. 7, N ??, P. 383-391.
126. Umino S., Kushiro I. Experimental studies on boninite petrogenesis // *Boninites* (ed. A.J. Crawford), London, Unwin Hyman, 1989, P. 89-111.
131. Longhi J., Wooden J.L., Coppinger K.D. The petrology of High-Mg dikes from the Beartooth Mountains, Montana: a search for the parent magma of the Stillwater Complex // *J. Geophys. Res.*, 1983, V. B88 (Supplement), P. 53-69. + unpublished data.
132. Baker D.R., Eggler D.H. Fractionation paths of Atka (Aleutians) high--alumina basalts: constraints from phase relations // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1983, V. 18, P. 387-404.
133. Helz R.T. Phase relations of basalts in their melting ranges at $P_{H_2O} = 5$ kb as a function of oxygen fugacity. Part I. Mafic phases // *J. Petrol.*, 1973, V. 14, Part 2, P. 249-302.+ Part II. Melt compositions // *J. Petrol.*, 1976, V. 17, Part 2, P. 139-193.
147. Fudali R.F. Oxygen fugacities of basaltic and andesitic magma // *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1965, V. 29, N 9, P. 1063-1075.
148. Shibata K. The Oxygen Partial Pressure of the Magma from Mihara Volcano, O-sima, Japan // *Bull. Chem. Soc. Japan*, 1967, V. 40, N 4, P. 830-834.
149. Thornber C.R., Roeder P.L., Foster J.R. The effect of composition on the ferric-ferrous ratio in basaltic liquids at atmospheric pressure // *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1980, V. 44, N 3, P. 525-532.
150. Sack R.O., Carmichael I.S.E., Rivers M., Ghiorso M.S. Ferric-Ferrous Equilibria in Natural Silicate Liquids at 1 Bar // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1980, V. 75, N 4, P. 369-376.
151. Kilinc A., Carmichael I.S.E., Rivers M.L., Sack R.O. The Ferric-Ferrous Ratio of Natural Silicate Liquids Equilibrated in Air // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1983, V. 83, N 1/2, P. 136-140.
152. Kress V.C., Carmichael I.S.E. Stoichiometry of the iron oxidation reaction in silicate melts // *Amer. Miner.*, 1988, V. 73, N 11/12, P. 1267-1274.
153. Kress V.C., Carmichael I.S.E. The compressibility of silicate liquids containing Fe_2O_3 and the effect of composition, temperature, oxygen fugacity and pressure on their redox states // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1991, V. 108, N 1/2, P. 82-92.
163. Stolper E., McSween Jr. H.Y. Petrology and origin of the shergottite meteorites // *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1979, V. 43, N ?, P. 1475-1498.
164. Jurewicz A.J.G., Mittlefehldt D.W., Jones J.H. Partial melting of the Allende (CV3) meteorite: Implications for origins of basaltic meteorites // *Science*, 1991, V. 252, P. 695-698.

165. Jurewicz A.J.G., Mittlefehldt D.W., Jones J.H. Experimental partial melting of the Allende (CV) and Murchison (CM) chondrites and the origin of asteroidal basalts // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, V. 57, N 9, P. 2123-2139.
166. Jurewicz A.J.G., Mittlefehldt D.W., Jones J.H. Experimental partial melting of the St. Severin (LL) and Lost City (H) chondrites // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, V. 59, N 2, P. 391-408.
167. Walker D., Grove T. Ureilite smelting // *Meteoritics*, 1993, V. 28, N5, P. 629-636.
169. Kennedy A.K., Grove T.L., Johnson R.W. Experimental and major element constraints on the evolution of lavas from Lihir Island, Papua New Guinea // *Contrib. Mineral. and Petrol.*, 1990, V. 104, N 6, P. 722-734.
171. Pan V., Longhi J. The system Mg_2SiO_4 - Ca_2SiO_4 - $CaAl_2O_4$ - $NaAlSiO_4$ - SiO_2 : one atmosphere liquidus equilibria of analogs of alkaline mafic lavas // *Contrib. Miner. and Petrol.*, 1990, V. 105, P. 569-584.
172. Soulard H., Provost A., Boivin P. CaO-MgO- Al_2O_3 - SiO_2 - Na_2O (CMASN) at the ferric-ferrous ratio in basaltic liquids at atmospheric pressure // *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1980, V. 44, N 3, P. 525-532.
150. Sack R.O., Carmichael I.S.E., Rivers M., Ghiorso M.S. Ferric-Ferrous Equilibria in Natural Silicate Liquids at 1 Bar // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1980, V. 75, N 4, P. 369-376.
151. Kilinc A., Carmichael I.S.E., Rivers M.L., Sack R.O. The Ferric-Ferrous Ratio of Natural Silicate Liquids Equilibrated in Air // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1983, V. 83, N 1/2, P. 136-140.
152. Kress V.C., Carmichael I.S.E. Stoichiometry of the iron oxidation reaction in silicate melts // *Amer. Miner.*, 1988, V. 73, N 11/12, P. 1267-1274.
153. Kress V.C., Carmichael I.S.E. The compressibility of silicate liquids containing Fe_2O_3 and the effect of composition, temperature, oxygen fugacity and pressure on their redox states // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1991, V. 108, N 1/2, P. 82-92.
163. Stolper E., McSween Jr. H.Y. Petrology and origin of the shergottite meteorites // *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1979, V. 43, N ?, P.1475-1498.
164. Jurewicz A.J.G., Mittlefehldt D.W., Jones J.H. Partial melting of the Allende (CV3) meteorite: Implications for origins of basaltic meteorites // *Science*, 1991, V. 252, P. 695-698.
165. Jurewicz A.J.G., Mittlefehldt D.W., Jones J.H. Experimental partial melting of the Allende (CV) and Murchison (CM) chondrites and the origin of asteroidal basalts // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, V. 57, N 9, P. 2123-2139.
166. Jurewicz A.J.G., Mittlefehldt D.W., Jones J.H. Experimental partial melting of the St. Severin (LL) and Lost City (H) chondrites // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, V. 59, N 2, P. 391-408.
167. Walker D., Grove T. Ureilite smelting // *Meteoritics*, 1993, V. 28, N5, P. 629-636.

169. Kennedy A.K., Grove T.L., Johnson R.W. Experimental and major element constraints on the evolution of lavas from Lihir Island, Papua New Guinea // *Contrib. Mineral. and Petrol.*, 1990, V. 104, N 6, P. 722-734.
171. Pan V., Longhi J. The system Mg_2SiO_4 - Ca_2SiO_4 - $CaAl_2O_4$ - $NaAlSiO_4$ - SiO_2 : one atmosphere liquidus equilibria of analogs of alkaline mafic lavas // *Contrib. Mineral. and Petrol.*, 1990, V. 105, P. 569-584.
172. Soulard H., Provost A., Boivin P. CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - Na_2O (CMASN) at 1 bar from low to high Na_2O contents: Topology of an analogue for alkaline basic rocks // *Chemical Geology*, 1992, V. 96, P. 459-477.
173. Shi P. Low-pressure phase relationships in the system Na_2O - CaO - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 at 1100°C, with implications for the differentiation of basaltic magmas // *J. Petrol.*, 1993, V. 4, N 4, P. 743-762.
174. Thy P., Lofgren G.E. Experimental constraints on the low-pressure evolution of transitional and mildly alkalic basalts: the effect of Fe-Ti oxide minerals and the origin of basaltic andesites // *Contrib. Mineral. and Petrol.*, 1994, V. 116, N 3, P. 340-351.
176. Toplis M.J., Libourel G., Carroll M.R. The role of phosphorus in crystallization processes of basalt: an experimental study // *Geochem. Cosmochim. Acta*, 1994, V. 58, N 2, P. 797-810.
177. Auwera J.V., Longhi J. Experimental study of a jotunite (hypersthene monzodiorite): constraints on the parent magma composition and crystallization conditions (P, T, f_{O_2}) of the Bjerkreim-Sokndal layered intrusion (Norway) // *Contrib. Mineral. and Petrol.*, 1994, V. 118, N 1, P. 60-78.
178. Baker M.B., Grove T.L., Price R. Primitive basalts and andesites from the Mt. Shasta region, N. California: products of varying melt fraction and water content // *Contrib. Mineral. and Petrol.*, 1994, V. 118, N 2, P. 111-129.
179. Nielsen R.L., Forsythe L.M., Gallahan W.E., Fisk M.R. Major- and trace-element magnetite-melt equilibria // *Chemical Geology*, 1994, V. 117, P. 167-191.
189. Sack R.O., Carmichael I.S.E. $Fe^{2+} = Mg^{2+}$ and $TiAl_2 = MgSi_2$ exchange reactions between clinopyroxenes and silicate melt // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1984, V. 85, N ??, P. 103-115.
190. Sack R.O., Ghiorso M.S. Thermodynamics of multicomponent pyroxenes: III. Calibration of $Fe^{2+}(Mg)$ -1, $TiAl_2(MgSi_2)$ -1, $TiFe_3+(MgSi_2)$ -1, ... and $Ca(Mg)_2$ -1 exchange reactions between pyroxenes and silicate melts // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1994, V.118, N 3, P. 271-296.
192. Moore G., Righter K., Carmichael I.S.E. The effect of dissolved water on the oxidation state of iron in natural silicate liquids // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1995, V. 120, N 1, P. 170-179.
193. Toplis M.J., Carroll M.R. An experimental study of the influence of oxygen fugacity on Fe-Ti oxide stability, phase relations, and mineral-melt equilibria in ferro-basaltic systems // *J. Petrol.*, 1995, V. 36, N 5, P. 1137-1170.
194. Thy P. Low-pressure experimental constraints on the evolution of komatiites // *J. Petrol.*, 1995, V. 36, N 6, P. 1529-1548.

197. Thy P. Experimental constraints on the evolution of transitional and mildly alkalic basalts: crystallization of spinel // *Lithos*, 1995, V. 36, N , P. 103-114.
198. Klingenberg B.M.E.T., Kushiro I. Melting of a chromite-bearing harzburgite and generation of boninitic melts at low pressures under controlled oxygen fugacity // *Lithos*, 1996, V. 37, N , P. 1-13.
199. Toplis M.J., Dingwell D.B., Libourel G. The effect of phosphorus on the iron redox ratio, viscosity, and density of an evolved ferro-basalt // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1994, V.117, N , P. 293-304.
201. Kadik A.A., Maksimov A.P. Ivanov B.V. Physical-chemical conditions of crystallization and the genesis of andesites (an example of the Klyuchevskoy group volcanoes) // Moscow, Nauka publ., 1986. V. 158 P. (in Russian).
203. Hoover J.D. The chilled marginal gabbro and other contact rocks of the Scaergaard intrusion // *J. Petrol.*, 1989, V. 30, N 2, P. 441-476.
205. Righter K., Carmichael I.S.E. Phase equilibria of phlogopite lamprophyres from western Mexico: biotite-liquid equilibria and P-T estimates for biotite-bearing igneous rocks // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1996, V. 123, N 1, P. 1-21.
206. Merzbacher C., Egger D.H. A magmatic geohygrometer: Application to Mount St.Helens and other dacitic magmas // *Geology*, 1984. V. 12. N 10. P. 587-590.
235. Cawthorn R.G. Re-evaluation of magma compositions and processes in the uppermost Critical Zone of the Bushveld Complex // *Mineral. Magazine*, 1996, V. 60, N ??, P. 131-148.
236. Yang H.-J., Kinzler R.J., Grove T.L. Experiments and models of anhydrous, basaltic olivine-plagioclase-augite saturated melts from 0.001 to 10 kbar // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1996, V. 124, N 1, P. 1-18.
255. Dunn T., Sen C. Mineral/matrix partition coefficients for orthopyroxene, plagioclase, and olivine in basaltic to andesitic systems: a combined analytical and experimental study // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1994, V. 58, N 2, P. 717-733.
257. Moore G., Carmichael I.S.E. The hydrous phase equilibria (to 3 kbar) of an andesite and basaltic andesite from western Mexico: constraints on water content and conditions of phenocryst growth // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1998, V. 130, N??, P. 304-319.
258. Falloon T.J., Green D.H., Jacques A.L., Hawkins J.W. Refractory magmas in Back-Arc basin settings - experimental constraints on the petrogenesis of a Lau Basin example // *J. Petrol.*, 1999, V. 40, N 2, P. 255-277.
261. Nimis P., Ulmer P. Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks Part 1: An expanded structural geobarometer for anhydrous and hydrous, basic and ultrabasic systems // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1998, V. 133, N 1/2, P. 122-135.
263. Blatter D.L., Carmichael I.S.E. Plagioclase-free andesites from Zitacuaro (Michoacan), Mexico: petrology and experimental constraints // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1998, V. 132, N??, P. 121-138.

270. Metrich N., Rutherford M.J. Low pressure crystallization paths of H₂O-saturated basaltic-hawaiitic melts from Mt Etna: implications for open-system degassing of basaltic volcanoes // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1998, V. 62, N 7, P. 1195-1205.
280. Thy P., Leshner C.E., Fram M.S. Low pressure experimental constraints on the evolution of basaltic lavas from site 917, southeast Greenland continental margin // *Proc. Ocean Drilling Program Scientific Results*, 1998, V. 152, P. 359-372.
281. Thy P., Leshner C.E., Mayfield J.D. Low-pressure melting studies of basalt and basaltic andesite from the southeast Greenland continental margin // *Proc. Ocean Drilling Program Scientific Results*, 1999, V. 163, P. 95-112.
282. McCoy T.J., Lofgren G.E. Crystallization of the Zagami shergottite: an experimental study // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1999, V. 173, P. 397-411.
291. Falloon T.J., Green D.H., Danyushevsky L.V., Faul U.H. Peridotite Melting at 1.0 and 1.5 GPa: An experimental evaluation of techniques using diamond aggregates and mineral mixes for determination of near-solidus melts // *J. Petrol.*, 1999, V. 40, N. 9, P. 1343-1375.
294. Parman S.W., Dann J.C., Grove T.L., de Wit M.J. Emplacement conditions of komatiite magmas from the 3.49 Ga Komati Formation, Barberton Greenstone Belt, South Africa // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1997, V. 150, N ??, P. 303-323.
305. Sano T., Fujii T., Deshmukh S.S., Fukuoka T., Aramaki S. Differentiation processes of Deccan Trap Basalts: Contribution from geochemistry and experimental petrology // *J. Petrol.*, 2001, V. 42, N 12, P. 2175-2195.
313. Arndt N.T. Melting relations of ultramafic lavas (komatiites) at 1 atm and high pressure // *Carnegie Inst. Wash. Yb*, 1976, V. 75, P. 555-562.
332. Minitti M.E., Rutherford M.J. Genesis of the Mars Pathfinder "sulfur-free" rock from SNC parental liquids // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2000, V. 64, N 14, P. 2535-2547.
333. Kohut E.J., Nielsen R.L. Low-pressure phase equilibria of anhydrous anorthite-bearing mafic magmas // *GGG*, 2003, V. 4, N 7, Paper number 2002GC000451.
345. Barclay J., Carmichael I.S.E. A hornblende basalt from Western Mexico: water-saturated phase relations constrain a pressure - temperature window of eruptibility // *J. Petrol.*, 2004, V. 45, N 3, P. 485-506.
347. Nekvasil H., Dondolini A., Horn J., Filiberto J., Long H., Lindsley D.H. The origin and evolution of silica-saturated alkalic suites: an experimental study // *J. Petrol.*, 2004, V. 45, N 4, P. 693-721.
- D1 Tuff G., Takahashi E., Gibson S. A. Experimental constraints on the role of garnet pyroxenite in the genesis of high-Fe mantle plume derived melts // *J. Petrol.*, 2005, V. 46, N 10, P. 2023-2058.

Часть II

**Уравнения, полученные по экспериментальным результатам при повышенном давлении
(до 17.5 ГПа)**

Для идентификации полученных формул была использована следующая нумерация: Si – 1 (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l), Ti – 2, Al – 3, Fe³⁺ – 4, Fe²⁺ – 5, Mn – 6, Mg – 7, Ca – 8, Na – 9, K – 10, Cr – 11, sFe – 12, sAl – 13, Fe²⁺:Mg – 14, sFe:Mg – 15, Fe³⁺:Fe²⁺ – 16, K:Na – 17, T (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k), f (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k), P (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k), R (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k) – формулы, описывающие равновесие внутри кристаллов при условии равновесия с расплавом и равновесие кристалл–расплав, равновесие кристалл–кристалл, находящихся в равновесии с расплавом. Нарушения в порядке следования в номерах формул связано с тем, что некоторые из созданных формул не вошли в текст.

Глава 4. Уравнения, полученные по системе расплав–минерал

В каждой выборке присутствует одна из следующих минеральных разностей: группы шпинелей, группы оливина, подгруппы ортопироксена, подгруппы клинопироксена (авгит), подгруппы плагиоклаза. В экспериментальных же результатах, служивших основой для этих выборок, в равновесии с указанным минералом могут присутствовать (или отсутствовать) также иные минеральные фазы, число которых может колебаться от 0 до 6 фаз.

4.1. Система расплав–шпинель

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [18; 19; 35; 49; 75; 80; 85; 86; 91; 93; 158; 159; 175; 181; 239; 243; 247; 258; 262; 272; 278; 279; 288; 291; 292; 298; 299; 300; 309; 321; 322; 323; 324; 325; 335; 337; 339; 340; 346].

Используемые данные: общее число точек – 313 парных анализов; после исключения анализов составов шпинелей и стекол с суммами окислов менее 98 % и более 102 % – 278 т. После исключения анализов, где отсутствовало железо в расплаве и содержание магния составляло < 1 % – 238 т. Исключены эксперименты с содержаниями титана > 10 % в расплаве – 221 т. Этот массив данных был разбит на 2 выборки по содержанию алюминия в кристаллах шпинели: < 50 % – 95 т.; > 50 % – 126 т. Из выборки 126 т. были удалены точки с нулевыми содержаниями титана – 116 т. Для расчетов содержаний хрома из выборки 95 т. были удалены 5 точек с нулевыми содержаниями хрома в расплаве – 90 т. Из выборки 126 т. осталось 76 точек.

Таблица П.1.1.1 sp. Диапазоны составов стекол (расплавов) и шпинелей в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

PGSP		Стекло		Шпинель			
SiO ₂	43.5–55.8	Si	39.41–53.01	SiO ₂	0–4.7	Si	0–4.05
TiO ₂	0.04–2.4	Ti	0.03–1.72	TiO ₂	0.03–2.5	Ti	0–2.07
Al ₂ O ₃	8.8–21.0	Al	9.44–21.84	Al ₂ O ₃	14.8–70.1	Al	18.14–66.65
FeO	3.3–21.7	Fe	2.54–17.78	FeO	3.1–28.6	Fe	2.06–31.95
MnO	0.02–0.55	Mn	0.02–0.46	MnO	0.01–0.51	Mn	0–0.47
MgO	3.7–19.1	Mg	5.29–25.81	MgO	6.01–26.6	Mg	9.63–31.57
CaO	3.9–16.3	Ca	3.84–15.82	CaO	0–0.59	Ca	0–0.62
Na ₂ O	0–7.4	Na	0.47–12.82	Na ₂ O	0–0.21	Na	0–0.34
K ₂ O	0–2.6	K	0.03–3.02	K ₂ O	0–0.09	K	0–0.12
Cr ₂ O ₃	0–1.48	Cr	0.01–1.06	Cr ₂ O ₃	0.01–56.4	Cr	0–46.39
T °C	1150–1575	P, кб	1–28			Mg# _{Sp}	27.60–93.86

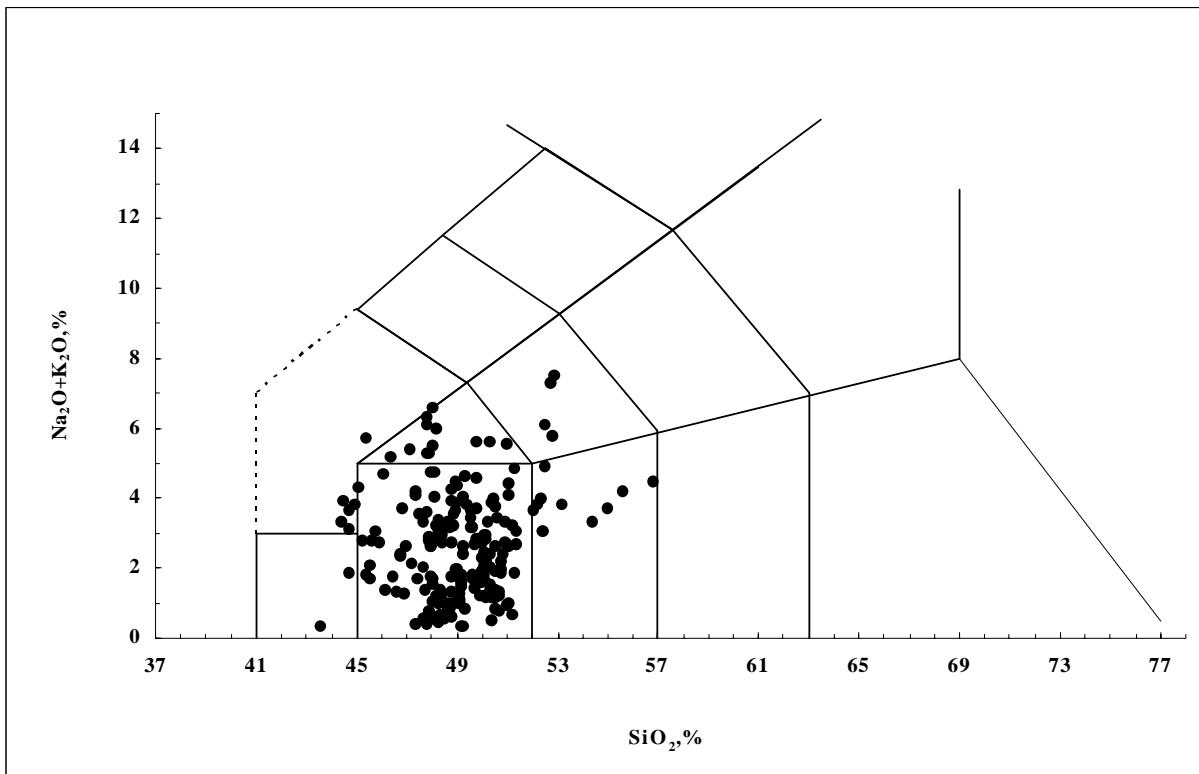


Рис. II.1.1 sp. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами шпинели, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчеты содержаний титана в расплаве

$$K_1 = 100Ti_{sp}:Fe^{2+}_{sp} + P:5$$

$$Ti_m = 0.17K_1 - 0.22(PGSP2a)$$

Диапазон содержаний Ti 0.1–1.7 (атом. %)

Относительная ошибка 150–9 %

$R = 0.89$; $N = 95$; $N_1 = 93$; $\sigma = 0.15$; $\chi^2 = 1.15$ (8)

Диапазон давлений 1–15 кб

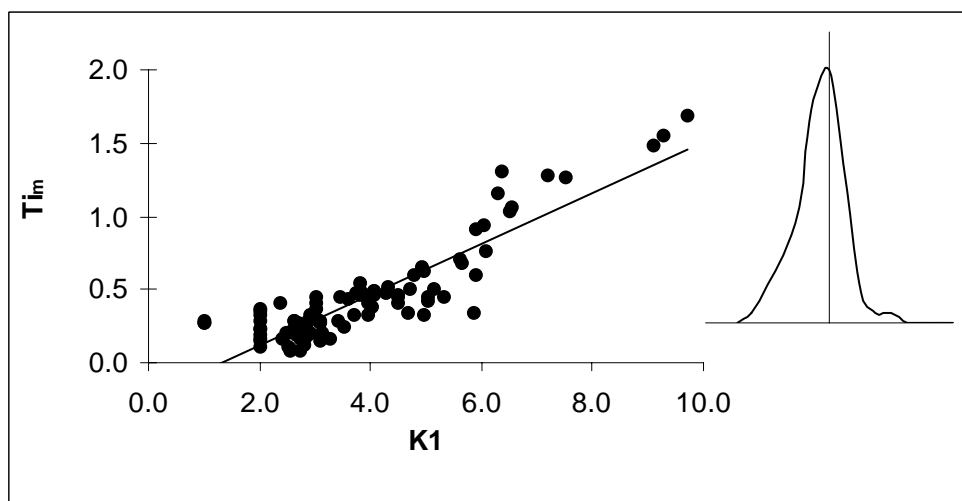


Рис. II.1.2 sp (формула **PGSP2a**). Зависимость содержаний Ti_m от состава шпинели и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = [15Ti_{sp} + Fe^{2+}_{sp} + Al_{sp}:5 + Fe^{3+}_{sp} + (K_m + Na_m) - Si_m:3 + P:3]:5$$

$$Ti_m = 0.2K_1 - 0.06(PGSP2b)$$

Диапазон содержаний Ti 0.03–1.7 (атом. %)

Относительная ошибка 600–11 %

R = 0.8; N = 116; N₁ = 113; сигма = 0.18; $\chi^2 = 1.92$ (12)

Диапазон давлений 10–28 кб

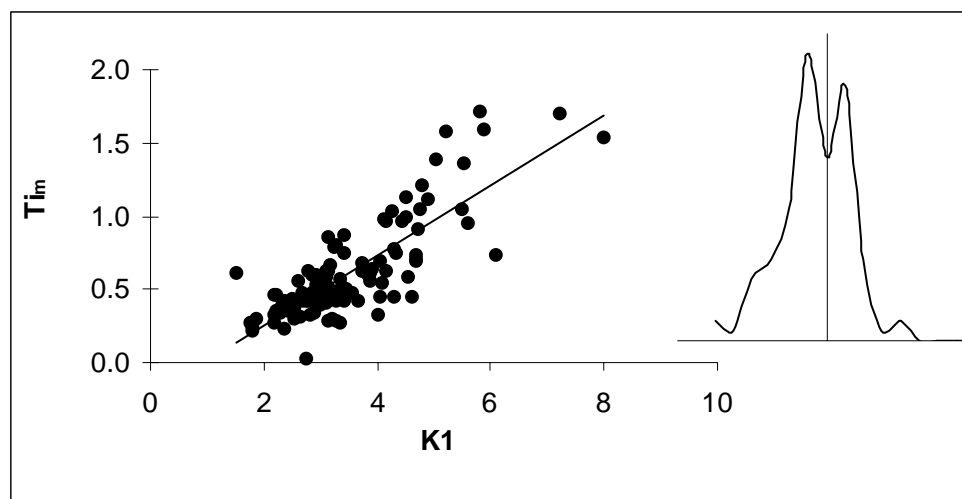


Рис. П.1.1.3 sp (формула PGSP2b). Зависимость содержаний Ti_m от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчеты содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Al_{sp}Si_m:100 - P:4$$

$$Al_m = 0.59K_1 + 7.44(PGSP3a)$$

Диапазон содержаний Al 9.4–20 (атом. %)

Относительная ошибка 10–5 %

R = 0.91; N = 95; N₁ = 93; сигма = 0.98; $\chi^2 = 2.04$ (8)

Диапазон давлений 1–15 кб

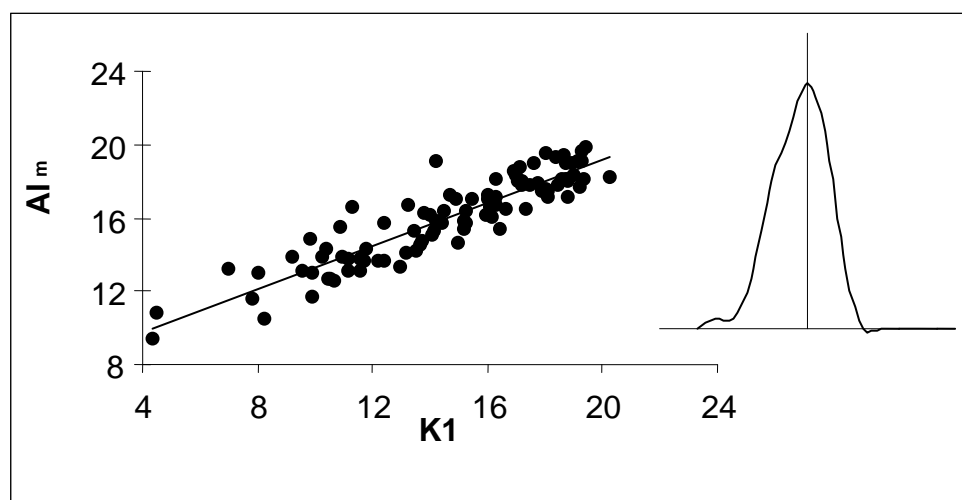


Рис. П.1.1.4 sp (формула PGSP3a). Зависимость содержаний Al_m от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{sp}Si_m:100 - Fe^{2+}_{sp}:2 + (K_m + Na_m):3 - P:2$$

$$Al_m = 0.37K_1 + 12.29 \text{ (PGSP3b)}$$

Диапазон содержаний Al 15.1–21.8 (атом. %)

Относительная ошибка 5–3 %

R = 0.85; N = 126; N₁ = 124; сигма = 0.6; χ^2 2.47 (12)

Диапазон давлений 10–28 кб

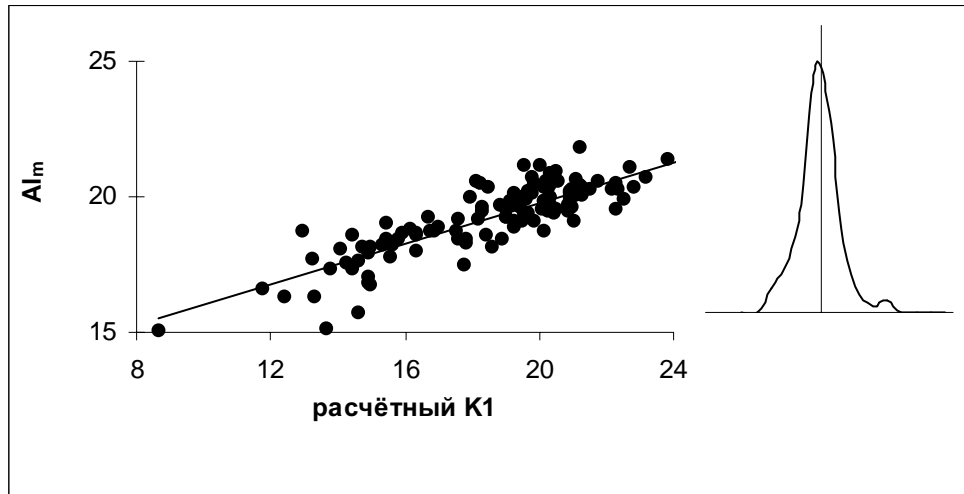


Рис. П.1.1.5 sp (формула PGSP3b). Зависимость содержаний Al_m от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчеты содержаний железа в расплаве

$$Fe^{2+}_m = 0.73Fe^{2+}_{sp} + 0.16 \text{ (PSP5a1)}$$

Диапазон содержаний Fe²⁺ 2.5–17.8 (атом. %)

Относительная ошибка 37–5 %

R = 0.97; N = 95; N₁ = 93; сигма = 0.93; χ^2 = 1.24 (8)

Диапазон давлений 1–15 кб

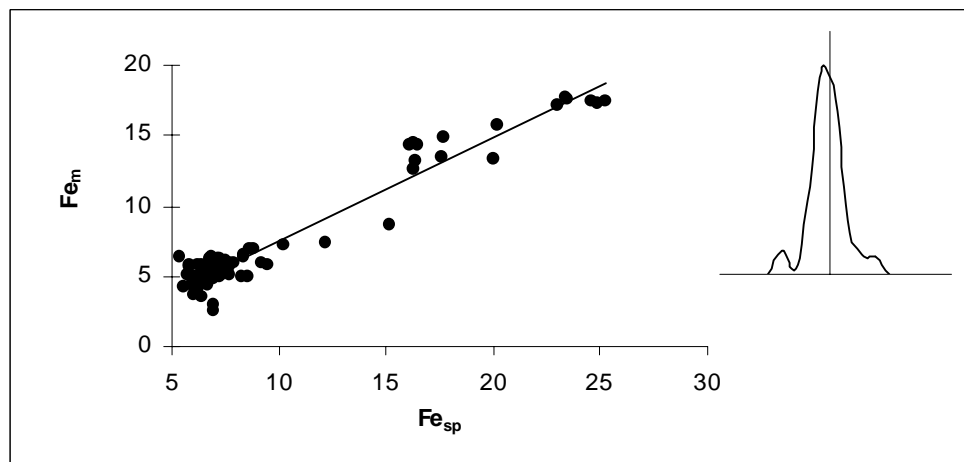


Рис. П.1.1.6 sp (формула PSP5a1). Зависимость содержаний Fe²⁺_m от состава шпинели и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{sp}:Si_m$$

$$Fe^{2+}_m = 32.91K_1 + 0.21(PSP5a2)$$

Диапазон содержаний Fe^{2+} 2.5–17.8 (атом. %)

Относительная ошибка 33–5 %

$R = 0.98$; $N = 95$; $N_1 = 93$; сигма = 0.82; $\chi^2 = 7.24$ (8)

Диапазон давлений 1–15 кб

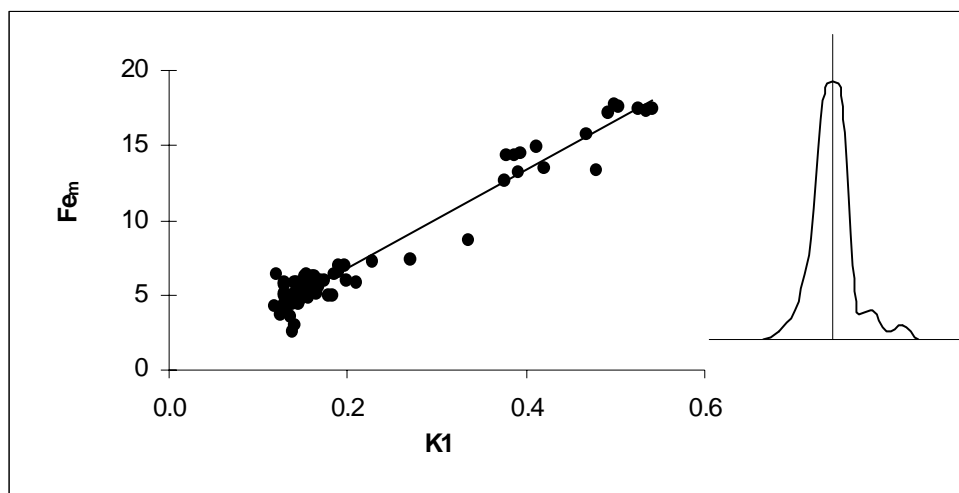


Рис. П.1.1.7 sp (формула PSP5a2). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава шпинели, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Ln[1.5Fe^{3+}_{sp} + Fe^{2+}_{sp} - Cr_{sp}:6 - (K_m + Na_m):5 + P:4]$$

$$Fe^{2+}_m = 5.51K_1 - 5.18(PGSP5b)$$

Диапазон содержаний Fe^{2+} 2.6–10.6 (атом. %)

Относительная ошибка 30–7 %

$R = 0.91$; $N = 126$; $N_1 = 125$; сигма = 0.77; $\chi^2 = 0.59$ (12)

Диапазон давлений 10–28 кб

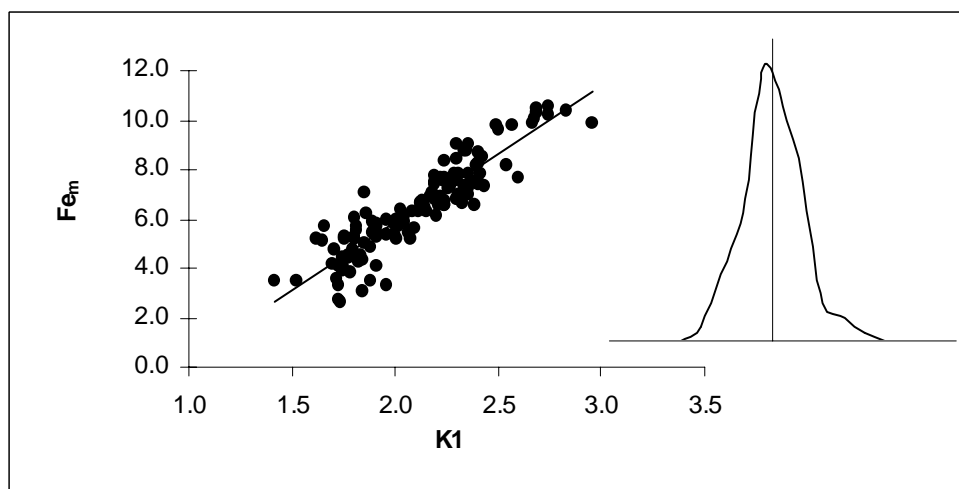


Рис. П.1.1.8 sp (формула PGSP5b). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава шпинели, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчеты содержаний магния в расплаве

$$K_1 = 5Mg_{sp}:Al_m - Ti_m$$

$$Mg_m = 1.75K_1 + 3.2(PGSP7a)$$

Диапазон содержаний Mg 8.4–23.6 (атом. %)

Относительная ошибка 15–6 %

$R = 0.93$; $N = 95$; $N_1 = 93$; $\sigma = 1.3$; $\chi^2 = 1.69$ (8)

Диапазон давлений 1–15 кб

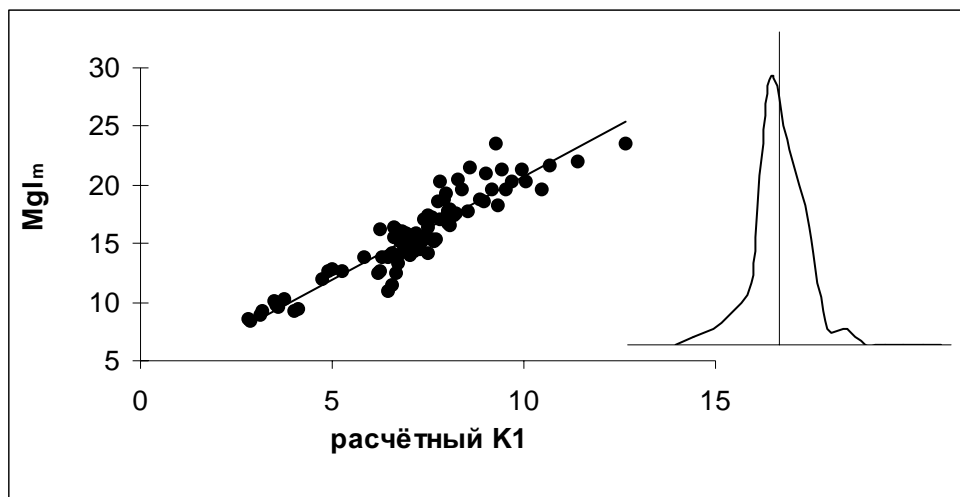


Рис. II.1.1.9 sp (формула PGSP7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 5Mg_{sp}:Al_m - (K_m + Na_m):4$$

$$Mg_m = 2.61K_1 - 1.05(PGSP7b)$$

Диапазон содержаний Mg 5.3–24.1 (атом. %)

Относительная ошибка 19–4 %

$R = 0.96$; $N = 126$; $N_1 = 123$; $\sigma = 1$; $\chi^2 = 1.67$ (12)

Диапазон давлений 10–28 кб

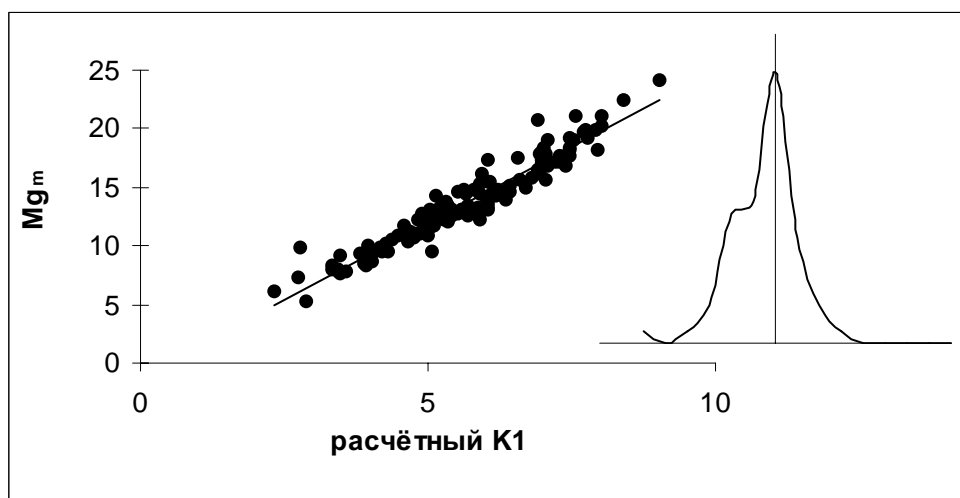


Рис. II.1.1.10 sp (формула PGSP7b). Зависимость содержаний Mg_m от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчеты содержаний хрома в расплаве

$$K_1 = (Mg_{sp} + Cr_{sp} + Mg_m \cdot 2 - Al_m - Ca_m) : 10$$

$$Cr_m = 0.14K_1 - 0.18 \text{ (PGSP11a)}$$

Диапазон содержаний Cr 0.03–0.84 (атом. %)

Относительная ошибка 330–12 %

R = 0.8; N = 90; N₁ = 89; сигма = 0.1; $\chi^2 = 2.02$ (8)

Диапазон давлений 1–15 кб

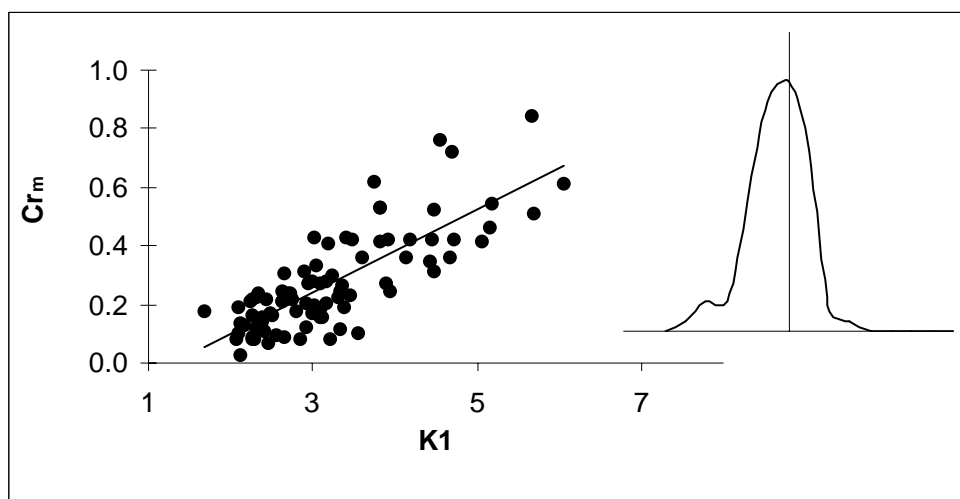


Рис. П.1.1.11 sp (формула PGSP11a). Зависимость содержаний Cr_m от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Exp}[(Mg_{sp} : 4 + Cr_{sp} + Mg_m - Al_m - Ca_m) : 15]$$

$$Cr_m = 0.14K_1 - 0.04 \text{ (PGSP11b)}$$

Диапазон содержаний Cr 0.007–0.58% (атом.)

Относительная ошибка 660–8 %

R = 0.9; N = 76; N₁ = 75; сигма = 0.046; $\chi^2 = 1.56$ (8)

Диапазон давлений 10–28 кб

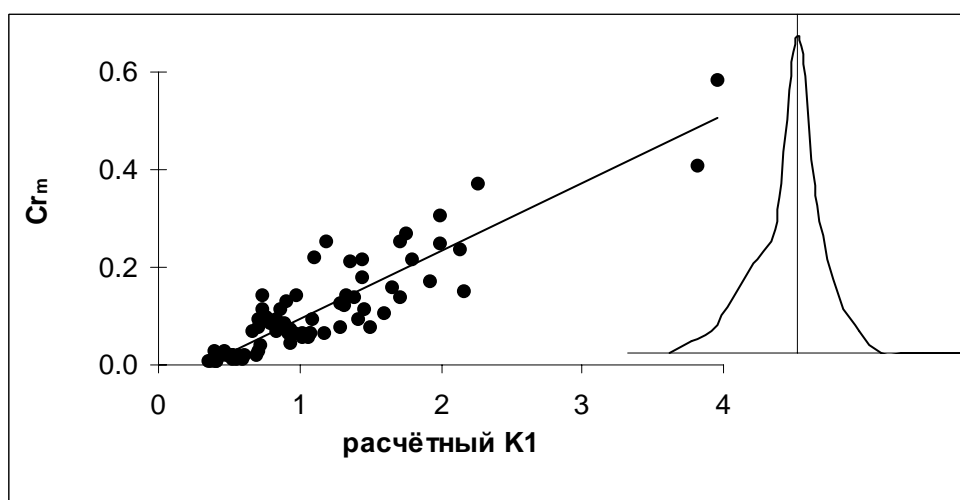


Рис. П.1.1.12 sp (формула PGSP11b). Зависимость содержаний Cr_m от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчеты железо-магниевого отношения в расплаве

$$K_1 = (Fe^{2+}/Mg)_{sp}; K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_m$$

$$K_2 = 0.79K_1 + 0.11 \text{ (PSP14a1)}$$

Диапазон содержаний K_2 0.23–2.1; K_1 0.2–2.6

Относительная ошибка 28–3 %

$R = 0.99$; $N = 95$; $N_1 = 94$; $\sigma = 0.065$; $\chi^2 = 6.82$ (8)

Диапазон давлений 1–15 кб

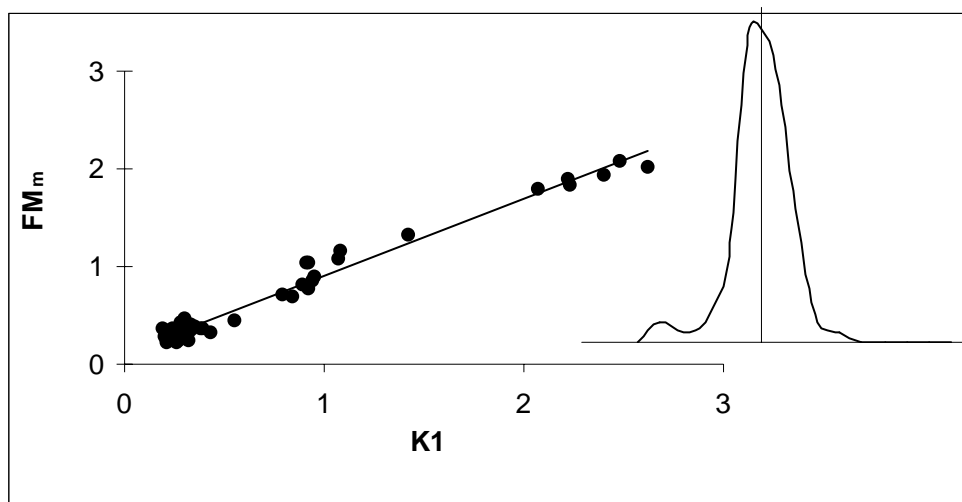


Рис. П.1.1.13 sp (формула PSP14a1). Зависимость значений K_2 от состава шпинели, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = (Fe^{2+}/Mg)_{sp}; K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_m$$

$$K_2 = 2.31K_1 - 0.07 \text{ (PSP14a2)}$$

Диапазон содержаний K_2 0.14–1.7; K_1 0.06–0.71

Относительная ошибка 71–6 %

$R = 0.93$; $N = 126$; $N_1 = 122$; $\sigma = 0.1$; $\chi^2 = 2.24$ (12)

Диапазон давлений 10–28 кб

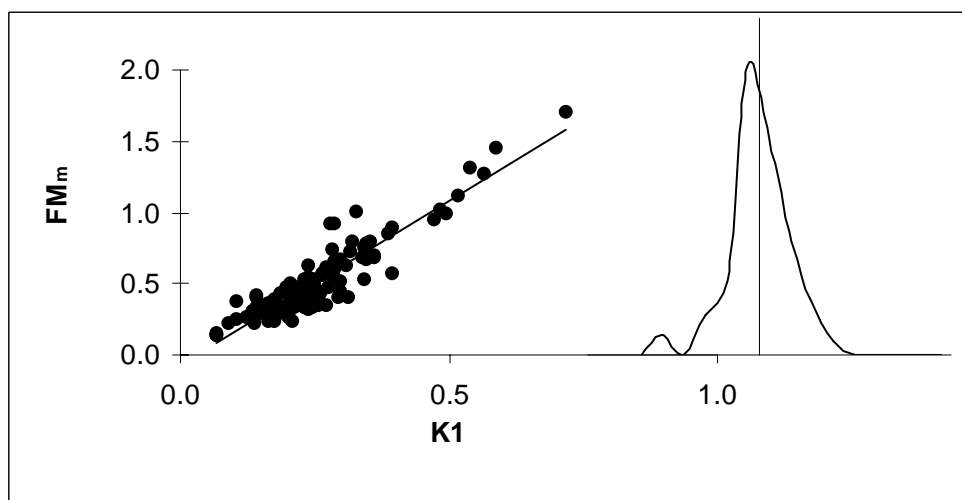


Рис. П.1.1.14 sp (формула PSP14a2). Зависимость значений K_2 от состава шпинели, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Fe}^{2+}_{\text{sp}}\text{Al}_m:3\text{Mg}_{\text{sp}}; K_2 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_m$$

$$K_2 = 0.35K_1 - 0.06(\text{PSP14a3})$$

Диапазон содержаний K_2 0.14–1.7; K_1 0.41–4.6

Относительная ошибка 64 – 5 %

$R = 0.94$; $N = 126$; $N_1 = 122$; сигма = 0.1; $\chi^2 = 1.96$ (12)

Диапазон давлений 10–28 кб

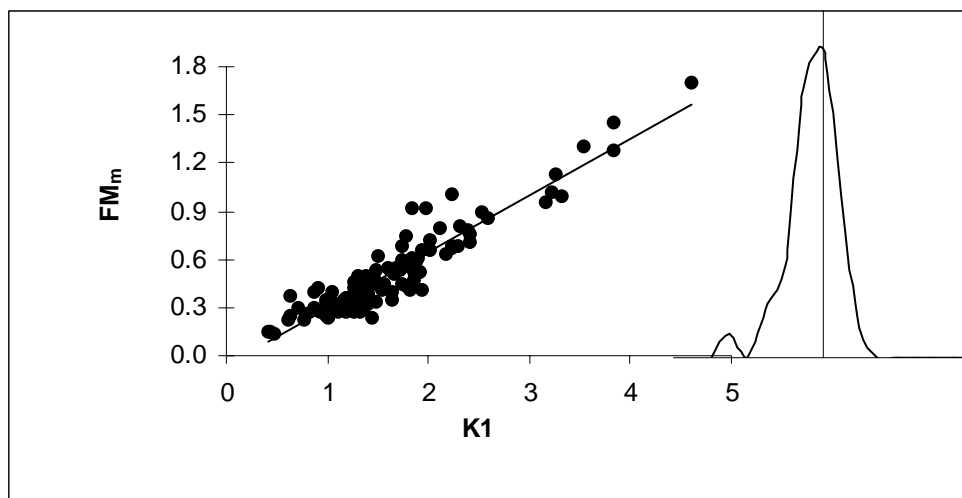


Рис. П.1.1.15 sp (формула PSP14a3). Зависимость значений K_2 от состава шпинели, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчеты температуры расплава

$$K_1 = \text{Fe}^{2+}_{\text{sp}} - \text{Ti}_{\text{sp}} + \text{Al}_{\text{sp}}:2 + \text{Fe}^{3+}_{\text{sp}}:2 - \text{P}$$

$$T_m = -8.35K_1 + 1466.83(\text{PSPTa1})$$

Диапазон значений T 1157–1425 °C;

Относительная ошибка 3–2 %

$R = -0.86$; $N = 95$; $N_1 = 95$; сигма = 30 °C; $\chi^2 = 0.64$ (8)

Диапазон давлений 1–15 кб

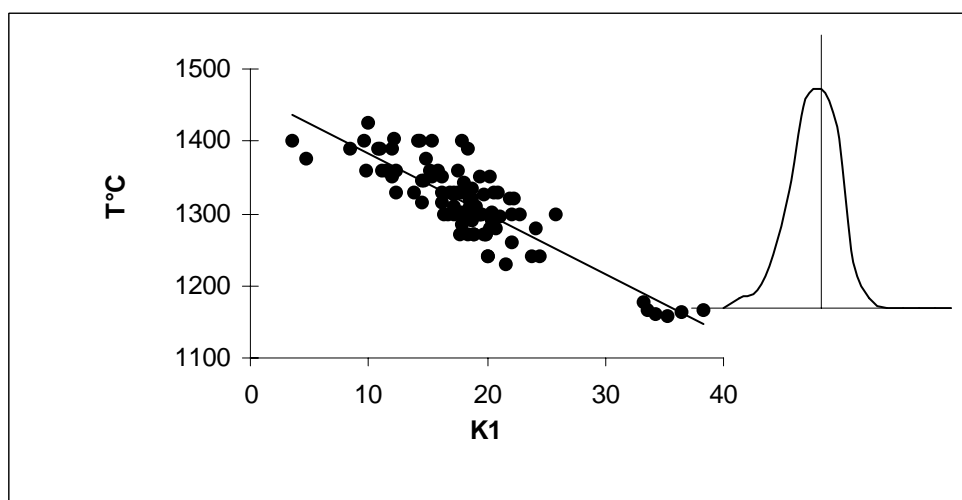


Рис. П.1.1.16 sp (формула PSPTa1). Зависимость значений T_m от состава шпинели, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{sp} - Ti_{sp} + Al_{sp}:5 + Fe^{3+}_{sp}:2 - Mg_m - 2P$$

$$T_m = -5.26K_1 + 1206.01(PSPTa2)$$

Диапазон значений T 1150–1575 °C;

Относительная ошибка 2.3–1.7 %

$R = -0.88$; $N = 126$; $N_1 = 126$; $\sigma = 27$ °C; $\chi^2 = 1.45$ (12)

Диапазон давлений 10–28 кб

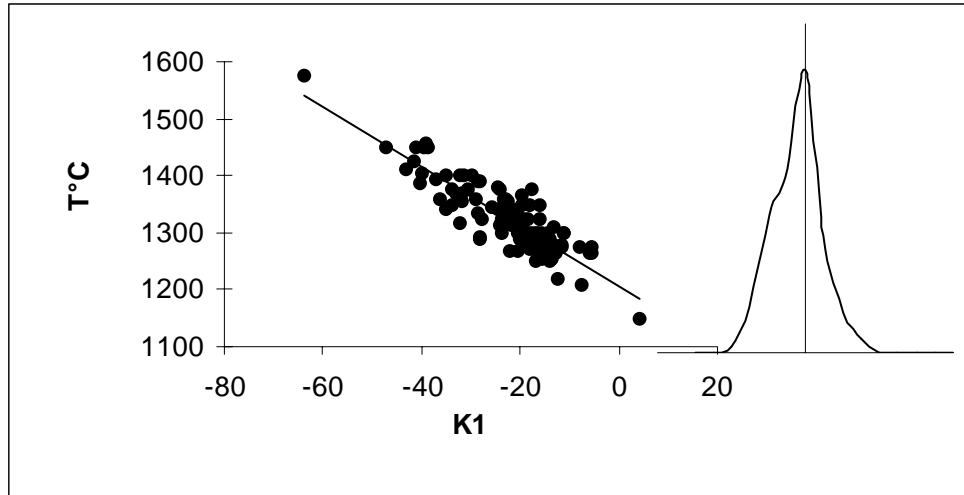


Рис. П.1.1.17 sp (формула PSPTa2). Зависимость значений T_m от состава шпинели, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = T:6 - (2Cr_{sp} - Mg_{sp}):3 - 3Si_m$$

$$P = 0.18K_1 - 3.33(PSPPa)$$

Диапазон значений P 1–28 кб

Относительная ошибка 210–8 %

$R = 0.82$; $N = 221$; $N_1 = 219$; $\sigma = 2.1$ кб; $\chi^2 = 11.24$ (12)

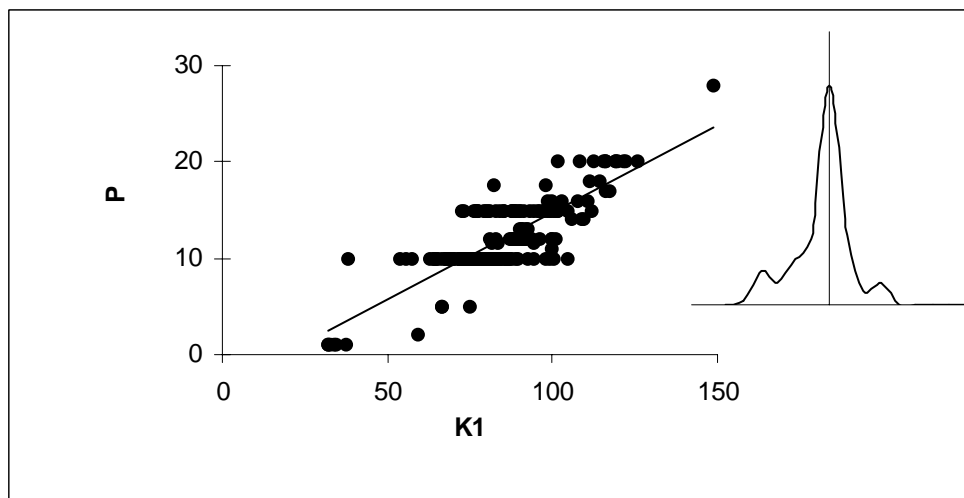


Рис. П.1.1.18 sp (формула PSPPa). Зависимость величины P от состава шпинели, расплава, температуры и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = T:3 + (3Al_{sp} - 1.5Mg_{sp}):4 - 8Ti_{sp} + 4(K_m + Na_m)$$

$$P = 0.14K_1 - 56.81(PSPPb)$$

Диапазон значений P 1–28 кб
 Относительная ошибка 196–7 %
 R = 0.85; N = 221; N₁ = 217; сигма = 2 кб; $\chi^2 = 6.8$ (12)

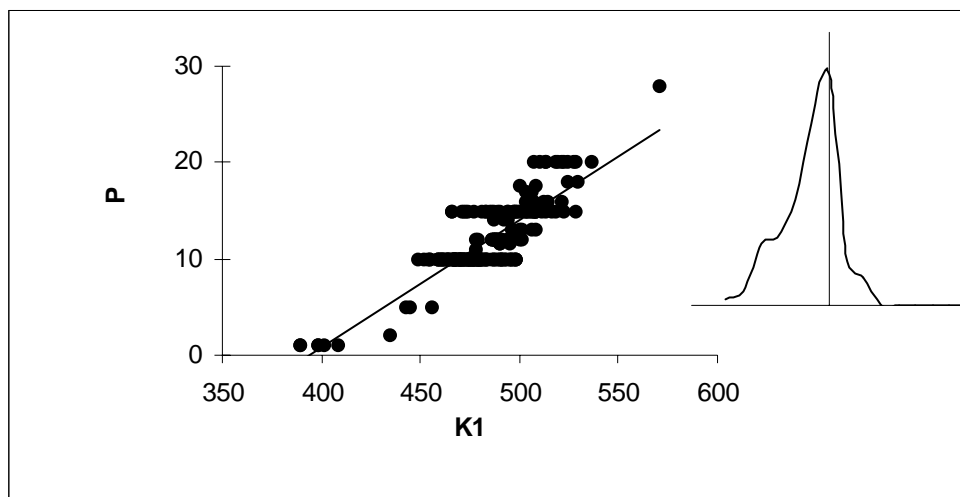


Рис. П.1.1.19 sp (формула PSPPb). Зависимость величины P от состава шпинели, расплава, температуры и распределение средноквадратичной ошибки.

Соотношения элементов в кристаллах шпинели, равновесных с расплавом

$$K_1 = (Cr/Mg)_{sp}; K_2 = (Fe^{2+}/Al)_{sp}$$

$$K_2 = 0.3K_1 - 0.09(PSPRa)$$

Диапазон значений K₂ 0.12–1.02; K₁ 0.6–3.8;
 Относительная ошибка 47–5 %
 R = 0.97; N = 95; N₁ = 95; сигма = 0.056; $\chi^2 = 1.64$ (8)
 Диапазон давлений 1–15 кб

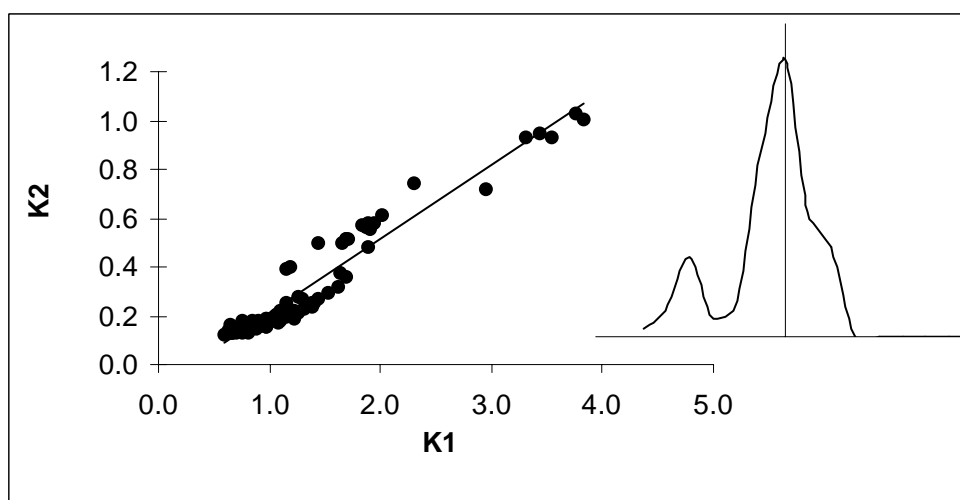


Рис. П.1.1.20 sp (формула PSPRa). Зависимость значений K₂ от состава шпинели и распределение средноквадратичной ошибки.

4.2. Система расплав–оливин

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [6; 18; 19; 21; 23; 29; 30; 33; 35; 37; 38; 39; 41; 43; 44; 47; 49; 53; 54; 59; 66; 75; 80; 82; 84; 85; 86; 87; 91; 92; 95; 15; 156; 158; 159; 167; 168; 175; 177; 181; 187; 188; 243; 247; 254; 258; 262; 267; 268; 272; 273; 277; 278; 279; 288; 291; 292; 298; 299; 300; 302; 304; 309; 314; 315; 318; 322; 323; 324; 325; 327; 335; 339; 340; 347; D1].

Используемые данные: общее число точек – 803 парных анализа. После исключения анализов составов оливина и стекол с суммами окислов менее 98 % и более 102 % – 764 т. После исключения анализов в экспериментах при давлении < 1 кб – 756 т. Для расчета содержаний титана были удалены точки с нулевыми содержаниями титана в расплаве и оливине – 154 т. Для расчета содержаний железа были удалены точки с нулевыми содержаниями в расплаве – 718 т. Для расчета содержаний марганца были отброшены точки с нулевыми содержаниями в расплаве и оливине – 420 т. Для расчета содержаний кальция удалены точки с нулевыми содержаниями $(K+Na)_m$ в расплаве и с нулевыми содержаниями кальция в оливине – 666 т. Для расчета были удалены точки с нулевыми содержаниями хрома в расплаве и оливине – 407 т. Для расчета железо-магниевого отношения был использован массив из 718 т. (см. выше), разбитый на 2 части: диапазон давлений 1–20 кб – 623 т. и 20–175 кб – 95 т. Для расчета температуры расплава массив был разбит на 2 группы точек с интервалами давлений 1–20 кб – 623 т. и 20–175 кб – 95 т.

Таблица П.1.2.1 ол. Диапазоны составов стекол (расплавов) и оливинов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

PLOL		Стекла		Оливины			
SiO ₂	31.5–66.39	Si	32.04–61.87	SiO ₂	34.4–43.11	Si	31.57–43.15
TiO ₂	0.04–21.83	Ti	0.01–15.49	TiO ₂	0–0.97	Ti	0–0.65
Al ₂ O ₃	3.27–22	Al	3.43–23.48	Al ₂ O ₃	0–0.82	Al	0–0.86
FeO	3.31–28.9	Fe	2.54–23.56	FeO	0–52.76	Fe	0–46.53
MnO	0–0.58	Mn	0–0.46	MnO	0–0.69	Mn	0–0.54
MgO	2.55–37.03	Mg	3.54–46.6	MgO	6.26–57.52	Mg	9.84–66.91
CaO	2.84–19.1	Ca	2.86–18.72	CaO	0–3.2	Ca	0–2.86
Na ₂ O	0–7.71	Na	0–13.7	Na ₂ O	0–0.11	Na	0–0.18
K ₂ O	0–9.33	K	0–11.02	K ₂ O	0–0.07	K	0–0.07
Cr ₂ O ₃	0–1.48	Cr	0–1.06	Cr ₂ O ₃	0–1.01	Cr	0–0.65
T °C	1095–2100	P, кб	1–175			Fo	17.4–100

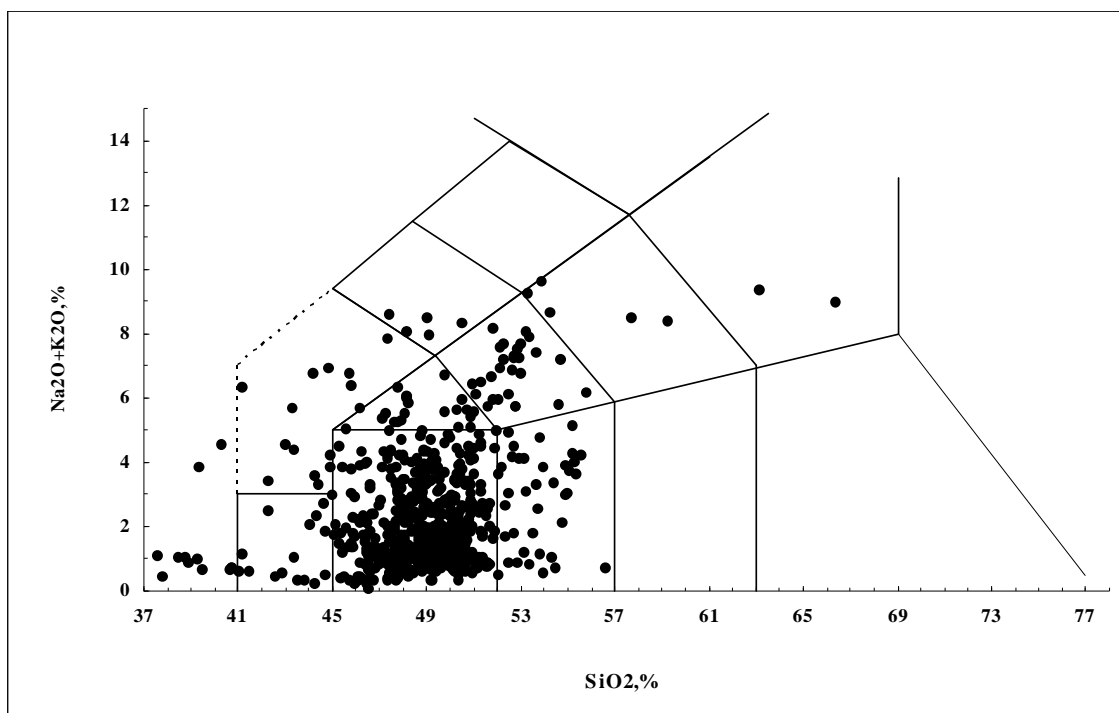


Рис. П.1.2.1 ol. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливины, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчеты содержаний титана в расплаве

$$K_1 = 100Ti_{ol}Ca_m:Si_m - Al_m:9$$

$$Ti_m = 0.98K_1 + 2.31(PLOL2a)$$

Диапазон значений Ti 0.03–5 (атом. %)

Относительная ошибка 2300–13 %

$R = 0.78$; $N = 154$; $N_1 = 150$; $\sigma = 0.67$; $\chi^2 = 2.32$ (12)

Диапазон давлений 1–50 кб

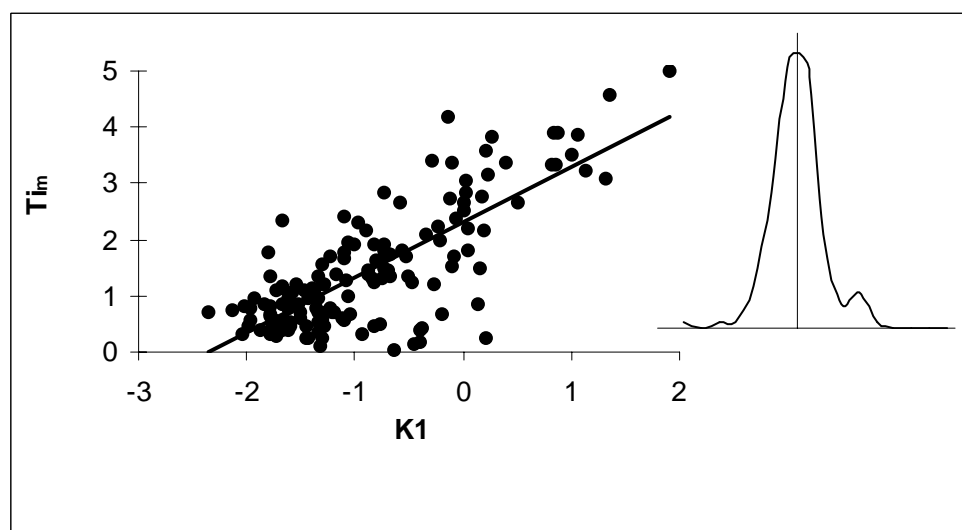


Рис. П.1.2.2 ol (формула PLOL2a). Зависимость содержаний Ti_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100Ti_{ol}Mg_{ol}:Si_m - Al_m:2$$

$$Ti_m = 0.19K_1 + 2.03(PLOL2b)$$

Диапазон значений Ti 0.03–5 (атом.%)

Относительная ошибка 2400–14 %

$R = 0.76$; $N = 154$; $N_1 = 152$; $\sigma = 0.71$; $\chi^2 = 4.03$ (12)

Диапазон давлений 1–50 кб

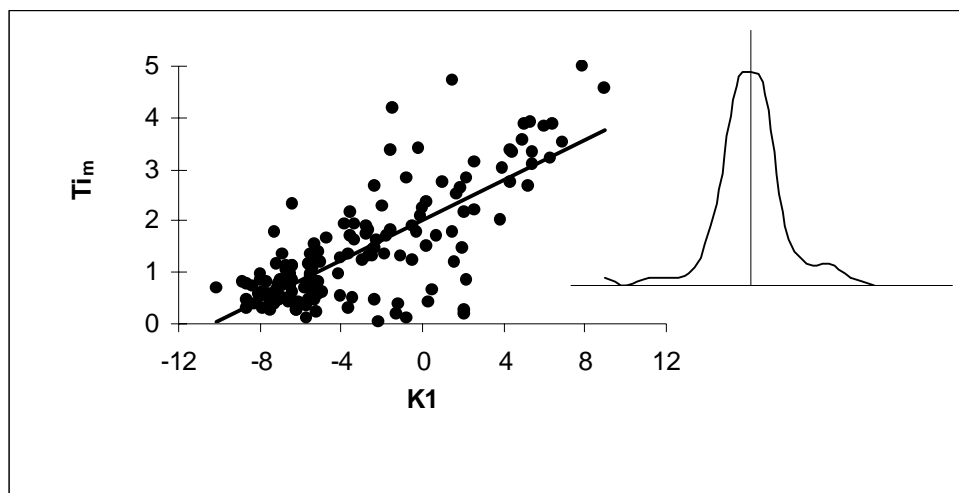


Рис. П.1.2.3 ol (формула PLOL2b). Зависимость содержаний Ti_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчеты содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Mg_m + Fe^{2+}_m + Fe^{2+}_{ol}:3 - Si_{ol}:2$$

$$Al_m = -0.46K_1 + 20.49(PLOL3)$$

Диапазон значений Al 3.4–23.5 (атом. %)

Относительная ошибка 51–8 %

$R = -0.91$; $N = 756$; $N_1 = 749$; $\sigma = 1.7$; $\chi^2 = 3.04$ (16)

Диапазон давлений 1–5 кб

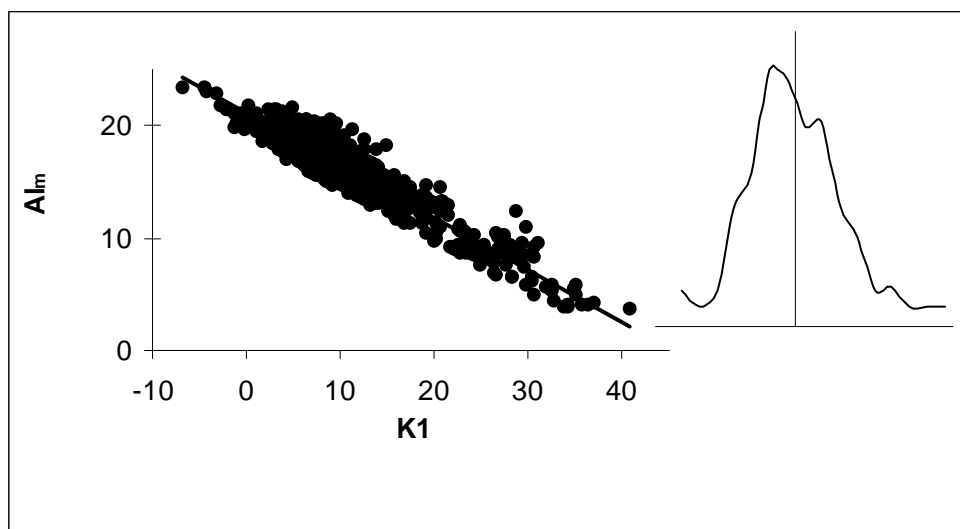


Рис. П.1.2.4 ol (формула PLOL3). Зависимость содержаний Al_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа двухвалентного в расплаве

$$K_1 = 10Fe_{ol}^{2+}Mg_m:Mg_{ol}Si_m$$

$$Fe_m^{2+} = 11.71K_1 + 1.21(PLOL5a)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 2.54–23.56 (атом. %)

Относительная ошибка 42–4 %

$R = 0.97$; $N = 718$; $N_1 = 703$; сигма = 1.06; $\chi^2 = 9.87$ (16)

Диапазон давлений 1–175 кб

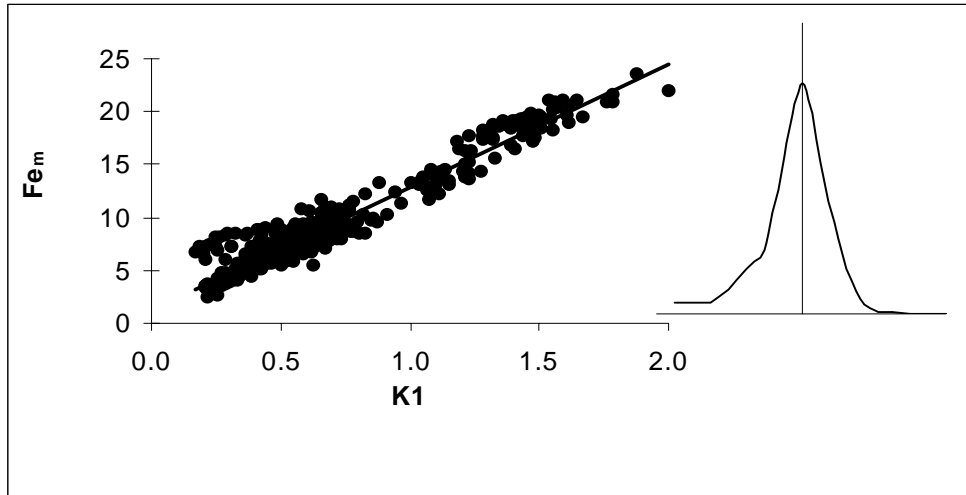


Рис. П.1.2.5 ol (формула PLOL5a). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe_{ol}^{2+}T^2:10^5Si_m - Al_m:4 + Ca_m:4$$

$$Fe_m^{2+} = 1.56K_1 + 4.12(PLOL5b)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 2.54–23.6 (атом. %)

Относительная ошибка 57–6 %

$R = 0.94$; $N = 718$; $N_1 = 713$; сигма = 1.45; $\chi^2 = 4.11$ (16)

Диапазон давлений 1–175 кб

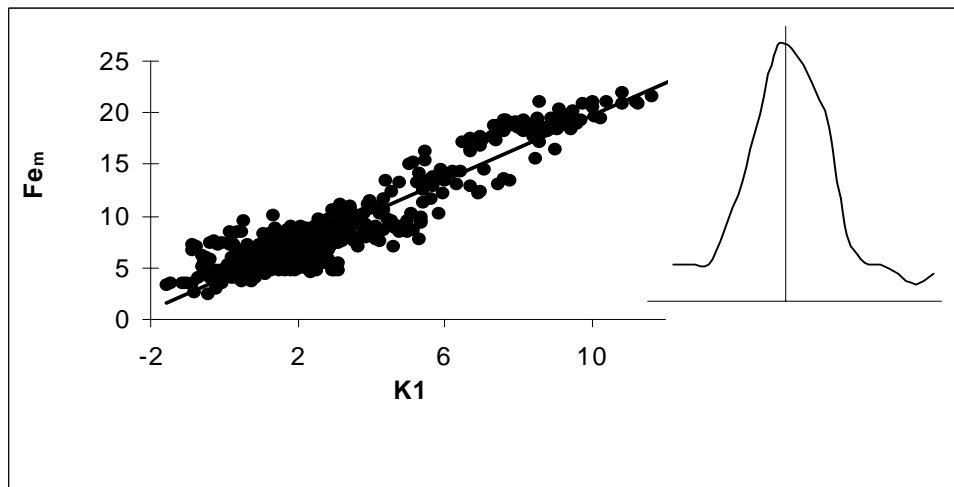


Рис. П.1.2.6 ol (формула PLOL5b). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет сигма 1.14.

Расчет содержаний марганца в расплаве

$$K_1 = Mn_{ol}Mg_m:5$$

$$Mn_m = 0.34K_1 + 0.01(PLOL6)$$

Диапазон значений Mn 0.01–0.46 (атом. %)

Относительная ошибка 400–9 %

$R = 0.83$; $N = 420$; $N_1 = 414$; $\sigma = 0.04$; $\chi^2 = 11.14$ (12)

Диапазон давлений 1–70 кб

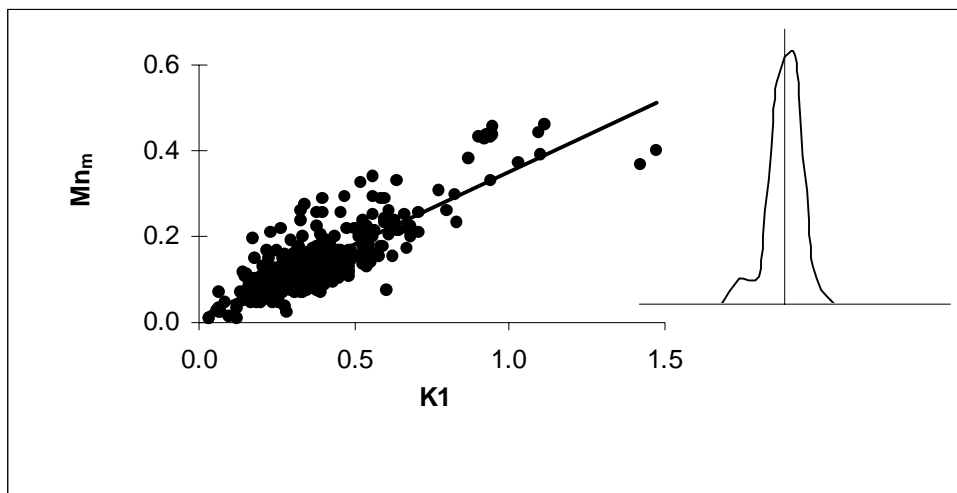


Рис. П.1.2.7 ol (формула PLOL6). Зависимость содержаний Mn_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Mg_{ol}T:1000 - 1.4Al_m - Si_m:3$$

$$Mg_m = 0.4K_1 + 0.12(PLOL7a)$$

Диапазон значений Mg 4–46.2 (атом. %)

Относительная ошибка 45–4 %

$R = 0.96$; $N = 756$; $N_1 = 745$; $\sigma = 1.8$; $\chi^2 = 1.66$ (16)

Диапазон давлений 1–175 кб

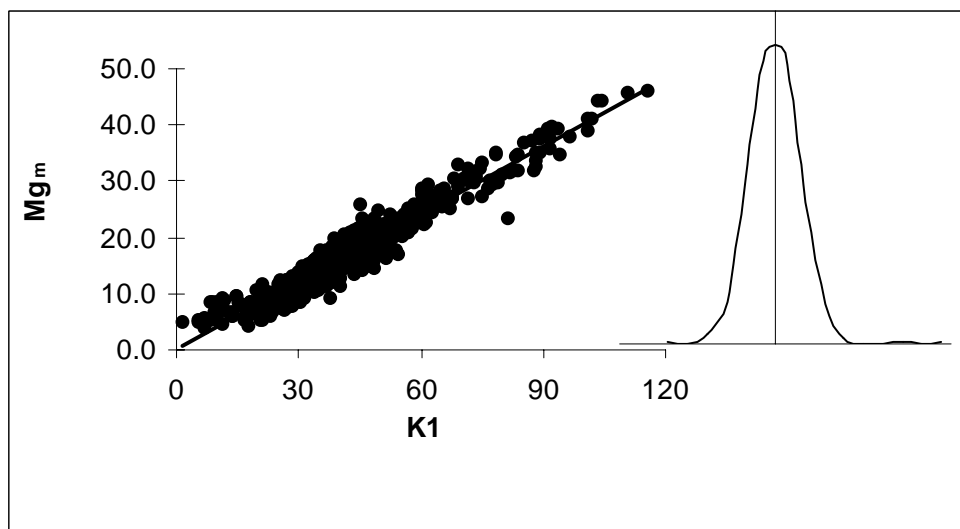


Рис. П.1.2.8 ol (формула PLOL7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol} - 2Mg_{ol}:Al_m + Si_m:4 + 1.2Ca_m + 1.4(K_m + Na_m)$$

$$Mg_m = -0.67K_1 + 36.62 \text{ (PLOL7b)}$$

Диапазон значений Mg 4–46.2 (атом. %)

Относительная ошибка 50–5 %

$$R = -0.95; N = 718; N_1 = 709; \text{сигма} = 2.2; \chi^2 = 4.78 \text{ (16)}$$

Диапазон давлений 1–175 кб

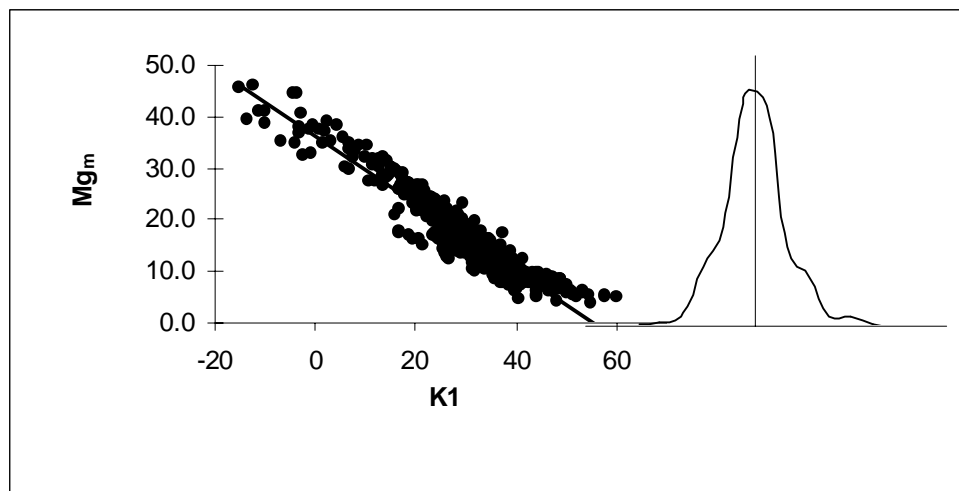


Рис. П.1.2.9 ol (формула PLOL7b). Зависимость содержаний Mg_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам составляет сигма–2.2.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Si_m:8 + Fe^{2+}_m:2 + Mg_m:1.8 + 1.4(K_m + Na_m) - Mg_{ol}:6 - 16Ca_{ol}$$

$$Ca_m = -0.54K_1 + 15.76 \text{ (PLOL8)}$$

Диапазон значений Ca 2.9–17.4 (атом. %)

Относительная ошибка 35–6 %

$$R = -0.9; N = 666; N_1 = 659; \text{сигма} = 1; \chi^2 = 8.28 \text{ (16)}$$

Диапазон давлений 1–175 кб

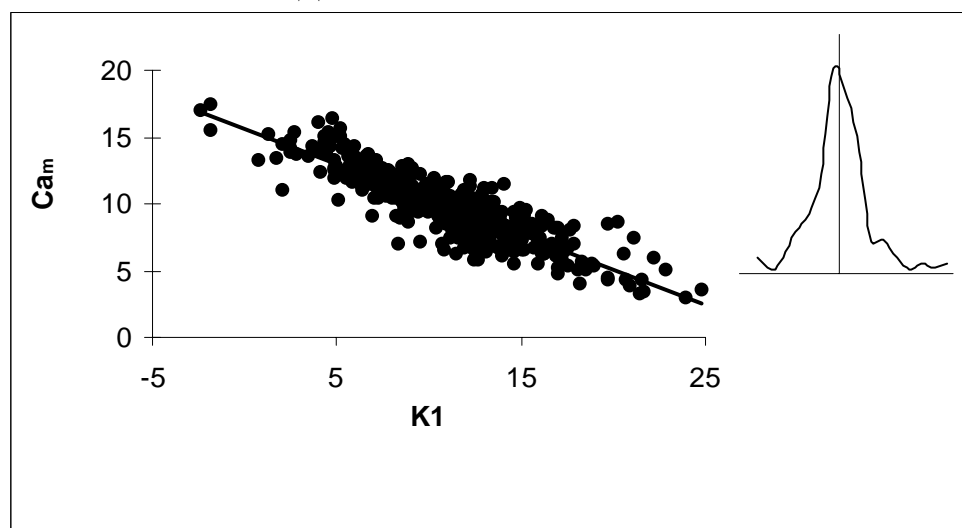


Рис. П.1.2.10 ol (формула PLOL8). Зависимость содержаний Ca_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний хрома в расплаве

$$K_1 = Cr_{ol}Mg_m:Mg_{ol}$$

$$Cr_m = 4.54K_1 + 0.04(PLOL11)$$

Диапазон значений Cr 0.01–1.05 (атом. %)

Относительная ошибка 1000–10 %

R = 0.86; N = 407; N₁ = 401; сигма = 0.1; $\chi^2 = 31.01$ (12)

Диапазон давлений 1–105 кб

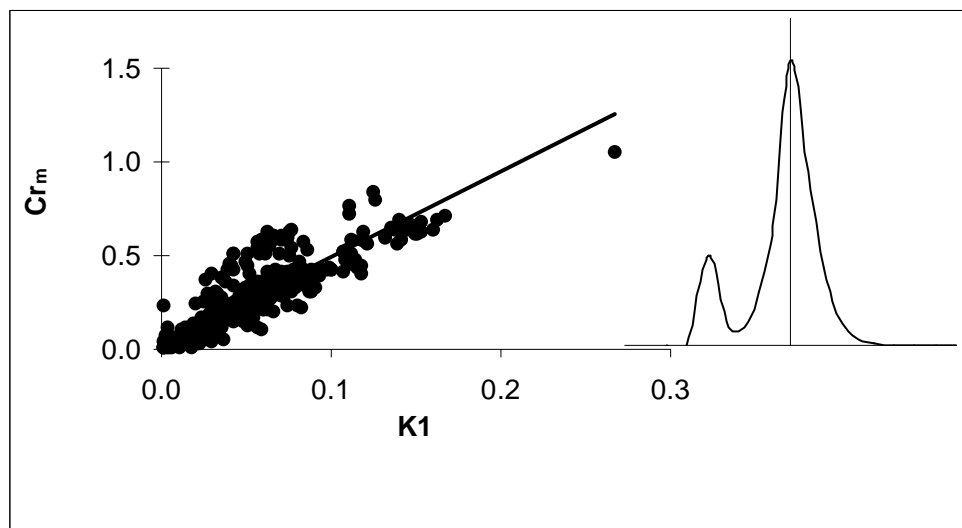


Рис. П.1.2.11 ol (формула PLOL11). Зависимость содержаний Cr_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет величины железо(+2)–магниевого отношения в расплаве

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol}/Mg_{ol}; K_2 = Fe^{2+}_m/Mg_m$$

$$K_2 = 3.35K_1(PLOL14a)$$

Диапазон значений K₂ 0.14–3.1; K₁ 0.05–0.95

Относительная ошибка 79–4 %

R = 0.96; N = 623; N₁ = 606; сигма = 0.11; $\chi^2 = 42.9$ (16)

Диапазон давлений 1–20 кб

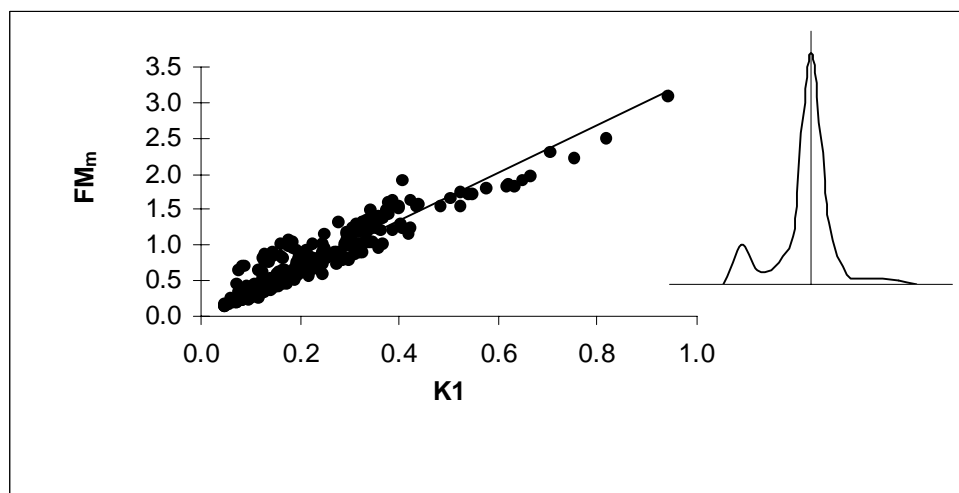


Рис. П.1.2.12 ol (формула PLOL14a). Зависимость величины (Fe²⁺/Mg)_m от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Fe}^{2+}_{\text{ol}}/\text{Mg}_{\text{ol}}; K_2 = \text{Fe}^{2+}_{\text{m}}/\text{Mg}_{\text{m}}$$

$$K_2 = 3.22K_1 - 0.03(\text{PLOL14b})$$

Диапазон значений K_2 0.12–1.5; K_1 0.04–0.44

Относительная ошибка 33–3 %

$R = 0.99$; $N = 95$; $N_1 = 93$; сигма = 0.04; $\chi^2 = 11.24$ (8)

Диапазон давлений 20–175 кб

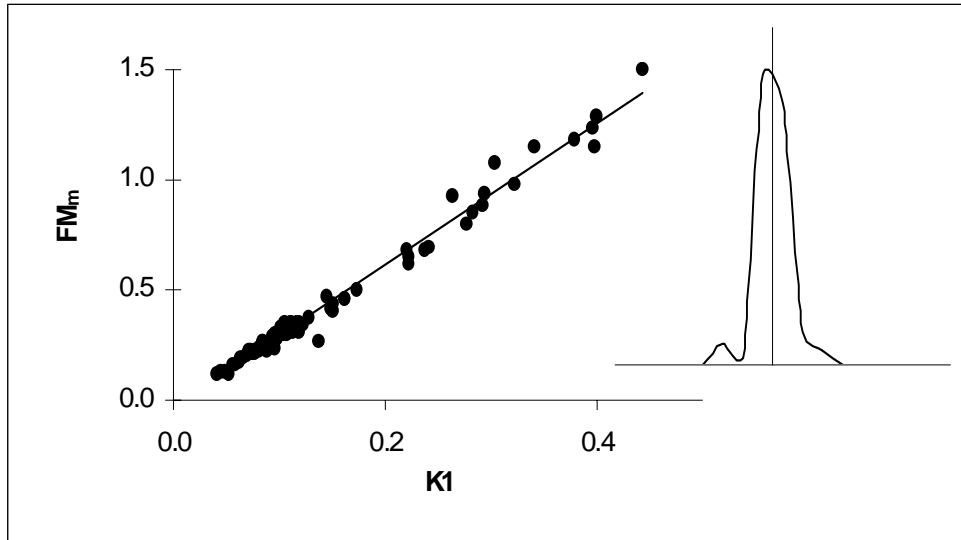


Рис. П.1.2.13 ol (формула PLOL14b). Зависимость величины $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_m$ от состава оливина, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = 100\text{Mg}_m:\text{Mg}_{\text{ol}} + \text{Mg}_{\text{ol}}:3 + \text{Si}_m:5 - 12\text{Ca}_{\text{ol}} + (\text{K}_m + \text{Na}_m):2 + \text{P}:2$$

$$T = 9.04K_1 + 787.26(\text{POLTa1})$$

Диапазон значений T 1095–1600 °C

Относительная ошибка 3–2 %

$R = 0.92$; $N = 623$; $N_1 = 614$; сигма = 36.4 °C; $\chi^2 = 2$ (16)

Диапазон давлений 1–20 кб

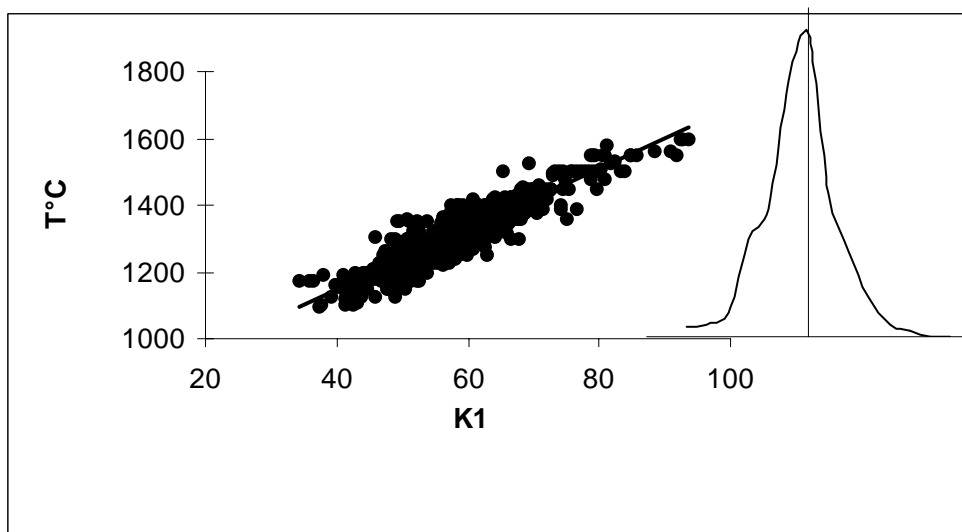


Рис. П.1.2.14 ol (формула POLTa1). Зависимость значений T от состава оливина, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100Mg_m:Mg_{ol} + Mg_{ol}:3 + Si_m:5 - 12Ca_{ol} + (K_m + Na_m):2 + P:2$$

$$T = 5.88K_1 + 1097.28(POLTa2)$$

Диапазон значений T 1400–2100 °C

Относительная ошибка 4–3 %

R = 0.93; N = 95; N₁ = 94; сигма = 61.7 °C; $\chi^2 = 2.05 (8)$

Диапазон давлений 20–175 кб

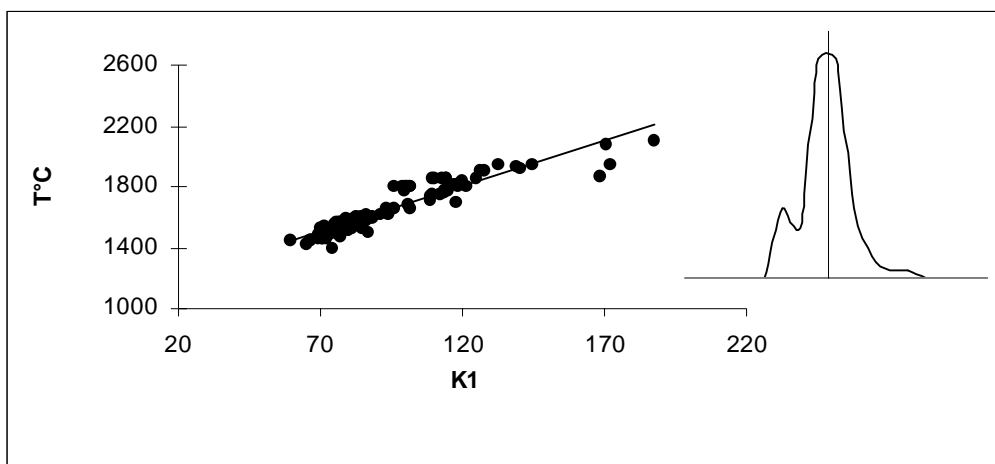


Рис. П.1.2.15 ol (формула POLTa2). Зависимость значений T от состава оливина, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100Mg_m:Mg_{ol} + Mg_{ol}:3 + (K_m + Na_m):2 - 15Ca_{ol} + P:2$$

$$T = 8.8K_1 + 886.75(POLTb1)$$

Диапазон значений T 1095–1600 °C

Относительная ошибка 3–2%

R = 0.92; N = 623; N₁ = 615; сигма = 36.1 °C; $\chi^2 = 1.86 (16)$

Диапазон давлений 1–20 кб

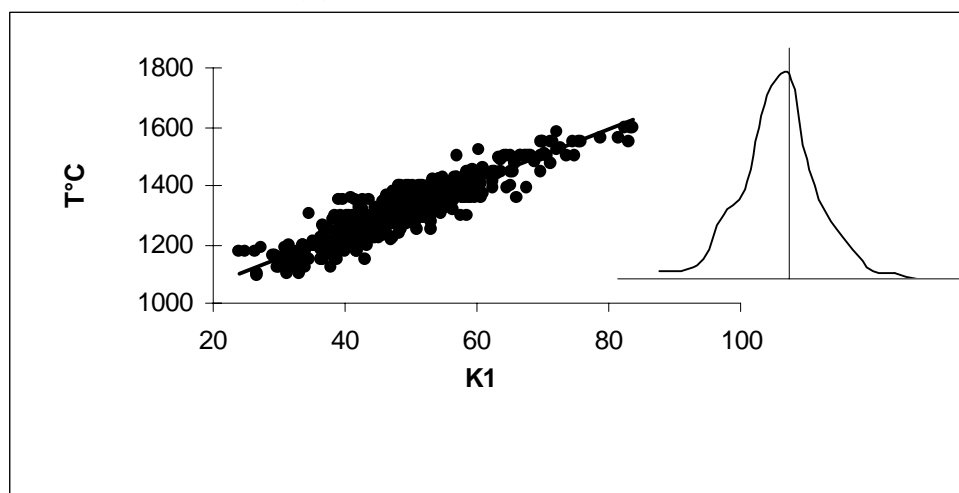


Рис. П.1.2.16 ol (формула POLTb1). Зависимость значений T от состава оливина, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100Mg_m:Mg_{ol} + Mg_{ol}:3 + (K_m + Na_m):3 - Al_m + P:2.6$$

$$T = 6.39K_1 + 1180.17(POL Tb2)$$

Диапазон значений T 1400–2100 °C

Относительная ошибка 4–3 %

$$R = 0.95; N = 95; N_1 = 93; \text{сигма} = 52.5 \text{ °C}; \chi^2 = 1.64 (8)$$

Диапазон давлений 20–175 кб

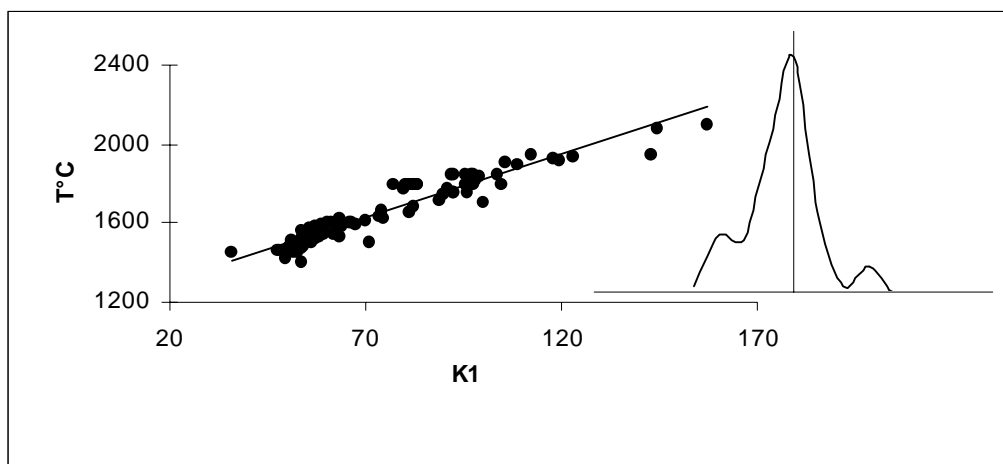


Рис. П.1.2.17 ol (формула POL Tb2). Зависимость значений T от состава оливина, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = 90Fe_m^{2+}:Fe_{ol}^{2+} + Mg_{ol} - (K_m + Na_m) - Ca_m - Ti_m + Si_m + 2P$$

$$T = 2.93K_1 + 776.11(POL Tf1)$$

Диапазон значений T 1095–1615 °C

Относительная ошибка 4–2 %

$$R = 0.9; N = 623; N_1 = 604; \text{сигма} = 38.9 \text{ °C}; \chi^2 = 4.73 (16)$$

Диапазон давлений 1–20 кб

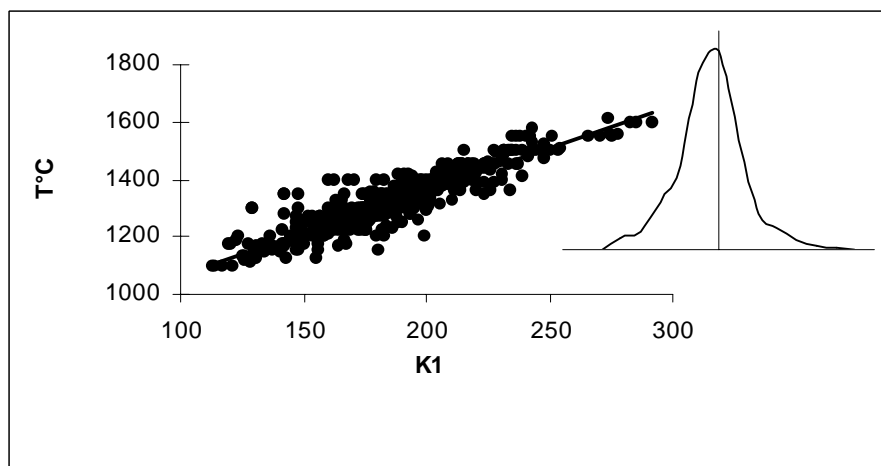


Рис. П.1.2.18 ol (формула POL Tf1). Зависимость значений T от состава оливина, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = 110Fe_m^{2+}:Fe_{ol}^{2+} + Mg_{ol} - (K_m + Na_m) - Ca_m - 2Ti_m + Si_m + 0.8P$$

$$T = 2.62K_1 + 938.52(POLTF2)$$

Диапазон значений T 1400–2100 °C

Относительная ошибка 4–3 %

$$R = 0.94; N = 95; N_1 = 94; \text{сигма} = 54.3 \text{ °C}; \chi^2 = 1.71 (8)$$

Диапазон давлений 20–175 кб

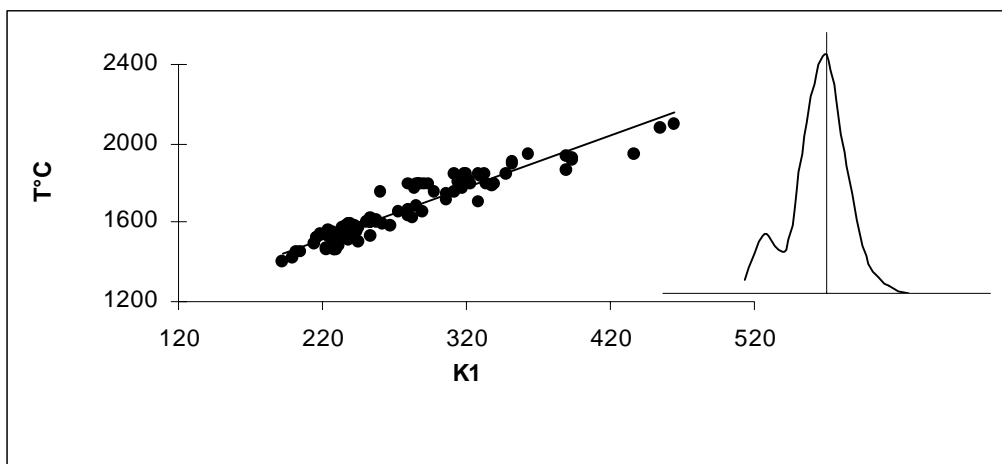


Рис. П.1.2.19 ol (формула POLTF2). Зависимость значений T от состава оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Величина среднеквадратичного отклонения для значений температуры, рассчитанных по 3 формулам в интервале 1–20 кб равно 23.9 °C; в интервале 20–175 кб равно 55.16 °C.

4.3. Система расплав–ортопироксен

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [19; 35; 37; 38; 39; 41; 44; 47; 48; 49; 56; 59; 72; 82; 85; 86; 87; 88; 91; 95; 156; 158; 159; 167; 168; 175; 177; 181; 239; 243; 244; 247; 254; 258; 262; 267; 268; 269; 272; 273; 277; 278; 279; 288; 291; 292; 296; 298; 299; 300; 302; 309; 314; 315; 318; 322; 323; 324; 325; 327; 335; 337; 339; 340; 346].

Используемые данные: общее число точек – 554 парных анализа. После исключения анализов составов ортопироксенов и стекол с суммами окислов менее 98 % и более 102 % – 522 т. При расчете содержания кремния по распределению железа были отброшены точки с нулевыми и < 5.66 % содержаниями железа в расплаве – 435 т. Для расчетов содержаний магния были отброшены точки с содержаниями в расплаве < 2 % – 464 т. Для расчетов содержаний хрома были отброшены точки с нулевыми содержаниями хрома – 331 т. Для расчета давления выборка была разбита на 2 массива: 3–30кб – 432 т. и > 30–110 кб – 17 т.

Таблица П.І.3.1 орх. Диапазоны составов стекол (расплавов) и ортопироксенов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

<i>PLOP</i>		Стекла		Ортопироксены		Wo	0.4–17.4
SiO ₂	31.5–76.6	Si	32.04–73.11	SiO ₂	45.4–58.7	Si	42.52–50.35
TiO ₂	0–21.83	Ti	0–15.49	TiO ₂	0–1.79	Ti	0–1.15
Al ₂ O ₃	3.42–24.01	Al	3.55–25.76	Al ₂ O ₃	0.29–12.2	Al	0.29–12.37
FeO	1.54–26.7	Fe	1.22–22.01	FeO	2.37–35.3	Fe	1.69–29.68
MnO	0–0.58	Mn	0–0.46	MnO	0–0.88	Mn	0–0.68
MgO	0.16–31.5	Mg	0.23–41.4	MgO	8.5–36.9	Mg	12.74–46.8
CaO	0.73–15.4	Ca	0.74–15.04	CaO	0.19–8.12	Ca	0.19–7.8
Na ₂ O	0–7.49	Na	0–12.82	Na ₂ O	0–0.76	Na	0–1.27
K ₂ O	0–6.57	K	0–7.75	K ₂ O	0–0.2	K	0–0.22
Cr ₂ O ₃	0–1.48	Cr	0–1.06	Cr ₂ O ₃	0–2.05	Cr	0–1.39
T °C	850–1950	P, кб	0.1–110	En	29.8–94.3	Fs	3.5–69.4

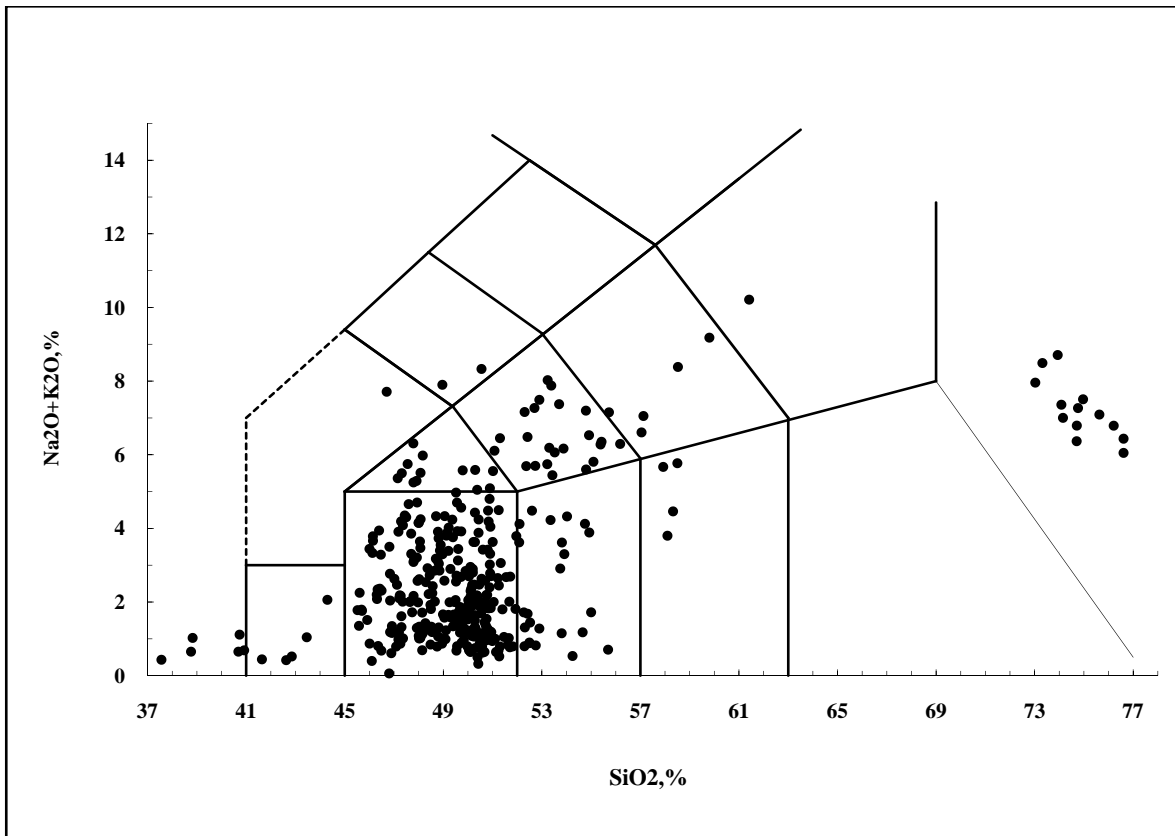


Рис. П.1.3.1 орх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами ортопироксена, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = 14 \ln(Mg_{op}:Mg_m) + 2Si_{op}$$

$$Si_m = 0.55K_1 - 14.19(PLOP1a)$$

Диапазон значений Si 35.8–73.1 (атом.%)

Относительная ошибка 5–3 %

$$R = 0.92; N = 522; N_1 = 512; \text{сигма} = 1.94; \chi^2 = 3.32 (16)$$

Диапазон давлений 0.1–110 кб

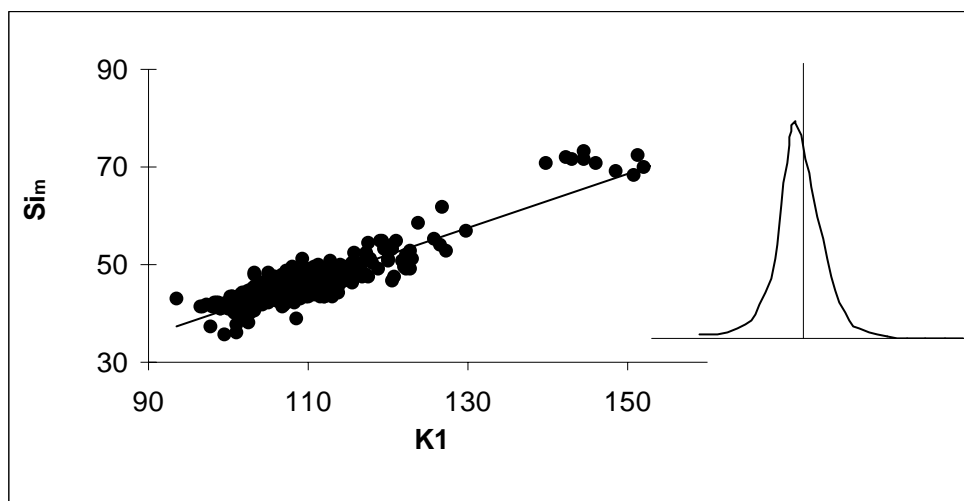


Рис. П.1.3.2 орх (формула PLOP1a). Зависимость содержаний Si_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 25Ln(Fe^{2+}_{op}:Fe^{2+}_m) + 2Si_{op}$$

$$Si_m = 0.3K_1 + 18.74(PLOP1b)$$

Диапазон значений Si 35.5–72.5 (атом. %)

Относительная ошибка 5–2 %

R = 0.93; N = 477; N₁ = 461; сигма = 1.66; $\chi^2 = 2.66$ (12)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

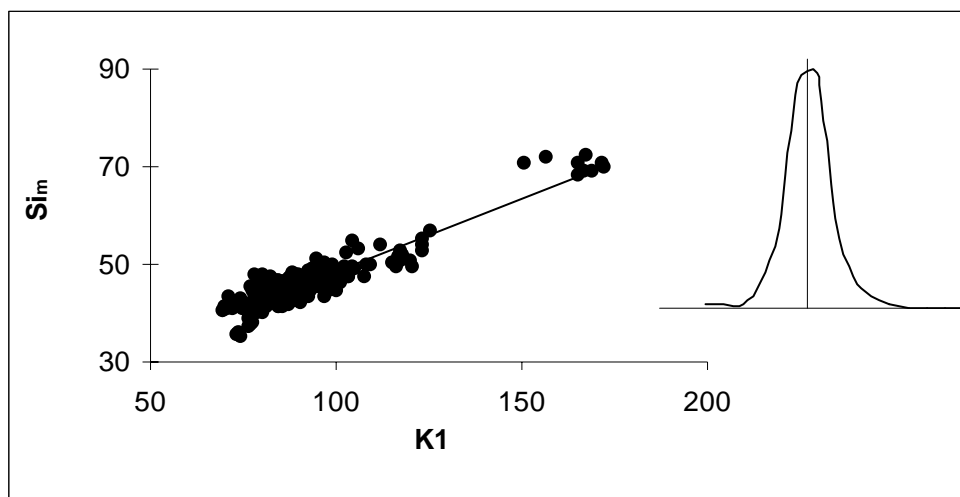


Рис. П.І.3.3 орх (формула PLOP1b). Зависимость содержаний Si_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Величина среднеквадратичного отклонения при расчетах по этим формулам составляет 1.2 в интервале давлений 0.1–110 кб.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = (Ti_{op}Mg_{op} + 1.4Fe^{2+}_m):10$$

$$Ti_m = 0.83K_1 - 0.42(PLOP2a)$$

Диапазон значений Ti 0.08–3.45 (атом. %)

Относительная ошибка 350–9 %

R = 0.86; N = 435; N₁ = 428; сигма = 0.3; $\chi^2 = 6.33$ (12)

Диапазон давлений 0.1–70 кб

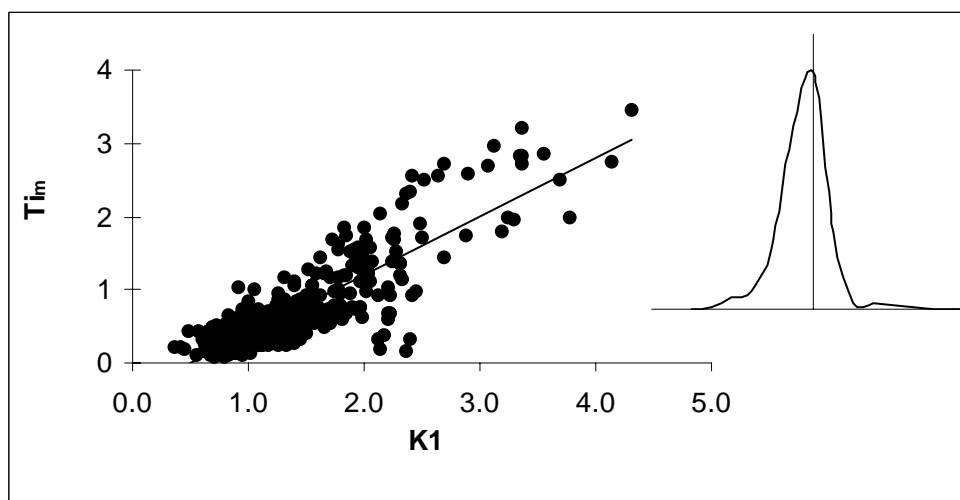


Рис. П.І.3.4 орх (формула PLOP2a). Зависимость содержаний Ti_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Ti_{op}Mg_{op} + Mg_m:5$$

$$Ti_m = 0.14K_1 - 0.32(PLOP2b)$$

Диапазон значений Ti 0.08–4.75 (атом. %)

Относительная ошибка 400–7 %

R = 0.85; N = 435; N₁ = 430; сигма = 0.32; $\chi^2 = 9.73$ (12)

Диапазон давлений 0.1–70 кб

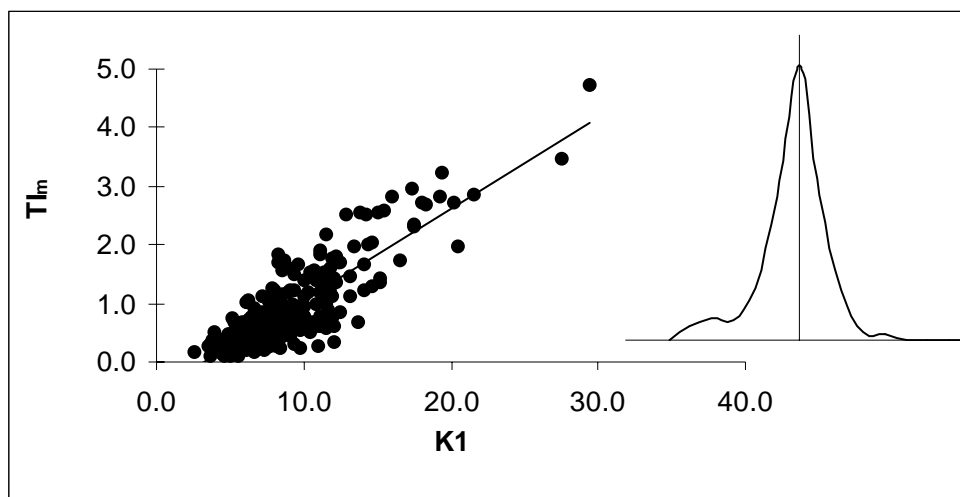


Рис. П.І.3.5 орх (формула PLOP2b). Зависимость содержаний Ti_m от состава ортопироксена, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Величина средноквадратичного отклонения при расчетах по этим формулам составляет 0.14 в интервале давлений 0.1–70 кб.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Al_{op} - Fe^{2+}_m:2 - P:6$$

$$Al_m = 0.86K_1 + 16.96(PLOP3a)$$

Диапазон значений Al 3.5–25.8 (атом. %)

Относительная ошибка 54–7 %

R = 0.86; N = 477; N₁ = 467; сигма = 1.9; $\chi^2 = 3.68$ (12)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

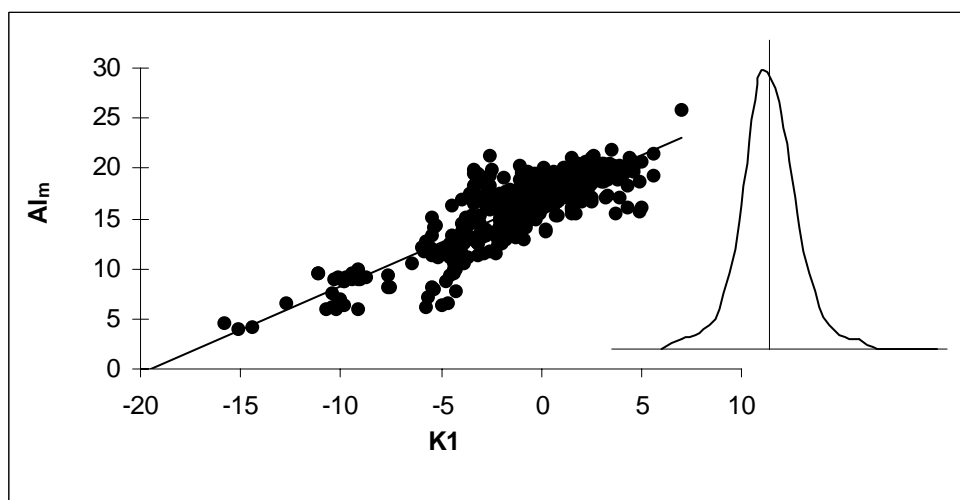


Рис. П.І.3.6 орх (формула PLOP3a). Зависимость содержаний Al_m от состава ортопироксена, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = 8Ti_{op} + Fe^{2+}_{op}:2.5 - Al_{op} + Mg_m:2 + P:8$$

$$Al_m = -0.73K_1 + 22.23(PLOP3b)$$

Диапазон значений Al 4–25.8 (атом. %)

Относительная ошибка 49–7 %

R = -0.93; N = 477; N₁ = 466; сигма = 1.4; $\chi^2 = 7.07$ (12)

Диапазон давлений 0.1–80 кб

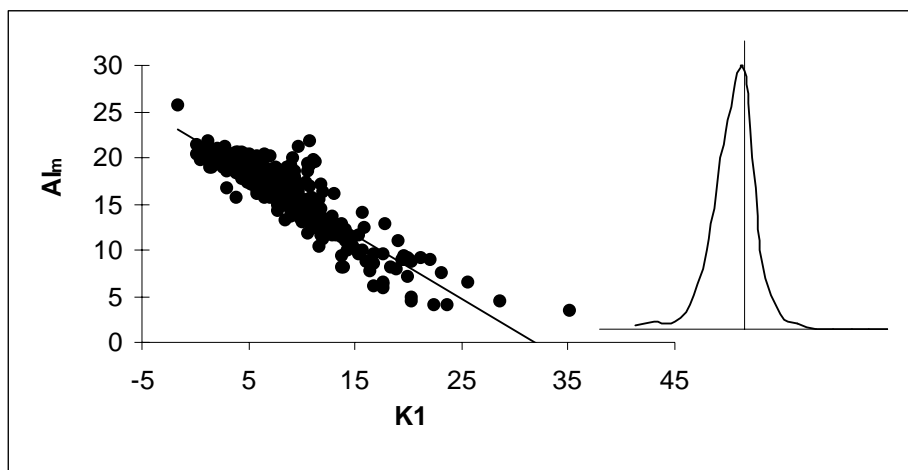


Рис. П.1.3.7 орх (формула PLOP3b). Зависимость содержаний Al_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Величина среднеквадратичного отклонения при расчетах по этим формулам составляет 1.6 в интервале давлений 0.1–80 кб.

Расчет содержаний железа двухвалентного в расплаве

$$K_1 = [Mg_m(Fe^{2+}_{op} - Ca_{op}:3) - Si_m:2]:10$$

$$Fe^{2+}_m = 0.82K_1 + 2.97(PLOP5)$$

Диапазон значений Fe²⁺ 1.22–22 (атом. %)

Относительная ошибка 90–5 %

R = 0.91; N = 477; N₁ = 467; сигма = 1.1; $\chi^2 = 11.9$ (12)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

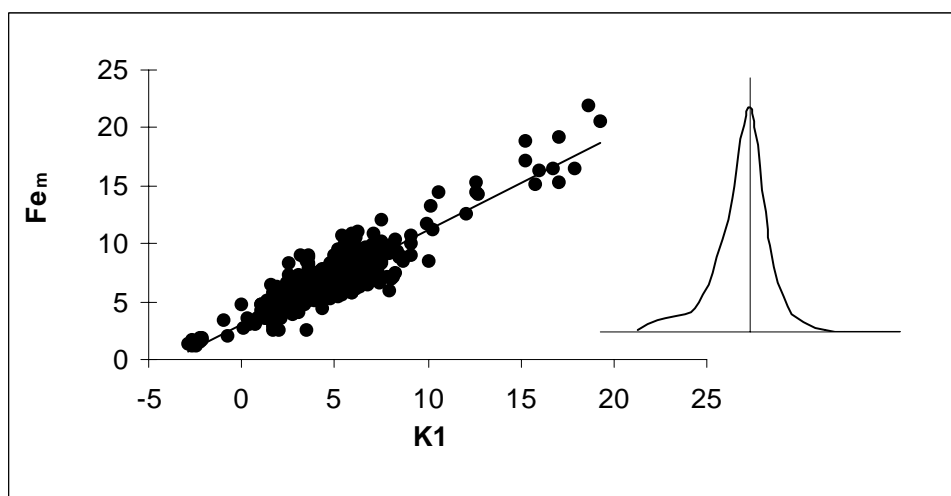


Рис. П.1.3.8 орх (формула PLOP5). Зависимость содержаний Fe²⁺_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = [Mg_m(Fe^{2+}_{op} + Ti_{op} - Ca_{op}:4) + (K_m + Na_m) - Si_m:2]:10$$

$$Fe^{2+}_m = 0.82K_1 + 2.25(PLOP5a)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 1.22–22 (атом. %)

Относительная ошибка 84–5 %

$R = 0.92$; $N = 477$; $N_1 = 466$; $\sigma = 1$; $\chi^2 = 8.1$ (12)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

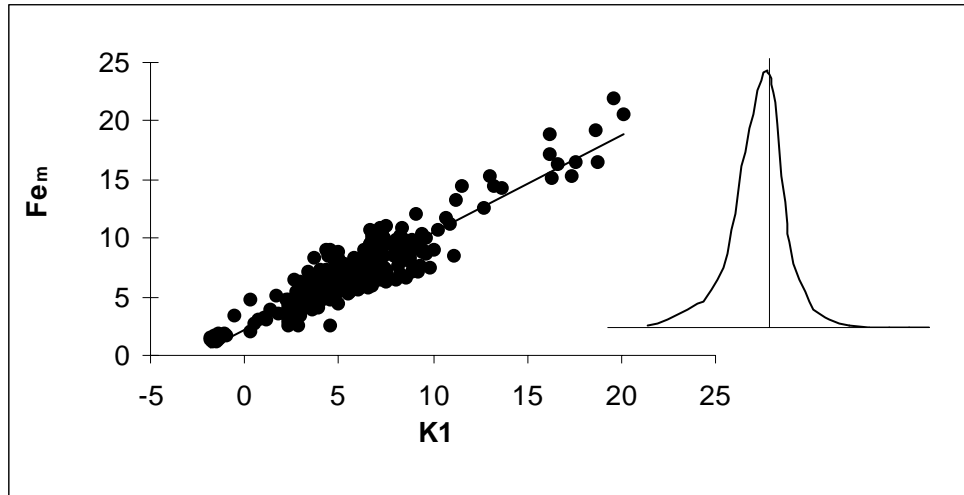


Рис. II.3.9 орх (формула PLOP5a). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = 20Mg_{op}:Si_m - Al_m:2$$

$$Mg_m = 1.9K_1 - 1.37(PLOP7a)$$

Диапазон значений Mg 1.9–41.4 (атом. %)

Относительная ошибка 105–5 %

$R = 0.95$; $N = 464$; $N_1 = 455$; $\sigma = 2$; $\chi^2 = 2.37$ (12)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

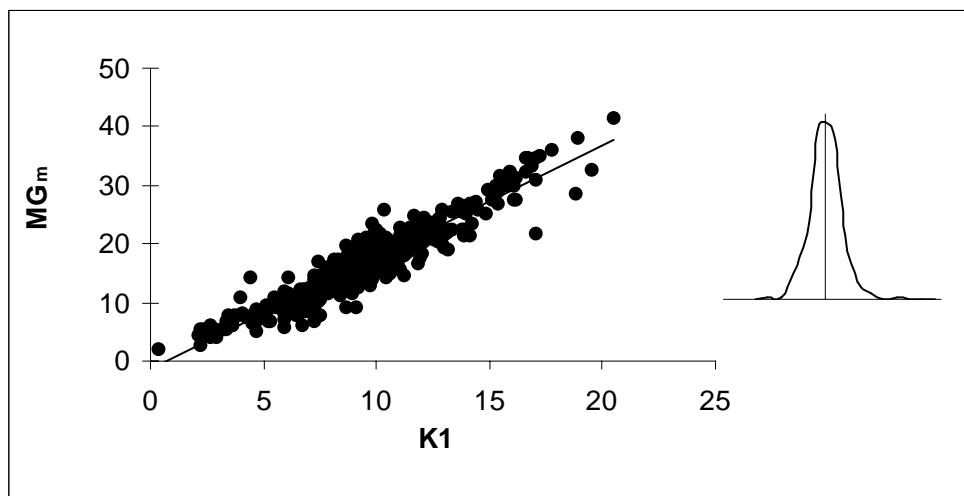


Рис. II.3.10 орх (формула PLOP7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 20Mg_{op}:Si_m + Si_{op}:2 + P:12$$

$$Mg_m = 2.27K_1 - 79.77(PLOP7b)$$

Диапазон значений Mg 1.9–41.4 (атом. %)

Относительная ошибка 130–6 %

$R = 0.91$; $N = 464$; $N_1 = 455$; сигма = 2.5; $\chi^2 = 2.92$ (12)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

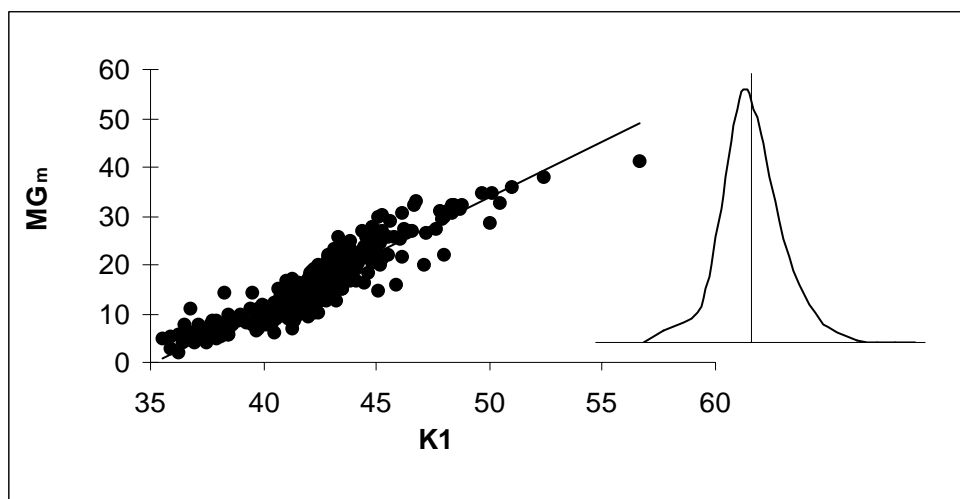


Рис. П.І.3.11 орх (формула PLOP7b). Зависимость содержаний Mg_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 17Mg_{op}:Si_m + Si_{op} + T:100$$

$$Mg_m = 1.88K_1 - 125.88(PLOP7c)$$

Диапазон значений Mg 1.9–41.4 (атом. %)

Относительная ошибка 126–6 %

$R = 0.93$; $N = 464$; $N_1 = 459$; сигма = 2.4; $\chi^2 = 0.74$ (12)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

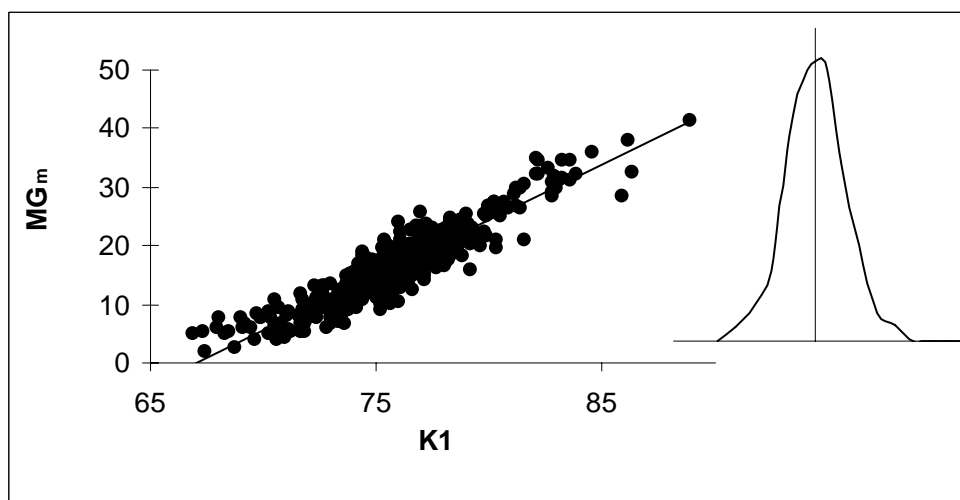


Рис. П.І.3.12 орх (формула PLOP7c). Зависимость содержаний Mg_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Величина среднеквадратичного отклонения при расчетах по этим формулам составляет 1.9 в интервале давлений 0.1–110 кб.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = 11Ca_{op} + Al_{op} + Fe^{2+}_{op}:4 + Si_m:3 + Al_m - 2Fe^{2+}_m - Mg_m:1.5 - 5(K_m + Na_m)$$

$$Ca_m = 0.13K_1 + 8.23 \text{ (PLOP8)}$$

Диапазон значений Ca 3–15 (атом. %)

Относительная ошибка 33–7 %

R = 0.9; N = 464; N₁ = 458; сигма = 1; $\chi^2 = 1.78$ (12)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

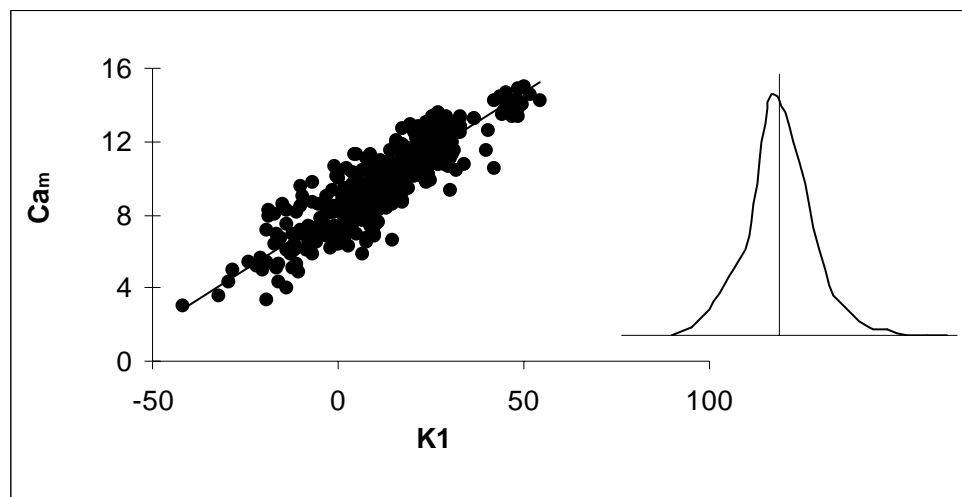


Рис. П.І.3.13 орх (формула PLOP8). Зависимость содержаний Ca_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний хрома в расплаве

$$K_1 = (Cr_{op}Mg_m - Al_m:2 + Fe^{2+}_m:3):10$$

$$Cr_m = 0.2K_1 + 0.13 \text{ (PLOP11)}$$

Диапазон значений Cr 0.007–0.85 (атом. %)

Относительная ошибка 1300–11 %

R = 0.86; N = 331; N₁ = 327; сигма = 0.09; $\chi^2 = 6.33$ (12)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

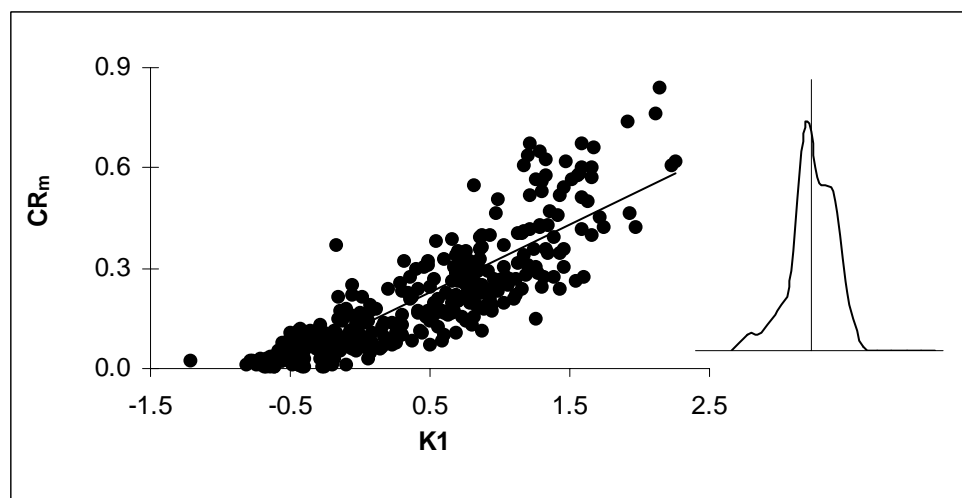


Рис. П.І.3.14 орх (формула PLOP11). Зависимость содержаний Cr_m от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет величины железо(+2)-магниевого отношения в расплаве

$$K_1 = \text{Fe}^{2+}_{\text{op}}/\text{Mg}_{\text{op}}; K_2 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_m$$

$$K_2 = 3.42K_1 - 0.01(\text{PLOP14a})$$

Диапазон значений K_2 0.14–2.13; K_1 0.04–0.6

Относительная ошибка 57–4 %

$R = 0.96$; $N = 464$; $N_1 = 450$; сигма = 0.08; $\chi^2 = 39.98$ (12)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

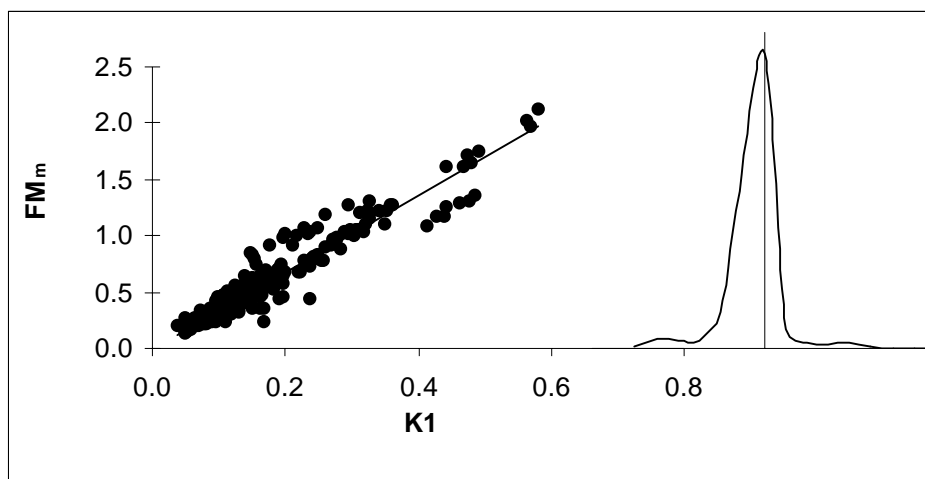


Рис. П.1.3.15 орх (формула PLOP14a). Зависимость величины $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_m$ от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 20\text{Fe}^{2+}_{\text{op}}/\text{Mg}_{\text{op}}\text{Si}_m; K_2 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_m$$

$$K_2 = 7.92K_1 - 0.02(\text{PLOP14b})$$

Диапазон значений K_2 0.14–2.13; K_1 0.04–0.6

Относительная ошибка 57–4 %

$R = 0.97$; $N = 464$; $N_1 = 450$; сигма = 0.08; $\chi^2 = 17.94$ (12)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

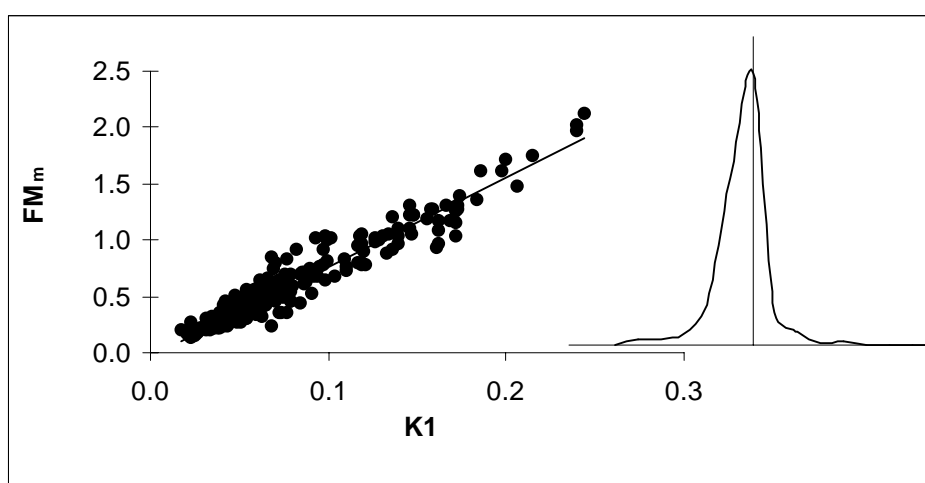


Рис. П.1.3.16 орх (формула PLOP14b). Зависимость величины $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_m$ от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Величина среднеквадратичного отклонения при расчетах по этим формулам составляет 0.06 в интервале давлений 0.1–110 кб.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = 100Mg_m:Mg_{op} + P:2$$

$$T = 6.79K_1 + 1024.32(PLOPTa)$$

Диапазон значений T 1115–1950 °C

Относительная ошибка 4–2 %

$R = 0.94$; $N = 464$; $N_1 = 460$; сигма = 41.3 °C; $\chi^2 = 1.85$ (12)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

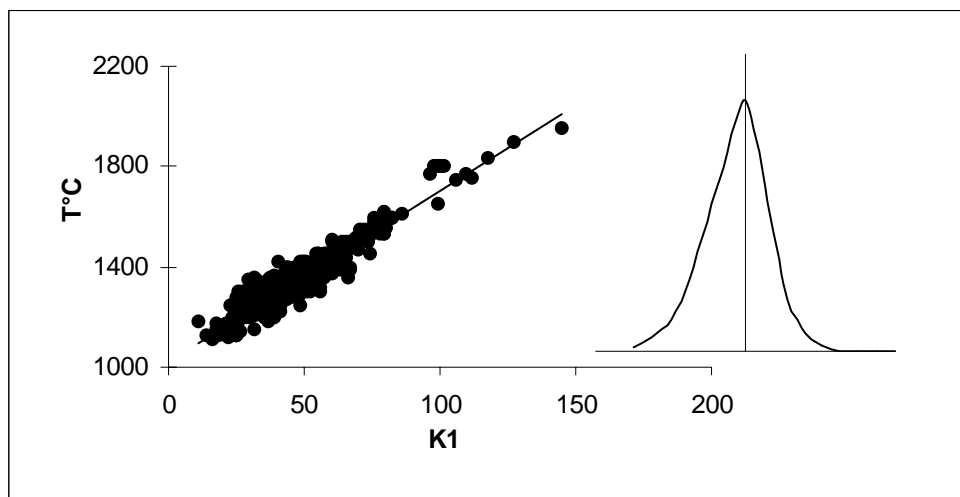


Рис. П.І.3.17 орх (формула PLOPTa). Зависимость значений T от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 10Fe^{2+}_m:(Fe^{2+}_{op} + Ti_{op}) + P:3$$

$$T = 17.73K_1 + 1032.62(PLOPTf)$$

Диапазон значений T 1115–1900 °C

Относительная ошибка 4–2 %

$R = 0.94$; $N = 464$; $N_1 = 459$; сигма = 42.3 °C; $\chi^2 = 2.78$ (12)

Диапазон давлений 0.1–80 кб

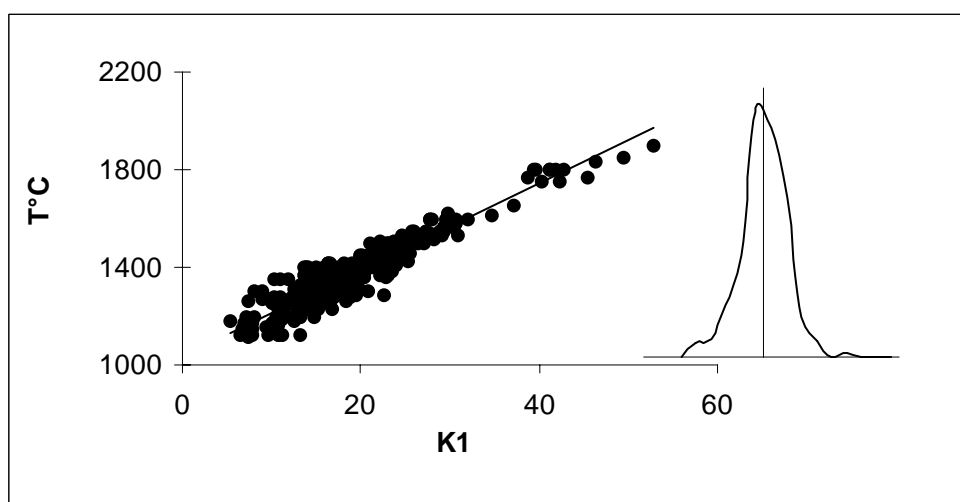


Рис. П.І.3.18 орх (формула PLOPTf). Зависимость значений T от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Величина среднеквадратичного отклонения при расчетах по этим формулам составляет 38.4 °C в интервале давлений 0.1–80 кб.

Расчет давления

$$K_1 = Al_{op} + Fe^{2+}_{op}:3 - Si_m:3 - Al_m:1.5 + (K_m + Na_m) + T:17$$

$$P = 0.66K_1 - 28.99(\text{PLOPPa})$$

Диапазон значений P 3–30 кб

Относительная ошибка 87–9 %

R = 0.85; N = 432; N₁ = 428; сигма = 2.6 кб; $\chi^2 = 1.55$ (12)

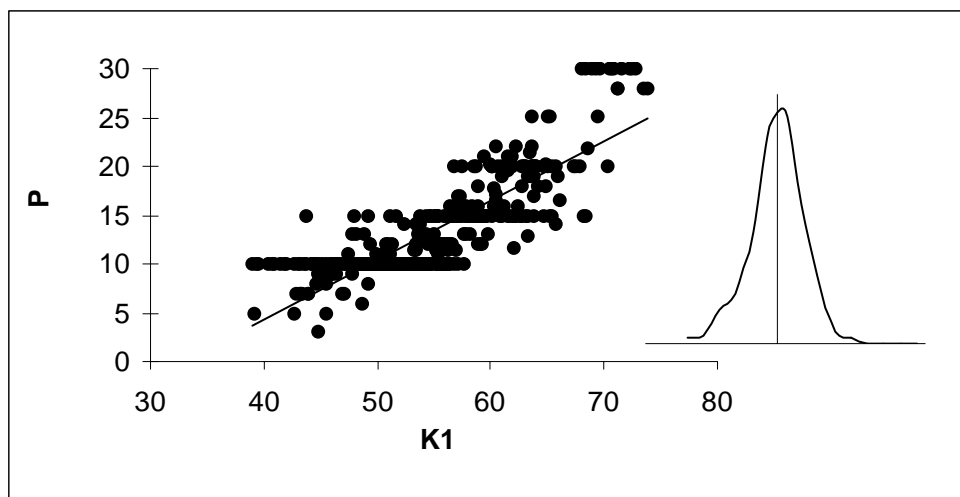


Рис. П.І.3.19 орх (формула PLOPPa). Зависимость величины P от состава ортопироксена, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = 0.8Al_{op} - Mg_{op} - Si_m:3 + Mg_m:1.5 + (K_m + Na_m) + T:14$$

$$P = 0.53K_1 - 18.69(\text{PLOPPb})$$

Диапазон значений P 3–30 кб

Относительная ошибка 87–9 %

R = 0.86; N = 433; N₁ = 429; сигма = 2.6 кб; $\chi^2 = 4.34$ (12)

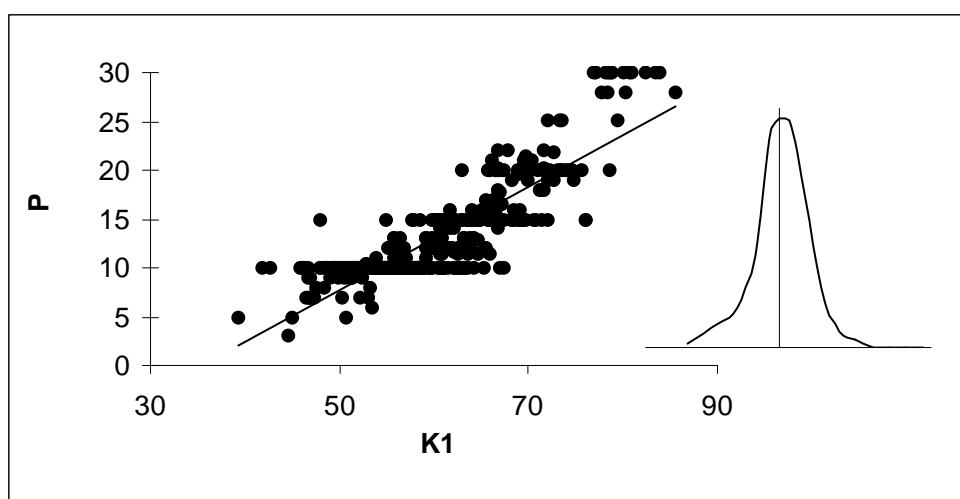


Рис. П.І.3.20 орх (формула PLOPPb). Зависимость величины P от состава ортопироксена, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расхождение (сигма) при расчетах по формулам PLOPPa и PLOPPb равно 1 кб.

$$K_1 = (\text{Si}_{\text{op}} - 3\text{Al}_{\text{op}} + \text{Mg}_{\text{op}} + 6\text{Ca}_{\text{op}} - 1.6\text{Al}_{\text{m}} + 3\text{Mg}_{\text{m}} - 3\text{Si}_{\text{m}}):10; K_2 = \text{Ln}P$$

$$K_2 = 0.13K_1 + 3.28(\text{PLOPPc})$$

Диапазон значений P 30–110 кб

Относительная ошибка 6–2 %

$R = 0.96$; $N = 31$; $N_1 = 31$; сигма ~ 5.4 кб; $\chi^2 = 5.49$ (8)

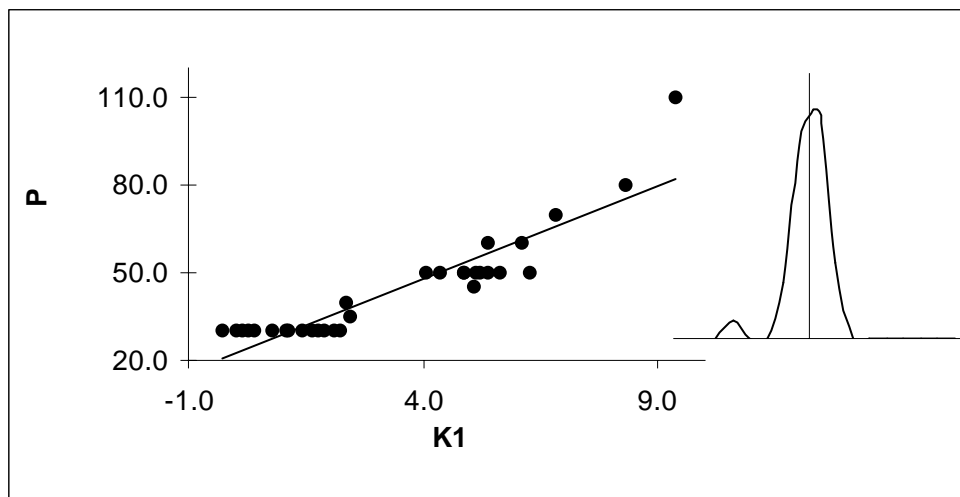


Рис. П.І.3.21 орх (формула PLOPPc). Зависимость величины P от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

4.4. Система расплав–клинопироксен

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [8; 19; 29; 30; 33; 35; 37; 38; 39; 41; 47; 49; 53; 54; 56; 80; 82; 84; 85; 86; 87; 88; 91; 92; 156; 158; 159; 175; 177; 181; 186; 201; 204; 244; 247; 258; 262; 267; 269; 272; 273; 274; 278; 279; 288; 291; 296; 298; 299; 300; 304; 309; 314; 315; 319; 320; 321; 322; 323; 324; 325; 327; 328; 335; 337; 339; 340; 347; D1].

Используемые данные: общее число точек – 649 парных анализов. После исключения анализов составов авгитов и стекол с суммами окислов менее 98 % и более 102 % – 552 т. Для расчета титана были удалены точки с нулевыми содержаниями в расплаве и

авгите, а также точки с содержаниями в расплаве > 5 % – 493 т. Для расчета марганца были удалены точки с содержаниями < 0.05 % в расплаве и кристаллах авгита – 374 т. Для расчета содержания натрия были удалены точки с нулевыми его содержаниями в расплаве и авгите – 509 т. Для расчета содержания хрома были отброшены точки с его нулевыми содержаниями в расплаве и авгите – 238 т. Для расчета давления были использованы точки с давлением > 5 кб – 533 т. Для расчета равновесия внутри кристаллов авгита были исключены составы с нулевыми содержаниями титана и натрия – 524 точки.

Таблица II.1.4.1 срх. Диапазоны составов стекол (расплавов) и клинопироксенов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

PLAV		Стекла		Авгиты		Wo	0.4–17.4
SiO ₂	38–63.84	Si	37.04–61.56	SiO ₂	44.5–56.39	Si	40.26–50.46
TiO ₂	0–8.5	Ti	0–6.35	TiO ₂	0 – 6.0	Ti	0–4.21
Al ₂ O ₃	2.23–24.01	Al	2.45–25.76	Al ₂ O ₃	0.78–25.76	Al	0.82–27.46
FeO	2.65–28.9	Fe	2.02–23.56	FeO	1.84–19.6	Fe	1.37–15.53
MnO	0–0.52	Mn	0–0.42	MnO	0–0.65	Mn	0–0.52
MgO	0.81–31.3	Mg	1.14–40.79	MgO	5.05–28.49	Mg	6.81–37.21
CaO	2.84–19.1	Ca	2.86–18.72	CaO	5.48–23	Ca	5.31–22.77
Na ₂ O	0–7.71	Na	0–13.7	Na ₂ O	0–4.87	Na	0–8.52
K ₂ O	0–6.72	K	0–7.95	K ₂ O	0–0.36	K	0–0.44
Cr ₂ O ₃	0–1.31	Cr	0–0.94	Cr ₂ O ₃	0–2.11	Cr	0–1.49
T °C	1100–1963	P, кб	1.5–75	En	25.7–77.6	Fs	2.8–36.0

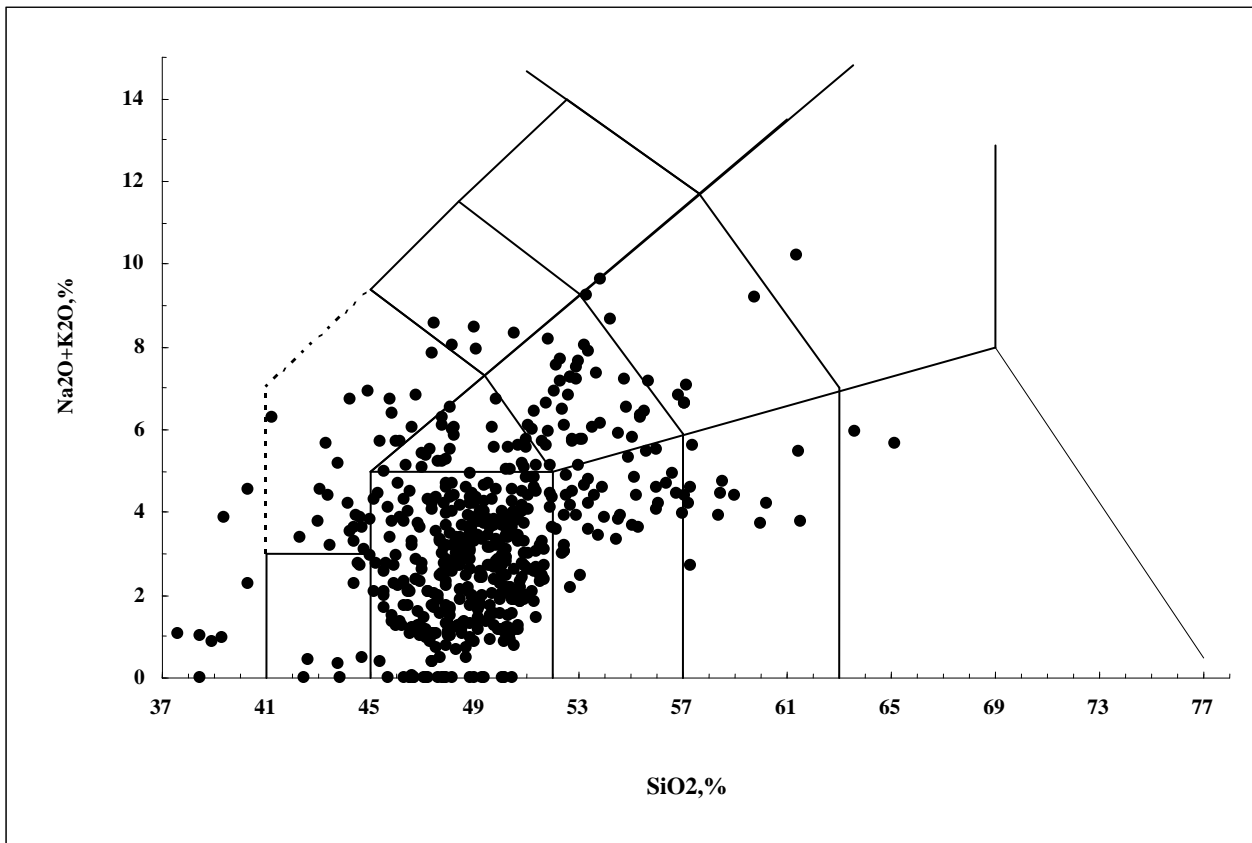


Рис. П.1.4.1 срх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами клинопироксена, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = Al_{av}:3 + Al_m:2 + 3Ti_{av} + Fe^{2+}_m + Mg_{av}:3 + Mg_m - Ca_{av}:7 - Si_{av}:3 - P:10$$

$$Si_m = -0.53K_1 + 56.96(PLAV1)$$

Диапазон значений Si 37–56.7 (атом. %)

Относительная ошибка 4–3 %

$R = -0.89$; $N = 552$; $N_1 = 544$; $\sigma = 1.4$; $\chi^2 = 1.44$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

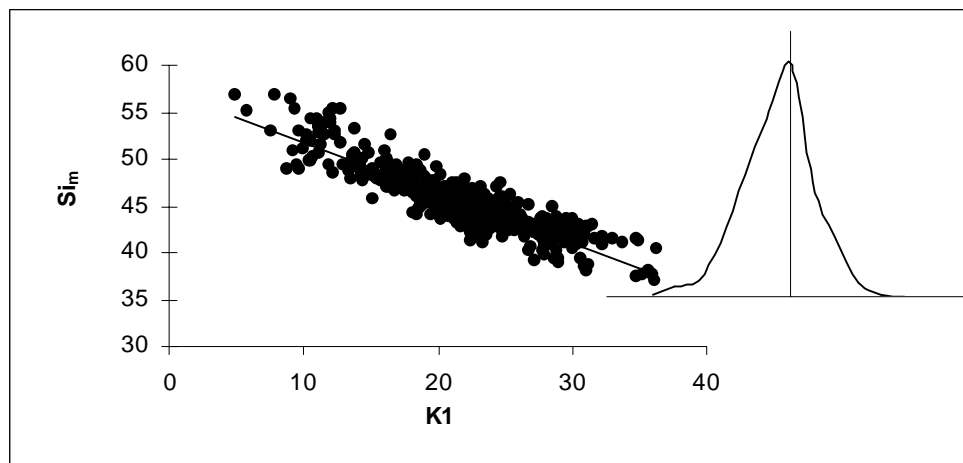


Рис. П.1.4.2 срх (формула **PLAV1**). Зависимость содержаний Si_m от состава авгита, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = Si_{av}:8 + 10Ti_{av} - Al_m:3 + Fe^{2+}_{av}:3.5 - Ca_{av}:7 + P:12$$

$$Ti_m = 0.2K_1 + 0.17(PLAV2)$$

Диапазон значений Ti 0.16–5 (атом. %)

Относительная ошибка 245–8 %

$R = 0.91$; $N = 493$; $N_1 = 488$; $\sigma = 0.39$; $\chi^2 = 8.64$ (12)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

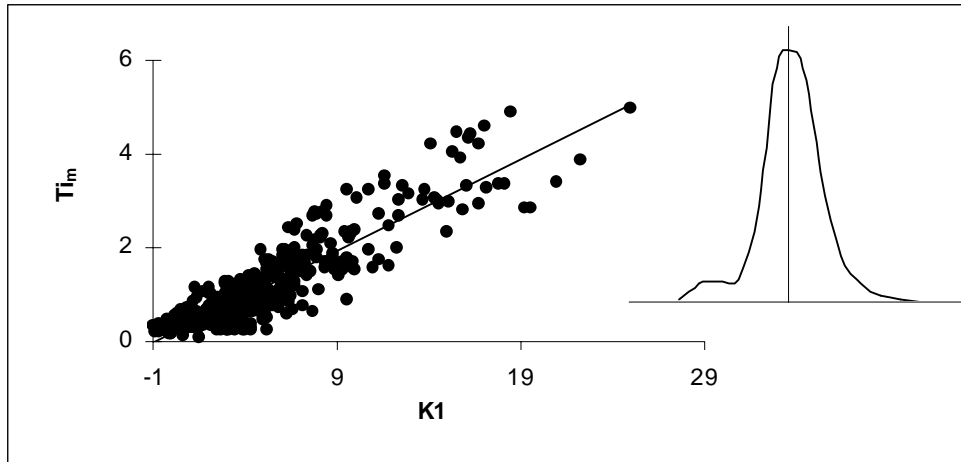


Рис. II.1.4.3 срх (формула PLAV2). Зависимость содержаний Ti_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Si_{av} + Ti_{av} - Al_{av}:4 - Fe^{2+}_{av}:5 - Ca_{av}:7 + Fe^{2+}_m:2 + Mg_m:6 + Ca_m:7 + P:6$$

$$Al_m = -0.73K_1 + 54.86(PLAV3)$$

Диапазон значений Al 2.5–25.8 (атом. %)

Относительная ошибка 56–6 %

$R = -0.87$; $N = 552$; $N_1 = 544$; $\sigma = 1.4$; $\chi^2 = 5.68$ (16)

Диапазон давлений 1.5–70 кб

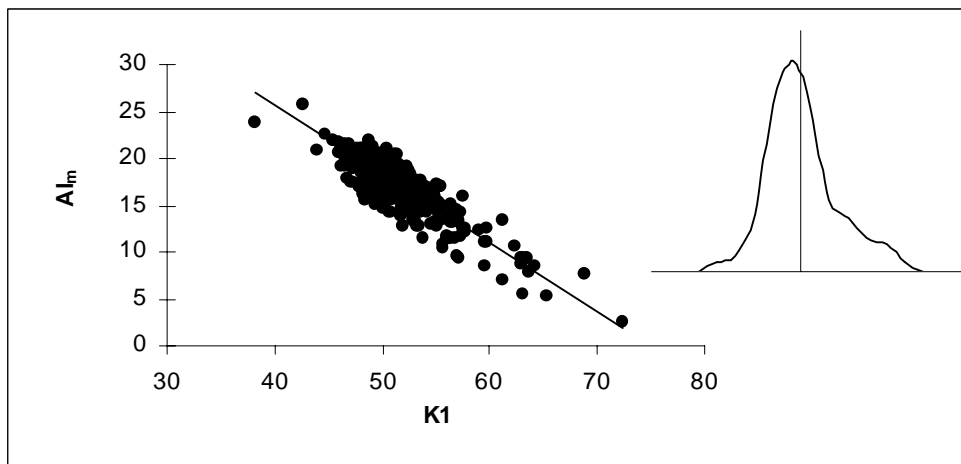


Рис. II.1.4.4 срх (формула PLAV3). Зависимость содержаний Al_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа двухвалентного в расплаве

$$K_1 = Ca_{av}:7 + Si_m:2.2 + Al_m:2 - Fe_{av}^{2+} - Ti_m$$

$$Fe_m^{2+} = -0.62K_1 + 23.16(PLAV5)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 2–23.5 (атом. %)

Относительная ошибка 58–5 %

$R = -0.9$; $N = 552$; $N_1 = 543$; $\sigma = 1.16$; $\chi^2 = 1.09$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

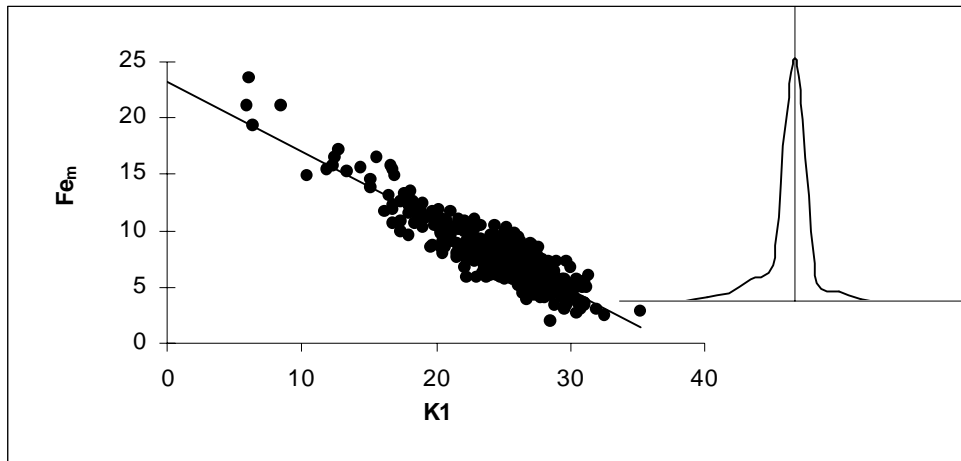


Рис. II.4.5 срх (формула PLAV5). Зависимость содержаний Fe_m^{2+} от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний марганца в расплаве

$$K_1 = Mn_{av}Fe_m^{2+}T:10000$$

$$Mn_m = 0.41K_1 + 0.07(PLAV6)$$

Диапазон значений Mn 0.046–0.39 (атом. %)

Относительная ошибка 65–8 %

$R = 0.84$; $N = 374$; $N_1 = 368$; $\sigma = 0.03$; $\chi^2 = 3.08$ (12)

Диапазон давлений 2–70 кб

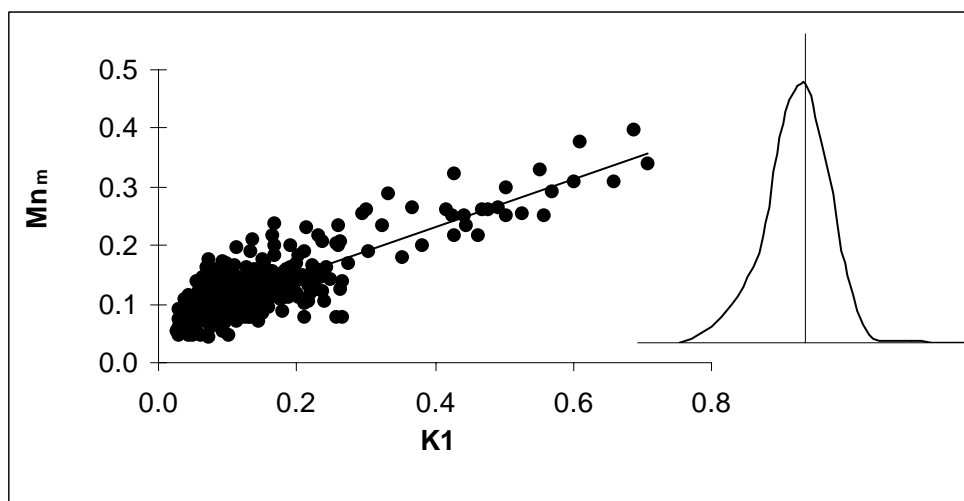


Рис. II.4.6 срх (формула PLAV6). Зависимость содержаний Mn_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Mg_{av}T:1200 + Ca_{av}:4 + 0,8(Na_{av} + K_{av}) - Fe^{2+}_{av}:3$$

$$Mg_m = 0.8K_1 - 11.17(PLAV7a)$$

Диапазон значений Mg 1.1–26.6 (атом. %)

Относительная ошибка 180–8 %

R = 0.92; N = 552; N₁ = 547; сигма = 2; $\chi^2 = 2.87$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

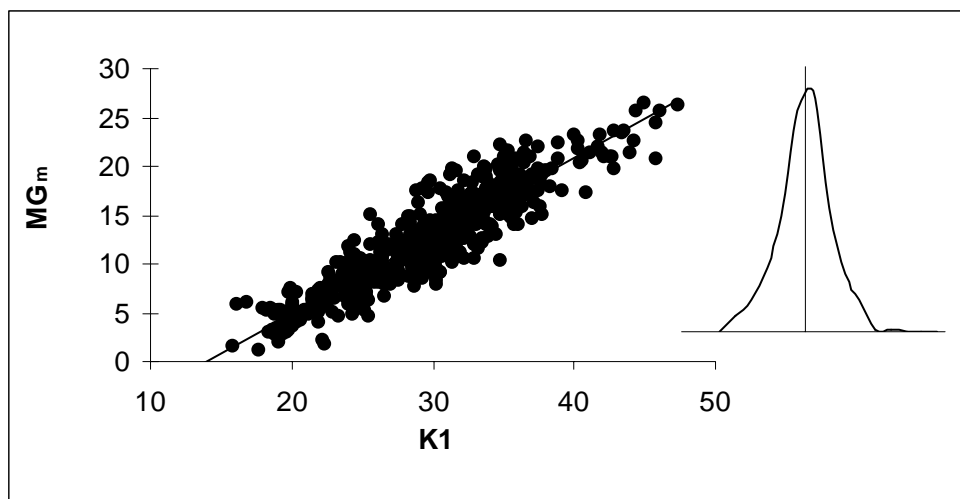


Рис. П.1.4.7 срх (формула PLAV7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава авгита и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = (Mg_{av}T:1300 + Ca_{av}:2 + 0.7(Na_{av} + K_{av}) - Fe^{2+}_{av}:3 - Si_m:4 - Al_m:4 - 0.7(Na_m + K_m))$$

$$Mg_m = 0.65K_1 + 5.08(PLAV7b)$$

Диапазон значений Mg 1.1–26.6 (атом. %)

Относительная ошибка 120–5 %

R = 0.97; N = 552; N₁ = 542; сигма = 1.3; $\chi^2 = 2.06$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

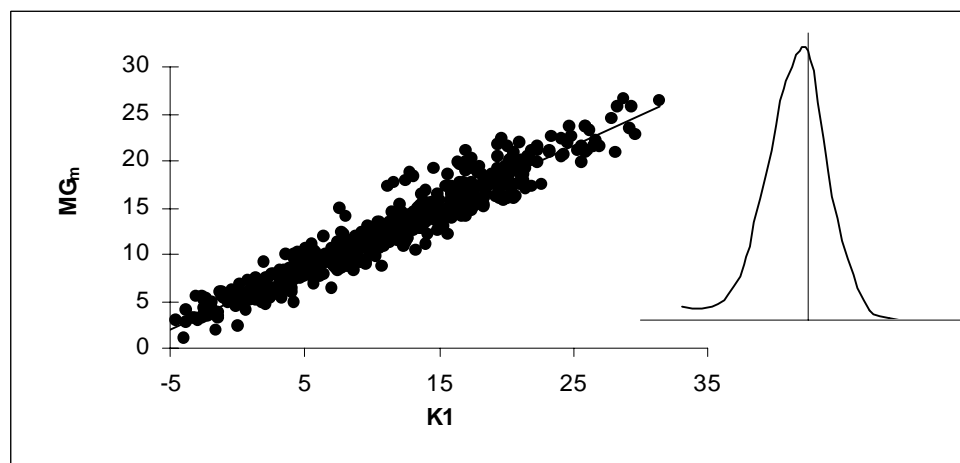


Рис. П.1.4.8 срх (формула PLAV7b). Зависимость содержаний Mg_m от состава авгита, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Si_{av}:8 - 2Ti_{av} + Al_{av}:5 + Fe^{2+}_{av} + Mg_{av}:2 + (Na_{av} + K_{av}) + Si_m:7 + 2(Na_m + K_m)$$

$$Ca_m = -0.33K_1 + 23.81(PLAV8)$$

Диапазон значений Ca 2.8–17.4 (атом. %)

Относительная ошибка 32–5 %

$$R = -0.93; N = 552; N_1 = 546; \text{сигма} = 0.88; \chi^2 = 5.54 (16)$$

Диапазон давлений 1.5–75 кб

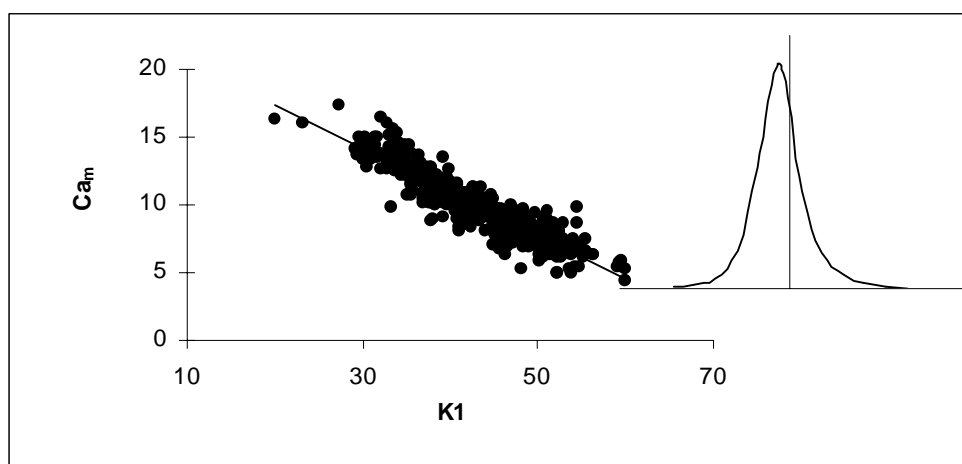


Рис. П.1.4.9 срх (формула PLAV8). Зависимость содержаний Ca_m от состава авгита, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний натрия в расплаве

$$K_1 = Fe^{2+}_{av}:4 + Mg_{av}:8 - Ti_{av} - Ca_{av}:8 - (Na_{av} + K_{av}) + Si_m:4 - Al_m:6 + 1.2Ca_m + P:7$$

$$Na_m = -0.56K_1 + 18.16(PLAV9)$$

Диапазон значений Na 0.6–12.5 (атом. %)

Относительная ошибка 180–10 %

$$R = -0.86; N = 509; N_1 = 504; \text{сигма} = 1.1; \chi^2 = 3.67 (16)$$

Диапазон давлений 1.5–75 кб

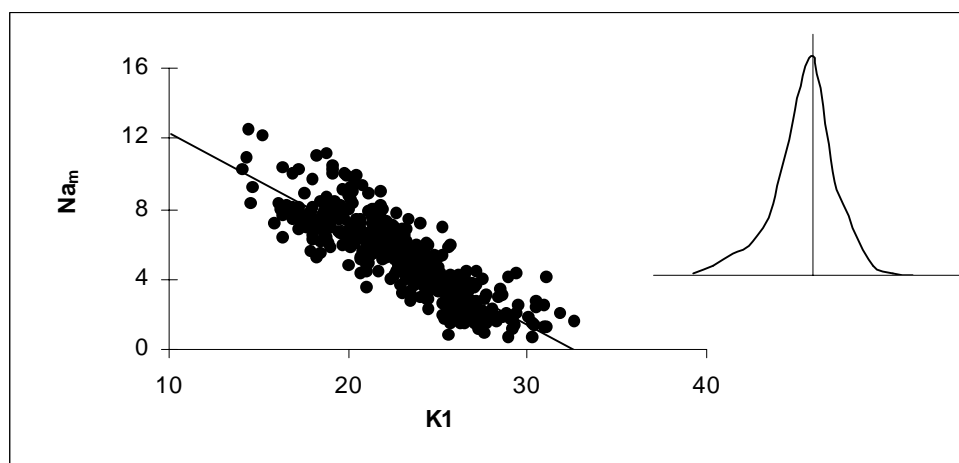


Рис. П.1.4.10 срх (формула PLAV9). Зависимость содержаний Na_m от состава авгита, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe_{av}^{2+}:2 - Ti_{av}:2 - (Na_{av} + K_{av}):3 + Si_m:3 + Fe_m^{2+}:6 + Mg_m:3 + Ca_m$$

$$Na_m = -0.72K_1 + 28.44(PLAV9a)$$

Диапазон значений Na 0.5–12.8 (атом. %)

Относительная ошибка 220–9 %

R = -0.88; N = 509; N₁ = 505; сигма = 1.1; $\chi^2 = 1.87$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

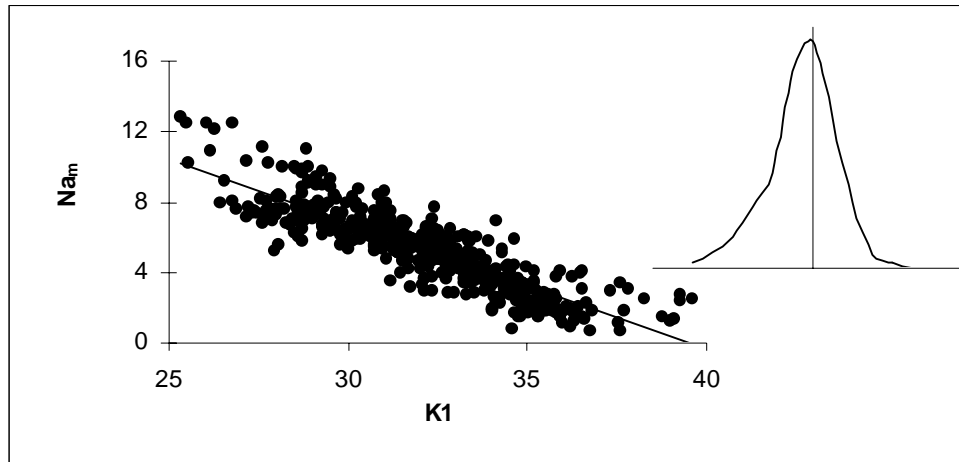


Рис. П.І.4.11 срх (формула PLAV9a). Зависимость содержаний Na_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний хрома в расплаве

$$K_1 = (50Cr_{av}:Al_{av} - Al_m:2 + Mg_m:4):10$$

$$Cr_m = 0.23K_1 + 0.13(PLAV11)$$

Диапазон значений Cr 0.03–0.95 (атом. %)

Относительная ошибка 230–7 %

R = 0.86; N = 238; N₁ = 233; сигма = 0.07; $\chi^2 = 3.24$ (12)

Диапазон давлений 1.5–70 кб

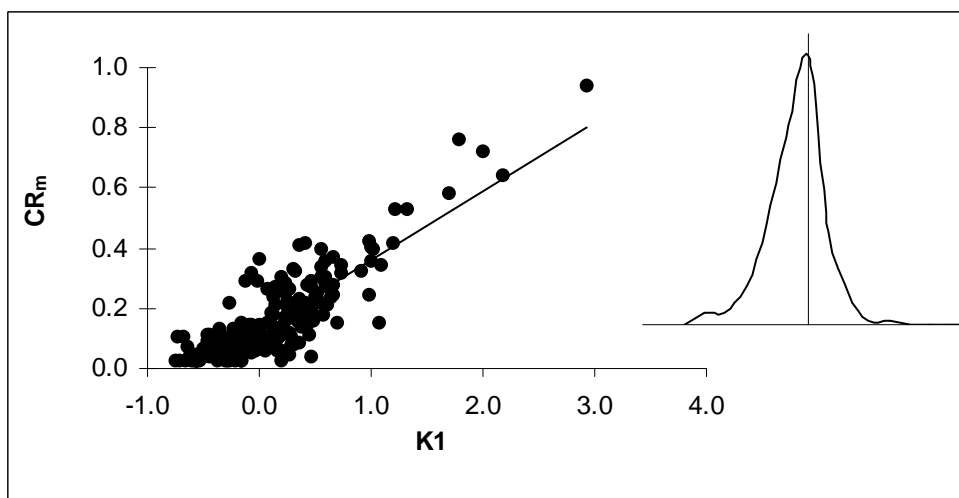


Рис. П.І.4.12 срх (формула PLAV11). Зависимость содержаний Cr_m от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет железо-магниевого отношения в расплаве

$$K_1 = (Fe^{2+}/Mg)_{av}; K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_m$$

$$K_2 = 3.53K_1 - 0.05(PLAV14a)$$

Диапазон значений K_2 0.14–3.2; K_1 0.04–0.82

Относительная ошибка 114–5 %

$R = 0.94$; $N = 552$; $N_1 = 536$; $\sigma = 0.16$; $\chi^2 = 11.76$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

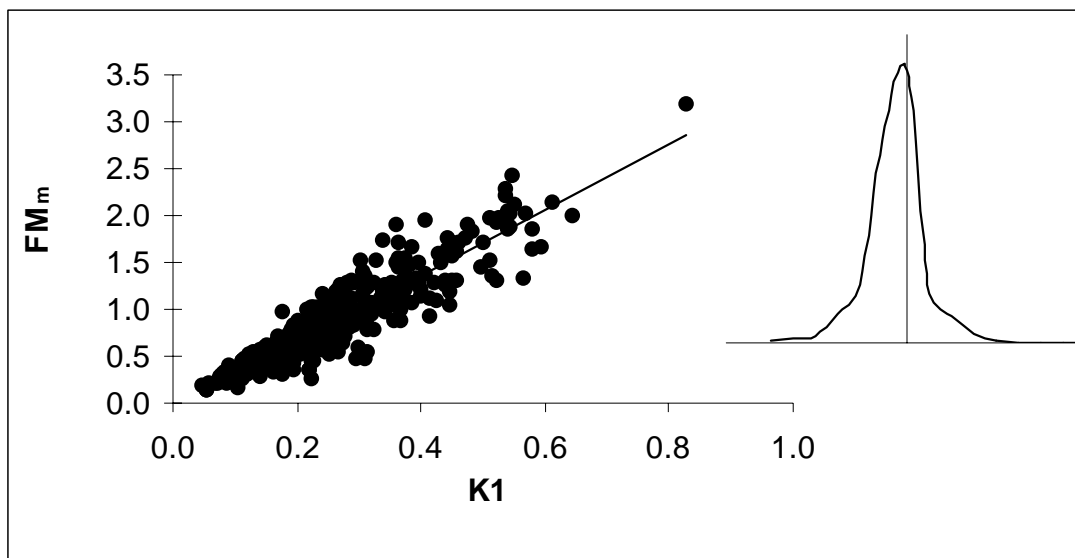


Рис. П.І.4.13 срх (формула PLAV14a). Зависимость значений K_2 от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = [(Fe^{2+} + Ti):Mg]_{av}; K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_m$$

$$K_2 = 3.09K_1 - 0.01(PLAV14c)$$

Диапазон значений K_2 0.14–3.2; K_1 0.04–0.91

Относительная ошибка 107–5 %

$R = 0.94$; $N = 552$; $N_1 = 538$; $\sigma = 0.15$; $\chi^2 = 12.78$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

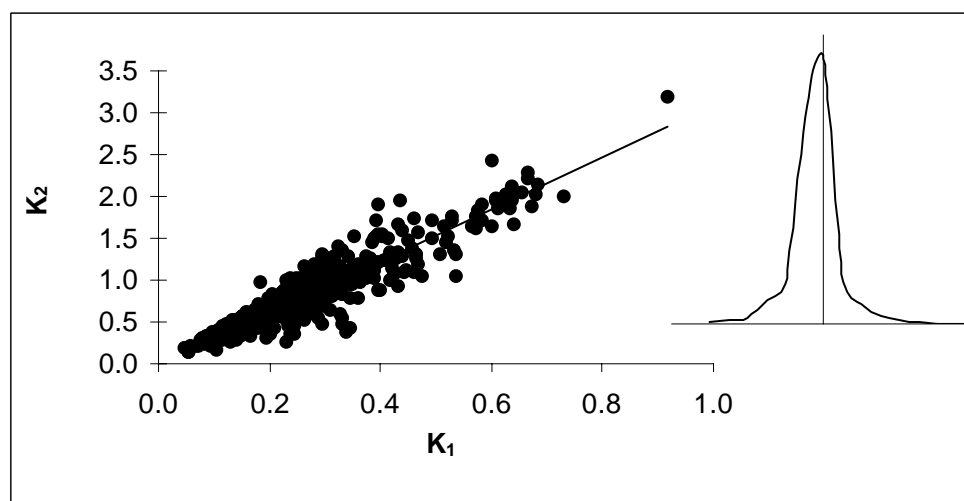


Рис. П.І.4.14 срх (формула PLAV14c). Зависимость значений K_2 от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = Al_{av}:4 + Fe^{2+}_{av} + Ca_{av}:1.7 - P:3.3$$

$$T = -24.11K_1 + 1578.5 \text{ (PLAVTa)}$$

Диапазон значений T 1100–1750 °C

Относительная ошибка 4–3 %

$R = -0.89$; $N = 552$; $N_1 = 546$; $\sigma = 46.3$ °C; $\chi^2 = 1.32$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

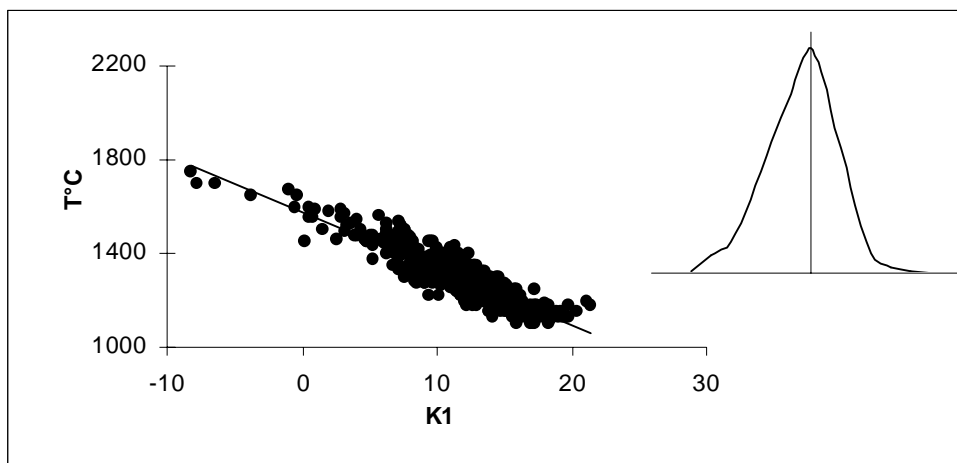


Рис. П.1.4.15 срх (формула PLAVTa).). Зависимость значения T от состава авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{av}:5.5 + Fe^{2+}_{av} + Ca_{av}:1.6 - Na_{av}:2 - Mg_m:3 - P:2.4$$

$$T = -16.06K_1 + 1385 \text{ (PLAVTb)}$$

Диапазон значений T 1100–1750 °C

Относительная ошибка 4–2 %

$R = -0.91$; $N = 552$; $N_1 = 546$; $\sigma = 41.5$ °C; $\chi^2 = 1.5$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

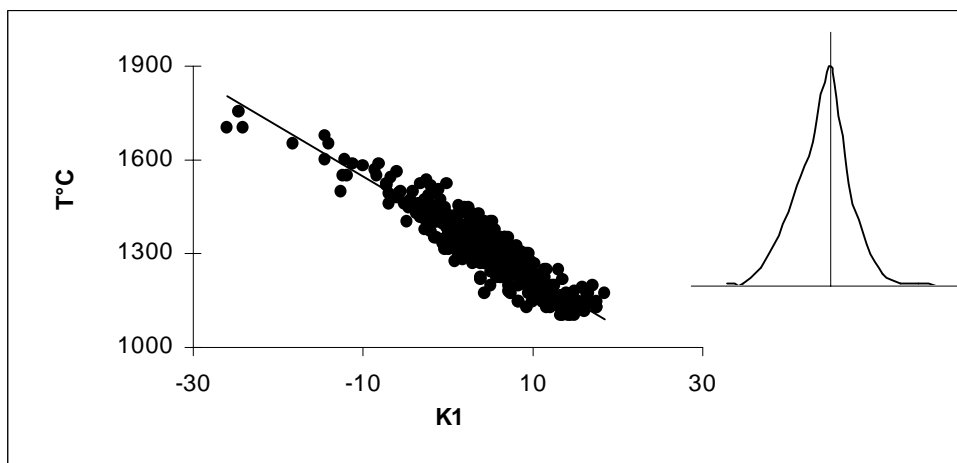


Рис. П.1.4.16 срх (формула PLAVTb).). Зависимость значения T от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{av}:3 + Mg_{av} - 7Ti_{av} - Ca_{av}:2 + 2Na_{av} + 1.4Ti_m + Mg_m:3 + Ca_m + P$$

$$T = 7.48K_1 + 936.9(PLAVTc)$$

Диапазон значений T 1100–1750 °C

Относительная ошибка 4–2 %

R = 0.92; N = 552; N₁ = 544; сигма = 40.1 °C; $\chi^2 = 2.55$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

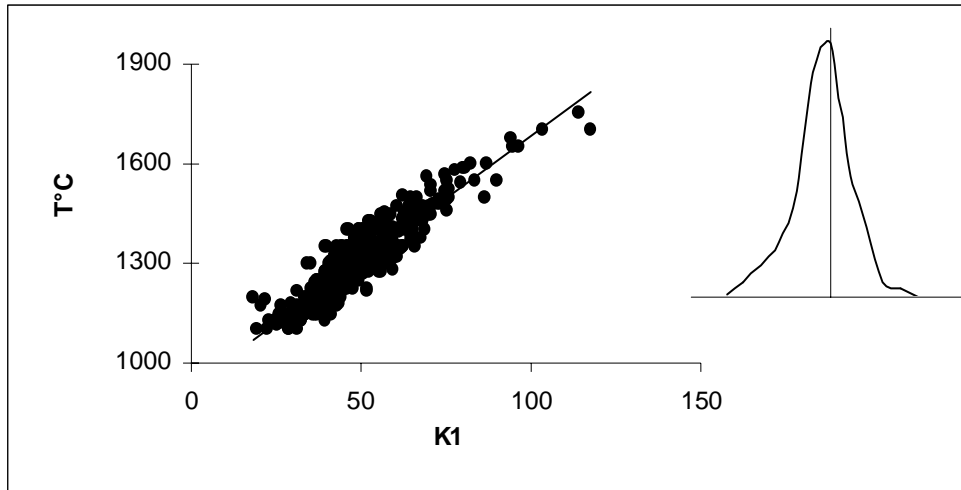


Рис. П.І.4.17 срх (формула PLAVTc). Зависимость значения T от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 3Ti_{av} + Fe^{2+}_{av} + Mg_{av}:4 + Ca_{av} + Na_{av}:2 - P:3$$

$$T = -19.11K_1 + 1739.01(PLAVTd)$$

Диапазон значений T 1100–1750 °C

Относительная ошибка 5–3 %

R = -0.9; N = 552; N₁ = 545; сигма = 45.6 °C; $\chi^2 = 3.73$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

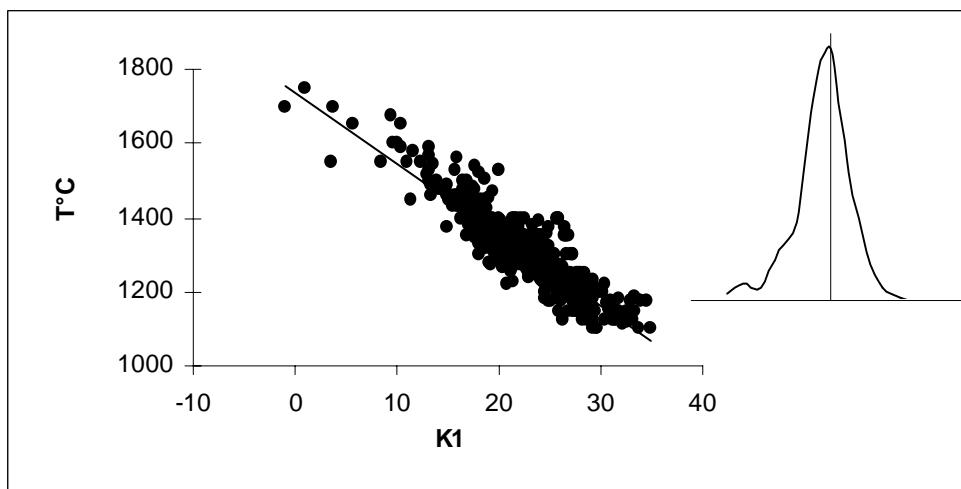


Рис. П.І.4.18 срх (формула PLAVTd). Зависимость значения T от состава авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe_{av}^{2+} - Al_{av} \cdot 3 + Mg_{av} \cdot 4 + Ca_{av} + Al_m \cdot 2 - Mg_m \cdot 3$$

$$T = -19.2K_1 + 1836.4(PLAVTe)$$

Диапазон значений T 1100–1750 °C

Относительная ошибка 5–3 %

R = -0.88; N = 552; N₁ = 546; сигма = 47.5 °C; $\chi^2 = 2.21$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

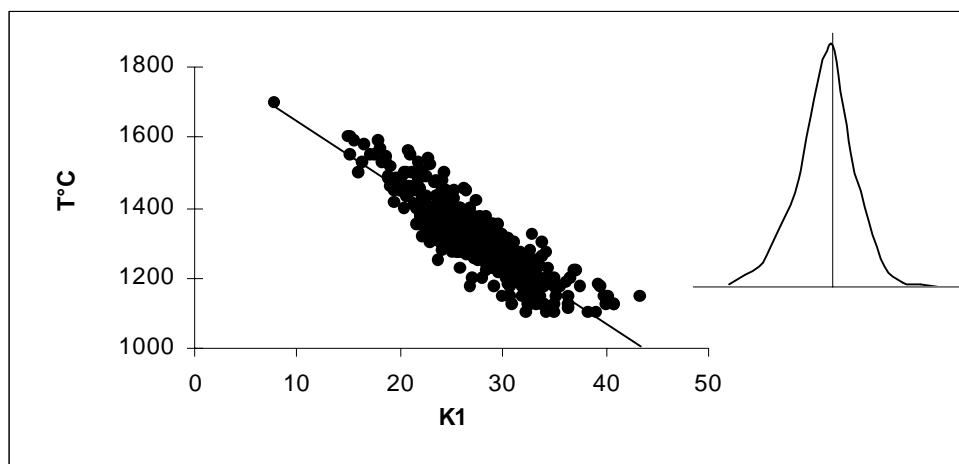


Рис. П.1.4.19 сrx (формула PLAVTe). Зависимость значения T от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления.

$$K_1 = 4.4Ti_{av} + Ca_{av} - Al_{av} - 6Na_{av} + 3.2Ti_m + 2.2Al_m$$

$$P = 0.56K_1 + 38.17(PLAVP)$$

Диапазон значений P 5–50 кб

Относительная ошибка 72–7 %

R = -0.85; N = 533; N₁ = 524; сигма = 3.6 кб; $\chi^2 = 2.97$ (16)

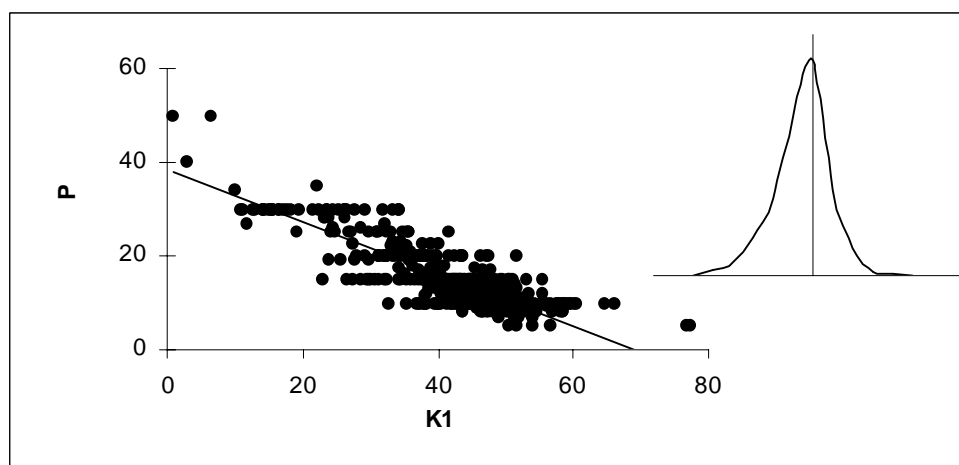


Рис. П.1.4.20 сrx (формула PLAVP). Зависимость величины P от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{av}:5 - 5Ti_{av} + Fe^{2+}_{av}:4 - Mg_{av}:3 - 2Ca_{av} + 5Na_{av} + T:16$$

$$P = 0.65K_1 - 40.71(PLAVPa)$$

Диапазон значений P 5–50 кб

Относительная ошибка 60–6 %

$$R = -0.91; N = 533; N_1 = 525; \text{сигма} = 2.94 \text{ кб}; \chi^2 = 2.7 (16)$$

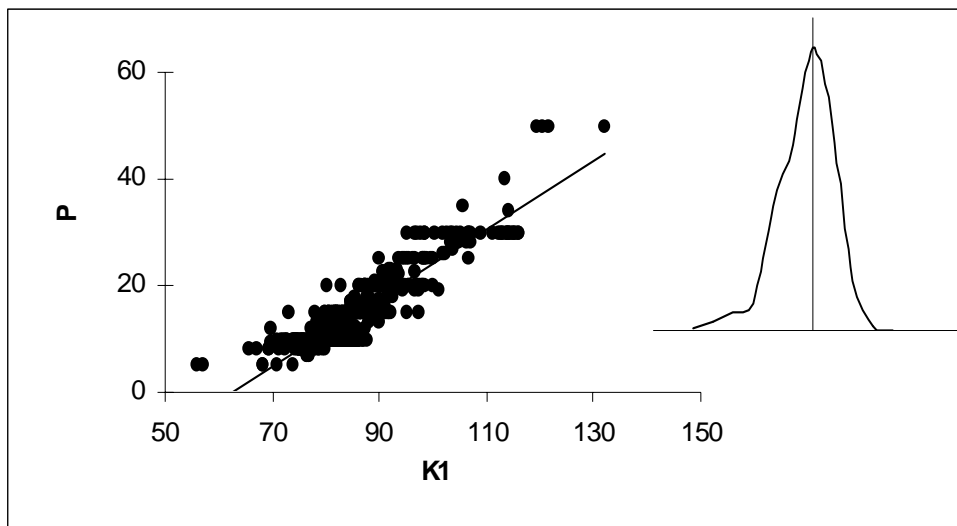


Рис. П.І.4.21 сrx (формула PLAVPa). Зависимость величины P от состава авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{av} + 16Al_{av}:Al_m + Fe^{2+}_{av}:2 - Mg_{av}:6 + Si_m:4 + T:28$$

$$P = 1.28K_1 - 126.8(PLAVPb)$$

Диапазон значений P 5–70 кб

Относительная ошибка 52–4 %

$$R = 0.93; N = 533; N_1 = 527; \text{сигма} = 2.6 \text{ кб}; \chi^2 = 0.85 (16)$$

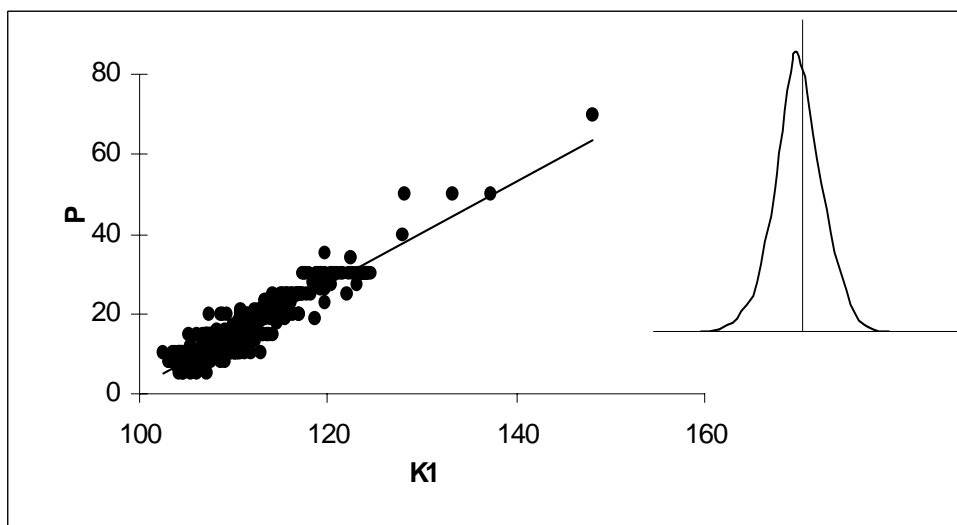


Рис. П.І.4.22 сrx (формула PLAVPb). Зависимость величины P от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Na_{av} + K_{av} - Al_{av}:7 + T:80$$

$$P = 3.85K_1 - 48.75(PLAVPc)$$

Диапазон значений P 5–50 кб

Относительная ошибка 62–7 %

R = 0.9; N = 533; N₁ = 525; сигма = 3.1 кб; $\chi^2 = 0.85$ (16)

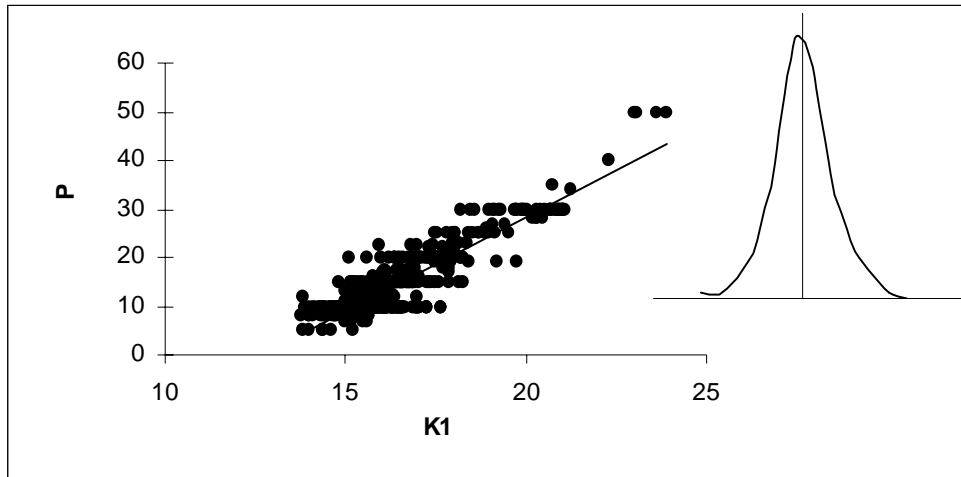


Рис. П.І.4.23 сrx (формула PLAVPc). Зависимость величины P от состава авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 1.3Si_{av} - 4Ti_{av} + Al_{av}:3 + Mg_{av}:5 - Ca_{av}:2.7 + 5(Na_{av} + K_{av}) - 4Cr_{av} + T:17$$

$$P = 0.62K_1 - 73.26(PLAVPd)$$

Диапазон значений P 5–50 кб

Относительная ошибка 58–6 %

R = 0.9; N = 533; N₁ = 521; сигма = 2.9 кб; $\chi^2 = 4.27$ (16)

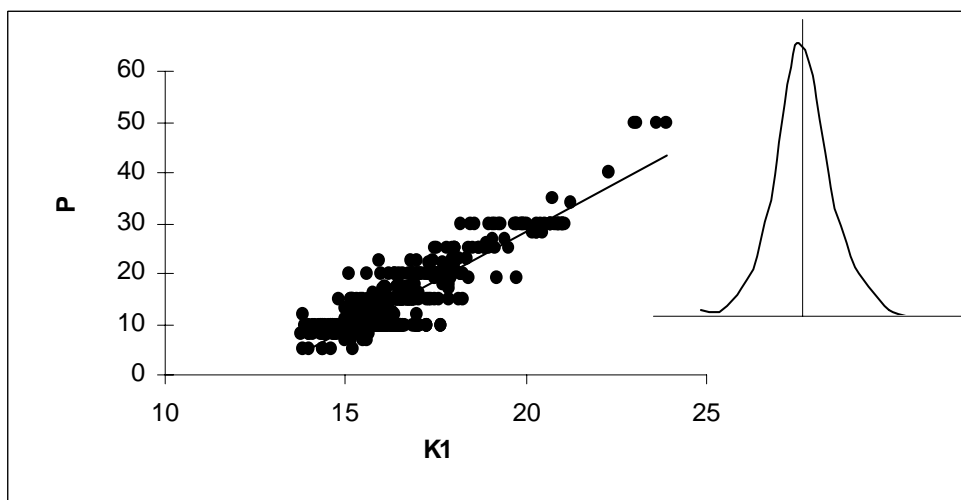


Рис. П.І.4.24 сrx (формула PLAVPd). Зависимость величины P от состава авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в авгите

$$K_1 = [(Si + Al:3 + P:3):(Mg + Ca:2)]_{av}; K_2 = Ti_{av} + 2.7(Na_{av} + K_{av})$$

$$K_2 = 8.46K_1 - 10.99(PLAVRa)$$

Диапазон значений K_2 0.13–23.3; K_1 1.3–4.5

Относительная ошибка 770–5 %

$R = 0.95$; $N = 524$; $N_1 = 513$; сигма = 1.1; $\chi^2 = 2.64$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

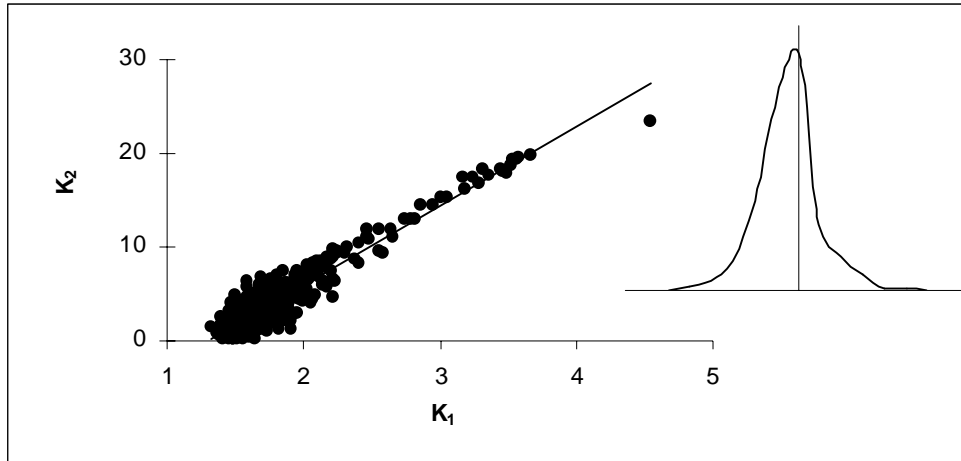


Рис. П.1.4.25 срх (формула PLAVRa). Зависимость значений K_2 от состава авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 2Ti_{av} + Al_{av} - 2(Na_{av} + K_{av})$$

$$Si_{av} = -0.46K_1 + 49.03(PLAVRb)$$

Диапазон значений Si_{av} 40.2–50.4;

Относительная ошибка 2–1 %

$R = -0.92$; $N = 524$; $N_1 = 516$; сигма = 0.49; $\chi^2 = 1.89$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

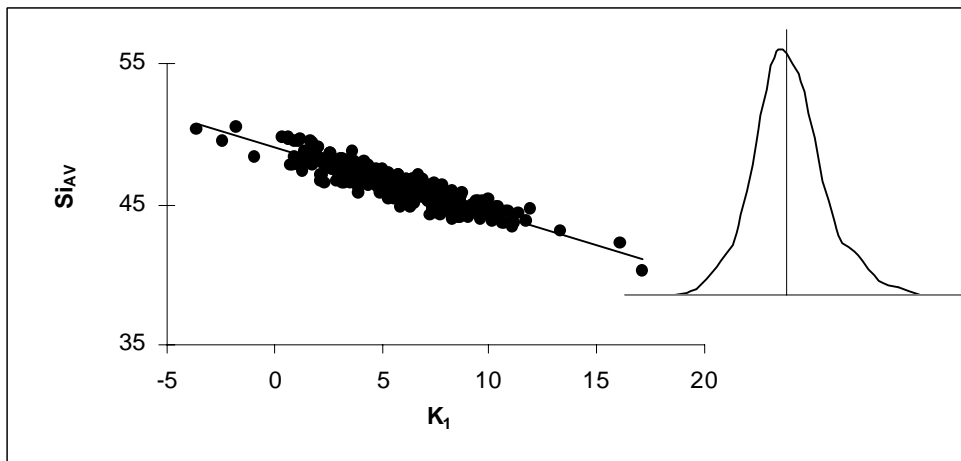


Рис. П.1.4.26 срх (формула PLAVRb). Зависимость величины Si_{av} от состава авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

4.5. Система расплав–плагиноклаз

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [29; 30; 38; 41; 49; 53; 54; 56; 75; 80; 82; 84; 85; 86; 87; 88; 91; 92; 177; 180; 239; 258; 262; 267; 269; 288; 291; 296; 300; 319; 334; 335; 339; 347; D1].

Используемые данные: общее число точек – 289 парных анализов. После исключения анализов стекол и кристаллов плагиноклаза с суммами окислов менее 98 % и более 102 % осталось 259 т. Для расчета натрия были удалены точки с нулевыми содержаниями в расплаве – 254 т. Для расчета калия были удалены точки с нулевыми содержаниями в расплаве и плагиноклазе – 234 т. Для расчета кали–натрового отношения были удалены точки с нулевыми содержаниями калия и натрия в расплаве и кристаллах – 234 т., для расчетов давления была использована эта же выборка – 234 т.

Таблица П.1.5.1 р1. Диапазоны составов стекол (расплавов) и плагиноклазов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

PLPL	Стекла			Плагиноклазы		An	34.1–100
SiO ₂	42.8–76.7	Si	41.73–73.11	SiO ₂	44.37–60.2	Si	41.08–54.55
TiO ₂	0.07–6.66	Ti	0–4.78	TiO ₂	0.01–0.63	Ti	0–0.44
Al ₂ O ₃	11.5–24.01	Al	12.75–25.76	Al ₂ O ₃	23.9–34.99	Al	25.78–37.84
FeO	1.4–20.9	Fe	0–16.87	FeO	0.12–2.01	Fe	0–1.55
MnO	0.02–0.41	Mn	0–0.33	MnO	0.01–0.11	Mn	0–0.09
MgO	0.01–14.13	Mg	0.01–18.85	MgO	0.01–1.0	Mg	0–1.35
CaO	0.73–15.54	Ca	0.74–15.46	CaO	7.02–20.24	Ca	6.72–20.08
Na ₂ O	0.95–7.71	Na	0–13.7	Na ₂ O	0.59–7.14	Na	0–12.34
K ₂ O	0.05–10.12	K	0–11.86	K ₂ O	0.02–2.07	K	0–6.61
Cr ₂ O ₃	0.01–0.17	Cr	0–0.13	Cr ₂ O ₃	0.01–0.03	Cr	0–0.02
T °C	840–1430	P, кб	2–27	Ab	0–63.4	Or	0–12

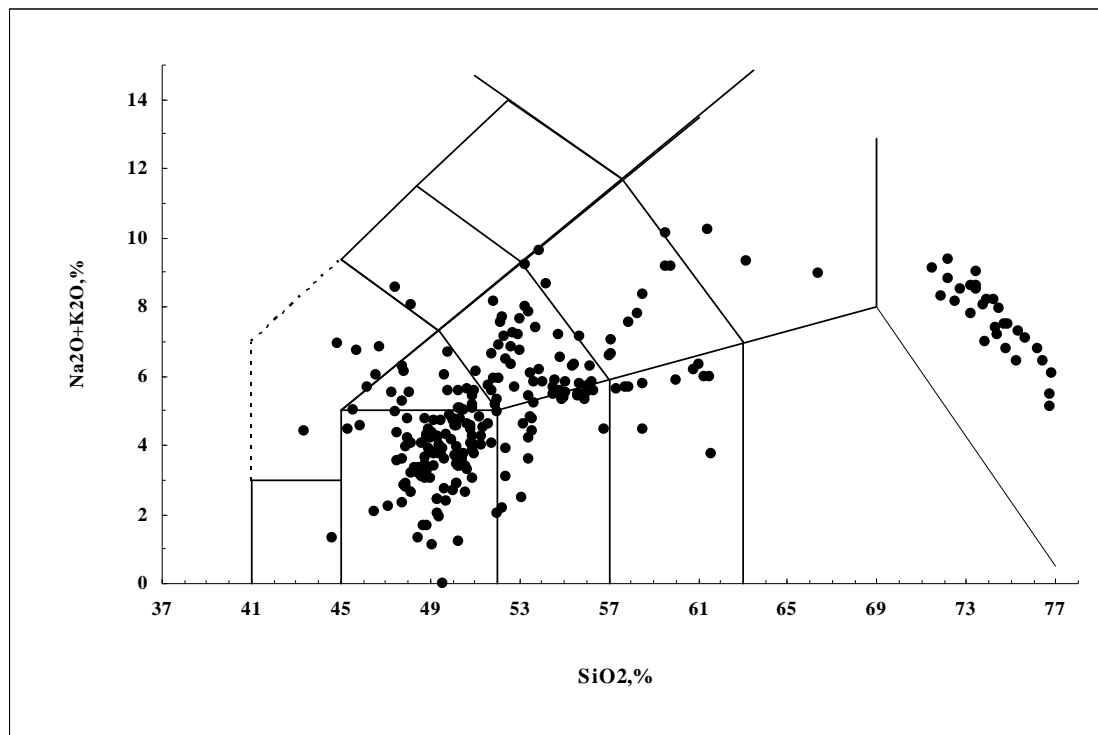


Рис. П.1.5.1 р1. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами плагиноклаза, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = 10Si_{pl}:(Ca_m + 2Ti_m + Al_{pl}:3 + Na_{pl}:3 - 3Fe^{2+}_{pl}) - P:4$$

$$Si_m = 1.25K_1 + 24.59(PLPL1)$$

Диапазон значений Si 41.7–73 (атом. %)

Относительная ошибка 5–3 %

R = 0.97; N = 259; N₁ = 255; сигма = 2; $\chi^2 = 1.72$ (12)

Диапазон давлений 2–20 кб

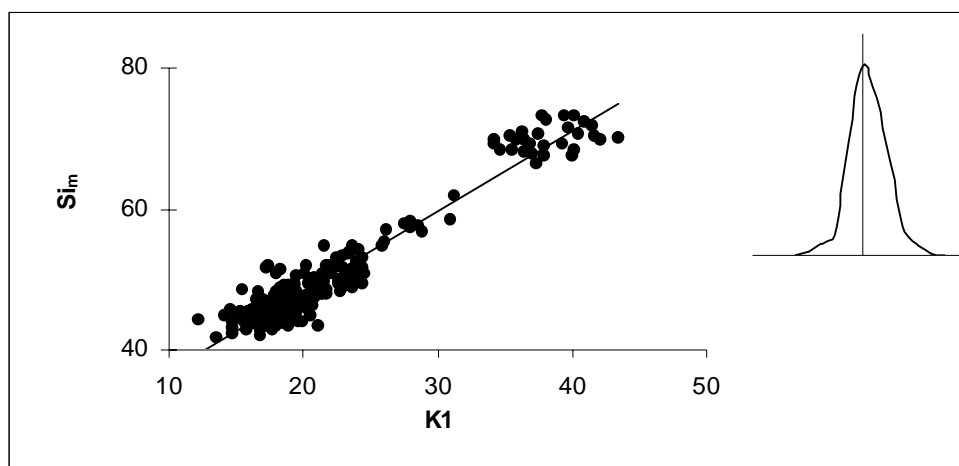


Рис. П.1.5.2 pl (формула PLPL1). Зависимость содержаний Si_m от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Al_{pl} - Si_{pl}:4 - Fe^{2+}_m - Mg_m + T:20 + P:5$$

$$Al_m = 0.3K_1 - 1.54(PLPL3)$$

Диапазон значений Al 12.7–25 (атом. %)

Относительная ошибка 9–5 %

R = 0.85; N = 259; N₁ = 258; сигма = 1.2; $\chi^2 = 2.18$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

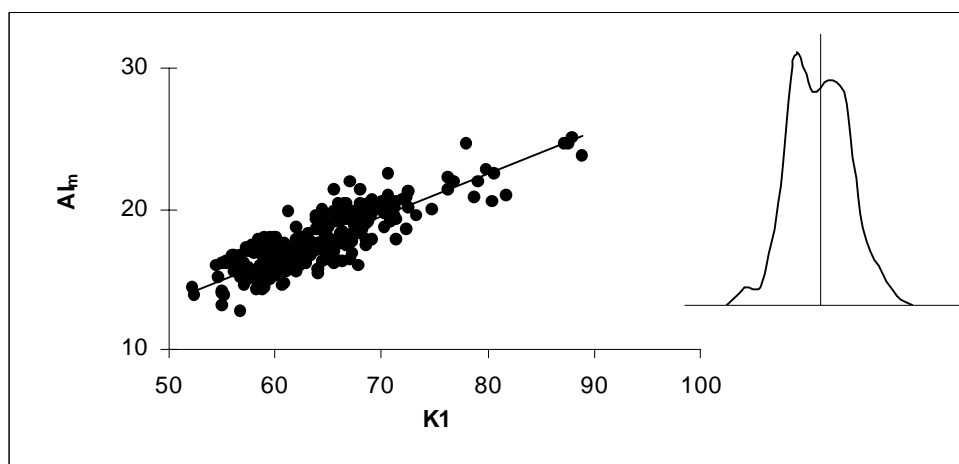


Рис. П.1.5.3 pl (формула PLPL3). Зависимость содержаний Al_m от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Ca_{pl} + Na_{pl}:3.5 - Si_m:3 - P:9$$

$$Ca_m = 0.72K_1 + 10.7(PLPL8)$$

Диапазон значений Ca 0.7–15.5 (атом. %)

Относительная ошибка 166–7 %

R = 0.93; N = 259; N₁ = 258; сигма = 1.16; $\chi^2 = 2.92$ (12)

Диапазон давлений 2–20 кб

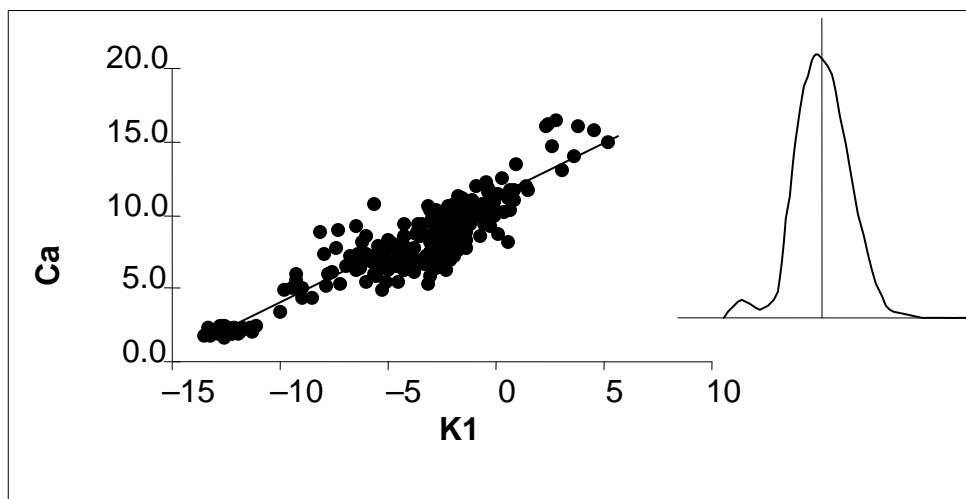


Рис. П.1.5.4 pl (формула PLPL8). Зависимость содержаний Ca_m от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний натрия в расплаве

$$K_1 = Na_{pl} - Si_m:4 - Ti_m:2 - Fe^{2+}_m:6 + T:90 - Ca_m:3 - K_{pl}:2$$

$$Na_m = 0.64K_1 + 3.63(PLPL9)$$

Диапазон значений Na 1.7–12.4 (атом. %)

Относительная ошибка 60–8 %

R = 0.82; N = 254; N₁ = 252; сигма = 1; $\chi^2 = 1.24$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

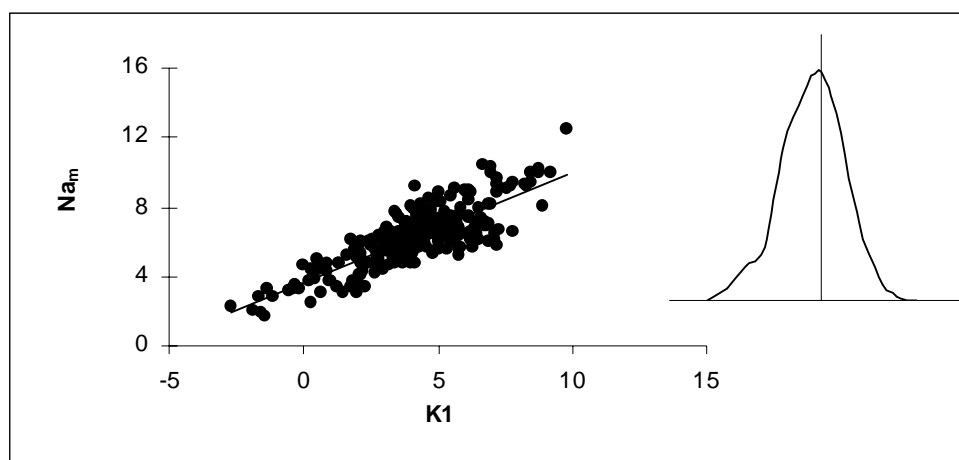


Рис. П.1.5.5 pl (формула PLPL9). Зависимость содержаний Na_m от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний калия в расплаве

$$K_1 = (22K_{pl} + Si_{pl}:2 + 5Al_{pl} - 3Ca_{pl} + Si_m:5 - 9Ca_m - 5Na_m - 2Mg_m):10$$

$$K_m = 0.46K_1 - 0.26(PLPL10)$$

Диапазон значений K_1 0.1–7.7 (атом. %)

Относительная ошибка 830–11 %

$R = 0.91$; $N = 234$; $N_1 = 230$; сигма = 0.83; $\chi^2 = 7.7$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

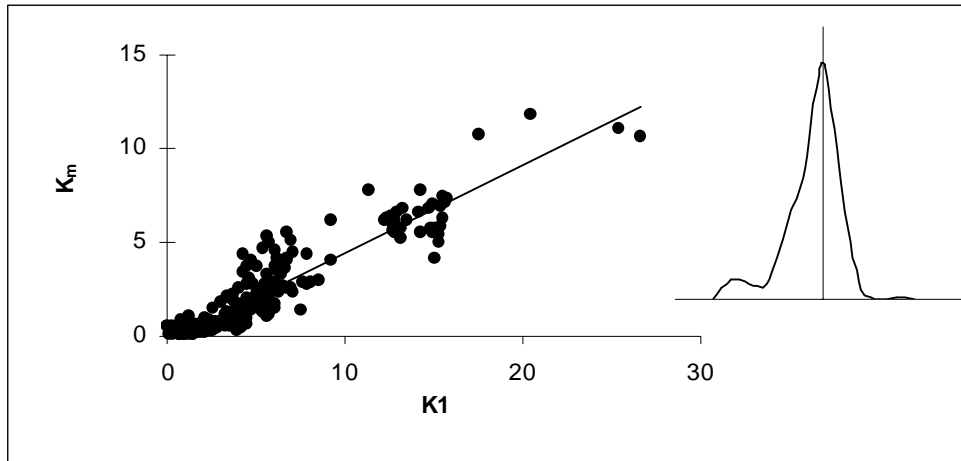


Рис. П.1.5.6 pl (формула PLPL10). Зависимость содержаний K_m от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет отношения калия к натрию в расплаве

$$K_1 = \text{Exp}[(45K_{pl}:Na_{pl} - 5Fe^{2+}_{pl} + Si_m:2 - Ca_m:4):10]$$

$$(10K/Na)_m = 0.38K_1 - 1.33(PLPL17)$$

Диапазон значений (K/Na) 0.02–2

Относительная ошибка 750–8%

$R = 0.94$; $N = 234$; $N_1 = 230$; сигма = 0.15; $\chi^2 = 1077$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

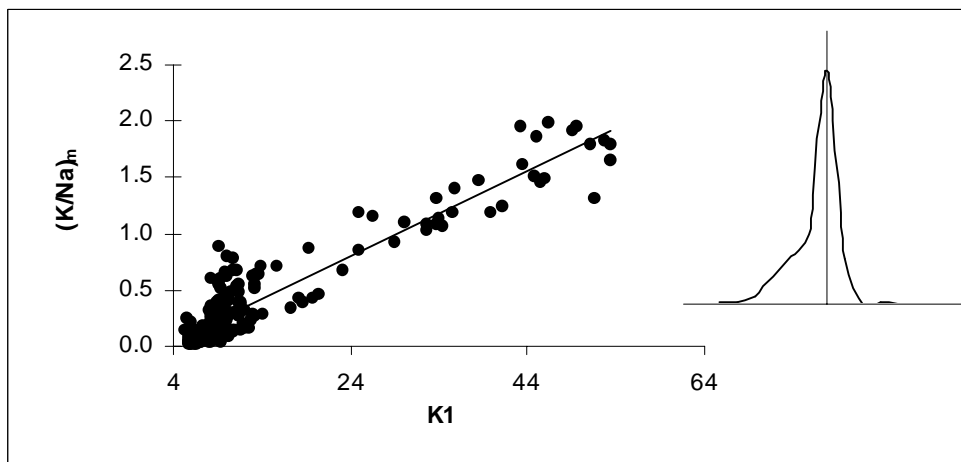


Рис. П.1.5.7 pl (формула PLPL17). Зависимость $(K/Na)_m$ от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = Si_{pl} + Si_m - P$$

$$T = -9.59K_1 + 2037.53(PLPLTa)$$

Диапазон значений T 840–1430 °C

Относительная ошибка 6–3%

$R = -0.9$; $N = 259$; $N_1 = 256$; сигма = 50.3 °C; $\chi^2 = 2.15$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

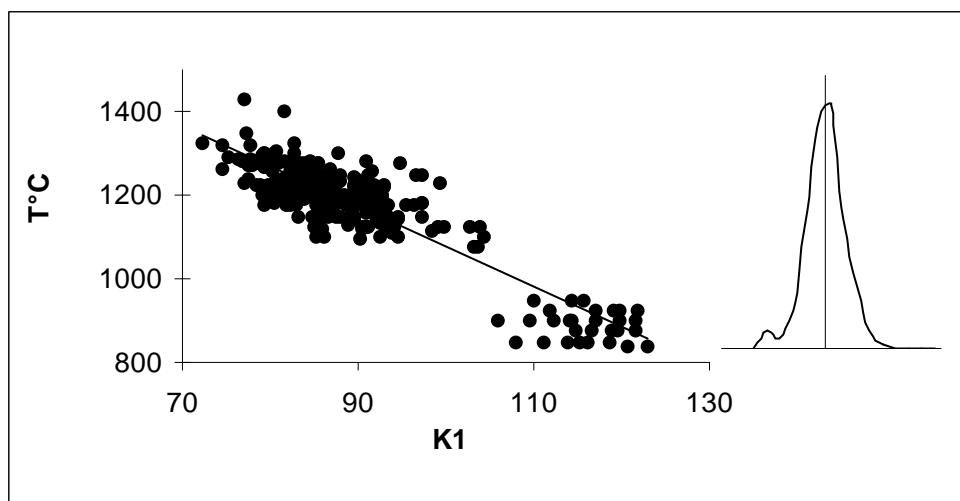


Рис. П.1.5.8 pl (формула PLPLTa). Зависимость значений T от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{pl} + Si_m - Al_m - Ca_m - P$$

$$T = -7.41K_1 + 1652.78(PLPLTb)$$

Диапазон значений T 840–1430 °C

Относительная ошибка 5–3 %

$R = -0.93$; $N = 259$; $N_1 = 257$; сигма = 44.8 °C; $\chi^2 = 2.17$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

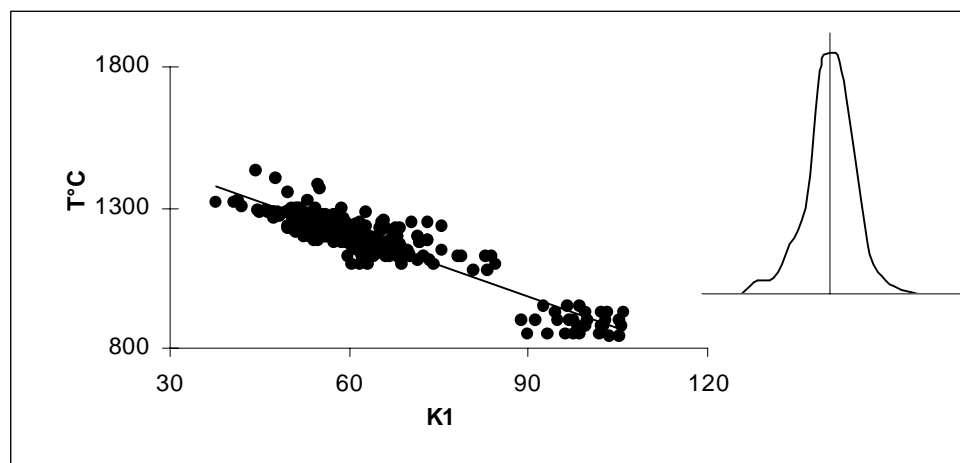


Рис. П.1.5.9 pl (формула PLPLTb). Зависимость значений T от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = [T - 2Al_{pl} + 9(Na_{pl} + K_{pl}) + 4Ti_m - 8Fe^{2+}_m - 16Ca_m + 5(Na_m + K_m) - 0.8Mg_m]:100$$

$$P = 3.78K_1 - 30.19(PLPLP)$$

Диапазон значений P 2–27 кб

Относительная ошибка 135–10 %

R = 0.69; N = 234; N₁ = 232; сигма = 2.7 кб; $\chi^2 = 1.8$ (12)

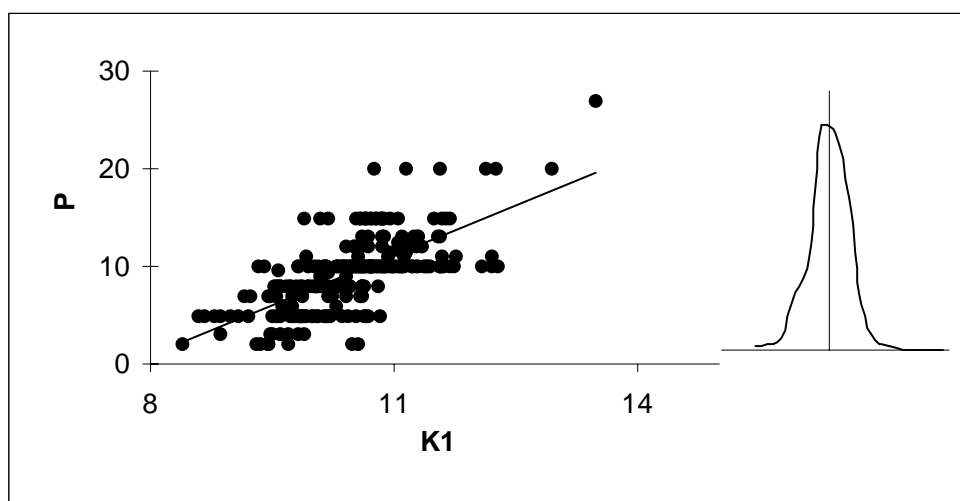


Рис. П.1.5.10 р1 (формула PLPLP). Зависимость величины P от состава плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Глава 5. Уравнения, полученные по системе расплав–минеральный парагенезис (2–3 минерала)

Эти выборки (см. введение, таблица 1) представлены 10 вариантами сочетаний из 5 по 2 [5!:(2!(5–2)!): sp–ol, sp–орх, sp–ав, sp–пл, ol–орх, ol–ав, ol–пл, орх–ав, орх–пл, ав–пл. Первичные выборки (без удаленных точек с «плохими» суммами) содержат от 100 до 800 точек, исключение составляют выборки sp–пл и орх–пл, содержащие менее 100 точек, для которых расчеты не проводились.

5.1. Система расплав–шпинель–оливин

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [18; 19; 35; 49; 75; 85; 86; 91; 158; 159; 175; 181; 243; 247; 258; 262; 272; 279; 288; 291; 292; 298; 299; 300; 309; 322; 323; 324; 335; 339; 340].

Общее число тройных анализов – 243 т. После исключения анализов составов шпинелей, оливинов и стекол с суммами окислов менее 97 % и более 102 % – 215 т. После исключения анализов с нулевыми содержаниями железа в стекле и содержаниями титана более 10 % в стекле – 167 т. Для расчетов титана были исключены точки с нулевыми содержаниями его в расплаве – 156 т.

Таблица II.П.1.1 sp–ol. Диапазоны составов стекол (расплавов), шпинелей и оливинов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

<i>PSPOL</i>	мас.%	Стекла	ат.%	Шпинели	мас.%		ат.%
SiO ₂	43.5–54.69	Si	39.41–50.19	SiO ₂	0–8.42	Si	0–7.09
TiO ₂	0–1.98	Ti	0–1.36	TiO ₂	0–0.89	Ti	0–0.6
Al ₂ O ₃	9.6–21	Al	10.48–21.84	Al ₂ O ₃	18.64–70.1	Al	22.1–66.21
FeO	3.31–18.6	Fe	2.54–14.51	FeO	3.1–23.2	Fe	2.06–19.72
MnO	0–0.48	Mn	0–0.38	MnO	0–0.4	Mn	0–0.35
MgO	5.7–19.16	Mg	7.74–25.81	MgO	11.4–26.6	Mg	17.35–31.57
CaO	3.97–16.3	Ca	3.84–15.82	CaO	0–0.5	Ca	0–0.5
Na ₂ O	0–7.49	Na	0–12.82	Na ₂ O	0–0.24	Na	0–0.39
K ₂ O	0–2.6	K	0–3.02	K ₂ O	0–0	K	0–0
Cr ₂ O ₃	0–1.48	Cr	0–1.06	Cr ₂ O ₃	0–54.19	Cr	0–43.09
T °C	1220–1575	P, кб	2–28			Mg#	46.8–93.86

Продолжение таблицы П.П.1.1 sp-ol.

Оливины			
SiO ₂	37.8–42	Si	32.36–35.62
TiO ₂	0–0.11	Ti	0–0.07
Al ₂ O ₃	0–0.31	Al	0–0.3
FeO	4.49–24.17	Fe	2.99–17.79
MnO	0–0.44	Mn	0–0.33
MgO	36.45–53.3	Mg	47.09–63.23
CaO	0–0.9	Ca	0–0.78
Na ₂ O	0–0.07	Na	0–0.11
K ₂ O	0–0	K	0–0
Cr ₂ O ₃	0–1.01	Cr	0–0.65
		Fo	73.16–95.48

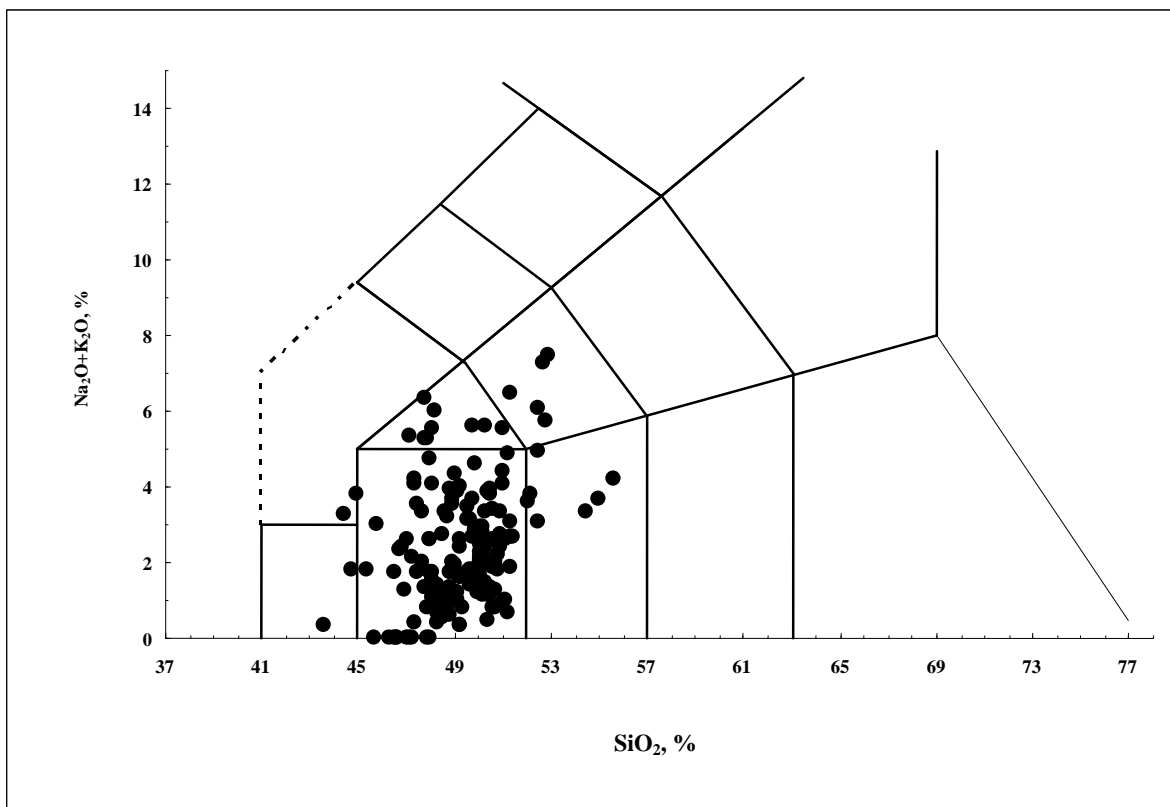


Рис. П.П.1.1 sp-ol. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами шпинели и оливины, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = 8Ca_{ol} - Si_{ol}:2 - Fe^{2+}_{ol}:1.7 + Al_{sp}:10 + Fe^{3+}_{sp}:2 + Fe^{2+}_m + P:4$$

$$Si_m = -0.62K_1 + 41.89(PSPOL1)$$

Диапазон значений Si 39.4–49 (атом. %)

Относительная ошибка 2–2 %

R = -0.87; N = 167; N₁ = 165; сигма = 0.73; $\chi^2 = 2.18$ (12)

Диапазон давлений 2–28 кб

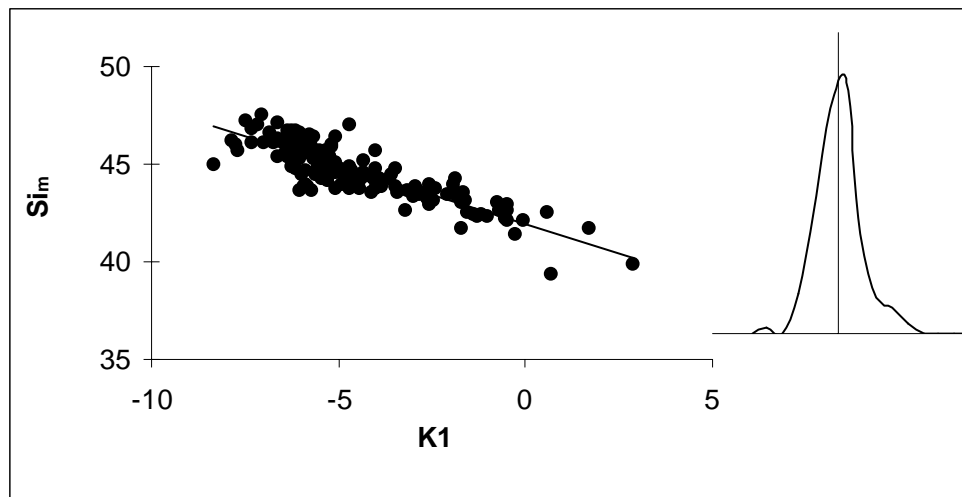


Рис. II.П.1.2 sp–ol (формула **PSPOL1**). Зависимость содержаний **Si_m** от состава шпинели, оливины, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = [Fe^{2+}_{ol} + 18Ti_{sp} - Fe^{2+}_{sp}:2 - Fe^{3+}_{sp}:3 + (Na_m + K_m) + P:2]:10$$

$$Ti_m = 0.33K_1 + 0.07(PSPOL2a)$$

Диапазон значений Ti 0.08–1.2 (атом. %)

Относительная ошибка 160–11 %

R = 0.8; N = 156; N₁ = 154; сигма = 0.13; $\chi^2 = 1.66$ (12)

Диапазон давлений 2–28 кб

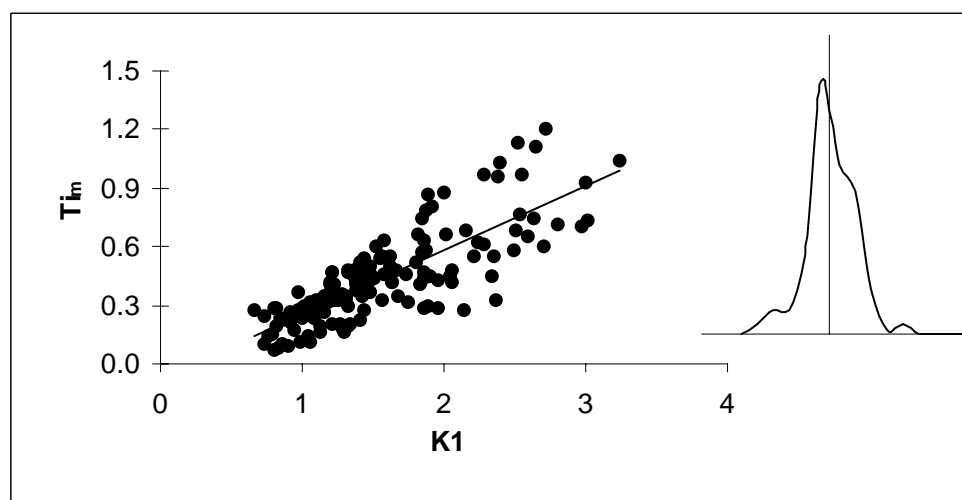


Рис. II.П.1.3 sp–ol (формула **PSPOL2a**). Зависимость содержаний **Ti_m** от состава шпинели, оливины, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = [1.2Fe_{ol}^{2+} + 19Ti_{sp} - Fe_{sp}^{2+} \cdot 2 - Si_m \cdot 3.5 + 1.3(Na_m + K_m) - Fe_{sp}^{3+} \cdot 2 - Al_m \cdot 4 - Mg_m \cdot 3 + P \cdot 2] : 10$$

$$Ti_m = 0.25K_1 + 0.55(PSPOL2b)$$

Диапазон значений Ti 0.08–1.2 (атом. %)

Относительная ошибка 160–12 %

$R = 0.82$; $N = 156$; $N_1 = 153$; $\sigma = 0.14$; $\chi^2 = 2.45$ (12)

Диапазон давлений 2–28 кб

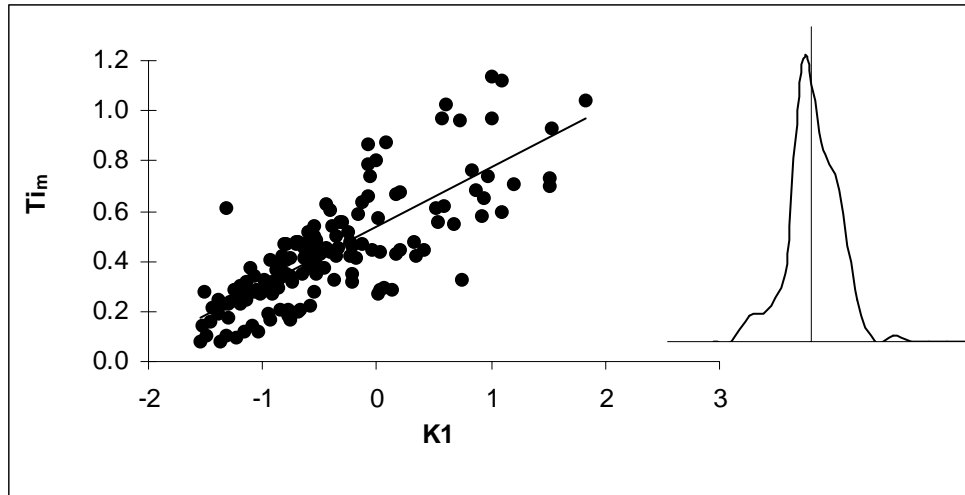


Рис. II.1.4 sp–ol (формула PSPOL2b). Зависимость содержаний Ti_m от состава шпинели, оливина, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа двухвалентного в расплаве

$$K_1 = Fe_{ol}^{2+} + Fe_{sp}^{2+} + Fe_{sp}^{3+} + 8Ca_{ol} + P \cdot 3$$

$$Fe_m^{2+} = 0.36K_1 - 1.64(PSPOL5)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 2.6–14.5 (атом. %)

Относительная ошибка 27–5 %

$R = 0.93$; $N = 167$; $N_1 = 163$; $\sigma = 0.7$; $\chi^2 = 2.57$ (12)

Диапазон давлений 2–28 кб

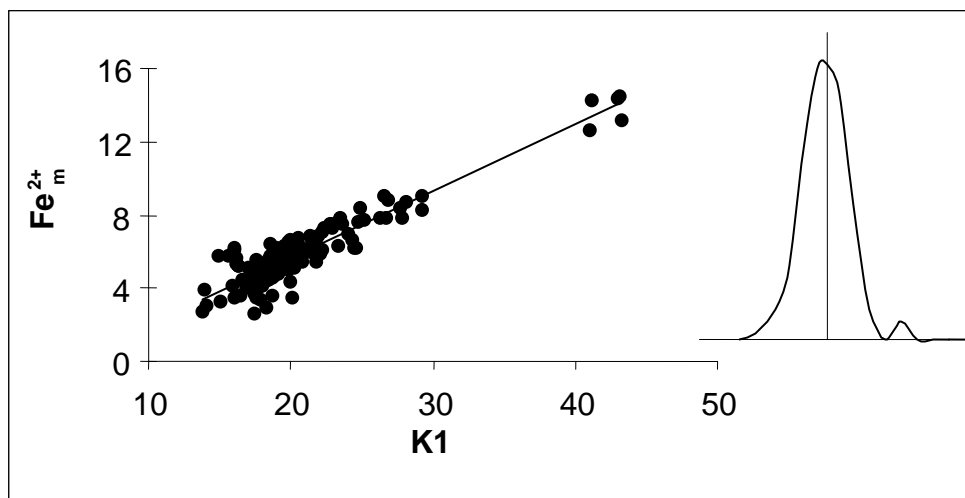


Рис. II.1.5 sp–ol (формула PSPOL5). Зависимость содержаний Fe_m^{2+} от состава шпинели, оливина и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Mg_{ol} - Al_{sp} \cdot 3 - 4(Na_m + K_m) + P$$

$$Mg_m = 0.23K_1 + 7.01(\text{PSPOL7})$$

Диапазон значений Mg 7.7–24.1 (атом. %)

Относительная ошибка 19–6 %

$R = 0.91$; $N = 167$; $N_1 = 164$; $\sigma = 1.43$; $\chi^2 = 2.74$ (12)

Диапазон давлений 2–28 кб

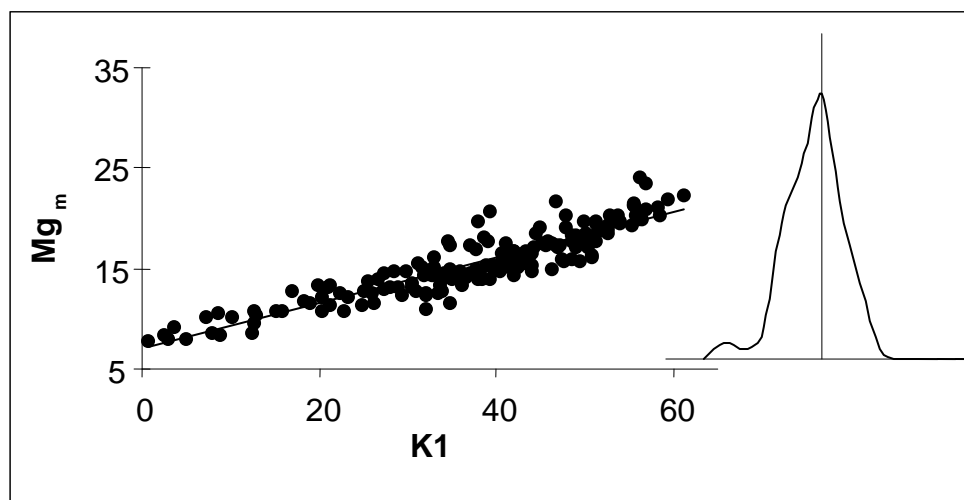


Рис. II.1.6 sp-ol (формула **PSPOL7**). Зависимость содержаний Mg_m от состава шпинели, оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет Fe^{2+}/Mg отношения в расплаве

$$K_1 = (9Fe^{2+}/Mg)_{ol} - (Fe^{2+}/Mg)_{sp}; K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_m;$$

$$K_2 = 0.45K_1(\text{PSOL14a})$$

Диапазон значений $(Fe^{2+}/Mg)_m$ 0.14–1.04

Относительная ошибка 30–4 %

$R = 0.96$; $N = 167$; $N_1 = 161$; $\sigma = 0.04$; $\chi^2 = 1.02$ (12)

Диапазон давлений 2–28 кб

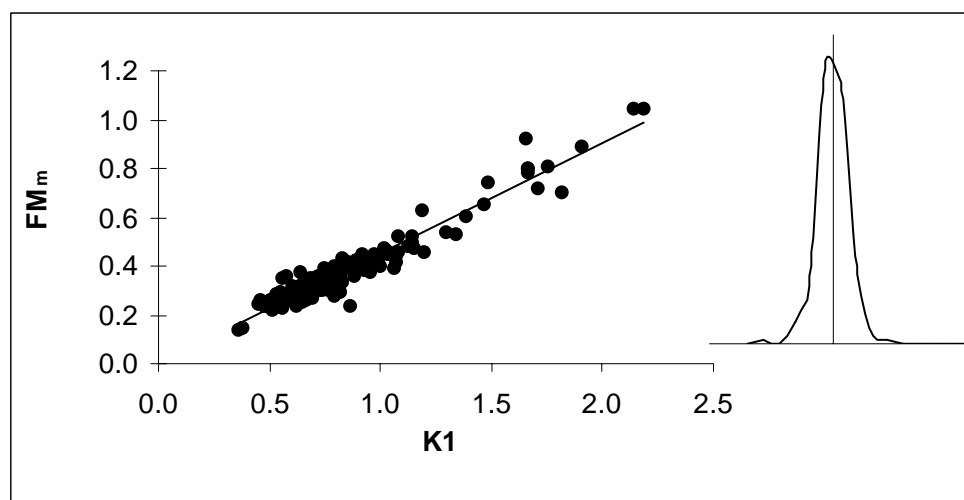


Рис. II.1.7 sp-ol (формула **PSOL14a**). Зависимость отношения $(Fe^{2+}/Mg)_m$ от состава шпинели, оливина и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (9Fe^{2+}/Mg)_{ol} - (Fe^{2+}/Mg)_{sp} + Ti_m:2; K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_m;$$

$$K_2 = 0.36K_1 + 0.01(PSPOL14b)$$

Диапазон значений $(Fe^{2+}/Mg)_m$ 0.14–1.04

Относительная ошибка 30–4 %

$R = 0.96$; $N = 167$; $N_1 = 162$; $\sigma = 0.05$; $\chi^2 = 4.11$ (12)

Диапазон давлений 2–28 кб

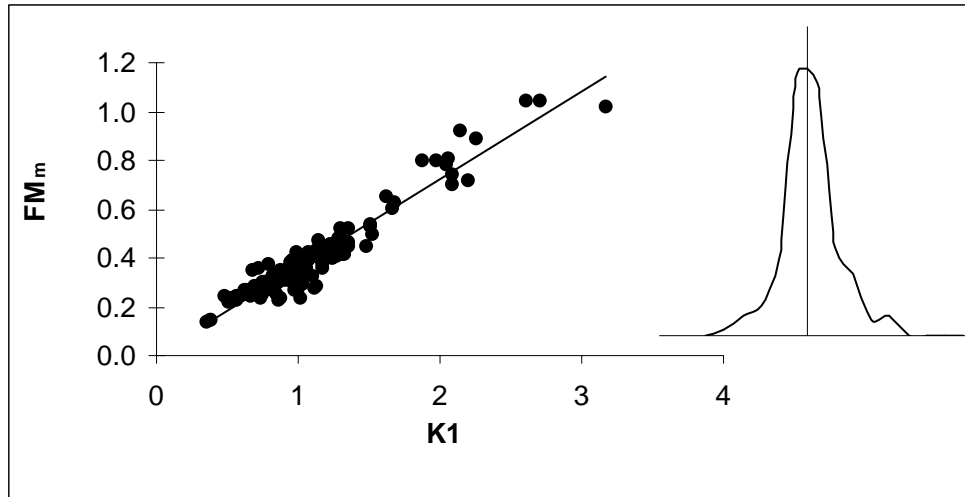


Рис. П.П.1.8 sp–ol (формула PSOL14b). Зависимость отношения $(Fe^{2+}/Mg)_m$ от состава шпинели, оливины, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = Mg_{ol} - Mg_{sp}:3 + 3Ca_{ol} - Si_m + Mg_m + P$$

$$T = 6.74K_1 + 1096.88(PSOLTa)$$

Диапазон значений T 1220–1575 °C

Относительная ошибка 2–2 %

$R = 0.86$; $N = 167$; $N_1 = 165$; $\sigma = 25.7$ °C; $\chi^2 = 0.48$ (12)

Диапазон давлений 2–28 кб

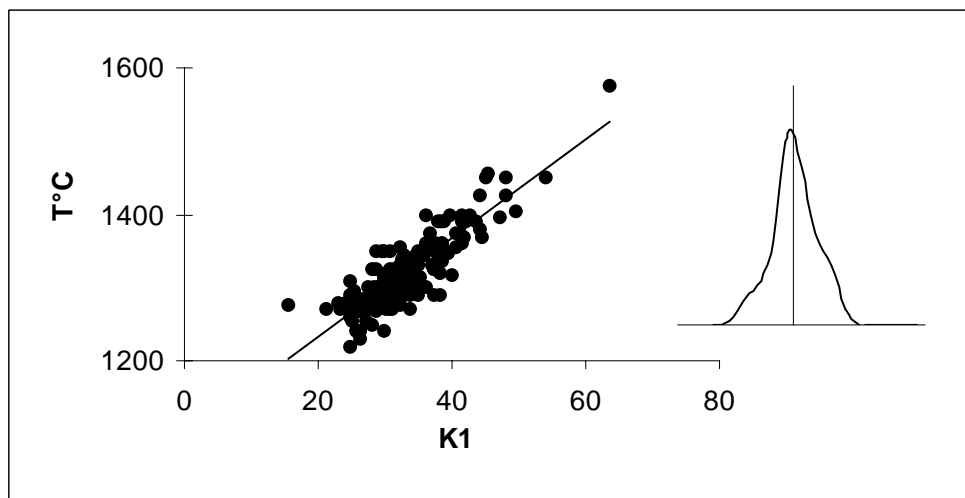


Рис. П.П.1.9 sp–ol (формула PSOLTa). Зависимость значения T от состава шпинели, оливины, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{ol} - Al_{sp}:7 - Mg_{sp}:3 + 3Ca_{ol} - Si_m - Ca_m:5 + P$$

$$T = 10.39K_1 + 1235.89(PSOLTb)$$

Диапазон значений T 1220–1575 °C

Относительная ошибка 2–2 %

$R = 0.8$; $N = 167$; $N_1 = 166$; сигма = 30.3 °C; $\chi^2 = 0.78$ (12)

Диапазон давлений 2–28 кб

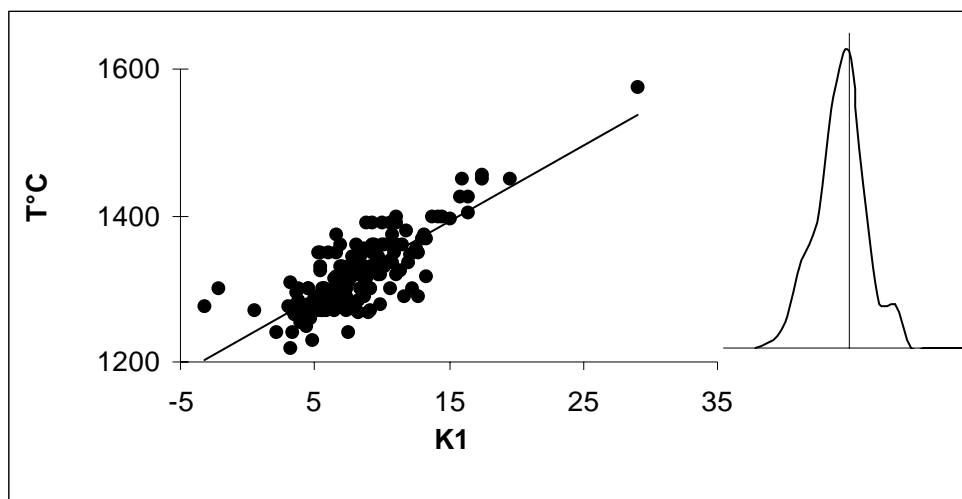


Рис. П.П.1.10 sp–ol (формула PSOLTb). Зависимость значения T от состава шпинели, оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{ol} - Al_{sp}:10 - Mg_{sp}:2 + 3Ca_{ol} - Si_m - Ca_m:2 - (Na_m + K_m):2 + P$$

$$T = 10.46K_1 + 1315.1(PSOLTc)$$

Диапазон значений T 1220–1575 °C

Относительная ошибка 2–2 %

$R = 0.86$; $N = 167$; $N_1 = 165$; сигма = 26 °C; $\chi^2 = 1.05$ (12)

Диапазон давлений 2–28 кб

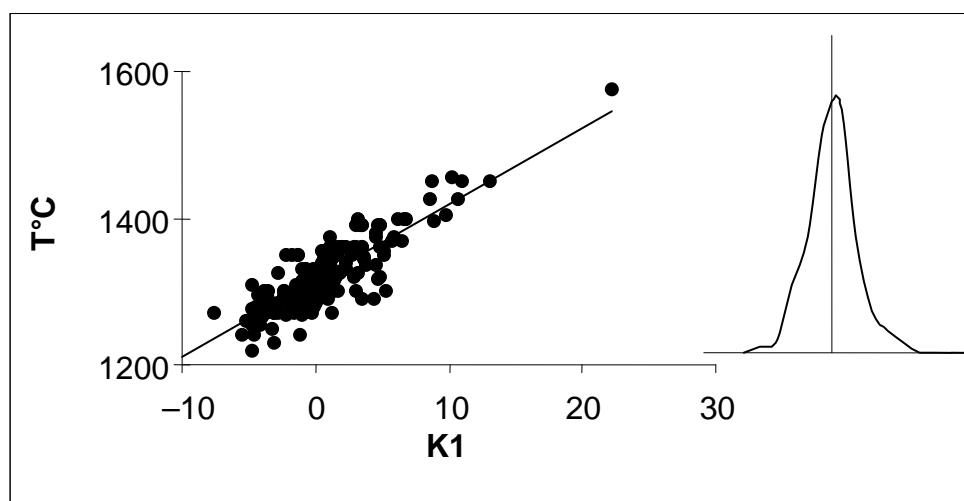


Рис. П.П.1.11 sp–ol (формула PSOLTc). Зависимость значения T от состава шпинели, оливина, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = T:8.6 + Fe_{ol}^{2+}:2 + 5Ti_m - Fe_{sp}^{3+} - Cr_{sp}:4 - 3Ca_{ol} - Al_m:3 - Mg_m:2$$

$$P = 0.41K_1 - 45.9(PSOLP)$$

Диапазон значений P 2–28

Относительная ошибка 95–7 %

$$R = 0.83; N = 167; N_1 = 167; \text{сигма} = 1.8; \chi^2 = 1.31 (12)$$

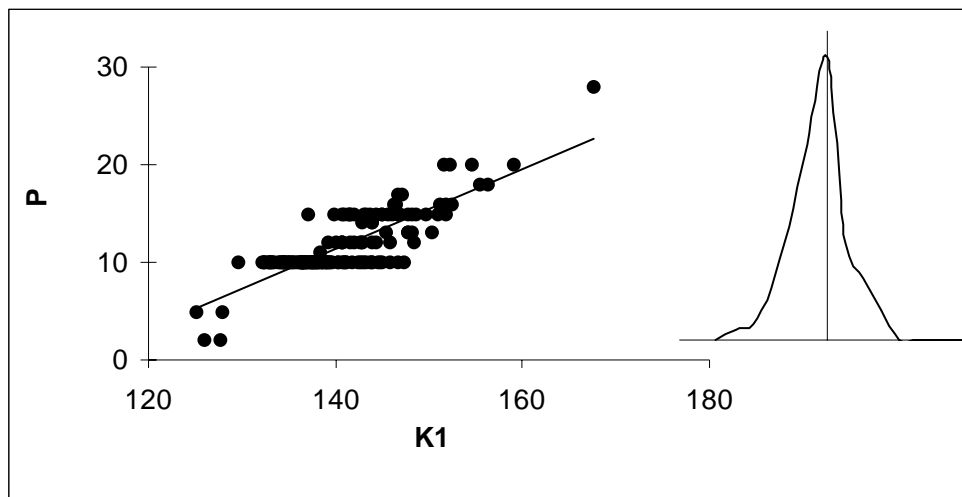


Рис. II.П.1.12 sp–ol (формула PSOLP). Зависимость величины P от состава шпинели, оливины, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в системе шпинель–оливин

$$K_1 = Fe_{sp}^{2+} + Al_{sp}:8$$

$$Fe_{ol}^{2+} = 1.12K_1 - 7.26(PSOLRa)$$

Диапазон значений Fe_{ol}^{2+} 3–16.8

Относительная ошибка 24–4 %

$$R = 0.95; N = 167; N_1 = 164; \text{сигма} = 0.71; \chi^2 = 1.3(12)$$

Диапазон давлений 2–28 кб

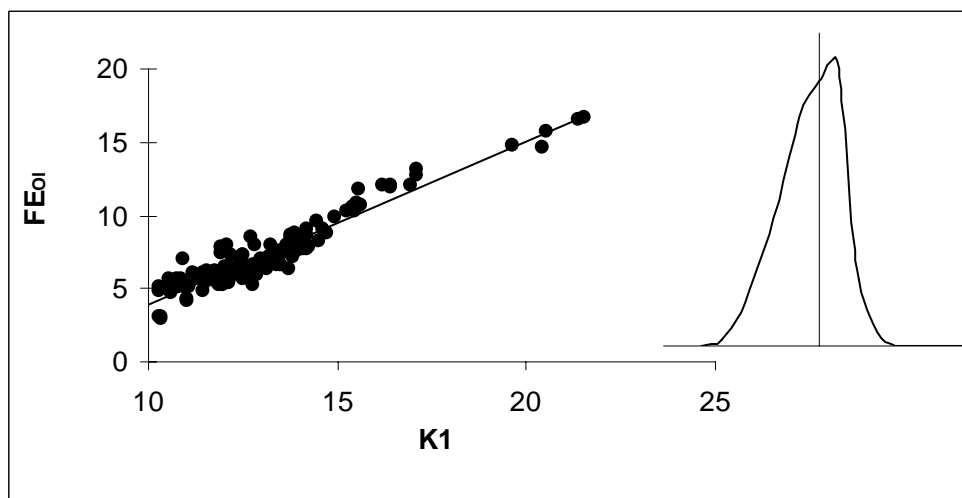


Рис. II.П.1.13 sp–ol (формула PSOLRa). Зависимость величины Fe_{ol}^{2+} от состава шпинели и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{sp} + Cr_{sp} \cdot 9$$

$$Mg_{ol} = 1.17K_1 + 25.62(PSOLRb)$$

Диапазон значений Mg_{ol} 48.7–63.2

Относительная ошибка 2–1 %

$R = 0.95$; $N = 167$; $N_1 = 163$; $\sigma = 0.78$; $\chi^2 = 2.02(12)$

Диапазон давлений 2–28 кб

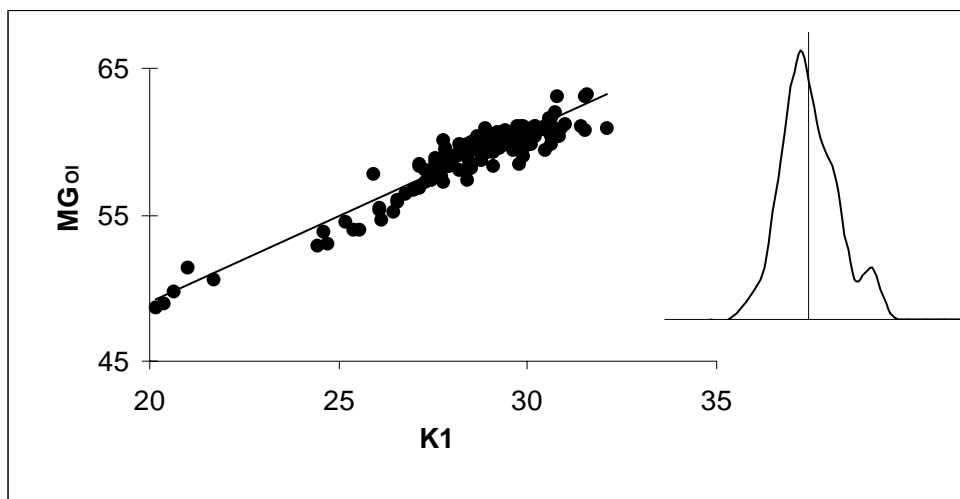


Рис. II.1.14 sp-ol (формула PSOLRb). Зависимость величины Mg_{ol} от состава шпинели и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{sp}(Fe^{2+}_{sp} - Ti_{sp}) \cdot 100Mg_{sp}; K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_{ol}$$

$$K_2 = 0.99K_1 + 0.01(PSOLRc)$$

Диапазон значений K_2 0.05–0.34; K_1 0.04–0.35

Относительная ошибка 24–4 %

$R = 0.97$; $N = 167$; $N_1 = 161$; $\sigma = 0.012$; $\chi^2 = 1.03(12)$

Диапазон давлений 2–28 кб

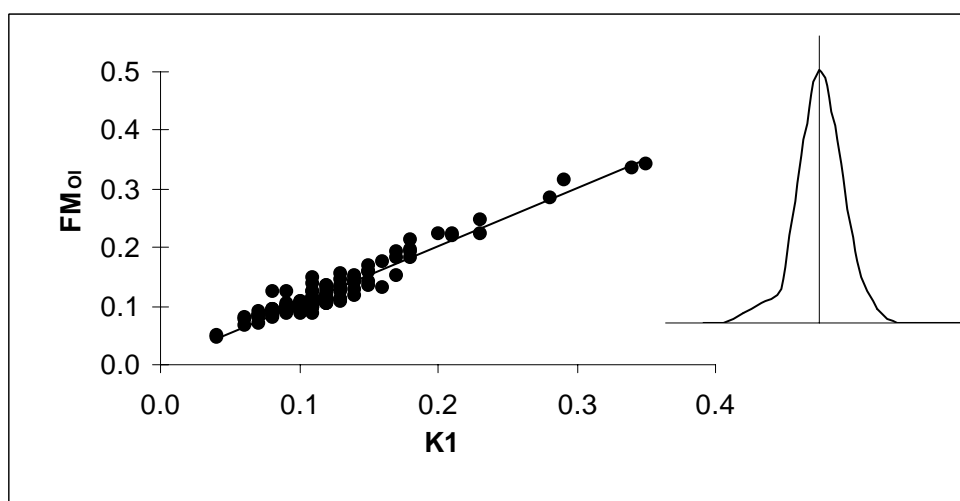


Рис. II.1.15 sp-ol (формула PSOLRc). Зависимость величины K_2 от состава шпинели и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol}:(Mg_{ol} + 3Al_{sp}); K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_{sp}$$

$$K_2 = 8.92K_1 - 0.03(PSOLRd)$$

Диапазон значений K_2 0.06–0.95; K_1 0.01–0.11

Относительная ошибка 55–4 %

$R = 0.96$; $N = 167$; $N_1 = 166$; сигма = 0.036; $\chi^2 = 0.95$ (12)

Диапазон давлений 2–28 кб

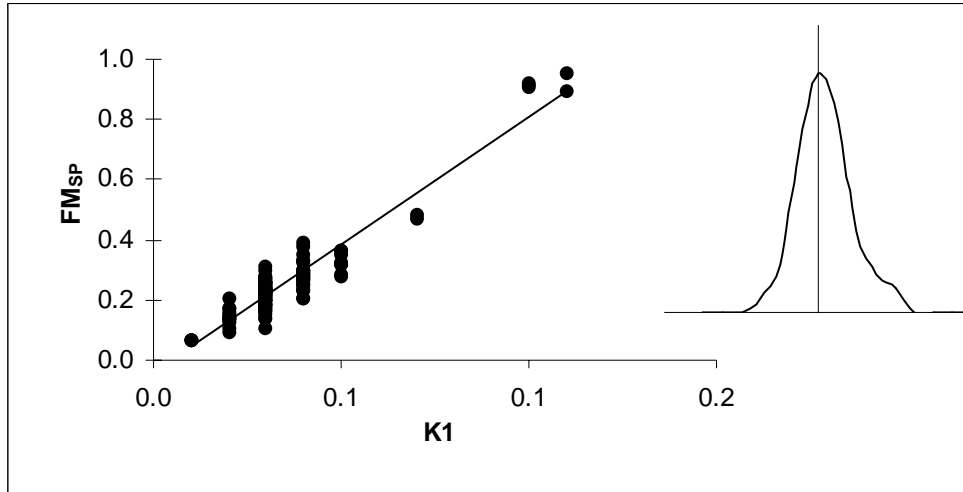


Рис. П.П.1.16 sp-ol (формула PSOLRd). Зависимость величины K_2 от состава шпинели и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol}:(Mg_{ol} - Cr_{sp}:1.3); K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_{sp}$$

$$K_2 = 1.67K_1 - 0.01(PSOLRf)$$

Диапазон значений K_2 0.06–0.95; K_1 0.05–0.58

Относительная ошибка 49–3 %

$R = 0.97$; $N = 167$; $N_1 = 165$; сигма = 0.032; $\chi^2 = 2.11$ (12)

Диапазон давлений 2–28 кб

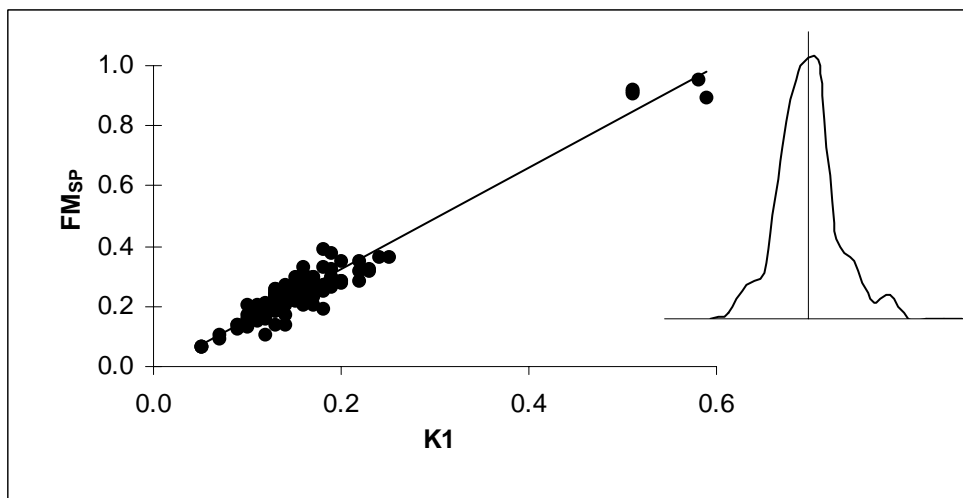


Рис. П.П.1.17 sp-ol (формула PSOLRf). Зависимость величины K_2 от состава шпинели и распределение средноквадратичной ошибки.

5.2. Система расплав–шпинель–ортопироксен

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [35; 49; 85; 86; 91; 158; 159; 175; 239; 243; 247; 258; 262; 272; 279; 288; 291; 292; 298; 299; 300; 309; 322; 323; 324; 325; 335; 337; 339; 340; 346].

Общее число тройных анализов – 223 т. После исключения анализов составов шпинелей, ортопироксена и стекол с суммами окислов менее 97 % и более 102 % – 197 т. После исключения анализов с нулевыми содержаниями железа в стекле – 162 т. Для расчета титана отброшены точки с его нулевыми содержаниями – 148 т. Для расчета железа отброшены 3 точки с содержаниями кремния в расплаве > 70 % – 159 т. Для расчета величины давления были отброшены точки с давлением < 11 кб – 67 точек.

Таблица II.П.2.1 sp–орх. Диапазоны составов стекол (расплавов), шпинелей и ортопироксенов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

<i>PSOP</i>		Стекла		Шпинели			
SiO ₂	44.4–76.1	Si	41.14–72.22	SiO ₂	0–8.42	Si	0–7.09
TiO ₂	0–2.43	Ti	0–1.72	TiO ₂	0–0.89	Ti	0–0.6
Al ₂ O ₃	8.82–21	Al	9.44–21.84	Al ₂ O ₃	14.81–70.1	Al	18.14–84.43
FeO	1.56–18.6	Fe	1.24–14.51	FeO	3.1–36.86	Fe	2.06–29.11
MnO	0–0.48	Mn	0–0.38	MnO	0–0.54	Mn	0–0.41
MgO	0.44–19.16	Mg	0.62–25.81	MgO	0.23–26.6	Mg	0.39–31.57
CaO	0.73–14.8	Ca	0.74–14.3	CaO	0–0.5	Ca	0–0.45
Na ₂ O	0–7.49	Na	0–12.82	Na ₂ O	0–0.24	Na	0–0.39
K ₂ O	0–5.17	K	0–6.27	K ₂ O	0–0.01	K	0–0.01
Cr ₂ O ₃	0–1.48	Cr	0–1.06	Cr ₂ O ₃	0–56.46	Cr	0–46.39
T °C	900–1455	P, кб	3–20			Mg _#	3.69–93.86

Продолжение таблицы II.П.2.1 sp–орх.

Ортопироксены		Wo	0.71–5.9
SiO ₂	49.3–56.98	Si	43.75–49.01
TiO ₂	0–0.72	Ti	0–0.5
Al ₂ O ₃	1.62–11	Al	1.65–11.76
FeO	2.79–20.7	Fe	1.98–16.3
MnO	0–0.88	Mn	0–0.67
MgO	18.09–34.03	Mg	24.7–43.46
CaO	0.29–2.93	Ca	0.28–2.73
Na ₂ O	0–0.33	Na	0–0.55
K ₂ O	0–0.01	K	0–0.01
Cr ₂ O ₃	0–2.05	Cr	0–1.39
En	61.4–91.31	Fs	4.39–37.89

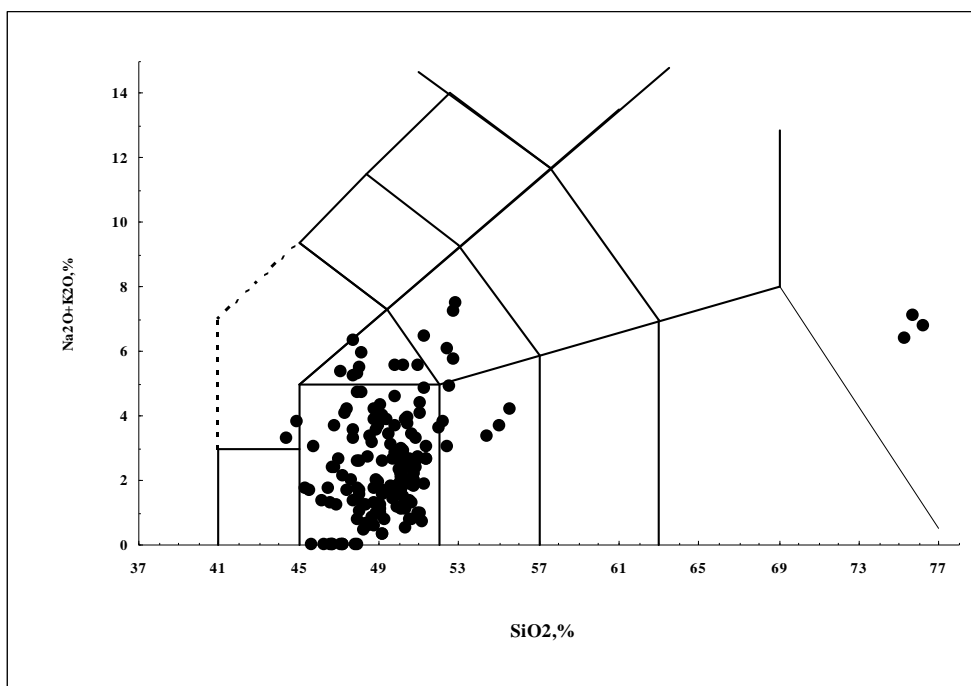


Рис. II.П.2.1 sp–орх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами шпинели и ортопироксена, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = [23(Ti_{sp} + 5Ti_{op}) + Al_{op} \cdot 2 + Fe_{sp}^{2+}] \cdot 10$$

$$Ti_m = 0.21K_1 + 0.05(PSOP2)$$

Диапазон значений Ti 0.08–1.7 (атом. %)

Относительная ошибка 150–7 %

$R = 0.89$; $N = 148$; $N_1 = 147$; сигма = 0.12; $\chi^2 = 1.16$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

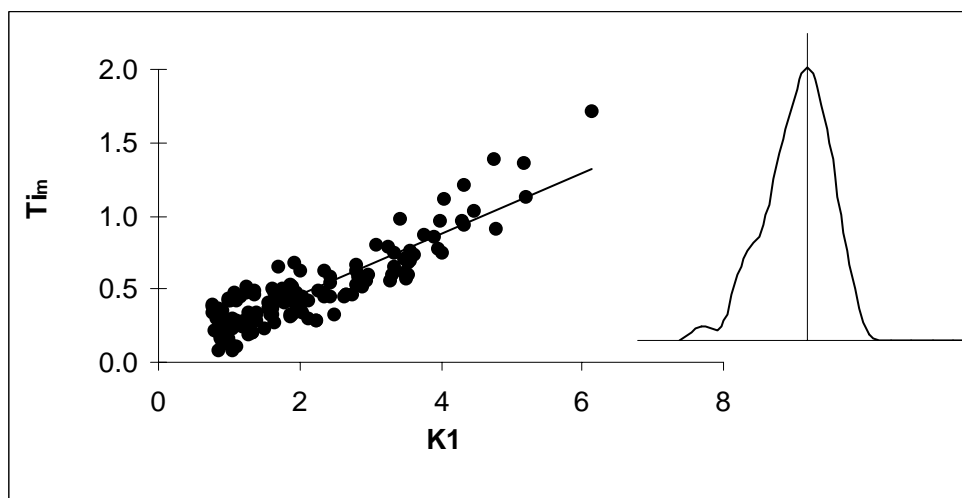


Рис. II.П.2.2 sp–орх (**формула PSOP2**). Зависимость содержаний Ti_m от состава шпинели, ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = 2Si_{op} + 1.8Al_{op} - Al_{sp} + 3Fe^{3+}_{sp} + P$$

$$Al_m = -0.2K_1 + 31.15(PSOP3)$$

Диапазон значений Al 9.4–21.4 (атом. %)

Относительная ошибка 11–5 %

$R = -0.9$; $N = 162$; $N_1 = 160$; $\sigma = 1$; $\chi^2 = 1.28$ (12)

Диапазон давлений 3–20 кб

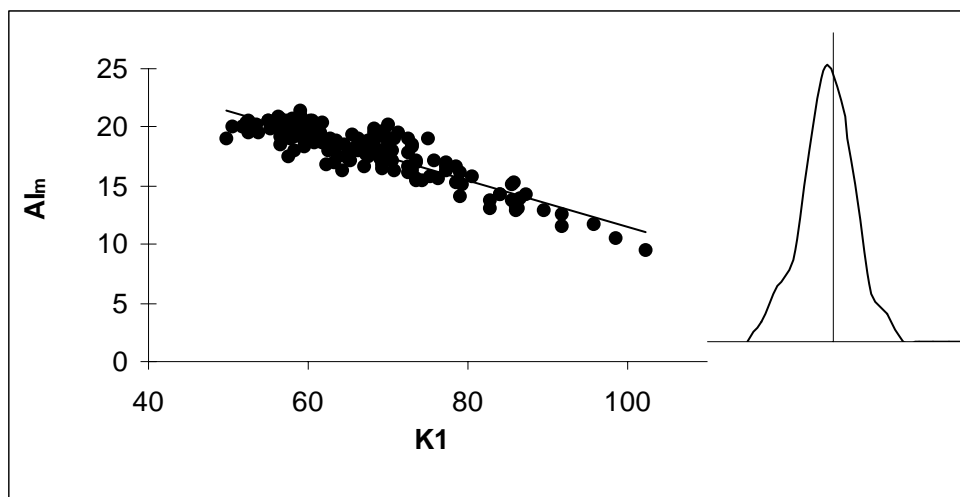


Рис. П.П.2.3 sp–орх (формула PSOP3). Зависимость содержаний Al_m от состава шпинели, ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний двухвалентного железа в расплаве

$$K_1 = Fe^{2+}_{sp} + Fe^{3+}_{sp} + Fe^{2+}_{op} - 3Na_{op} + P:2$$

$$Fe^{2+}_m = 0.4K_1 - 1.10(PSOP5)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 2.6–14.5 (атом. %)

Относительная ошибка 30–5 %

$R = 0.92$; $N = 159$; $N_1 = 158$; $\sigma = 0.80$; $\chi^2 = 1.29$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

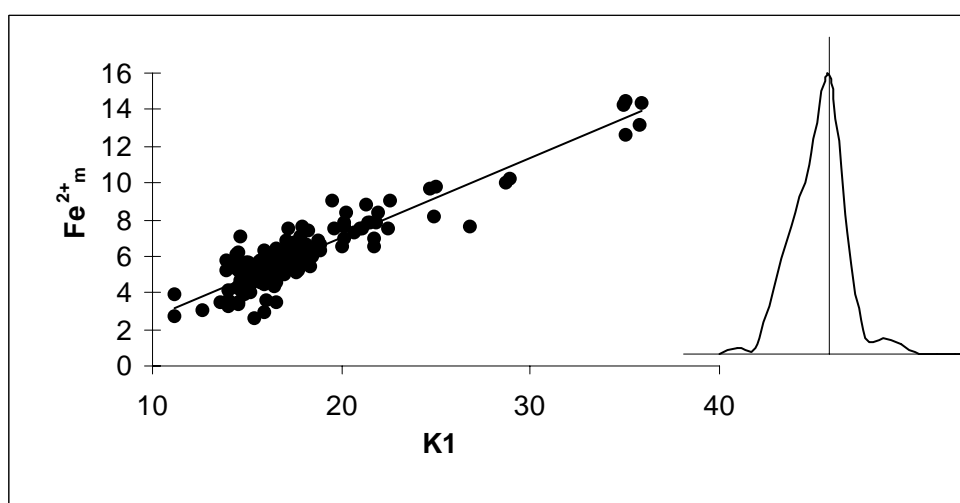


Рис. П.П.2.4 sp–орх (формула PSOP5). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава шпинели, ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Mg_{op} - 6Na_{op} + Mg_{sp:2} + Cr_{sp:4} - 3(Na_m + K_m) + P$$

$$Mg_m = 0.29K_1 - 0.46(PSOP7a)$$

Диапазон значений Mg 7.7–24.9 (атом. %)

Относительная ошибка 21–6 %

R = 0.91; N = 159; N₁ = 158; сигма = 1.6; $\chi^2 = 3.09$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

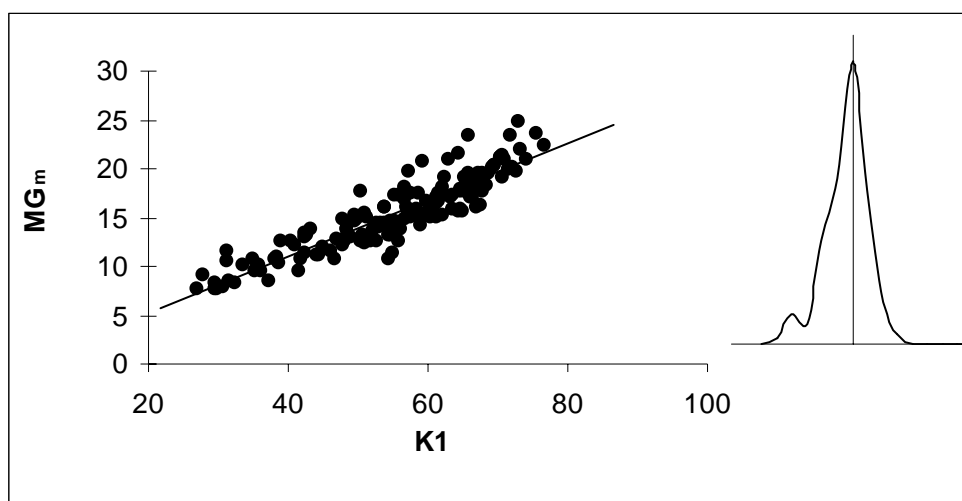


Рис. II.2.5 sp–орх (формула PSOP7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава шпинели, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{op} - Ca_{op} - 6Na_{op} - Fe_{sp}^{3+} + Mg_{sp:2} + Cr_{sp:4} - Si - Al - 3Ti + P$$

$$Mg_m = 0.48K_1 + 14.85(PSOP7b)$$

Диапазон значений Mg 7.7–24.9 (атом. %)

Относительная ошибка 21–6 %

R = 0.9; N = 159; N₁ = 157; сигма = 1.6; $\chi^2 = 2.08$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

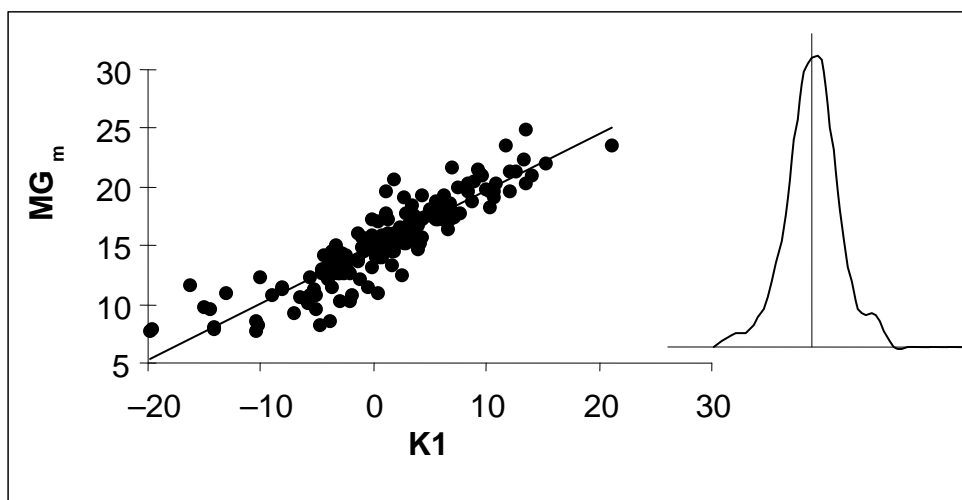


Рис. II.2.6 sp–орх (формула PSOP7b). Зависимость содержаний Mg_m от состава шпинели, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет железо-магниевого отношения в расплаве

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{op}}; K_2 = [(\text{Fe}^{2+} - 4\text{Ti} + \text{Al}:5):\text{Mg}]_{\text{sp}}; K_3 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$$

$$K_3 = 0.14(23K_1 + K_2) - 0.06(\text{PSOP14})$$

Диапазон значений Fe^{2+}/Mg 0.14–1.3

Относительная ошибка 36–4 %

$$R = 0.97; N = 159; N_1 = 153; \text{сигма} = 0.05; \chi^2 = 6.51 \text{ (12)}$$

Диапазон давлений 10–20 кб

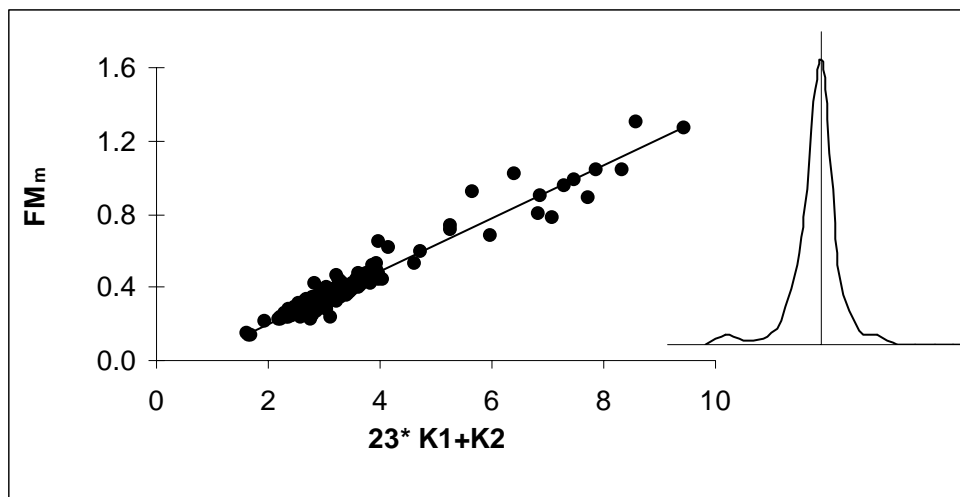


Рис. II.П.2.7 sp–орх (формула PSOP14). Зависимость величины $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$ от состава шпинели, ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = \text{Si}_m:6 + \text{Mg}_m - 0.5\text{Mg}_{\text{op}} - \text{Fe}^{3+}_{\text{sp}}:4 - \text{Fe}^{2+}_{\text{sp}}:7 + \text{P}:2$$

$$T = 11.52K_1 + 1231.98(\text{PSOPT})$$

Диапазон значений T 1210–1455 °C

Относительная ошибка 2–2 %

$$R = 0.87; N = 159; N_1 = 158; \text{сигма} = 24.7 \text{ °C}; \chi^2 = 2.24 \text{ (12)}$$

Диапазон давлений 10–20 кб

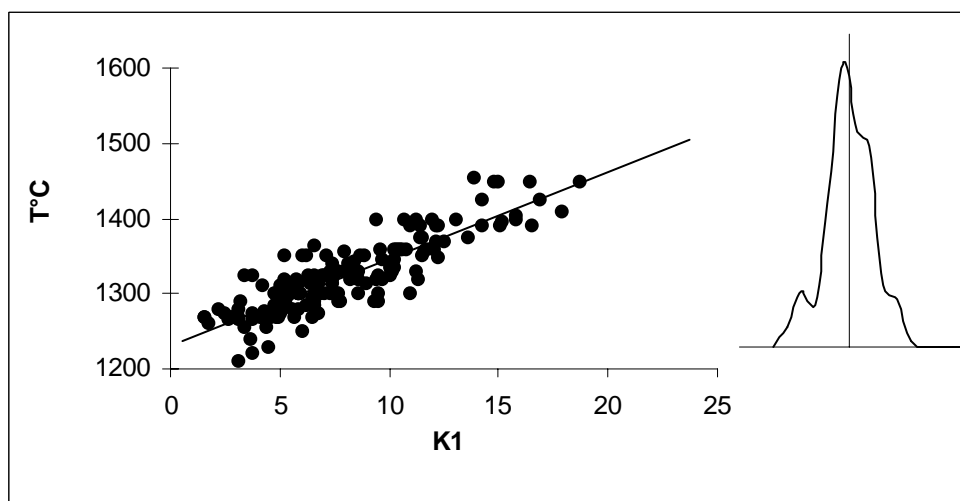


Рис. II.П.2.8 sp–орх (формула PSOPT). Зависимость значения T от состава шпинели, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = Al_{op} + 13Ti_{sp}13 + 9Ti_{op} + 1.5Ca_{op} - Si_m:2 - Ti_m + (Na_m + K_m):2 + T:9$$

$$P = 0.42K_1 - 44.55(PSOPP)$$

Диапазон значений P 1–20 кб

Относительная ошибка 20–10 %

$$R = 0.88; N = 67; N_1 = 66; \text{сигма} = 1; \chi^2 = 0.63 (8)$$

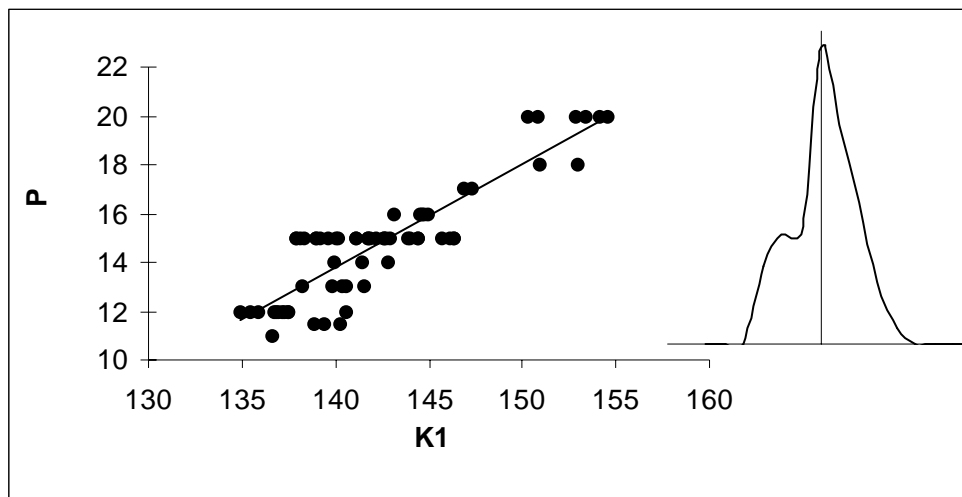


Рис. П.П.2.9 sp–орх (формула PSOPP). Зависимость величины P от состава шпинели, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в системе шпинель–ортопироксен

$$K_1 = Fe^{2+}_{sp} + Al_{sp}:9 - P:10$$

$$Fe^{2+}_{op} = 0.7K_1 - 3.19(PSOPRa)$$

Диапазон значений Fe^{2+}_{op} 2–10.6

Относительная ошибка 24–5 %

$$R = 0.95; N = 159; N_1 = 156; \text{сигма} = 0.48; \chi^2 = 1.79 (12)$$

Диапазон давлений 10–20 кб

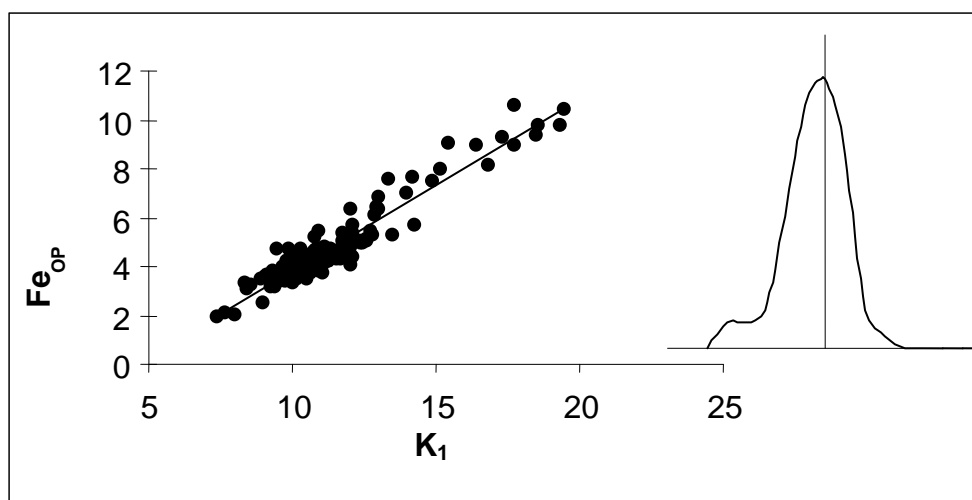


Рис. П.П.2.10 sp–орх (формула PSOPRa). Зависимость величины Fe^{2+}_{op} от состава шпинели и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{op} - Ca_{op}:3; K_2 = Al_{sp} + P:2$$

$$K_2 = 5.35K_1 + 28.75(PSOPRb)$$

Диапазон значений K_2 25.6–75.9

Относительная ошибка 20–7 %

$R = 0.91$; $N = 159$; $N_1 = 156$; $\sigma = 5$; $\chi^2 = 1.18$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

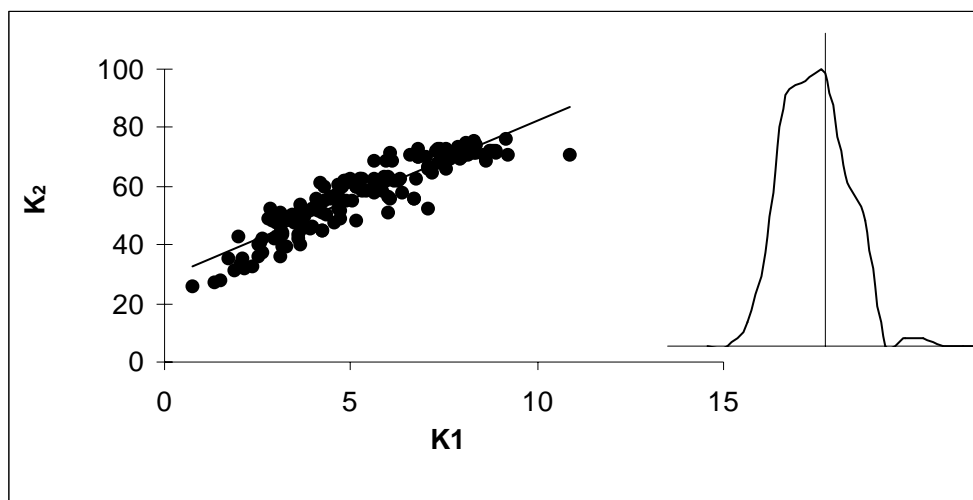


Рис. П.П.2.11 sp–орх (формула PSOPRb). Зависимость величины K_2 от состава шпинели и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{sp} + Fe^{3+}_{sp}$$

$$K_1 = 4.57Al_{op} + 24.49(PSOPRc)$$

Диапазон значений K_1 20–66.6

Относительная ошибка 28–8 %

$R = 0.88$; $N = 162$; $N_1 = 160$; $\sigma = 5.5$; $\chi^2 = 1.58$ (12)

Диапазон давлений 3–20 кб

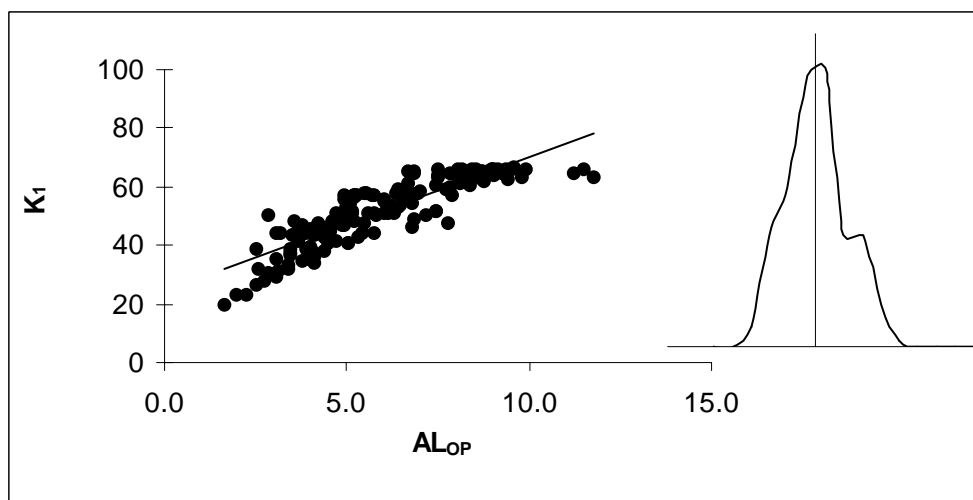


Рис. П.П.2.12 sp–орх (формула PSOPRc). Зависимость величины K_1 от состава ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

5.3. Система расплав–шпинель–клинопироксен

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [19; 35; 49; 80; 85; 86; 91; 158; 159; 175; 247; 258; 262; 272; 279; 288; 291; 298; 299; 300; 309; 321; 322; 323; 324; 325; 335; 337; 339; 340].

Общее число тройных анализов – 222 т. После исключения анализов составов шпинелей, авгита и стекол с суммами окислов менее 97 % и более 102 % – 193 т. После исключения анализов с нулевыми содержаниями железа в стекле – 162 т. Для расчета титана отброшены точки с его нулевыми содержаниями – 151 т. Для расчета натрия были отброшены точки с нулевыми его содержаниями в расплаве – 152 т. Для расчета хрома были отброшены точки с нулевыми содержаниями его в расплаве – 107 т. Для расчета давления были отброшены точки < 11 кб – 91 т. Для расчета равновесия по распределению хрома были отброшены точки с содержаниями хрома в авгите < 0.02 (атом %).

Таблица II.П.3.1 sp–срх. Диапазоны составов стекол (расплавов), шпинелей и клинопироксенов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

PSA	Стекла			Шпинели			
SiO ₂	44.12–55.87	Si	40.54–53.01	SiO ₂	0–8.42	Si	0–7.09
TiO ₂	0–2.43	Ti	0–1.72	TiO ₂	0–1.08	Ti	0–0.84
Al ₂ O ₃	11.5–21	Al	12.65–21.84	Al ₂ O ₃	23.96–70.1	Al	28.24–66.21
FeO	3.31–20	Fe	2.54–15.79	FeO	3.1–27	Fe	2.06–23.33
MnO	0–0.39	Mn	0–0.31	MnO	0–0.35	Mn	0–0.3
MgO	3.74–16.7	Mg	5.29–22.38	MgO	9.18–26.6	Mg	14.14–31.57
CaO	6.46–14.8	Ca	6.11–14.3	CaO	0–1.96	Ca	0–1.8
Na ₂ O	0–7.49	Na	0–12.82	Na ₂ O	0–0.24	Na	0–0.39
K ₂ O	0–2.6	K	0–3.02	K ₂ O	0–0.02	K	0–0.02
Cr ₂ O ₃	0–1.06	Cr	0–0.76	Cr ₂ O ₃	0–47.02	Cr	0–37.18
T °C	1150–1455	P, кб	10–20			Mg#	37.74–93.86

Продолжение таблицы II.П.3.1 sp–срх.

Пироксены		Wo	11.7–41.64
SiO ₂	47.3–54.04	Si	43.38–48.22
TiO ₂	0–1.59	Ti	0–1.11
Al ₂ O ₃	2.89–12.9	Al	3.11–13.54
FeO	2.13–13.8	Fe	1.57–10.86
MnO	0–0.41	Mn	0–0.31
MgO	13.17–24.7	Mg	18.27–32.64
CaO	5.48–19.4	Ca	5.31–18.84
Na ₂ O	0–1.72	Na	0–3.05
K ₂ O	0–0.02	K	0–0.02
Cr ₂ O ₃	0–2.11	Cr	0–1.49
En	44.03–69.78	Fs	3.49–25.45

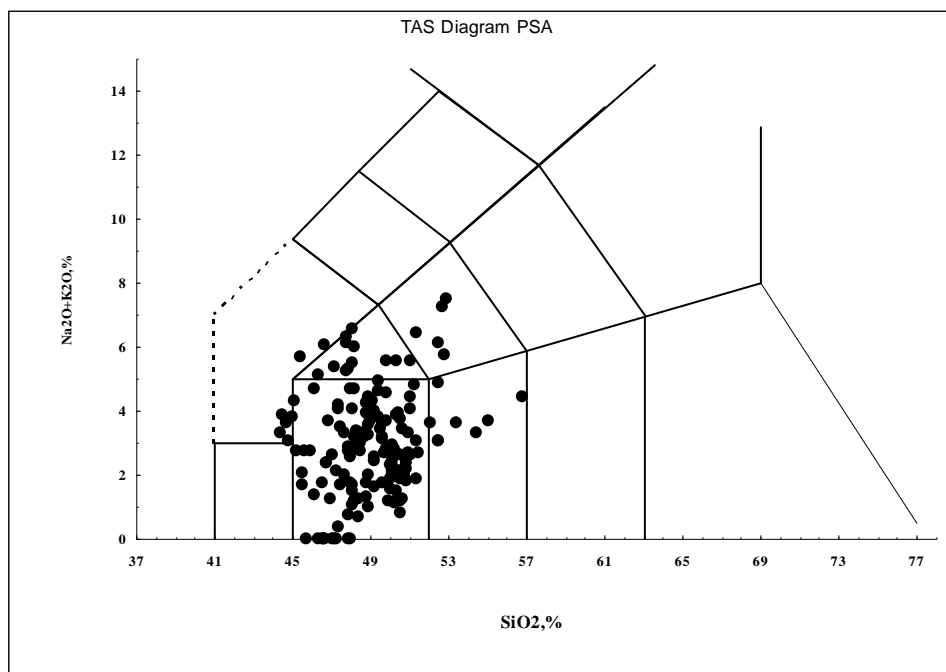


Рис. П.П.3.1 sp–срх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами шпинели и клинопироксена, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = 8(Ti_{sp} + Ti_{av}) + Fe^{2+}_{av}:3 - Fe^{2+}_{sp}:7 + P:4$$

$$Ti_m = 0.11K_1 - 0.12(PSA2)$$

Диапазон значений Ti 0.1–1.7 (атом. %)

Относительная ошибка 130–8 %

$R = 0.91$; $N = 151$; $N_1 = 147$; $\sigma = 0.13$; $\chi^2 = 2.7$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

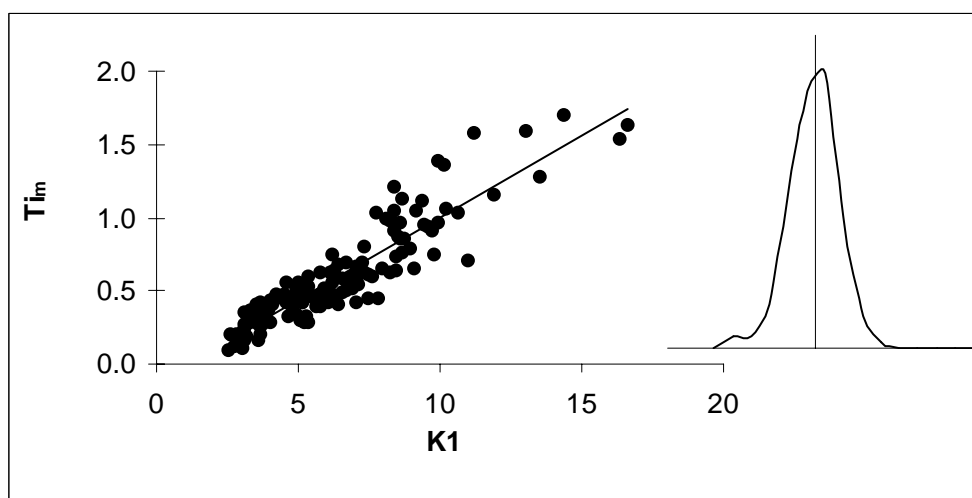


Рис. П.П.3.2 sp–срх (**формула PSA2**). Зависимость содержаний Ti_m от состава шпинели, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = 0.2Al_{sp} + Al_{av} - Cr_{sp}:7 - 2Cr_{av} - Fe^{2+}_{sp}:4 + Ca_{av}:3 + 2Na_{av} - 1.4P$$

$$Al_m = 0.26K_1 + 17.73(PSA3)$$

Диапазон значений Al 12.6–21.8 (атом. %)

Относительная ошибка 7–4 %

$$R = 0.88; N = 162; N_1 = 160; \text{сигма} = 0.86 \chi^2 = 5.37 (12)$$

Диапазон давлений 10–20 кб

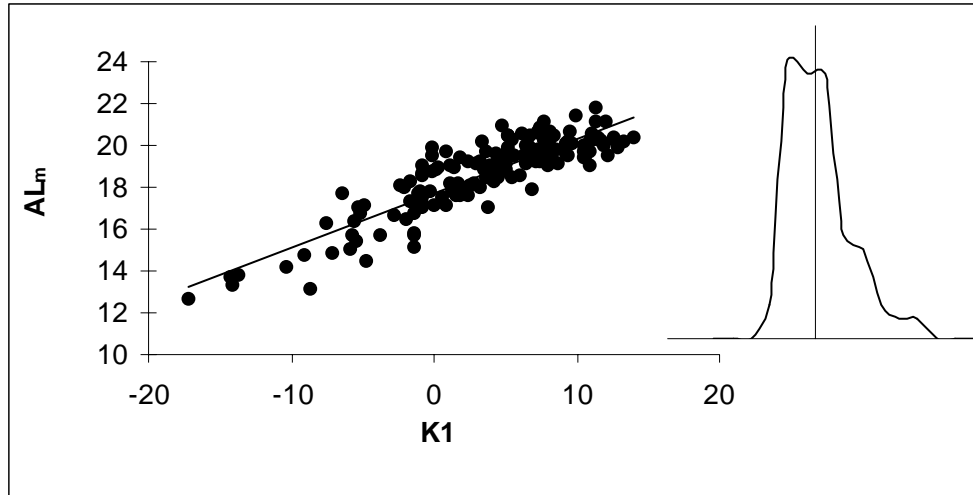


Рис. П.П.3.3 sp–срх (формула PSA3). Зависимость содержаний Al_m от состава шпинели, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний двухвалентного железа в расплаве

$$K_1 = Fe^{2+}_{sp}:3 + Fe^{2+}_{av} + P:8$$

$$Fe^{2+}_m = 0.78K_1 + 0.1(PSA5)$$

Диапазон значений Fe²⁺ 2.5–15.8 (атом. %)

Относительная ошибка 31–5 %

$$R = 0.95; N = 162; N_1 = 161; \text{сигма} = 0.77; \chi^2 = 4.3 (12)$$

Диапазон давлений 10–20 кб

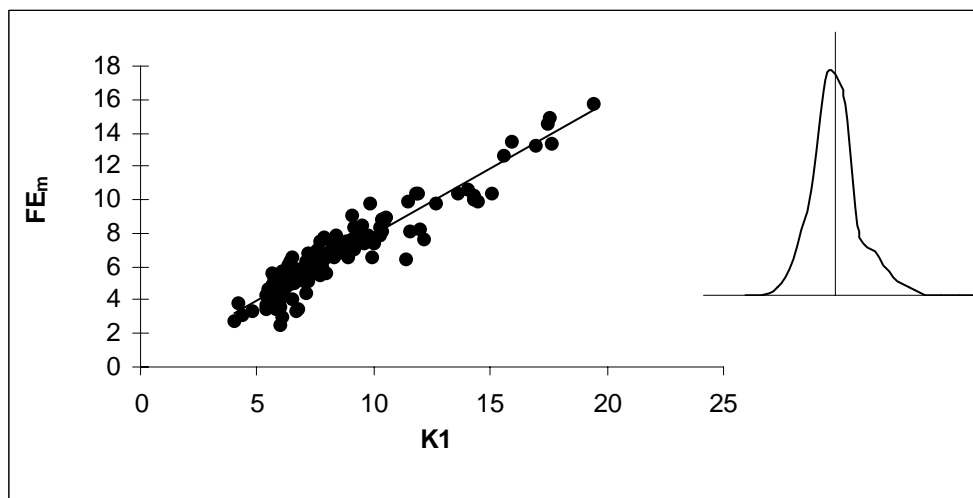


Рис. П.П.3.4 sp–срх (формула PSA5). Зависимость содержаний Fe²⁺_m от состава шпинели, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Mg_{av} + Mg_{sp}:2 - Al_{sp}:8 + Al_{av}:4 + 3Ca_m + P$$

$$Mg_m = 0.41K_1 - 18.15(PSA7a)$$

Диапазон значений Mg 5.3–22.4 (атом. %)

Относительная ошибка 21–5 %

R = 0.95; N = 162; N₁ = 159; сигма = 1.1; $\chi^2 = 2.59$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

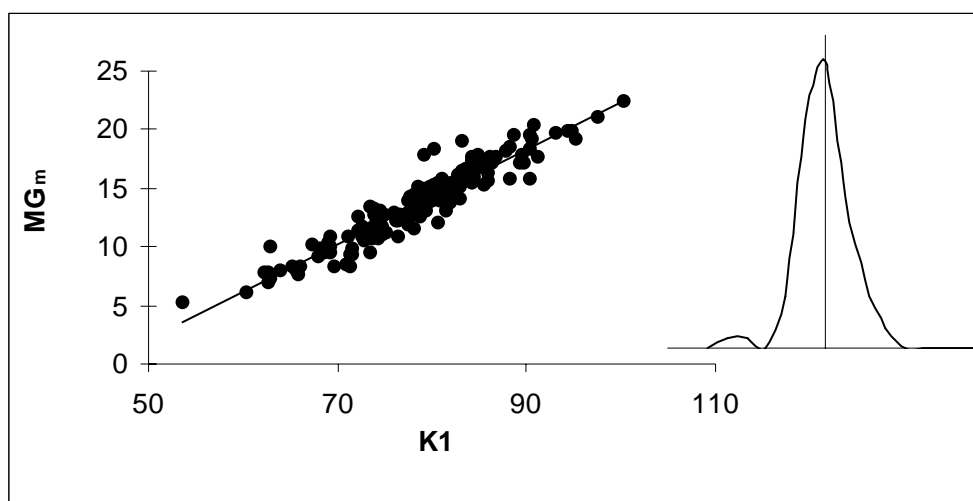


Рис. II.П.3.5 sp–срх (формула PSA7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава шпинели, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{av} + Mg_{sp}:2 - Al_{sp}:6 + Al_{av}:4 - 2(Na_m + K_m) + P$$

$$Mg_m = 0.39K_1 + 0.36(PSA7b)$$

Диапазон значений Mg 5.3–22.4 (атом. %)

Относительная ошибка 23–5 %

R = 0.94; N = 162; N₁ = 162; сигма = 1.2; $\chi^2 = 1.93$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

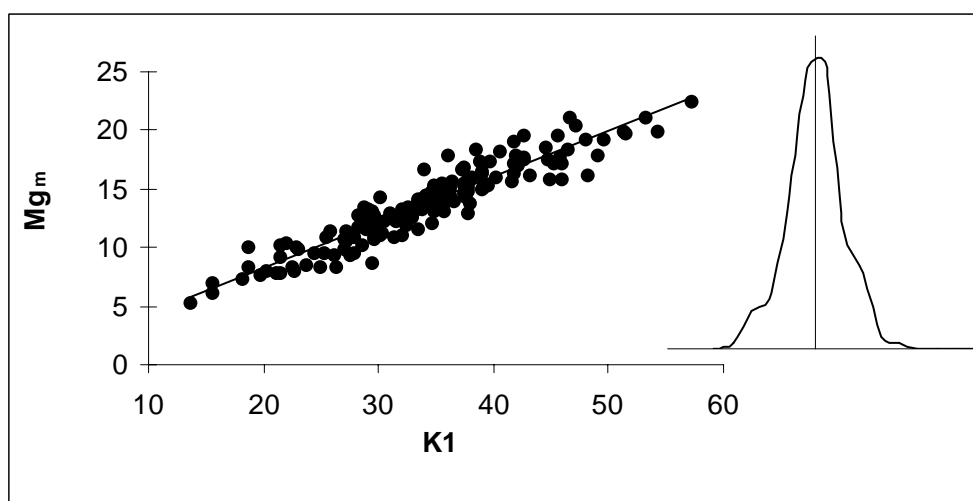


Рис. II.П.3.6 sp–срх (формула PSA7b). Зависимость содержаний Mg_m от состава шпинели, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = 8Ti_{av} - Al_{av}:4 + 4Na_{av} + Fe^{2+}_{sp}:4 - Cr_{sp}:6 + 3(Na_m + K_m) + P:2$$

$$Ca_m = -0.14K_1 + 14.23(PSA8)$$

Диапазон значений Ca 6.1–14.3 (атом. %)

Относительная ошибка 8–3 %

$$R = -0.96; N = 162; N_1 = 160; \text{сигма} = 0.49; \chi^2 = 0.75 (12)$$

Диапазон давлений 10–20 кб

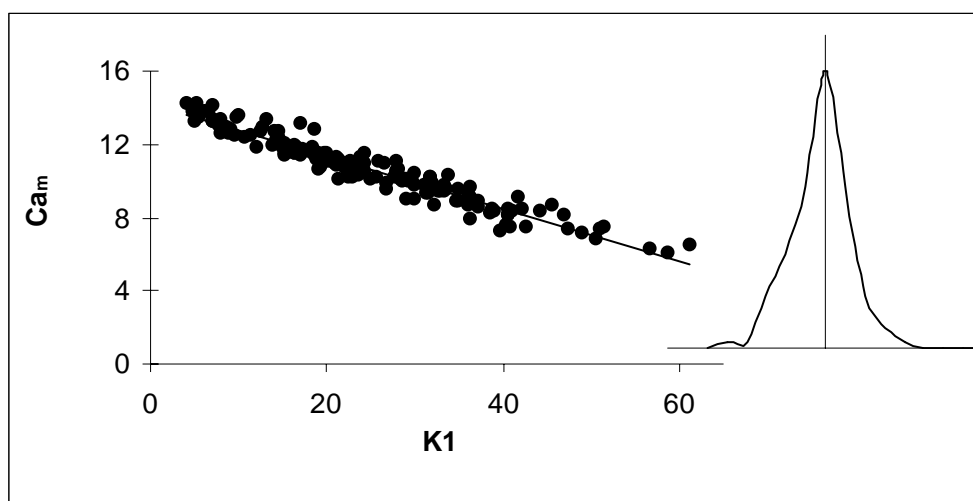


Рис. II.П.3.7 sp–срх (формула PSA8). Зависимость содержаний Ca_m от состава шпинели, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 8Ti_{av} - Al_{av}:2 + 6Na_{av} + Fe^{2+}_{sp}:5 - Cr_{sp}:9 - Mg_m + P:3$$

$$Ca_m = -0.22K_1 + 9.25(PSA8a)$$

Диапазон значений Ca 6.1–14.3 (атом. %)

Относительная ошибка 11–5 %

$$R = -0.93; N = 162; N_1 = 160; \text{сигма} = 0.66; \chi^2 = 0.28 (12)$$

Диапазон давлений 10–20 кб

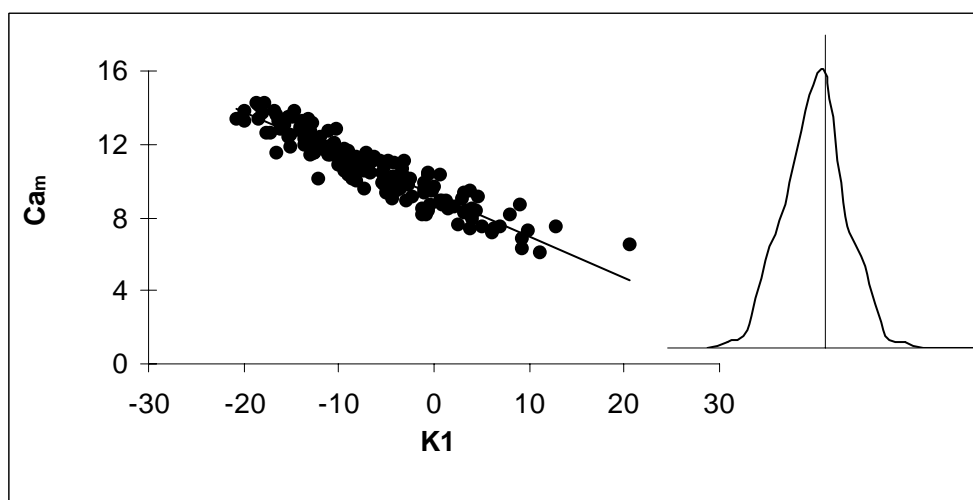


Рис. II.П.3.8 sp–срх (формула PSA8a). Зависимость содержаний Ca_m от состава шпинели, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{av}:7 + 10Ti_{av} - Al_{av}:6 + 8Na_{av} + Fe^{2+}_{sp}:2 - Cr_{sp}:7 + P:5$$

$$Ca_m = -0.23K_1 + 15(PSA8b)$$

Диапазон значений Ca 6.1–14.3 (атом. %)

Относительная ошибка 14–6 %

R = -0.89; N = 162; N₁ = 160; сигма = 0.84; $\chi^2 = 0.55$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

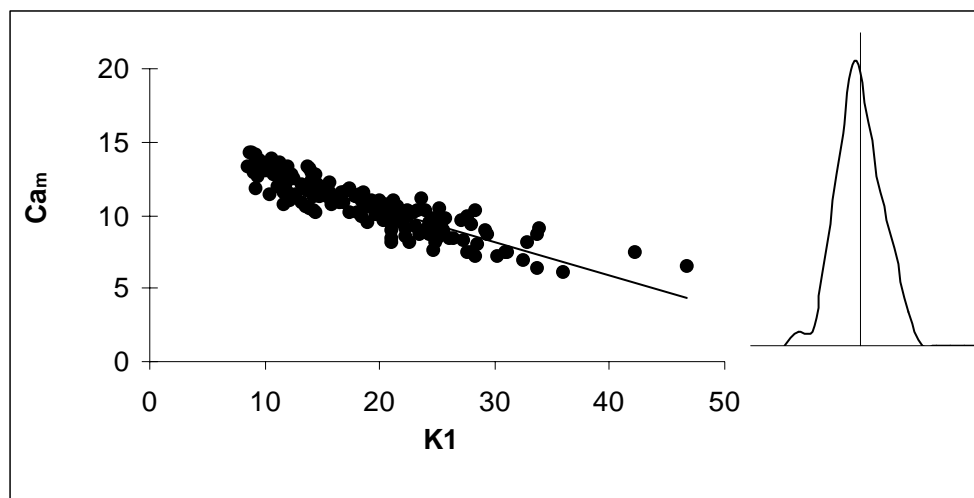


Рис. II.П.3.9 sp–срх (формула PSA8b). Зависимость содержаний Ca_m от состава шпинели, авгита и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний натрия в расплаве

$$K_1 = 9Ti_{av} + 10Na_{av} + Mg_{sp}:3 - P:6$$

$$Na_m = 0.33K_1 - 0.98(PSA9)$$

Диапазон значений Na 0.72–12.8 (атом. %)

Относительная ошибка 175–10 %

R = 0.85; N = 152; N₁ = 151; сигма = 1.26; $\chi^2 = 2.03$ (12)

диапазон давлений 10–20 кб

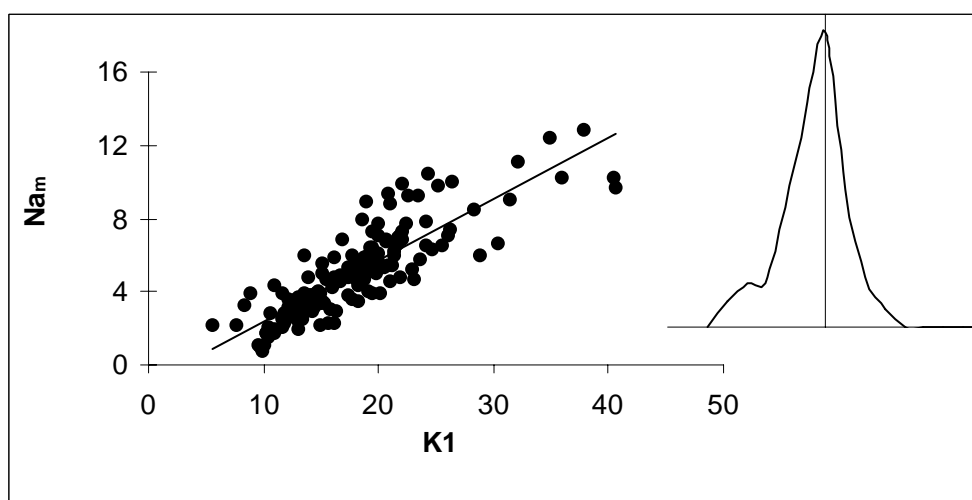


Рис. II.П.3.10 sp–срх (формула PSA9). Зависимость содержаний Na_m от состава шпинели, авгита и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний хрома в расплаве

$$K_1 = (Cr_{sp}Cr_{av} + Al_{sp}:2 - Fe^{2+}_{av}:2 + Mg_m + P:2):10$$

$$Cr_m = 0.11K_1 - 0.51(PSA11)$$

Диапазон значений Cr 0.01–0.51 (атом. %)

Относительная ошибка 620–9 %

R = 0.88; N = 107; N₁ = 106; сигма = 0.07; $\chi^2 = 2.42$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

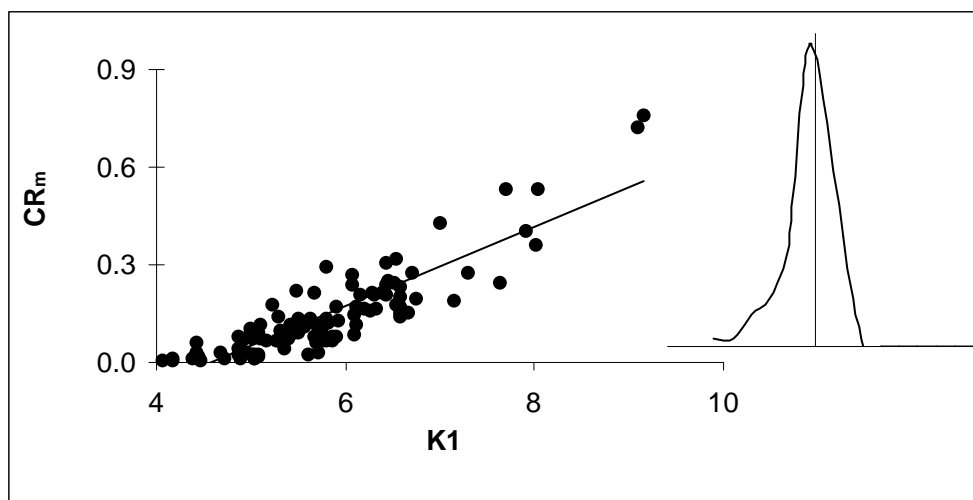


Рис. II.П.3.11 sp–срх (формула PSA11). Зависимость содержаний Cr_m от состава шпинели, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет железо-магниевого отношения в расплаве

$$K_1 = (Fe^{2+}/Mg)_{av}; K_2 = (Fe^{2+}_{sp} + Al_{sp}:2.2):Mg_{sp}; K_3 = (Fe^{2+}/Mg)_m$$

$$K_3 = 0.4(4K_1 + K_2) - 0.22(PSA14)$$

Диапазон значений Fe²⁺/Mg 0.14–1.5

Относительная ошибка 54–5 %

R = 0.96; N = 162; N₁ = 156; сигма = 0.075; $\chi^2 = 5.69$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

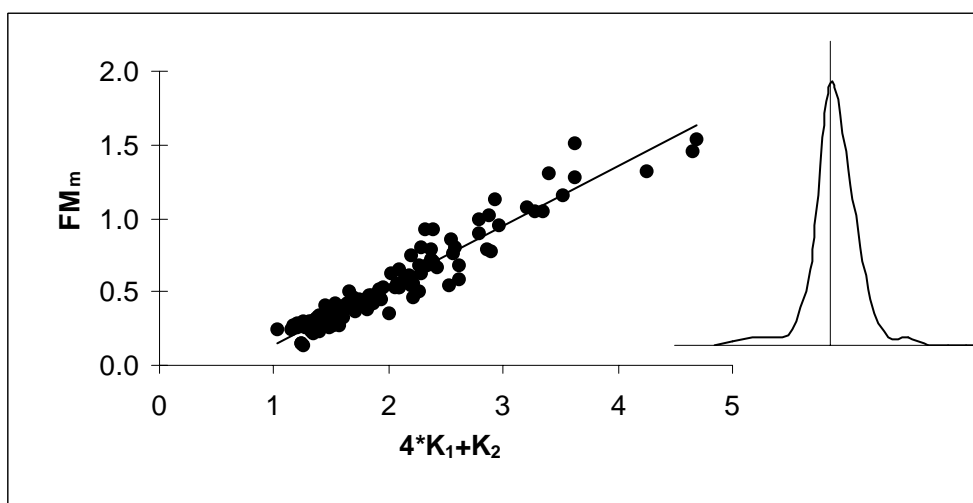


Рис. II.П.3.12 sp–срх (формула PSA14). Зависимость величины (Fe²⁺/Mg)_m от состава шпинели, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = Mg_{av} - Si_{av} - Ca_{av}:2 - Ti_{sp}:2 - Al_{sp}:13 + Mg_m + 1.3P$$

$$T = 5.81K_1 + 1317.93(PSAT)$$

Диапазон значений T 1150–1455 °C

Относительная ошибка 2–2 %

$R = 0.87$; $N = 162$; $N_1 = 160$; сигма = 23.7 °C; $\chi^2 = 2.06$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

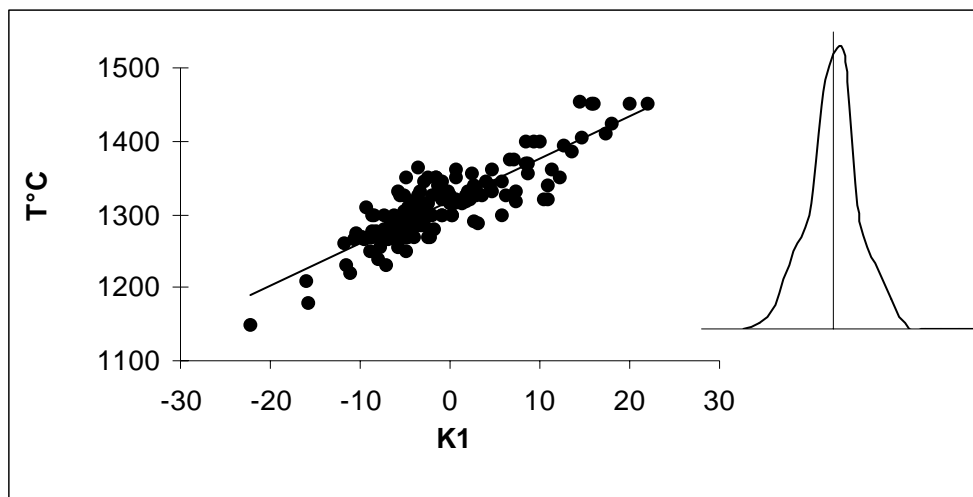


Рис. II.П.3.13 sp–срх (формула PSAT). Зависимость значения T от состава шпинели, авгита, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = 6Ti_{av} - Ca_{av}:3 + 3Na_{av} + Al_{sp}:8 - Cr_{sp}:7 - Si_m:3 - Al_m:2 + Mg_m:2 - Ca_m:3 + T:12$$

$$P = 0.44K_1 - 29(PSAP)$$

Диапазон значений P 11–20 кб

Относительная ошибка 12–7 %

$R = 0.9$; $N = 91$; $N_1 = 90$; сигма = 1.1; $\chi^2 = 0.98$ (8)

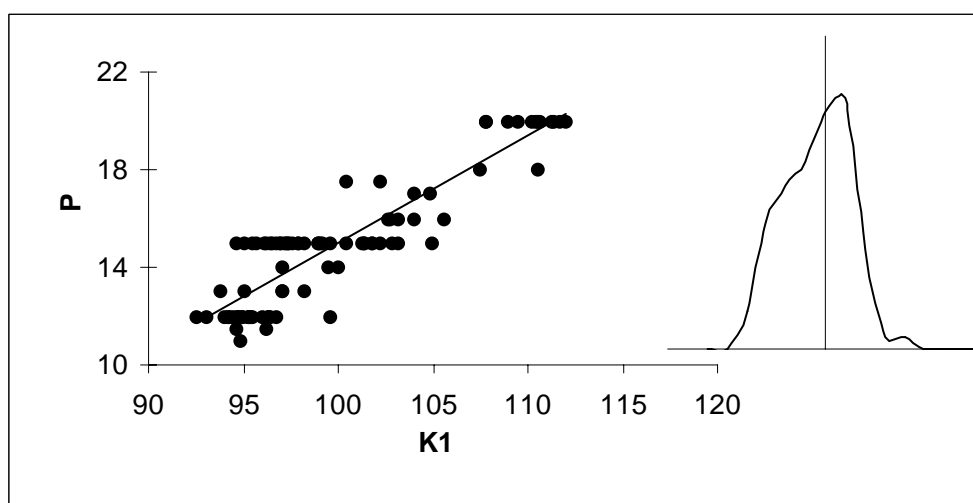


Рис. II.П.3.14 sp–срх (формула PSAP). Зависимость величины P от состава шпинели, авгита, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в системе шпинель–авгит

$$K_1 = (Fe^{2+}/Mg)_{av}; K_2 = [(Fe^{2+}_{sp} + A_{sp}:2.6):Mg_{sp}]$$

$$K_1 = 0.26K_2 - 0.13(PSARa)$$

Диапазон значений K_1 0.05–0.5

Относительная ошибка 44–4 %

$R = 0.97$; $N = 162$; $N_1 = 158$; сигма = 0.022; $\chi^2 = 1.35$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

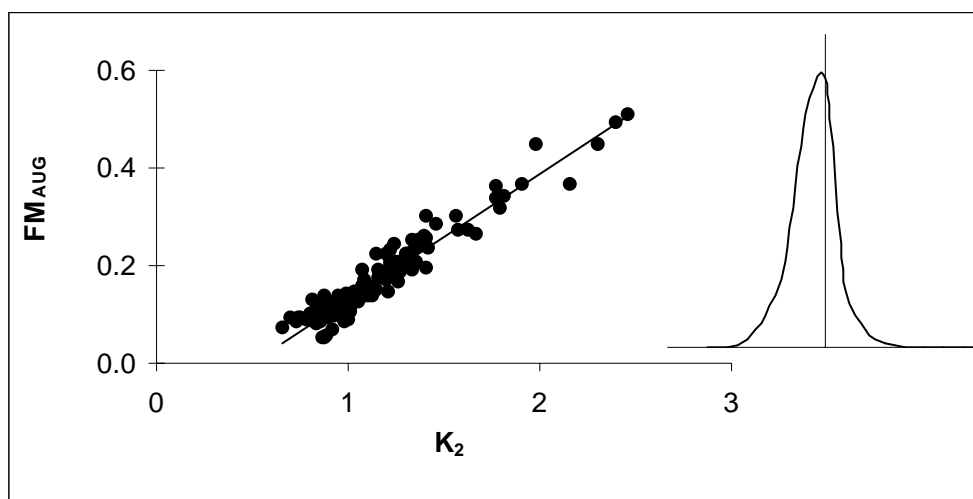


Рис. П.П.3.15 sp–срх (формула PSARa). Зависимость величины K_1 от состава авгита, и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = (Cr_{sp} - Fe^{2+}_{sp}:2.7 - 2Na_{av}):10$$

$$Cr_{av} = 0.39K_1 + 0.28(PSARb)$$

Диапазон значений K_1 0.02–1.5

Относительная ошибка 700–9 %

$R = 0.94$; $N = 137$; $N_1 = 135$; сигма = 0.14; $\chi^2 = 4.14$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

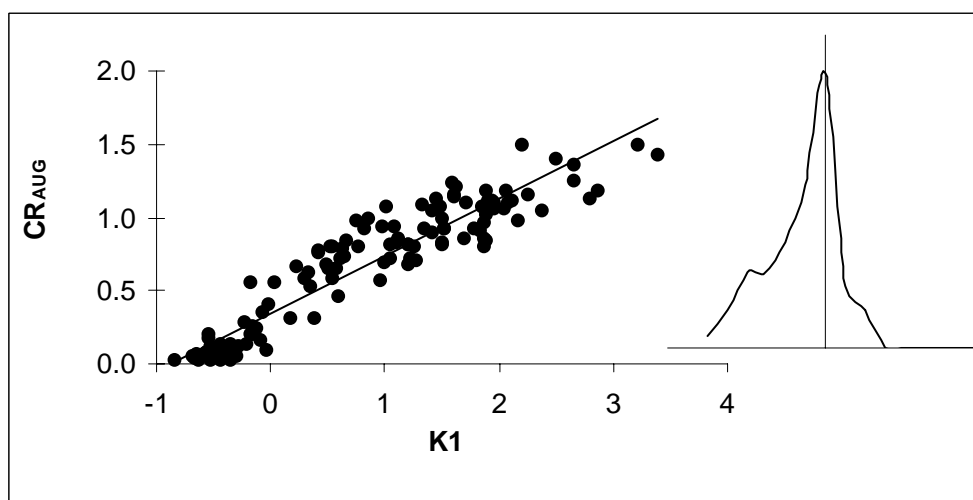


Рис. П.П.3.16 sp–срх (формула PSARb). Зависимость величины Cr_{av} от состава шпинели, авгита и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{av} - Mg_m:3; K_2 = Al_{sp}Al_mT:1000Mg_{sp}$$

$$K_2 = 4.21K_1 + 37.59(PSARc)$$

Диапазон значений K_2 18.2–87

Относительная ошибка 30–6 %

$R = 0.91$; $N = 162$; $N_1 = 160$; $\sigma = 5.5$; $\chi^2 = 0.52$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

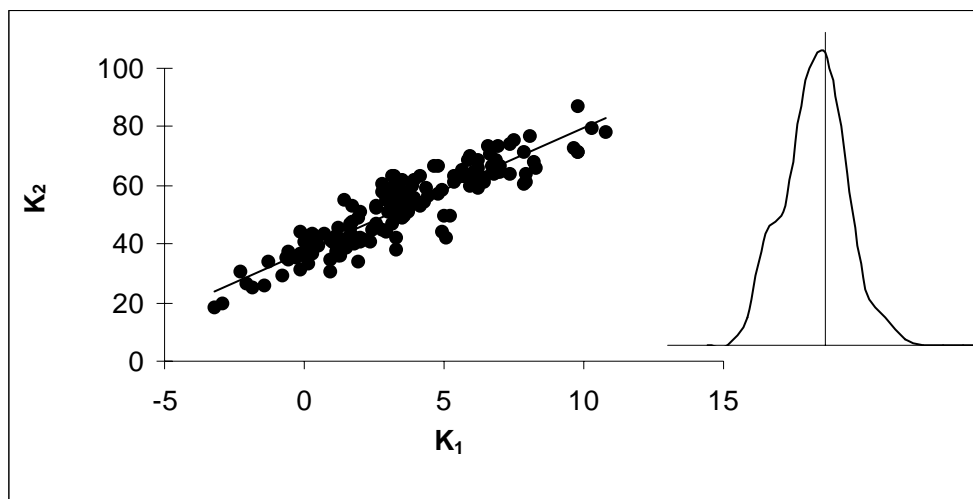


Рис. П.П.3.17 sp – $срх$ (формула **PSARc**). Зависимость величины K_2 от состава шпинели, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

5.4. Система расплав–оливин–ортопироксен

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [19; 35; 37; 38; 39; 49; 59; 82; 85; 86; 87; 91; 95; 156; 158; 159; 167; 168; 175; 177; 181; 243; 247; 254; 258; 262; 272; 273; 277; 279; 288; 291; 292; 298; 299; 300; 302; 309; 314; 318; 322; 323; 324; 325; 327; 335; 339; 340].

Общее число тройных анализов – 426 т. После исключения анализов составов оливина, ортопироксена и стекол с суммами окислов менее 97 % и более 102 % – 406 т. После исключения анализов с нулевыми содержаниями железа в стекле – 375 т. Удалены точки с содержаниями титана в расплаве > 5 % – 369 т. Для расчета титана отброшены точки с его нулевыми содержаниями – 343 т. Для расчета натрия отброшены точки с его нулевыми содержаниями – 345 т. Для расчета хрома отброшены точки с его нулевыми содержаниями – 253 т. Для расчета давления выборка была разбита на 2 массива: 5–20 кб – 339 т. и 21–80 кб – 30 т.

Таблица П.П.4.1 ol–орх. Диапазоны составов стекол (расплавов), оливинов и ортопироксенов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

POLR		Стекла		Оливины			
SiO ₂	38.7–54.8	Si	38.14–50.55	SiO ₂	36–42.17	Si	31.7–35.62
TiO ₂	0–6.76	Ti	0–4.74	TiO ₂	0–0.2	Ti	0–0.12
Al ₂ O ₃	3.57–21	Al	3.87–21.84	Al ₂ O ₃	0–0.66	Al	0–0.64
FeO	3.31–26.7	Fe	2.54–22.01	FeO	4.49–35.6	Fe	2.99–27.37
MnO	0–0.58	Mn	0–0.46	MnO	0–0.48	Mn	0–0.34
MgO	3.85–28.7	Mg	5.32–38.39	MgO	28.3–53.3	Mg	38.78–63.23
CaO	3.15–15.4	Ca	3.01–15.04	CaO	0–0.75	Ca	0–0.67
Na ₂ O	0–7.49	Na	0–12.82	Na ₂ O	0–0.07	Na	0–0.11
K ₂ O	0–4.77	K	0–5.64	K ₂ O	0–0.01	K	0–0.01
Cr ₂ O ₃	0–1.48	Cr	0–1.06	Cr ₂ O ₃	0–1.01	Cr	0–0.65
T °C	1120–1900	P, кб	1.5–80			Fo	58.63–95.48

Продолжение таблицы П.П.4.1ol–орх.

Пироксены		Wo	0.75–14.8
SiO ₂	49.3–58.4	Si	43.75–49.9
TiO ₂	0–0.98	Ti	0–0.63
Al ₂ O ₃	0.29–11	Al	0.29–11.5
FeO	2.37–19.9	Fe	1.69–15.37
MnO	0–0.4	Mn	0–0.3
MgO	22.8–36.9	Mg	30.96–46.8
CaO	0.37–7.32	Ca	0.34–6.84
Na ₂ O	0–0.54	Na	0–0.92
K ₂ O	0–0.07	K	0–0.08
Cr ₂ O ₃	0–2.05	Cr	0–1.39
En	64.85–94.4	Fs	3.51–31.75

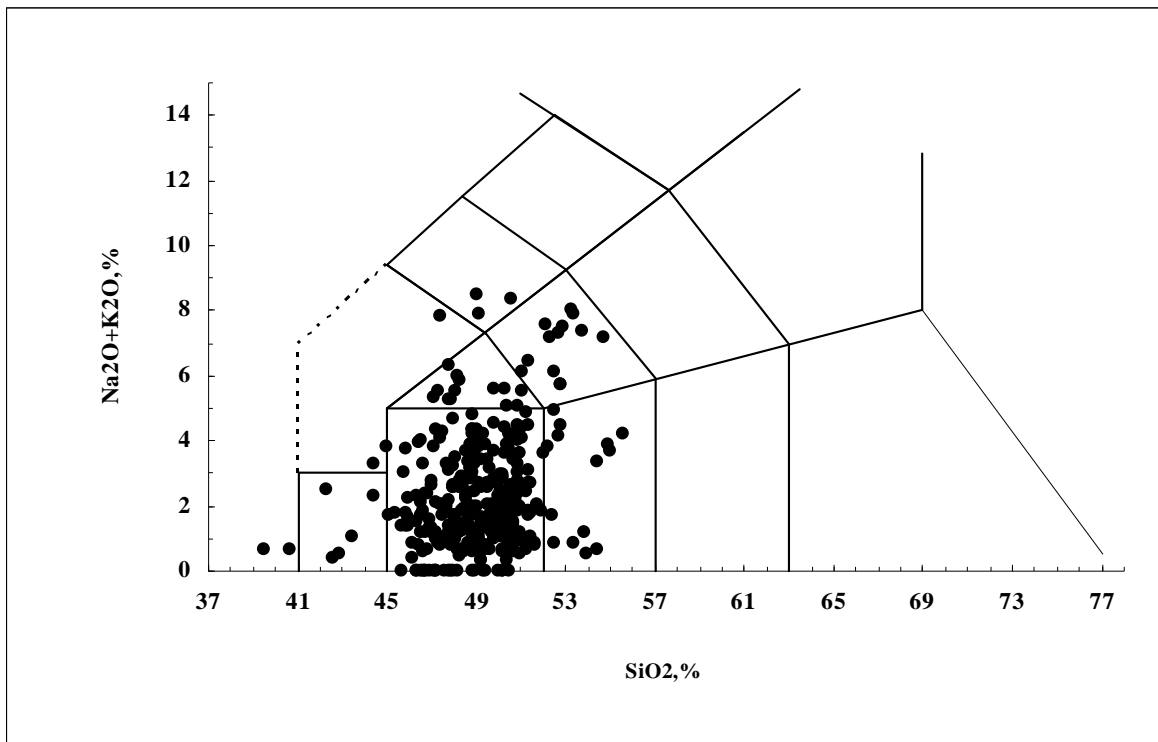


Рис. П.П.4.1 ol–орх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливина и ортопироксена, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = 14 \ln(Mg_{op}:Mg_m) + 2Si_{op} + 1.2(Si/Fe^{2+})_{ol} - 5Ca_{ol}$$

$$Si_m = 0.44K_1 - 4.36(PO1R1)$$

Диапазон значений Si 39–50.5 (атом.%)

Относительная ошибка 3–2 %

$R = 0.82$; $N = 369$; $N_1 = 367$; $\sigma = 1$; $\chi^2 = 1.4$ (12)

Диапазон давлений 1.5–80 кб

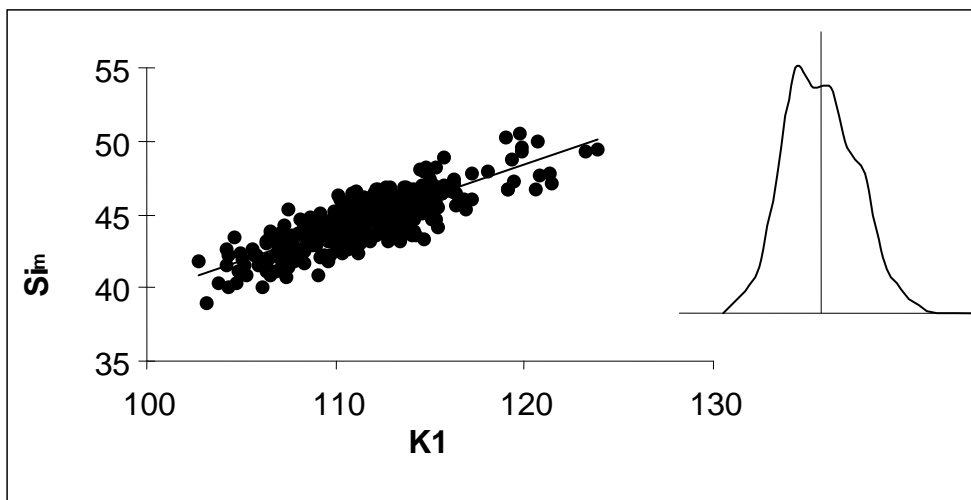


Рис. П.П.4.2 ol–орх (**формула PO1R1**). Зависимость содержаний Si_m от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 13\text{Ln}(\text{Mg}_{\text{op}}:\text{Mg}_{\text{m}}) + 2.1\text{Si}_{\text{op}} + 0.9(\text{Si}/\text{Fe}^{2+})_{\text{ol}} - 4\text{Ca}_{\text{ol}} - 2\text{Na}_{\text{op}} - 4\text{Ti}_{\text{op}} - \text{Fe}^{2+}_{\text{m}}:3 - \text{Ca}_{\text{m}}:5$$

$$\text{Si}_{\text{m}} = 0.43K_1 - 2.3(\text{PO1R1a})$$

Диапазон значений Si 38–50.5 (атом. %)

Относительная ошибка 3–2 %

$R = 0.84$; $N = 369$; $N_1 = 367$; $\text{сигма} = 0.99$; $\chi^2 = 1.09$ (12)

Диапазон давлений 1.5–80 кб

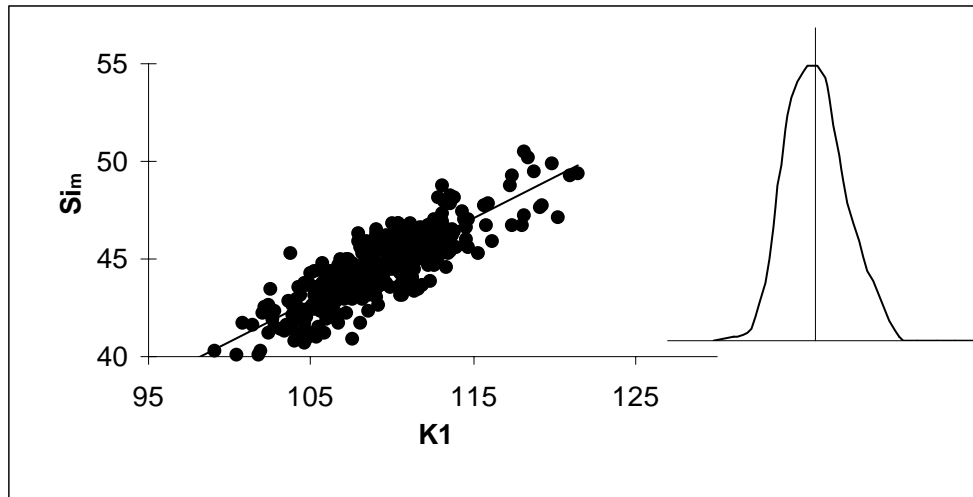


Рис. П.П.4.3 ol–орх (формула PO1R1a). Зависимость содержаний Si_{m} от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = 25(\text{Ti}_{\text{ol}} + \text{Ti}_{\text{op}}) + \text{Si}_{\text{op}}:2 - \text{Mg}_{\text{ol}}:4 + \text{P}:17$$

$$\text{Ti}_{\text{m}} = 0.12K_1 - 0.91(\text{PO1R2})$$

Диапазон значений Ti 0.08–2.8 (атом. %)

Относительная ошибка 300–8 %

$R = 0.85$; $N = 343$; $N_1 = 340$; $\text{сигма} = 0.22$; $\chi^2 = 5.82$ (12)

Диапазон давлений 1.5–70 кб

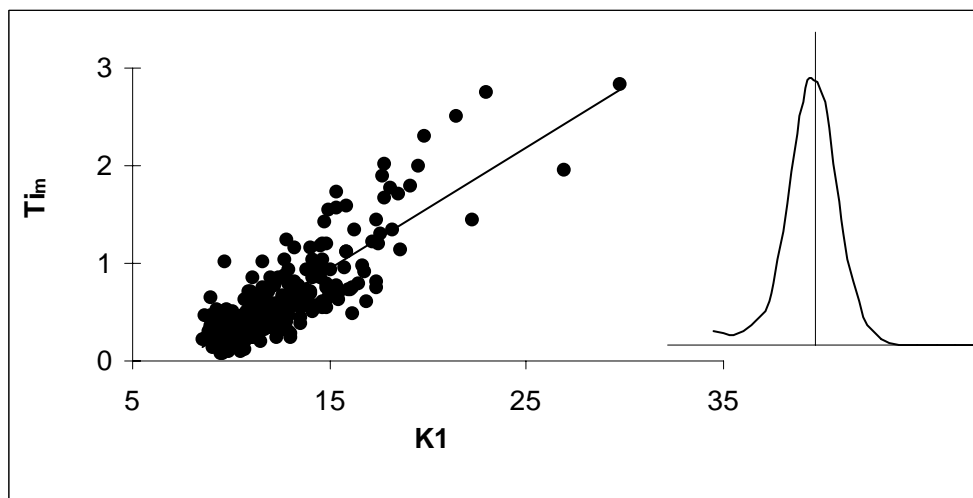


Рис. П.П.4.4 ol–орх (формула PO1R2). Зависимость содержаний Ti_{m} от состава оливина, ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol}:3 - Al_{op} - 3Ca_{ol} + Mg_m:2$$

$$Al_m = -0.82K_1 + 20.73(PO1R3)$$

Диапазон значений Al 3.9–21.8 (атом. %)

Относительная ошибка 33–6 %

R = -0.93; N = 369; N₁ = 368; сигма = 1.29; $\chi^2 = 0.5$ (12)

Диапазон давлений 1.5–80 кб

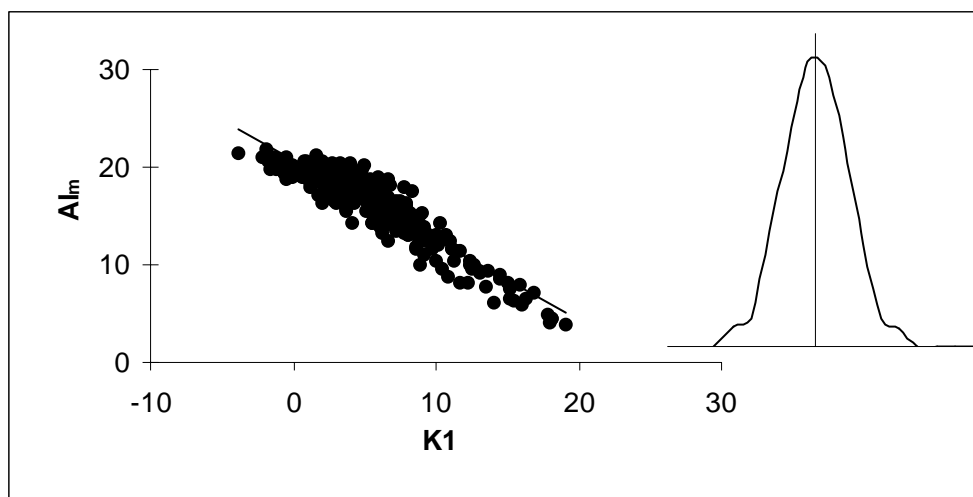


Рис. II.П.4.5 ol–орх (формула PO1R3). Зависимость содержаний Al_m от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа в расплаве

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol} + Si_{op} - Si_m - Al_m:3$$

$$Fe^{2+}_m = 0.52K_1 + 4.08(PO1R5)$$

Диапазон значений Fe²⁺ 2.5–17.1 (атом.%)

Относительная ошибка 37–5 %

R = 0.92; N = 369; N₁ = 359; сигма = 0.7; $\chi^2 = 3.1$ (12)

Диапазон давлений 1.5–80 кб

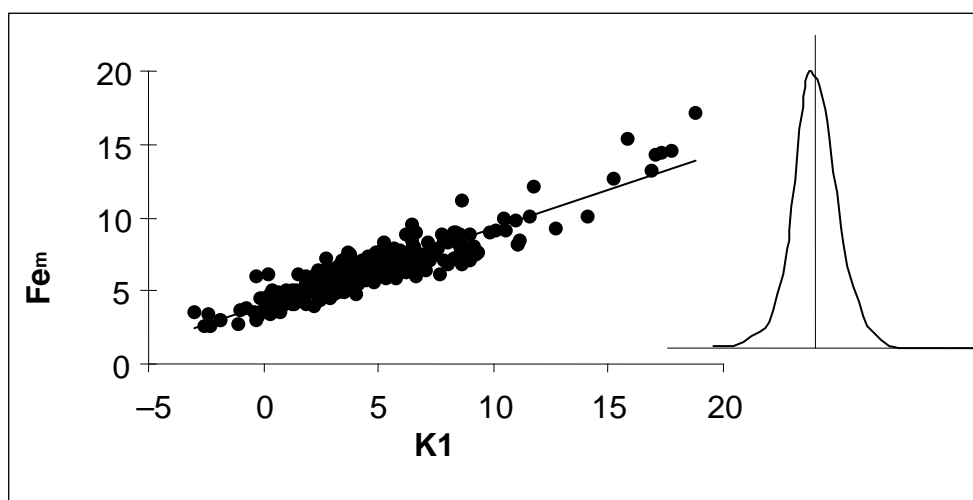


Рис. II.П.4.6 ol–орх (формула PO1R5). Зависимость содержаний Fe²⁺_m от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Mg_{op} + Ca_{op}:2 + Mg_{ol}:3 - Ca_m - (Na_m + K_m) + P:5$$

$$Mg_m = 0.93K_1 - 28.38(PO1R7)$$

Диапазон значений Mg 5.3–38.4 (атом. %)

Относительная ошибка 38–5 %

$R = 0.93$; $N = 369$; $N_1 = 368$; $\sigma = 2$; $\chi^2 = 4.02$ (12)

Диапазон давлений 1.5–80 кб

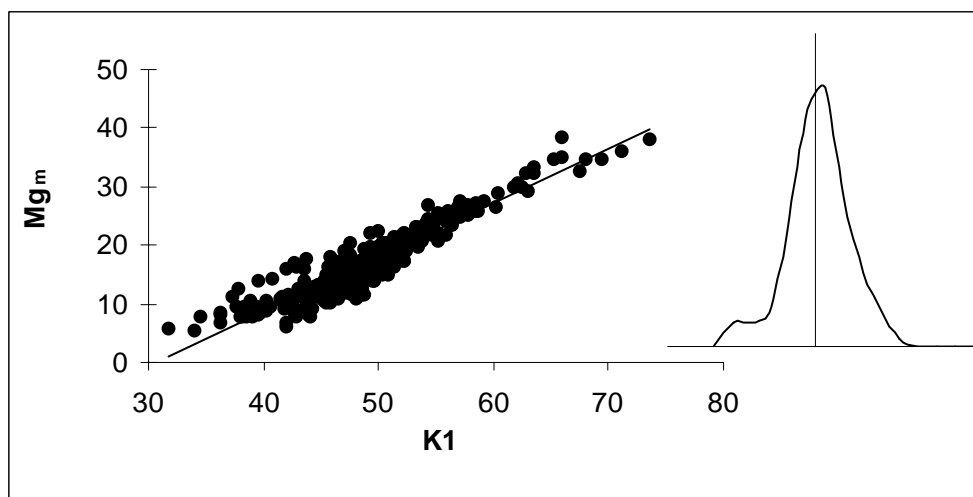


Рис. II.П.4.7 ol–орх (формула PO1R7). Зависимость содержаний Mg_m от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = 3Ca_{ol} + 1.2Ca_{op} - 3Ti_{op} - Fe^{2+}_{op}:5 + Al_m:4 - (Na_m + K_m):2 - T:310$$

$$Ca_m = 0.92K_1 + 10.67(PO1R8)$$

Диапазон значений Ca 3–15 (атом. %)

Относительная ошибка 29–6 %

$R = 0.92$; $N = 369$; $N_1 = 363$; $\sigma = 0.86$; $\chi^2 = 1.45$ (12)

Диапазон давлений 1.5–80 кб

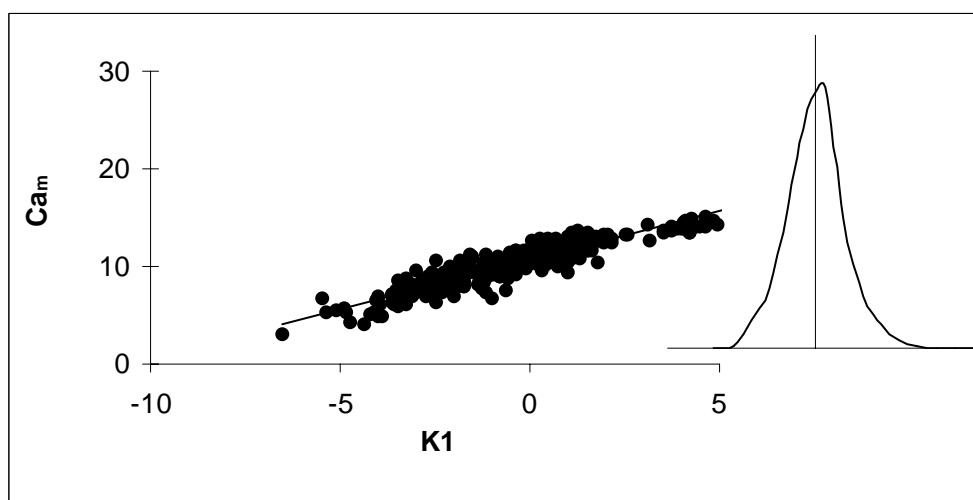


Рис. II.П.4.8 ol–орх (формула PO1R8). Зависимость содержаний Ca_m от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний натрия в расплаве

$$K_1 = 0.2Mg_{op} - 7Ti_{op} - 6Na_{op} + Fe^{2+}_{ol}:2 + 6Ca_{ol} + Mg_m + Ca_m - P:8$$

$$Na_m = -0.42K_1 + 19.51(PO1R9)$$

Диапазон значений Na 0.5–12.8 (атом. %)

Относительная ошибка 190–7 %

R = -0.93; N = 345; N₁ = 340; сигма = 0.93; $\chi^2 = 2.76$ (12)

Диапазон давлений 1.5–70 кб

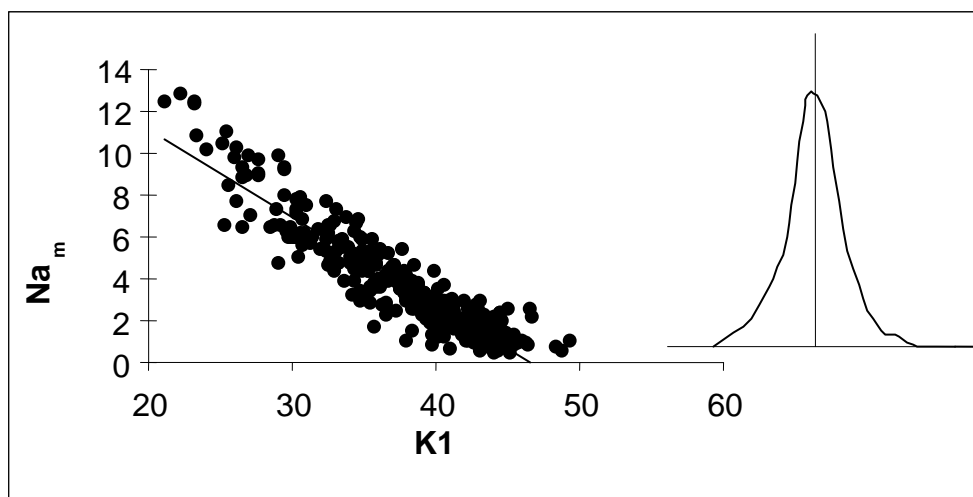


Рис. II.П.4.9 ol–орх (формула PO1R9). Зависимость содержаний Na_m от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний хрома в расплаве

$$K_1 = (Cr_{op} + 8Cr_{ol} - 2Ca_{ol} - Al_{op}:7 + Mg_m:10):10$$

$$Cr_m = 1.04K_1 - 0.01(PO1R11)$$

Диапазон значений Cr 0.04–1.05 (атом. %)

Относительная ошибка 185–7 %

R = 0.89; N = 253; N₁ = 247; сигма = 0.073; $\chi^2 = 1.97$ (12)

Диапазон давлений 1.5–80 кб

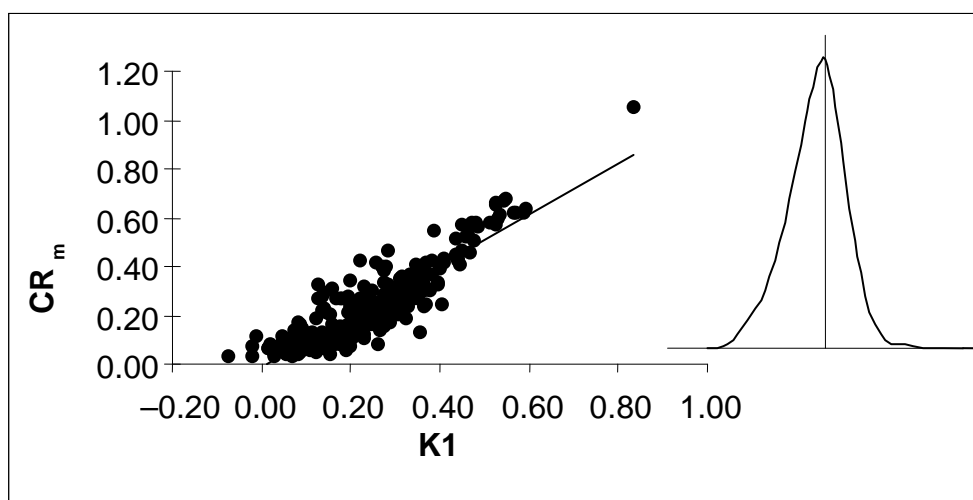


Рис. II.П.4.10 ol–орх (формула PO1R11). Зависимость содержаний Cr_m от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет железо–магниевого отношения в расплаве

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{ol}}; K_2 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{op}}; K_3 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$$

$$K_3 = 0.6(K_1 + 5K_2) - 0.03(\text{PO1R14})$$

Диапазон значений Fe^{2+}/Mg 0.14–1.3; K_1 0.05–0.42; K_2 0.04–0.36

Относительная ошибка 36–4 %

$R = 0.97$; $N = 369$ $N_1 = 358$; $\sigma = 0.05$; $\chi^2 = 12.32$ (12)

Диапазон давлений 1.5–80 кб

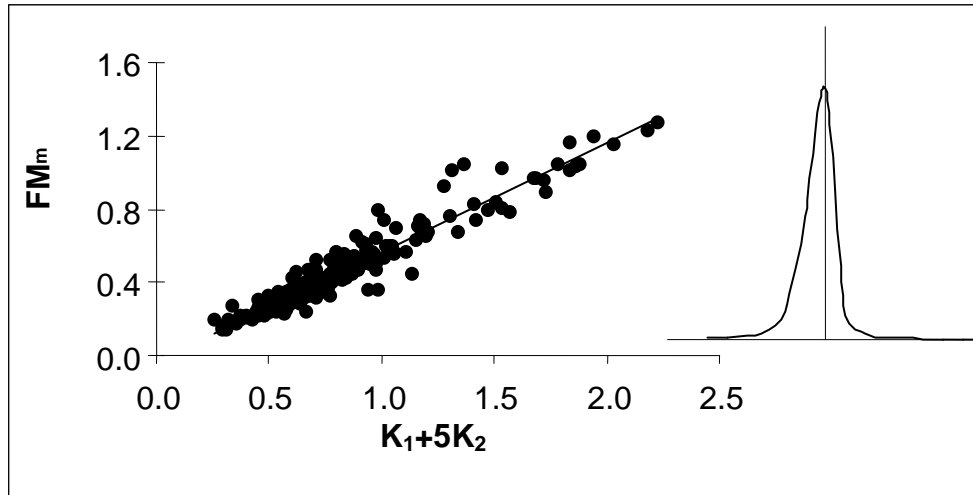


Рис. П.П.4.11 ol–орх (формула PO1R14). Зависимость величины $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$ от состава оливина, ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = [\text{Fe}^{2+}_{\text{ol}} + 4\text{Ca}_{\text{ol}} + (\text{Na}_{\text{m}} + \text{K}_{\text{m}}):3]:\text{Mg}_{\text{ol}} + 2(\text{Fe}^{2+}_{\text{op}} + 2\text{Ti}_{\text{op}}):\text{Mg}_{\text{op}}$$

$$(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}} = 1.07K_1 - 0.04(\text{PO1R14a})$$

Диапазон значений Fe^{2+}/Mg 0.14–1.27; K_1 0.16–1.27

Относительная ошибка 33–4 %

$R = 0.97$; $N = 369$ $N_1 = 358$; $\sigma = 0.045$; $\chi^2 = 9.94$ (12)

Диапазон давлений 1.5–80 кб

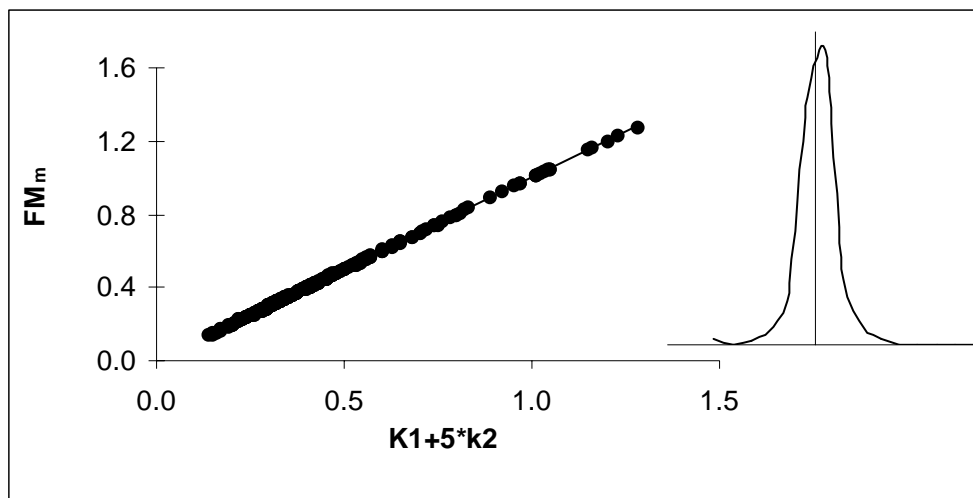


Рис. П.П.4.12 ol–орх (формула PO1R14a). Зависимость величины $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{m}}$ от состава оливина, ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = Mg_{op} - 9Ca_{ol} + P:2$$

$$T = 17.64K_1 + 570.14(PO1RTa)$$

Диапазон значений T 1120–1900 °C

Относительная ошибка 5–3 %

$R = 0.87$; $N = 369$; $N_1 = 365$; сигма = 53.1; $\chi^2 = 1.16$ (12)

Диапазон давлений 1.5–80 кб

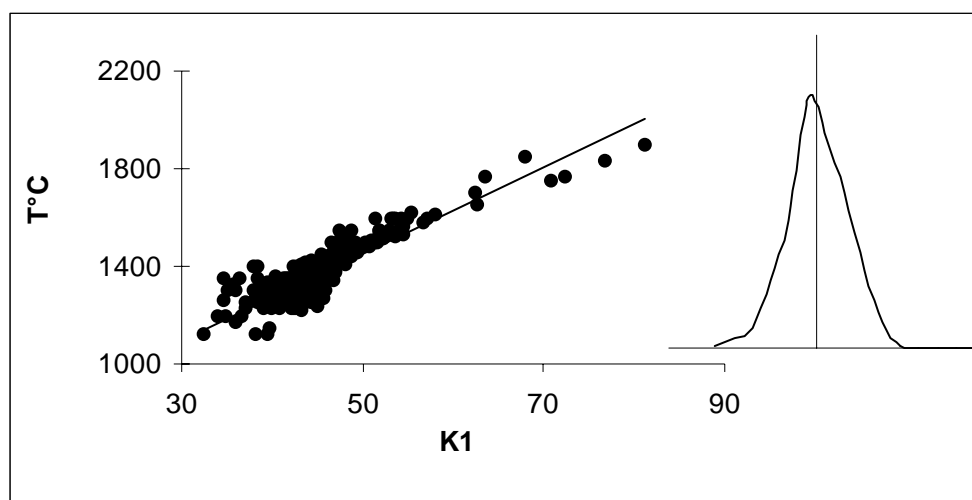


Рис. II.П.4.13 ol–орх (формула PO1RTa). Зависимость значения T от состава оливина, ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{op} - 9Ca_{ol} - Si_m - Al_m + P:2$$

$$T = 11.23K_1 + 1545.05(PO1RTb)$$

Диапазон значений T 1120–1900 °C

Относительная ошибка 3–2 %

$R = 0.93$; $N = 369$; $N_1 = 365$; сигма = 39.1; $\chi^2 = 1.39$ (12)

Диапазон давлений 1.5–80 кб

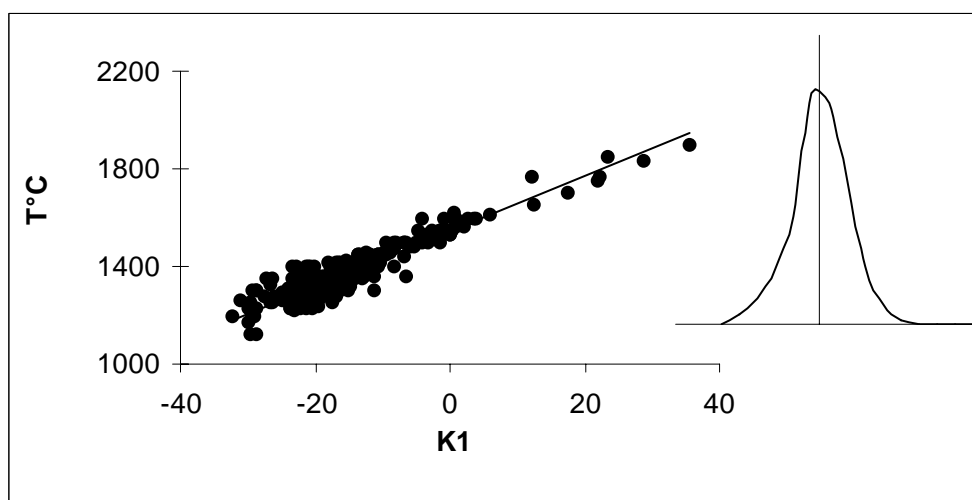


Рис. II.П.4.14 ol–орх (формула PO1RTb). Зависимость значения T от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{op} - 9Ca_{ol} - Si_m - Al_m + Mg_m:2 + P:2$$

$$T = 8.82K_1 + 1428.87(PO1RTc)$$

Диапазон значений T 1120–1900 °С

Относительная ошибка 3–2 %

$R = 0.93$; $N = 369$; $N_1 = 367$; сигма = 39.1; $\chi^2 = 2.6$ (12)

Диапазон давлений 1.5–80 кб

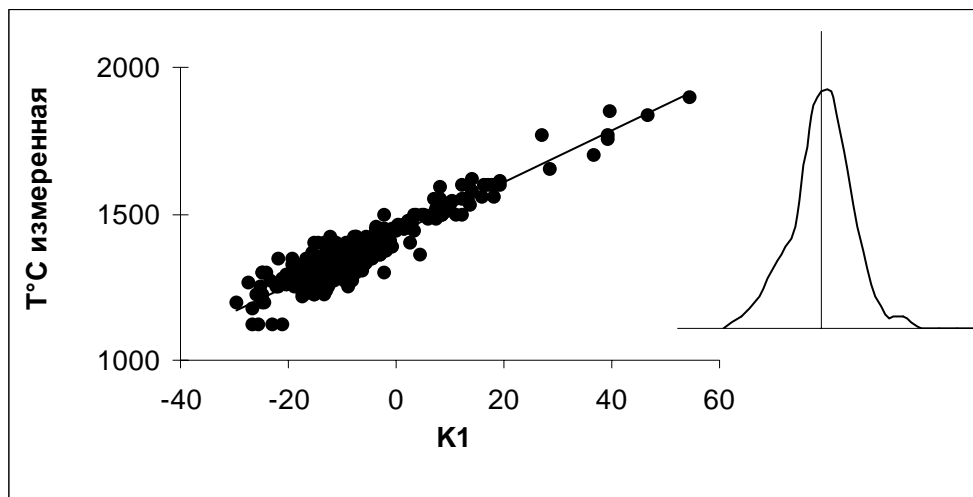


Рис. II.П.4.15 ol–орх (формула **PO1RTc**). Зависимость значения T от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по двум выше приведенным формулам (**POLRTb** и **POLRTc**) составляет сигма 11.1 °С.

Расчет давления

$$K_1 = T:17 + Fe^{2+}_{op} + 12Al_{ol} + Mg_m:6 - 1.6Si_m + AL_m:3 - Ca_m:4 + (Na_m + K_m):2$$

$$P = 0.49K_1 + 2.51(PO1RPa)$$

Диапазон значений P 5–20 кб

Относительная ошибка 40–10 %

$R = 0.82$; $N = 339$; $N_1 = 325$; сигма = 1.9 кб; $\chi^2 = 3.05$ (12)

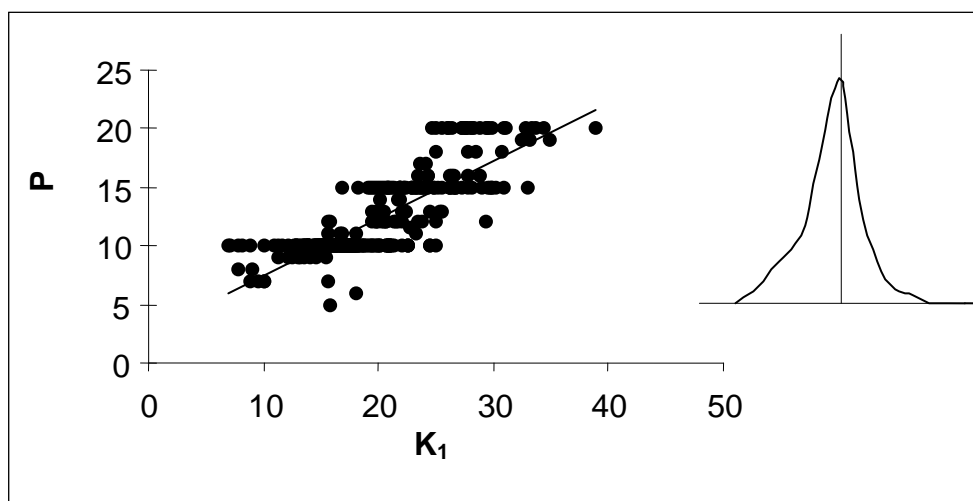


Рис. II.П.4.16 ol–орх (формула **PO1RPa**). Зависимость величины P от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (T:15 - Fe^{2+}_{op}:3 + 22Al_{ol} + Mg_m:3 - Si_m):10$$

$$LnP = 0.3K_1 + 1.23(PO1RPb)$$

Диапазон значений P 21–80 кб

Относительная ошибка 25–6 %

$$R = 0.97; N = 30; N_1 = 30; \text{сигма} = 4 \text{ кб}; \chi^2 = 1.46 (8)$$

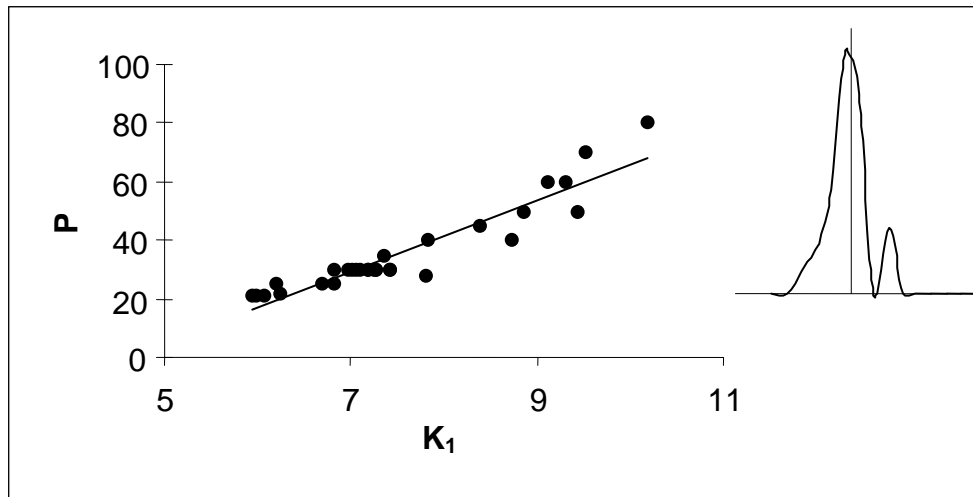


Рис. П.П.4.17 ol–орх (формула PO1RPb). Зависимость величины P от состава оливина, ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в системе оливин–ортопироксен

$$Fe^{2+}_{op} = 0.57Fe^{2+}_{ol} + 0.5(PO1RRa)$$

Диапазон значений Fe^{2+}_{op} 1.7–15.4

Относительная ошибка 20–2 %

$$R = 0.98; N = 369; N_1 = 360; \text{сигма} = 0.33; \chi^2 = 12.34 (12)$$

Диапазон давлений 1.5–80 кб

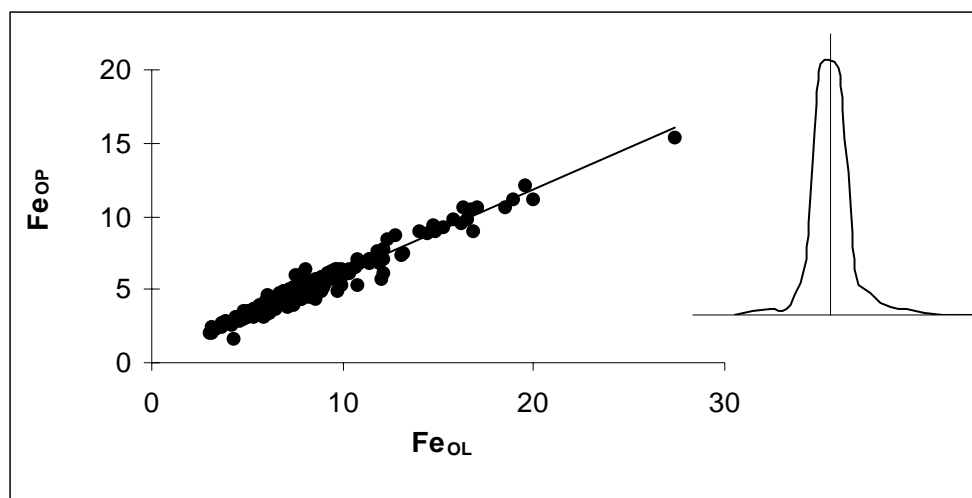


Рис. П.П.4.18 ol–орх (формула PO1RRa). Зависимость величины Fe^{2+}_{op} от состава оливина и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{op} + Ca_{op} - Fe^{2+}_{op}; K_2 = Mg_{ol} + T:250$$

$$K_2 = 0.76K_1 + 32.92(PO1RRb)$$

Диапазон значений K_2 51–70

Относительная ошибка 2–1 %

$$R = 0.94; N = 369; N_1 = 364; \text{сигма} = 1; \chi^2 = 2.5 \text{ (12)}$$

Диапазон давлений 1.5–80 кб

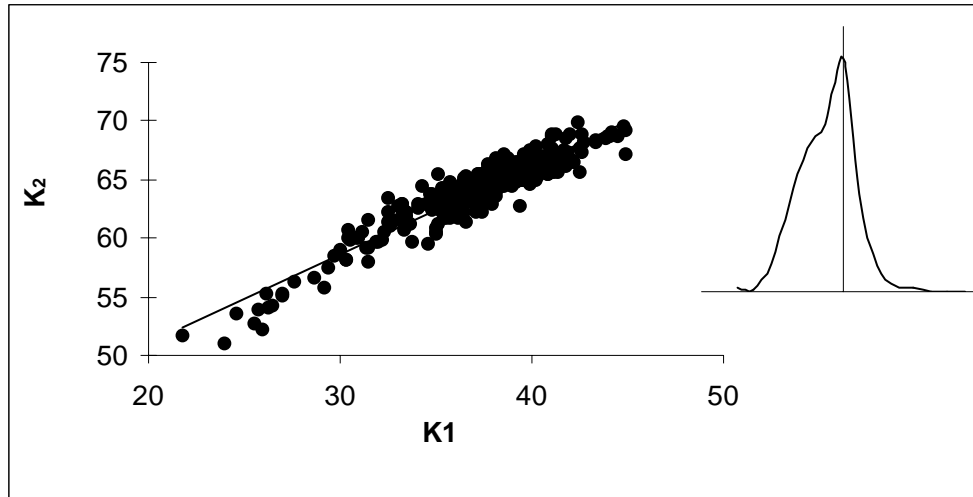


Рис. П.П.4.19 ol–орх (формула PO1RRb). Зависимость величины K_2 от состава ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (Fe^{2+}/Mg)_{ol}; K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_{op}$$

$$K_2 = 0.83K_1 + 0.02(PO1RRc)$$

Диапазон значений K_2 0.04–0.36; K_1 0.05–0.4

Относительная ошибка 25–3 %

$$R = 0.98; N = 369; N_1 = 360; \text{сигма} = 0.01; \chi^2 = 12.31 \text{ (12)}$$

Диапазон давлений 1.5–80 кб

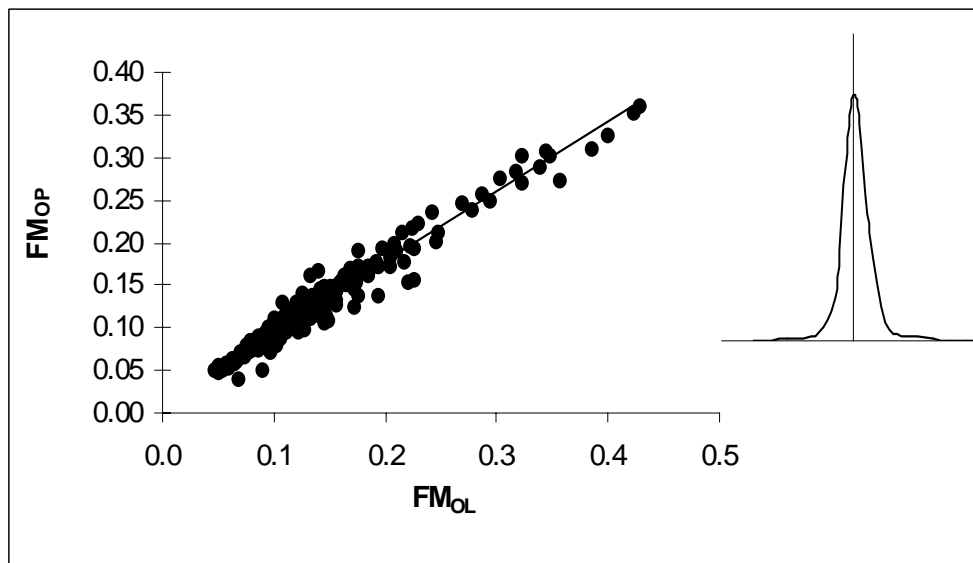


Рис. П.П.4.20 ol–орх (формула PO1RRc). Зависимость величины K_2 от состава оливина и распределение среднеквадратичной ошибки.

5.5. Система расплав–оливин–клинопироксен

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [19; 29; 30; 33; 35; 37; 38; 39; 41; 49; 53; 54; 80; 84; 85; 86; 87; 91; 92; 156; 158; 159; 175; 181; 247; 258; 262; 272; 273; 278; 279; 288; 291; 298; 299; 300; 304; 309; 314; 315; 322; 323; 324; 325; 327; 335; 339; 340; 347; D1].

Общее число тройных анализов – 396 т. После исключения анализов составов оливина, клинопироксена и стекол с суммами окислов менее 97 % и более 102 % – 372 т. После исключения анализов с нулевыми содержаниями железа в стекле – 346 т. Для расчета титана отброшены точки с его нулевыми содержаниями – 343 т. Для расчета содержаний кальция до давлений 50 кб были отброшены точки с содержаниями кальция < 7 % – 316 т. Для расчета натрия отброшены точки с его содержаниями < 0.5 % – 323 т. Для расчета содержаний хрома были удалены точки с содержаниями его < 0.07 % – 135 т. Для расчета величины давления были отброшены точки с давлениями < 7 кб – 326 т.

Таблица II.П.5.1 ol–срх. Диапазоны составов стекол (расплавов), оливинов и клинопироксенов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

POLA		Стекла		Оливины			
SiO ₂	38–54.8	Si	37.04–52.64	SiO ₂	35–42	Si	31.57–35.62
TiO ₂	0–6.66	Ti	0–5	TiO ₂	0–0.2	Ti	0–0.14
Al ₂ O ₃	5–21	Al	5.25–21.84	Al ₂ O ₃	0–0.66	Al	0–0.64
FeO	3.31–28.9	Fe	2.54–23.56	FeO	4.49–40.5	Fe	2.99–31.79
MnO	0–0.47	Mn	0–0.4	MnO	0–0.66	Mn	0–0.52
MgO	2.98–31.3	Mg	4.15–40.79	MgO	24.1–53.44	Mg	33.73–63.23
CaO	2.84–19.1	Ca	2.86–18.72	CaO	0–3.2	Ca	0–2.86
Na ₂ O	0–7.71	Na	0–13.7	Na ₂ O	0–0.11	Na	0–0.18
K ₂ O	0–6.72	K	0–7.95	K ₂ O	0–0.05	K	0–0.05
Cr ₂ O ₃	0–1.31	Cr	0–0.94	Cr ₂ O ₃	0–0.66	Cr	0–0.42
T °C	1100–1963	P, кб	1.5–50			Fo	51.47–95.48

Продолжение таблицы II.П.5.1 ol–срх.

Пироксены		Wo	11.7–48.73
SiO ₂	45.7–56.1	Si	41.97–49.79
TiO ₂	0–3.01	Ti	0–2.12
Al ₂ O ₃	0.78–12.5	Al	0.82–13.19
FeO	1.84–19.6	Fe	1.37–15.53
MnO	0–0.51	Mn	0–0.39
MgO	11.6–28.49	Mg	16.2–37.21
CaO	5.48–23	Ca	5.31–22.77
Na ₂ O	0–2.5	Na	0–4.37
K ₂ O	0–0.36	K	0–0.44
Cr ₂ O ₃	0–2.11	Cr	0–1.49
En	37.73–77.68	Fs	2.81–36.02

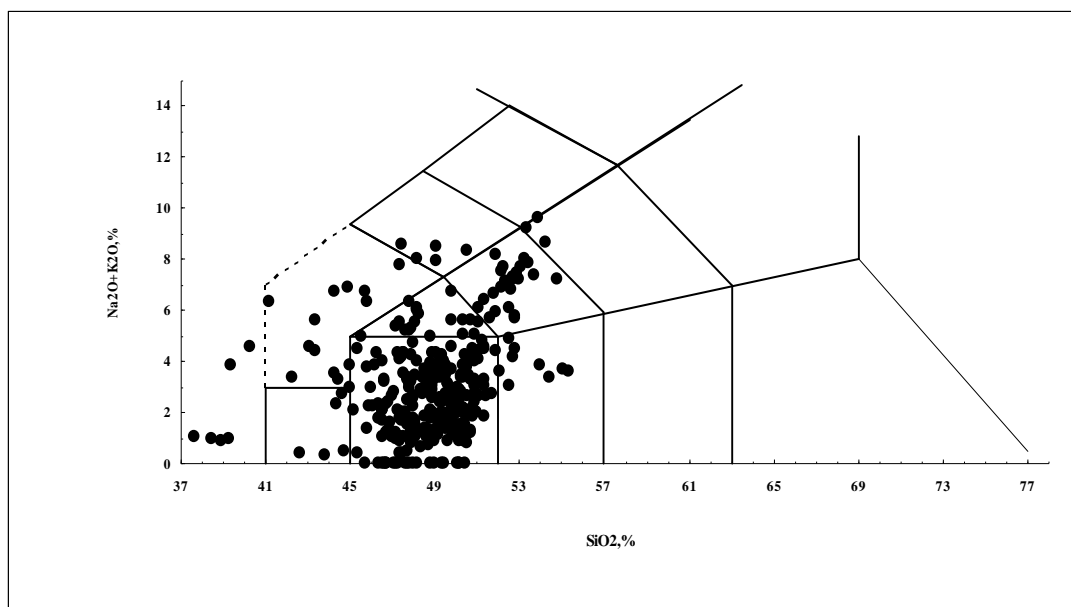


Рис. II.П.5.1 ol–срх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливина и клинопироксена, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = Al_{av} + 2Fe^{2+}_{av} + 2Na_{av} - 3Ca_{ol} + 2Ti_m + Mg_m + Ca_m$$

$$Si_m = -0.35K_1 + 59.79(POLA1)$$

Диапазон значений Si 37–50.3 (атом. %)

Относительная ошибка 3–2 %

$R = -0.87$; $N = 346$; $N_1 = 344$; $\sigma = 1.1$; $\chi^2 = 2.91$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

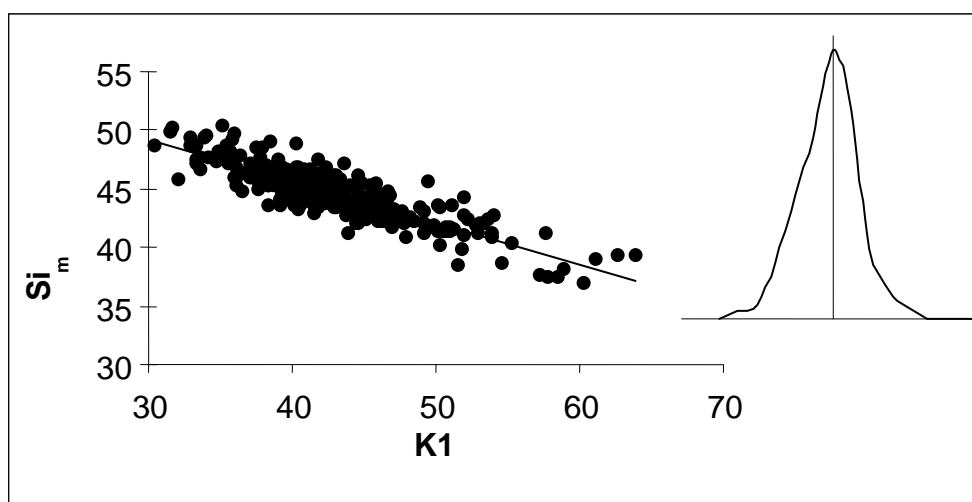


Рис. II.П.5.2 ol–срх (**формула POLA1**). Зависимость содержаний Si_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = 7(Ti_{av} + Ti_{ol}) + Fe^{2+}_{ol}:2 + Fe^{2+}_{av}:2 - Ca_{av}:4 + Na_{av}$$

$$Ti_m = 0.12K_1 + 0.04(POLA2a)$$

Диапазон значений Ti 0.2–5 (атом. %)

Относительная ошибка 175–7 %

R = 0.88; N = 280; N₁ = 274; сигма = 0.35; $\chi^2 = 4.21$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

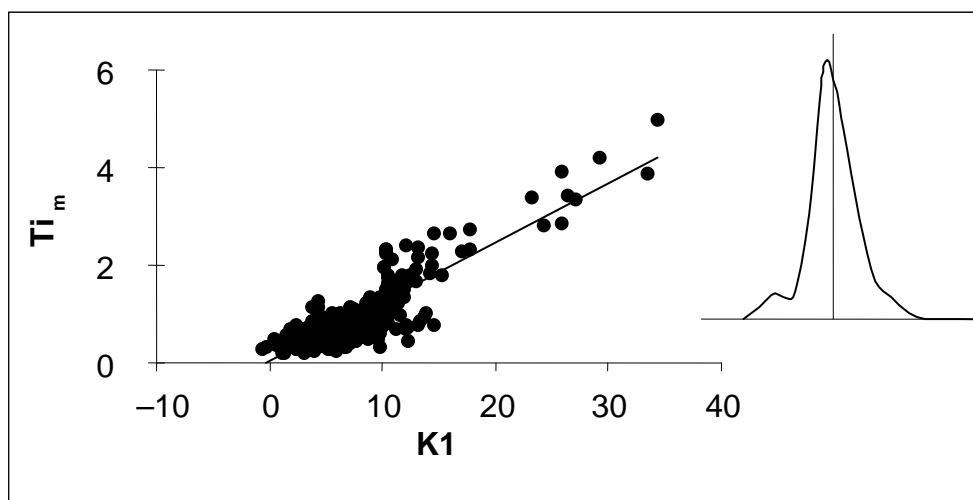


Рис. П.П.5.3 ol–срх (формула POLA2a). Зависимость содержаний Ti_m от состава оливина, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 7(Ti_{av} + Ti_{ol}) + Fe^{2+}_{ol}:2 + Fe^{2+}_{av}:2 - Ca_{av}:4 + Na_{av} + 0.7Fe^{2+}_m$$

$$Ti_m = 0.1K_1 - 0.3(POLA2b)$$

Диапазон значений Ti 0.2–5 (атом. %)

Относительная ошибка 150–6 %

R = 0.92; N = 280; N₁ = 266; сигма = 0.3; $\chi^2 = 1.67$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

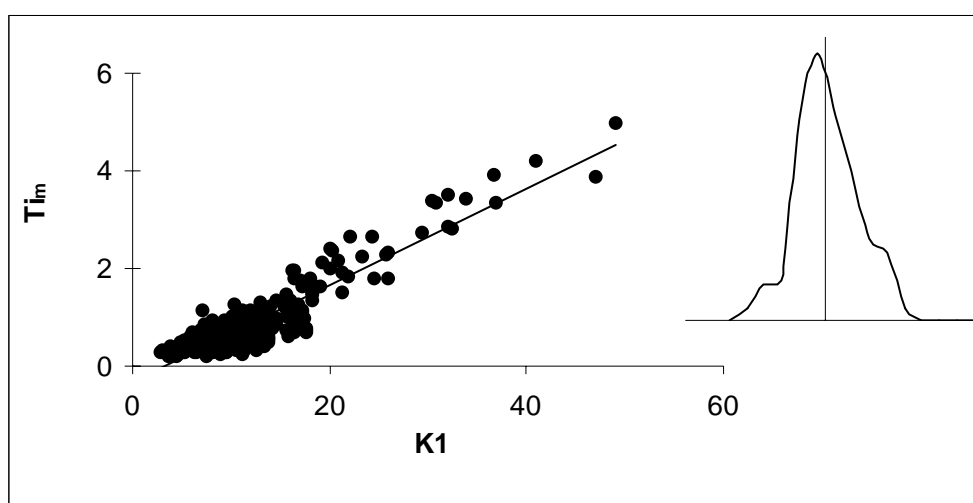


Рис. П.П.5.4 ol–срх (формула POLA2b). Зависимость содержаний Ti_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Mg_{ol}:4 + 5Ca_{ol} - 2Al_{av} + 3Na_{av} + Fe^{2+}_m + P:2.5$$

$$Al_m = -0.4K_1 + 24(POLA3)$$

Диапазон значений Al 5.2–21.8 (атом. %)

Относительная ошибка 27–7 %

$R = -0.87$; $N = 346$; $N_1 = 342$; $\sigma = 1.4$; $\chi^2 = 2.07$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

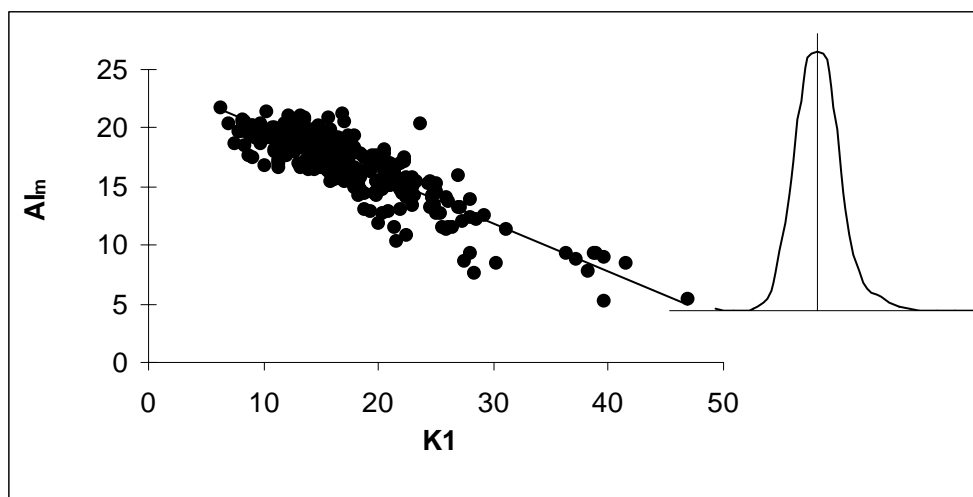


Рис. II.П.5.5 ol–срх (формула POLA3). Зависимость содержаний Al_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа в расплаве

$$K_1 = 0.5Fe^{2+}_{ol} + 2Fe^{2+}_{av} - Al_{av}:3 + P:9$$

$$Fe^{2+}_m = 0.42K_1 + 1.97(POLA5)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 2.5–21 (атом.%)

Относительная ошибка 40–5 %

$R = 0.92$; $N = 346$; $N_1 = 338$; $\sigma = 1$; $\chi^2 = 2.43$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

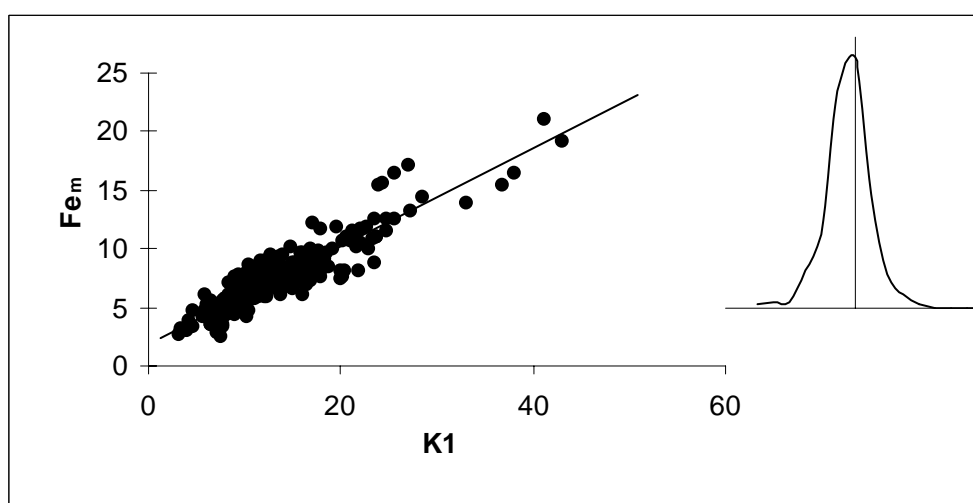


Рис. II.П.5.6 ol–срх (формула POLA5). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава оливина, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol}:3 + Al_{av}:3 + Fe^{2+}_{av} - 3Ti_{av} + Si_{av}:9 + 2Ti_m - Al_m:2$$

$$Fe^{2+}_m = 0.61K_1 + 2.91(POLA5a)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 2.5–21 (атом. %)

Относительная ошибка 33–4 %

$R = 0.95$; $N = 346$; $N_1 = 339$; $\sigma = 0.84$; $\chi^2 = 3.48$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

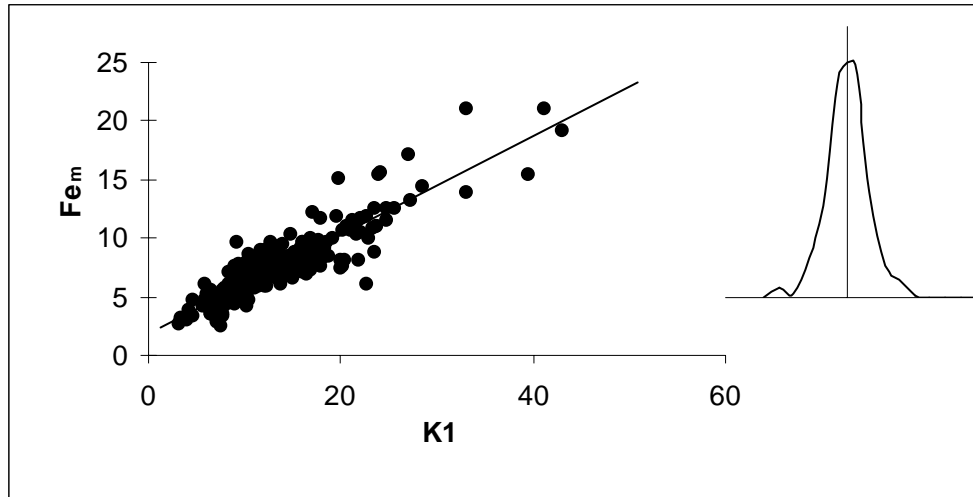


Рис. II.П.5.7 ol–срх (формула POLA5a). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = \text{Exp}[(Mg_{av} + Mg_{ol}:3 - Fe^{2+}_{av} + Ca_m:2 + P:2):28]$$

$$Mg_m = 2.29K_1 - 1.19(POLA7a)$$

Диапазон значений Mg 4.1–41 (атом. %)

Относительная ошибка 49–5 %

$R = 0.9$; $N = 346$; $N_1 = 342$; $\sigma = 2$; $\chi^2 = 2.37$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

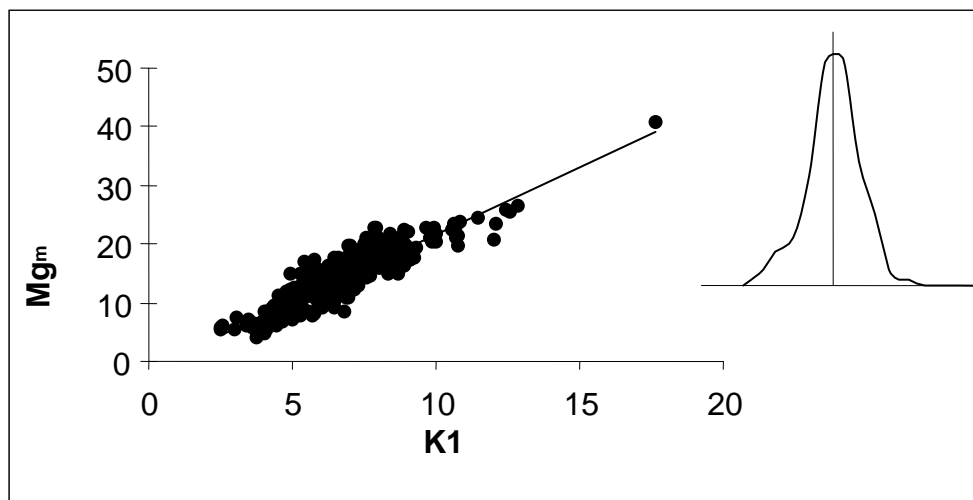


Рис. II.П.5.8 ol–срх (формула POLA7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Exp}[(Mg_{av} + Mg_{ol}:3 - Fe^{2+}_{av} - Ca_{av}:9 - (Na_m + K_m) + P:2):30]$$

$$Mg_m = 3.28K_1 + 0.97(\text{POLA7b})$$

Диапазон значений Mg 4.1–41 (атом. %)

Относительная ошибка 44–4 %

R = 0.92; N = 346; N₁ = 341; сигма = 1.8; $\chi^2 = 7.21$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

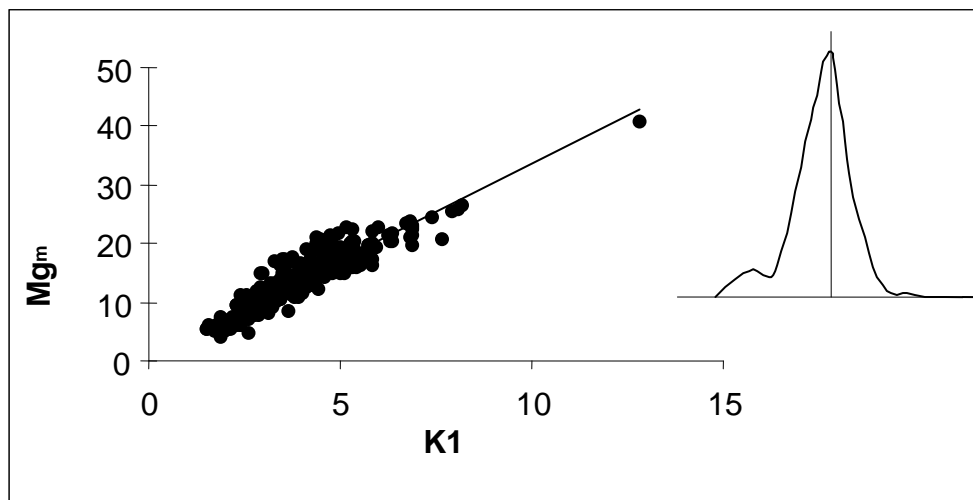


Рис. II.П.5.9 ol–срх (формула POLA7b). Зависимость содержаний Mg_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 4.2(Mg_{av} - Ca_{av}:2.6):(Fe^{2+}_{ol} + Al_{av}:5 + 3Ti_{av}3 - Na_{av}) - 0.8(Na_m + K_m) - 0.7Al_m$$

$$Mg_m = 0.61K_1 + 18.05(\text{POLA7c})$$

Диапазон значений Mg 4.1–41 (атом. %)

Относительная ошибка 42–5 %

R = 0.93; N = 346; N₁ = 340; сигма = 1.7; $\chi^2 = 2.63$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

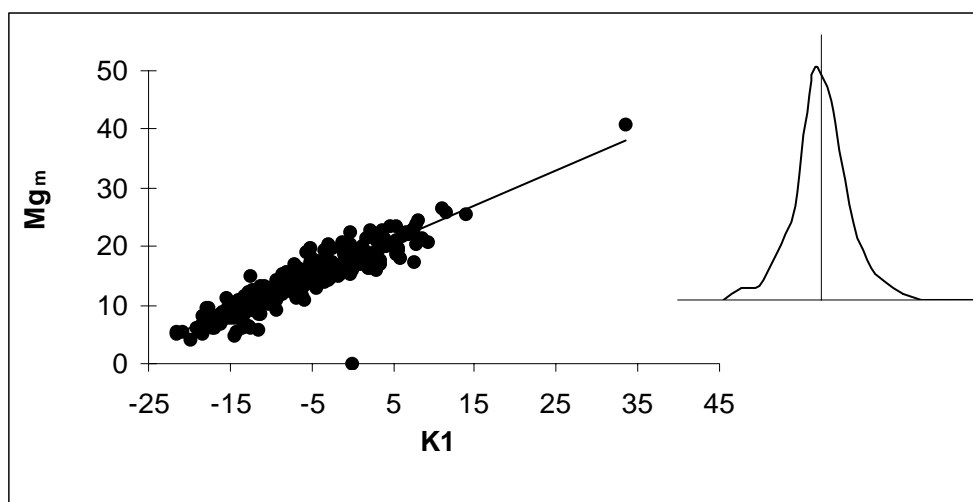


Рис. II.П.5.10 ol–срх (формула POLA7c). Зависимость содержаний Mg_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Значение среднеквадратичного отклонения при расчетах по трем выше приведенным формулам составляет сигма < 1.7.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Al_{av}:4 + 2Fe^{2+}_{av} - Ca_{av}:2 + 7(Na_{av} + K_{av}) + Fe^{2+}_{ol}:5 - 3Ca_{ol} + 2(Na_m + K_m)$$

$$Ca_m = -0.17K_1 + 13.96(POLA8a)$$

Диапазон значений Ca 2.9–17.4 (атом. %)

Относительная ошибка 32–5 %

R = -0.92; N = 346; N₁ = 340; сигма = 0.93; $\chi^2 = 7.42$ (12)

Диапазон давлений 1.5–40 кб

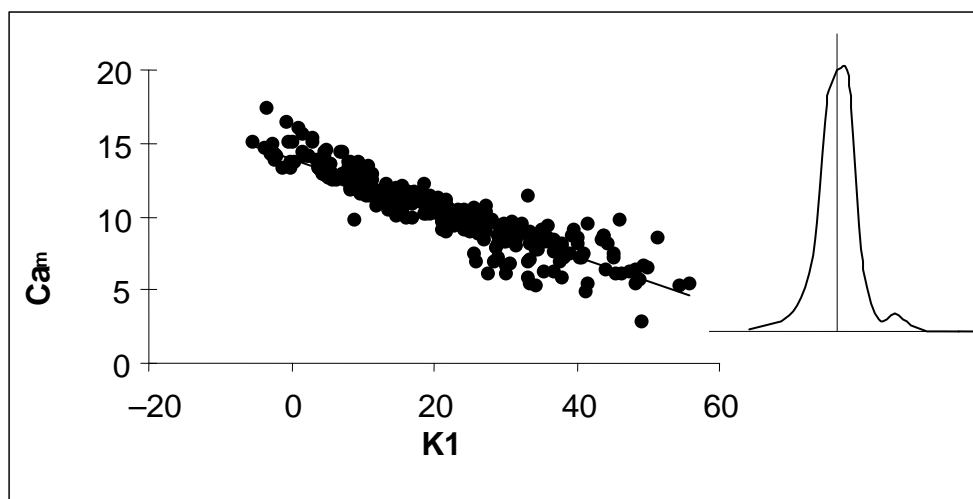


Рис. П.П.5.11 ol–срх (формула POLA8a). Зависимость содержаний Ca_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{av}:4 + Fe^{2+}_{av}:3 - Ca_{av} + 7(Na_{av} + K_{av}) + Fe^{2+}_{ol}:7 - 3Ca_{ol} - Mg_m$$

$$Ca_m = -0.22K_1 + 6.55(POLA8b)$$

Диапазон значений Ca 7.1–18.7 (атом.%)

Относительная ошибка 12–5 %

R = -0.9; N = 316; N₁ = 310; сигма = 0.87; $\chi^2 = 3.25$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

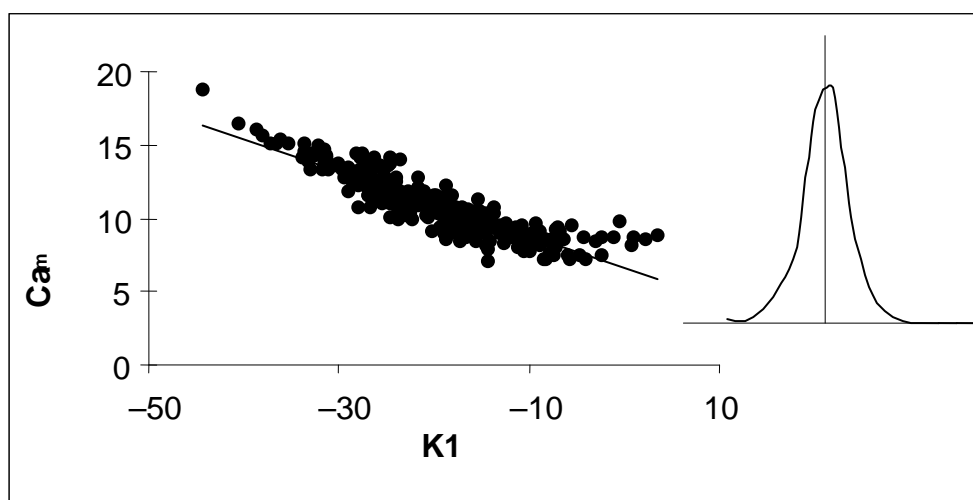


Рис. П.П.5.12 ol–срх (формула POLA8b). Зависимость содержаний Ca_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний натрия в расплаве

$$K_1 = Mg_m + Ca_m - Al_m - 2Ti_{av} - Al_{av}:2 - Fe^{2+}_{av}:5 - 11Na_{av} + Mg_{ol}:6 + P:4$$

$$Na_m = -0.15K_1 + 5.61(POLA9)$$

Диапазон значений Na 0.55–12.8 (атом. %)

Относительная ошибка 220–9 %

R = -0.87; N = 323; N₁ = 318; сигма = 1.2; $\chi^2 = 3.35$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

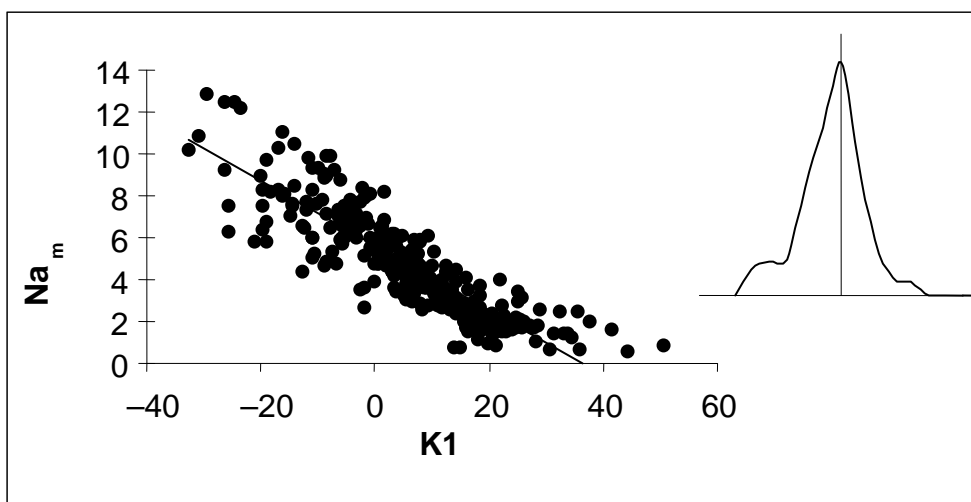


Рис. П.П.5.13 ol–срх (формула POLA9). Зависимость содержаний Na_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_m + Ca_m - Al_{av}:3 - 6(Na_{av} + K_{av}) - Mg_{ol}:4 - Ca_{av}:5 + P:5$$

$$(Na + K)_m = -0.34K_1 + 6.15(POLA9a)$$

Диапазон значений (Na + K) 0.67–13.7 (атом.%)

Относительная ошибка 170–8 %

R = -0.94; N = 323; N₁ = 319; сигма = 1; $\chi^2 = 2.05$ (12)

Диапазон давлений 1.5–40 кб

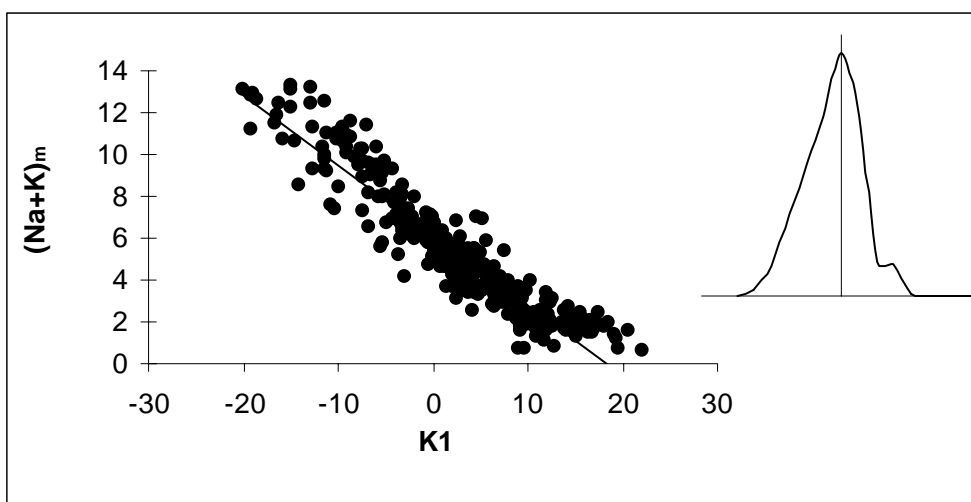


Рис. П.П.5.14 ol–срх (формула POLA9a). Зависимость содержаний Na_m от состава оливина, авгита, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний хрома в расплаве

$$K_1 = 0.1 \text{Exp}\{[10(\text{Cr}_{\text{av}} + 5\text{Cr}_{\text{ol}}) + \text{Ca}_{\text{ol}}:3 + \text{Mg}_{\text{av}}:2 + \text{P}:3]:22\}$$

$$\text{Cr}_m = 0.74K_1 - 0.13(\text{POLA11})$$

Диапазон значений Cr 0.07–0.76 (атом. %)

Относительная ошибка 100–9 %

R = 0.86; N = 135; N₁ = 133; сигма = 0.07; $\chi^2 = 2.2$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

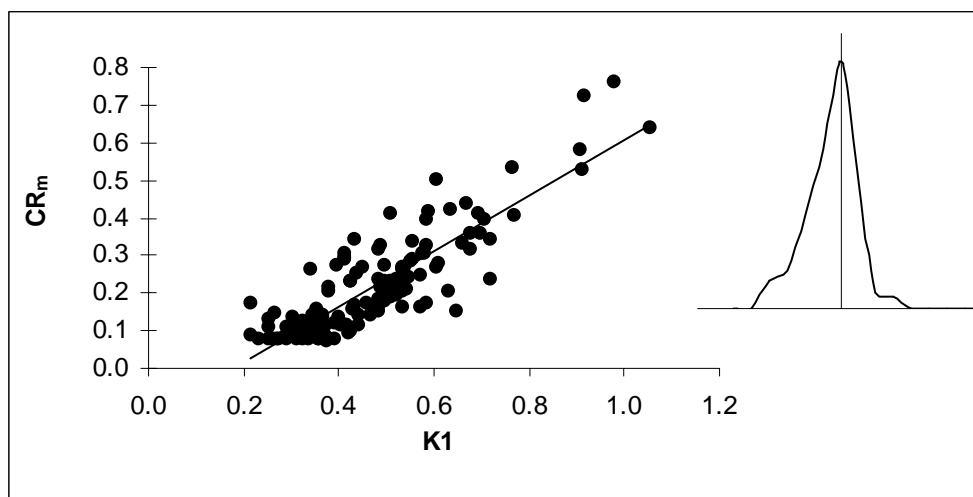


Рис. II.П.5.15 ol–срх (формула POLA11). Зависимость содержаний Cr_m от состава оливина, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет железо–магниевого отношения в расплаве

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}_{\text{ol}} + 2\text{Ca}_{\text{ol}}):\text{Mg}_{\text{ol}} + (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{av}}$$

$$(\text{Fe}^{2+}:\text{Mg})_m = 2K_1 - 0.12(\text{POLAFM})$$

Диапазон значений (Fe²⁺/Mg)_m 0.14–3.2

Относительная ошибка 79–3 %

R = 0.96; N = 346; N₁ = 339; сигма = 0.11; $\chi^2 = 18.7$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

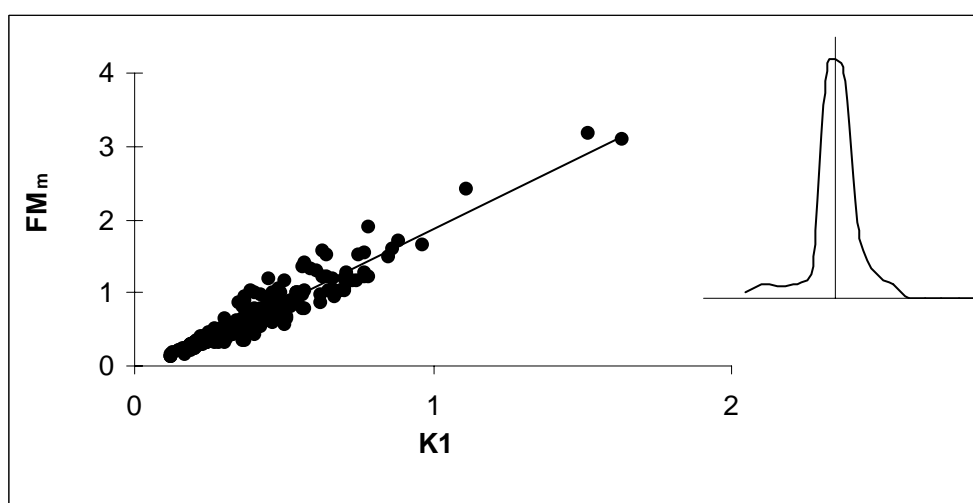


Рис. II.П.5.16 ol–срх (формула POLAFM). Зависимость величины (Fe²⁺/Mg)_m от состава оливина, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры расплава

$$K_1 = Mg_{av} + Mg_{ol}:4 + Mg_m - Si_m + P$$

$$T = 6.6K_1 + 1161.45(POLAT)$$

Диапазон значений T 1100–1600 °C

Относительная ошибка 3–2 %

$$R = 0.91; N = 346; N_1 = 340; \text{сигма} = 38.1; \chi^2 = 2.59 (12)$$

Диапазон давлений 1.5–40 кб

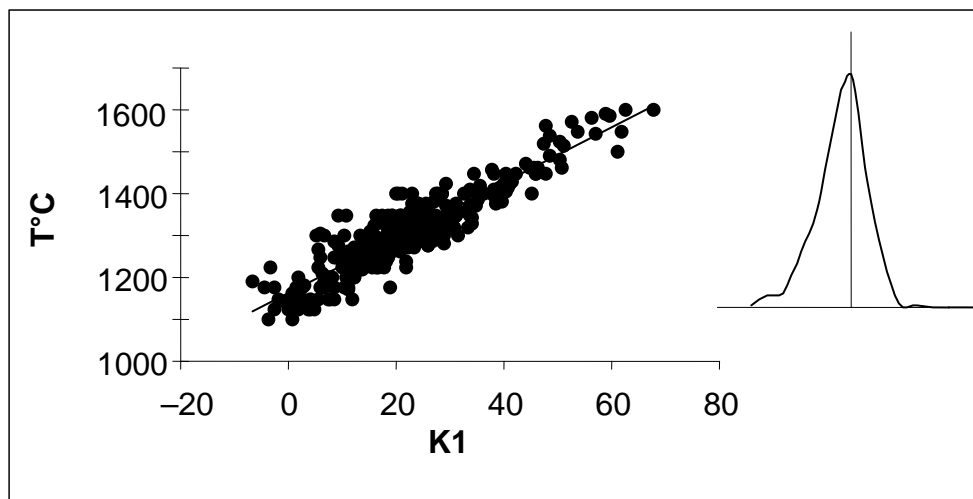


Рис. П.П.5.17 ol–срх (формула POLAT). Зависимость значения T от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Ca_{av} + 6Ti_{av} - 3Na_{av} + Fe^{2+}_{ol}:4 - 5Ca_{ol} - Mg_m + Si_m:2 + (Na_m + K_m):3 - P:3$$

$$T = -8.46K_1 + 1480.99(POLATa)$$

Диапазон значений T 1100–1700 °C

Относительная ошибка 4–3 %

$$R = -0.92; N = 346; N_1 = 344; \text{сигма} = 38.2 \text{ °C}; \chi^2 = 0.47 (12)$$

Диапазон давлений 1.5–50 кб

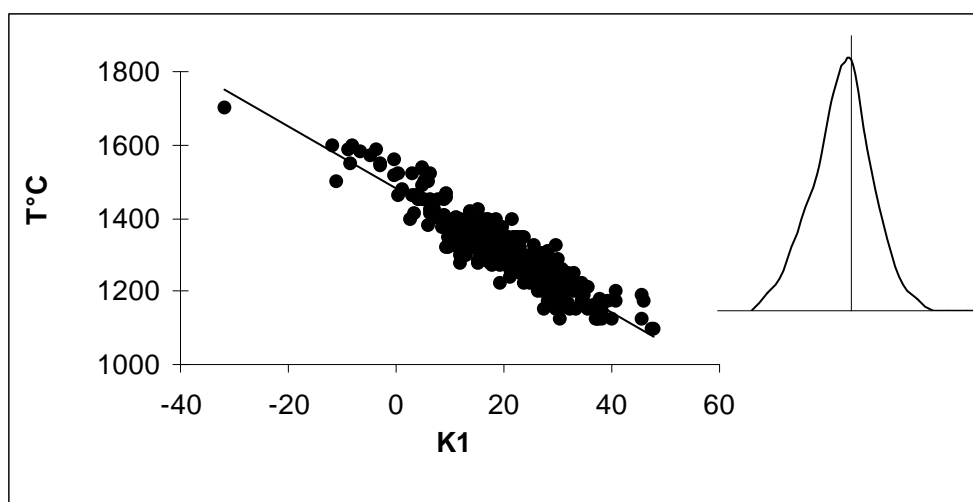


Рис. П.П.5.18 ol–срх (формула POLATa). Зависимость значения T от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Ca_{av} + 6Ti_{av} + Al_{av}:2 + Fe^{2+}_{av}:2 - 2Na_{av} + Fe^{2+}_{ol}:2.4 - 9Ca_{ol} + Si_m - Ca_m:2 - P:2$$

$$T = -10.71K_1 + 1891.6(POLATb)$$

Диапазон значений T 1100–1700 °C

Относительная ошибка 4–3 %

R = -0.9; N = 346; N₁ = 344; сигма = 43.2 °C; $\chi^2 = 1.99$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

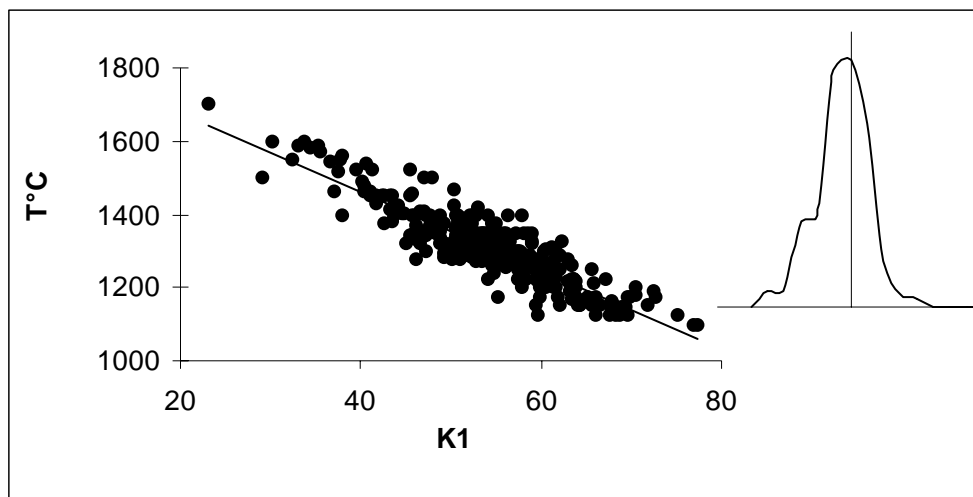


Рис. II.5.19 ol–срх (формула POLATb). Зависимость значения T от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = Al_{av} - Mg_{av} - Ca_{av} + 3Na_{av} + 11Ca_{ol} - Al_m:2 + T:11$$

$$P = 0.5K_1 - 28.27(POLAP)$$

Диапазон значений P 7–40 кб

Относительная ошибка 34–6 %

R = 0.9; N = 326; N₁ = 324; сигма = 2.4 кб; $\chi^2 = 1.24$ (12)

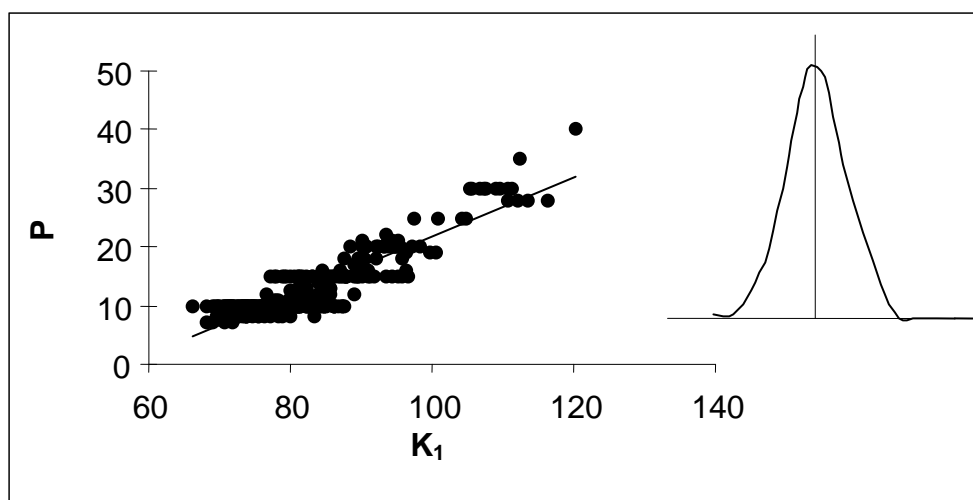


Рис. II.5.20 ol–срх (формула POLAP). Зависимость величины P от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Ti_{av} - Al_{av}:2 + Ca_{av} - 4Na_{av} + Fe_{ol}^{2+}:4 - 9Ca_{ol} + Si_m + Al_m:3 - Mg_m + Ca_m$$

$$P = -0.56K_1 + 43.71(POLAPa)$$

Диапазон значений P 7–40 кб

Относительная ошибка 36–7 %

$$R = -0.89; N = 326; N_1 = 324; \text{сигма} = 2.5 \text{ кб}; \chi^2 = 9.99 (12)$$

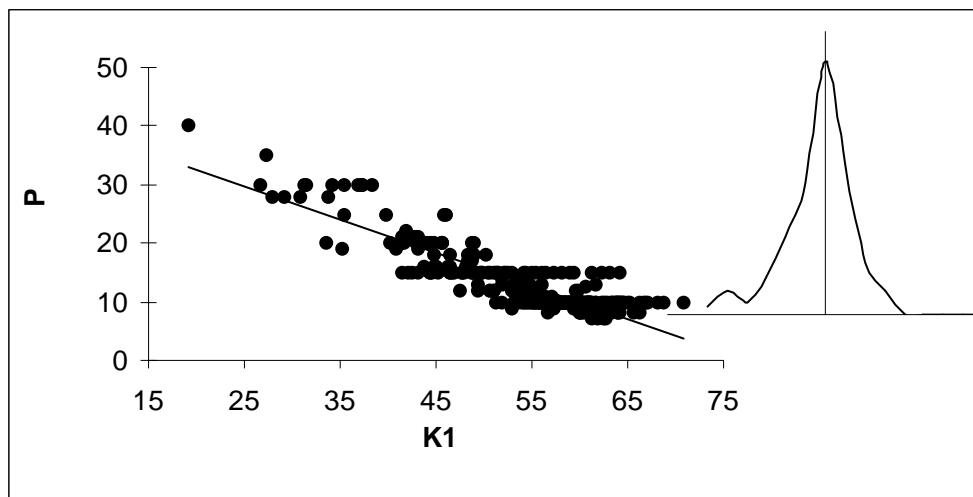


Рис. II.П.5.21 ol–срх (формула POLAPa). Зависимость величины P от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = T:25 - Ti_{av} + Al_{av}:2 - Mg_{av}:2 - Ca_{av} + 3Na_{av} - Fe_{ol}^{2+}:4 + 6Ca_{ol} - Al_m:2$$

$$P = 0.78K_1 - 3.73(POLAPb)$$

Диапазон значений P 7–50 кб

Относительная ошибка 34–5 %

$$R = 0.91; N = 326; N_1 = 325; \text{сигма} = 2.4 \text{ кб}; \chi^2 = 1.67 (12)$$

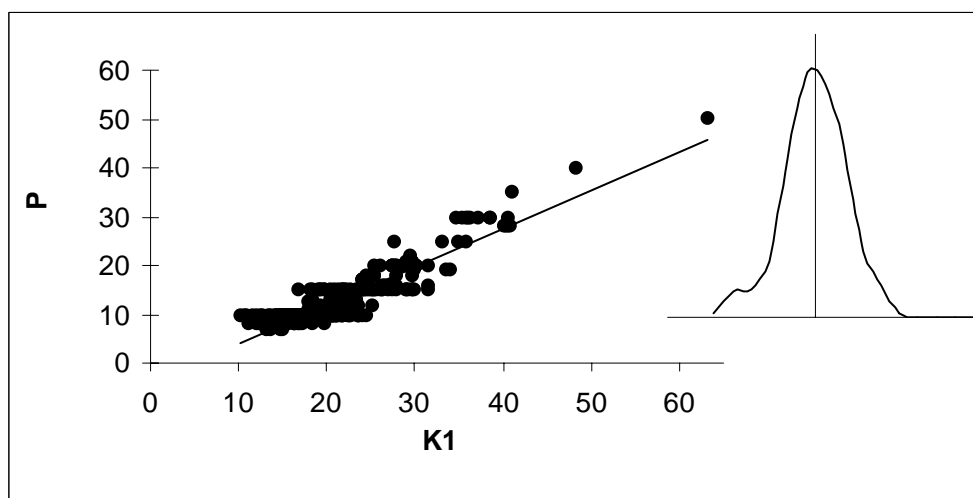


Рис. II.П.5.22 ol–срх (формула POLAPb). Зависимость величины P от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в системе оливин–авгит

$$K_1 = Fe^{2+}_{av} + 2Ti_{av} + Ca_{av} \cdot 5$$

$$Fe^{2+}_{ol} = 1.76K_1 - 4.41(POLARa)$$

Диапазон значений Fe^{2+}_{ol} 3–28 (вес. %)

Относительная ошибка 43–5 %

$R = 0.95$; $N = 346$; $N_1 = 339$; сигма = 1.3; $\chi^2 = 10.48$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

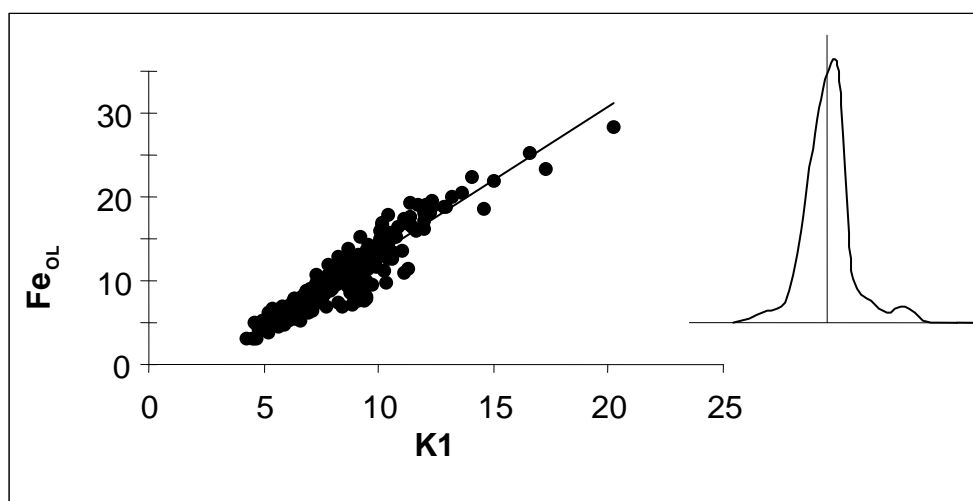


Рис. П.П.5.23 ol–срх (формула POLARa). Зависимость величины Fe^{2+}_{ol} от состава авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{av} + 0.5Al_{av} + 0.8Ca_{av} + Na_{av} - Ti_{av}$$

$$Mg_{ol} = 1.85K_1 - 20.47(POLARb)$$

Диапазон значений Mg_{ol} 38–63 (вес. %)

Относительная ошибка 4–2 %

$R = 0.94$; $N = 346$; $N_1 = 339$; сигма = 1.5; $\chi^2 = 3.84$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

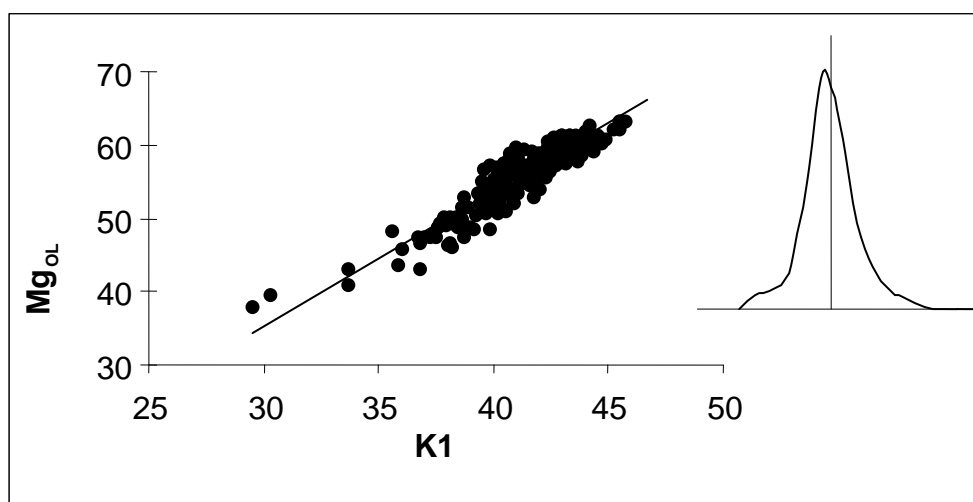


Рис. П.П.5.24 ol–срх (формула POLARb). Зависимость величины Mg_{ol} от состава авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (Fe^{2+}/Mg)_{ol}; K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_{av}$$

$$K_2 = 0.84K_1 + 0.03(POLARc)$$

Диапазон значений K_2 0.045–0.55; K_1 0.05–0.62

Относительная ошибка 62–5 %

$R = 0.93$; $N = 346$; $N_1 = 335$; сигма = 0.028; $\chi^2 = 21.95$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

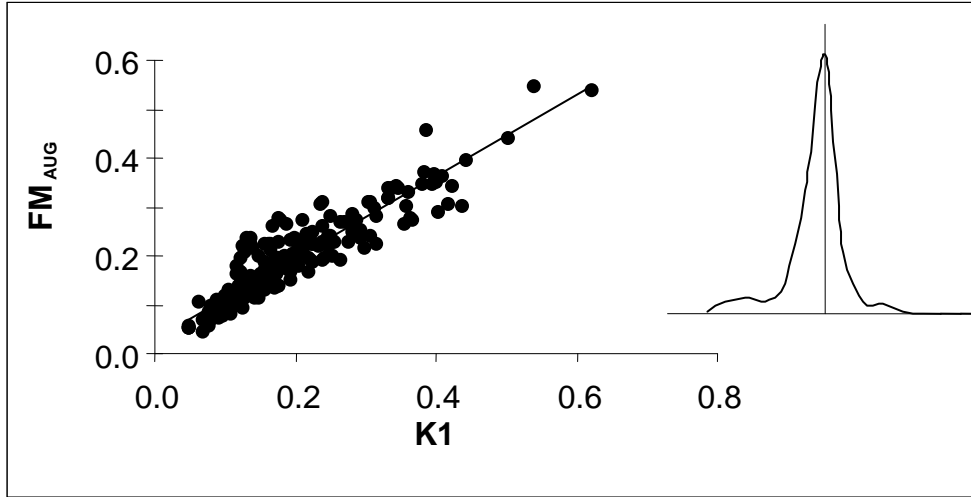


Рис. П.П.5.25 ol–срх (формула POLARc). Зависимость величины $(Fe^{2+}/Mg)_{av}$ от состава оливина и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{ol:2} + Ti_{av} - Al_{av:2} - 1.1Mg_{av} - 1.2Na_{av}; K_2 = Ca_{av} - 3Ca_{ol}$$

$$K_2 = K_1 + 18.04(POLARD)$$

Диапазон значений K_2 4.3–18.6; K_1 13.1–2.8

Относительная ошибка 19–4 %

$R = 0.97$; $N = 346$; $N_1 = 340$; сигма = 0.8; $\chi^2 = 1.32$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

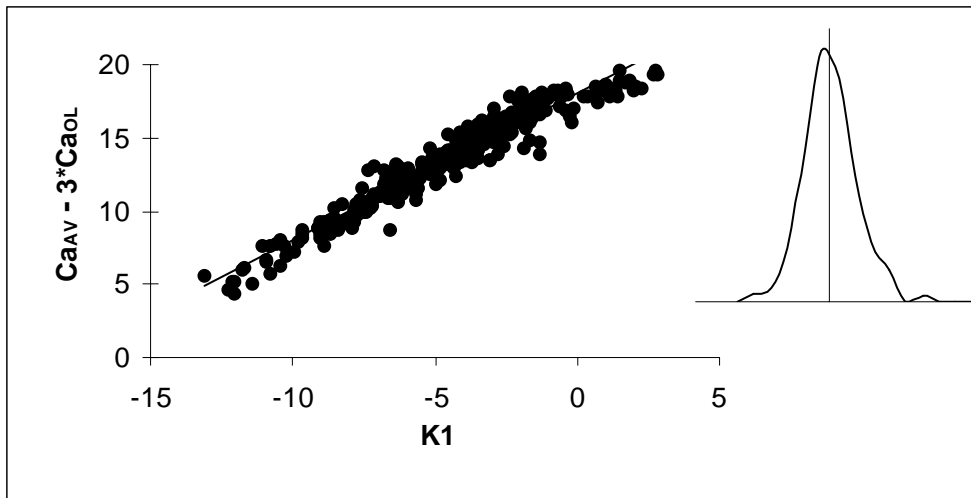


Рис. П.П.5.26 ol–срх (формула POLARD). Зависимость содержаний Ca_{ol} и Ca_{av} от состава оливина, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

5.6. Система расплав–оливин–плаггиоклаз

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [29; 30; 38; 41; 49; 53; 54; 75; 80; 82; 84; 85; 86; 87; 91; 92; 177; 258; 262; 267; 288; 291; 300; 339; 347; D1].

Общее число тройных анализов – 117 т. После исключения анализов составов оливина, плаггиоклаза и стекол с суммами окислов менее 97 % и более 102 % – 101 т. После исключения анализов с нулевыми содержаниями железа в стекле – 99 т.

Таблица II.П.6.1 ol-pl. Диапазоны составов стекол (расплавов), оливинов и плаггиоклазов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

PPLO		Стекла		Оливины			
SiO ₂	42.8–54.8	Si	42.11–50.18	SiO ₂	34.4–41.8	Si	32.61–35.62
TiO ₂	0.47–5.63	Ti	0.33–4.19	TiO ₂	0–0.24	Ti	0–0.17
Al ₂ O ₃	11.5–19.36	Al	12.75–21.16	Al ₂ O ₃	0–0.66	Al	0–0.65
FeO	5.8–20.4	Fe	4.32–16.56	FeO	7–41.3	Fe	4.73–33
MnO	0–0.36	Mn	0–0.29	MnO	0–0.66	Mn	0–0.52
MgO	2.98–11.1	Mg	4.15–15.05	MgO	23.1–51	Mg	32.91–61.2
CaO	5.06–15.54	Ca	4.96–15.46	CaO	0.21–0.88	Ca	0.19–0.79
Na ₂ O	1.04–7.71	Na	1.87–13.7	Na ₂ O	0–0.04	Na	0–0.07
K ₂ O	0–6.72	K	0–7.95	K ₂ O	0–0.01	K	0–0.01
Cr ₂ O ₃	0–0.17	Cr	0–0.13	Cr ₂ O ₃	0–0.15	Cr	0–0.1
T °C	1095–1300	P, кб	2–15			Fo	49.93–92.82

Продолжение таблицы II.П.6.1 ol-pl.

Плаггиоклазы		An	40.91–90.35
SiO ₂	47.2–58.3	Si	43.18–52.32
TiO ₂	0–0.51	Ti	0–0.35
Al ₂ O ₃	26.2–33.6	Al	27.71–36.41
FeO	0.16–0.99	Fe	0.12–0.74
MnO	0–0.11	Mn	0–0.09
MgO	0–0.98	Mg	0–1.34
CaO	8.3–18.3	Ca	7.98–18.15
Na ₂ O	1.08–6.62	Na	1.94–11.48
K ₂ O	0–1.09	K	0–1.27
Cr ₂ O ₃	0–0	Cr	0–0
Ab	9.65–58.63	Or	0–6.45

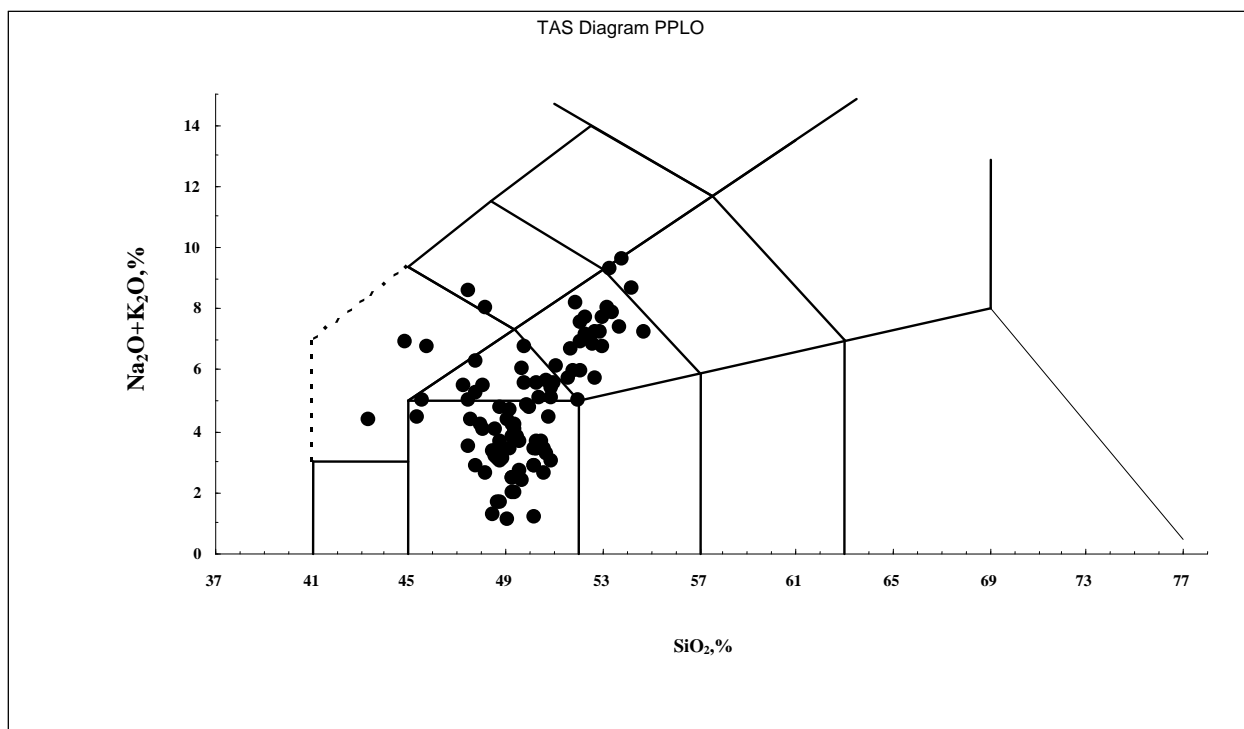


Рис. II.П.6.1 ol-pl. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливина и плагиоклазом, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний железа в расплаве

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol} + 9Ca_{ol}$$

$$Fe^{2+}_m = 0.3K_1 + 3.47(PPLO5)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 4.3–16.6 (атом.%)

Относительная ошибка 23–6 %

$R = 0.86$; $N = 99$; $N_1 = 97$; $\sigma = 1$; $\chi^2 = 0.27$ (8)

Диапазон давлений 2–15 кб

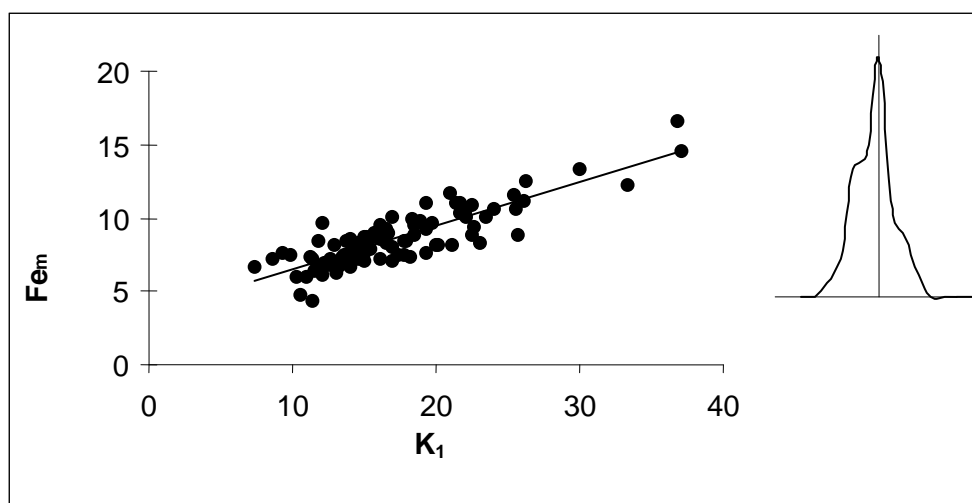


Рис. II.П.6.2 ol-pl (формула **PPLO5**). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава оливина и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Mg_{ol}:2.7 + Ca_{pl} - 3K_{pl}$$

$$Mg_m = 0.49K_1 - 5.86(PPLO7)$$

Диапазон значений Mg 4.1–13.3 (атом.%)

Относительная ошибка 32–10 %

$R = 0.84$; $N = 99$; $N_1 = 98$; $\sigma = 1.3$; $\chi^2 = 3.56$ (8)

Диапазон давлений 2–15 кб

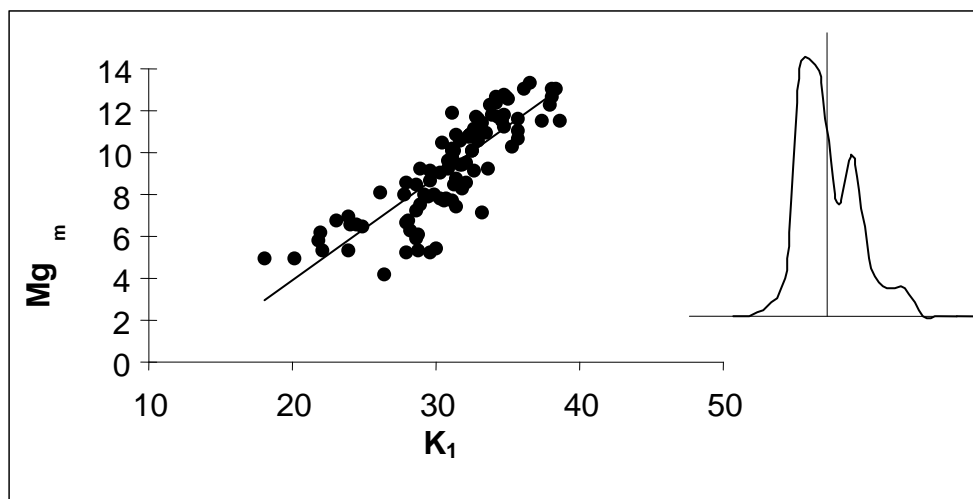


Рис. II.П.6.3 ol-pl (формула PPLO7). Зависимость содержаний Mg_m от состава оливина, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{ol}:2.6 + Ca_{pl} - 5K_{pl} - (Na_m + K_m) + P:5$$

$$Mg_m = 0.34K_1 + 1.29(PPLO7a)$$

Диапазон значений Mg 4.1–13.3 (атом.%)

Относительная ошибка 22–7 %

$R = 0.92$; $N = 99$; $N_1 = 97$; $\sigma = 0.9$; $\chi^2 = 2.78$ (8)

Диапазон давлений 2–15 кб

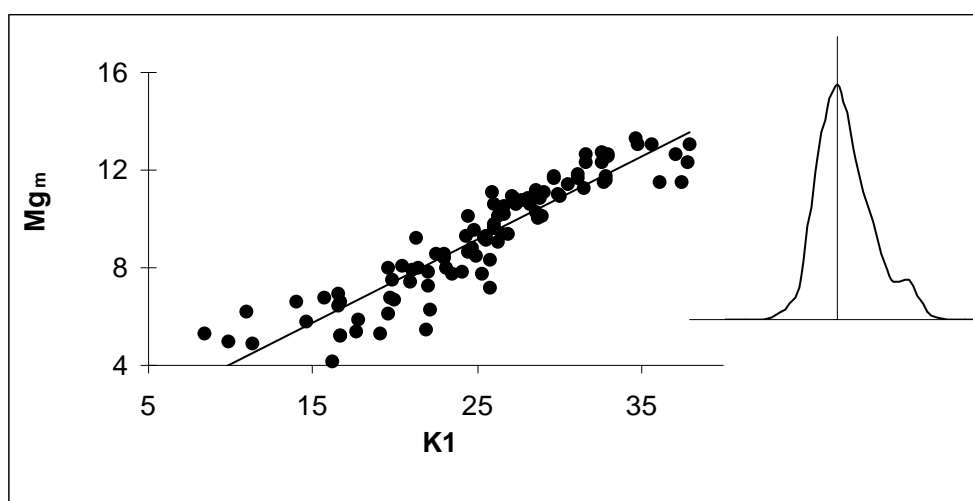


Рис. II.П.6.4 ol-pl (формула PPLO7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава оливина, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Ca_{pl} - P:3$$

$$Ca_m = 0.76K_1 + 2.03(PPLO8)$$

Диапазон значений Ca 5–15.5 (атом.%)

Относительная ошибка 23–7 %

$R = 0.87$; $N = 99$; $N_1 = 99$; $\sigma = 1.15$; $\chi^2 = 0.78$ (8)

Диапазон давлений 2–15 кб

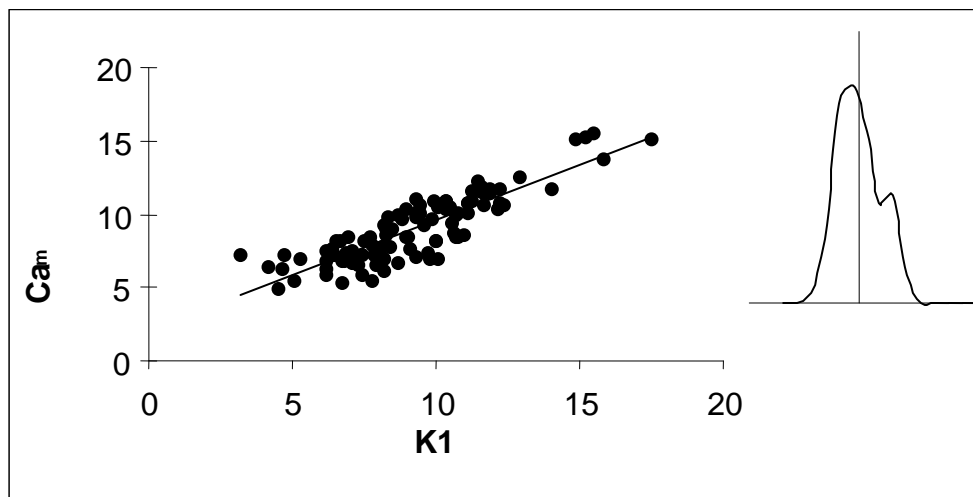


Рис. II.П.6.5 ol-pl (формула PPLO8). Зависимость содержаний Ca_m от состава плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний натрия в расплаве

$$K_1 = Na_{pl} - K_{pl} + Al_m:3 - Ca_m:2 + T:130 + 3Ca_{ol}$$

$$Na_m = 0.56K_1 - 4.28(PPLO9)$$

Диапазон значений Na 1.9–12.4 (атом. %)

Относительная ошибка 58–9 %

$R = 0.81$; $N = 99$; $N_1 = 97$; $\sigma = 1.1$; $\chi^2 = 3.24$ (8)

Диапазон давлений 2–15 кб

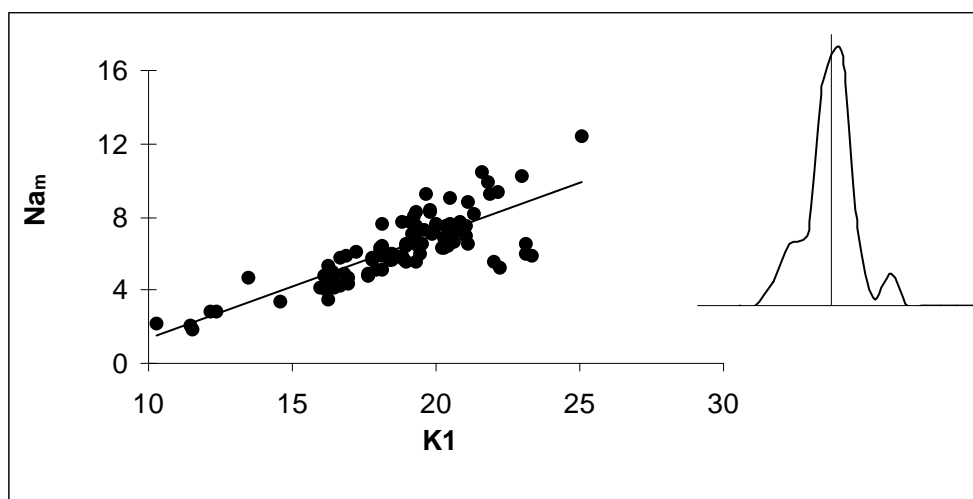


Рис. II.П.6.6 ol-pl (формула PPLO9). Зависимость содержаний Na_m от состава оливина, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Si_{pl} - (Na_{pl} + K_{pl}):2 - Mg_{ol}:7 + 9Ca_{ol} + Si_m + 2Ti_m - Mg_m:8 + Ca_m:5 - P:4$$

$$T = -11.24 K_1 + 2182.84(PLOT)$$

Диапазон значений T 1095–1300 °C

Относительная ошибка 2–2 %

R = -0.86; N = 99; N₁ = 99; сигма = 27 °C; $\chi^2 = 0.25$ (8)

Диапазон давлений 2–15 кб

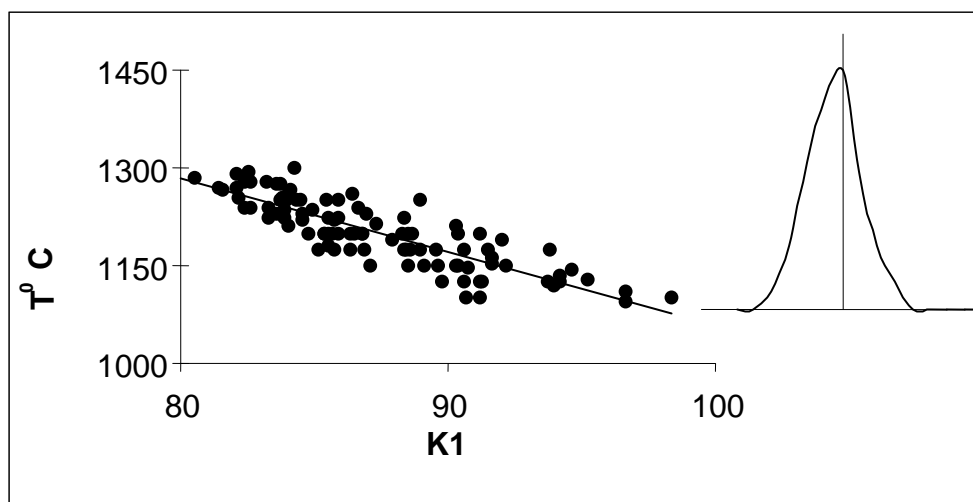


Рис. П.П.6.7 ol-pl (формула PLOT). Зависимость значения T от состава оливина, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{pl}:2 + Fe^{2+}_{ol}:3 + 7Ca_{ol} + 2Si_m - 4Al_m - Mg_m + 0.8(Na_m + K_m) - P$$

$$T = -3.35K_1 + 1345.22(PLOTa)$$

Диапазон значений T 1095–1300 °C

Относительная ошибка 2–2%

R = -0.9; N = 99; N₁ = 97; сигма = 21.7 °C; $\chi^2 = 0.11$ (8)

Диапазон давлений 2–15 кб

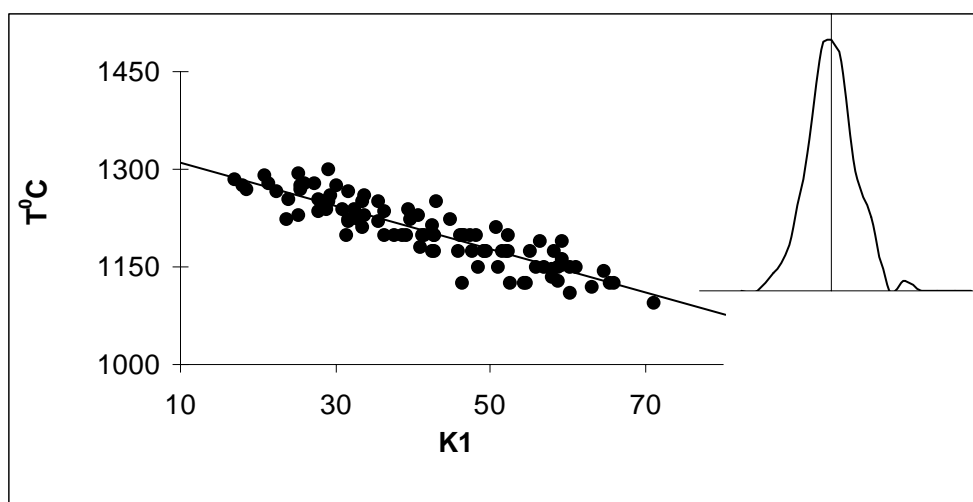


Рис. П.П.6.8 ol-pl (формула PLOTa). Зависимость значения T от состава оливина, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{pl} + Fe^{2+}_{ol:2} + 1.7 Si_m - 4Al_m - Mg_m + (Na_m + K_m):2$$

$$T = -3.55K_1 + 1409.79(PLOTb)$$

Диапазон значений T 1095–1300 °C

Относительная ошибка 3–2 %

R = -0.87; N = 99; N₁ = 99; сигма = 26 °C; $\chi^2 = 0.34$ (8)

Диапазон давлений 2–15 кб

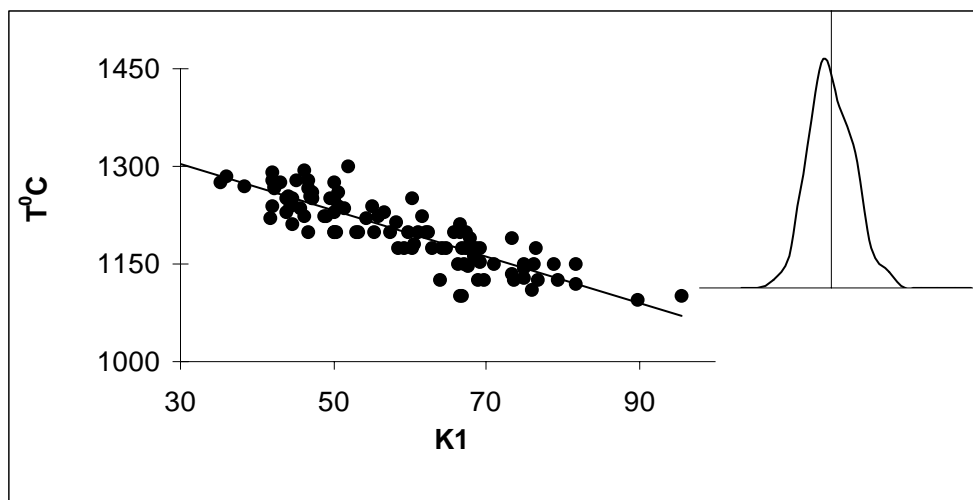


Рис. II.П.6.9 ol-pl (формула PLOTb). Зависимость значения T от состава оливина, плагиоклаза, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = Si_{ol:2} + 2Ca_{ol} - Ca_{pl:5} + K_{pl} - Si_m:7 - Ti_m:2 - Ca_m:2 - Na_m:3 + T:60$$

$$P = 2.61K_1 - 46.73(PLOP)$$

Диапазон значений P 2–15 кб

Относительная ошибка 90–12 %

R = 0.85; N = 99; N₁ = 98; сигма = 1.8 кб; $\chi^2 = 0.81$ (8)

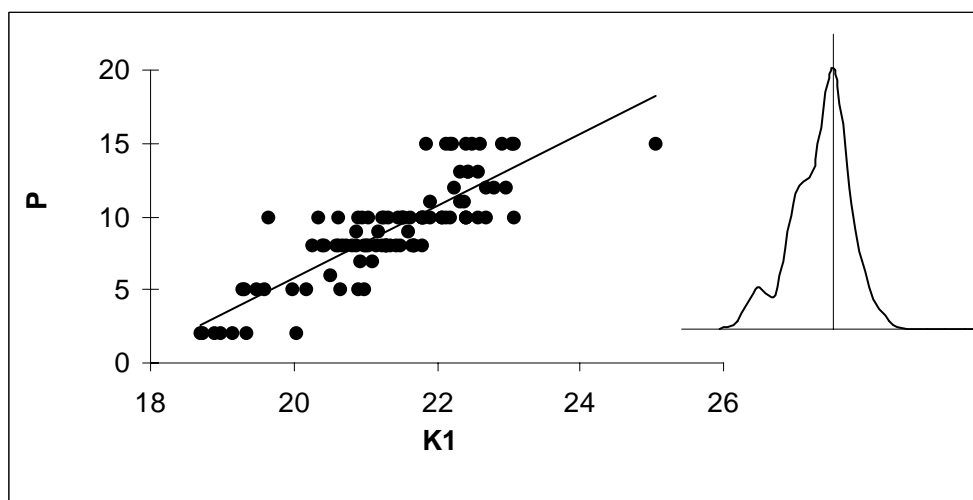


Рис. II.П.6.10 ol-pl (формула PLOP). Зависимость величины P от состава оливина, плагиоклаза, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в системе оливин–плаггиоклаз

$$K_1 = 10(\text{Ca}_{\text{pl}} + 3\text{Fe}^{2+}_{\text{pl}}):(\text{Mg}_{\text{ol}} - 3\text{Ca}_{\text{ol}}); K_2 = \text{Fe}^{2+}_{\text{ol}}:(\text{Na}_{\text{pl}} + K_{\text{pl}})$$

$$K_2 = 1.47K_1 - 1.97(\text{PPLOR})$$

Диапазон значений K_2 0.66–4.5; K_1 1.5–4.6

Относительная ошибка 50–7 %

$R = 0.9$; $N = 99$; $N_1 = 98$; сигма = 0.32; $\chi^2 = 2.03$ (8)

Диапазон давлений 2–15 кб

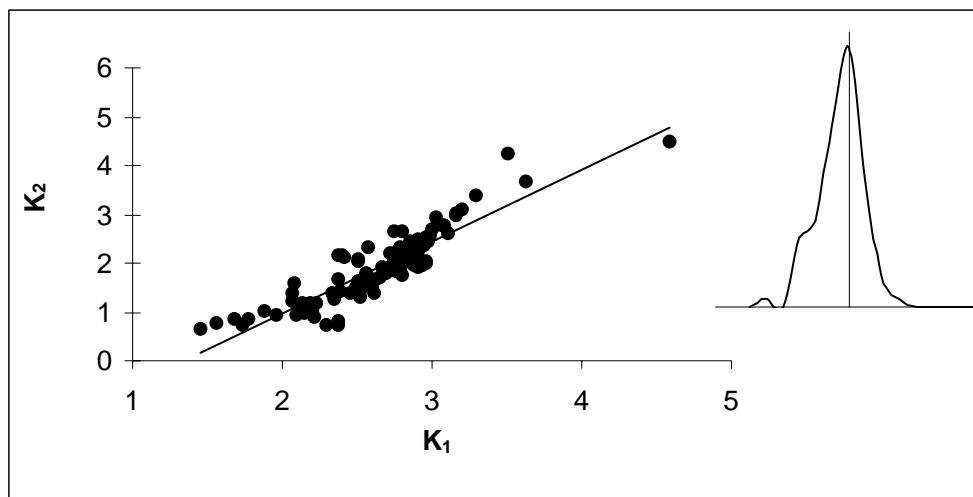


Рис. II.П.6.11 ol–pl (формула PPLOR). Зависимость величины K_2 от состава оливина, плаггиоклаза и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Fe}^{2+}_{\text{ol}}(\text{Al}_{\text{pl}} - \text{Na}_{\text{pl}} - 2K_{\text{pl}} - \text{P}:2):100;$$

$$K_2 = 10000(\text{Ca}_{\text{pl}} + 3\text{Fe}^{2+}_{\text{pl}} + \text{Si}_{\text{pl}}:15):\text{T}(\text{Mg}_{\text{ol}} + 4\text{Ca}_{\text{ol}})$$

$$K_2 = 0.36K_1 + 1.66(\text{PPLORa})$$

Диапазон значений K_2 1.7–4.2; K_1 0.9–6.3

Относительная ошибка 9–4 %

$R = 0.92$; $N = 99$; $N_1 = 98$; сигма = 0.15; $\chi^2 = 5.27$ (8)

Диапазон давлений 2–15 кб

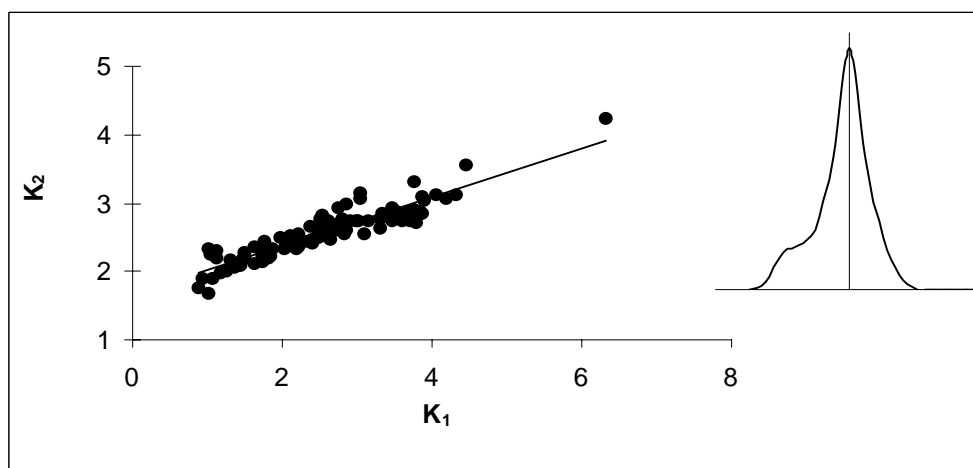


Рис. II.П.6.12 ol–pl (формула PPLORa). Зависимость величины K_2 от состава оливина, плаггиоклаза и распределение средноквадратичной ошибки.

5.7. Система расплав ортопироксен–клинопироксен

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [35; 37; 39; 47; 49; 56; 82; 85; 86; 87; 88; 91; 156; 158; 159; 175; 177; 181; 244; 247; 258; 262; 269; 272; 273; 279; 288; 291; 296; 298; 299; 300; 309; 314; 322; 323; 324; 325; 327; 335; 337; 339; 340].

Общее число тройных анализов – 300 т. После исключения анализов составов ортопироксена, авгита и стекла с суммами окислов менее 97 % и более 102 % – 281 т. После исключения анализов с нулевыми содержаниями железа в стекле – 246 т.

Для расчета титана были отброшены точки с его нулевыми содержаниями – 223 т. Для расчета натрия отброшены точки с его содержаниями < 0.5 % – 224 т. Для расчета содержания хрома были удалены точки с содержаниями его < 0.07 % – 128 т. Для расчета величины давления были отброшены точки с давлениями < 7 кб – 237 т.

Таблица П.П.7.1 орх–срх. Диапазоны составов стекол (расплавов), ортопироксенов и клинопироксенов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

POAV	Стекла				Авгиты	Wo	11.7–45.97
SiO ₂	42.5–61.4	Si	40.29–56.76	SiO ₂	47.3–54.5	Si	43.21–48.99
TiO ₂	0–4.42	Ti	0–3.22	TiO ₂	0–1.78	Ti	0–1.26
Al ₂ O ₃	7.84–24.01	Al	8.77–25.76	Al ₂ O ₃	1.85–12.5	Al	2.05–13.38
FeO	2.65–21.6	Fe	2.02–17.15	FeO	1.84–16.3	Fe	1.37–12.92
MnO	0–0.39	Mn	0–0.31	MnO	0–0.42	Mn	0–0.33
MgO	1.41–19.99	Mg	1.91–26.58	MgO	11.6–28.49	Mg	16.29–37.21
CaO	3.44–15.4	Ca	3.41–15.04	CaO	5.48–20.8	Ca	5.31–20.41
Na ₂ O	0–7.49	Na	0–12.82	Na ₂ O	0–1.66	Na	0–2.86
K ₂ O	0–6.57	K	0–7.75	K ₂ O	0–0.06	K	0–0.07
Cr ₂ O ₃	0–1.06	Cr	0–0.76	Cr ₂ O ₃	0–2.11	Cr	0–1.49
T °C	1100–1600	P, кб	1.5–35	En	33.54–77.68	Fs	2.81–28.28

Продолжение таблицы П.П.7.1 орх–срх.

Ортопироксены		Wo	1.64–8.33
SiO ₂	48.7–56.89	Si	43.75–49.67
TiO ₂	0–0.93	Ti	0–0.65
Al ₂ O ₃	1.3–11	Al	1.4–11.5
FeO	2.37–23.2	Fe	1.69–18.2
MnO	0–0.42	Mn	0–0.32
MgO	19.3–34.4	Mg	26.99–43.81
CaO	0.85–4.17	Ca	0.78–3.99
Na ₂ O	0–0.54	Na	0–0.92
K ₂ O	0–0.04	K	0–0.05
Cr ₂ O ₃	0–1.88	Cr	0–1.28
En	56.89–90.71	Fs	3.51–38.36

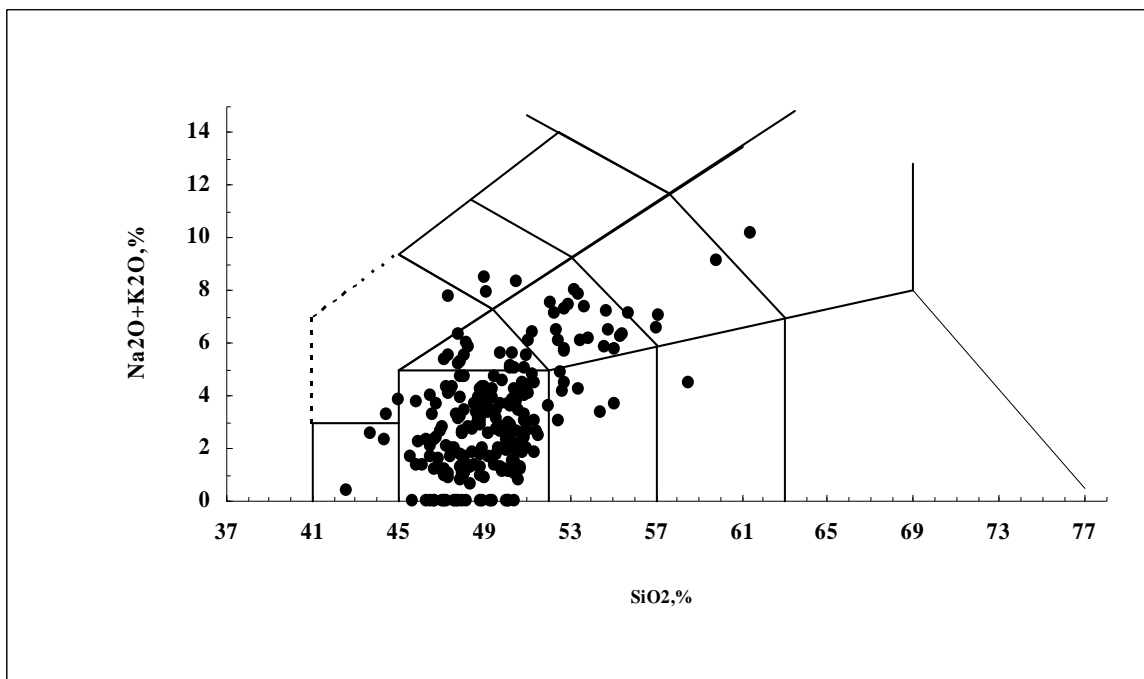


Рис. П.П.7.1 орх–срх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами ортопироксена и клинопироксена в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = Al_{av} + Mg_{av} - Si_{op} \cdot 2 + Fe^{2+}_m + Mg_m + P \cdot 3$$

$$Si_m = -0.22K_1 + 52.75(POAV1)$$

Диапазон значений Si 40.3–53 (атом.%)

Относительная ошибка 3–2 %

$$R = -0.86; N = 246; N_1 = 243; \text{сигма} = 1.1; \chi^2 = 1.1 (12)$$

Диапазон давлений 1.5–35 кб

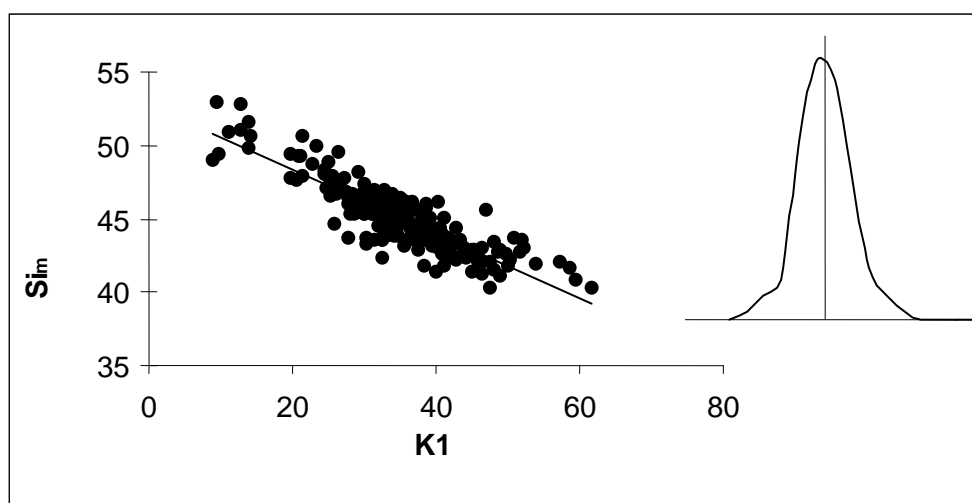


Рис. П.П.7.2 орх–срх (**формула POAV1**). Зависимость содержаний Si_m от состава ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{av} + Mg_{av} - Si_{op}:2 + P:3$$

$$Si_m = -0.39K_1 + 50.79(POAV1a)$$

Диапазон значений Si 40.3–55 (атом.%)

Относительная ошибка 3–2 %

R = -0.83; N = 246; N₁ = 244; сигма = 1.3; $\chi^2 = 2.13$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

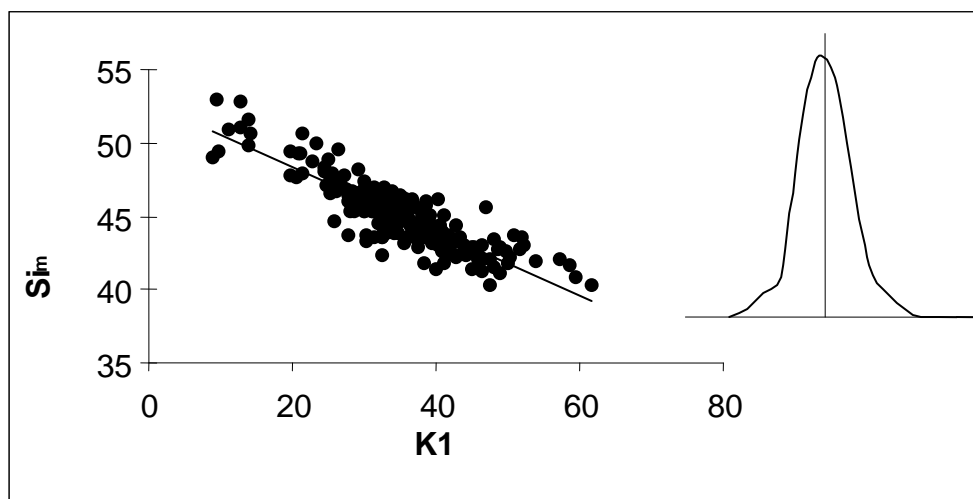


Рис. П.П.7.3 орх–срх (формула POAV1a). Зависимость содержаний Si_m от состава ортопироксена, авгита и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = 8(Ti_{op} + Al_{av}) + Fe^{2+}_{av}:4 - Ca_{av}:8 + P:9$$

$$Ti_m = 0.14K_1 + 0.15(POAV2)$$

Диапазон значений Ti 0.1–3.2 (атом.%)

Относительная ошибка 230–3 %

R = 0.86; N = 223; N₁ = 220; сигма = 0.23; $\chi^2 = 3.6$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

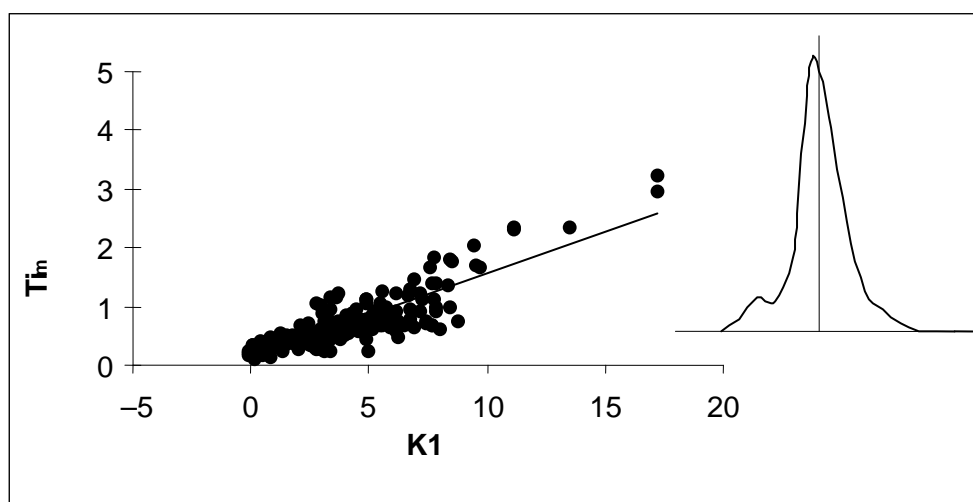


Рис. П.П.7.4 орх–срх (формула POAV2). Зависимость содержаний Ti_m от состава ортопироксена, авгита и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Al_{op} + Fe^{2+}_{op} \cdot 4 - Ca_{op} + Al_{av} \cdot 2 - Fe^{2+}_{av} \cdot 3 - Mg_{av} \cdot 5 + Ca_{av} \cdot 4 - Na_{av} - Fe^{2+}_m \cdot 2 - Mg_m \cdot 4 - P \cdot 4$$

$$Al_m = 0.44K_1 + 20.45(POAV3)$$

Диапазон значений Al 8.8–25.8 (атом.%)

Относительная ошибка 11–4 %

R = 0.88; N = 246; N₁ = 243; сигма = 0.96; $\chi^2 = 0.66$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

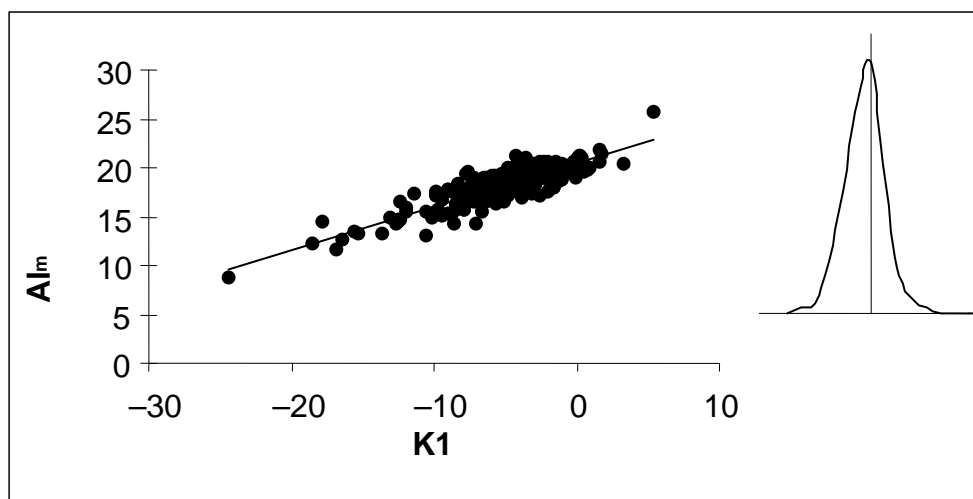


Рис. II.П.7.5 орх–срх (формула POAV3). Зависимость содержаний Al_m от состава ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{op} + Fe^{2+}_{op} \cdot 4 - Ca_{op} + Al_{av} \cdot 2 - Fe^{2+}_{av} \cdot 3 - Mg_{av} \cdot 5 + Ca_{av} \cdot 2 - Na_{av} - P \cdot 2$$

$$Al_m = 0.39K_1 + 17.43(POAV3a)$$

Диапазон значений Al 8.8–21.8 (атом.%)

Относительная ошибка 14–6 %

R = 0.81; N = 246; N₁ = 243; сигма = 1.1; $\chi^2 = 0.45$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

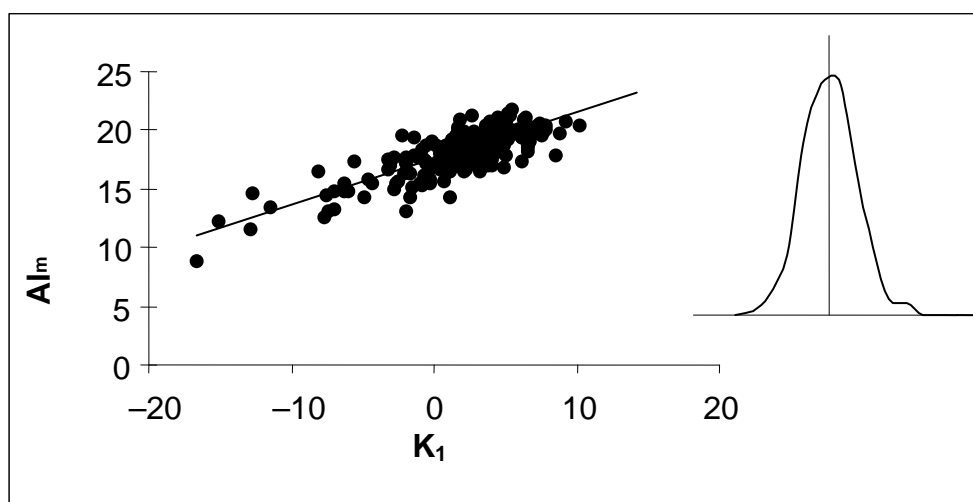


Рис. II.П.7.6 орх–срх (формула POAV3a). Зависимость содержаний Al_m от состава ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа в расплаве

$$K_1 = Ca_{av}:6 - Fe^{2+}_{av} - Fe^{2+}_{op}:3 - Mg_{av}:6 + Si_m:2 + Al_m:2$$

$$Fe^{2+}_m = -0.5K_1 + 17.87(POAV5)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 2.5–14.5 (атом. %)

Относительная ошибка 34–6 %

$$R = -0.88; N = 246; N_1 = 241; \text{сигма} = 0.85; \chi^2 = 1.14 (12)$$

Диапазон давлений 1.5–35 кб

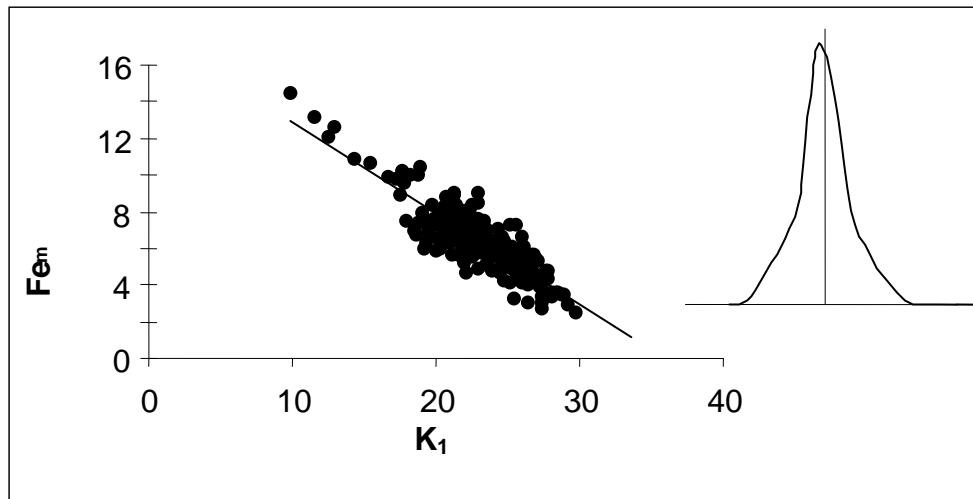


Рис. II.П.7.7 орх–срх (формула POAV5). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{av} + Fe^{2+}_{op}:4 - Si_{av}:4 + Mg_{av}:3 - Ca_{av}:3$$

$$Fe^{2+}_m = 0.53K_1 + 7.09(POAV5a)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 2.5–14.5 (атом.%)

Относительная ошибка 40–7 %

$$R = 0.84; N = 246; N_1 = 241; \text{сигма} = 1; \chi^2 = 3.27 (12)$$

Диапазон давлений 1.5–35 кб

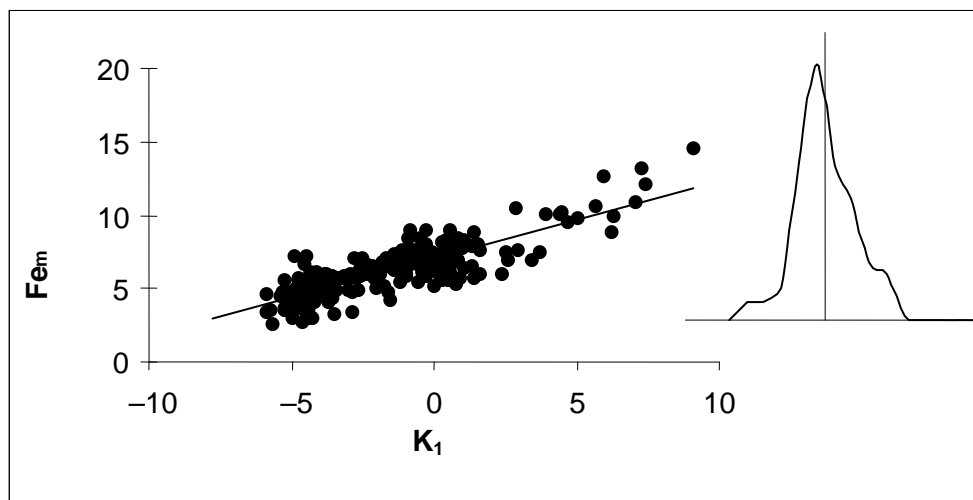


Рис. II.П.7.8 орх–срх (формула POAV5a). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = (Mg_{av} + Mg_{op}:4 + Ca_{av}:2 + Al_{av}:5 - Si_m:2 - Al_m:3):10$$

$$\ln(Mg_m) = 0.85K_1 + 1.22(POAV7)$$

Диапазон значений Mg 2.9–26.6 (атом. %)

Относительная ошибка 39–4 %

R = 0.95; N = 246; N₁ = 242; сигма = 1.1; $\chi^2 = 2.64$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

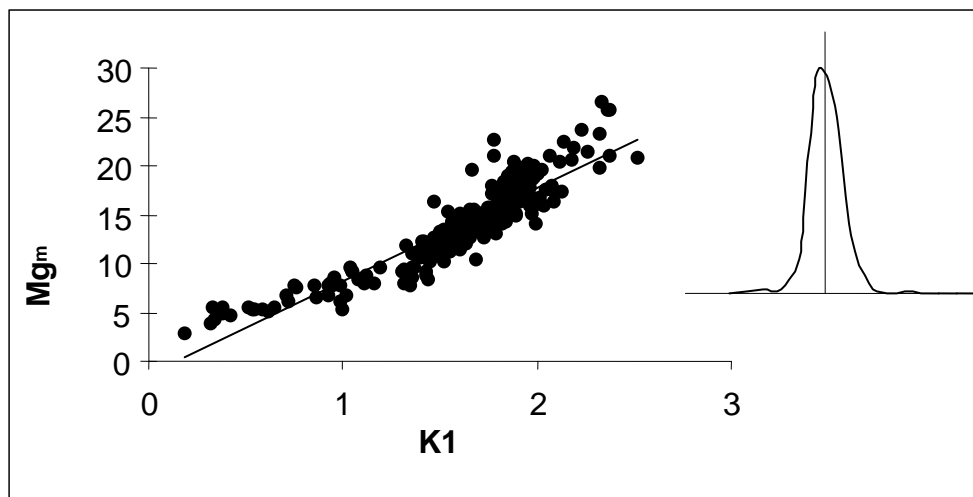


Рис. II.П.7.9 орх–срх (формула POAV7). Зависимость содержаний Mg_m от состава ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (Mg_{av} + Mg_{op}:4 + Ca_{av}:3 + Al_{av}:5):10$$

$$\ln(Mg_m) = 0.99K_1 - 1.61(POAV7a)$$

Диапазон значений Mg 2.9–26.6 (атом.%)

Относительная ошибка 42–5 %

R = 0.89; N = 246; N₁ = 243; сигма = 1.2; $\chi^2 = 1.82$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

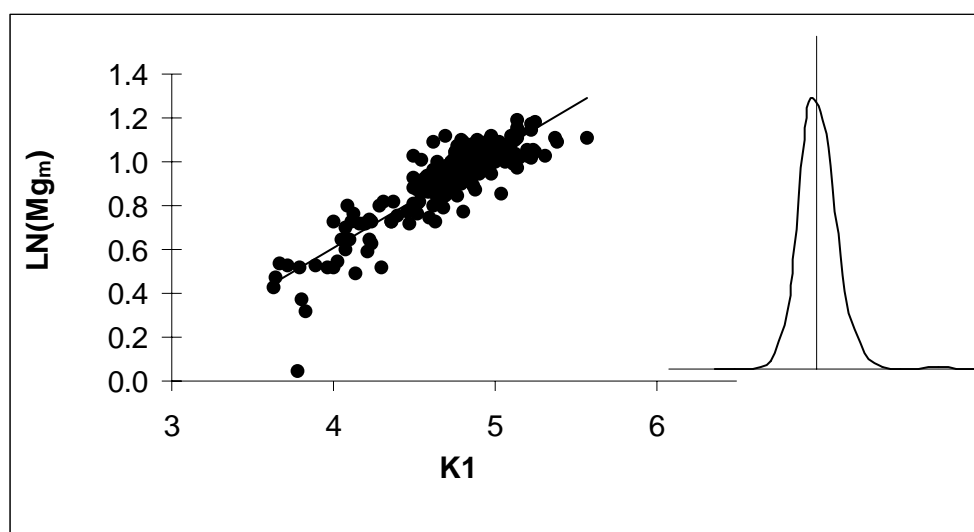


Рис. II.П.7.10 орх–срх (формула POAV7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = 1.8Si_{op} + 11(Ti_{op} + Ti_{av}) + 7Na_{av} - Mg_{op} - Mg_{av}:2 - 6Ca_{op} - Ca_{av}:5$$

$$Ca_m = -0.2K_1 + 15.59(POAV8)$$

Диапазон значений Ca 4.4–15 (атом.%)

Относительная ошибка 20–6 %

$$R = -0.91; N = 246; N_1 = 242; \text{сигма} = 0.9; \chi^2 = 1.69 (12)$$

Диапазон давлений 1.5–35 кб

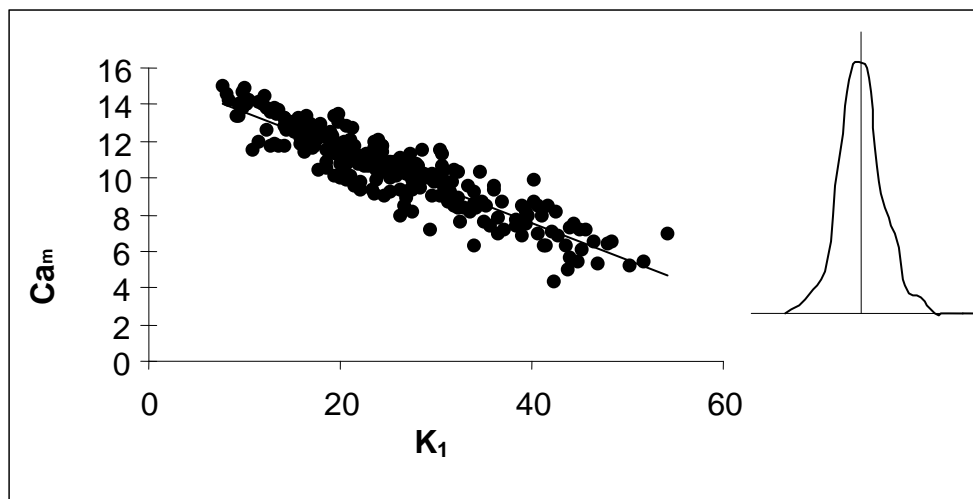


Рис. П.П.7.11 орх–срх (формула POAV8). Зависимость содержаний Ca_m от состава ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний натрия в расплаве

$$K_1 = 9Na_{av} + 9Ti_{av} - Mg_{op}:6 - P:3$$

$$Na_m = 0.35K_1 + 5.18(POAV9)$$

Диапазон значений Na 0.7–12.8 (атом.%)

Относительная ошибка 180–10 %

$$R = 0.86; N = 224; N_1 = 221; \text{сигма} = 1.27; \chi^2 = 2.2 (12)$$

Диапазон давлений 1.5–35 кб

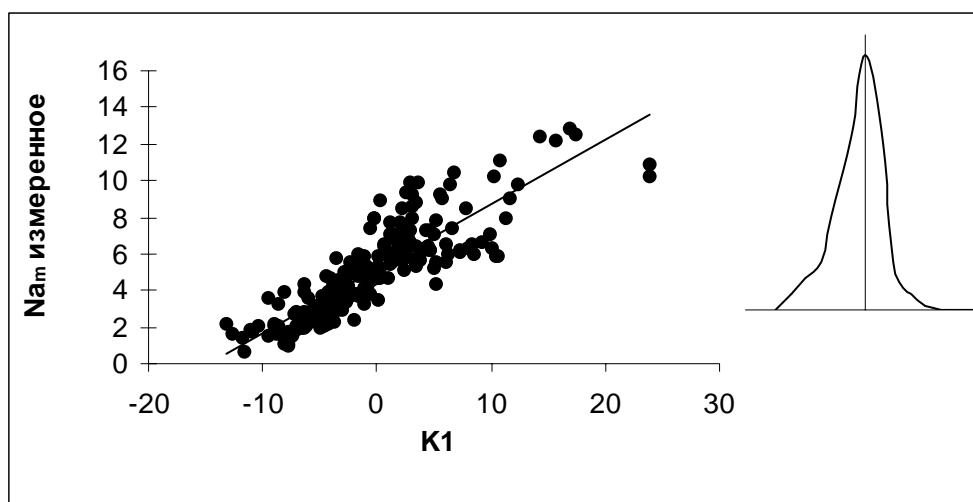


Рис. П.П.7.12 орх–срх (формула POAV9). Зависимость содержаний Na_m от состава ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний хрома в расплаве

$$K_1 = 5(Cr_{op} + Cr_{av}) + Mg_{av}:2 + P:4$$

$$Ln10Cr_m = 0.14K_1 - 3.17(POAV11)$$

Диапазон значений Cr 0.06–0.76 (атом.%)

Относительная ошибка 250–20 %

R = 0.8; N = 128; N₁ = 128 сигма = 0.15; $\chi^2 = 5.95$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

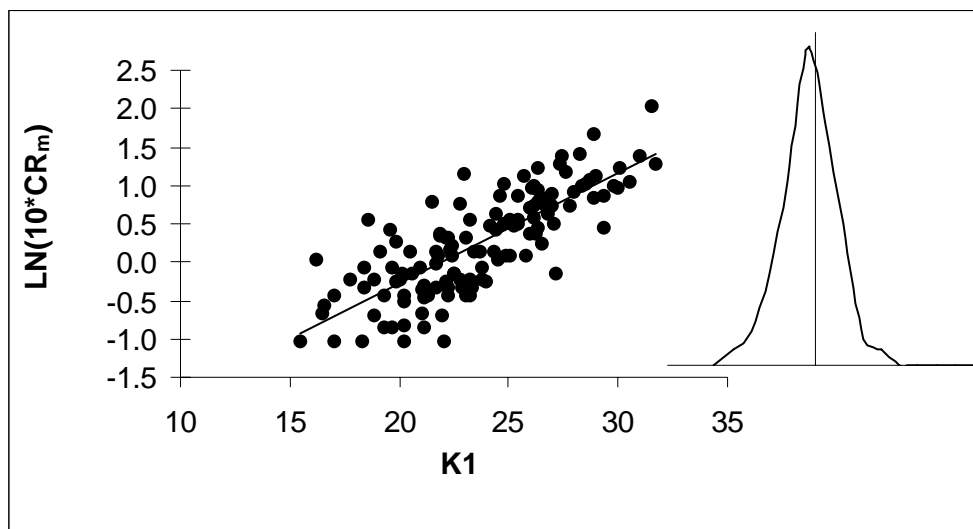


Рис. II.П.7.13 орх–срх (формула POAV11). Зависимость содержаний Cr_m от состава ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет величины железо–магниевого отношения в расплаве

$$K_1 = (Fe^{2+}/Mg)_{op}; K_2 = (Fe^{2+}/Mg)_{av};$$

$$(Fe^{2+}/Mg)_m = 1.4(K_1 + K_2 + Ti_{aug}:5 + Ca_{op}:9) - 0.33(POAV14)$$

Диапазон значений Fe²⁺:Mg 0.14–2.1; K₁ 0.04–0.6; K₂ 0.04–0.6

Относительная ошибка 70–5%

R = 0.95; N = 246; N₁ = 239; сигма = 0.1; $\chi^2 = 3.68$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

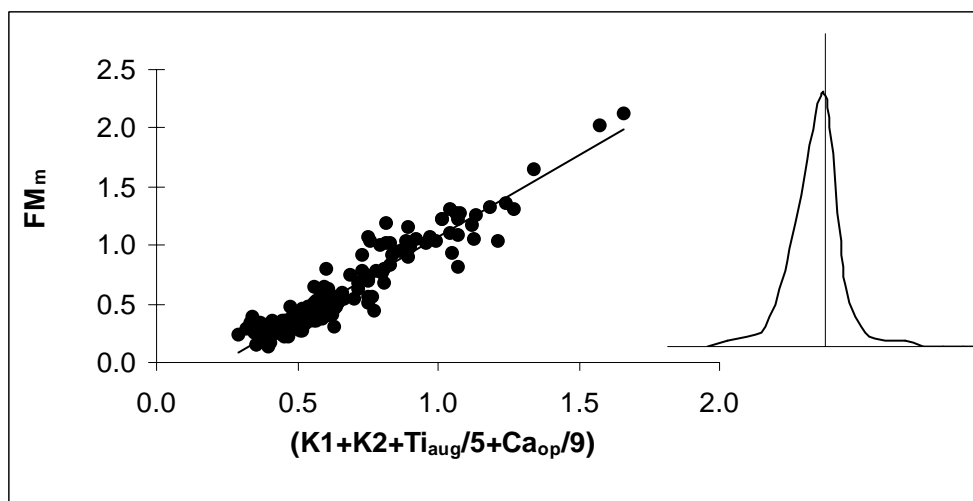


Рис. II.П.7.14 орх–срх (формула POAV14). Зависимость величины (Fe²⁺/Mg)_m от состава ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Al_{av}:1.3 + Mg_{av} - Ca_{av}:3 - Fe^{2+}_{op}:2 + Mg_m + P:1.7$$

$$T = 6.95K_1 + 991.21(POAVT)$$

Диапазон значений T 1100–1600 °C

Относительная ошибка 3–2 %

$R = 0.91$; $N = 246$; $N_1 = 246$ сигма = 34.6 °C; $\chi^2 = 1.28$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

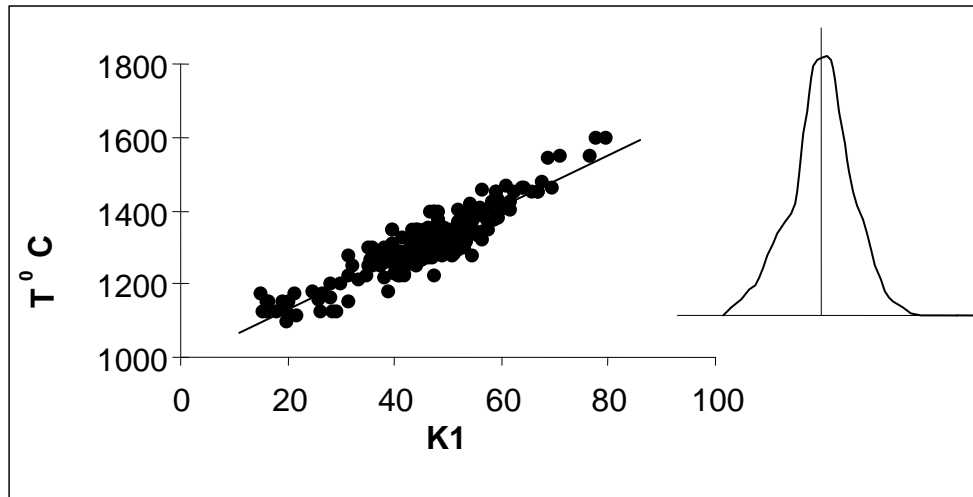


Рис. П.П.7.15 орх–срх (формула POAVT). Зависимость значения T от состава ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{av}:1.8 - 4Ti_{av} + Mg_{av} - Ca_{av}:4 + Na_{av} - Fe^{2+}_{op}:2 + 2Ca_{op} + P:1.5$$

$$T = 9.83K_1 + 948(POAVTa)$$

Диапазон значений T 1100–1600 °C

Относительная ошибка 4–3 %

$R = 0.89$; $N = 246$; $N_1 = 245$ сигма = 38.6 °C; $\chi^2 = 1.19$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

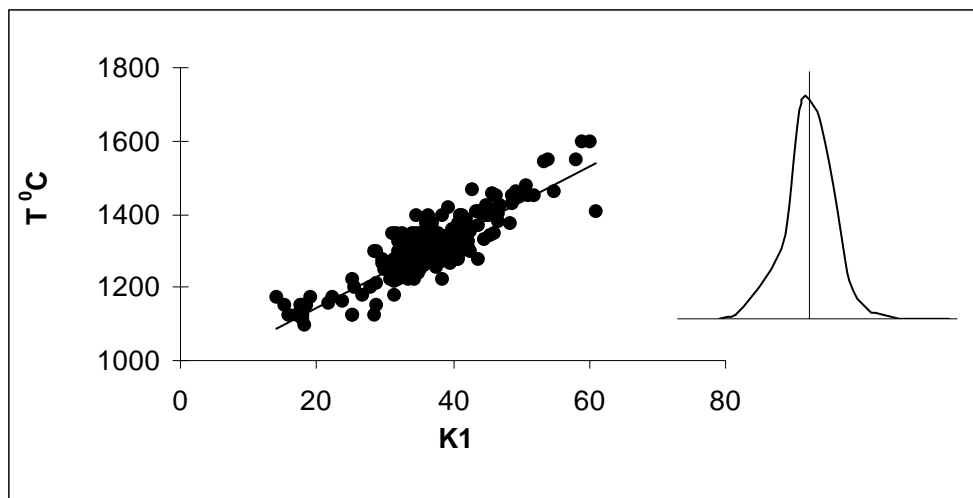


Рис. П.П.7.16 орх–срх (формула POAVTa). Зависимость значения T от состава ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = T:14 + Al_{op} + Fe^{2+}_{op} - Fe^{2+}_{av}:2 - Mg_{av}:2 - Ca_{av} - Al_m + Mg_m:2 - Ca_m$$

$$P = 0.4K_1 - 8.66(POAVP)$$

Диапазон значений P 7–30 кб

Относительная ошибка 27–6 %

R = 0.88; N = 237; N₁ = 235 сигма = 1.9; $\chi^2 = 0.98$ (12)

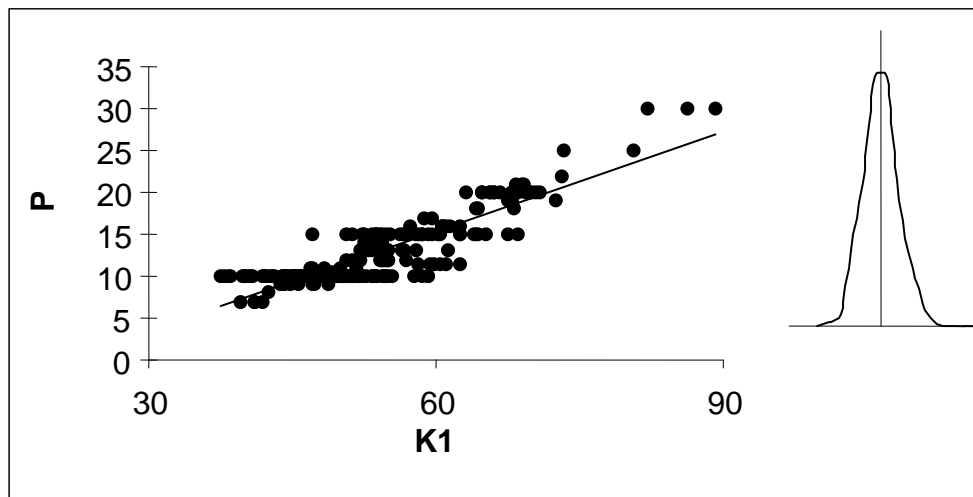


Рис. П.П.7.17 орх–срх (формула POAVP). Зависимость величины P от состава ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = T:9 + Al_{op} + Fe^{2+}_{op} - Ca_{op}:2 - Fe^{2+}_{av}:3 - Mg_{av}:4 - Ca_{av}:3 + 5Na_{av} + Mg_m:2$$

$$P = 0.32K_1 - 36.95(POAVPa)$$

Диапазон значений P 7–30 кб

Относительная ошибка 27–6 %

R = 0.86; N = 237; N₁ = 232 сигма = 2 кб; $\chi^2 = 2.35$ (12)

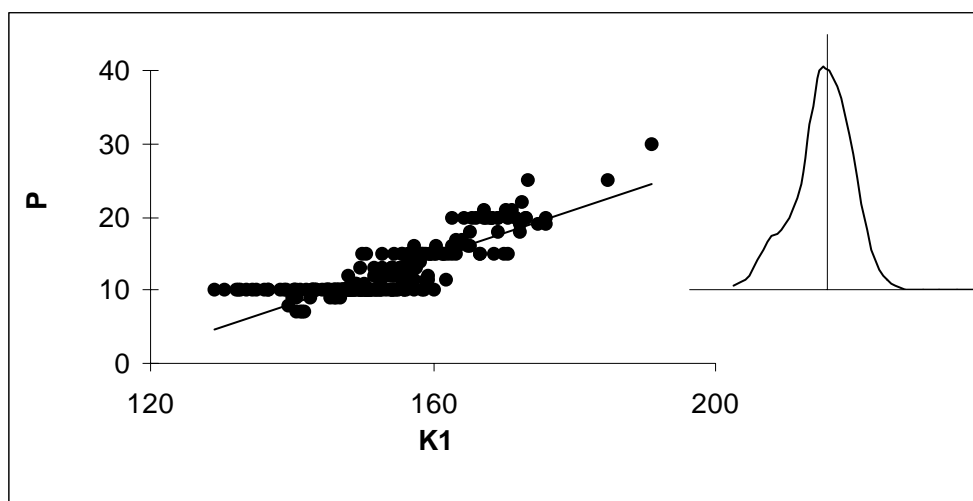


Рис. П.П.7.18 орх–срх (формула POAVPa). Зависимость величины P от состава ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в системе ортопироксен–авгит

$$K_1 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{op}}; K_2 = (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{av}}$$

$$K_2 = 1.07K_1 + 0.01(\text{POAVR})$$

Диапазон значений K_2 0.04–0.69; K_1 0.04–0.7

Относительная ошибка 38–2 %

$R = 0.99$; $N = 246$; $N_1 = 240$; сигма = 0.015; $\chi^2 = 7.2$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

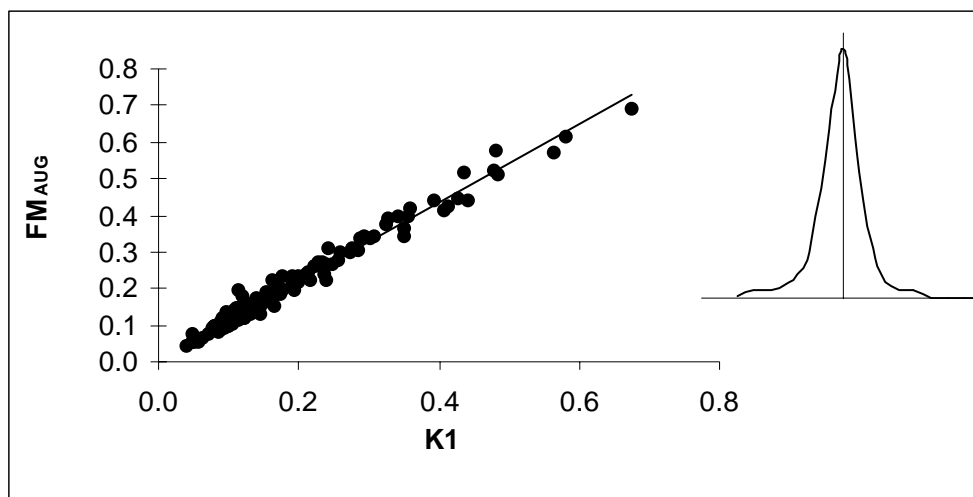


Рис. П.П.7.19 орх–срх (формула POAVR). Зависимость величины $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{av}}$ от состава ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Ti}_{\text{op}} + \text{Al}_{\text{op}}; K_2 = \text{Ti}_{\text{av}} + \text{Al}_{\text{av}}$$

$$K_2 = 0.91K_1 + 1.84(\text{POAVRa})$$

Диапазон значений K_2 2.4–13.8; K_1 1.7–11.7

Относительная ошибка 39–7 %

$R = 0.9$; $N = 246$; $N_1 = 240$; сигма = 0.93; $\chi^2 = 1.54$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

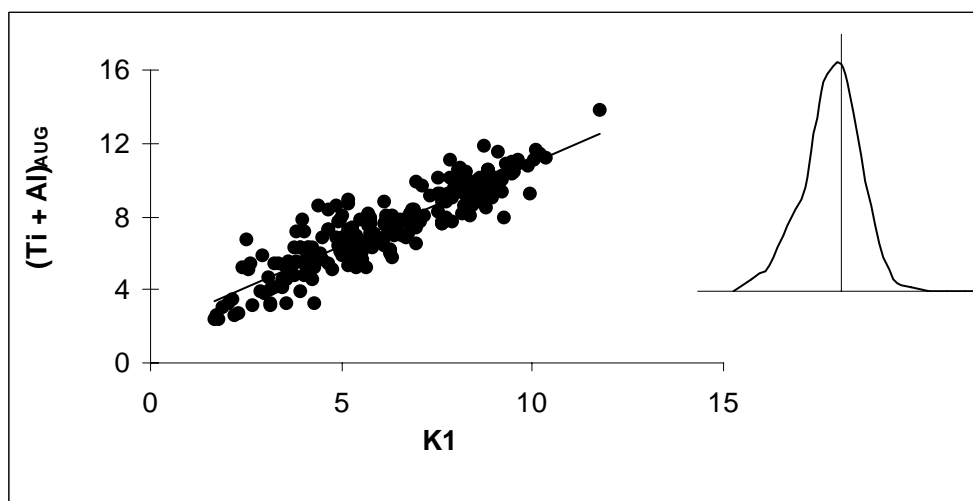


Рис. П.П.7.20 орх–срх (формула POAVRa). Зависимость величины K_2 от состава ортопироксена и распределение среднеквадратичной ошибки.

5.8. Система расплав–клинопироксен–плаггиоклаз

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [29; 30; 38; 41; 49; 54; 56; 80; 82; 84; 85; 86; 87; 88; 91; 92; 177; 258; 262; 269; 288; 291; 296; 300; 319; 335; 339; 347; D1].

Общее число тройных анализов – 186 т. После исключения анализов составов авгита, плаггиоклаза и стекол с суммами окислов менее 97 % и более 102 % – 143 т. После исключения анализов с нулевыми содержаниями железа в стекле – 138 т. Для расчета калия были отброшены точки с нулевыми содержаниями его в расплаве – 128 т.

Таблица П.П.8.1 срх–рл. Диапазоны составов стекол (расплавов), клинопироксенов и плаггиоклазов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

PAVL	Стекла			Авгиты		Wo	19.3–64.28
SiO ₂	42.8–61.49	Si	42.11–58.06	SiO ₂	44.51–53.2	Si	40.26–48.99
TiO ₂	0.35–6.66	Ti	0.24–4.78	TiO ₂	0–3.01	Ti	0–2.12
Al ₂ O ₃	11.9–24.01	Al	12.75–25.76	Al ₂ O ₃	1.85–25.76	Al	2.05–27.46
FeO	2.65–20.4	Fe	2.02–16.56	FeO	3.48–18.3	Fe	2.63–14.49
MnO	0–0.36	Mn	0–0.29	MnO	0–0.65	Mn	0–0.52
MgO	0.81–11.1	Mg	1.14–15.05	MgO	5.05–22.3	Mg	6.81–29.59
CaO	3.44–13.86	Ca	3.41–13.78	CaO	8.8–23	Ca	8.56–22.77
Na ₂ O	1.14–7.71	Na	2.05–13.7	Na ₂ O	0–3.12	Na	0–5.47
K ₂ O	0–6.72	K	0–7.95	K ₂ O	0–0.11	K	0–0.13
Cr ₂ O ₃	0–0.14	Cr	0–0.1	Cr ₂ O ₃	0–1.2	Cr	0–0.85
T °C	1100–1430	P, кб	2–27	En	25.76–64.68	Fs	6.35–30.6

Продолжение таблицы П.П.8.1 срх–рл.

Плаггиоклазы		An	34.06–87.71
SiO ₂	46.03–59.93	Si	42.59–53.5
TiO ₂	0–0.63	Ti	0–0.44
Al ₂ O ₃	25.1–33.65	Al	26.69–36.7
FeO	0–2.01	Fe	0–1.55
MnO	0–0.11	Mn	0–0.09
MgO	0–1	Mg	0–1.35
CaO	7.02–18.24	Ca	6.72–17.87
Na ₂ O	1.37–6.93	Na	2.45–11.99
K ₂ O	0–2.07	K	0–2.4
Cr ₂ O ₃	0–0.03	Cr	0–0.02
Ab	12.29–63.46	Or	0–12.03

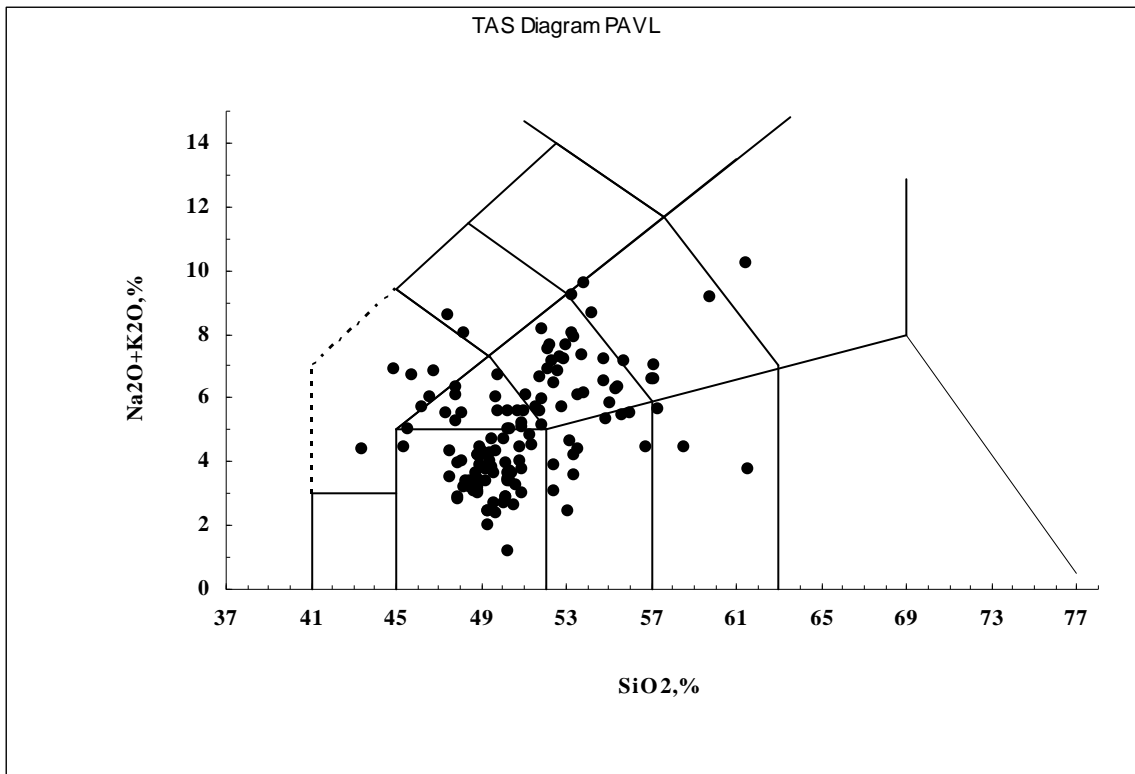


Рис. II.П.8.1 срх–рл. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами клинопироксена и плагиоклаза, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = Si_{pl} + Si_{av} - 2Ti_{av} - Mg_{av}:5 + Ca_{av}:6 - 2Fe^{2+}_m - Mg_m + P:5$$

$$Si_m = 0.32K_1 + 24.36(PAVL1)$$

Диапазон значений Si 42–57 (атом. %)

Относительная ошибка 3–2 %

R = 0.85; N = 138; N₁ = 135; сигма = 1.4; $\chi^2 = 0.71$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

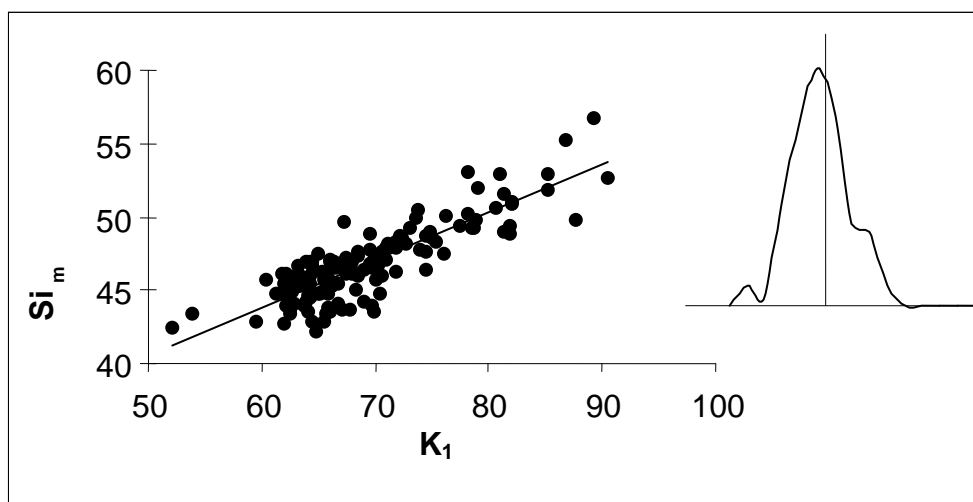


Рис. II.П.8.2 срх–рл (**формула PAVL1**). Зависимость содержаний **Si_m** от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{pl} + Si_{av} - 2Ti_{av} - Mg_{av}:5 + Ca_{av}:6 - Fe^{2+}_m - Na_m + P:5$$

$$Si_m = 0.57K_1 + 1.88(PAVL1a)$$

Диапазон значений Si 42–57 (атом. %)

Относительная ошибка 3–2 %

R = 0.86; N = 138; N₁ = 135; сигма = 1.35; $\chi^2 = 1.77$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

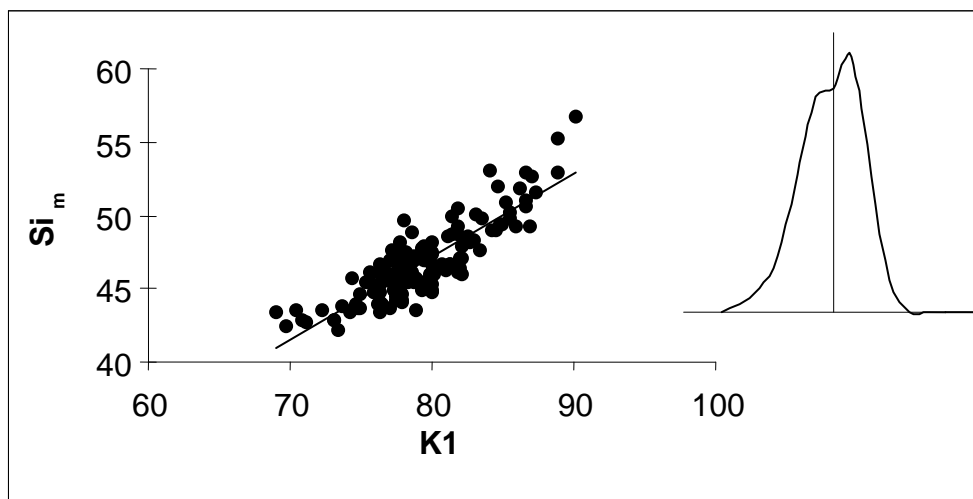


Рис. II.П.8.3 срх–пл (формула PAVL1a). Зависимость содержаний Si_m от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = 9Ti_{av} - Al_{av}:6 - 2Fe^{2+}_{pl}$$

$$Ti_m = 0.19K_1 + 0.64(PAVL2)$$

Диапазон значений Ti 0.24–3.4 (атом. %)

Относительная ошибка 170–12 %

R = 0.83; N = 138; N₁ = 136; сигма = 0.4; $\chi^2 = 2.78$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

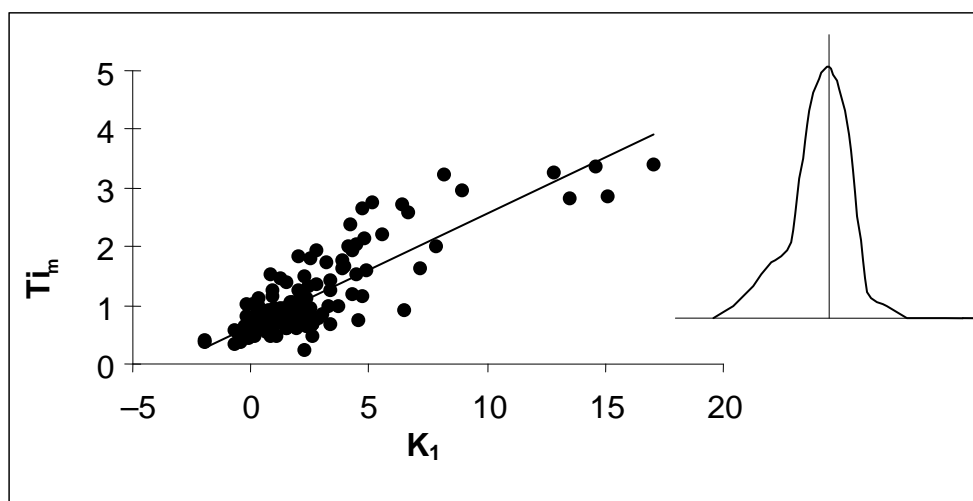


Рис. II.П.8.4 срх–пл (формула PAVL2). Зависимость содержаний Ti_m от состава авгита, плагиоклаза и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Si_{av} + Ti_{av} + Al_{av}:5 - Fe^{2+}_{av}:4 + Fe^{2+}_{pl} + Si_m:5 + Fe^{2+}_m:2 - T:250$$

$$Al_m = -1.38K_1 + 94.88(PAVL3)$$

Диапазон значений Al 12.7–25.8 (атом. %)

Относительная ошибка 9–4 %

R = -0.85; N = 138; N₁ = 138; сигма = 1.14; $\chi^2 = 1.45$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

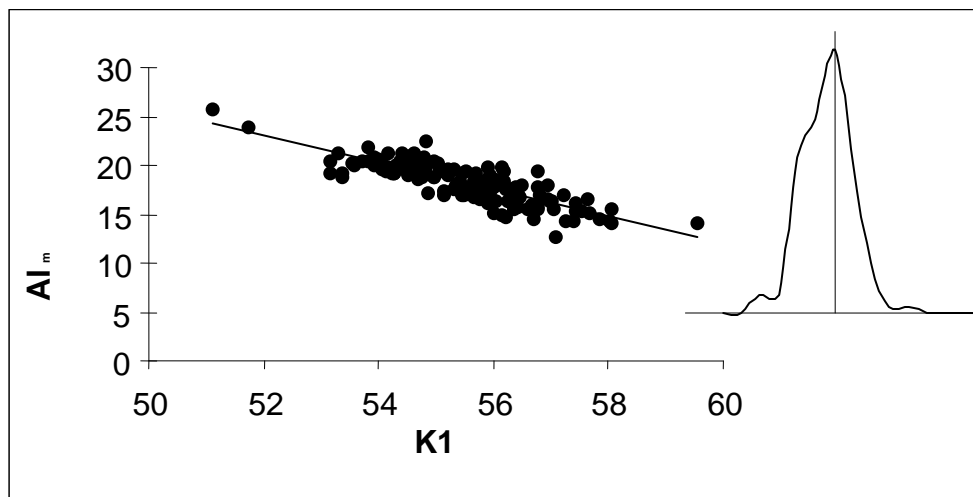


Рис. П.П.8.5 срх–pl (формула PAVL3). Зависимость содержаний Al_m от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа в расплаве

$$K_1 = Si_{pl}:5 + 4K_{pl} - 5Ti_{av} - Fe^{2+}_{av} - Mg_{av}:5 - Na_{av} + Si_m:2 + Al_m$$

$$Fe^{2+}_m = -0.45K_1 + 25.06(PAVL5)$$

Диапазон значений Fe²⁺ 2–16.2 (атом. %)

Относительная ошибка 47–6 %

R = -0.88; N = 138; N₁ = 137; сигма = 0.93; $\chi^2 = 0.77$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

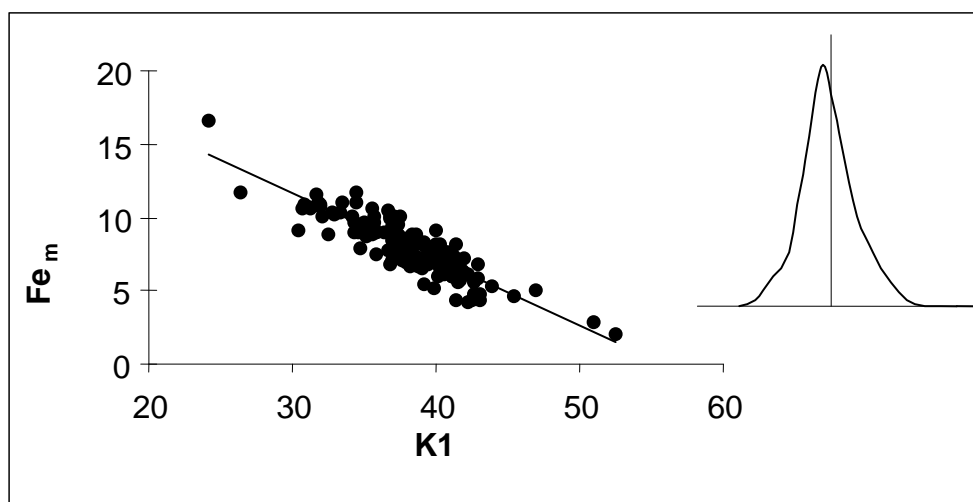


Рис. П.П.8.6 срх–pl (формула PAVL5). Зависимость содержаний Fe²⁺_m от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Si_{av}:7 - Al_{av}:5 - Fe^{2+}_{av} - Ca_{av}:3 - 2Na_{av} - Si_{pl}:5 + Ca_{pl}:3 + (Na_{pl} + K_{pl}):5 + P:3$$

$$Mg_m = 0.83K_1 + 17.5(PAVL7)$$

Диапазон значений Mg 1.1–14.1 (атом. %)

Относительная ошибка 130–10 %

R = 0.86; N = 138; N₁ = 136; сигма = 1.4; $\chi^2 = 3.48$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

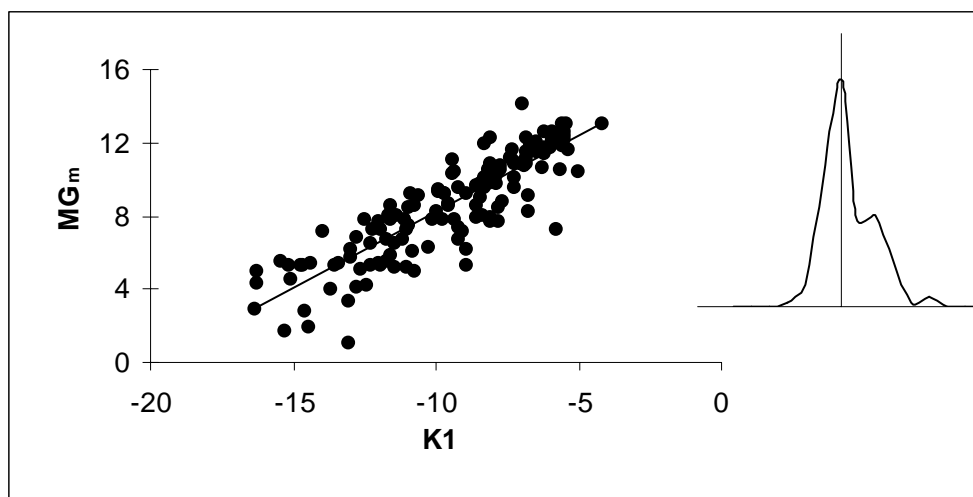


Рис. II.П.8.7 срх–pl (формула PAVL7). Зависимость содержаний Mg_m от состава авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Si_{pl}:4 + Ca_{pl} - Si_{av}:7 + Ti_{av} - Fe^{2+}_{av}:6 + Mg_{av}:5 - Ca_{av}:6 - P:6$$

$$Ca_m = 0.6K_1 - 1.53(PAVL8)$$

Диапазон значений Ca 3.4–13.8 (атом. %)

Относительная ошибка 32–8 %

R = 0.81; N = 138; N₁ = 137; сигма = 1.1; $\chi^2 = 0.69$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

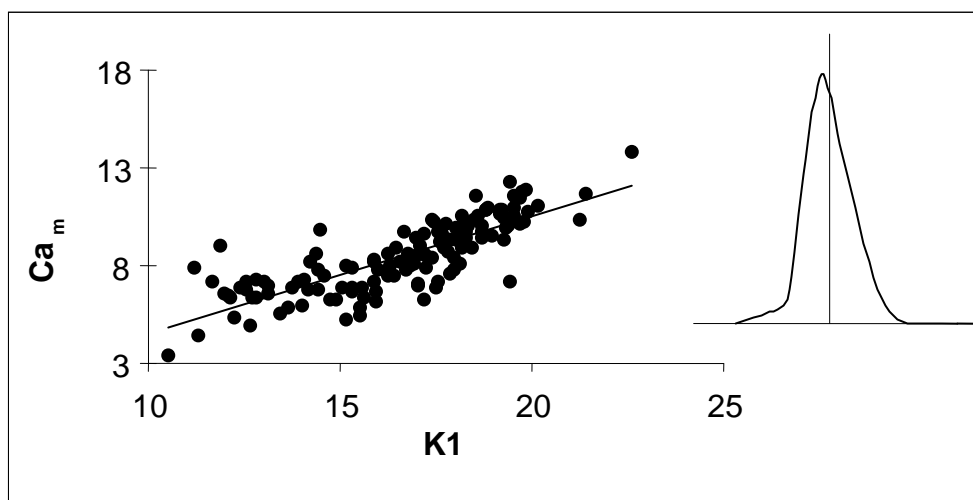


Рис. II.П.8.8 срх–pl (формула PAVL8). Зависимость содержаний Ca_m от состава авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_{pl}:6 + Ca_{pl} - Si_{av}:8 + 2Ti_{av} - Fe^{2+}_{av}:6 + Mg_{av}:5 - Ca_{av}:8 + Na_{av} - (Na_m + K_m) + T:80 - P:3$$

$$Ca_m = 0.34K_1 + 1.43(PAVL8a)$$

Диапазон значений Ca 3.4–13.8 (атом. %)

Относительная ошибка 23–6 %

R = 0.9; N = 138; N₁ = 137; сигма = 0.79; $\chi^2 = 0.82$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

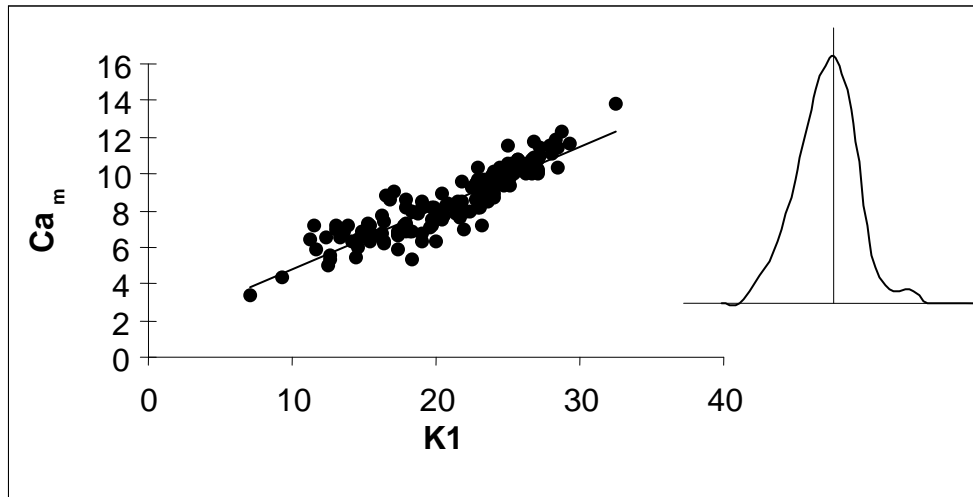


Рис. II.П.8.9 сrx–pl (формула PAVL8a). Зависимость содержаний Ca_m от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний натрия в расплаве

$$K_1 = Fe^{2+}_{av}:4 - Ca_{av}:8 - Na_{av}:2 + Si_{pl}:3 - Fe^{2+}_{pl} - Na_{pl} + Si_m:3 + Ca_m - T:90 + P:5$$

$$Na_m = -0.57K_1 + 17.88(PAVL9)$$

Диапазон значений Na 2–12.5 (атом.%)

Относительная ошибка 46–7 %

R = -0.81; N = 138; N₁ = 137; сигма = 0.92; $\chi^2 = 3.17$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

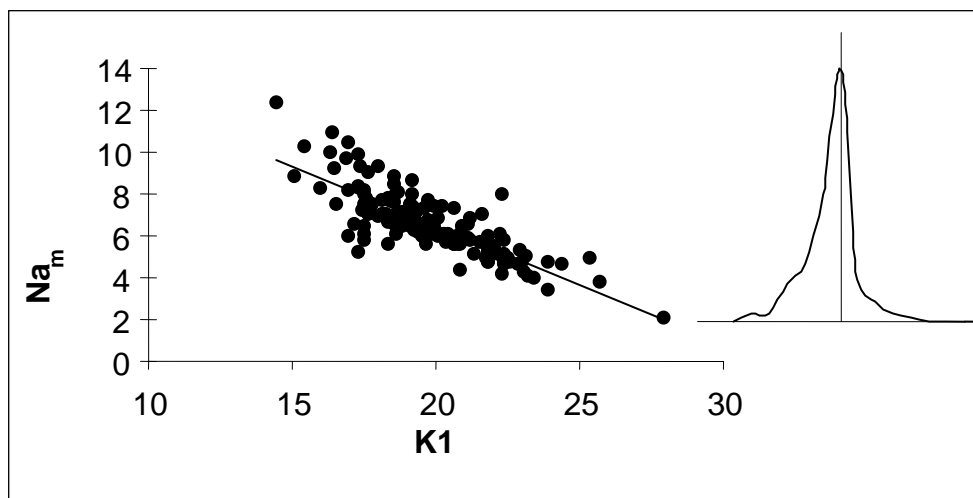


Рис. II.П.8.10 сrx–pl (формула PAVL9). Зависимость содержаний Na_m от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний калия в расплаве

$$K_1 = Mg_{av}:4 - Ca_{av}:6 - 5K_{pl} + 2Ti_m + 2Ca_m + Na_m + T:60$$

$$K_m = -0.26K_1 + 13.83(\text{PAVL10})$$

Диапазон значений К 0.1–7.74 (атом.%)

Относительная ошибка 760–10 %

R = -0.88; N = 128; N₁ = 126; сигма = 0.76; $\chi^2 = 3.48$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

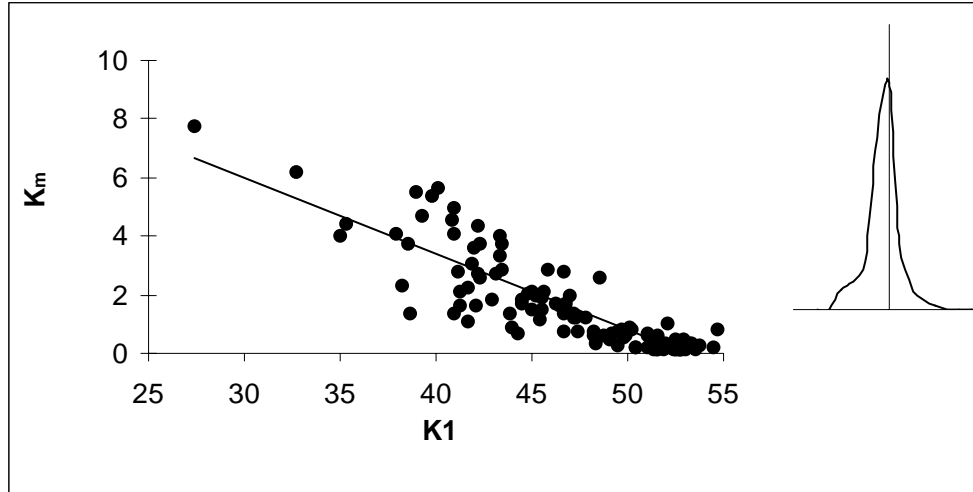


Рис. П.П.8.11 срх–pl (формула PAVL10). Зависимость содержаний K_m от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Si_{pl}:3 + Al_{pl} - 3Fe^{2+}_{pl} - 6Ti_{av} + 2Al_{av} + Mg_{av} - Ca_{av}:3$$

$$T = 6.47K_1 + 734.3(\text{PAVLT})$$

Диапазон значений T 1100–1430 °C

Относительная ошибка 3–2 %

R = 0.85; N = 138; N₁ = 138; сигма = 32.6 °C; $\chi^2 = 0.72$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

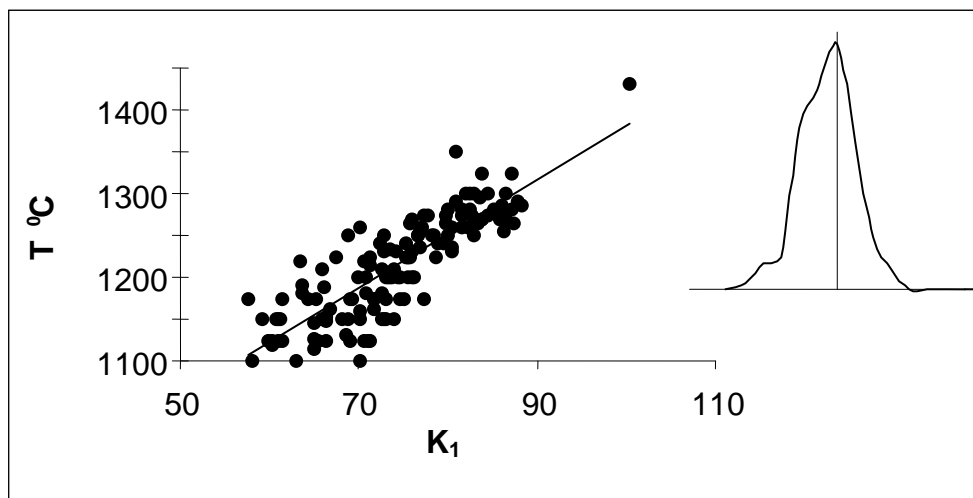


Рис. П.П.8.12 срх–pl (формула PAVLT). Зависимость значения T от состава авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 2Al_{av} - 4Ti_{av} + Mg_{av} - Ca_{av}:4 + Si_{pl}:8 + Al_{pl} - 3Fe^{2+}_{pl}3 + Al_m:2 + Ca_m + Na_m - K_m + P:3$$

$$T = 5.13K_1 + 738.03(PAVLTa)$$

Диапазон значений T 1100–1430 °C

Относительная ошибка 2–2 %

R = 0.91; N = 138; N₁ = 136; сигма = 25.2 °C; $\chi^2 = 1.02$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

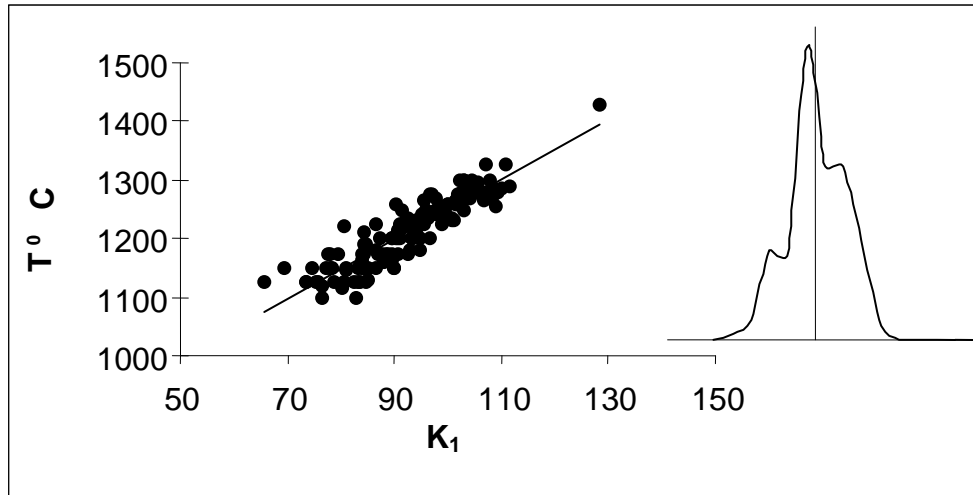


Рис. II.П.8.13 сrx–pl (формула PAVLTa). Зависимость значения T от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = Al_{av}:2 + Na_{av} - Fe^{2+}_{pl}$$

$$P = 1.31K_1 + 4.84(PAVLP)$$

Диапазон значений P 2–27 кб

Относительная ошибка 115–9 %

R = 0.78; N = 138; N₁ = 137; сигма = 2.3 кб; $\chi^2 = 3.23$ (12)

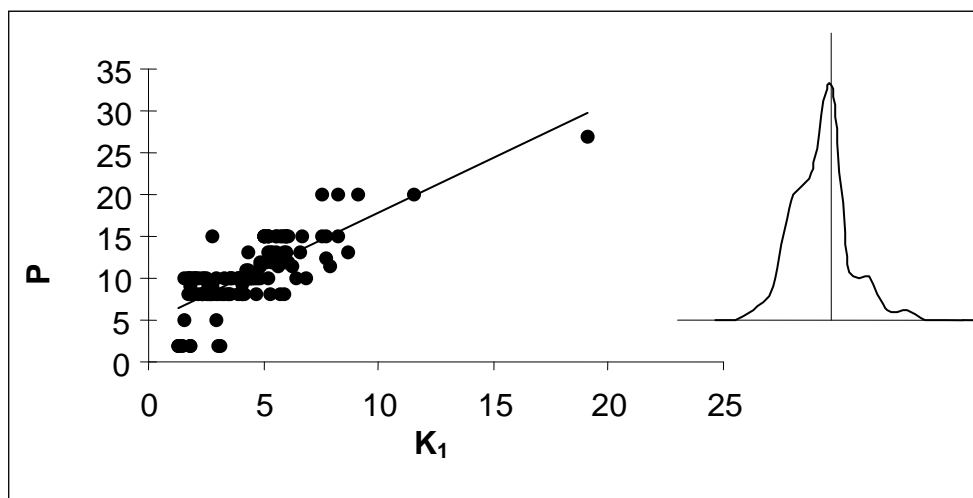


Рис. II.П.8.14 сrx–pl (формула PAVLP). Зависимость содержаний P от состава авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{av}:2 - Ti_{av} + 1.8Na_{av} - Fe^{2+}_{pl} + Si_m:4 + Mg_m:5 - Ca_m:2 - Na_m:4$$

$$P = 1.14K_1 - 3.42(\text{PAVLPa})$$

Диапазон значений P 2–27 кб

Относительная ошибка 90–7 %

$$R = 0.87; N = 138; N_1 = 137; \text{сигма} = 1.8 \text{ кб}; \chi^2 = 2.33 (12)$$

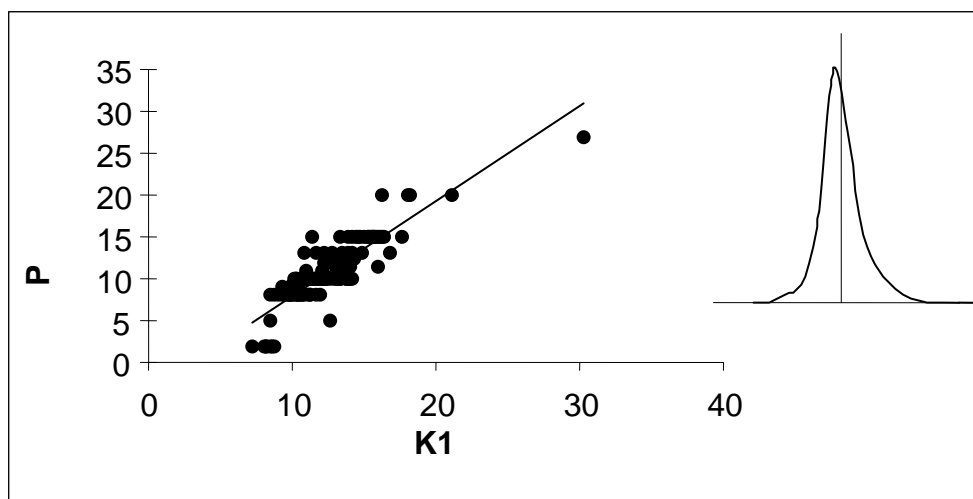


Рис. II.П.8.15 сrx–pl (формула PAVLPa). Зависимость величины P от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = [2Si_{av} + 2.5Al_{av} + 0.6Fe^{2+}_{av} - Mg_{av} + 1.8(Na_{av} + K_{av}) + 0.4Si_{pl} - 1.5(Na_{pl} + K_{pl}) + Al_m - 4Ca_m + T:11]:10$$

$$P = 2.23K_1 - 32.87(\text{PAVLP1})$$

Диапазон значений P 2–27 кб

Относительная ошибка 90–7 %

$$R = 0.88; N = 138; N_1 = 136; \text{сигма} = 1.8 \text{ кб}; \chi^2 = 1.46 (12)$$

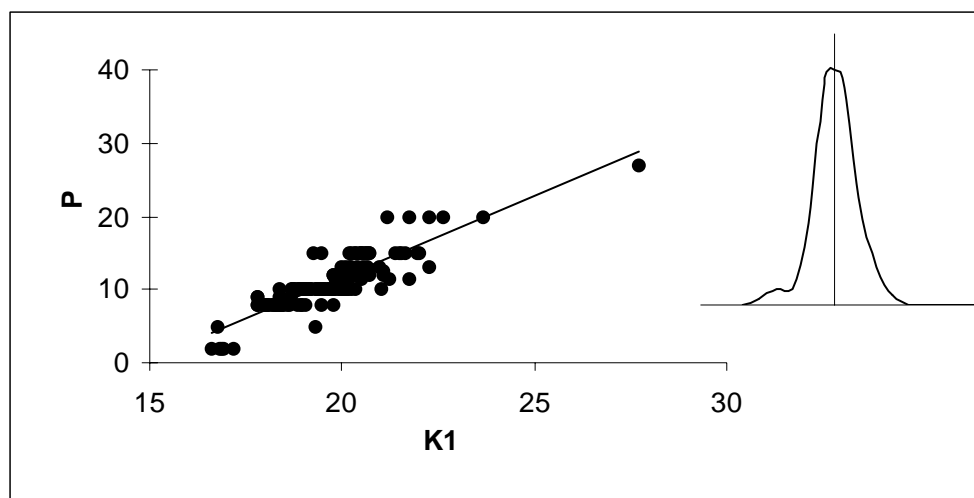


Рис. II.П.8.16 сrx–pl (формула PAVLP1). Зависимость величины P от состава авгита, плагиоклаза, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в системе авгит–плаггиоклаз

$$K_1 = Mg_{av} - Fe^{2+}_{av} - 2Ti_{av} + 2Fe^{2+}_{pl}; K_2 = Ca_{pl} - 2Na_{av} - 5K_{pl} + T:100$$

$$K_2 = 0.69K_1 + 9.47(\text{PAVLR})$$

Диапазон значений K_2 9.6–29.5; K_1 3.7–25.9

Относительная ошибка 24–8 %

$R = 0.83$; $N = 138$; $N_1 = 136$; сигма = 2.3; $\chi^2 = 0.84$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

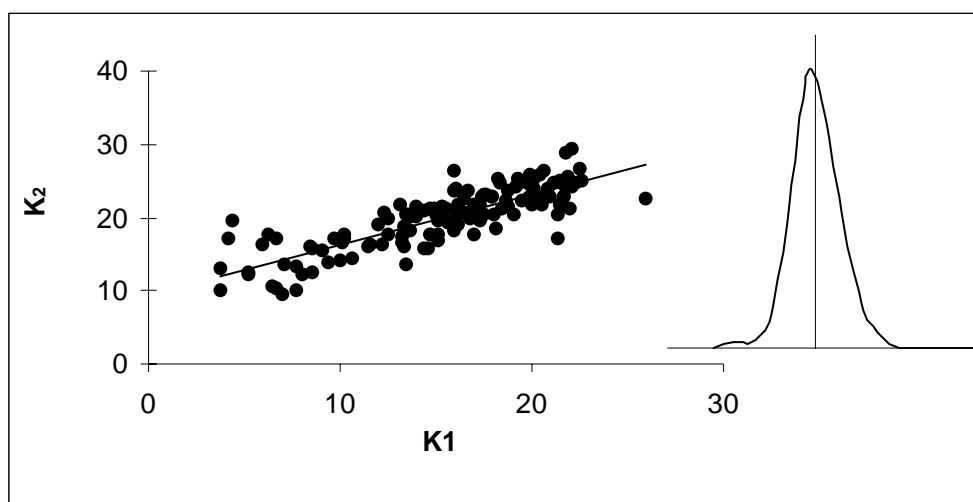


Рис. II.П.8.17 сrx–pl (формула PAVLR). Зависимость величины K_2 от состава авгита, плаггиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{av} - Fe^{2+}_{av} - 2Ti_{av} + 2Fe^{2+}_{pl} + Ca_m; K_2 = Ca_{pl} - 2Na_{av} - 5K_{pl} + T:100$$

$$K_2 = 0.58K_1 + 6.18(\text{PAVLRa})$$

Диапазон значений K_2 9.6–29.5; K_1 10.4–35.9

Относительная ошибка 21–7 %

$R = 0.88$; $N = 138$; $N_1 = 136$; сигма = 1.97; $\chi^2 = 1.52$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

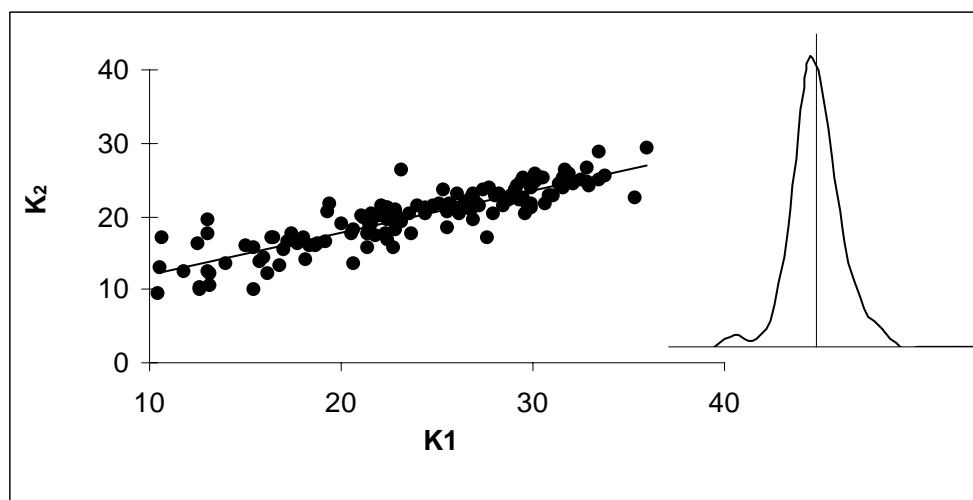


Рис. II.П.8.18 сrx–pl (формула PAVLRa). Зависимость величины K_2 от состава авгита, плаггиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{av} - Fe_{av}^{2+} - 2Ti_{av} + 2Fe_{pl}^{2+} - (Na + K)_m; K_2 = Ca_{pl} - 2Na_{av} - 5K_{pl} + T:100$$

$$K_2 = 0.56K_1 + 16.01(PAVLRb)$$

Диапазон значений K_2 9.6–29.5; K_1 7.3–20

Относительная ошибка 20–6 %

$R = 0.89$; $N = 138$; $N_1 = 137$; сигма = 1.9; $\chi^2 = 2.05$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

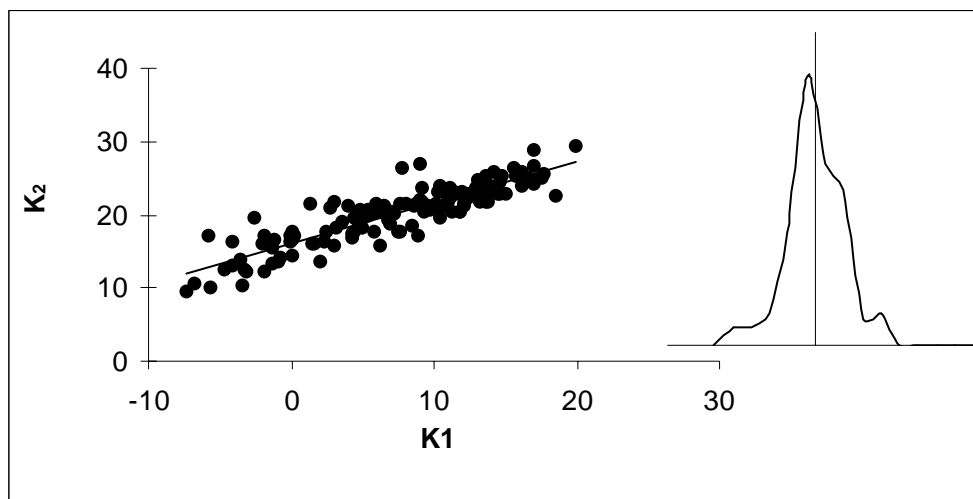


Рис. П.П.8.19 сrx-pl (формула PAVLRb). Зависимость величины K_2 от состава авгита, плагиоклаза и распределение среднеквадратичной ошибки.

Выборки расплав – три минерала в условиях «сухого» давления

Эти выборки (см. таблицу 1) представлены 10 вариантами сочетаний из 5 по 3 [5!:3!(5–3)!]. Эти выборки в большинстве своем представлены малочисленными массивами (меньше 100 т.). Исключение составляет выборка оливин–ортопироксен–авгит, результаты по обработке которой представлены ниже.

5.9. Система расплав–оливин–ортопироксен–авгит

Этот массив данных был сформирован с использованием экспериментальных результатов, выбранных из публикаций [35; 37; 39; 49; 85; 86; 87; 91; 156; 158; 159; 175; 181; 247; 258; 262; 272; 273; 279; 288; 291; 298; 299; 300; 309; 314; 322; 323; 324; 325; 327; 335; 339; 340].

Общее число четверных анализов – 255 т. После исключения анализов составов оливина, ортопироксена, авгита и стекол с суммами окислов менее 97 % и более 102 % – 240 т. После исключения анализов с нулевыми содержаниями железа в стекле – 214 т. Для расчета титана отброшены точки с его нулевыми содержаниями – 192 т. Для расчета марганца отброшены точки с его нулевыми содержаниями – 130 т. Для расчета содержания натрия были отброшены точки с нулевыми содержаниями – 192 т. Для расчета хрома отброшены точки с его нулевыми содержаниями – 105 т. Для расчета давления были исключены точки < 7 кб – 206 т.

Таблица II.П.9.1 ol–орх–срх. Диапазоны составов стекол (расплавов), оливинов, ортопироксенов и авгитов в весовых содержаниях окислов (%) элементов и атомных количествах (%) элементов.

PORA Стекла				Авгиты		Wo	11.7–45.97
SiO ₂	42.5–54.8	Si	40.29–49.95	SiO ₂	47.47–54.5	Si	43.21–48.63
TiO ₂	0–3.38	Ti	0–2.34	TiO ₂	0–1.4	Ti	0–0.95
Al ₂ O ₃	7.84–21	Al	8.77–21.84	Al ₂ O ₃	2.89–12.5	Al	3.09–13.19
FeO	3.31–21.6	Fe	2.54–17.15	FeO	1.84–13.4	Fe	1.37–10.14
MnO	0–0.39	Mn	0–0.31	MnO	0–0.41	Mn	0–0.31
MgO	3.85–19.99	Mg	5.32–26.58	MgO	13.4–28.49	Mg	18.27–37.21
CaO	5.06–15.4	Ca	4.96–15.04	CaO	5.48–20.8	Ca	5.31–20.41
Na ₂ O	0–7.49	Na	0–12.82	Na ₂ O	0–1.66	Na	0–2.86
K ₂ O	0–4.77	K	0–5.64	K ₂ O	0–0.06	K	0–0.07
Cr ₂ O ₃	0–1.06	Cr	0–0.76	Cr ₂ O ₃	0–2.11	Cr	0–1.49
T °C	1125–1600	P, кб	1.5–35	En	42.48–77.68	Fs	2.81–22.34

Продолжение таблицы II.П.9.1 ol–орх–срх.

Ортопироксены		Wo	1.64–8.33	Оливины			
SiO ₂	50.5–56.89	Si	44.63–49.26	SiO ₂	37.4–42	Si	31.7–35.62
TiO ₂	0–0.59	Ti	0–0.39	TiO ₂	0–0.2	Ti	0–0.12
Al ₂ O ₃	1.52–9.91	Al	1.59–9.89	Al ₂ O ₃	0–0.66	Al	0–0.64
FeO	2.37–15.71	Fe	1.69–12.08	FeO	4.49–26.19	Fe	2.99–19.57
MnO	0–0.4	Mn	0–0.3	MnO	0–0.44	Mn	0–0.33
MgO	24.8–34.4	Mg	33.01–43.81	MgO	34.38–53.3	Mg	46.29–63.23
CaO	0.85–4.17	Ca	0.78–3.99	CaO	0–0.75	Ca	0–0.67
Na ₂ O	0–0.54	Na	0–0.92	Na ₂ O	0–0.07	Na	0–0.11
K ₂ O	0–0.03	K	0–0.03	K ₂ O	0–0.01	K	0–0.01
Cr ₂ O ₃	0–1.88	Cr	0–1.28	Cr ₂ O ₃	0–0.55	Cr	0–0.35
En	71.42–90.71	Fs	3.51–25.09			Fo	70.32–95.48

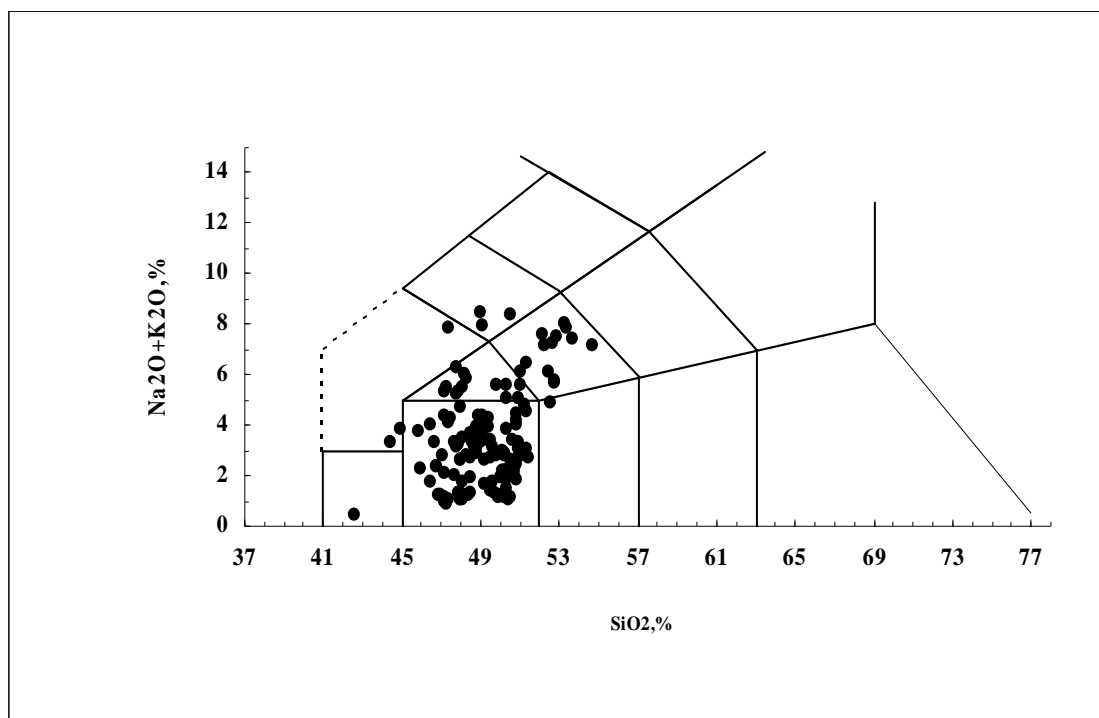


Рис. П.П.9.1 ol–орх–срх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливина, ортопироксена и клинопироксена, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = 2Ti_{av} + Ca_{av} + Na_{av} - Al_{op} + Fe^{2+}_{ol} \cdot 5 - P \cdot 4$$

$$Si_m = 0.32K_1 + 42.31(PORA1)$$

Диапазон значений Si 40.3–49.9 (атом. %)

Относительная ошибка 3–2 %

R = 0.79; N = 214; N₁ = 213; сигма = 1.1; $\chi^2 = 0.94$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

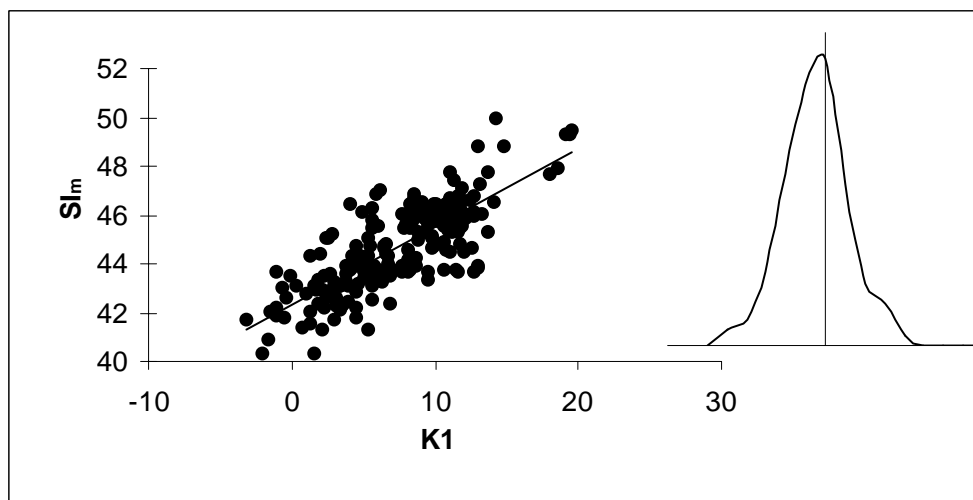


Рис. П.П.9.2 ol–орх–срх (**формула PORA1**). Зависимость содержаний Si_m от состава оливина, ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{av}:4 - 3Ti_{av} - Ca_{av}:1.8 - Fe^{2+}_{ol}:5 + Al_{op}:2 - Mg_{op}:7 + T:80$$

$$Si_m = -0.49K_1 + 47.1(PORA1a)$$

Диапазон значений Si 40.3–49.9 (атом. %)

Относительная ошибка 3–2 %

R = -0.81; N = 214; N₁ = 212; сигма = 1; $\chi^2 = 3.98$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

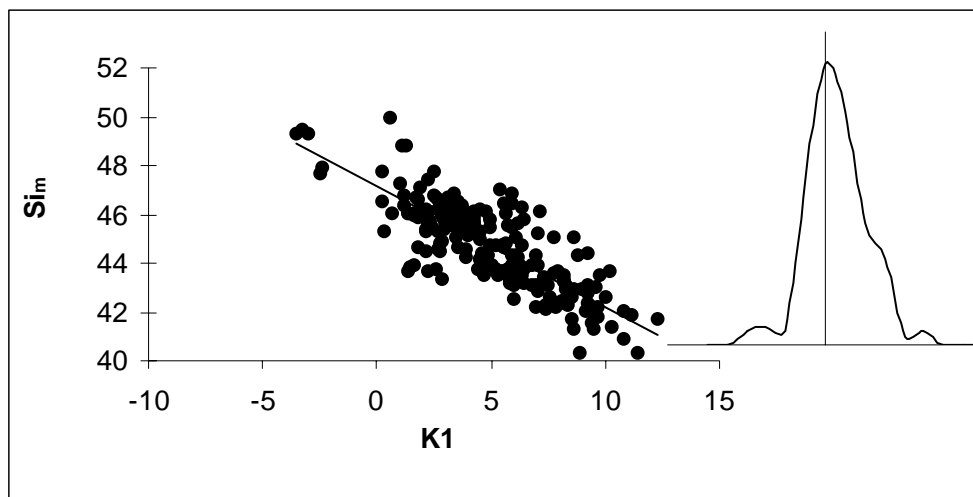


Рис. П.П.9.3 ol–орх–срх (формула PORA1a). Зависимость содержаний Si_m от состава оливина, ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{av}:2 - 4Ti_{av} - Ca_{av}:2 - Fe^{2+}_{ol}:5 + Al_{op} - Mg_{op}:5 + Ti_m + Mg_m:4 + T:80$$

$$Si_m = -0.39K_1 + 46.5(PORA1b)$$

Диапазон значений Si 40.3–49.9 (атом. %)

Относительная ошибка 3–2 %

R = -0.86; N = 214; N₁ = 212; сигма = 0.9; $\chi^2 = 4.3$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

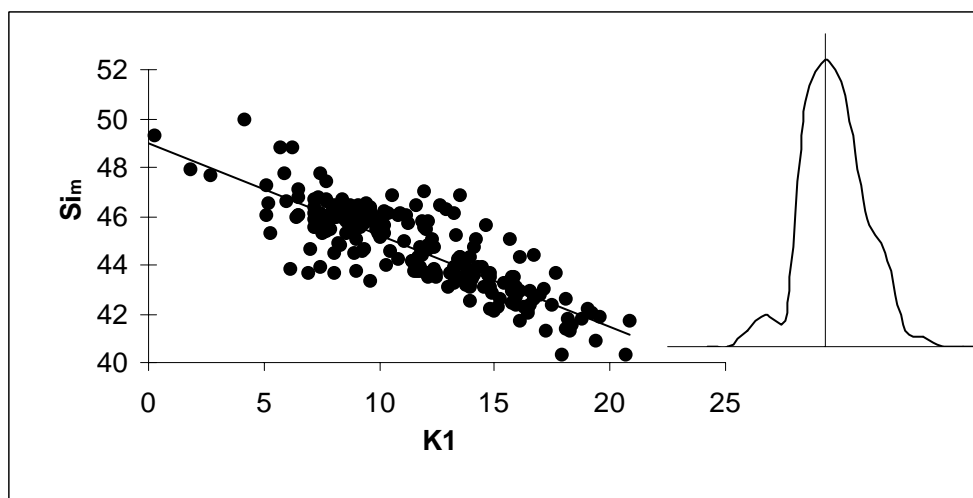


Рис. П.П.9.4 ol–орх–срх (формула PORA1b). Зависимость содержаний Si_m от состава оливина, ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = [12(Ti_{av} + Ti_{op}) + Fe^{2+}_{ol}:5 - Al_{op}:3 - Ca_{av}:3 + Na_{av}]:10$$

$$Ti_m = 0.85K_1 + 0.62(PORA2)$$

Диапазон значений Ti 0.1–2.3 (атом. %)

Относительная ошибка 170–7 %

$$R = 0.86; N = 192; N_1 = 188; \text{сигма} = 0.17; \chi^2 = 3.99 \text{ (12)}$$

Диапазон давлений 1.5–35 кб

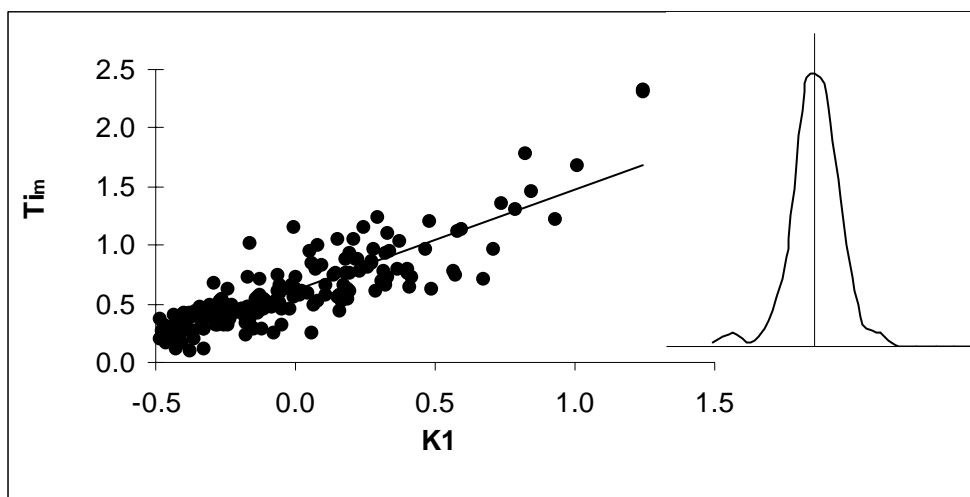


Рис. II.9.5 ol–орх–срх (формула PORA2). Зависимость содержаний Ti_m от состава оливина, ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Mg_{av}:5 - Al_{av} - Ca_{av}:3 + Na_{av} - Al_{op}:2 + Ca_{op}:2 + 6Ca_{ol} + P:2$$

$$Al_m = -0.43K_1 + 18.32(PORA3)$$

Диапазон значений Al 8.8–21.8 (атом. %)

Относительная ошибка 13–5 %

$$R = -0.82; N = 214; N_1 = 214; \text{сигма} = 1.16; \chi^2 = 1.96 \text{ (12)}$$

Диапазон давлений 1.5–35 кб

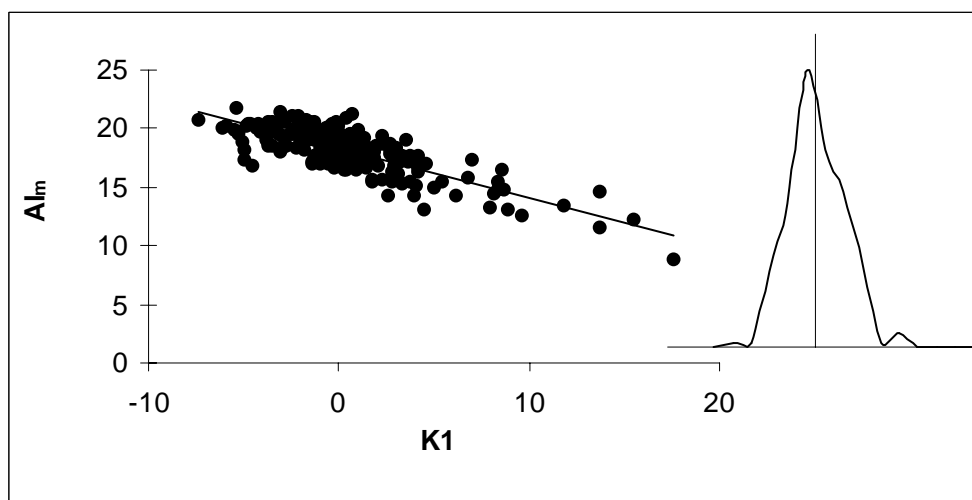


Рис. II.9.6 ol–орх–срх (формула PORA3). Зависимость содержаний Al_m от состава оливина, ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 3Ti_{av} - Al_{av} + Mg_{av}:6 - Ca_{av}:3 + Na_{av} - Al_{op}:2 + Ca_{op}:2 + 6Ca_{ol} + Mg_m:3 + P:4$$

$$Al_m = -0.46K_1 + 19.02(PORA3a)$$

Диапазон значений Al 8.8–21.8 (атом. %)

Относительная ошибка 11–5 %

$$R = -0.87; N = 214; N_1 = 212; \text{сигма} = 1; \chi^2 = 0.27 (12)$$

Диапазон давлений 1.5–35 кб

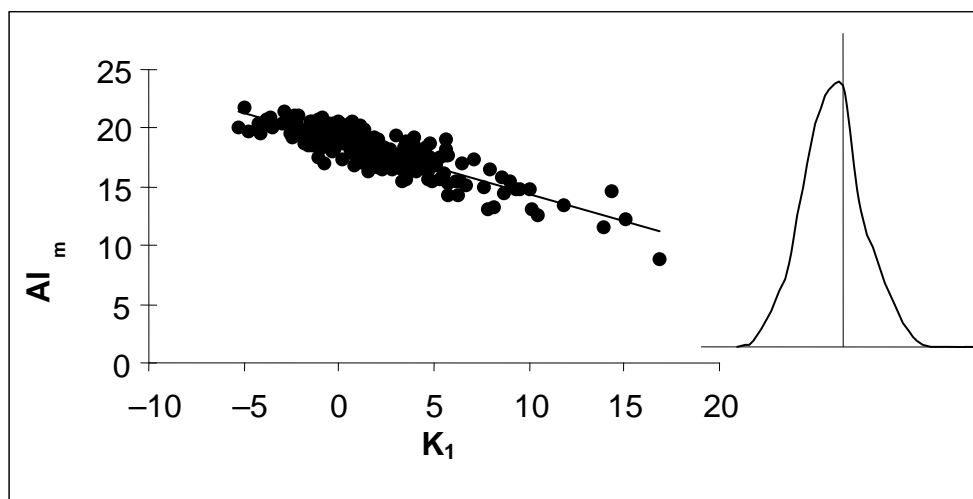


Рис. П.П.9.7 ol–орх–срх (формула PORA3a). Зависимость содержаний Al_m от состава оливина, ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа в расплаве

$$K_1 = Fe^{2+}_{av} + Fe_{op}:5 + Fe^{2+}_{ol}:8 - 3Ti_{av} + Ca_{op}$$

$$Fe^{2+}_m = 0.84K_1 - 0.14(PORA5)$$

Диапазон значений Fe²⁺ 2.5–14.5 (атом. %)

Относительная ошибка 28.5–5 %

$$R = 0.91; N = 214; N_1 = 210; \text{сигма} = 0.7; \chi^2 = 0.54 (12)$$

Диапазон давлений 1.5–35 кб

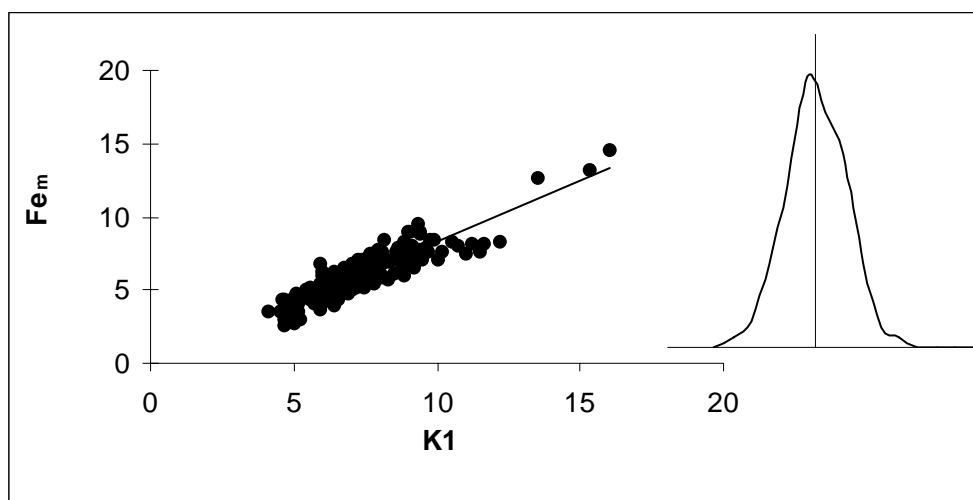


Рис. П.П.9.8 ol–орх–срх (формула PORA5). Зависимость содержаний Fe²⁺_m от состава оливина, ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe_{av}^{2+} + Fe_{op:5}^{2+} + Fe_{ol:8}^{2+} - 2Ti_{av} + Ca_{op} + P:8$$

$$Fe_m^{2+} = 0.78K_1 - 1.04(PORA5a)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 2.5–14.5 (атом. %)

Относительная ошибка 26.5–5 %

$R = 0.92$; $N = 214$; $N_1 = 210$; $\sigma = 0.66$; $\chi^2 = 2.94$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

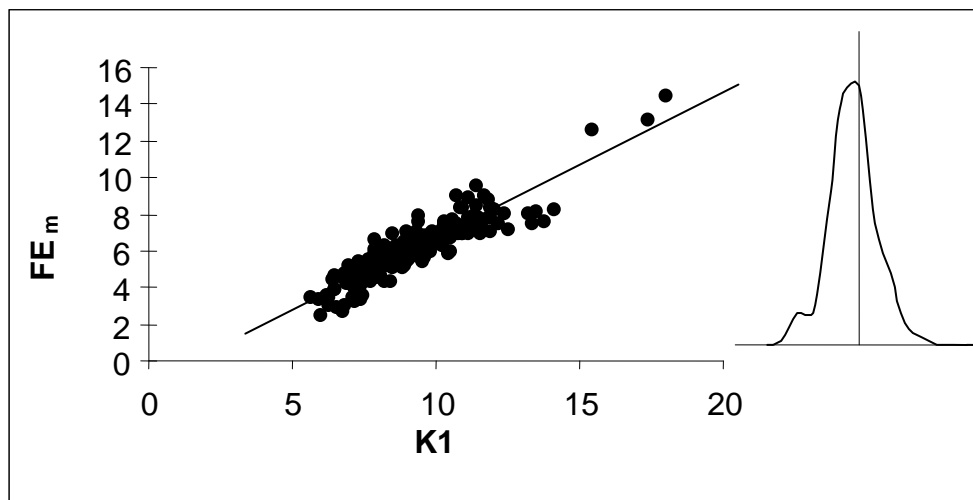


Рис. П.П.9.9 ol–орх–срх (формула PORA5a). Зависимость содержаний Fe_m^{2+} от состава оливина, ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний марганца в расплаве

$$K_1 = [11(Mn_{op} + Mn_{av}) + Mg_{av}:11 + Fe_m^{2+}:8 - Al_m:11 + P:18]:20$$

$$Mn_m = 0.48K_1(PORA6)$$

Диапазон значений Mn 0.03–0.3 (атом. %)

Относительная ошибка 83–8 %

$R = 0.81$; $N = 130$; $N_1 = 127$; $\sigma = 0.025$; $\chi^2 = 2.3$ (12)

Диапазон давлений 9–30 кб

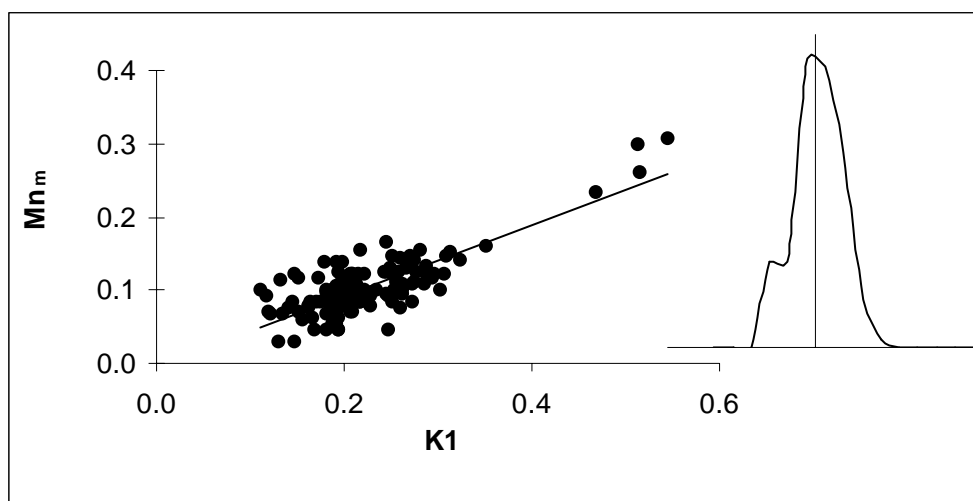


Рис. П.П.9.10 ol–орх–срх (формула PORA6). Зависимость содержаний Mn_m от состава оливина, ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Mg_{av} - 4Ti_{av} - Fe^{2+}_{op} \cdot 5 + Ca_{op} + Mg_{ol} \cdot 2 - 3Ca_{ol} + P \cdot 4$$

$$Mg_m = 0.68K_1 - 25.38(PORA7)$$

Диапазон значений Mg 5.3–26.6 (атом. %)

Относительная ошибка 35–7 %

$R = 0.88$; $N = 214$; $N_1 = 211$; $\sigma = 1.83$; $\chi^2 = 1.84$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

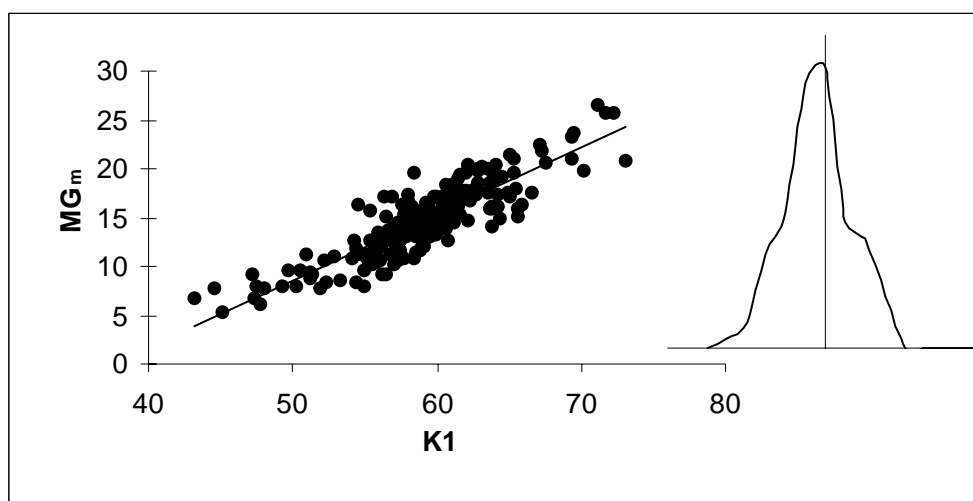


Рис. П.П.9.11 ol–орх–срх (формула PORA7). Зависимость содержаний Mg_m от состава оливина, ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{av} - 3Ti_{av} - Fe^{2+}_{op} \cdot 5 + Ca_{op} + Mg_{ol} \cdot 2 - 3Ca_{ol} - Si_m \cdot 2 - Al_m - (Na + K)_m + P \cdot 3$$

$$Mg_m = 0.39K_1 + 8.78(PORA7a)$$

Диапазон значений Mg 5.3–26.6 (атом. %)

Относительная ошибка 23–5 %

$R = 0.94$; $N = 214$; $N_1 = 213$; $\sigma = 1.24$; $\chi^2 = 0.52$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

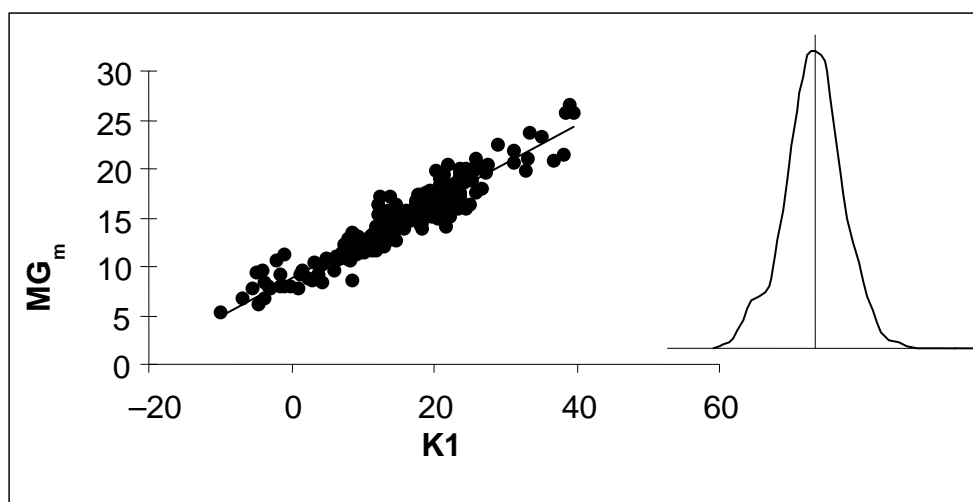


Рис. П.П.9.12 ol–орх–срх (формула PORA7a). Зависимость содержаний Mg_m от состава оливина, ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Mg_{op} + Mg_{av} + Mg_{ol} + 2Ca_{op} - 4Ti_{av} - Al_{av} + Ca_{av} \cdot 3 - 6Na_{av}$$

$$Ca_m = 0.17K_1 - 10.09(PORA8)$$

Диапазон значений Ca 5–15 (атом. %)

Относительная ошибка 20–7 %

R = 0.87; N = 214; N₁ = 212; сигма = 1; $\chi^2 = 1.1$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

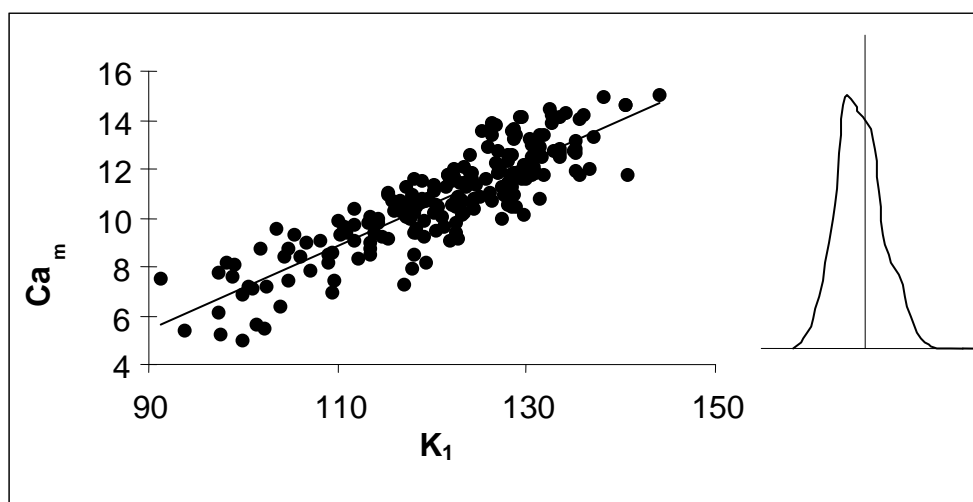


Рис. П.П.9.13 ol–орх–срх (формула PORA8). Зависимость содержаний Ca_m от состава оливина, ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{op} + Mg_{av} + Mg_{ol} + 2Ca_{op} - 4Ti_{av} - Al_{av} + Ca_{av} \cdot 3 - 6Na_{av} - 2(Ti_m + Na_m + K_m)$$

$$Ca_m = 0.12K_1 - 2.19(PORA8a)$$

Диапазон значений Ca 5–15 (атом. %)

Относительная ошибка 13–4 %

R = 0.95; N = 214; N₁ = 211; сигма = 0.67; $\chi^2 = 1.84$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

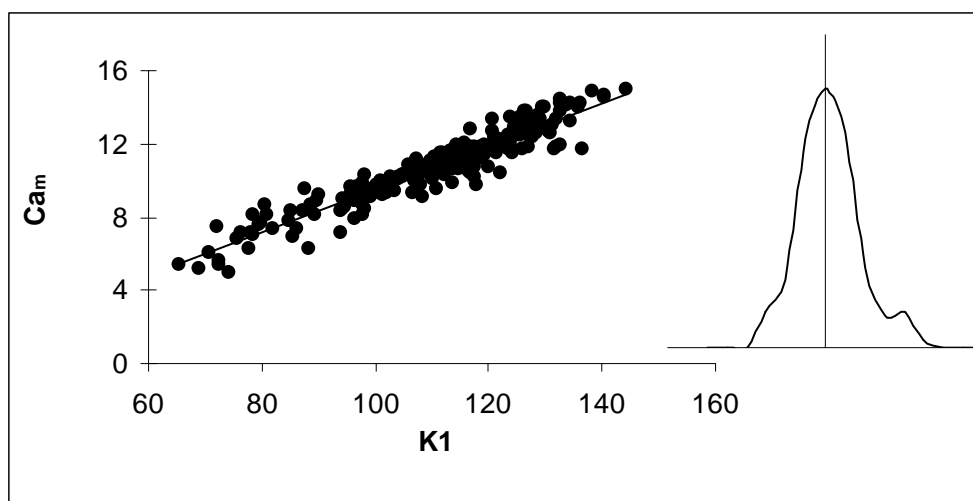


Рис. П.П.9.14 ol–орх–срх (формула PORA8a). Зависимость содержаний Ca_m от состава оливина, ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний натрия в расплаве

$$K_1 = 10(Na_{av} + Ti_{op} + Ti_{av}) - Mg_{ol}:3$$

$$Na_m = 0.3K_1 + 7.12(PORA9)$$

Диапазон значений Na 0.7–12.8 (атом. %)

Относительная ошибка 170–9 %

$R = 0.88$; $N = 192$; $N_1 = 189$; $\sigma = 1.2$; $\chi^2 = 2.4$ (12)

Диапазон давлений 1.5–30 кб

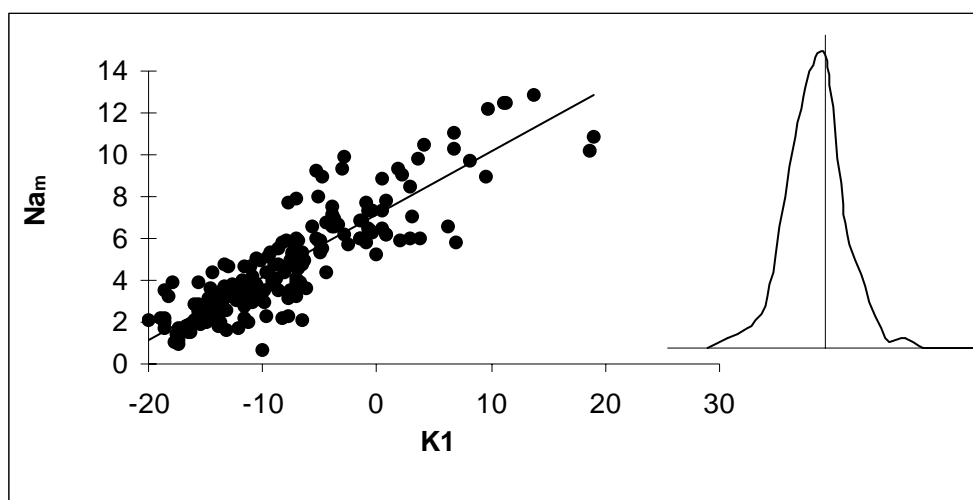


Рис. П.П.9.15 ol–орх–срх (формула PORA9). Зависимость содержаний Na_m от состава оливина, ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_{ol}:5 - 10(Na_{av} + Ti_{op} + Ti_{av}) - Al_m + Mg_m + Ca_m$$

$$Na_m = -0.19K_1 + 6.17(PORA9a)$$

Диапазон значений Na 0.7–12.8 (атом. %)

Относительная ошибка 120–7 %

$R = -0.94$; $N = 192$; $N_1 = 189$; $\sigma = 0.85$; $\chi^2 = 1.32$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

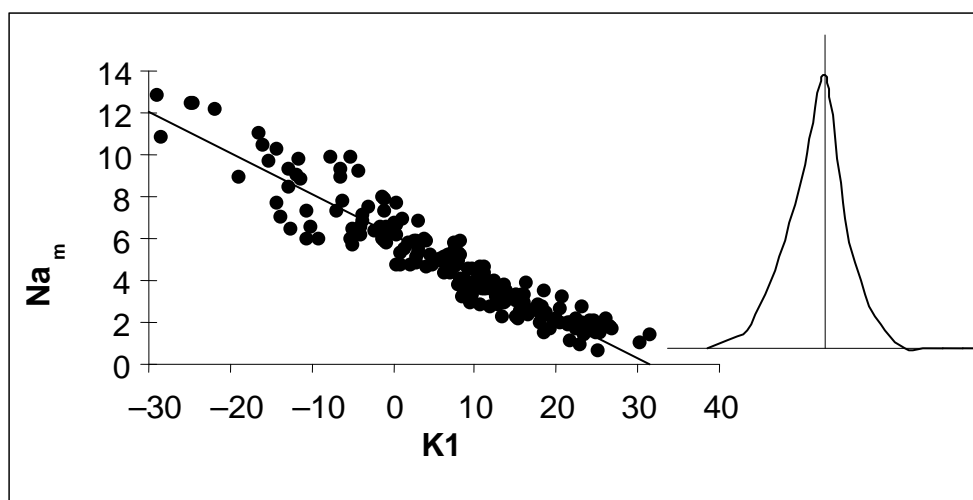


Рис. П.П.9.16 ol–орх–срх (формула PORA9a). Зависимость содержаний Na_m от состава оливина, ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний хрома в расплаве

$$K_1 = [11(Cr_{ol} + Cr_{op} + Cr_{av}) + Mg_{av} - Al_m + Mg_m]:100$$

$$Cr_m = 0.77K_1 - 0.16(PORA11)$$

Диапазон значений Cr 0.06–0.53 (атом. %)

Относительная ошибка 170–9 %

R = 0.79; N = 105; N₁ = 104; сигма = 0.06; $\chi^2 = 1.33$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

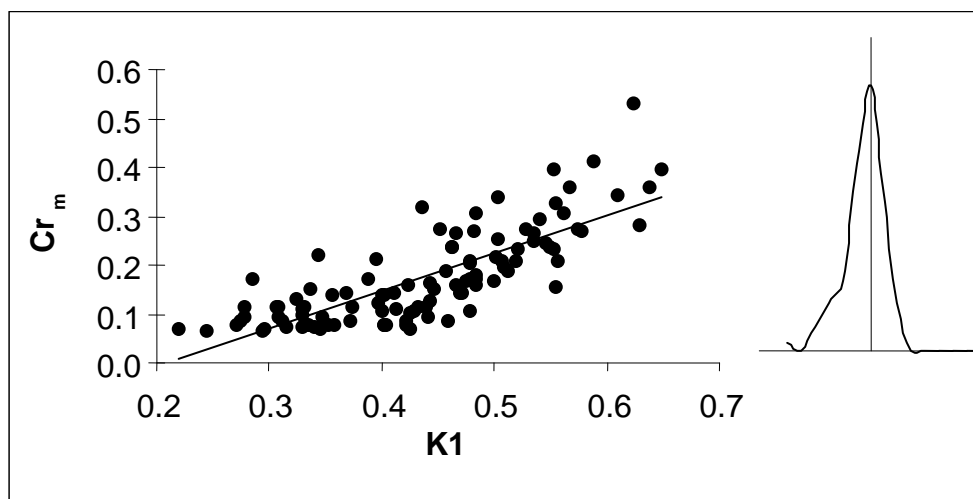


Рис. П.П.9.17 ol–орх–срх (формула PORA11). Зависимость содержаний Cr_m от состава оливина, ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет величины железо-магниевого отношения в расплаве

$$K_1 = (Fe^{2+}/Mg)_{ol} + (Fe^{2+}/Mg)_{op} + (Fe^{2+}/Mg)_{av} + Ca_{ol}:4$$

$$(Fe^{2+}/Mg)_m = 1.14K_1 - 0.1(PORA15)$$

Диапазон значений Fe²⁺/Mg 0.14–1.23 (атом. %)

Относительная ошибка 43–5 %

R = 0.96; N = 214; N₁ = 208; сигма = 0.06; $\chi^2 = 4.49$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

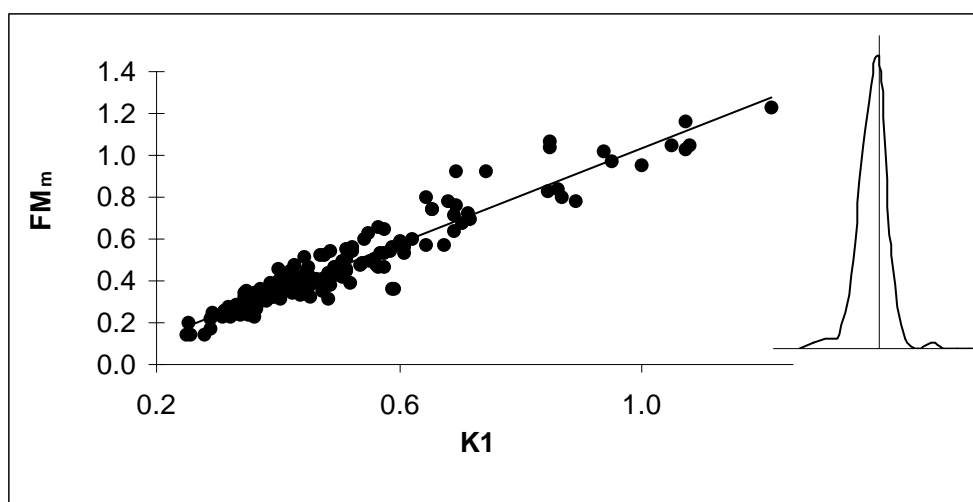


Рис. П.П.9.18 ol–орх–срх (формула PORA15). Зависимость величины (Fe²⁺/Mg)_m от состава оливина, ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет величины температуры

$$K_1 = Mg_{av} - Ca_{av}:5 - Fe^{2+}_{op}:2 - Fe^{2+}_{ol}:7 - 8Ca_{ol} + P$$

$$T = 9.26K_1 + 1031.03(PORAT)$$

Диапазон значений T 1125–1600 °C

Относительная ошибка 3–2 %

R = 0.88; N = 214; N₁ = 210; сигма = 35.3 °C; $\chi^2 = 2.02$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

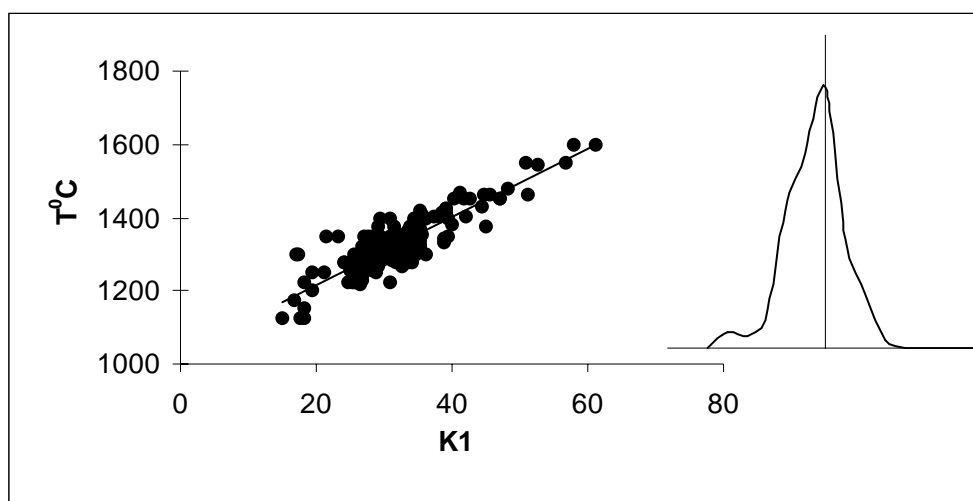


Рис. П.П.9.19 ol–орх–срх (формула **PORAT**). Зависимость значения **T** от состава оливина, ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol}:5 + 8Ca_{ol} + Fe^{2+}_{op}:3 + Ca_{av}:3 - Mg_{av}:3 + 2Si_m + Al_m$$

$$T = -10.42K_1 + 2454(PORATa)$$

Диапазон значений T 1125–1600 °C

Относительная ошибка 3–2 %

R = -0.86; N = 214; N₁ = 212; сигма = 37.3; $\chi^2 = 1.48$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

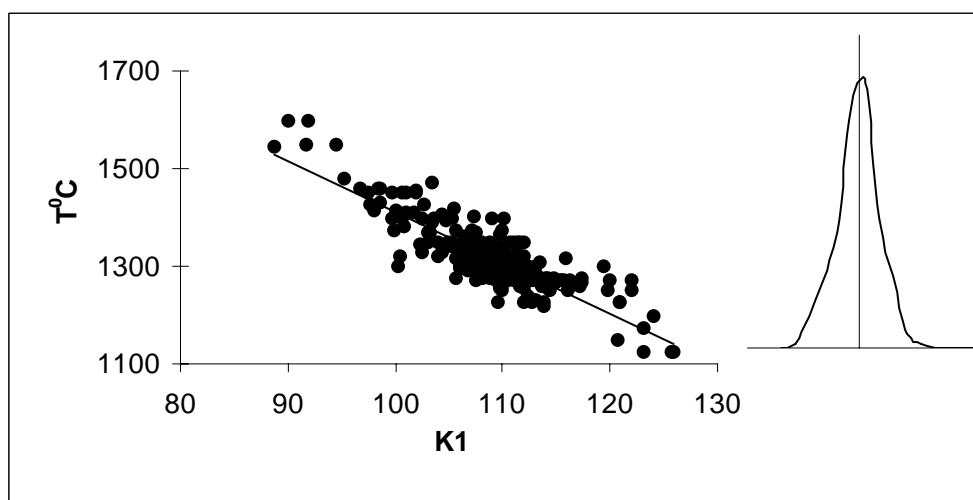


Рис. П.П.9.20 ol–орх–срх (формула **PORATa**). Зависимость значения **T** от состава оливина, ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{av} + Mg_{av} - Ca_{av} + 4Na_{av} + Al_{op} - Fe^{2+}_{op}:3 - Fe^{2+}_{ol}:8 - 8Ca_{ol} + 2Mg_m$$

$$T = 5.4K_1 + 1028.69(PORATb)$$

Диапазон значений T 1125–1600 °C

Относительная ошибка 3–2 %

R = 0.88; N = 214; N₁ = 213; сигма = 34.3; $\chi^2 = 1$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

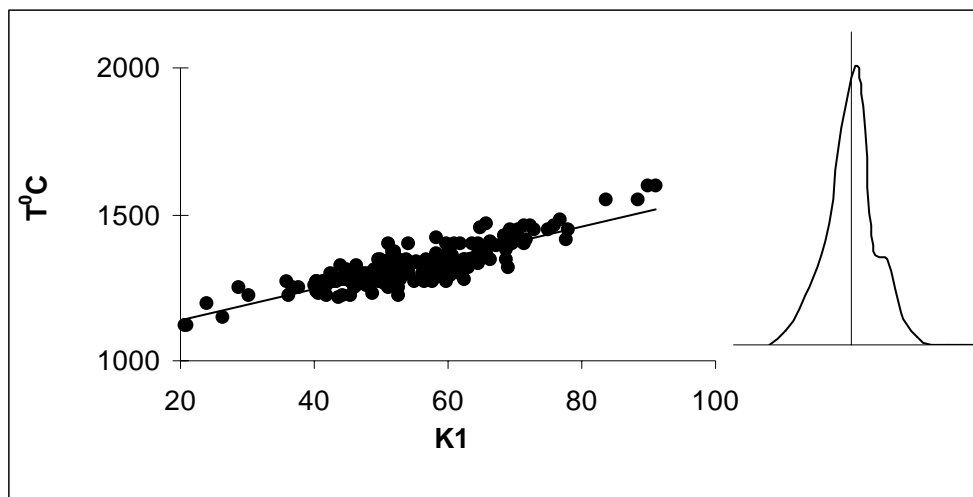


Рис. П.П.9.21 ol–орх–срх (формула PORATb). Зависимость значения T от состава оливина, ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_{av} + Mg_{av}:2 - Ca_{av} - Al_{op}:2 + Mg_{op} + Mg_{ol}:3 - 11Ca_{ol} + P$$

$$T = 7.98K_1 + 743.18(PORATc)$$

Диапазон значений T 1125–1600 °C

Относительная ошибка 3–2 %

R = 0.85; N = 214; N₁ = 212; сигма = 38.4; $\chi^2 = 2.19$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

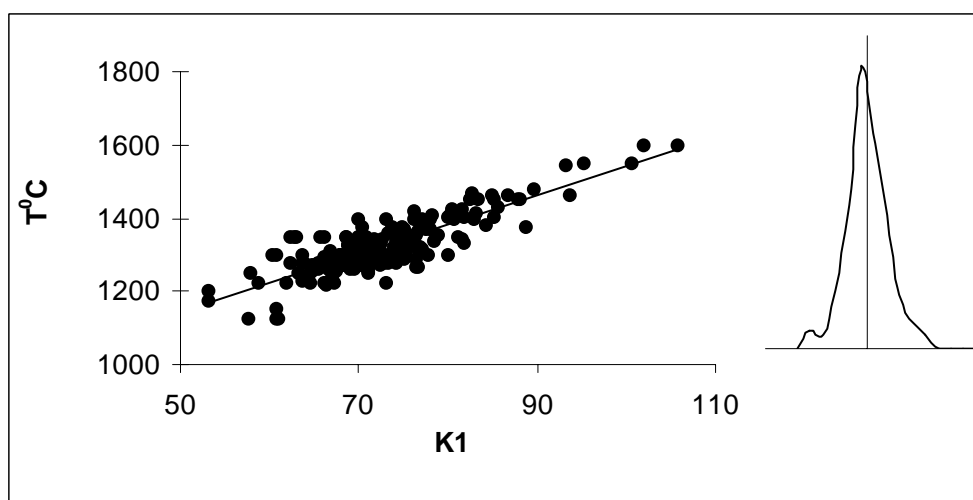


Рис. П.П.9.22 ol–орх–срх (формула PORATc). Зависимость значения T от состава оливина, ортопироксена, авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет величины давления

$$K_1 = Mg_{av}:3 - Si_{av}:4 - Fe^{2+}_{av}:5 + Ca_{av} - 5Na_{av} + Mg_{op}:4 - 2Ca_{ol} + Si_m - Mg_m$$

$$P = -0.56K_1 + 38.83(\text{PORAP})$$

Диапазон значений P 7–30 кб

Относительная ошибка 33–8 %

$$R = -0.84; N = 206; N_1 = 204; \text{сигма} = 2.3; \chi^2 = 4.06 (12)$$

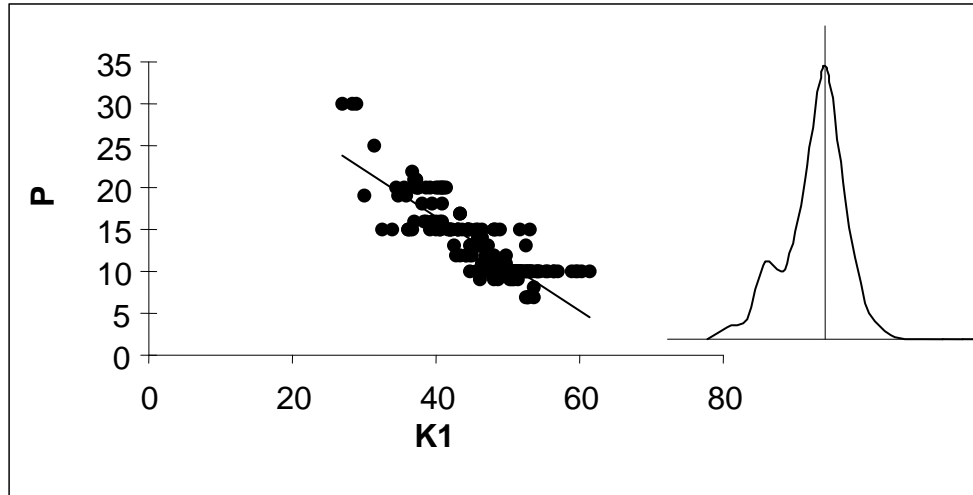


Рис. II.П.9.23 ol–орх–срх (формула **PORAP**). Зависимость величины **P** от состава оливина, ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в системе
расплав–оливин–ортопироксен–клинопироксен

$$K_1 = Fe^{2+}_{ol} + Fe^{2+}_{op} + Ca_{op} - Ca_{av}:2; K_2 = Fe^{2+}_{av} - Cr_{av}:2$$

$$K_2 = 0.3K_1 + 1.15(\text{PORAR})$$

Диапазон значений K_2 1.4–9.4; K_1 0.1–25.9

Относительная ошибка 23–4 %

$$R = 0.98; N = 214; N_1 = 209; \text{сигма} = 0.31; \chi^2 = 1.65 (12)$$

Диапазон давлений 1.5–35 кб

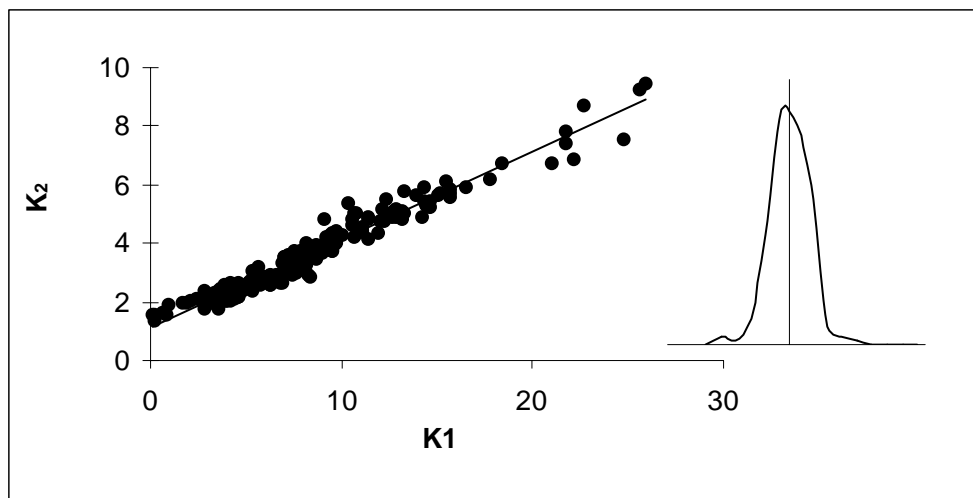


Рис. II.П.9.24 ol–орх–срх (формула **PORAR**). Зависимость величины K_2 от состава авгита и распределение среднеквадратичной ошибки.

Глава 6. Уравнения, полученные с учетом температуры и давления по составам расплавов

Эти выборки ограничены составами квазиравновесных расплавов (стекол) в системах расплав–кристаллическая фаза, где кристаллическая фаза может быть представлена различными наборами минералов и их различными количественными соотношениями. Собственно минеральные фазы представлены следующими группами: шпинели; оливина; ортопироксена; плагиоклаза; клинопироксена, представленного двумя минеральными видами: авгитом и пижонитом. Расчеты для пижонита по вышеприведенной схеме не проводились, но составы стекол для этой выборки были использованы. Поэтому нельзя с полной уверенностью утверждать, что приводимые ниже соотношения элементов, свидетельствующих о стехиометрии природных магматических расплавов, являются универсальными. Эти данные в дальнейшем будут дополнены экспериментальными результатами для амфиболов, магнетита, граната и т.д.

6.1. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с кристаллической фазой

Эта выборка была сформирована путем объединения выборок из части I с исключением повторов экспериментальных точек в случаях равновесия расплава с несколькими минеральными фазами и представлена 1526 точками. После выбраковки результатов с суммами < 98 % и > 102 % – 1434 т. Для расчета магния удалены точки с содержаниями его < 2 % – 1395 т. Для расчета температуры были отброшены точки со значениями < 1100 °С – 1399 т., < 1075 °С и нулевыми содержаниями железа – 1348 т. Для расчета давления были отброшены точки < 5 кб – 1294 т. Для расчета равновесных распределений элементов были отброшены точки с содержаниями магния < 1 % – 1403 т.

Таблица II.Ш.1.1gl. Составы стекол равновесных с кристаллической фазой в условиях давления.

SORAP		Стекла	
SiO ₂	31.5–76.1	Si	32.04–74.2
TiO ₂	0–21.8	Ti	0–15.49
Al ₂ O ₃	2.2–24.0	Al	2.45–25.76
FeO	0–28.9	Fe	0–23.56
MnO	0–0.58	Mn	0–0.46
MgO	0.01–40.6	Mg	0.01–50.05
CaO	0.73–19.1	Ca	0.74–18.72
Na ₂ O	0–7.7	Na	0–13.7
K ₂ O	0–10.1	K	0–11.86
Cr ₂ O ₃	0–1.5	Cr	0–1.08
T °C	850–2230	P, кб	0.1–175

Примечание. Диапазон для давлений кристаллизации P 0.1–175 кб, температур кристаллизации T 850–2230 °С.

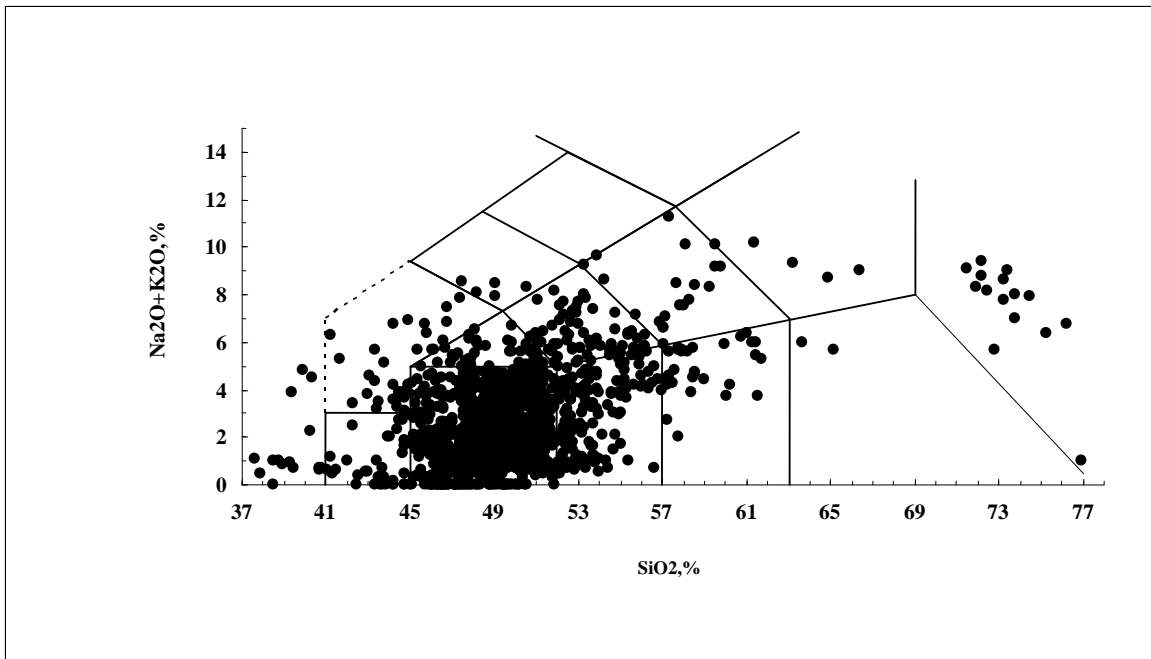


Рис. П.Ш.1.1gl. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами шпинели, оливина, ортопироксена, клинопироксена и плагиоклаза, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Ti_m + Fe^{2+}_m + Mg_m + (Na_m + K_m):2.5$$

$$Al_m = -0.43K_1 + 27.1 \text{ (SORAPA)}$$

Диапазон значений Al 2.4–25.8 (атом.%)

Относительная ошибка 78–7 %

$$R = -0.89; N = 1434; N_1 = 1405; \text{сигма} = 1.87; \chi^2 = 5.12 \text{ (24)}$$

Диапазон давлений 0.1–175 кб

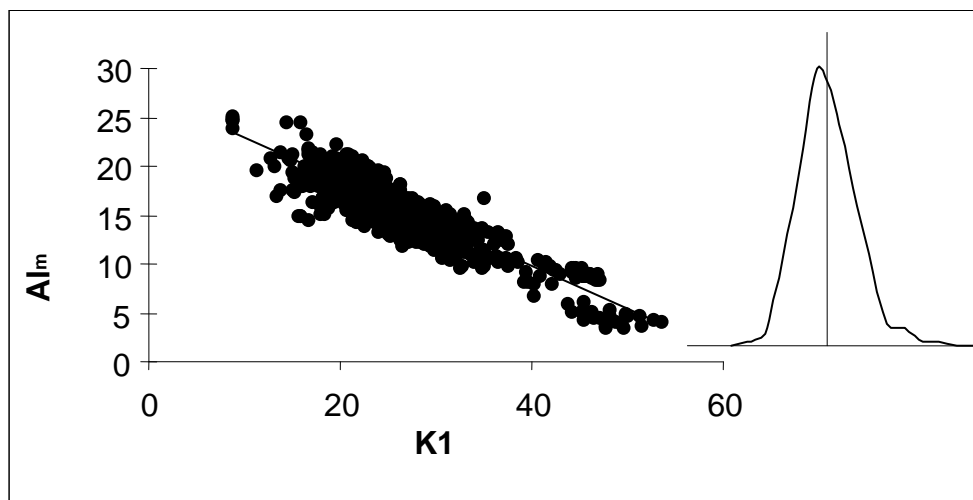


Рис. П.Ш.1.2 gl–sp–ol–орх–срх–pl (формула **SORAPA**). Зависимость содержаний Al_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = [T - 14Si_m - 16Ti_m - 25Al_m - 15Fe_m^{2+} - 21(Na_m + K_m)]:100$$

$$Mg_m = 2.45K_1 + 13.32 \text{ (SORAPM)}$$

Диапазон значений Mg 2.1–50 (атом.%)

Относительная ошибка 86–4 %

$$R = 0.97; N = 1395; N_1 = 1372; \text{сигма} = 1.8; \chi^2 = 11.44 \text{ (24)}$$

Диапазон давлений 0.1–175 кб

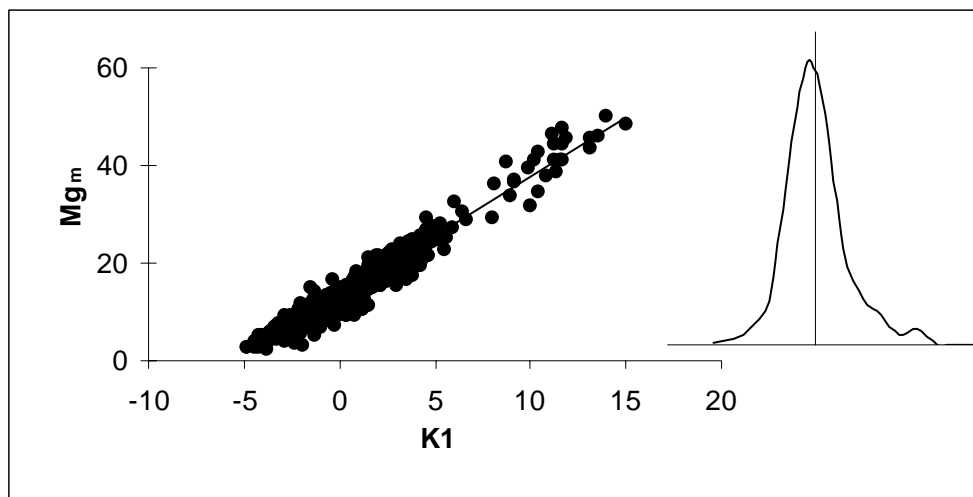


Рис. II.III.1.3 gl–sp–ol–орх–срх–pl (формула SORAPM). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_m:2 + 1.5Ti_m + Al_m + (Na_m + K_m) - T:200 - P:19$$

$$Mg_m = -0.88K_1 + 48.31 \text{ (SORAPM1)}$$

Диапазон значений Mg 2.1–50 (атом.%)

Относительная ошибка 114–5 %

$$R = -0.95; N = 1395; N_1 = 1368; \text{сигма} = 2.4; \chi^2 = 8.05 \text{ (24)}$$

Диапазон давлений 0.1–175 кб

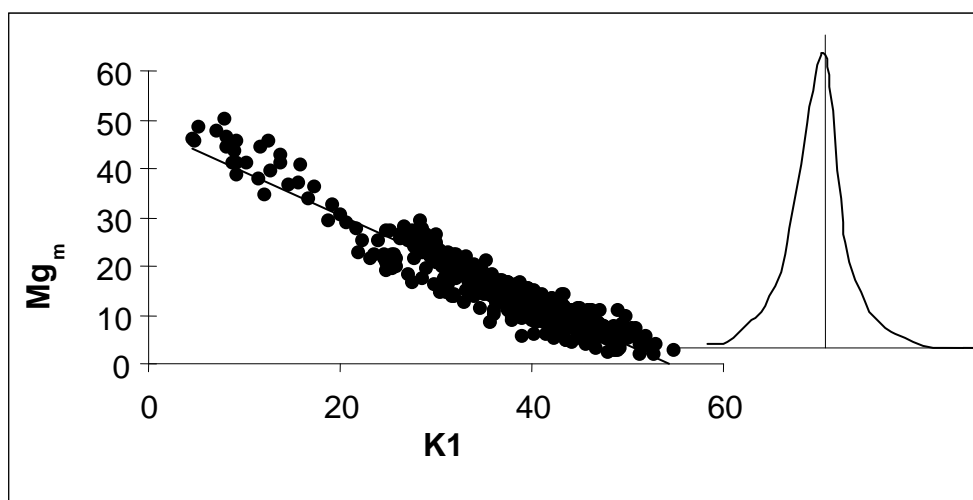


Рис. II.III.1.4 gl–sp–ol–орх–срх–pl (формула SORAPM1). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Mg_m - Si_m:11 - (Na_m + K_m):3 + P:2$$

$$T = 10.59K_1 + 1160.57(\text{SORAPT})$$

Диапазон значений T 1100–2230 °C

Относительная ошибка 4–2 %

$R = 0.94$; $N = 1399$; $N_1 = 1379$; сигма = 48.5 °C; $\chi^2 = 4.64$ (24)

Диапазон давлений 0.1–175 кб

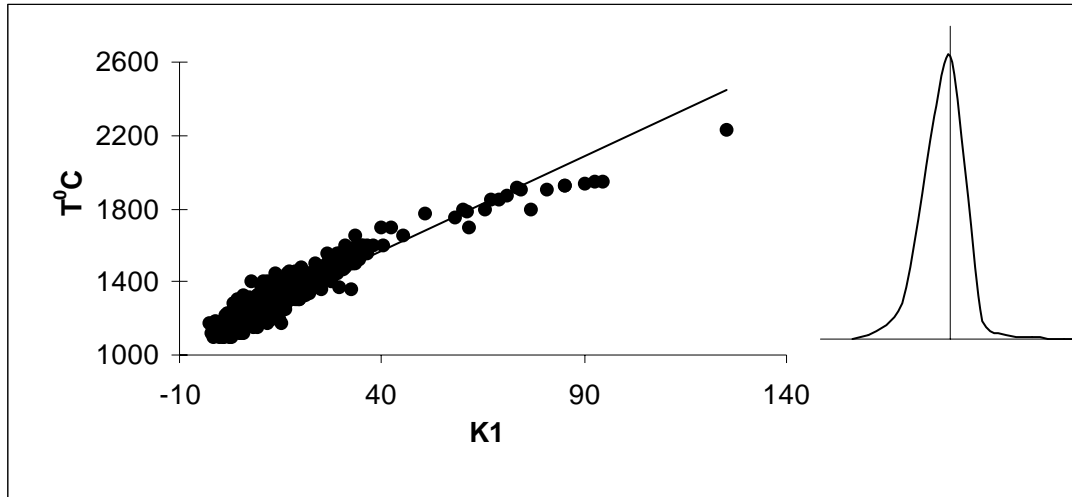


Рис. II.Ш.1.5 gl–sp–ol–орх–срх–pl (формула SORAPT). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100(Mg_m + P:6):(Si_m + Al_m:3.5)$$

$$T = 6.35K_1 + 1106.36(\text{SORAPT}_a)$$

Диапазон значений T 1075–2230 °C

Относительная ошибка 5–3 %

$R = 0.93$; $N = 1348$; $N_1 = 1323$; сигма = 56.1 °C; $\chi^2 = 6.75$ (24)

Диапазон давлений 0.1–175 кб

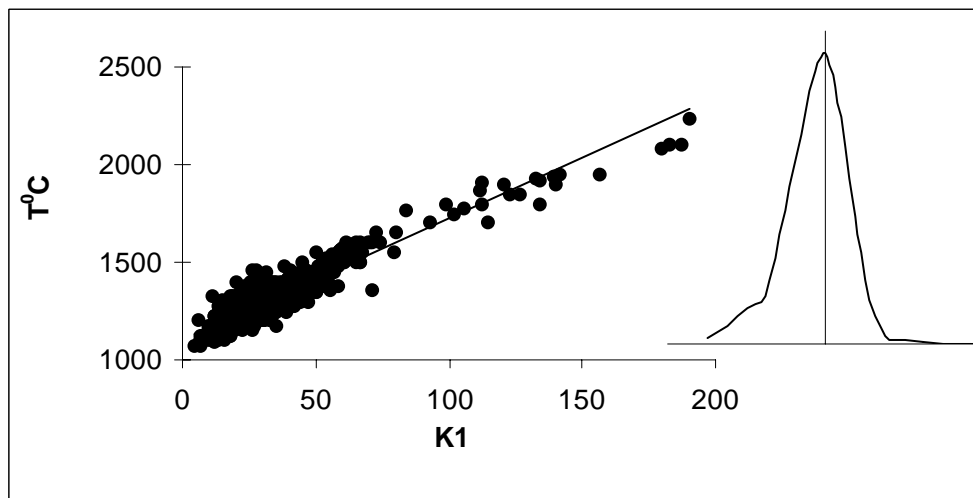


Рис. II.Ш.1.6 gl–sp–ol–орх–срх–pl (формула SORAPT_a). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет величины давления

$$K_1 = Mg_m - Al_m + 4(Na_m + K_m) + T:6$$

$$P = 0.37K_1 - 73.48(\text{SORAPP})$$

Диапазон значений P 5–95 кб

Относительная ошибка 120–6 %

$R = 0.85$; $N = 1294$; $N_1 = 1277$; сигма = 6 кб; $\chi^2 = 12.21$ (24)

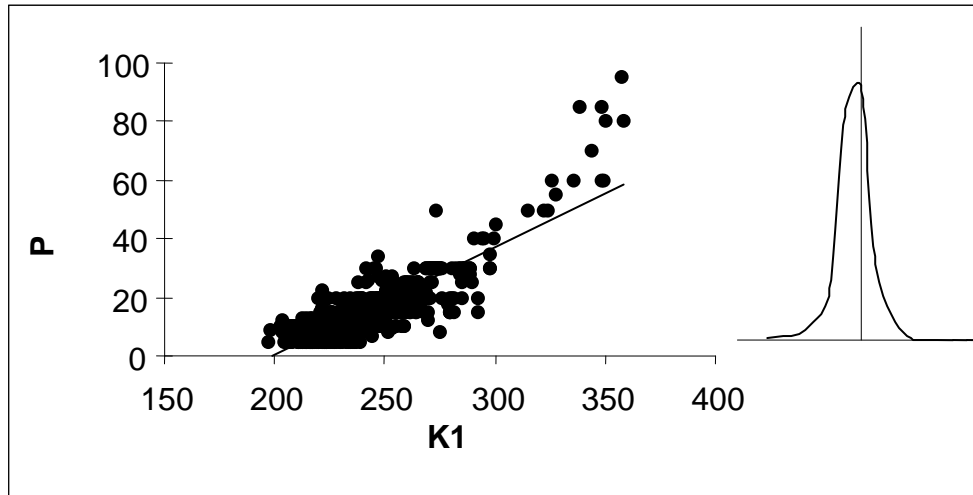


Рис. II.Ш.1.7 gl–sp–ol–орх–срх–pl (формула SORAPP). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в расплаве

$$K_1 = Al_m + Si_m - T:80; K_2 = Ti_m + Fe^{2+}_m + Mg_m$$

$$K_2 = -1.08K_1 + 72.11(\text{SORAPR})$$

Диапазон значений K_2 3.5–56; K_1 15.1–67

Относительная ошибка 51–3 %

$R = -0.98$; $N = 1403$; $N_1 = 1391$; сигма = 1.8; $\chi^2 = 3.9$ (24)

Диапазон давлений 0.1–175 кб

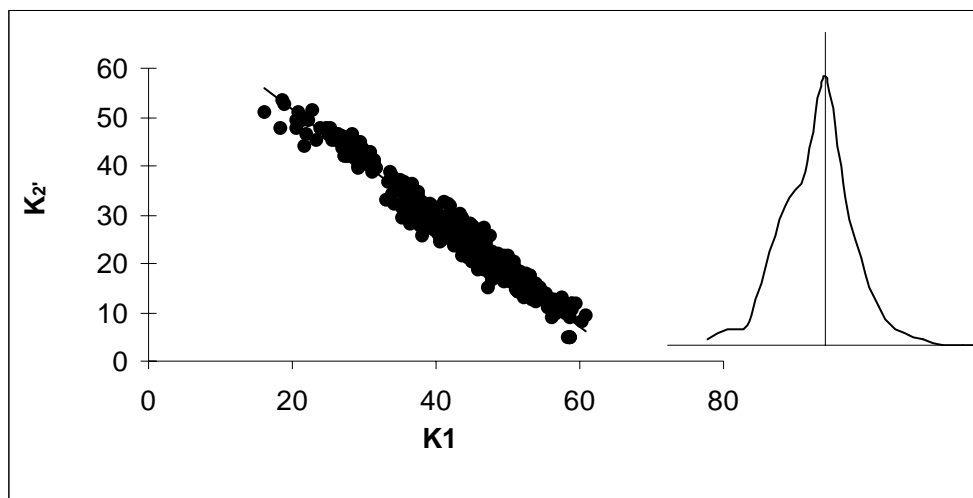


Рис. II.Ш.1.8 gl–sp–ol–орх–срх–pl (формула SORAPR). Зависимость величины K_2 от K_1 и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_m + Ca_m + T:28; K_2 = 1400Si_m:T + (Na_m + K_m) - P:30$$

$$K_2 = -1.52K_1 + 151.36(SORAPRa)$$

Диапазон значений K_2 19–118; K_1 34–90

Относительная ошибка 23–4 %

$R = -0.92$; $N = 1434$; $N_1 = 1404$; сигма = 4.4; $\chi^2 = 8.46$ (24)

Диапазон давлений 0.1–175 кб

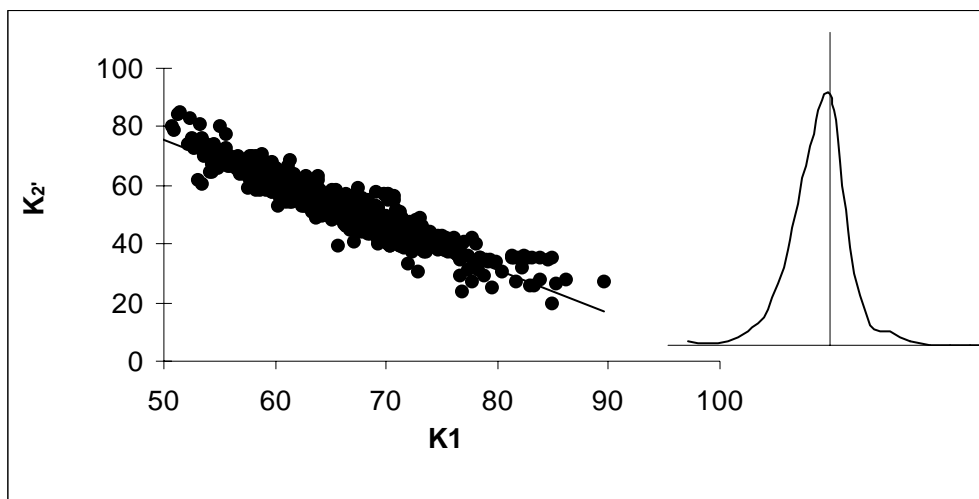


Рис. П.Ш.1.9 gl-sp-ol-орх-срх-pl (формула SORAPRa). Зависимость величины K_2 от K_1 и распределение среднеквадратичной ошибки.

6.2. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном со шпинелью

Эта выборка представлена 238 точками (см. часть I, раздел 1) и использованы те же анализы стекол, что и для системы расплав–шпинель. Это условие распространяется и на другие выборки расплавов, равновесных с различными вариантами наборов минеральных фаз, представленные ниже. В разделах, приводимых ниже, это условие не оговаривается. Для расчетов были удалены точки с нулевыми содержаниями суммы щелочей – 228 т. и содержания титана < 0.03 % и > 1.72 % – 211 т.

Таблица П.Ш.2.1 gl–sp. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных со шпинелью.

PGLS		Стекла	
SiO ₂	33.1–55.87	Si	33.45–53.01
TiO ₂	0.04–17.8	Ti	0–13.67
Al ₂ O ₃	5.02–21	Al	5.94–21.84
FeO	3.31–25.1	Fe	2.54–21.18
MnO	0.02–0.55	Mn	0–0.46
MgO	3.74–19.16	Mg	5.29–25.81
CaO	3.97–16.3	Ca	3.84–15.82
Na ₂ O	0.15–7.49	Na	0–12.82
K ₂ O	0.03–2.6	K	0–3.02
Cr ₂ O ₃	0.01–1.48	Cr	0–1.06
T °C	1150–1575	P, кб	1–28

Примечание. Диапазон для давлений кристаллизации P 1–28 кб, для температур кристаллизации T 1150–1575 °C.

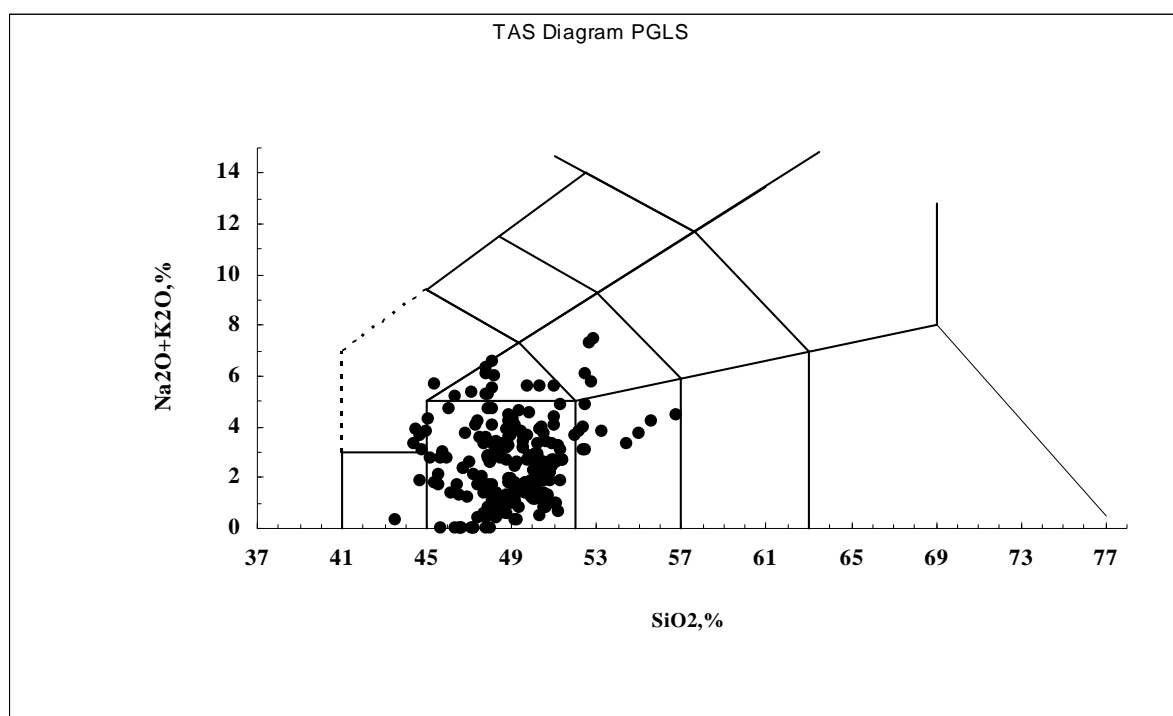


Рис. П.Ш.2.1 gl–sp. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами шпинели, оливина, ортопироксена, клинопироксена и плагиоклаза, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний железа в расплаве

$$K_1 = Si_m + Al_m + Ca_m + T:90 + P:2.5$$

$$Fe_m = -0.6K_1 + 62.12(PGLSF)$$

Диапазон значений Fe^{2+} 2.5–21.5 (атом.%)

Относительная ошибка 70–8 %

$R = -0.91$; $N = 238$; $N_1 = 233$; $\sigma = 1.73$; $\chi^2 = 2.69$ (12)

Диапазон давлений 1–28 кб

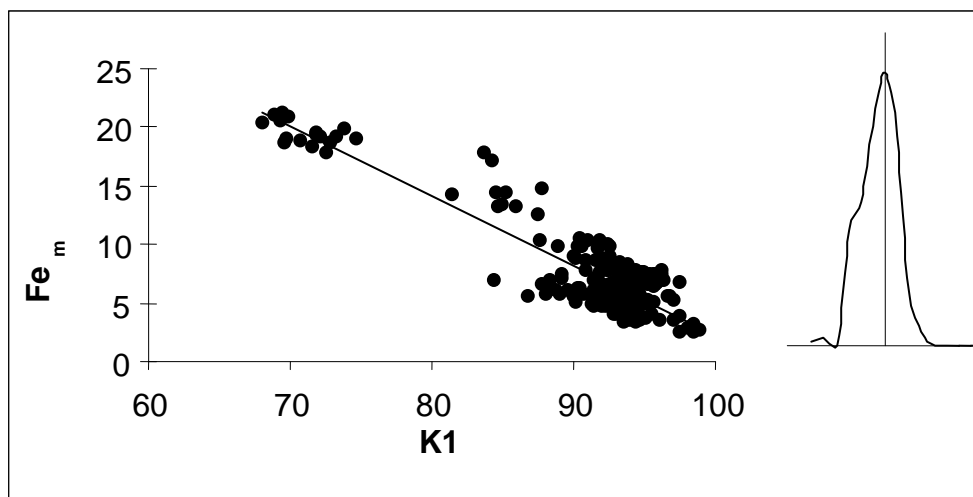


Рис. II.Ш.2.2 gl-sp (формула PGLSF). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = T:90 - Al_m:6 - (Na_m + K_m):2$$

$$Mg_m = 1.88K_1 - 2.85(PGLSM)$$

Диапазон значений Mg_m 5.3–25 (атом. %)

Относительная ошибка 30–6 %

$R = 0.91$; $N = 211$; $N_1 = 204$; $\sigma = 1.6$; $\chi^2 = 1.61$ (12)

Диапазон давлений 2–28 кб

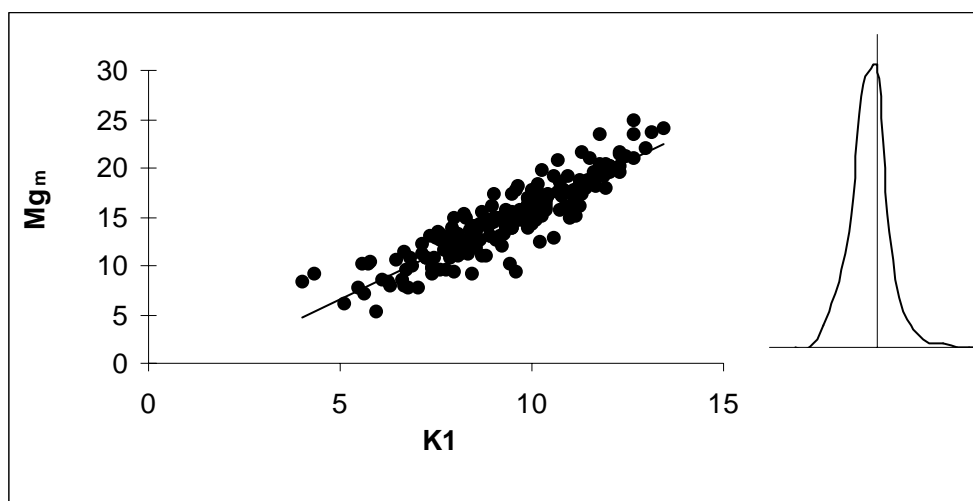


Рис. II.Ш.2.3 gl-sp (формула PGLSM). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Fe^{2+}_m:5 + Al_m:3 + (Na_m + K_m)$$

$$Mg_m = -1.06K_1 + 27.37(PGLSMA)$$

Диапазон значений Mg_m 5.3–25 (атом. %)

Относительная ошибка 34–7 %

$R = -0.88$; $N = 211$; $N_1 = 203$; $\sigma = 1.8$; $\chi^2 = 3.17$ (12)

Диапазон давлений 2–20 кб

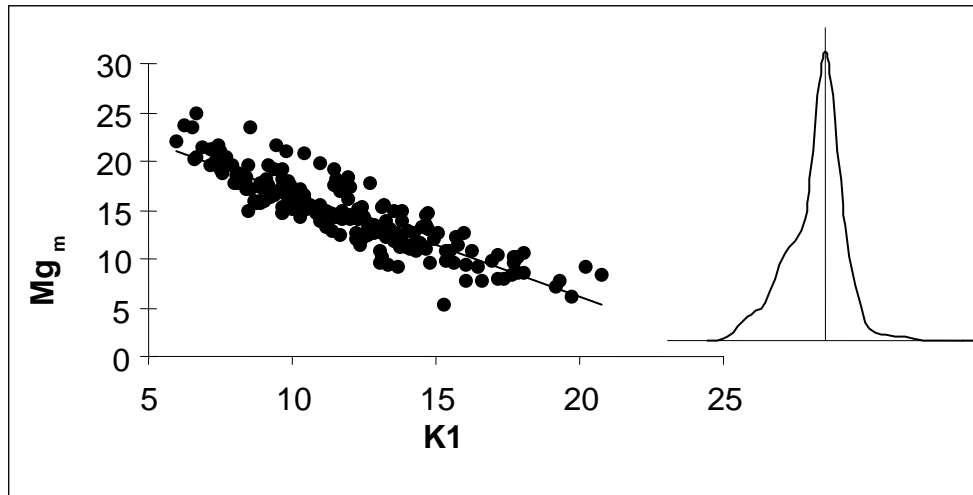


Рис. II.Ш.2.4 gl–sp (формула PGLSMA). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Mg_m - Si_m:4 + (Na_m + K_m):3 + 3Ti_m - Fe^{2+}:5 + P:3$$

$$T = 12.17K_1 + 1202.22(PGLSTa)$$

Диапазон значений T 1150–1575 °C

Относительная ошибка 3–2 %

$R = 0.87$; $N = 211$; $N_1 = 208$; $\sigma = 28.3$ °C; $\chi^2 = 1.44$ (12)

Диапазон давлений 1–28 кб

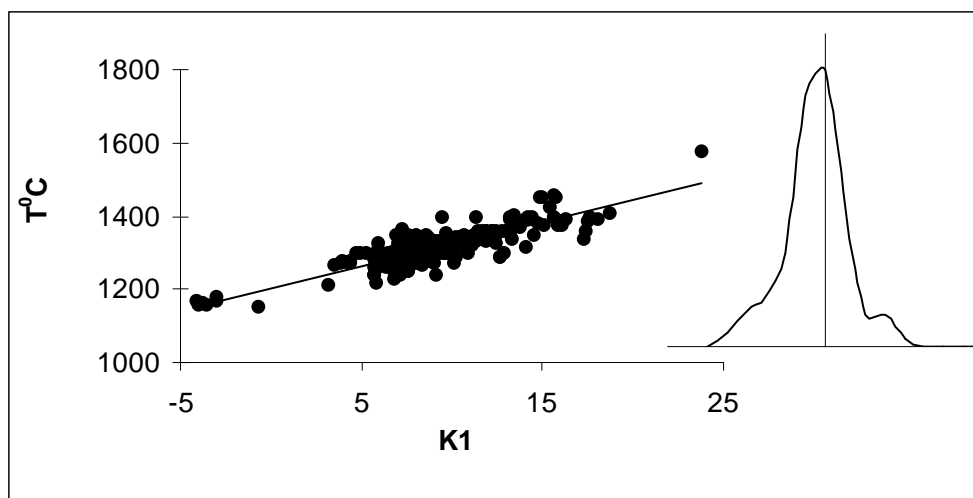


Рис. II.Ш.2.5 gl–sp (формула PGLSTa). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = Si - 2Ti - Al:4 + Fe^{2+}:5 + Mg:8 + Ca:3 - T:32$$

$$P = -1.03K_1 + 16.83(PGLSP) - 13$$

Диапазон значений P 1–28 кб

Относительная ошибка –200...–7 %

R = -0.85; N = 211; N₁ = 208; сигма = 2 кб; $\chi^2 = 2.95$ (12)

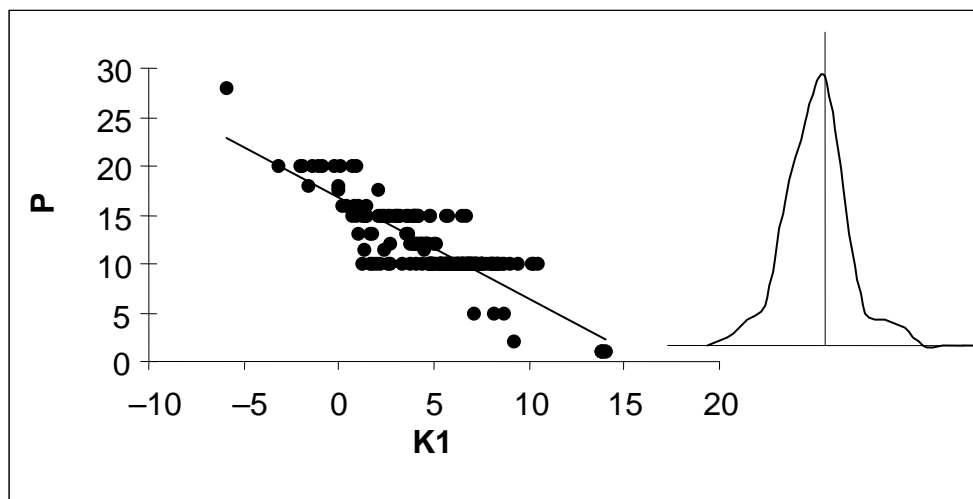


Рис. П.Ш.2.6 gl–sp (формула PGLSP). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в расплаве

$$K_1 = Mg_m - P:2; K_2 = 2Ti_m + (Na_m + K_m)$$

$$K_2 = -0.62K_1 + 11.09(PGLSR)$$

Диапазон значений K₂ 0.8–14.6; K₁ 2–21;

Относительная ошибка 180–10 %

R = -0.88; N = 211; N₁ = 2111; сигма = 1.44; $\chi^2 = 2.18$ (12)

Диапазон давлений 1–28 кб

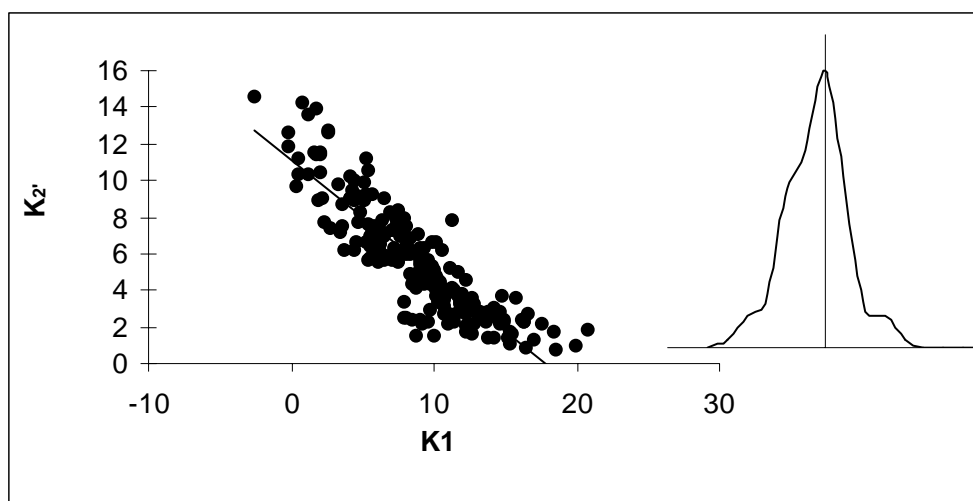


Рис. П.Ш.2.7 gl–sp (формула PGLSR). Зависимость величины K₂ от K₁ и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_2 = Na_m + K_m; K_1 = Mg_m + Ca_m - Al_m \cdot 2.5 - P \cdot 2$$

$$K_2 = -0.39K_1 + 9.22(\text{PGLSRa})$$

Диапазон значений K_2 0.43–12.8; K_1 3,8–25;

Относительная ошибка 284–10 %

$R = -0.88$; $N = 228$; $N_1 = 228$; $\sigma = 1.22$; $\chi^2 = 2.6$ (12)

Диапазон давлений 1–28 кб

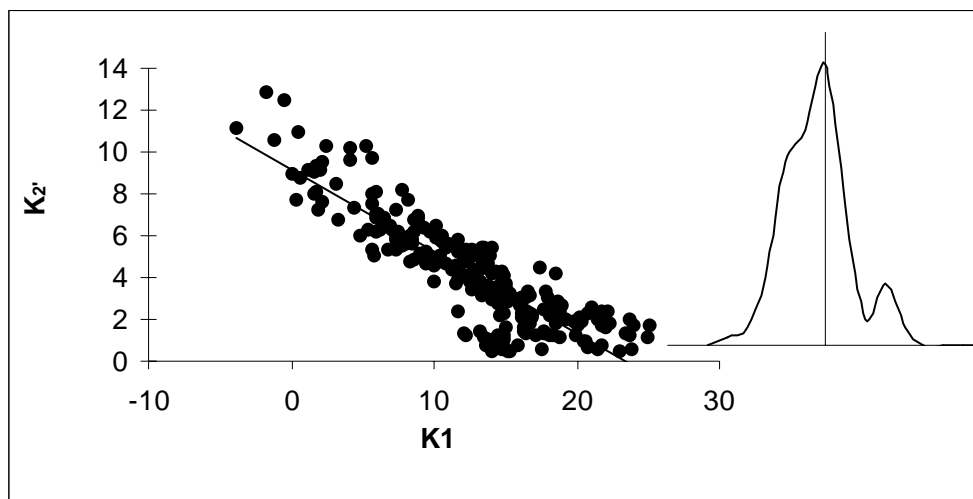


Рис. II.Ш.2.8 gl-sp (формула PGLSRa). Зависимость величины K_2 от K_1 и распределение среднеквадратичной ошибки.

6.3. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с оливином

Эта выборка представлена 756 точками. Для расчетов были удалены точки, где давление < 2 кб – 742 т. Для расчетов содержаний магния, величин температур и давлений выборка была разбита на 2 массива: 2–21 кб – 634 т. и 22–175 кб – 93 т. Для расчета величин давлений были использованы точки со значениями > 6 кб – 700 т. и 5–21кб – 629 т.

Таблица П.Ш.3.1 gl-ol. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с оливином.

PGOL		Стекла	
SiO ₂	31.5–66.3	Si	32.04–61.87
TiO ₂	0.04–21.83	Ti	0–15.49
Al ₂ O ₃	3.27–22	Al	3.43–23.48
FeO	3.31–28.9	Fe	0–23.56
MnO	0.01–0.58	Mn	0–0.46
MgO	2.55–37.03	Mg	3.54–46.6
CaO	2.84–19.1	Ca	2.86–18.72
Na ₂ O	0.03–7.71	Na	0–13.7
K ₂ O	0.01–9.33	K	0–11.02
Cr ₂ O ₃	0.01–1.48	Cr	0–1.06
T °C	1095–2100	P, кб	2–175

Примечание. Диапазон для давлений кристаллизации P 2–175 кб, температур кристаллизации T 1095–2100 °C.

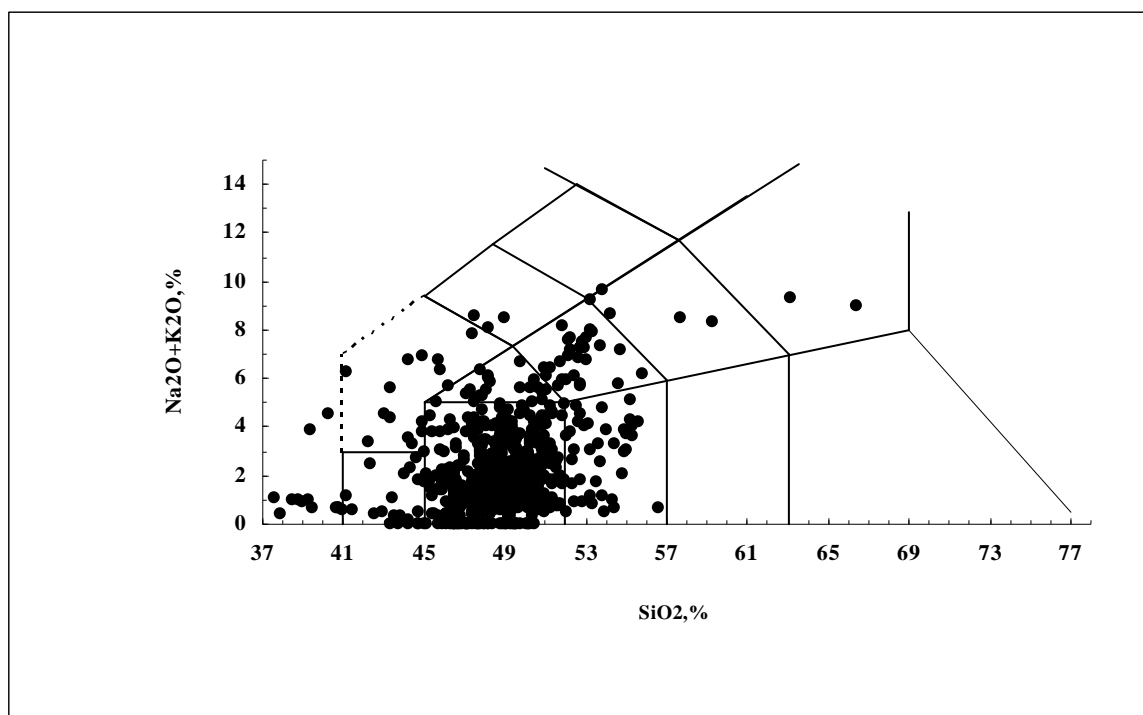


Рис. П.Ш.3.1 gl-ol. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливина, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Fe_m^{2+} + Mg_m + (Na_m + K_m) \cdot 2 + P \cdot 35$$

$$Al_m = -0.51K_1 + 29.04(PGOLA)$$

Диапазон значений Al_m 3.42–23.5 (атом. %)

Относительная ошибка 53–8 %

$R = -0.9$; $N = 742$; $N_1 = 739$; сигма = 1.82; $\chi^2 = 1.38$ (16)

Диапазон давлений 2–175 кб

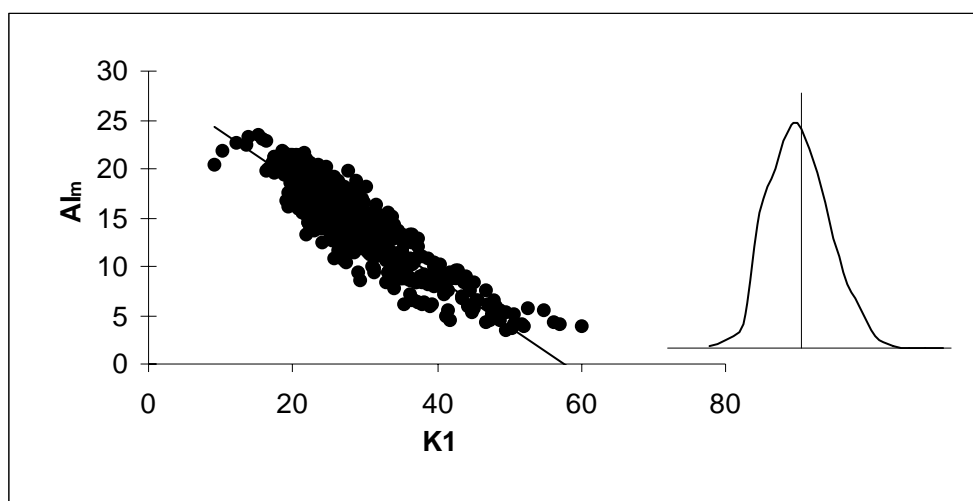


Рис. П.Ш.3.2 gl-ol (формула PGOLA). Зависимость содержаний Al_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$Mg_m = 0.42(T:10) - 39.75 (PGOLM1)$$

Диапазон значений Mg_m 3.5–46.6 (атом. %)

Относительная ошибка 80–6 %

$R = 0.91$; $N = 742$; $N_1 = 739$; сигма = 2.8; $\chi^2 = 1.59$ (16)

Диапазон давлений 2–175 кб

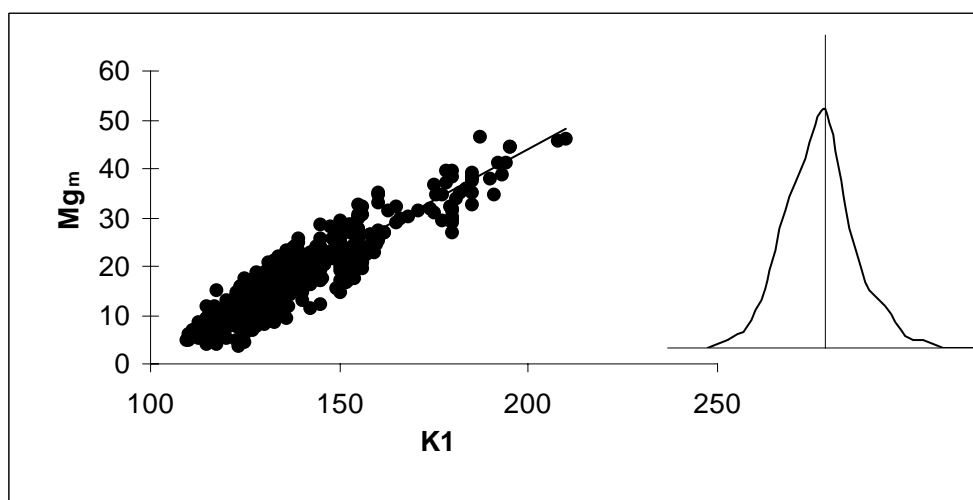


Рис. П.Ш.3.3 gl-ol (формула PGOLM1). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = T:10 - Ti_m - Al_m:2 - Na_m - K_m - P:11$$

$$Mg_m = 0.37K_1 - 28.52(PGOLM2)$$

Диапазон значений Mg_m 3.5–46.6 (атом. %)

Относительная ошибка 60–5 %

$R = 0.95$; $N = 742$; $N_1 = 733$; $\sigma = 2.1$; $\chi^2 = 7.09$ (16)

Диапазон давлений 2–175 кб

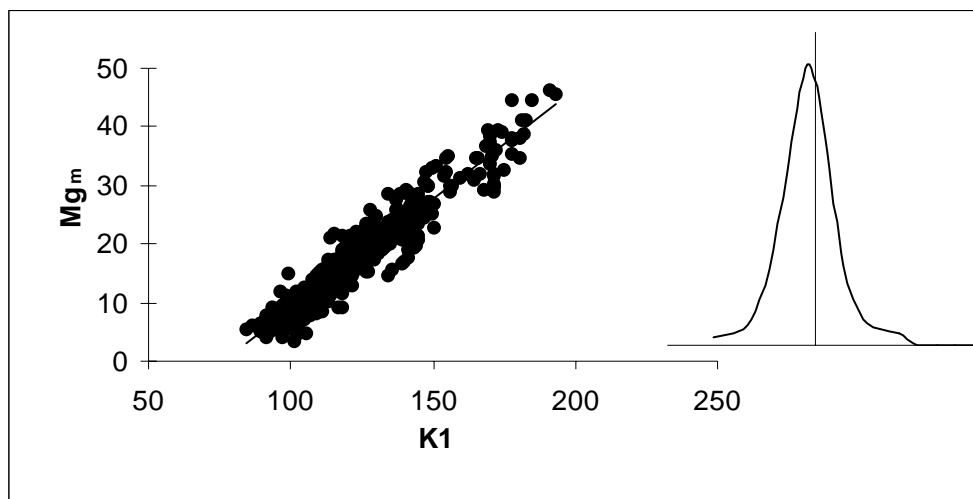


Рис. II.Ш.3.4 gl–ol (формула PGOLM2). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$Mg_m = 0.5T:10 - 50.74(PGOLM3)$$

Диапазон значений Mg_m 3.5–35.2 (атом. %)

Относительная ошибка 71–7 %

$R = 0.87$; $N = 634$; $N_1 = 630$; $\sigma = 2.5$; $\chi^2 = 0.87$ (16)

Диапазон давлений 3–21 кб

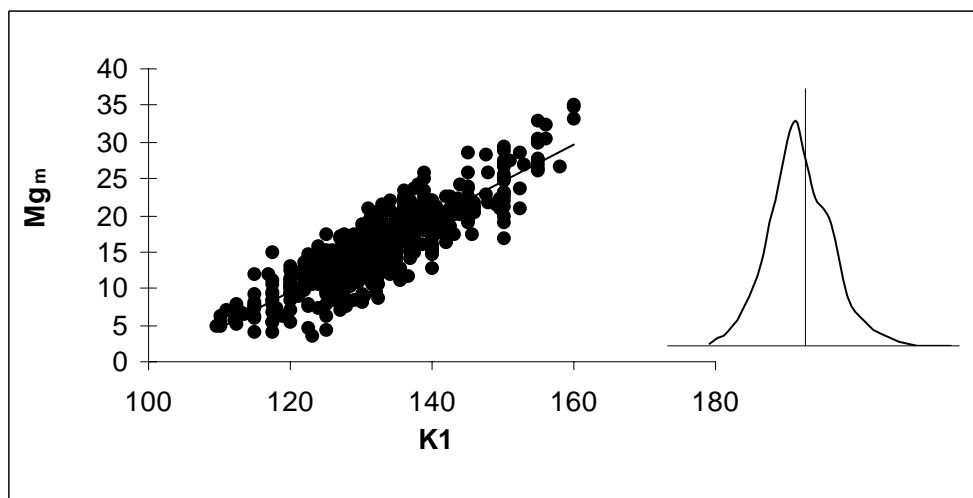


Рис. II.Ш.3.5 gl–ol (формула PGOLM3). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = T:7 - Al_m:2 - Na_m - K_m - P$$

$$Mg_m = 0.33K_1 - 38.99(PGOLM4)$$

Диапазон значений Mg_m 3.5–35.1 (атом. %)

Относительная ошибка 60–6 %

$R = 0.91$; $N = 634$; $N_1 = 629$; сигма = 2.1; $\chi^2 = 3.23$ (16)

Диапазон давлений 3–21 кб

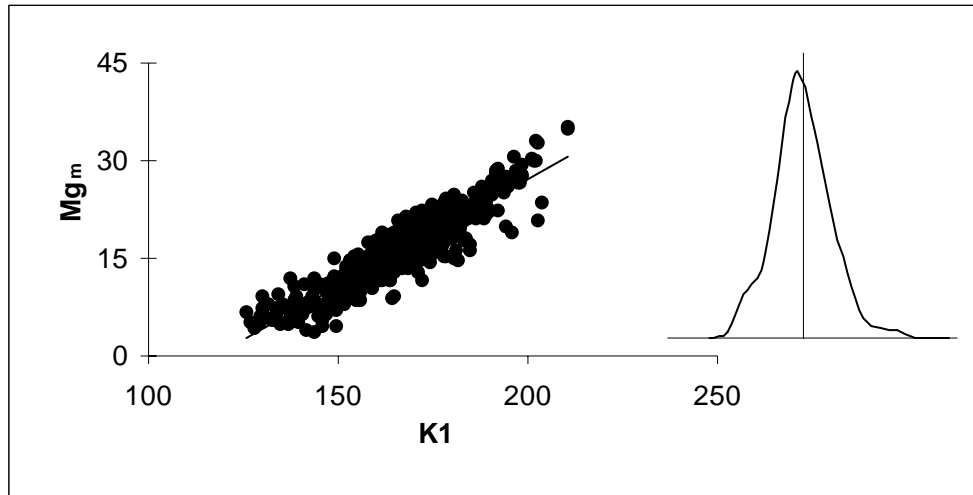


Рис. П.Ш.3.6 gl–ol (формула PGOLM4). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

$$K_1 = T:26 - Al_m:5 - Ca_m$$

$$Mg_m = 0.88K_1 - 19.31(PGOLM5)$$

Диапазон значений Mg_m 12.2–46.6 (атом. %)

Относительная ошибка 27–7 %

$R = 0.91$; $N = 93$; $N_1 = 93$; сигма = 3.34; $\chi^2 = 1.96$ (8)

Диапазон давлений 22–175 кб

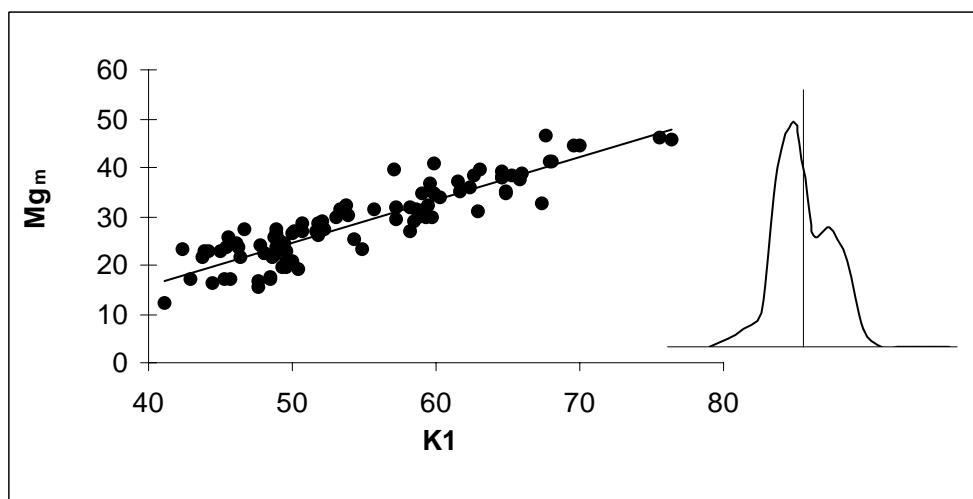


Рис. П.Ш.3.7 gl–ol (формула PGOLM5). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Mg_m + P:12$$

$$T = 17.97K_1 + 1030.4(PGOLT)$$

Диапазон значений T 1100–2100 °C

Относительная ошибка 5–2 %

$R = 0.94$; $N = 742$; $N_1 = 736$; сигма = 52.1 °C; $\chi^2 = 4.29$ (16)

Диапазон давлений 2–175 кб

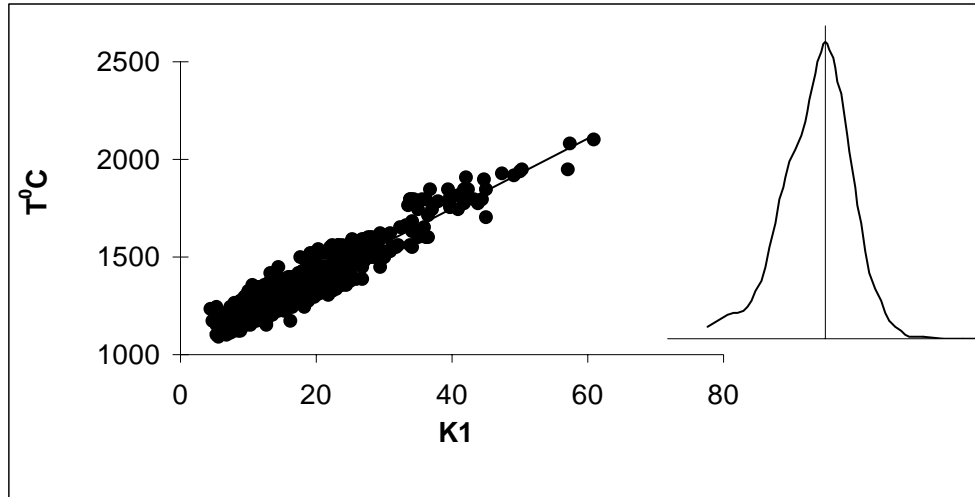


Рис. II.Ш.3.8 gl–ol (формула PGOLT). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$T = 19.82Mg_m + 1022.05(PGOLTa)$$

Диапазон значений T 1100–2100 °C

Относительная ошибка 5–2 %

$R = 0.92$; $N = 742$; $N_1 = 738$; сигма = 61 °C; $\chi^2 = 4.78$ (16)

Диапазон давлений 2–175 кб

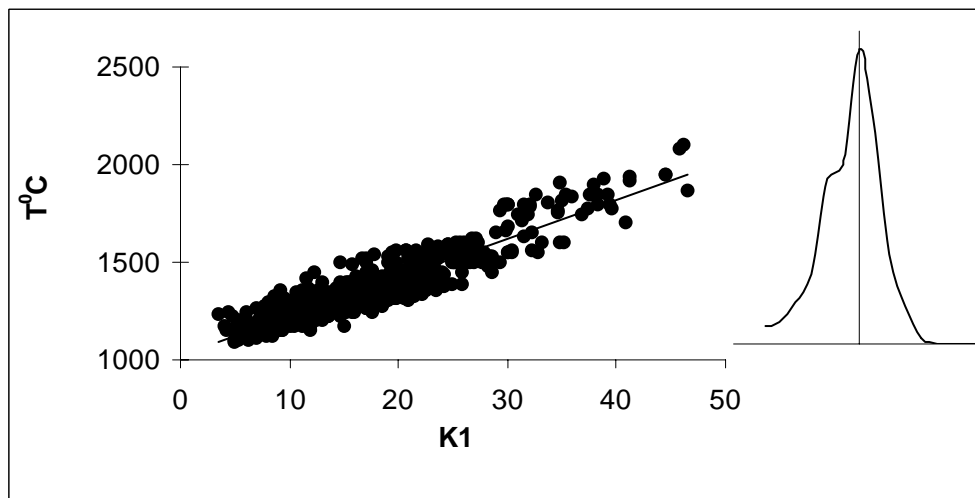


Рис. II.Ш.3.9 gl–ol (формула PGOLTa). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 130Mg_m \cdot Si_m - Ti_m + Na_m + K_m$$

$$T = 6.9K_1 + 990.14(PGOLTb)$$

Диапазон значений T 1100–2100 °C

Относительная ошибка 5–2 %

$R = 0.94$; $N = 742$; $N_1 = 733$; сигма = 49.8 °C; $\chi^2 = 2.93$ (16)

Диапазон давлений 2–175 кб

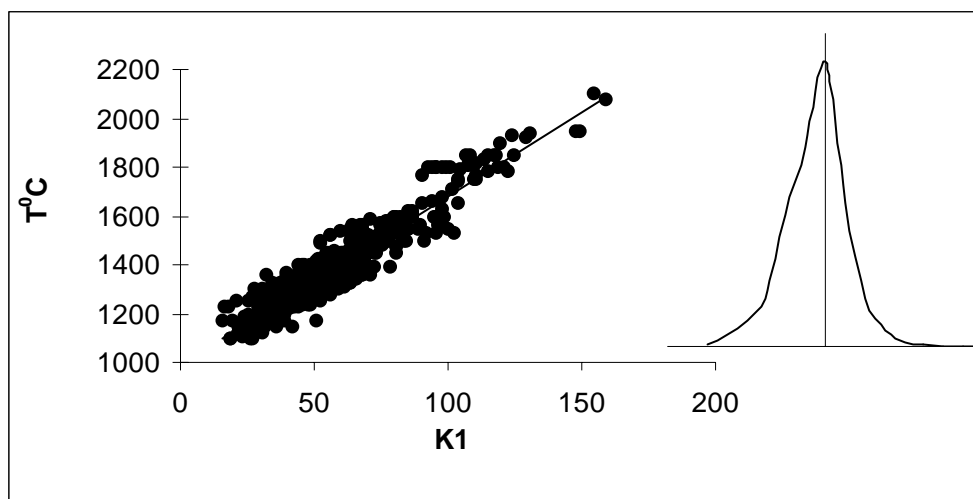


Рис. II.Ш.3.10 gl–ol (формула PGOLTb). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 5Mg_m - 2Al_m - Na_m - Fe_m^{2+} - Si_m \cdot 3 - Ti_m \cdot 3 - Ca_m + 42LnP$$

$$T = 2.31K_1 + 1069.35(PGOLTg)$$

Диапазон значений T 1100–2100 °C

Относительная ошибка 4–2 %

$R = 0.97$; $N = 742$; $N_1 = 718$; сигма = 38.2 °C; $\chi^2 = 2.26$ (16)

Диапазон давлений 2–175 кб

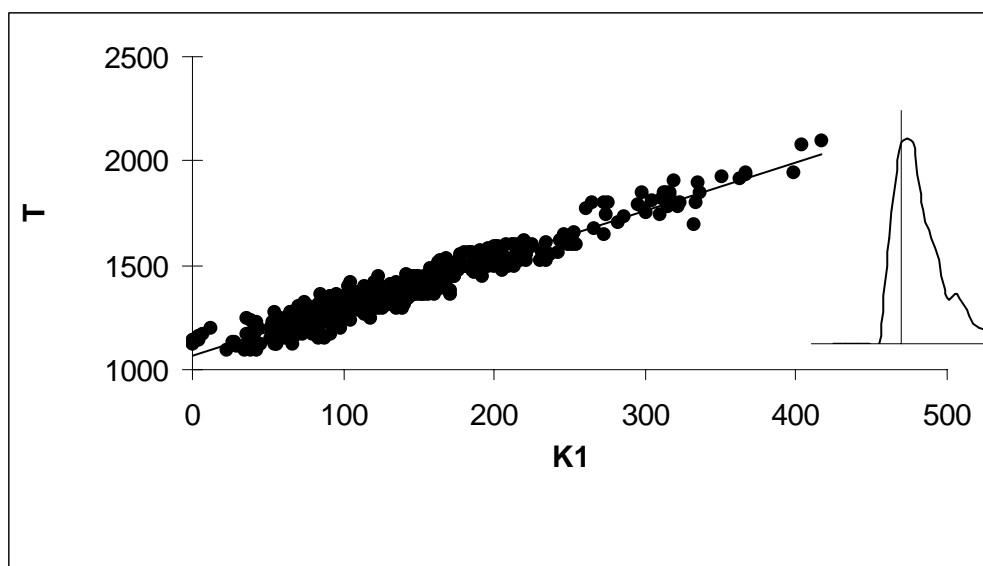


Рис. II.Ш.3.11 gl–ol (формула PGOLTg). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$T = 15.09Mg + 1085.77(PGOLTc)$
 Диапазон значений T 1095–1600 °C
 Относительная ошибка 4–3 %
 $R = 0.87$; $N = 634$; $N_1 = 630$; сигма = 43.8 °C; $\chi^2 = 1.55$ (16)
 Диапазон давлений 3–21 кб

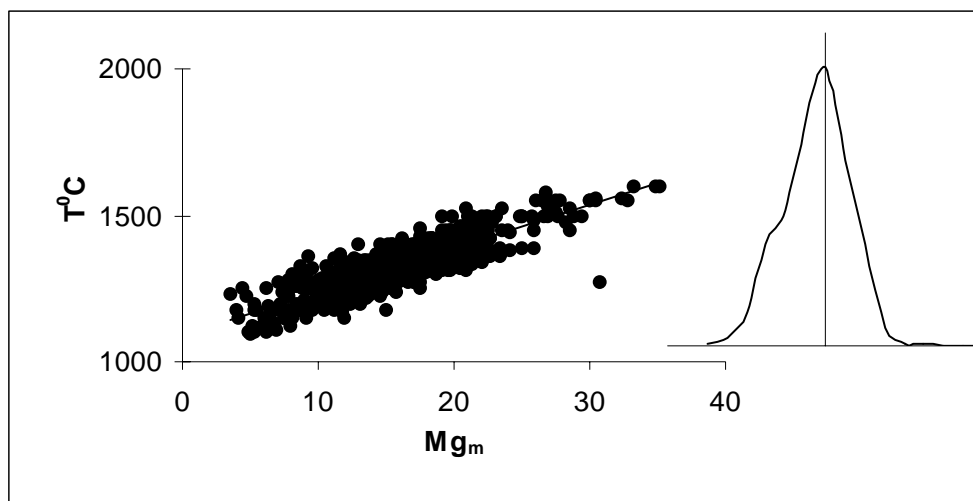


Рис. П.Ш.3.12 gl–ol (формула PGOLTc). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_m + P:3$$

$$T = 14.24K_1 + 1043.1(PGOLTd)$$

Диапазон значений T 1095–1600 °C
 Относительная ошибка 3–2 %
 $R = 0.92$; $N = 634$; $N_1 = 626$; сигма = 35.2 °C; $\chi^2 = 0.9$ (16)
 Диапазон давлений 3–21 кб

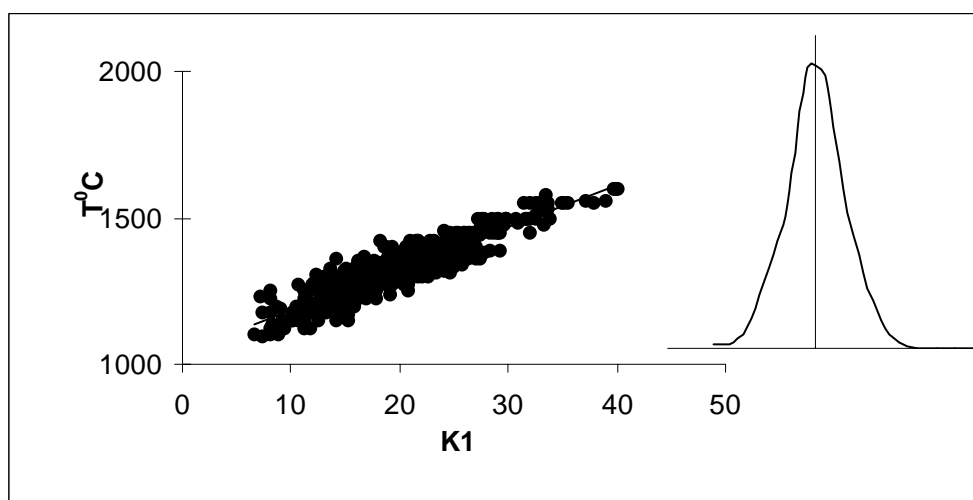


Рис. П.Ш.3.13 gl–ol (формула PGOLTd). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 100(Mg_m + P:2):(4Si_m + 3Ti_m + Al_m + Ca_m + Na_m + K_m)$$

$$T = 25.28K_1 + 1063.14(PGOLTe)$$

Диапазон значений T 1100–1600 °C

Относительная ошибка 4–3 %

$R = 0.92$; $N = 634$; $N_1 = 627$; сигма = 34.5 °C; $\chi^2 = 2.69$ (16)

Диапазон давлений 3–21 кб

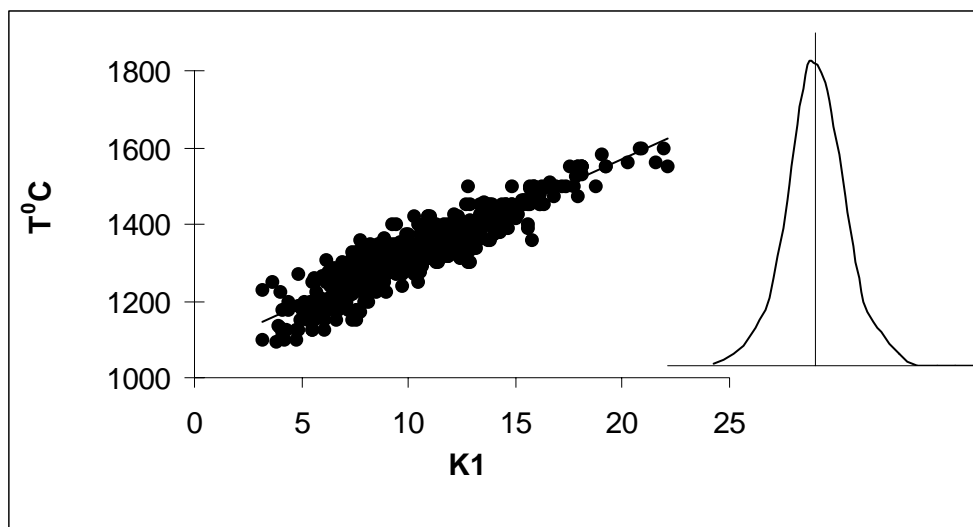


Рис. П.Ш.3.14 gl–ol (формула PGOLTe). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Mg_m - Al_m - 2(Na_m + K_m) + P:5$$

$$T = 8.54K_1 + 1451.34(PGOL Tf)$$

Диапазон значений T 1400–2100 °C

Относительная ошибка 4–3 %

$R = 0.94$; $N = 93$; $N_1 = 92$; сигма = 55.4 °C; $\chi^2 = 0.51$ (8)

Диапазон давлений 22–175 кб

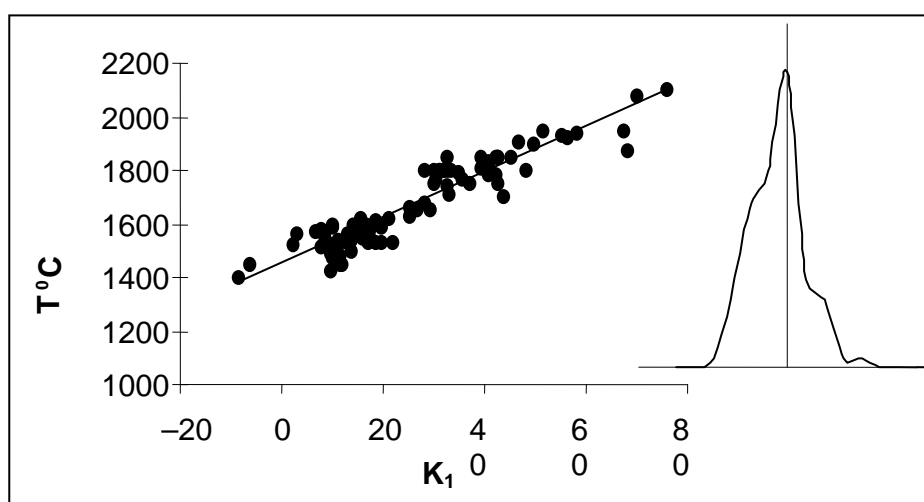


Рис. П.Ш.3.15 gl–ol (формула PGOL Tf). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = T(Mg_m - Si_m:7):10(5Ti_m + Al_m + Fe^{2+}_m:2.2 + Ca_m)$$

$$P = 0.15K_1 + 7.29(PGOLP)$$

Диапазон значений P 6–140 кб

Относительная ошибка 120–5 %

R = 0.87; N = 700; N₁ = 695; сигма = 7.1 кб; $\chi^2 = 8.96$ (16)

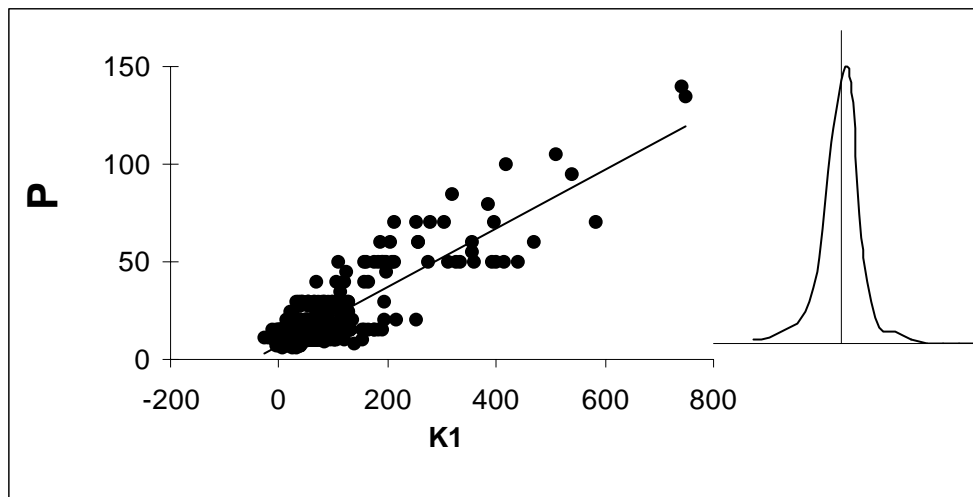


Рис. II.Ш.3.16 gl–ol (формула PGOLP). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_m:3 + (Na_m + K_m):2 - Si_m:2 - Mg_m - Ca_m + T:7$$

$$P = 0.32K_1 - 35.89(PGOLPa)$$

Диапазон значений P 2–21 кб

Относительная ошибка 50–12 %

R = 0.76; N = 649; N₁ = 634; сигма = 2.4 кб; $\chi^2 = 2.41$ (16)

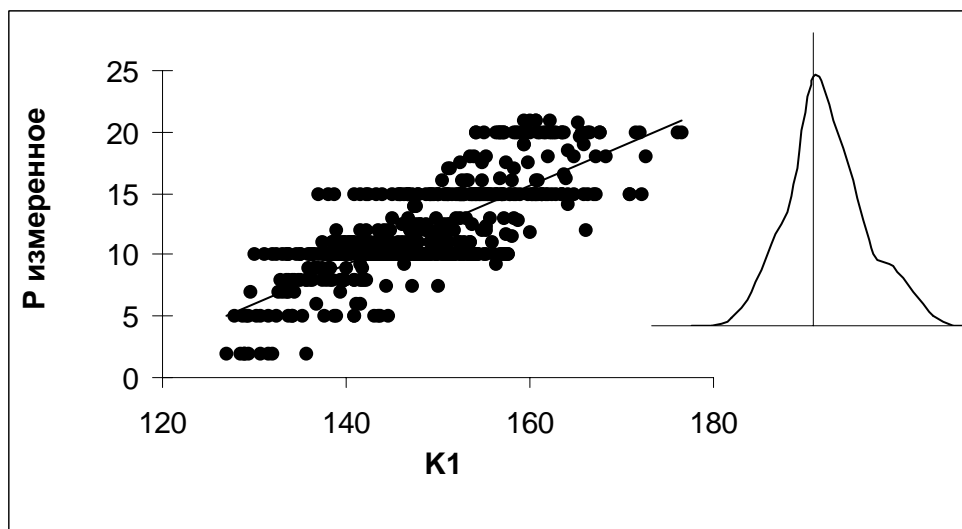


Рис. II.Ш.3.17 gl–ol (формула PGOLPa). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Exp}[(Mg_m - Al_m:3 - Si_m:2.5 + Fe^{2+}_m:3 + Ca_m + 2Na_m + T:100):10]$$

$$P = 0.48K_1 + 13.51(\text{PGOLPb})$$

Диапазон значений P 22–175 кб

Относительная ошибка 34–5 %

$$R = 0.96; N = 93; N_1 = 91; \text{сигма} = 7.3 \text{ кб}; \chi^2 = 1.69 \text{ (8)}$$

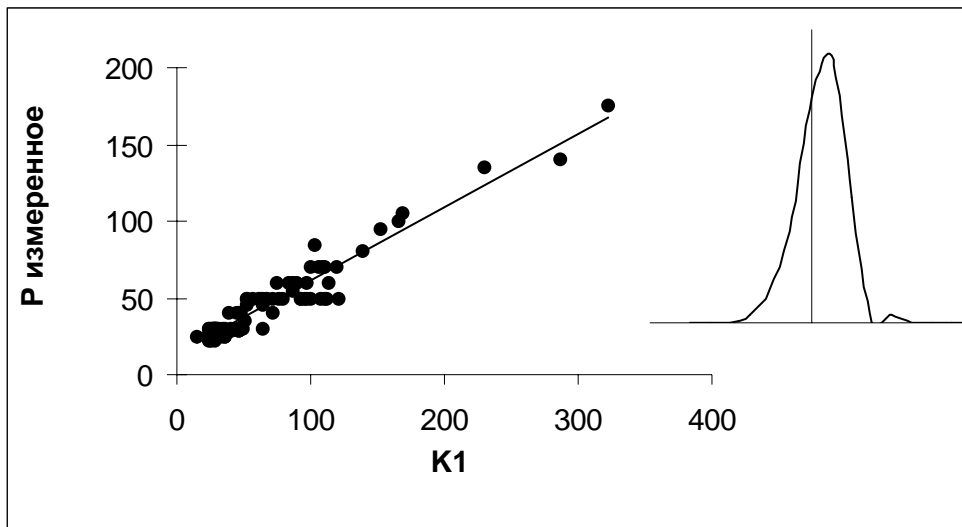


Рис. П.Ш.3.18 gl–ol (формула PGOLPb). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в расплаве

$$K_1 = Ti_m:2 + Al_m + Na_m + K_m; K_2 = 1000(Fe^{2+}_m:2 + Mg_m + P_m:20):T$$

$$K_2 = -0.59K_1 + 27.33(\text{PGOL1})$$

Диапазон значений K₂ 4–27.8; K₁ 3.4–35;

Относительная ошибка 32–5 %

$$R = -0.94; N = 742; N_1 = 732; \text{сигма} = 1.27; \chi^2 = 1.94 \text{ (16)}$$

Диапазон давлений 2–175 кб

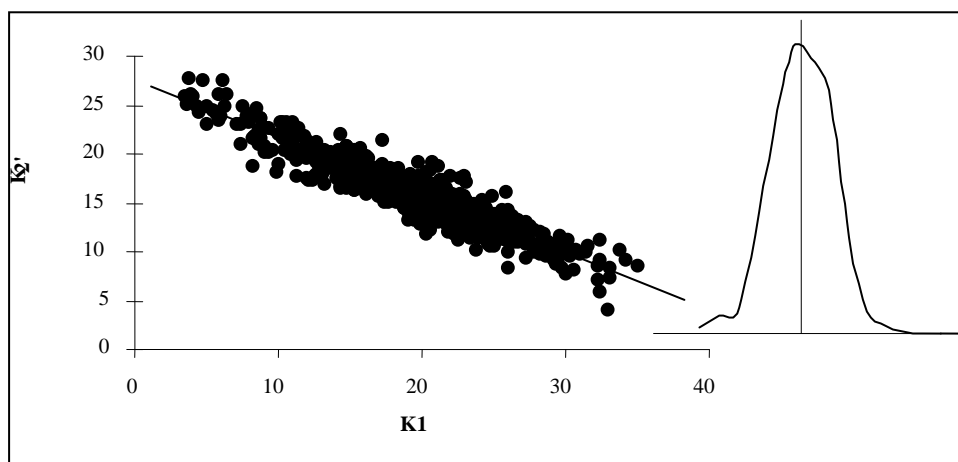


Рис. П.Ш.3.19 gl–ol (формула PGOL1). Зависимость величины K₂ от K₁ и распределение среднеквадратичной ошибки.

6.4. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с ортопироксеном

Эта выборка представлена 522 точками. Для расчетов содержаний кремния были удалены точки с содержаниями кремния > 62 % – 509 т. Для расчетов содержаний магния и величин температур и давлений массив был разбит на две выборки: диапазон 3–21 кб и $T > 1100$ °С – 448 т.; диапазон 22–110 кб – 47 т. Для расчета равновесного распределения элементов в расплаве (PGORR1) были удалены точки с $K_2 < 2$ – 477 т.

Таблица II.Ш.4.1 gl–орх. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с ортопироксеном.

PGLR		Стекла	
SiO ₂	31.5–76.6	Si	32.04–73.11
TiO ₂	0–21.83	Ti	0–15.49
Al ₂ O ₃	3.42–24.01	Al	3.55–25.76
FeO	0–26.7	Fe	0–22.01
MnO	0–0.58	Mn	0–0.46
MgO	0.16–31.5	Mg	0.23–41.4
CaO	0.73–15.51	Ca	0.74–15.04
Na ₂ O	0–7.49	Na	0–12.82
K ₂ O	0–10.12	K	0–11.86
Cr ₂ O ₃	0–1.48	Cr	0–1.06
T °С	850–1950	P, кб	0.1–110

Примечание. Диапазон для давлений кристаллизации P 0.1–110 кб, температур кристаллизации T 850–1950 °С.

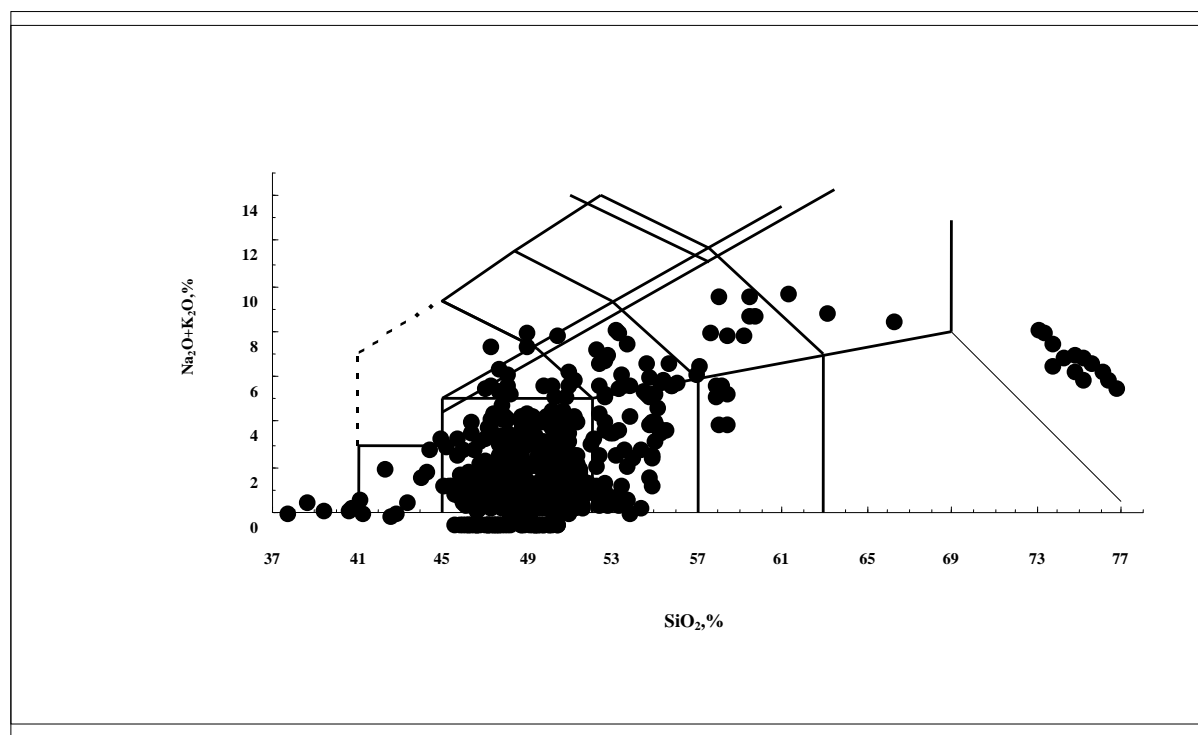


Рис. II.Ш.4.1 gl–орх Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами ортопироксена, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = Ti_m + 0,7Fe_m^{2+} + Ca_m + T:60$$

$$Si_m = -0.61K_1 + 68.24(PGLRS)$$

Диапазон значений Si_m 32–58.5 (атом. %)

Относительная ошибка 5–3 %

$R = -0.83$; $N = 509$; $N_1 = 505$; сигма = 1.75; $\chi^2 = 1.28$ (16)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

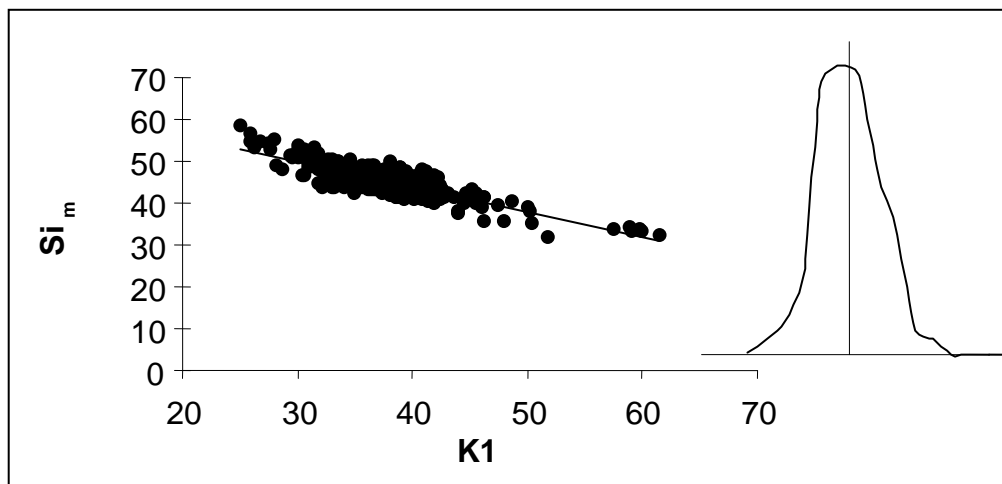


Рис. II.Ш.4.2 gl–орх (формула PGLRS). Зависимость содержаний Si_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Si_m:4 + Fe_m^{2+} + Mg_m - Ca_m - P:7$$

$$Al_m = -0.53K_1 + 28.14(PGLRA)$$

Диапазон значений Al_m 3.5–25.8.5 (атом. %)

Относительная ошибка 46–6 %

$R = -0.9$; $N = 522$; $N_1 = 515$; сигма = 1.62; $\chi^2 = 1.29$ (16)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

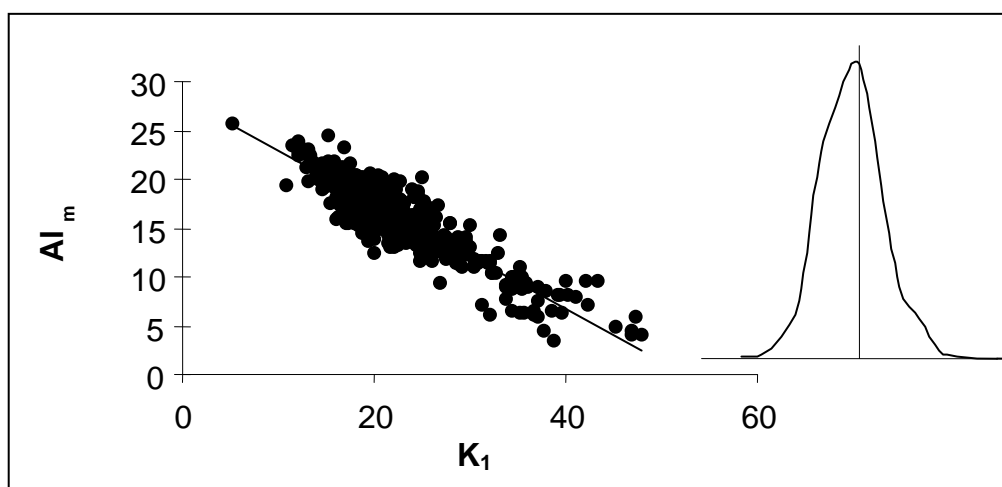


Рис. II.Ш.4.3 gl–орх (формула PGLRA). Зависимость содержаний Al_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = T:9 - Al_m - 2(Na_m + K_m)$$

$$Mg_m = 0.32K_1 - 23.56(\text{PGLRM})$$

Диапазон значений Mg_m 19–35.2 (атом. %)

Относительная ошибка 90–5 %

$R = 0.95$; $N = 448$; $N_1 = 438$; $\sigma = 1.7$; $\chi^2 = 0.58$ (12)

Диапазон давлений 3–21 кб

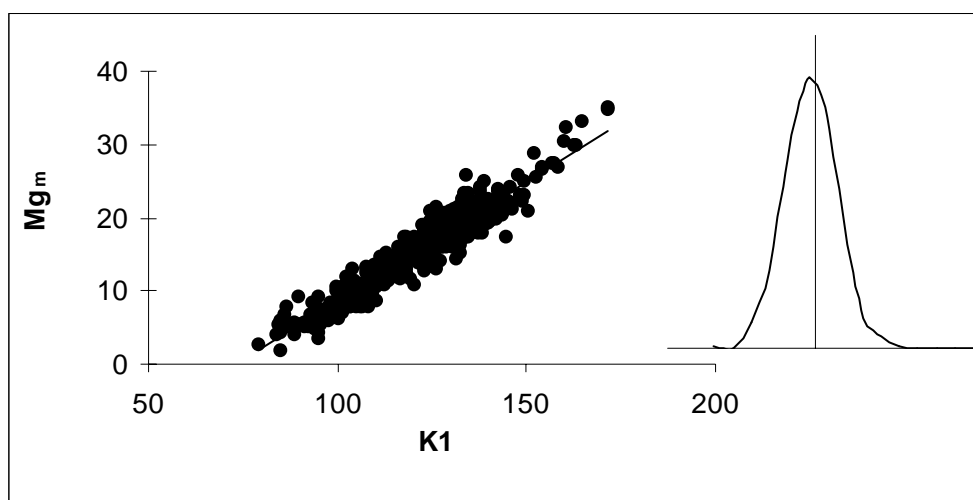


Рис. П.Ш.4.4 gl-орх (формула PGLRM). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = T:16 - Fe^{2+}_m:2$$

$$Mg_m = 0.54K_1 - 25.46(\text{PGLRM1})$$

Диапазон значений Mg_m 19–41 (атом. %)

Относительная ошибка 10–5 %

$R = 0.93$; $N = 47$; $N_1 = 46$; $\sigma = 1.9$; $\chi^2 = 0.54$ (8)

Диапазон давлений 22–110 кб

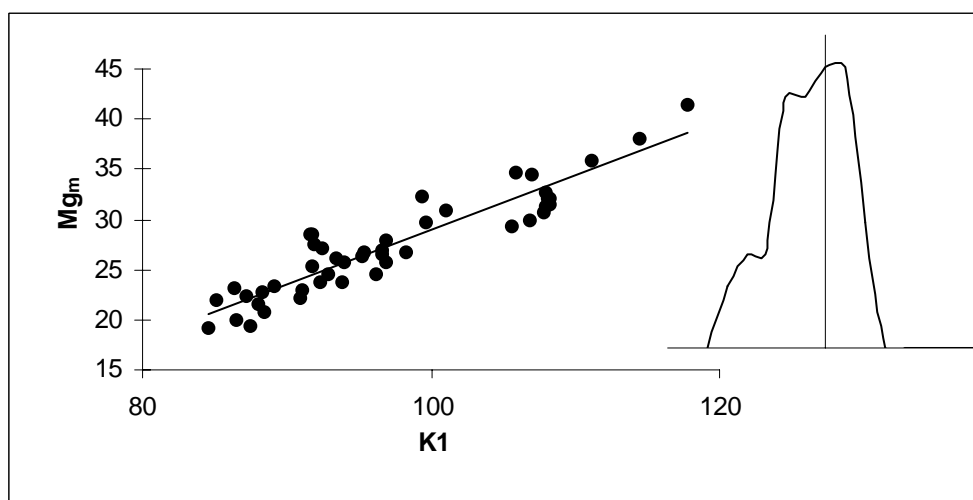


Рис. П.Ш.4.5 gl-орх (формула PGLRM1). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al_m:2 - (Na_m + K_m) + T:12 + P:5$$

$$Mg_m = 0.32K_1 - 19.78(PGLRM2)$$

Диапазон значений Mg_m 19–41(атом. %)

Относительная ошибка 12–5 %

$R = 0.9$; $N = 47$; $N_1 = 46$; сигма = 2.2; $\chi^2 = 0.40$ (8)

Диапазон давлений 22–110 кб

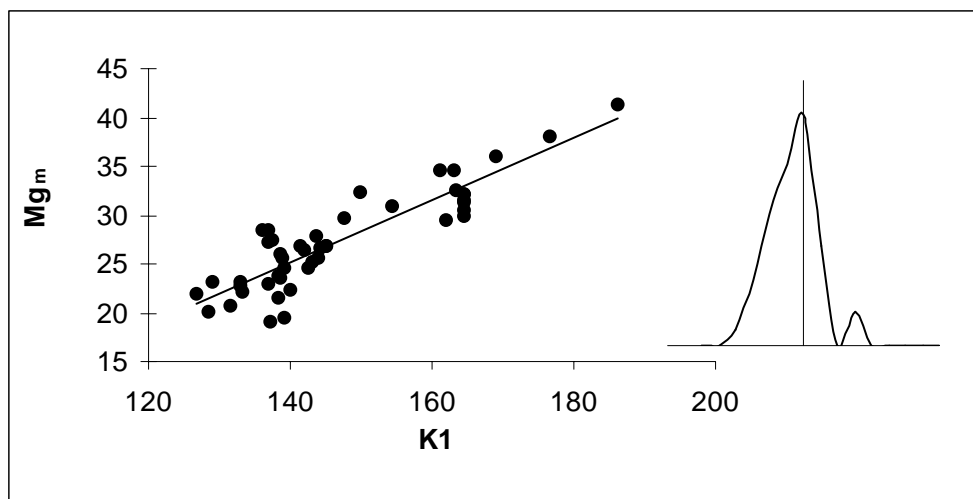


Рис. II.Ш.4.6 gl–орх (формула PGLRM2). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Mg_m + P:2$$

$$T = 12.13K_1 + 1064.4(PGLRT)$$

Диапазон значений T 1115–1600 °C

Относительная ошибка 3–2 %

$R = 0.91$; $N = 448$; $N_1 = 444$; сигма = 34.6 °C; $\chi^2 = 0.77$ (12)

Диапазон давлений 3–21 кб

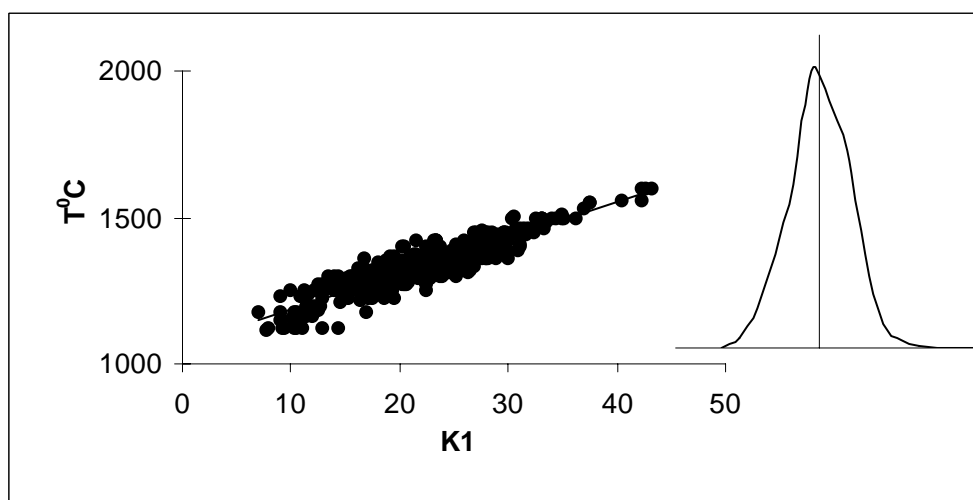


Рис. II.Ш.4.7 gl–орх (формула PGLRT). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = \text{Ln}[\text{Mg}_m - \text{Al}_m:2 + \text{P}:2.5]$$

$$T = 426.71K_1 + 102.05(\text{PGLRT1})$$

Диапазон значений T 1430–1950 °C

Относительная ошибка 3–2 %

$R = 0.95$; $N = 47$; $N_1 = 46$; сигма = 44 °C; $\chi^2 = 1.86$ (8)

Диапазон давлений 22–110 кб

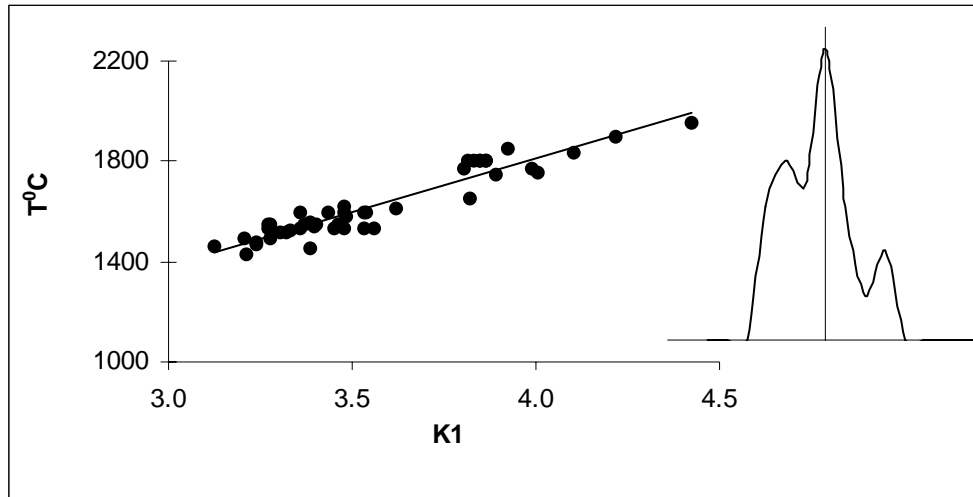


Рис. П.Ш.4.8 gl–орх (формула PGLRT1). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 3.1\text{Mg}_m + \text{P} - 0.8\text{Si}_m - \text{Fe}^{2+}_m:4 - 2\text{Ca}_m + \text{Na}_m - \text{Ti}_m$$

$$T = 4.39K_1 + 1309.22(\text{PGLRT2})$$

Диапазон значений T 1115–1900 °C

Относительная ошибка 4–2 %

$R = 0.95$; $N = 522$; $N_1 = 501$; сигма = 38.6 °C; $\chi^2 = 6.68$ (16)

Диапазон давлений 0.1–80 кб

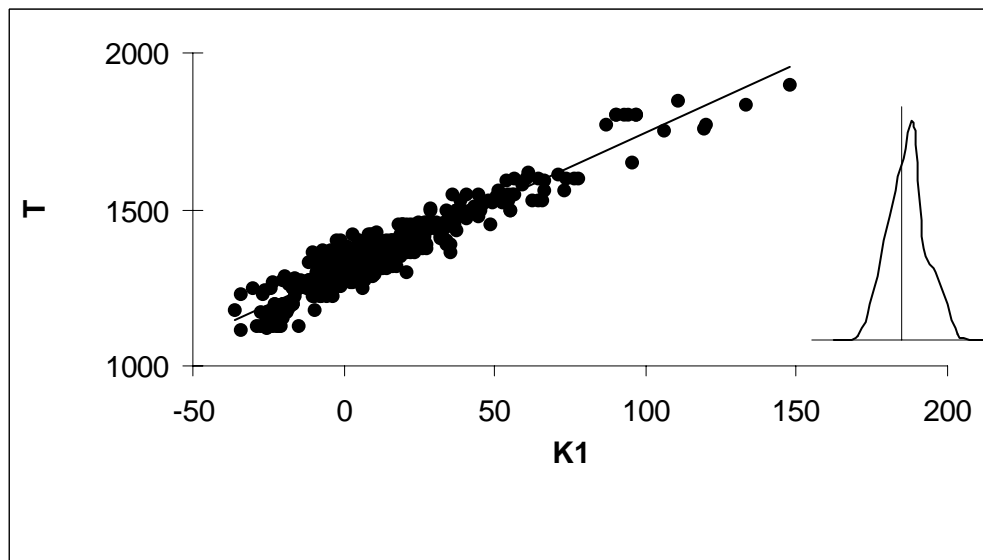


Рис. П.Ш.4.9 gl–орх (формула PGLRT2). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = Fe^{2+}_m:5 - Si_m:4 - Mg_m:5 - Ca_m:4 + (Na_m + K_m) + T:12$$

$$P = 0.45K_1 - 32.79(PGLRP)$$

Диапазон значений P 3–21 кб.

Относительная ошибка 78–11%

$$R = 0.75; N = 448; N_1 = 447; \text{сигма} = 2.34 \text{ кб}; \chi^2 = 4.04 (12)$$

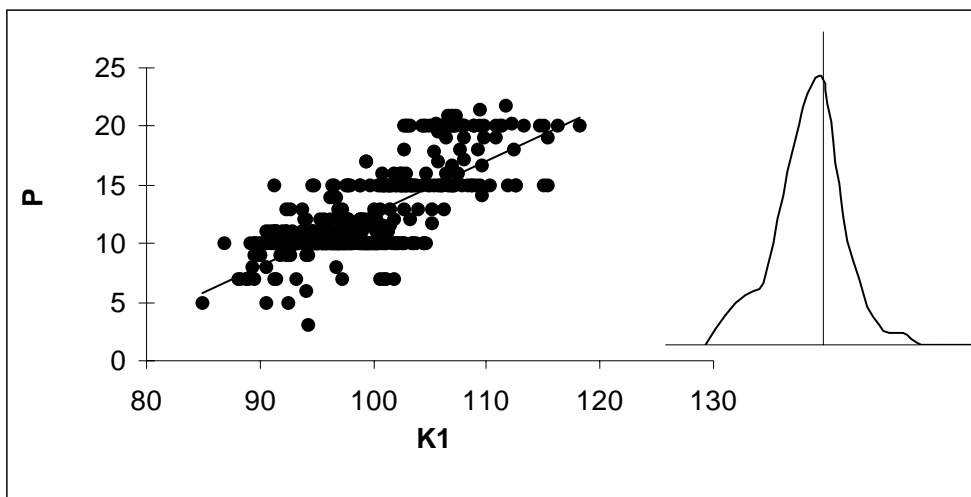


Рис. II.Ш.4.10 gl–орх (формула PGLRP). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = [Mg_m - Al_m - (Na_m + K_m):2]:10$$

$$P = 20.19K_1 + 6.72(PGLRP1)$$

Диапазон значений P 22–110 кб

Относительная ошибка 30–6%

$$R = 0.92; N = 47; N_1 = 46; \text{сигма} = 7 \text{ кб}; \chi^2 = 4.11 (8)$$

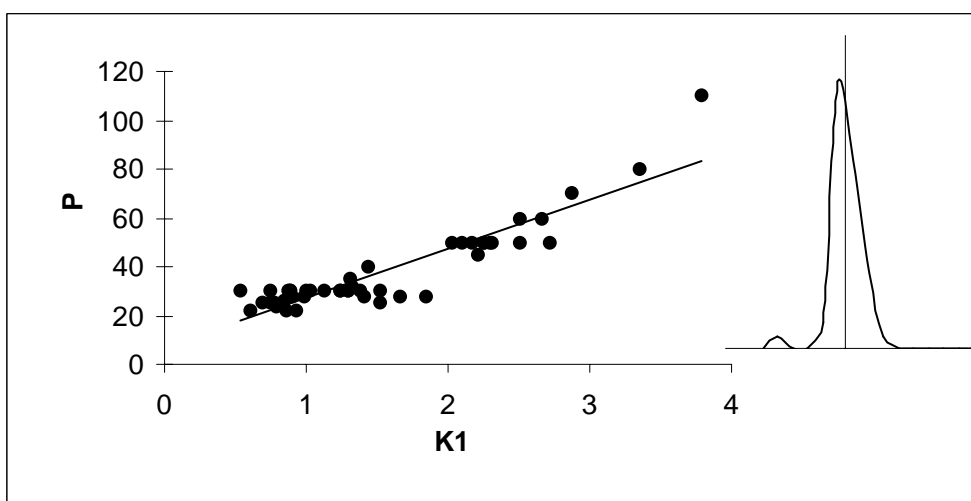


Рис. II.Ш.4.11 gl–орх (формула PGLRP1). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в расплаве

$$K_1 = Mg:(Si_m + Al_m + Na_m + K_m)$$

$$T = 866.37K_1 + 1120.19(PGORR)$$

Диапазон значений T 925–1950 °C;

Относительная ошибка 6–3 %

$R = 0.9$; $N = 522$; $N_1 = 513$; сигма = 57.5 °C; $\chi^2 = 3.24$ (16)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

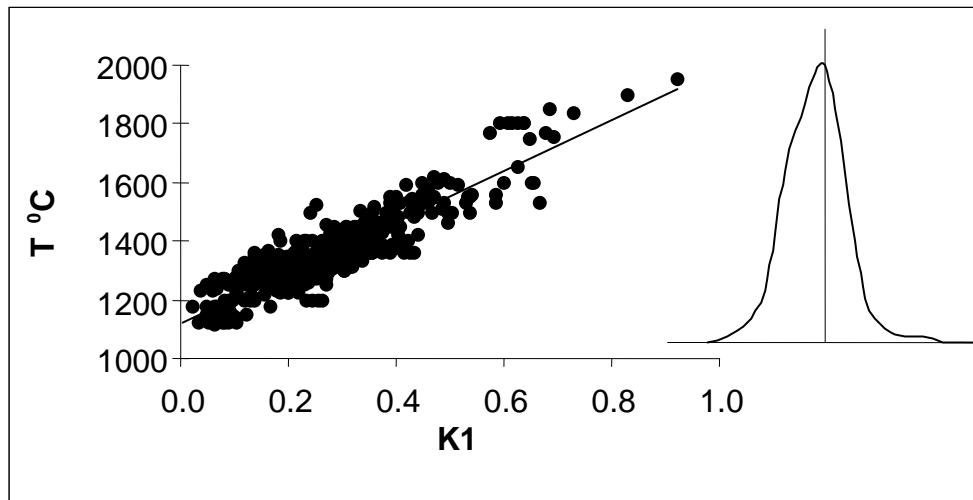


Рис. П.Ш.4.12 gl–орх (формула **PGORR**). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_m \cdot 1.7 + Al_m; K_2 = Mg_m + Fe^{2+}_m + Ti_m$$

$$K_2 = -1.59K_1 + 92.21(PGORR1)$$

Диапазон значений K_2 1.7–52; K_1 25–58

Относительная ошибка 100–3 %

$R = -0.98$; $N = 477$; $N_1 = 470$; сигма = 1.51; $\chi^2 = 7.16$ (12)

Диапазон давлений 0.1–110 кб

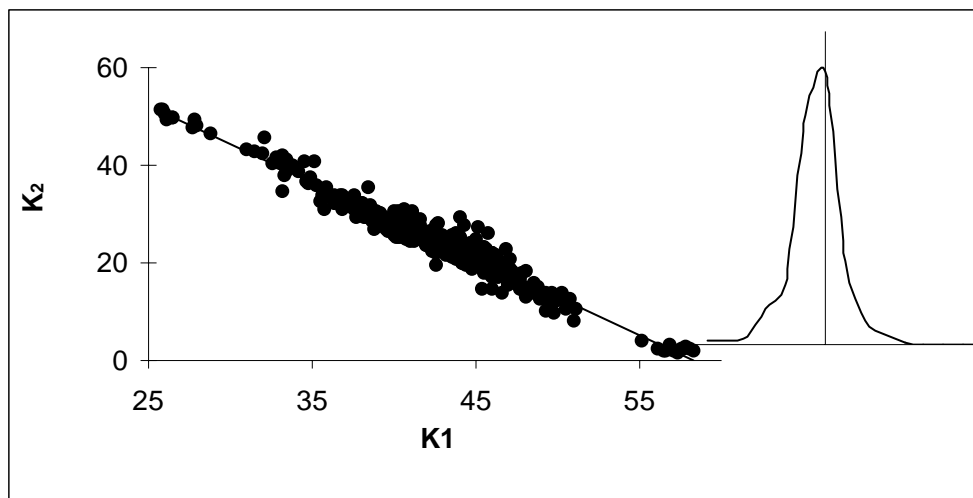


Рис. П.Ш.4.13 gl–орх (формула **PGORR1**). Зависимость величины K_2 от величины K_1 и распределение среднеквадратичной ошибки.

6.5. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с клинопироксеном

Эта выборка представлена 552 точками. Для расчета магния при высоких давлениях была сформирована выборка 22–75 кб – 80 т. Для расчета величины давления были отброшены точки с давлением < 5 кб – 53 т. и сформирован массив с точками, где давление > 21 кб – 80 т.

Таблица П.Ш.5.1 гл–срх. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с клинопироксеном.

PAUG		Стекла	
SiO ₂	38–63.84	Si	37.04–61.56
TiO ₂	0–8.5	Ti	0–6.35
Al ₂ O ₃	2.23–24.01	Al	2.45–25.76
FeO	2.65–28.9	Fe	2.02–23.56
MnO	0–0.52	Mn	0–0.42
MgO	0.81–31.3	Mg	1.14–40.79
CaO	2.84–19.1	Ca	2.86–18.72
Na ₂ O	0–7.71	Na	0–13.7
K ₂ O	0–6.72	K	0–7.95
Cr ₂ O ₃	0–1.31	Cr	0–0.94
T °C	1100–1963	P, кб	1.5–75

Примечание. Диапазон для давлений кристаллизации P 1.5–75 кб, температур кристаллизации T 1100–1963 °C.

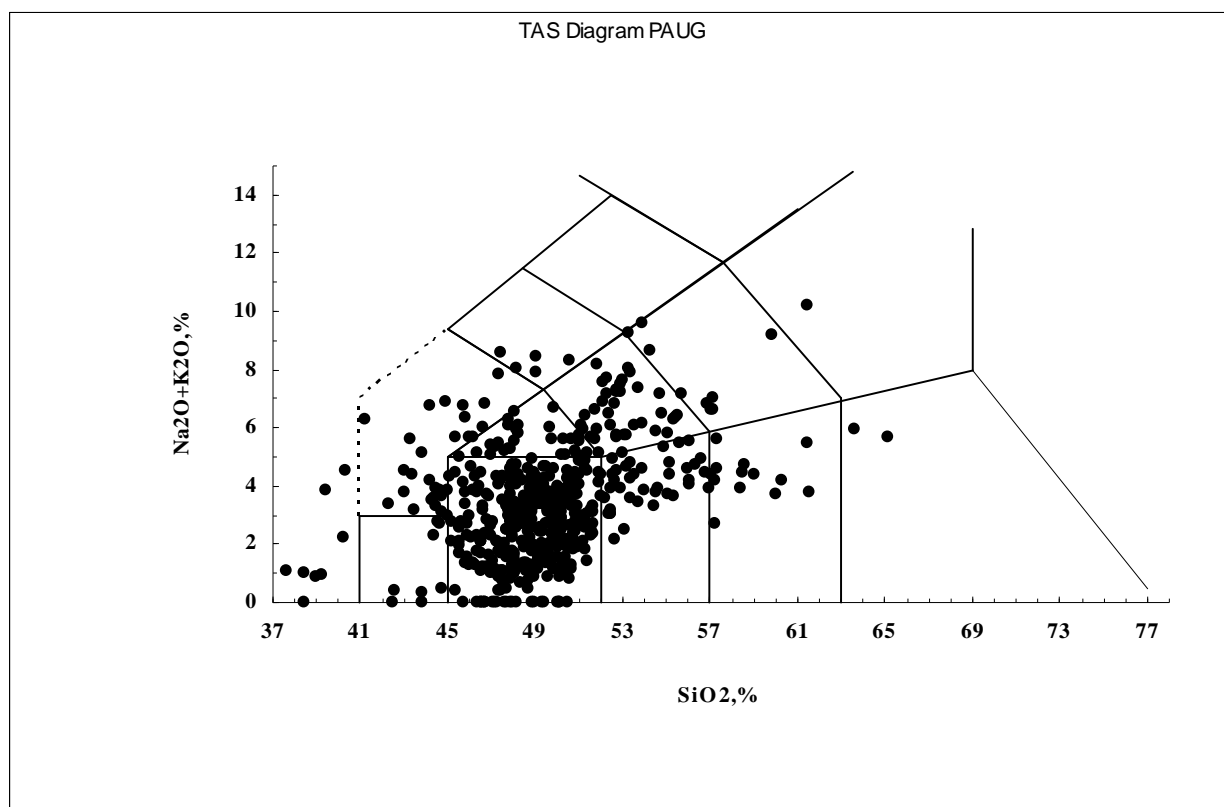


Рис. П.Ш.5.1 гл–срх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами клинопироксена, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = Ti_m + Al_m + Fe^{2+}_m + Mg_m$$

$$Si_m = -0.76K_1 + 74.81(\text{PAUGS})$$

Диапазон значений Si_m 37–60.5 (атом. %)

Относительная ошибка 3–2 %

$R = -0.92$; $N = 552$; $N_1 = 544$; $\sigma = 1.27$; $\chi^2 = 2.59$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

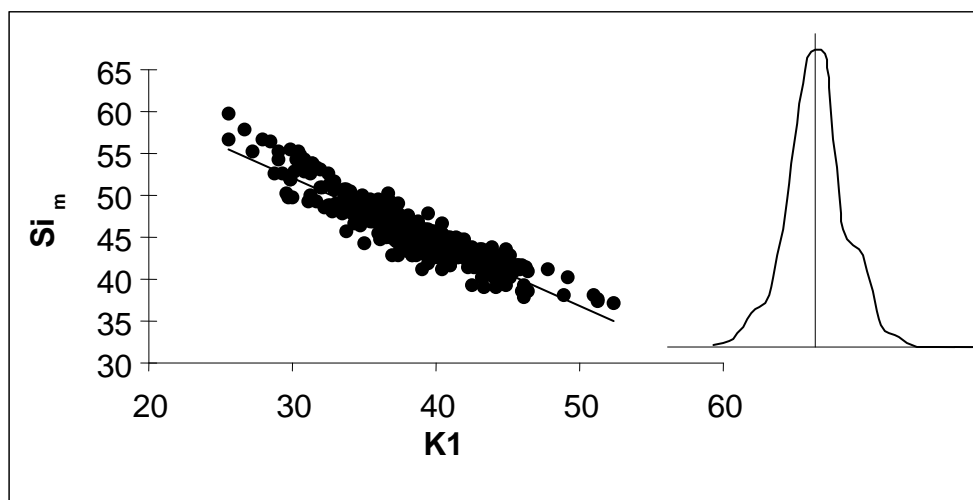


Рис. II.Ш.5.2 gl-срх (формула PAUGS). Зависимость содержаний Si_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = Si_m:2 + Ti_m + Fe^{2+}_m + Mg_m + P:7$$

$$Al_m = -0.47K_1 + 39.74(\text{PAUGA})$$

Диапазон значений Al_m 2.4–25.8.5 (атом. %)

Относительная ошибка 63–6 %

$R = -0.85$; $N = 552$; $N_1 = 546$; $\sigma = 1.5$; $\chi^2 = 5.43$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

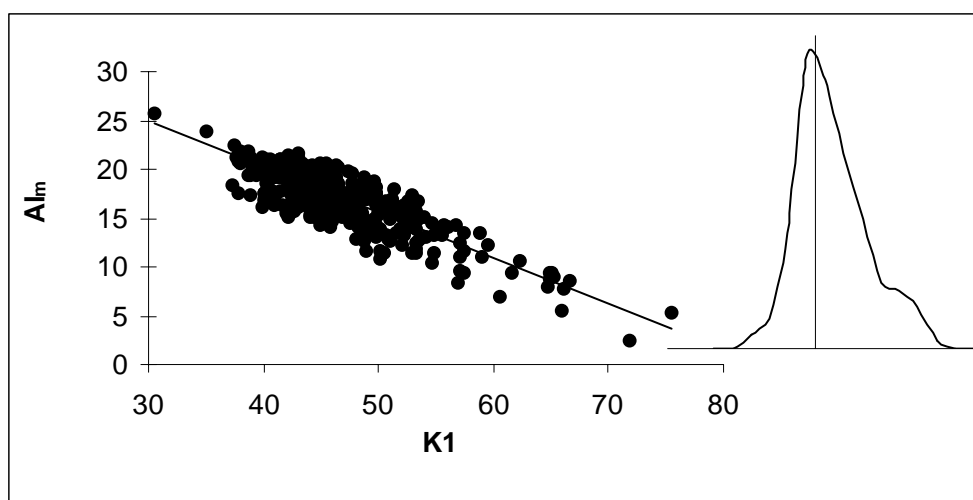


Рис. II.Ш.5.3 gl-срх (формула PAUGA). Зависимость содержаний Al_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Si + 2Ti_m + Al_m:3 - Ca_m:3 + Na_m - T:50$$

$$Mg_m = -0.63K_1 + 30.7(\text{PAUGM})$$

Диапазон значений Mg_m 1.2–26.6 (атом. %)

Относительная ошибка 140–6 %

$R = -0.94$; $N = 552$; $N_1 = 547$; $\sigma = 1.7$; $\chi^2 = 1.3$ (16)

Диапазон давлений 1.5–70 кб

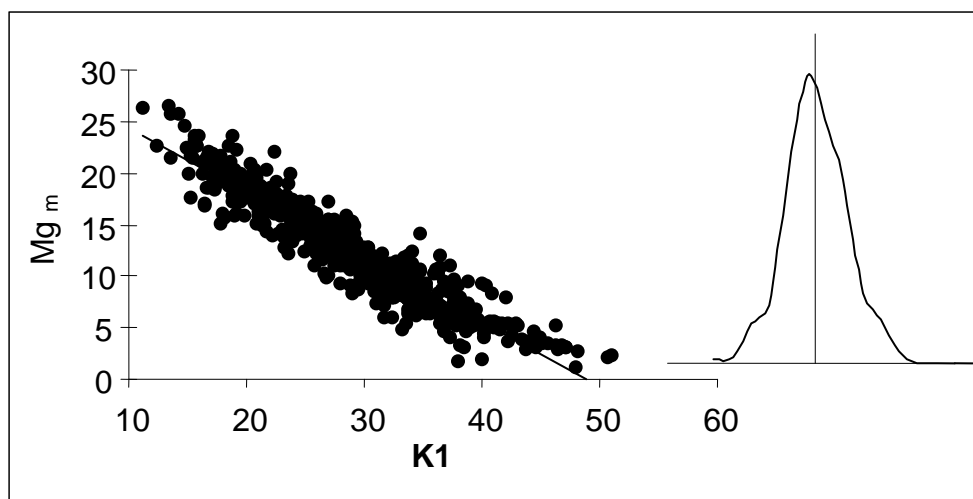


Рис. П.Ш.5.4 gl–срх (формула PAUGM). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Ln(Si + 3Ti_m + Al_m + 1.5Na_m)$$

$$Mg_m = -43.92K_1 + 201.41(\text{PAUGM1})$$

Диапазон значений Mg_m 1.7–26.6 (атом. %)

Относительная ошибка 125–8 %

$R = -0.96$; $N = 80$; $N_1 = 79$; $\sigma = 2.1$; $\chi^2 = 2.3$ (8)

Диапазон давлений 22–75 кб

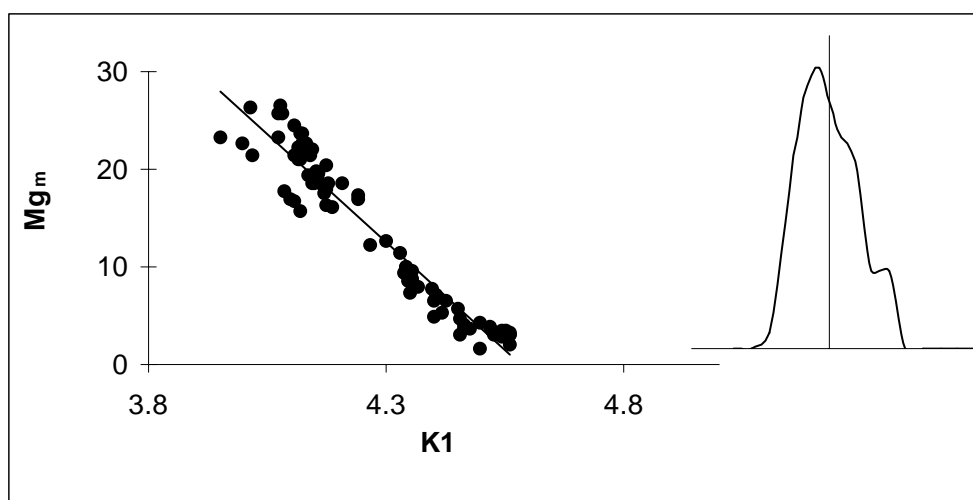


Рис. П.Ш.5.5 gl–срх (формула PAUGM1). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Ti_m + Al_m:2 + Mg_m + P:2$$

$$T = 15.26K_1 + 858.79(\text{PAUGT})$$

Диапазон значений T 1100–1750 °C

Относительная ошибка 4–3 %

$R = 0.9$; $N = 552$; $N_1 = 543$; сигма = 44.4 °C; $\chi^2 = 1.78$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

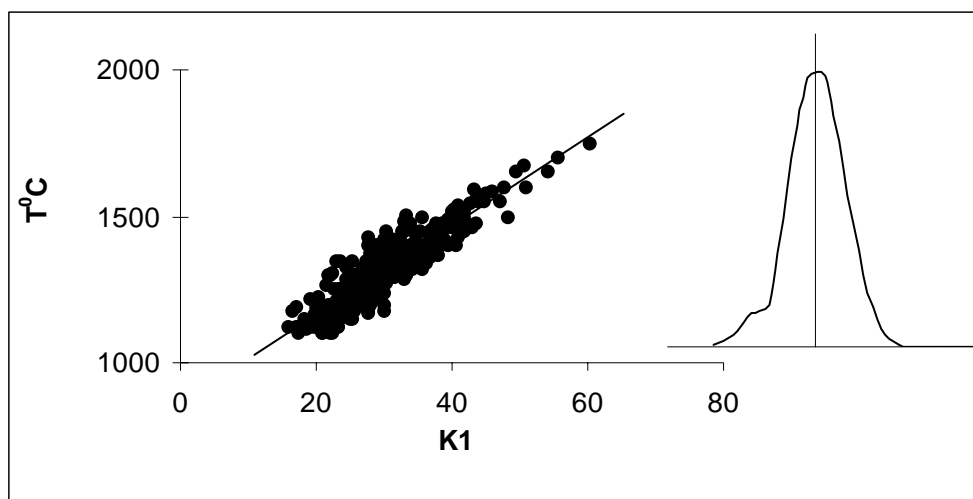


Рис. П.Ш.5.6 gl–срх (формула PAUGT). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Al:2 + Mg_m + Na_m:3 + P:2$$

$$T = 15.4K_1 + 845.49(\text{PAUGT1})$$

Диапазон значений T 1100–1750 °C

Относительная ошибка 4–3 %

$R = 0.89$; $N = 552$; $N_1 = 543$; сигма = 45.7 °C; $\chi^2 = 2.39$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

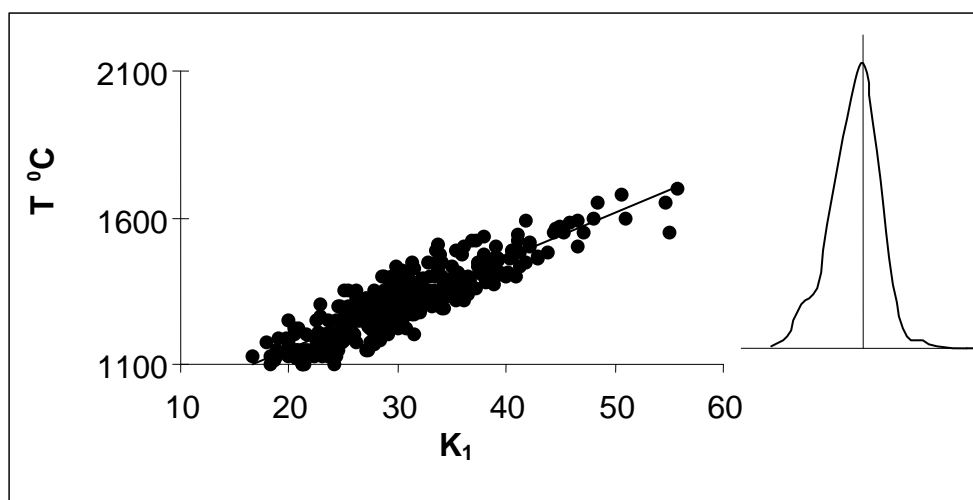


Рис. П.Ш.5.7 gl–срх (формула PAUGT1). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_m:6 + Ti_m + Al_m:5 + Mg_m + Na_m:6 + P:2$$

$$T = 15.76K_1 + 793.08(PAUGT2)$$

Диапазон значений T 1100–1750 °C

Относительная ошибка 4–3 %

R = 0.91; N = 552; N₁ = 537; сигма = 41 °C; $\chi^2 = 3.39$ (16)

Диапазон давлений 1.5–75 кб

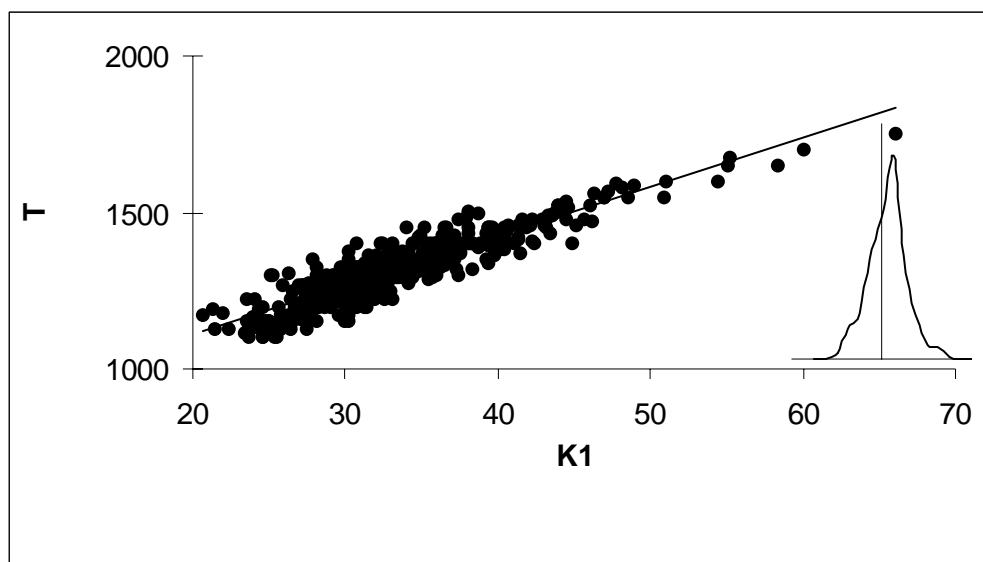


Рис. П.Ш.5.8 gl–срх (формула PAUGT2). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = T:14 + Ti_m:2 - Al_m:2 - Mg_m:2 - Ca_m$$

$$P = 0.96K_1 - 51.39(PAUGP)$$

Диапазон значений P 5–0 кб

Относительная ошибка 64–6 %

R = 0.9; N = 532; N₁ = 527; сигма = 3.2 кб; $\chi^2 = 1.46$ (16)

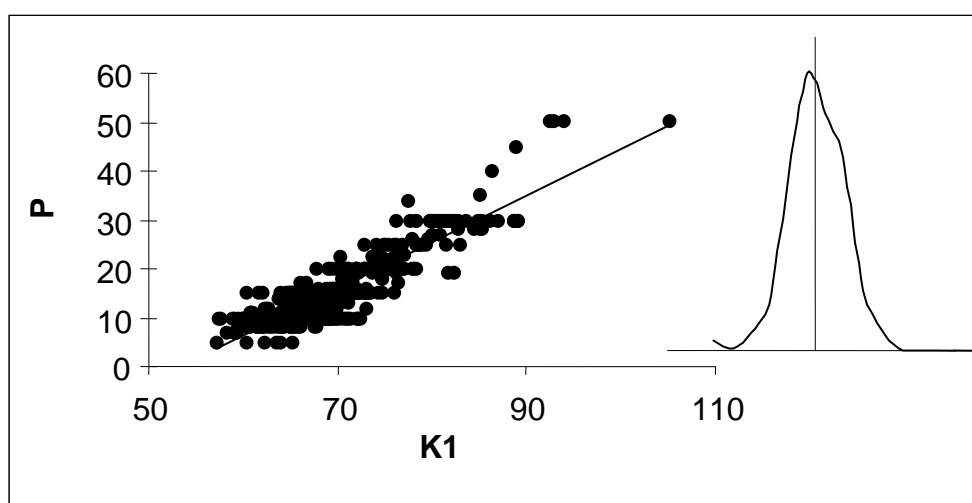


Рис. П.Ш.5.9 gl–срх (формула PAUGP). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = T:18 + Na_m:2 - Al_m:2 - Mg_m:2 - Ca_m$$

$$P = 1.61K_1 - 65.69(\text{PAUGP1})$$

Диапазон значений P 22–0 кб

Относительная ошибка 23–7 %

$R = 0.85$; $N = 80$; $N_1 = 78$; сигма = 5 кб; $\chi^2 = 2.93 (8)$

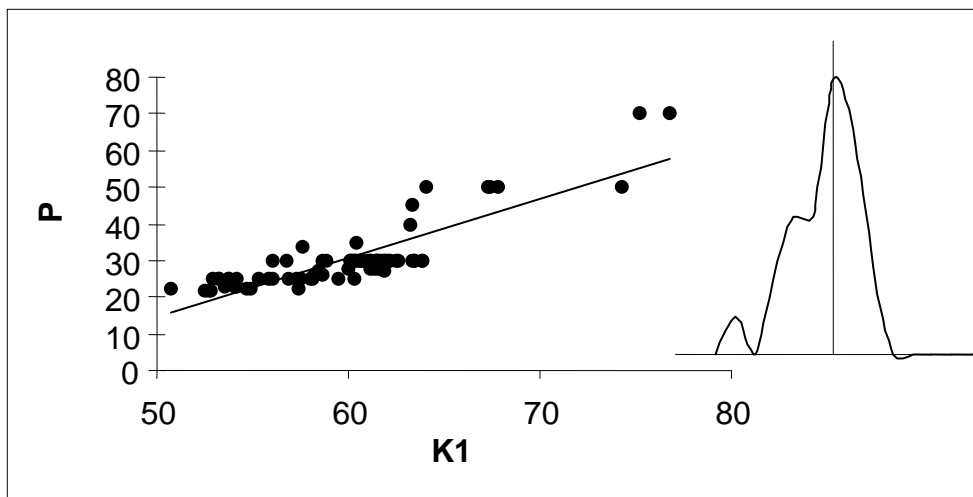


Рис. П.Ш.5.10 gl-срх (формула PAUGP1). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в расплаве

$$K_1 = Si_m + 2Ti_m + Na_m; K_2 = Mg_m + Ca_m - P:8$$

$$K_2 = -1.13K_1 + 79.81(\text{PAUGR})$$

Диапазон значений K_2 3.3–39; K_1 41–72

Относительная ошибка 82–7 %

$R = -0.92$; $N = 552$; $N_1 = 546$; сигма = 2.7; $\chi^2 = 0.97 (16)$

Диапазон давлений 1.5–75 кб

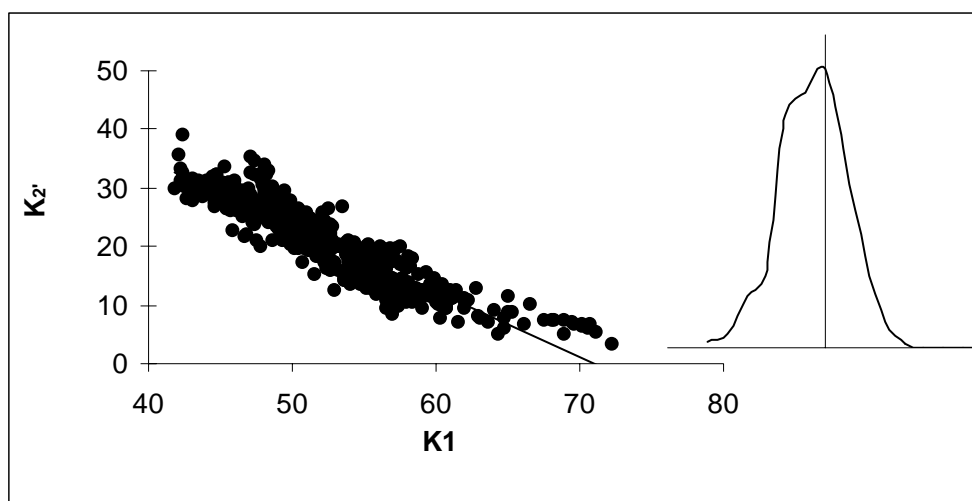


Рис. П.Ш.5.11 gl-срх (формула PAUGR). Зависимость величины K_2 от величины K_1 и распределение среднеквадратичной ошибки.

6.6. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с плагиоклазом

Эта выборка представлена 259 точками. Для расчета алюминия, кальция, величины давления были отброшены точки с содержаниями кальция < 3 % – 230 точек.

Таблица П.Ш.6.1 гл. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с плагиоклазом.

PGPL		Стекла	
SiO ₂	42.8–76.7	Si	41.73–73.11
TiO ₂	0–6.66	Ti	0–4.78
Al ₂ O ₃	11.5–24.01	Al	12.75–25.76
FeO	1.4–20.9	Fe	0–16.87
MnO	0–0.41	Mn	0–0.33
MgO	0.01–14.13	Mg	0.01–18.85
CaO	0.73–15.54	Ca	0.74–15.46
Na ₂ O	0–7.71	Na	0–13.7
K ₂ O	0–10.12	K	0–11.86
Cr ₂ O ₃	0–0.17	Cr	0–0.13
T °C	840–1430	P, кб	2–27

Примечание. Диапазон для давлений кристаллизации P кб 2–27 кб , температур кристаллизации T 840–1430 °C.

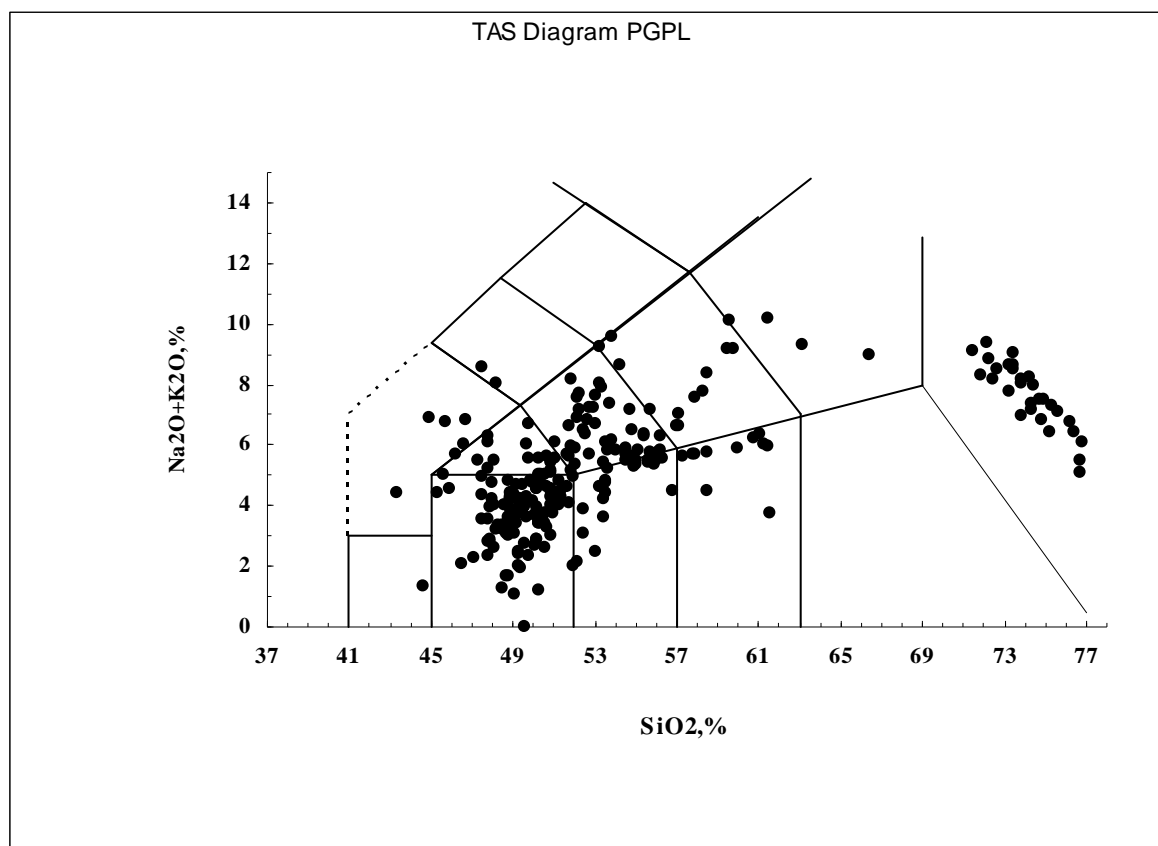


Рис. П.Ш.6.1 гл–пл. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами плагиоклаза, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = Fe_m^{2+} + Ca_m + P:3$$

$$Si_m = -1.32K_1 + 73.96(PGPLS)$$

Диапазон значений Si_m 41.7–73.1 (атом. %)

Относительная ошибка 6–4 %

$R = -0.94$; $N = 259$; $N_1 = 259$; сигма = 2.61; $\chi^2 = 0.89$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

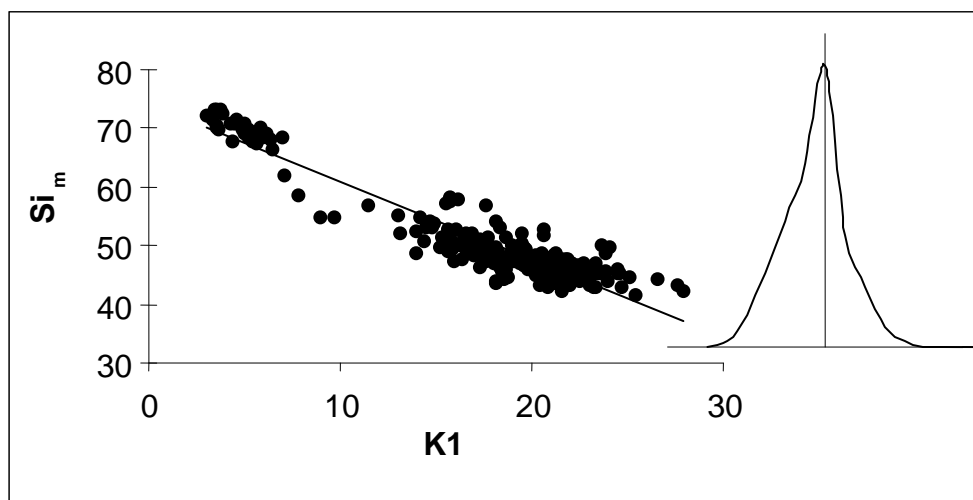


Рис. II.Ш.6.2 gl-pl (формула PGPLS). Зависимость содержаний Si_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = T:19 - Mg_m:3 - Fe_m^{2+}$$

$$Al_m = 0.38K_1 - 1.92(PGPLA)$$

Диапазон значений Al_m 12.7–25 (атом. %)

Относительная ошибка 10–5 %

$R = 0.82$; $N = 230$; $N_1 = 227$; сигма = 1.24; $\chi^2 = 1.36$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

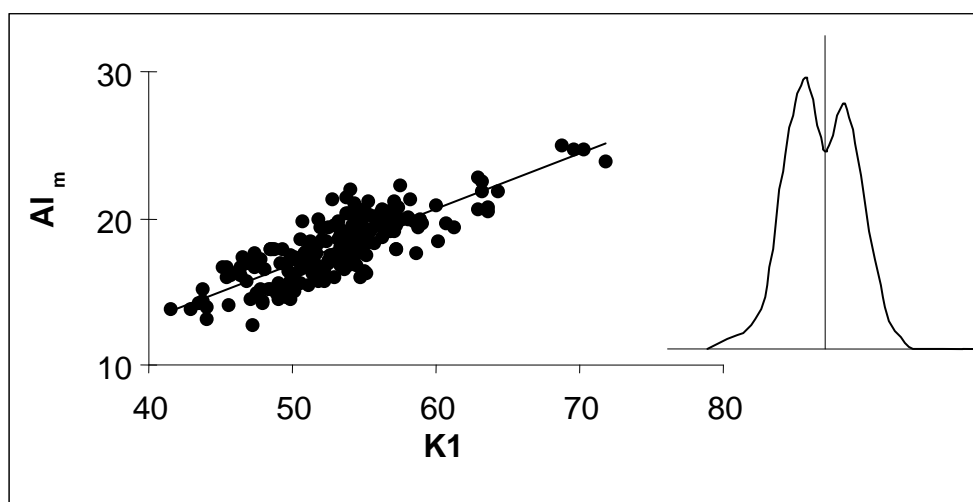


Рис. II.Ш.6.3 gl-pl (формула PGPLA). Зависимость содержаний Al_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Na_m + K_m - T:250$$

$$Ca_m = -0.75K_1 + 10.83(PGPLC)$$

Диапазон значений Ca_m 3.4–15.5 (атом. %)

Относительная ошибка 32–7 %

$R = -0.87$; $N = 230$; $N_1 = 229$; $\sigma = 1.1$; $\chi^2 = 1.64$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

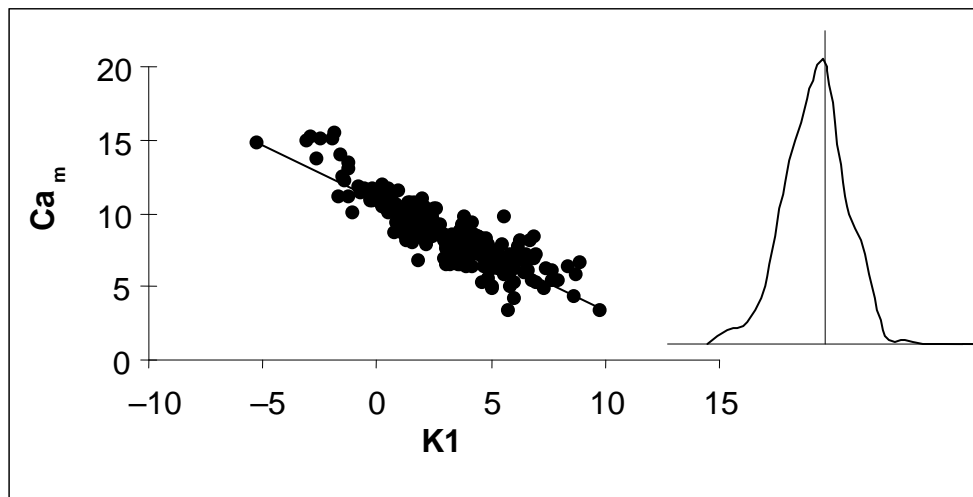


Рис. П.Ш.6.4 gl-pl (формула PGPLC). Зависимость содержаний Ca_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Si_m + Ti_m - Al_m - P:2$$

$$T = -11.79K_1 + 1515.22(PGPLT)$$

Диапазон значений T 840–1430 °C

Относительная ошибка 5–3 %

$R = -0.93$; $N = 259$; $N_1 = 257$; $\sigma = 42.6$ °C; $\chi^2 = 1.87$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

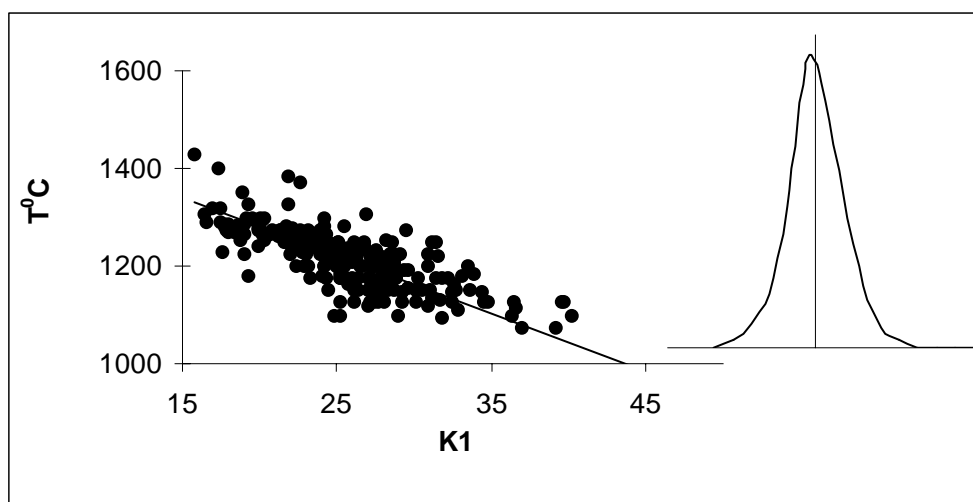


Рис. П.Ш.6.5 gl-pl (формула PGPLT). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = (T + 2.5Si_m - Mg_m - 19Ca_m + 3Na_m + 3K_m):100$$

$$P = 3.83K_1 - 35.6(PGPLP)$$

Диапазон значений P 2–27 кб

Относительная ошибка 135–10 %

R = 0.66; N = 230; N₁ = 229; сигма = 2.7 кб; $\chi^2 = 3.18$ (12)

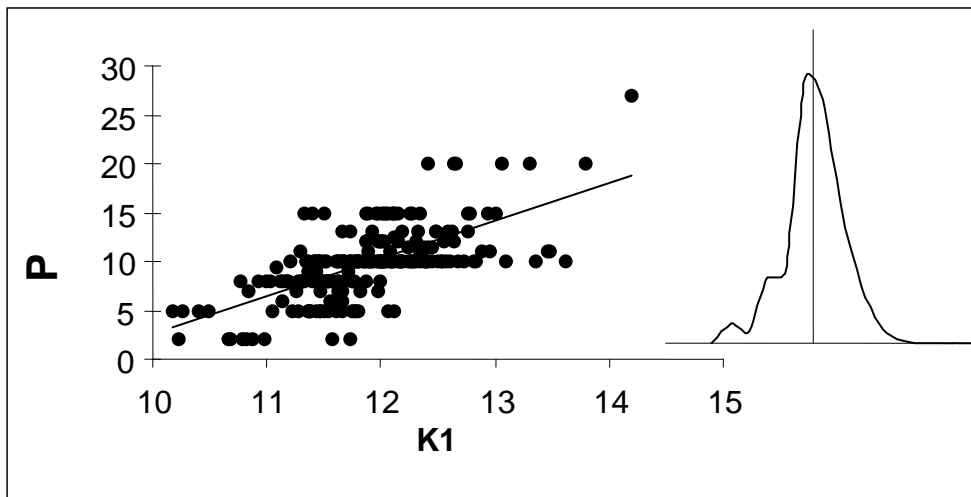


Рис. П.Ш.6.6 gl-pl (формула PGPLP). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в расплаве

$$K_1 = Ti_m:2 + Mg_m:4 + Ca_m; K_2 = Na_m + K_m$$

$$K_2 = -0.82K_1 + 17.07(PGPLR)$$

Диапазон значений K₂ 0.1–14.3; K₁ 4.4–19.6

Относительная ошибка 110–8 %

R = -0.89; N = 230; N₁ = 227; сигма = 1.1; $\chi^2 = 1.36$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

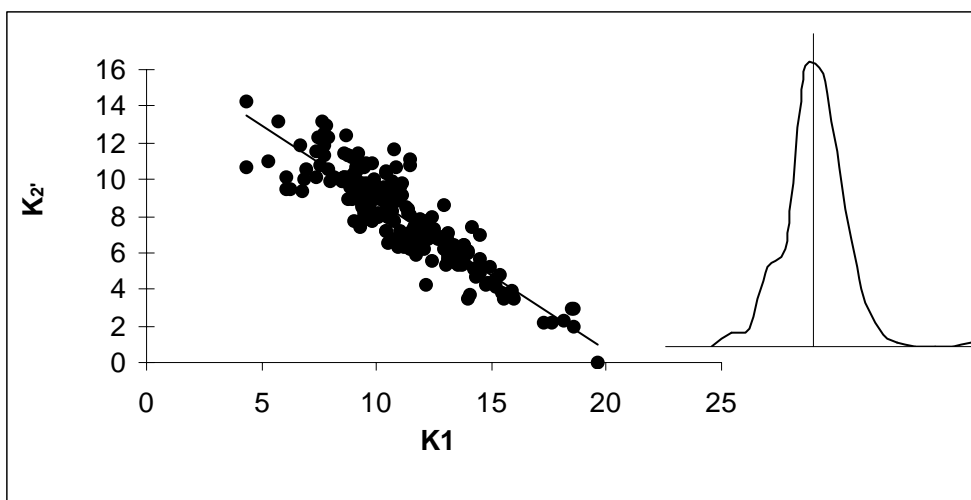


Рис. П.Ш.6.7 gl-pl (формула PGPLR). Зависимость величины K₂ от величины K₁ и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_m + Al_m - Ca_m \cdot 2.6 - P \cdot 12; K_2 = Ti_m \cdot 2 + Fe_m^{2+} + Mg_m + T \cdot 90$$

$$K_2 = -0.8K_1 + 79.72(PGPLRa)$$

Диапазон значений K_2 11–38.3; K_1 52.6–88.6

Относительная ошибка 13–4 %

$R = -0.98$; $N = 259$; $N_1 = 255$; $\sigma = 1.4$; $\chi^2 = 2.03$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

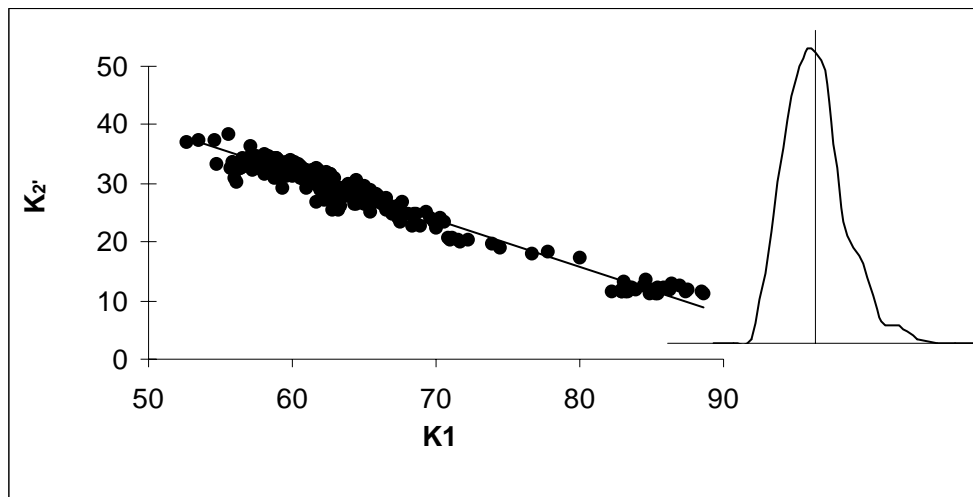


Рис. II.Ш.6.8 gl-pl (формула **PGPLRa**). Зависимость величины K_2 от величины K_1 и распределение среднеквадратичной ошибки.

6.7. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом шпинель–оливин

Эта выборка представлена 167 точками. При расчете равновесия в расплаве были отброшены точки с нулевыми содержаниями титана, натрия и калия в расплаве – 157 точек.

Таблица П.Ш.7.1 gl. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных со шпинелью и оливином.

PSOL		Стекла	
SiO ₂	43.5–54.69	Si	39.41–50.19
TiO ₂	0–1.98	Ti	0–1.36
Al ₂ O ₃	9.6–21	Al	10.48–21.84
FeO	3.31–18.6	Fe	2.54–14.51
MnO	0–0.48	Mn	0–0.38
MgO	5.7–19.16	Mg	7.74–25.81
CaO	3.97–16.3	Ca	3.84–15.82
Na ₂ O	0–7.49	Na	0–12.82
K ₂ O	0–2.6	K	0–3.02
Cr ₂ O ₃	0–1.48	Cr	0–1.06
T°C	1220–1575	P, кб	2–28

Примечание. Диапазон для давлений кристаллизации P 2–28 кб, температур кристаллизации T 1220–1575 °C.

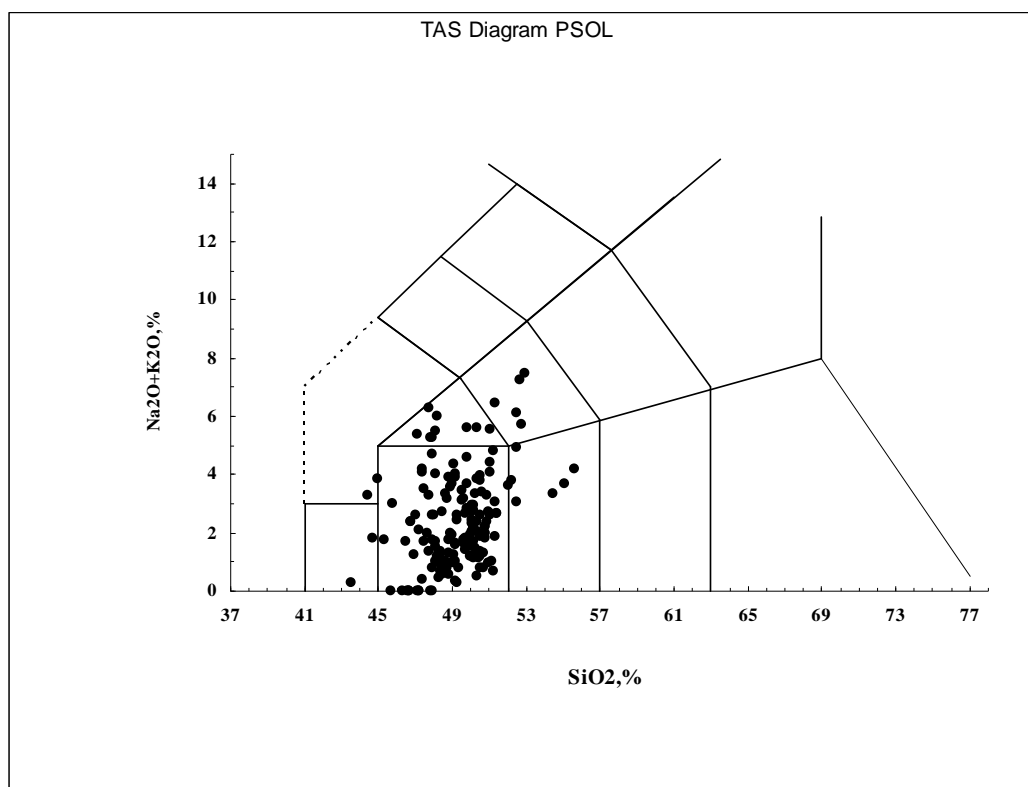


Рис. П.Ш.7.1 gl–sp–ol. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами шпинели и оливина, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = 2Ti_m + Na_m + K_m - T:90 - P:6$$

$$Mg_m = -0.92K_1 + 4.76(PSOLMG)$$

Диапазон значений Mg_m 7.7–24.1 (атом. %)

Относительная ошибка 21–7 %

$R = -0.89$; $N = 167$; $N_1 = 165$; $\sigma = 1.6$; $\chi^2 = 0.91$ (12)

Диапазон давлений 2–28 кб

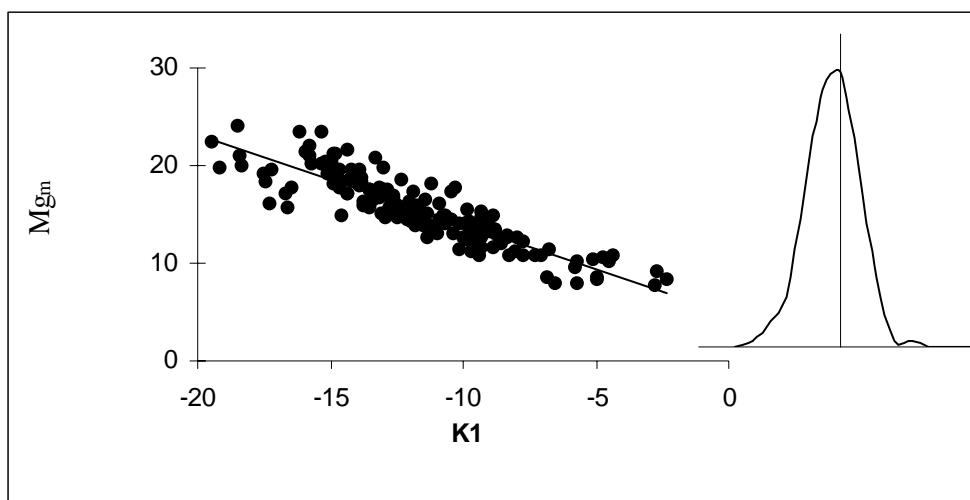


Рис. П.Ш.7.2 gl–sp–ol (формула PSOLMG). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = 3Ti_m + Al_m + Ca_m:3+ (Na_m + K_m)$$

$$Mg_m = -0.72K_1 + 35.12(PSOLM1)$$

Диапазон значений Mg_m 7.7–24.9 (атом. %)

Относительная ошибка 19–6 %

$R = -0.9$; $N = 167$; $N_1 = 165$; $\sigma = 1.5$; $\chi^2 = 2.92$ (12)

Диапазон давлений 2–20 кб

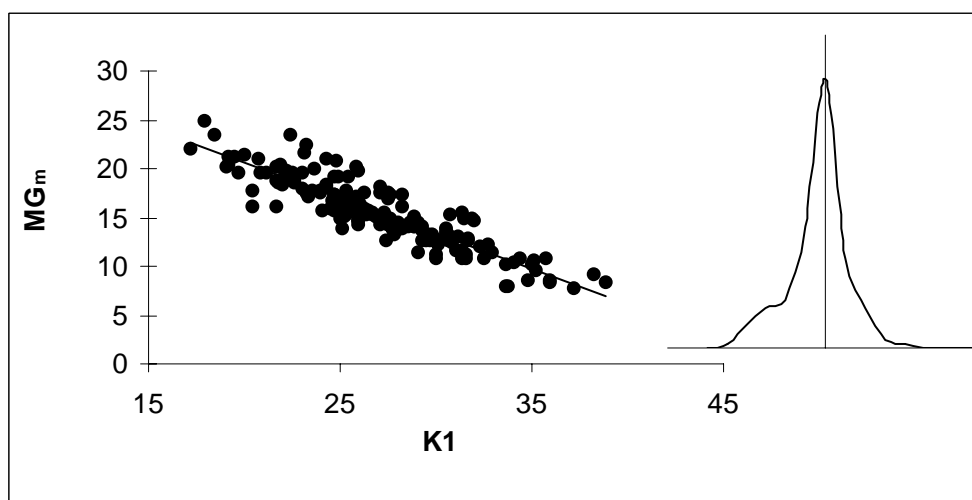


Рис. П.Ш.7.3 gl–sp–ol (формула PSOLM1). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Mg_m + P$$

$$T = 9.35K_1 + 1067.36(PSOLTe)$$

Диапазон значений T 1220–1575 °C

Относительная ошибка 2–1 %

$R = 0.89$; $N = 167$; $N_1 = 165$; сигма = 22.5 °C; $\chi^2 = 2.52$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

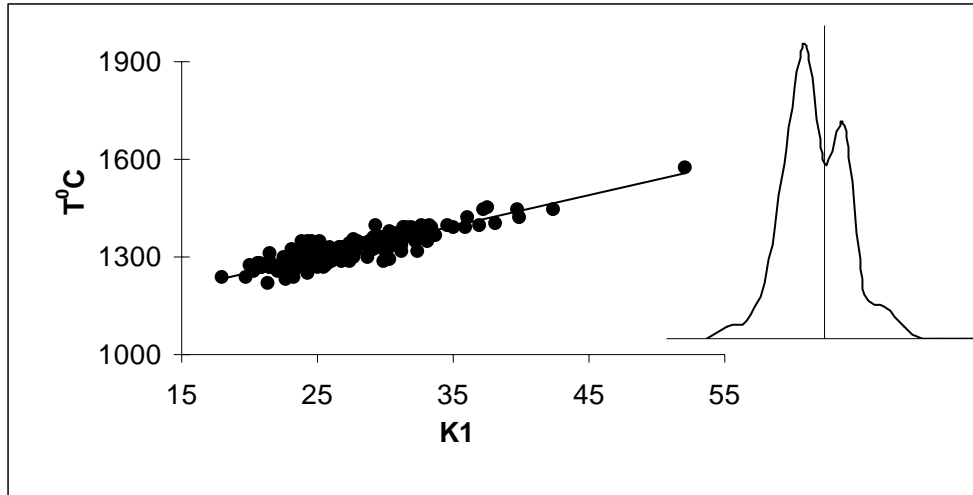


Рис. II.Ш.7.4 gl–sp–ol (формула PSOLTe). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = Si_m:1.6 + Fe^{2+}_m:4 + Mg_m:3 + Ca_m:4 - T:30$$

$$P = -1.5K_1 + 1.73(PSPOL)$$

Диапазон значений P 2–28 кб

Относительная ошибка 100–7 %

$R = -0.84$; $N = 167$; $N_1 = 165$; сигма = 1.7 кб; $\chi^2 = 3.48$ (12)

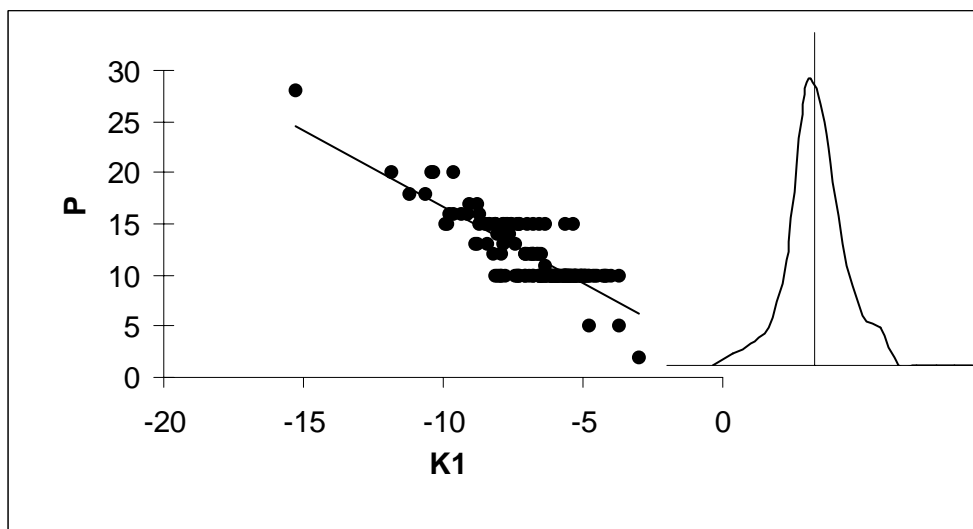


Рис. II.Ш.7.5 gl–sp–ol (формула PSPOL). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов

$$K_1 = 1000(Mg_m + Ca_m):T; K_2 = (Na_m + K_m) + 2Ti_m$$

$$K_2 = -0.87K_1 + 22.76(\text{PSPOLR})$$

Диапазон значений K_2 0.8–14.2; K_1 11.4–26.1

Относительная ошибка 125–7 %

$R = -0.94$; $N = 157$; $N_1 = 157$; $\sigma = 1$; $\chi^2 = 1.33$ (12)

Диапазон давлений 2–28 кб

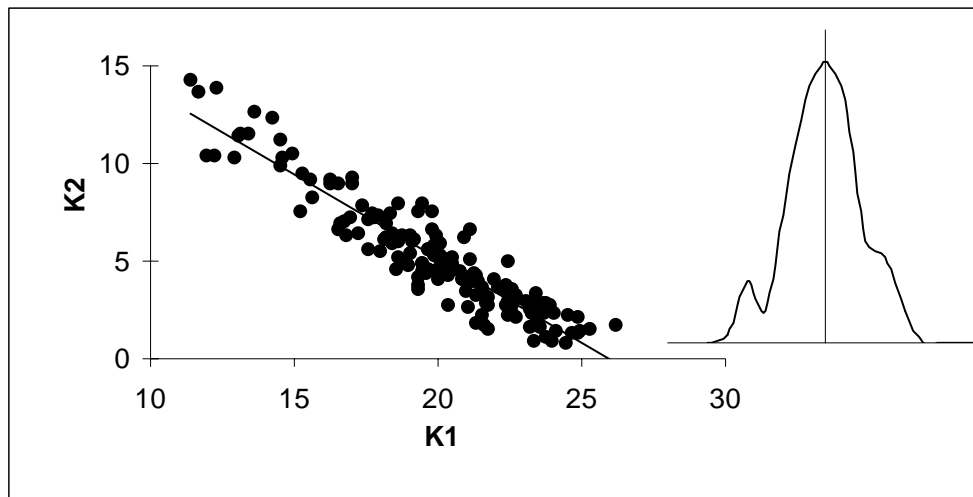


Рис. II.Ш.7.6 gl-sp-ol (формула PSPOLR). Зависимость величины K_2 от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

6.8. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом шпинель–ортопироксен

Эта выборка представлена 159 точками.

Таблица П.Ш.8.1 гл. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных со шпинелью и ортопироксеном.

PSOP		Стекла	
SiO ₂	44.4–54.69	Si	41.14–50.19
TiO ₂	0–2.43	Ti	0–1.72
Al ₂ O ₃	8.82–21	Al	9.44–21.84
FeO	3.31–18.6	Fe	2.54–14.51
MnO	0–0.48	Mn	0–0.38
MgO	5.57–19.16	Mg	7.74–25.81
CaO	3.97–14.8	Ca	3.84–14.3
Na ₂ O	0–7.49	Na	0–12.82
K ₂ O	0–2.6	K	0–3.02
Cr ₂ O ₃	0–1.48	Cr	0–1.06
T °C	1210–1455	P, кб	10–20

Примечание. Диапазон для давлений кристаллизации P 10–20 кб, температур кристаллизации T 1210–1455°C.

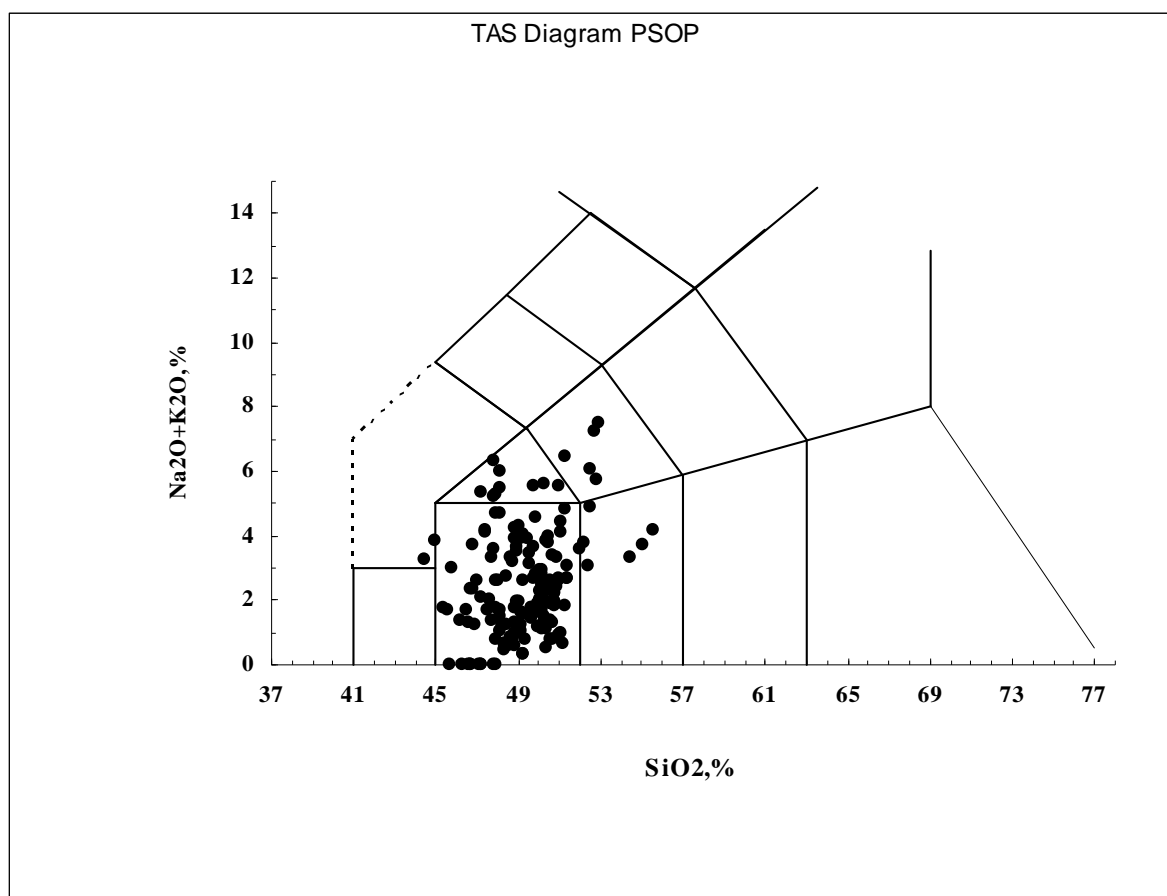


Рис. П.Ш.8.1 гл–сп–орх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами шпинели и ортопироксена, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = 2Ti_m + Al_m \cdot 2 + Ca_m \cdot 2 + (Na_m + K_m)$$

$$Mg_m = -1.08K_1 + 36.61(PSOPM)$$

Диапазон значений Mg_m 7.7–25.8 (атом. %)

Относительная ошибка 18–6 %

$R = -0.93$; $N = 159$; $N_1 = 159$; $\sigma = 1.4$; $\chi^2 = 2.27$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

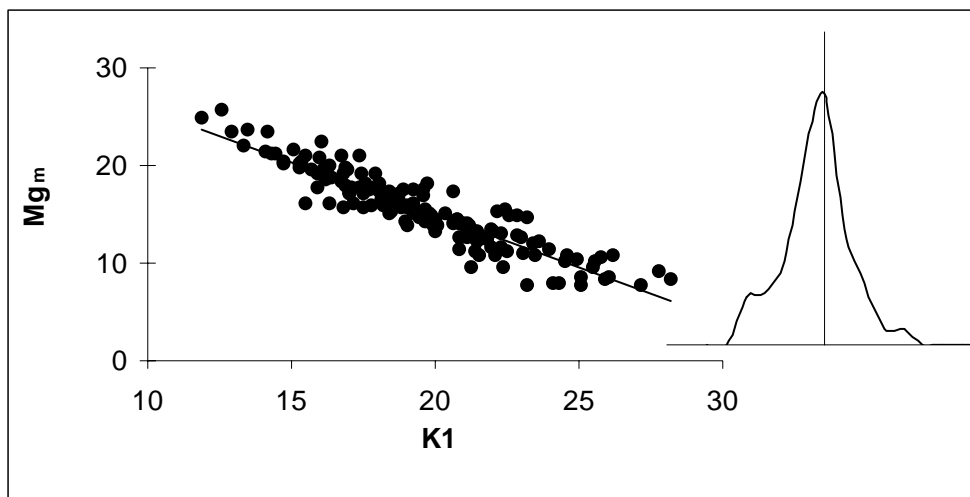


Рис. II.Ш.8.2 gl–sp–орх (формула PSOPM). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = [4(Na_m + K_m) - 18Si_m - 4Al_m - 5Fe^{2+}_m - 9Mg_m + T] : 10$$

$$P = 0.47K_1 - 1.9(PSOPPb)$$

Диапазон значений P 10–20 кб

Относительная ошибка 20–10 %

$R = 0.83$; $N = 159$; $N_1 = 159$; $\sigma = 2$ кб; $\chi^2 = 1.88$ (12)

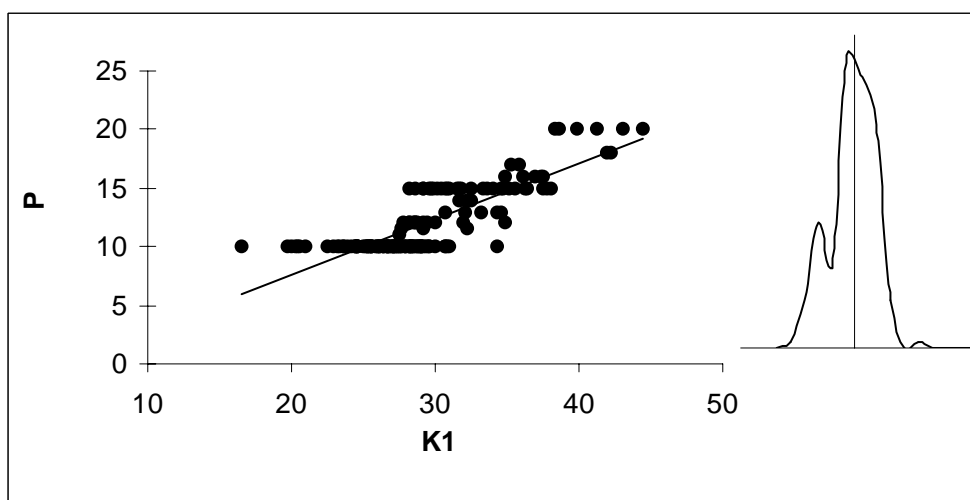


Рис. II.Ш.8.3 gl–sp–орх (формула PSOPPb). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

6.9. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом шпинель–клинопироксен

Эта выборка представлена 162 точками. Для расчета равновесного распределения элементов в расплаве были отброшены точки, в которых сумма натрия, калия и титана равна нулю – 152 точки.

Таблица П.Ш.9.1 гл. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных со шпинелью и авгитом.

PGSV		Стекла	
SiO ₂	44.12–55.87	Si	40.54–53.01
TiO ₂	0–2.43	Ti	0–1.72
Al ₂ O ₃	11.5–21	Al	12.65–21.84
FeO	3.31–20	Fe	2.54–15.79
MnO	0–0.39	Mn	0–0.31
MgO	3.74–16.7	Mg	5.29–22.38
CaO	6.46–14.8	Ca	6.11–14.3
Na ₂ O	0–7.49	Na	0–12.82
K ₂ O	0–2.6	K	0–3.02
Cr ₂ O ₃	0–1.06	Cr	0–0.76
T °C	1150–1455	P, кб	10–20

Примечание. Диапазон для давлений кристаллизации P 10–20 кб , температур кристаллизации T 1150–1455 °C.

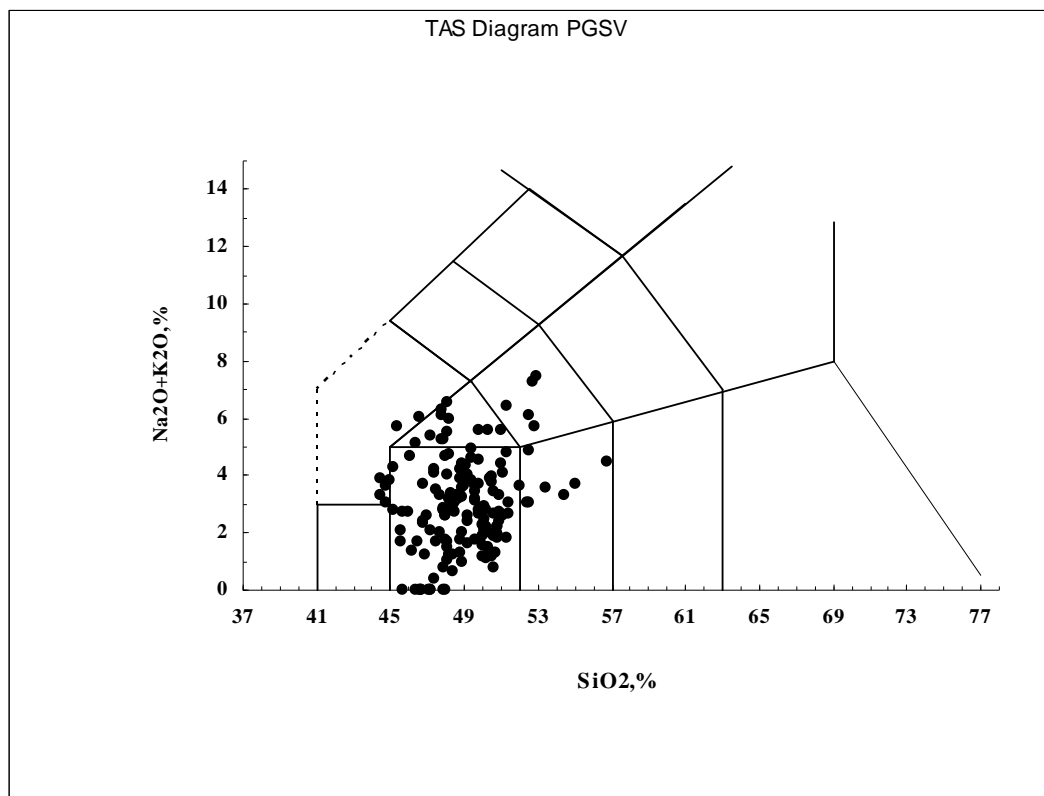


Рис. П.Ш.9.1 гл–сп–срх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами шпинели и клинопироксена, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Ti_m:2 + (Na_m + K_m) + P:9$$

$$Ca_m = -0.59K_1 + 14.69(PGSVCa)$$

Диапазон значений Ca_m 6.1–14.3 (атом. %)

Относительная ошибка 8–3 %

$R = -0.96$; $N = 162$; $N_1 = 160$; $\sigma = 0.48$; $\chi^2 = 1.88$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

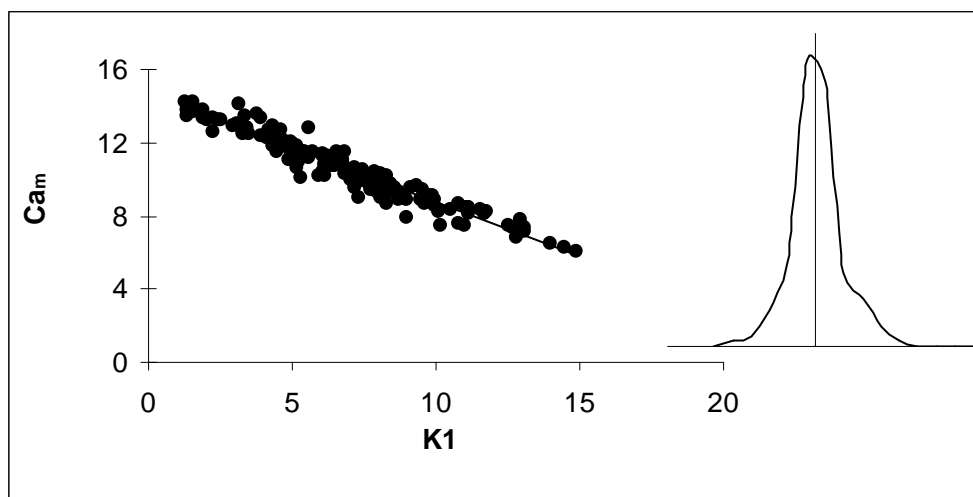


Рис. П.Ш.9.2 gl–sp–срх (формула PGSVCa). Зависимость содержаний Ca_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Ca_m - Fe^{2+}_m:2 - (Na_m + K_m) + P:2$$

$$Mg_m = 0.64K_1 + 8.22(PGSVM)$$

Диапазон значений Mg_m 5.3–22.4 (атом. %)

Относительная ошибка 28–7 %

$R = 0.9$; $N = 162$; $N_1 = 162$; $\sigma = 1.48$; $\chi^2 = 2.1$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

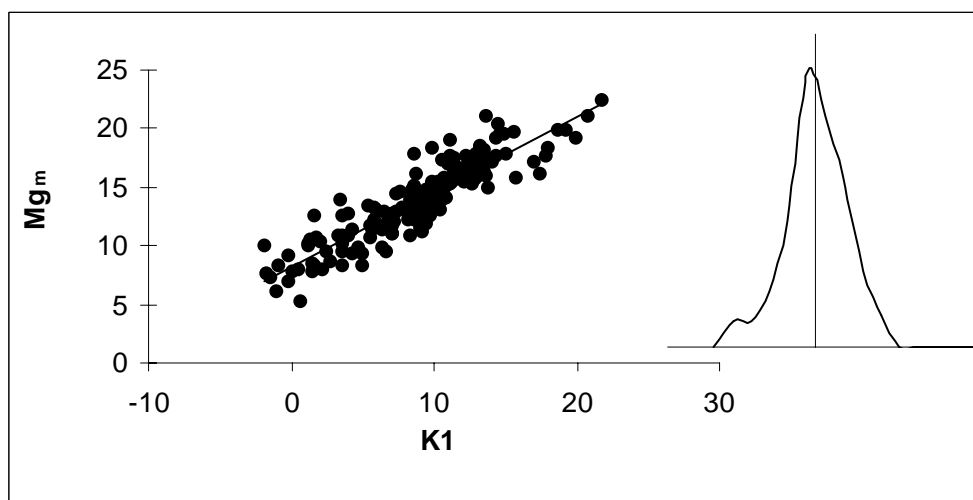


Рис. П.Ш.9.3 gl–sp–срх (формула PGSVM). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Mg_m + P$$

$$T = 8.64K_1 + 1081.38(PGSVT)$$

Диапазон значений T 1150–1455 °C

Относительная ошибка 2–2 %

$R = -0.86$; $N = 162$; $N_1 = 160$; сигма = 24.6 °C; $\chi^2 = 1.25$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

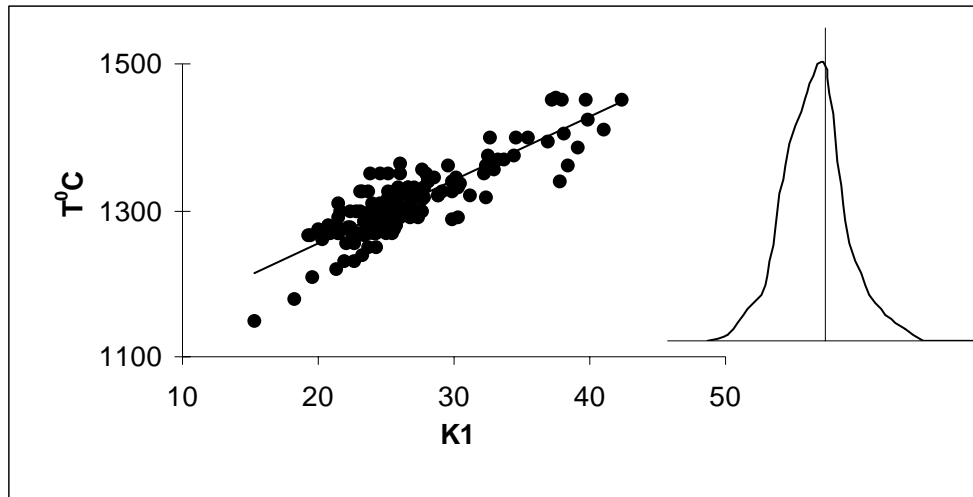


Рис. II.Ш.9.4 gl–sp–срх (формула PGSVT). Зависимость величины T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = (9Al_m + 9Fe_m - 17Si_m - 7Ti_m - 3Mg_m - 7Ca_m + T):10$$

$$P = 0.38K_1 - 12.16(PGSVP)$$

Диапазон значений P 10–20 кб

Относительная ошибка 20–10 %

$R = 0.85$; $N = 162$; $N_1 = 161$; сигма = 2 кб; $\chi^2 = 2.92$ (12)

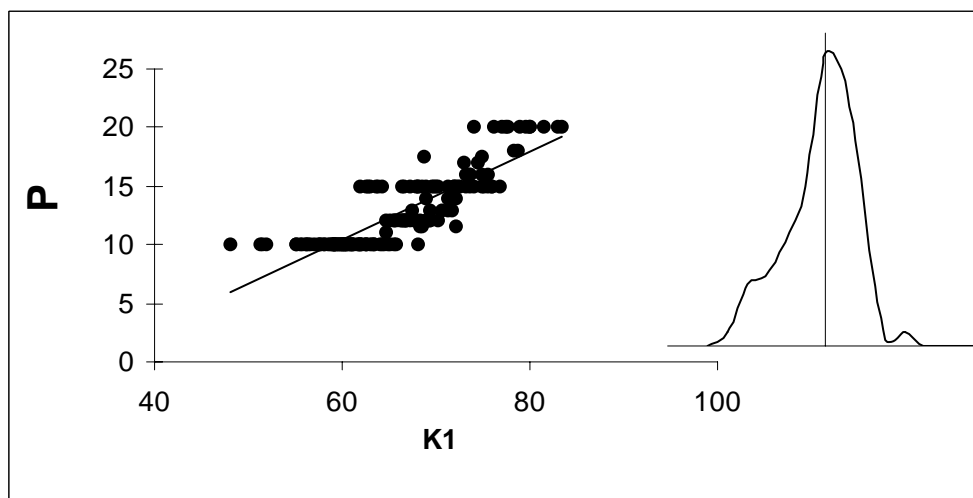


Рис. II.Ш.9.5 gl–sp–срх (формула PGSVP). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в расплаве.

$$K_1 = Ca_m + Mg_m:5 + Fe^{2+}_m:5 - T:200; K_2 = Na_m + K_m + Ti_m$$

$$K_2 = -1.27K_1 + 16.07(PGSVPR)$$

Диапазон значений K_2 1.1–13.5; K_1 2.1–12.2

Относительная ошибка 77–6 %

$R = -0.95$; $N = 152$; $N_1 = 152$; сигма = 0.85; $\chi^2 = 3.61$ (12)

Диапазон давлений 10–20 кб

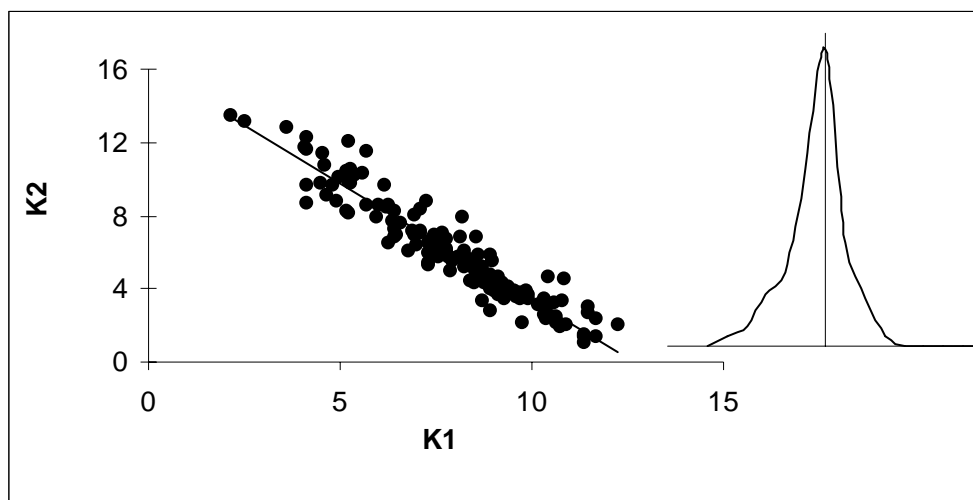


Рис. П.Ш.9.6 gl–sp–срх (формула PGSVPR). Зависимость величины K_2 от величины K_1 и распределение среднеквадратичной ошибки.

6.10. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–ортопироксен

Эта выборка представлена 369 точками. Для расчета давления были удалены точки с давлениями < 5 кб – 358 т. Для расчета равновесного распределения элементов в расплаве были удалены точки с нулевыми содержаниями щелочей в расплаве – 345 т.

Таблица П.Ш.10.1 гл. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с оливином и ортопироксеном.

POLOP		Стекла	
SiO ₂	38.7–54.8	Si	38.14–50.55
TiO ₂	0–6.76	Ti	0.01–1.48
Al ₂ O ₃	3.57–21	Al	0.01–1.48
FeO	3.31–26.7	Fe	0.01–1.48
MnO	0–0.58	Mn	0.01–1.48
MgO	3.85–28.7	Mg	0.01–1.48
CaO	3.15–15.4	Ca	0.01–1.48
Na ₂ O	0–7.49	Na	0.01–1.48
K ₂ O	0–4.77	K	0.01–1.48
Cr ₂ O ₃	0–1.48	Cr	0.01–1.48
T °C	1120–1900	P, кб	1.5–80

Примечание. Диапазон для давлений кристаллизации P 1.5–80 кб, температур кристаллизации T 1120–1900 °C.

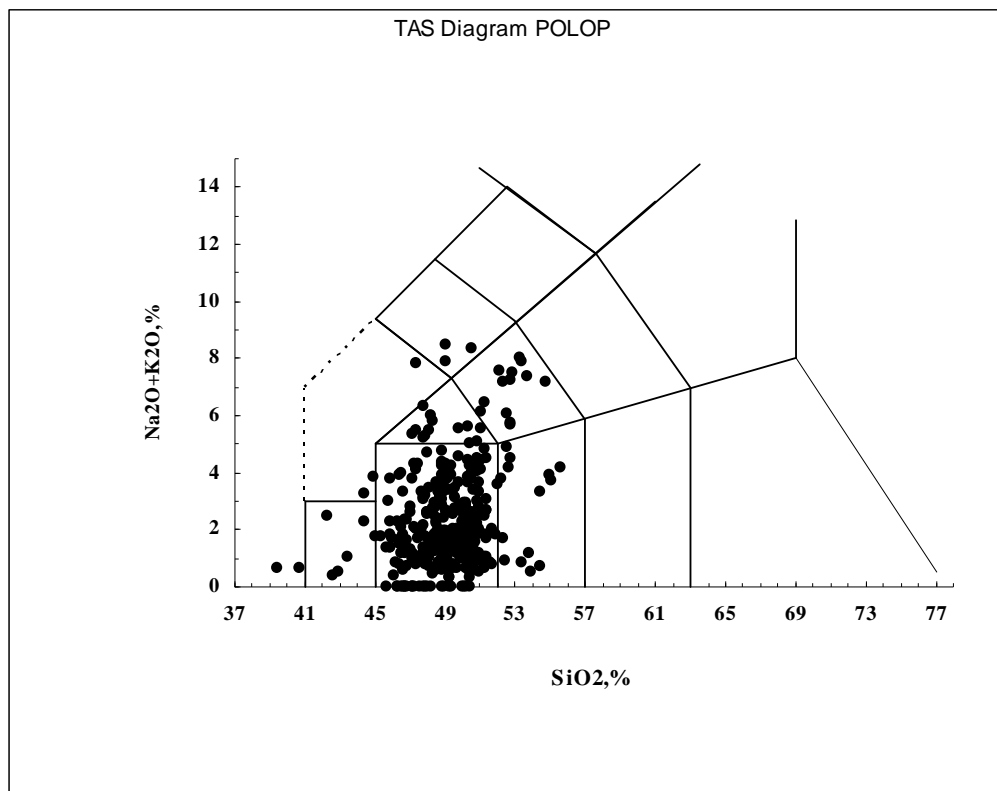


Рис. П.Ш.10.1 гл–ол–орх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливина и ортопироксена, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Ti_m + Al_m + (Na_m + K_m) - P:12$$

$$Mg_m = -0.87K_1 + 34.24(POLOPM)$$

Диапазон значений Mg_m 5.3–38.4 (атом. %)

Относительная ошибка 42–6 %

$R = -0.92$; $N = 369$; $N_1 = 368$; $\sigma = 2.22$; $\chi^2 = 4.7$ (12)

Диапазон давлений 1.5–80 кб

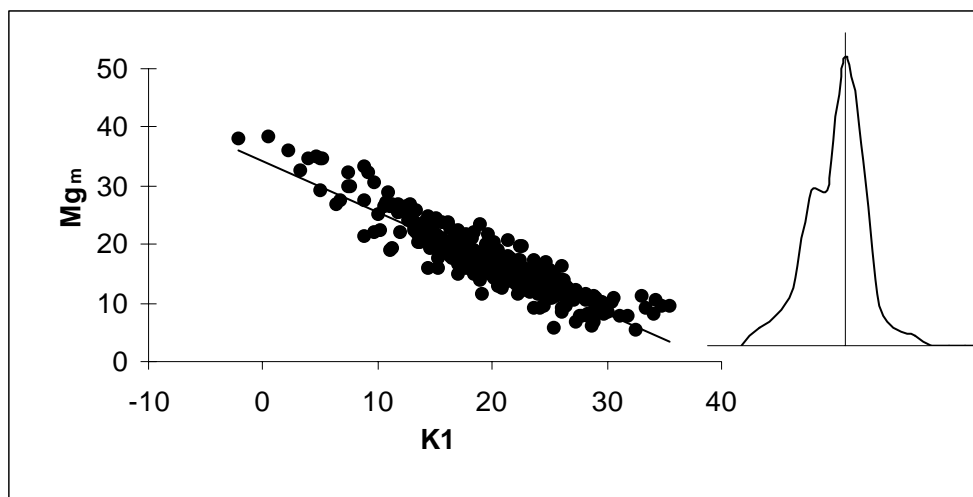


Рис. П.Ш.10.2 gl–ol–орх (формула POLOPM). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Si_m \cdot 2 + Al_m + Fe^{2+}_m \cdot 5 - P:3$$

$$T = -16.87K_1 + 1961(POLOPT)$$

Диапазон значений T 1175–1900 °C

Относительная ошибка 3–2 %

$R = -0.93$; $N = 369$; $N_1 = 363$; $\sigma = 40.1$ °C; $\chi^2 = 2.97$ (12)

Диапазон давлений 1.5–80 кб

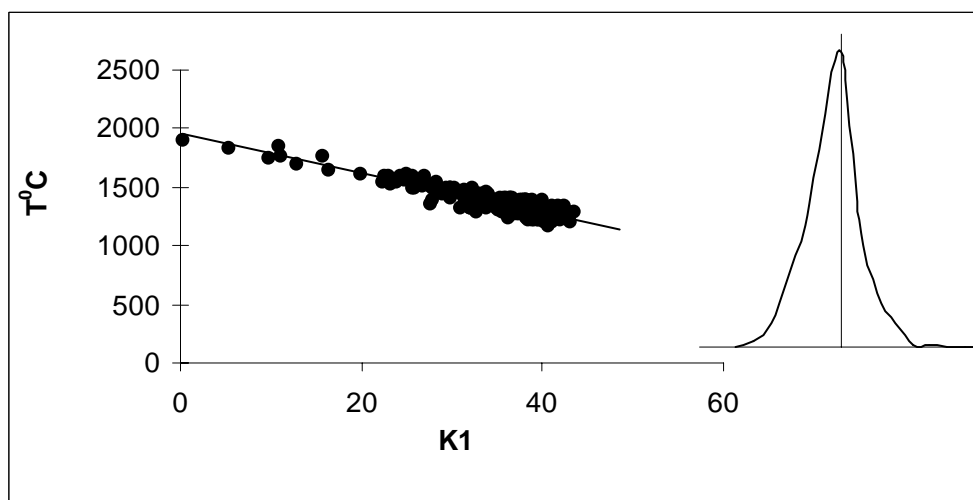


Рис. П.Ш.10.3 gl–ol–орх (формула POLOPT). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = \text{Exp}\{[T - 6Si_m - 7Mg_m - 9Ca_m - 4(Na_m + K_m)]:400\}$$

$$P = 2.5K_1 - 8.28(\text{POLOPP})$$

Диапазон значений P 5–50 кб

Относительная ошибка 56–6 %

$$R = 0.88; N = 358; N_1 = 350; \text{сигма} = 2.8 \text{ кб}; \chi^2 = 3 \text{ (12)}$$

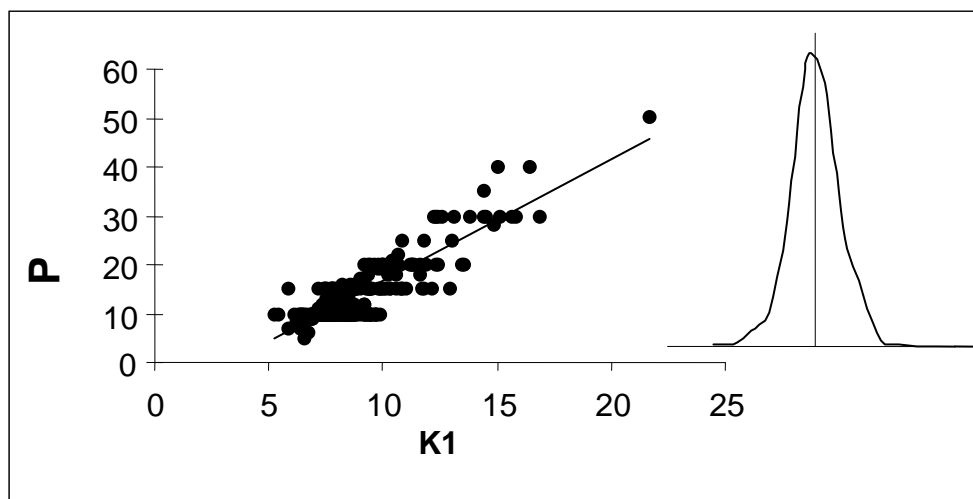


Рис. П.Ш.10.4 gl–ol–орх (формула POLOPP). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в расплаве

$$K_1 = Ca_m + Mg_m + Fe^{2+}_m:3 - T:110 - P:6; K_2 = Na_m + K_m$$

$$K_2 = -0.53K_1 + 11.99(\text{POLOPR})$$

Диапазон значений K₂ 0.52–12.8; K₁ 1.6–24.9

Относительная ошибка 173–7 %

$$R = -0.94; N = 345; N_1 = 339; \text{сигма} = 0.9; \chi^2 = 3.29 \text{ (12)}$$

Диапазон давлений 1.5–70 кб

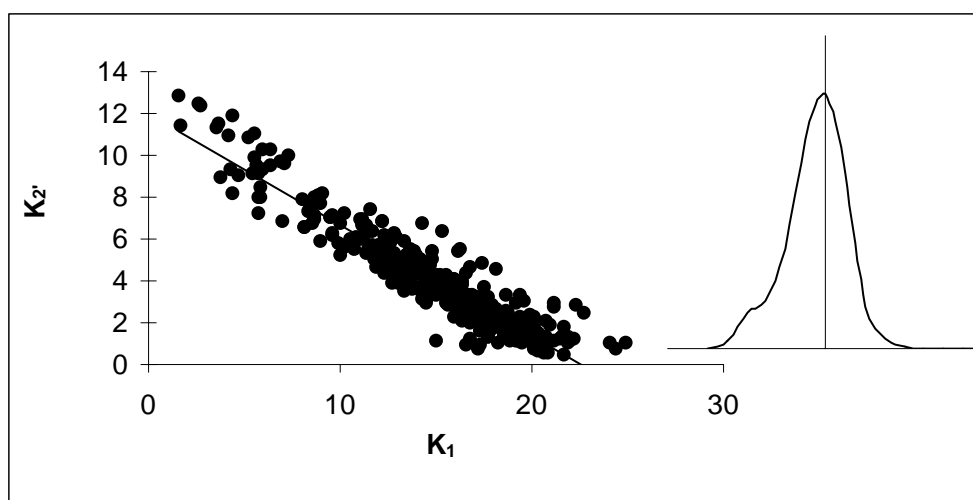


Рис. П.Ш.10.5 gl–ol–орх (формула POLOPR). Зависимость величины K₂ от величины K₁ и распределение среднеквадратичной ошибки.

6.11. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–клинопироксен

Эта выборка представлена 346 точками. Для расчета давления были удалены точки с давлениями < 5 кб – 326 т. Для расчета равновесного распределения элементов в расплаве были удалены точки с нулевыми содержаниями щелочей в расплаве – 325 т.

Таблица П.Ш.11.1 гл. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с оливином и авгитом.

ПОА		Стекла	
SiO ₂	38–54.8	Si	37.04–52.64
TiO ₂	0–6.66	Ti	0–5
Al ₂ O ₃	5–21	Al	5.25–21.84
FeO	3.31–28.9	Fe	2.54–23.56
MnO	0–0.47	Mn	0–0.4
MgO	2.98–31.3	Mg	4.15–40.79
CaO	2.84–19.1	Ca	2.86–18.72
Na ₂ O	0–7.71	Na	0–13.7
K ₂ O	0–6.72	K	0–7.95
Cr ₂ O ₃	0–1.31	Cr	0–0.94
T °C	1.5–50	P, кб	1100–1963

Примечание. Диапазон для давлений кристаллизации P 1.5–50 кб , температур кристаллизации T 1100–1963 °C.

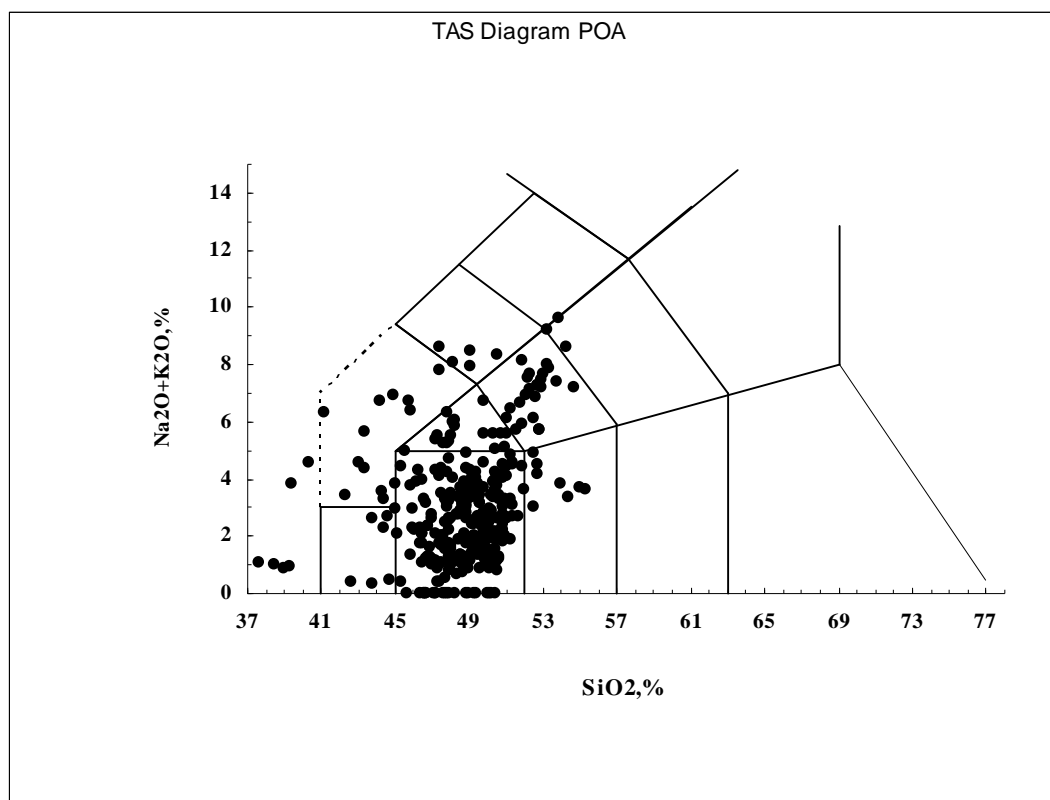


Рис. П.Ш.11.1 гл–ол–срх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливина и клинопироксена, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = [T - 13Ti_m - 12Al_m - 11Fe_m^{2+} - 13(Na_m + K_m) - 2P]:100$$

$$Mg_m = 3.07K_1 - 14.24(POAM)$$

Диапазон значений Mg_m 4.1–26.6 (атом. %)

Относительная ошибка 29–5 %

$R = 0.96$; $N = 346$; $N_1 = 341$; $\sigma = 1.2$; $\chi^2 = 1.11$ (12)

Диапазон давлений 1.5–40 кб

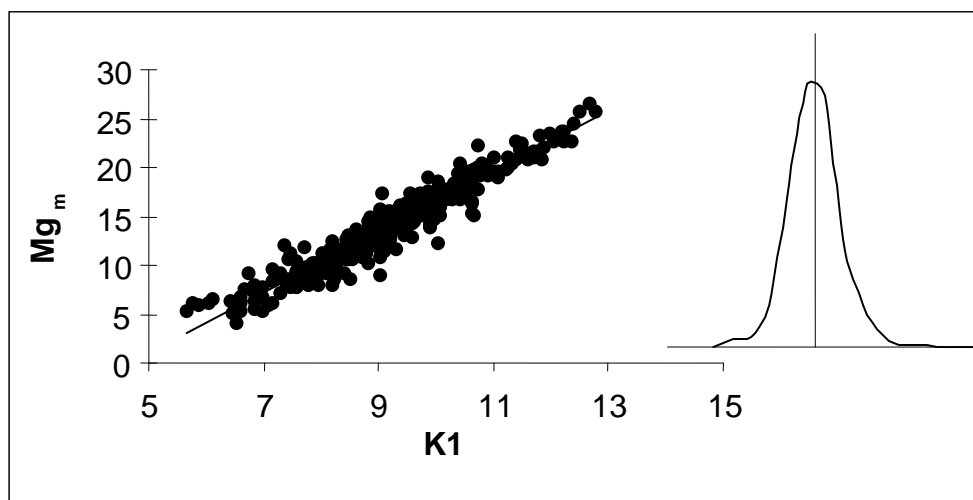


Рис. П.Ш.11.2 gl–ol–срх (формула POAM). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Fe_m^{2+} \cdot 6 + Na_m + K_m + P:10$$

$$Ca_m = -0.64K_1 + 15.42(POACA)$$

Диапазон значений Ca_m 2.9–16.4 (атом. %)

Относительная ошибка 31–5 %

$R = -0.92$; $N = 346$; $N_1 = 341$; $\sigma = 0.9$; $\chi^2 = 18.85$ (12)

Диапазон давлений 1.5–40 кб

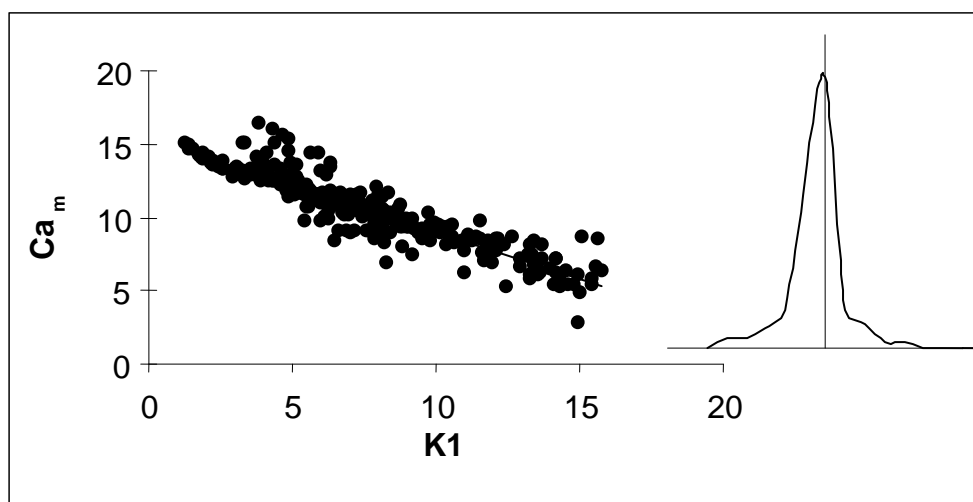


Рис. П.Ш.11.3 gl–ol–срх (формула POACA). Зависимость содержаний Ca_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Si_m - Mg_m + Ca_m:4$$

$$T = -15.02K_1 + 1807.09(POAT)$$

Диапазон значений T 1100–1700 °C

Относительная ошибка 4–3 %

$R = -0.89$; $N = 346$; $N_1 = 344$; сигма = 45 °C; $\chi^2 = 2.23$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

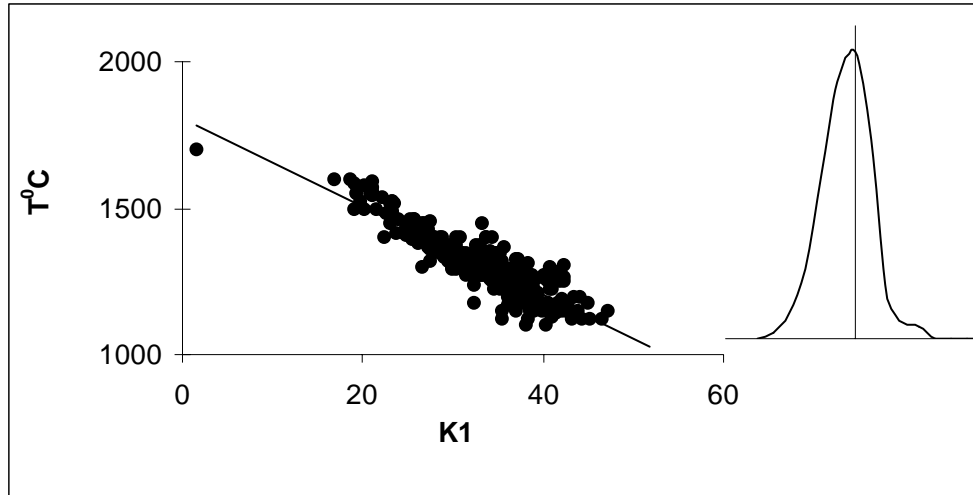


Рис. П.Ш.11.4 gl–ol–срх (формула POAT). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_m + Al_m:3 + Fe^{2+}_m:2 - Ca_m:3 + (Na_m + K_m):2 - P:2$$

$$T = -14.62K_1 + 1990.83(POATa)$$

Диапазон значений T 1100–1700 °C

Относительная ошибка 4–3 %

$R = -0.87$; $N = 346$; $N_1 = 339$; сигма = 47.4 °C; $\chi^2 = 2.03$ (12)

Диапазон давлений 1.5–50 кб

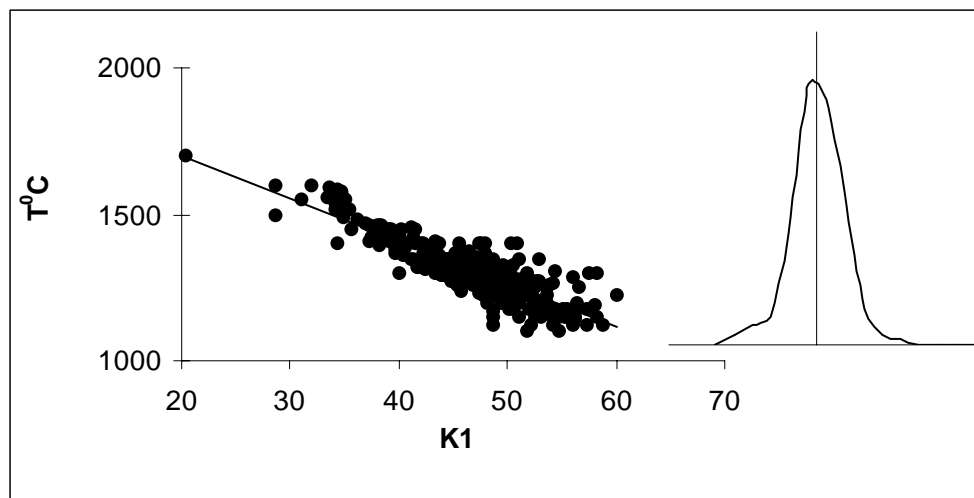


Рис. П.Ш.11.5 gl–ol–срх (формула POATa). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = [T - 2Si_m - 4Al_m + 2Fe_m^{2+} - 3Ca_m + 10(Na_m + K_m)]:100$$

$$P = 5.27K_1 - 49.46(\text{POAP})$$

Диапазон значений P 7–50 кб

Относительная ошибка 36–5 %

$$R = 0.89; N = 326; N_1 = 322; \text{сигма} = 2.5 \text{ кб}; \chi^2 = 2.12 (12)$$

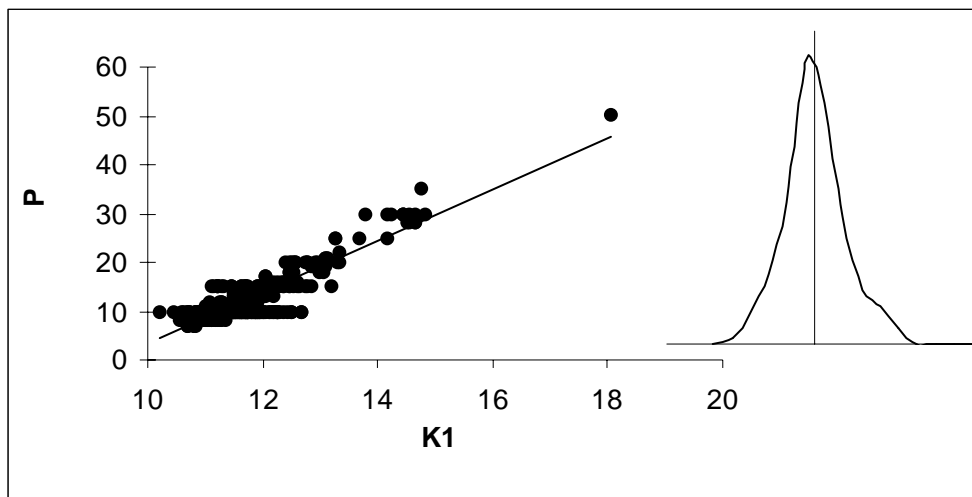


Рис. П.Ш.11.6 gl–ol–срх (формула POAP). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в расплаве

$$K_1 = Ca_m + Mg_m:3; K_2 = (Na_m + K_m + Ti_m)$$

$$K_2 = -0.96K_1 + 20.77(\text{POAR})$$

Диапазон значений K₂ 0.4–16.2; K₁ 7.6–24

Относительная ошибка 305–8 %

$$R = -0.93; N = 325; N_1 = 320; \text{сигма} = 1.22; \chi^2 = 8.86 (12)$$

Диапазон давлений 1.5–50 кб

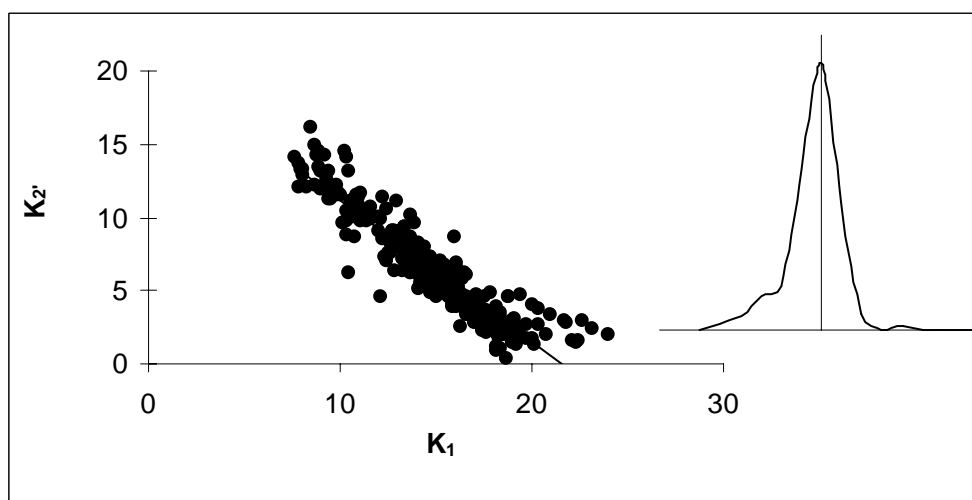


Рис. П.Ш.11.7 gl–ol–срх (формула POAR). Зависимость величины K₂ от величины K₁ и распределение среднеквадратичной ошибки.

6.12. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–плаггиоклаз

Эта выборка представлена 99 точками.

Таблица П.Ш.12.1 гл. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с оливином и плаггиоклазом.

POLPL		Стекла	
SiO ₂	42.8–54.8	Si	42.11–50.18
TiO ₂	0.47–5.63	Ti	0.33–4.19
Al ₂ O ₃	11.5–19.36	Al	12.75–21.16
FeO	5.8–20.4	Fe	4.32–16.56
MnO	0–0.36	Mn	0–0.29
MgO	2.98–11.1	Mg	4.15–15.05
CaO	5.06–15.54	Ca	4.96–15.46
Na ₂ O	1.04–7.71	Na	1.87–13.7
K ₂ O	0–6.72	K	0–7.95
Cr ₂ O ₃	0–0.17	Cr	0–0.13
T °C	1095–1300	P, кб	2–15

Примечание. Диапазон для давлений кристаллизации P 2–15 кб, температур кристаллизации T 1095–1300 °C.

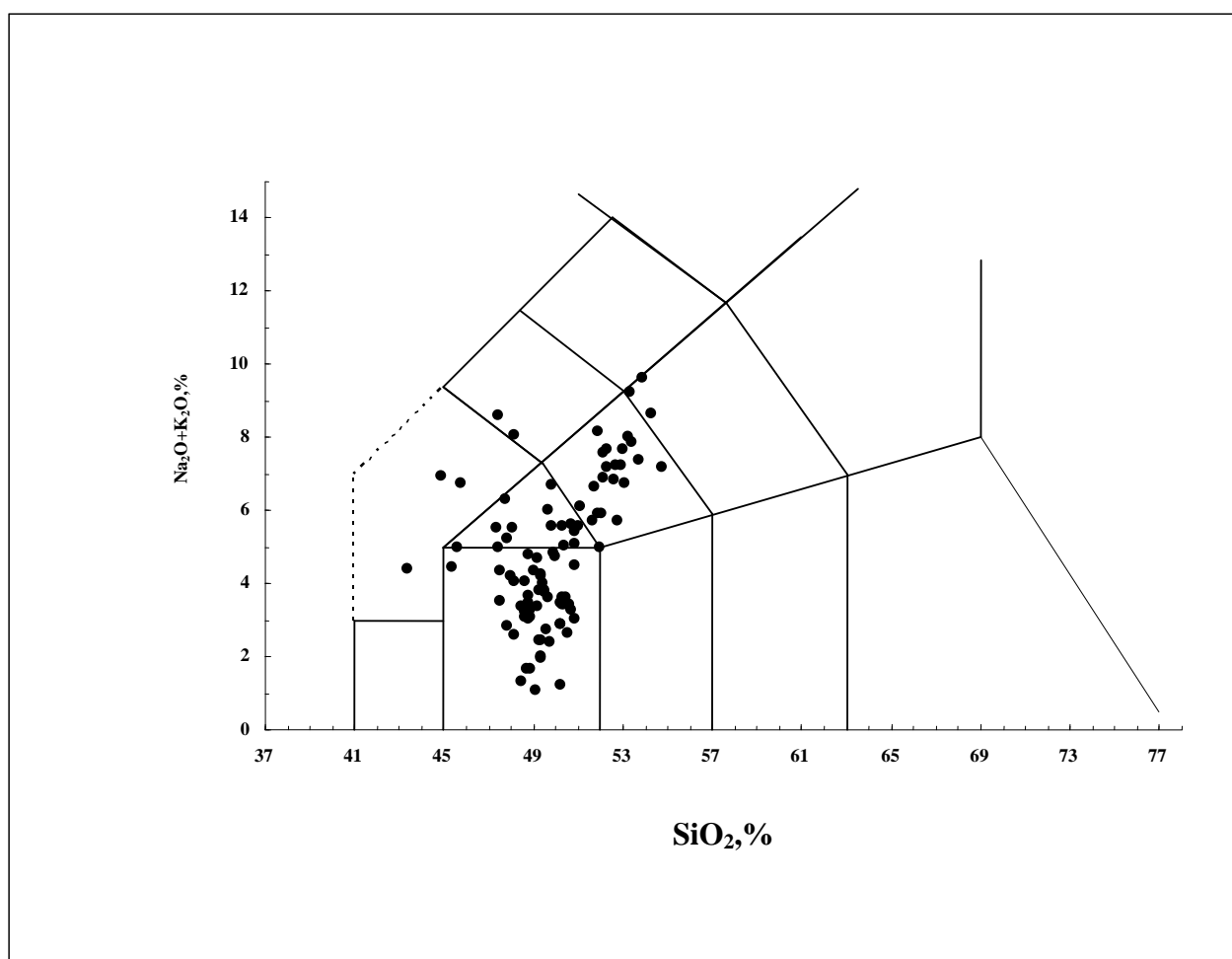


Рис. П.Ш.12.1 гл–ол–пл. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливина и плаггиоклаза, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний алюминия в расплаве

$$K_1 = T:17 - Si_m:5 - Fe^{2+}_m - Mg_m - (Na_m + K_m):3$$

$$Al_m = 0.47K_1 - 1.75(POLPLA)$$

Диапазон значений Al_m 12.7–21.1 (атом. %)

Относительная ошибка 7–4 %

$R = 0.9$; $N = 99$; $N_1 = 99$; сигма = 0.84; $\chi^2 = 1.68$ (8)

Диапазон давлений 2–15 кб

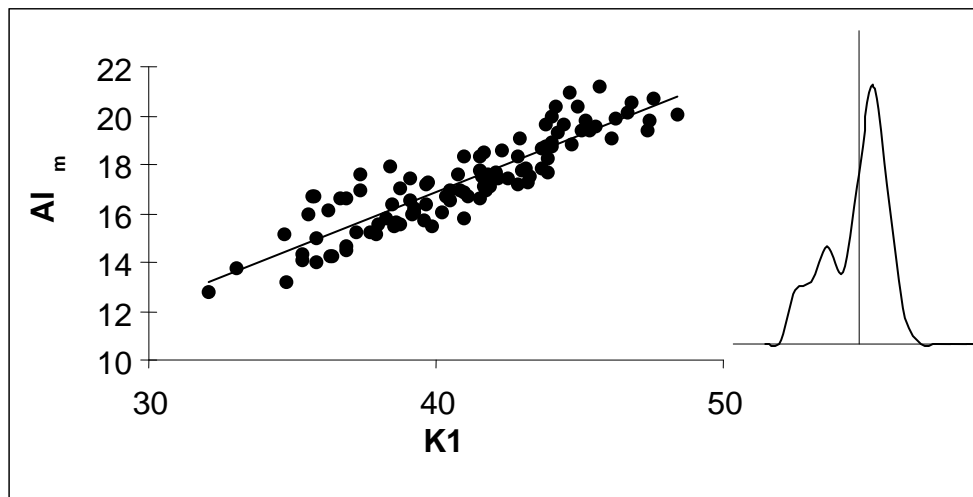


Рис. П.Ш.12.2 gl–ol–pl (формула POLPLA). Зависимость содержаний Al_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Ca_m - Al_m:2 - Fe^{2+}_m:2 - (Na_m + K_m):2 + T:60 + P:3$$

$$Mg_m = 0.54K_1 + 1.02(PPLOM)$$

Диапазон значений Mg_m 4.1–13.3 (атом. %)

Относительная ошибка 28–9 %

$R = 0.88$; $N = 99$; $N_1 = 98$; сигма = 1.14; $\chi^2 = 0.91$ (8)

Диапазон давлений 2–15 кб

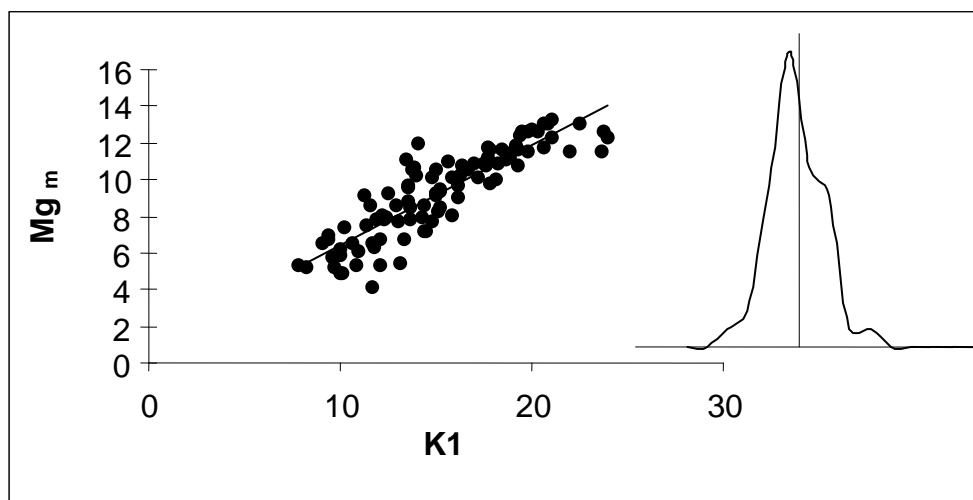


Рис. П.Ш.12.3 gl–ol–pl (формула PPLOM). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Al_m - Si_m:9 + Fe^{2+}_m:5 + 0.6Mg_m + P:8$$

$$T = 18.61K_1 + 817.9(POLPLT)$$

Диапазон значений T 1095–1300 °C

Относительная ошибка 2–2 %

R = 0.89; N = 99; N₁ = 99; сигма = 24 °C; $\chi^2 = 0.94$ (8)

Диапазон давлений 2–15 кб

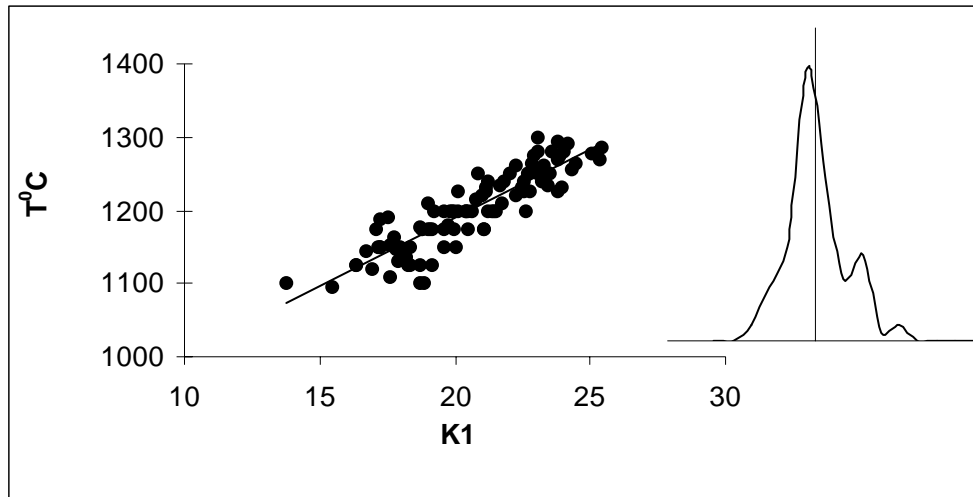


Рис. II.Ш.12.4 gl–ol–pl (формула POLPLT). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = [T - 11Fe^{2+}_m - 29Ca_m + 7(Na_m + K_m) - 9Ti_m]:100$$

$$P = 2.95K_1 - 17.02(PPLOP)$$

Диапазон значений P 2–15 кб

Относительная ошибка 100–13 %

R = 0.79; N = 99; N₁ = 97; сигма = 2 кб; $\chi^2 = 0.18$ (8)

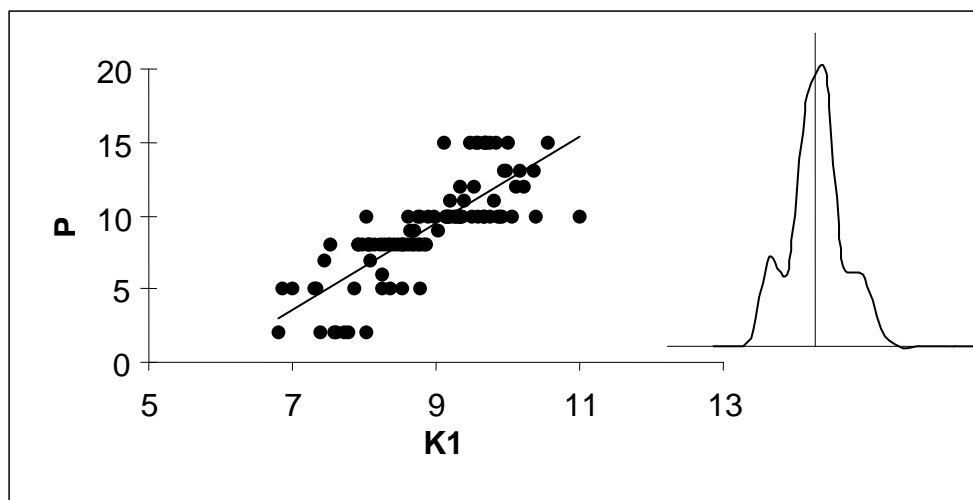


Рис. II.Ш.12.5 gl–ol–pl (формула PPLOP). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в расплаве.

$$K_1 = Ca_m + Mg_m:3 + Fe^{2+}_m:5; K_2 = (Na_m + K_m)$$

$$K_2 = -0.93K_1 + 20.64(\text{POLPR})$$

Диапазон значений K_2 1.9–13.3; K_1 9–20.8

Относительная ошибка 48–7 %

$R = -0.94$; $N = 99$; $N_1 = 98$; сигма = 0.92; $\chi^2 = 1.18$ (8)

Диапазон давлений 2–15 кб

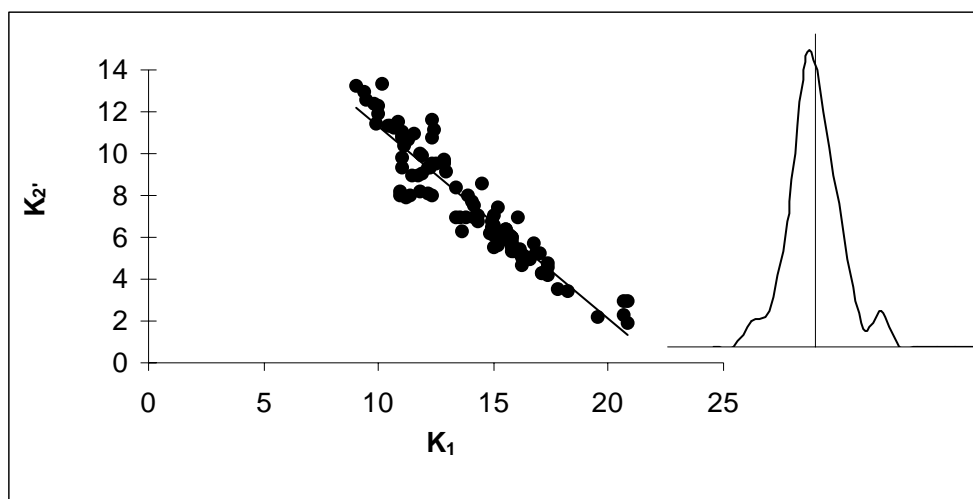


Рис. П.Ш.12.6 gl–ol–pl (формула POLPR). Зависимость величины K_2 от величины K_1 и распределение среднеквадратичной ошибки.

6.13. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом ортопироксен–клинопироксен

Эта выборка представлена 246 точками. Для расчета суммы щелочей были удалены точки с их нулевыми содержаниями – 224 т. Для расчета давления были удалены точки < 7 кб – 237 т.

Таблица П.Ш.13.1 г1. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с ортопироксеном и авгитом.

POAV		Стекла	
SiO ₂	42.5–61.4	Si	40.29–56.76
TiO ₂	0–4.42	Ti	0–3.22
Al ₂ O ₃	7.84–24.01	Al	8.77–25.76
FeO	2.65–21.6	Fe	2.02–17.15
MnO	0–0.39	Mn	0–0.31
MgO	1.41–19.99	Mg	1.91–26.58
CaO	3.44–15.4	Ca	3.41–15.04
Na ₂ O	0–7.49	Na	0–12.82
K ₂ O	0–6.57	K	0–7.75
Cr ₂ O ₃	0–1.06	Cr	0–0.76
T °C	1100–1600	P, кб	1.5–35

Примечание. Диапазон для давлений кристаллизации P 1.5–35 кб , температур кристаллизации T 1100–1600 °C.

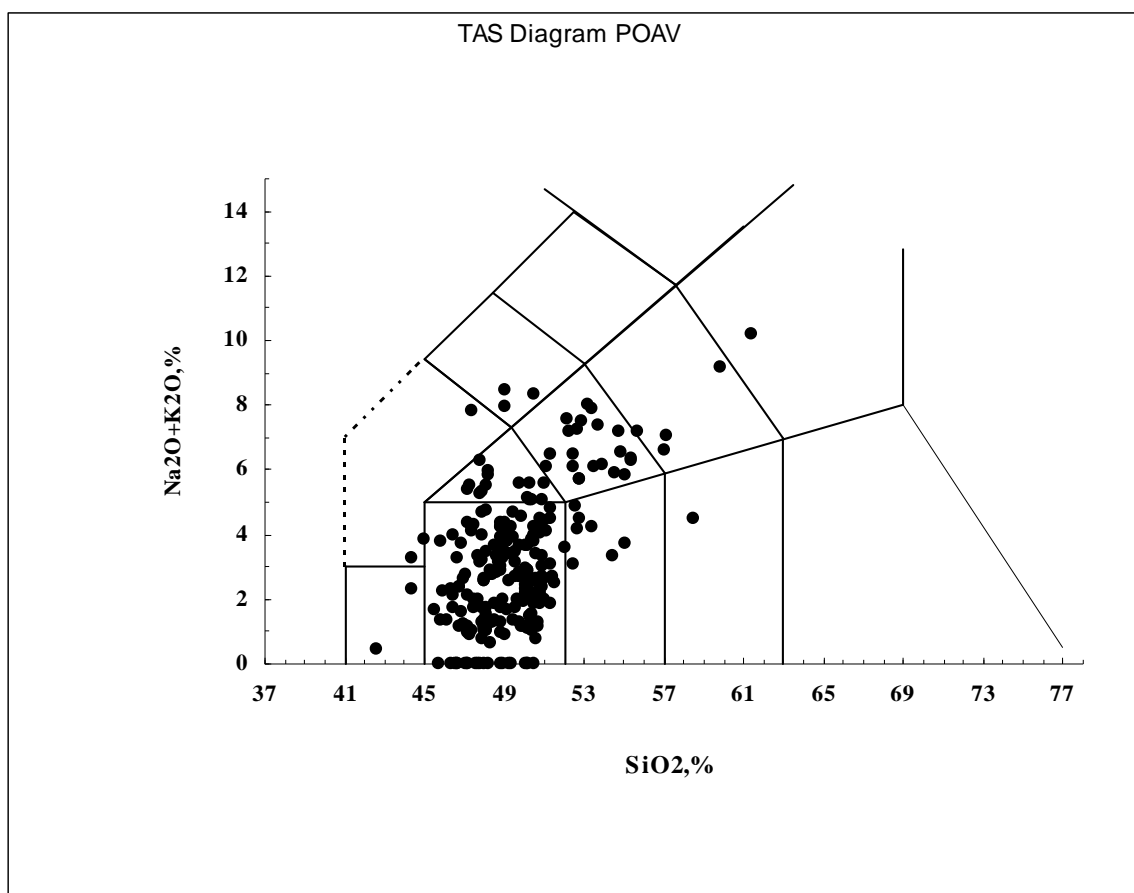


Рис. П.Ш.13.1 г1–орх–срх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами ортопироксена и клинопироксена, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний кремния в расплаве

$$K_1 = Al_m + Fe^{2+}_m + Mg_m$$

$$Si_m = -0.63K_1 + 69.24(POAVSi)$$

Диапазон значений Si_m 40.3–56.8 (атом. %)

Относительная ошибка 3–2 %

$R = -0.9$; $N = 246$; $N_1 = 244$; $\sigma = 1$; $\chi^2 = 3.7$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

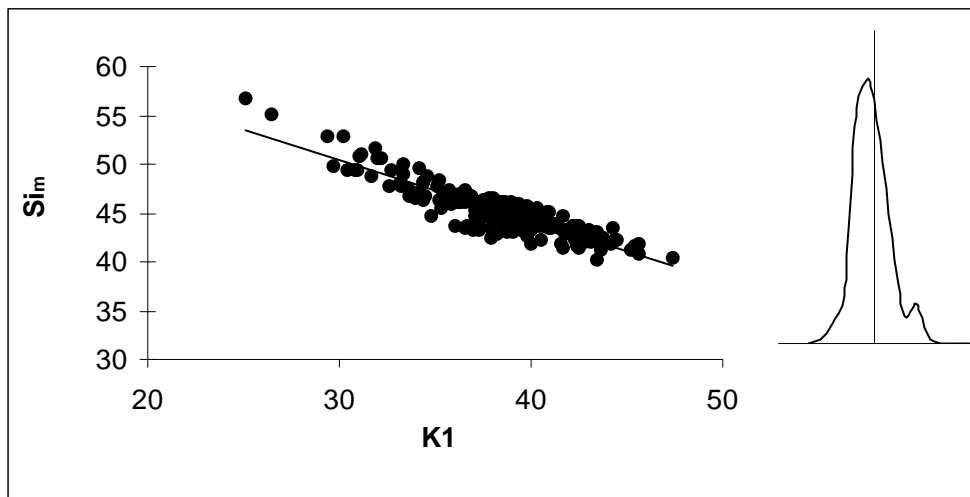


Рис. П.Ш.13.2 gl–орх–срх (формула POAVSi). Зависимость содержаний Si_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Si_m - Ca_m \cdot 2 + (Na_m + K_m) \cdot 2 - P \cdot 4$$

$$Mg_m = -0.82K_1 + 46.21(POAVM)$$

Диапазон значений Mg_m 1.91–26.6 (атом. %)

Относительная ошибка 103–7 %

$R = -0.9$; $N = 246$; $N_1 = 246$; $\sigma = 1.96$; $\chi^2 = 1.52$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

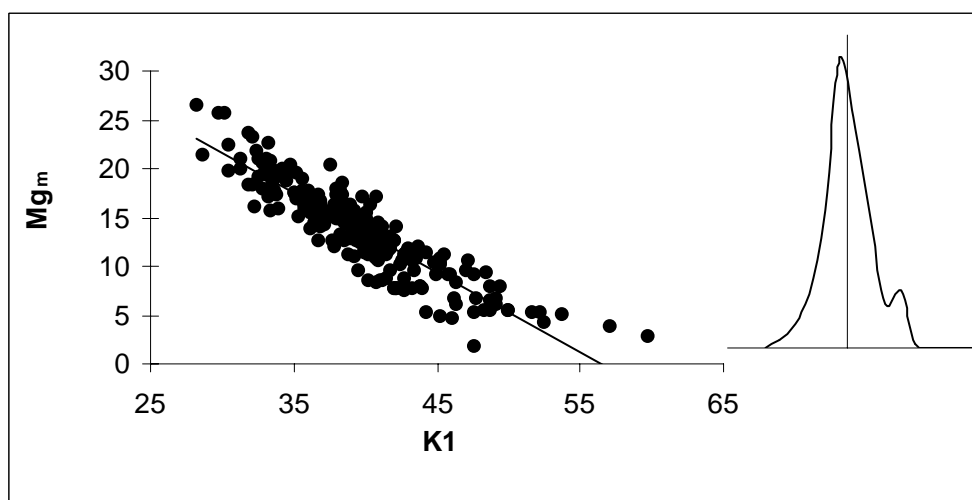


Рис. П.Ш.13.3 gl–орх–срх (формула POAVM). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = (T - 7Al_m + 11Ca_m):100$$

$$Mg_m = 4.04K_1 - 38.47(POAVM1)$$

Диапазон значений Mg_m 1.91–26.6 (атом. %)

Относительная ошибка 89–6%

$R = 0.93$; $N = 246$; $N_1 = 246$; $\sigma = 1.7$; $\chi^2 = 1.85$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

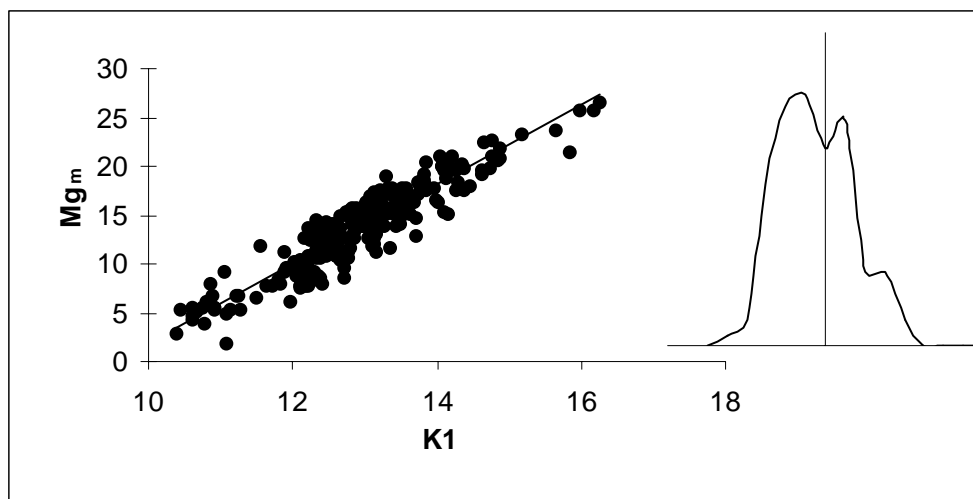


Рис. П.Ш.13.4 gl–орх–срх (формула POAVM1). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Fe^{2+}_m:3 + (Na_m + K_m) + P:9$$

$$Ca_m = -0.64K_1 + 15.95(POAVCA)$$

Диапазон значений Ca_m 3.4–15.95 (атом. %)

Относительная ошибка 16–4 %

$R = -0.97$; $N = 246$; $N_1 = 244$; $\sigma = 0.55$; $\chi^2 = 6.23$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

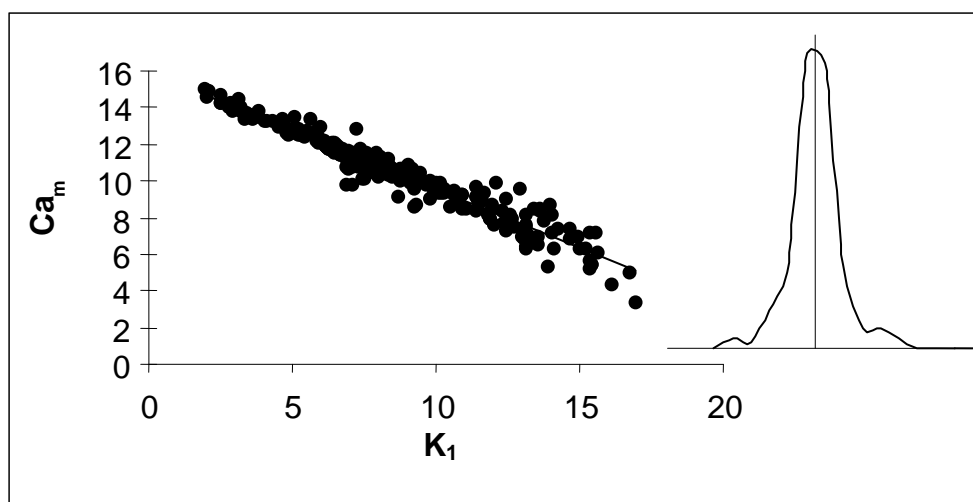


Рис. П.Ш.13.5 gl–орх–срх (формула POAVCA). Зависимость содержаний Ca_m от состава расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний суммы щелочей в расплаве

$$K_1 = Ca_m + P:11$$

$$Na_m + K_m = -1.36K_1 + 20.87(POAVNK)$$

Диапазон значений $(Na + K)_m$ 1.1–14.3 (атом. %); K_1 4.3–14.5

Относительная ошибка 82–6 %

$R = -0.95$; $N = 224$; $N_1 = 221$; $\sigma = 0.9$; $\chi^2 = 2.34$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

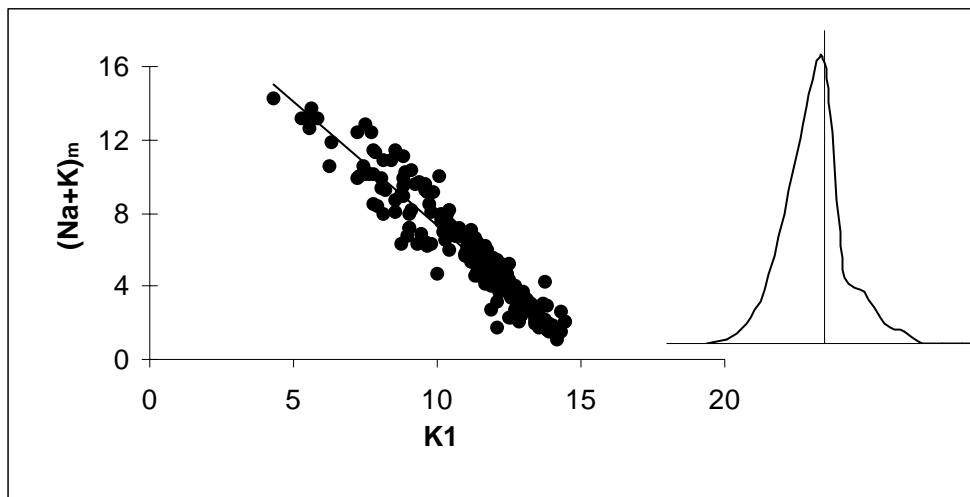


Рис. II.Ш.13.6 gl–орх–срх (формула POAVNK). Зависимость содержаний $(Na_m + K_m)$ от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Mg_m + P:3$$

$$T = 13.55K_1 + 1063.25(POAVTe)$$

Диапазон значений T 1100–1600 °C

Относительная ошибка 4–2 %

$R = 0.88$; $N = 246$; $N_1 = 244$; $\sigma = 39$ °C; $\chi^2 = 2.29$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

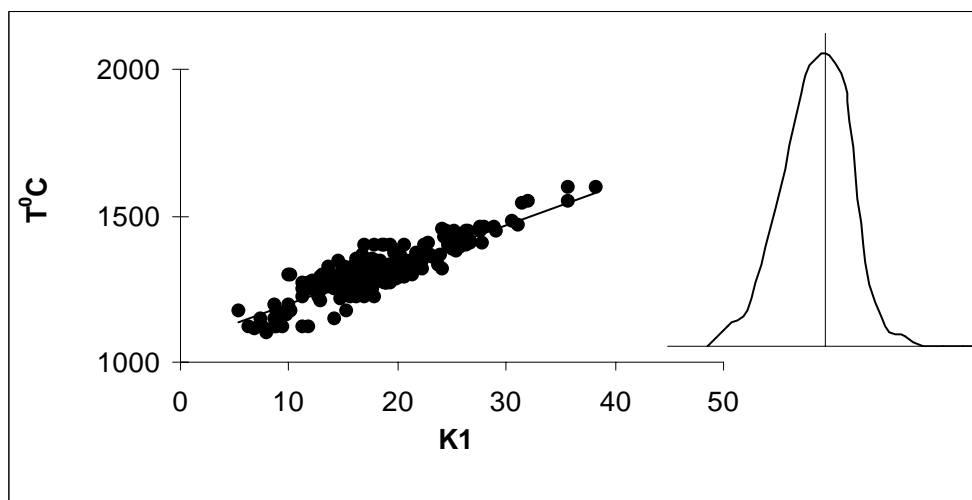


Рис. II.Ш.13.7 gl–орх–срх (формула POAVTe). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Si_m + Ti_m + Al_m:4 - Mg_m - P:4$$

$$T = -9.66K_1 + 1631.17(POAVTe1)$$

Диапазон значений T 1100–1600 °C

Относительная ошибка 4–2 %

$R = -0.89$; $N = 246$; $N_1 = 246$; сигма = 38.4 °C; $\chi^2 = 1.81$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

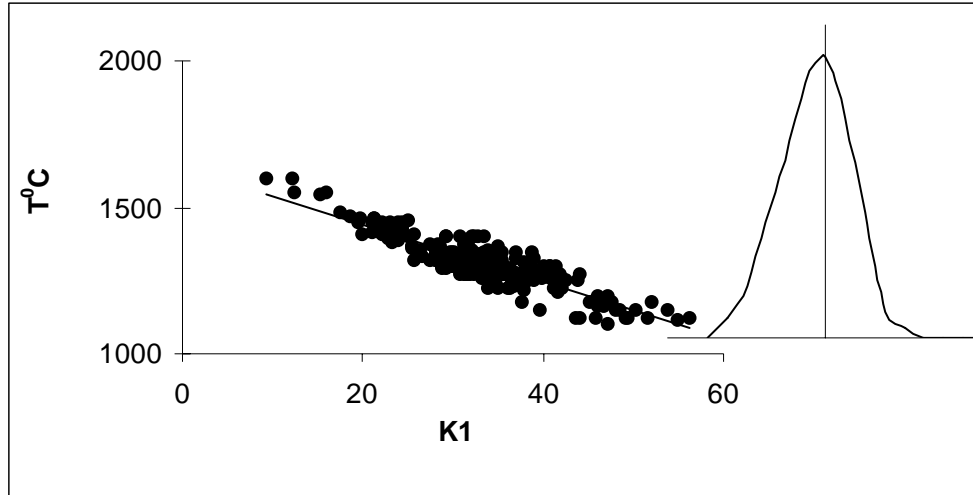


Рис. П.Ш.13.8 gl–орх–срх (формула POAVTe1). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = [T + 16Ti_m - 7Al_m + 6Fe^{2+}_m - 4Mg_m - 5Ca_m + 3(Na_m + K_m)]:100$$

$$P = 4.74K_1 - 41.01(POAVPb)$$

Диапазон значений P 7–30 кб

Относительная ошибка 30–7 %

$R = 0.84$; $N = 237$; $N_1 = 235$; сигма = 2 кб; $\chi^2 = 0.44$ (12)

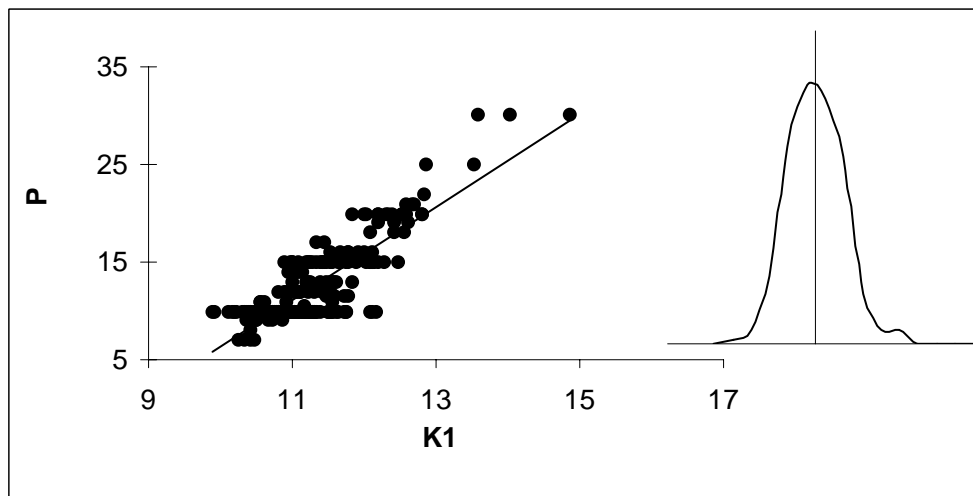


Рис. П.Ш.13.9 gl–орх–срх (формула POAVPb). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

6.14. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом клинопироксен–плагиоклаз

Эта выборка представлена 138 точками.

Таблица П. Ш.14.1 gl. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с авгитом и плагиоклазом.

PLVA		Стекла	
SiO ₂	42.8–61.49	Si	42.11–58.06
TiO ₂	0.35–6.66	Ti	0.24–4.78
Al ₂ O ₃	11.9–24.01	Al	12.75–25.76
FeO	2.65–20.4	Fe	2.02–16.56
MnO	0–0.36	Mn	0–0.29
MgO	0.81–11.1	Mg	1.14–15.05
CaO	3.44–13.86	Ca	3.41–13.78
Na ₂ O	1.14–7.71	Na	2.05–13.7
K ₂ O	0–6.72	K	0–7.95
Cr ₂ O ₃	0–0.14	Cr	0–0.1
T °C	1100–1430	P, кб.	2–27

Примечание. Диапазон для давлений кристаллизации P 2–27 кб, температур кристаллизации T 1100–1430 °C.

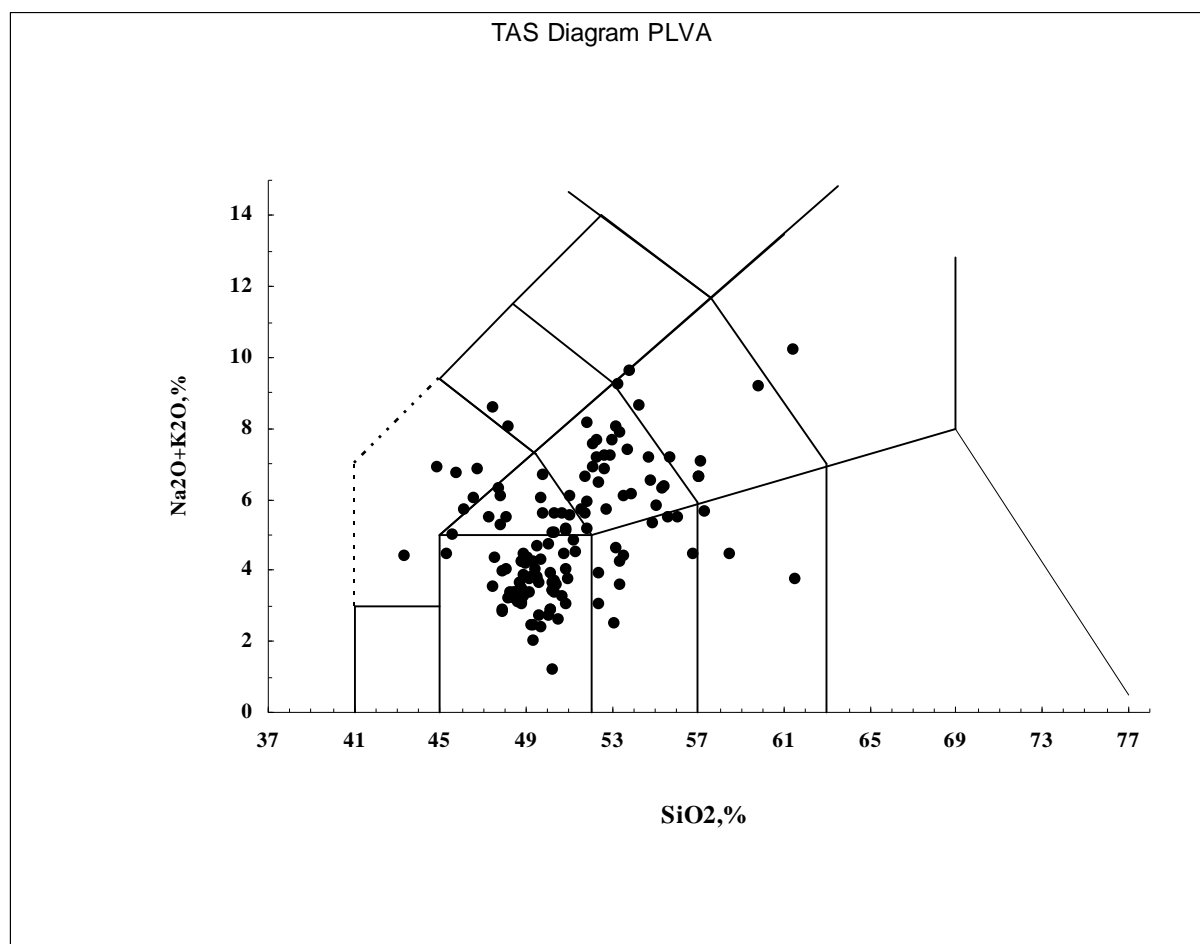


Рис. П.Ш.14.1 gl–срх–рл. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами клинопироксена и плагиоклаза, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме TAS.

Расчет содержаний алюминия

$$K_1 = T:90 - Si_m:3 - Fe^{2+}_m - Mg_m:3 + Ca_m:3 + P:5$$

$$Al_m = 0.69K_1 + 23.76(PLVAA)$$

Диапазон значений Al_m 12.7–25.8 (атом. %)

Относительная ошибка 10–5 %

$R = 0.8$; $N = 138$; $N_1 = 138$; сигма = 1.28; $\chi^2 = 1.75$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

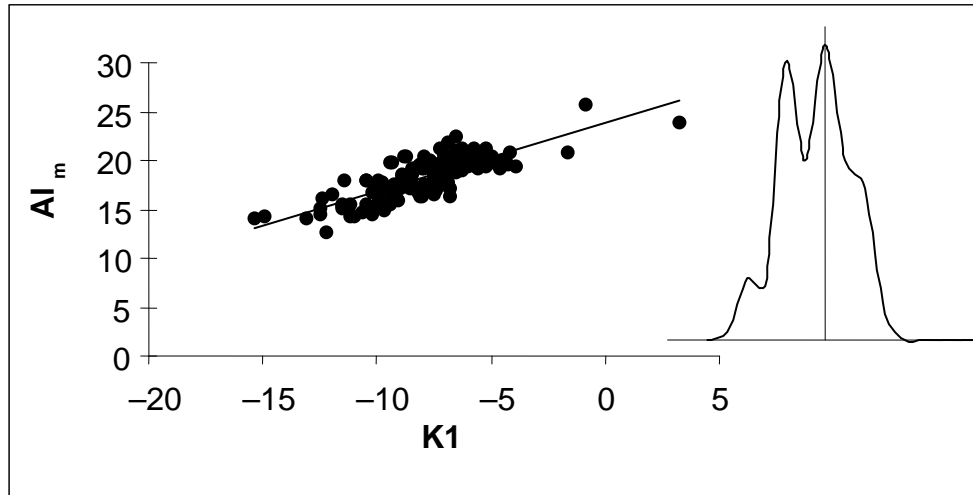


Рис. П.Ш.14.2 gl–срх–pl (формула PLVAA). Зависимость содержаний Al_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний железа в расплаве

$$K_1 = Si_m - 3.5Ti_m + Al_m + T:90 - P:6$$

$$Fe^{2+}_m = -0.3K_1 + 29.77(PLVAF)$$

Диапазон значений Fe^{2+}_m 2–16.6 (атом. %)

Относительная ошибка 60–7 %

$R = -0.81$; $N = 138$; $N_1 = 137$; сигма = 1.17; $\chi^2 = 3.01$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

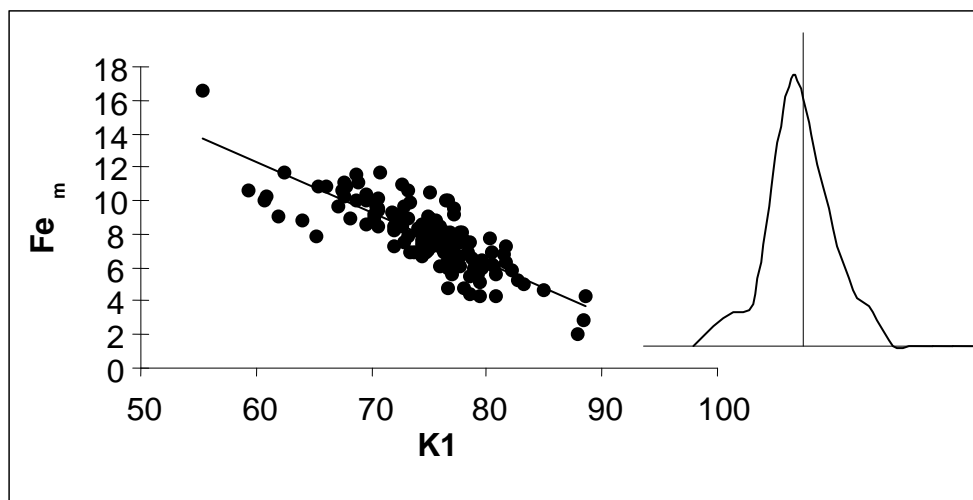


Рис. П.Ш.14.3 gl–срх–pl (формула PLVAF). Зависимость содержаний Fe^{2+}_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = Si_m - Mg_m:2 + 4(Na_m + K_m) + P:2$$

$$Ca_m = -0.13K_1 + 19.36(PLVAC)$$

Диапазон значений Ca_m 3.4–13.78 (атом. %)

Относительная ошибка 20–5 %

$R = -0.93$; $N = 138$; $N_1 = 134$; $\sigma = 0.68$; $\chi^2 = 0.92$ (12)

Диапазон давлений 2–20 кб

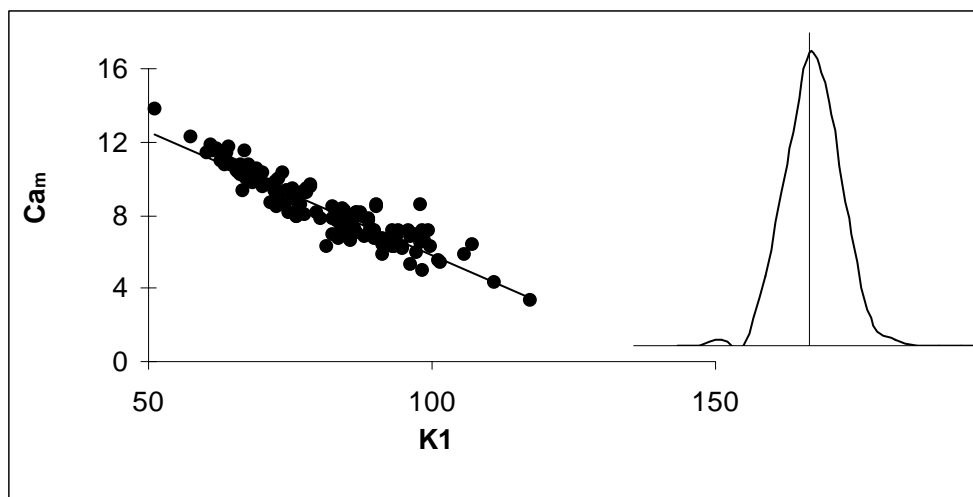


Рис. П.Ш.14.4 gl–срх–pl (формула PLVAC). Зависимость содержаний Ca_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = 0.8Al_m - Si_m:6 + Mg_m:4 + Ca_m + P:2$$

$$T = 14.4K_1 + 887.87(PLVAT)$$

Диапазон значений T 1100–1430 °C

Относительная ошибка 3–2 %

$R = 0.86$; $N = 138$; $N_1 = 136$; $\sigma = 31.3$ °C; $\chi^2 = 0.65$ (12)

Диапазон давлений 2–27 кб

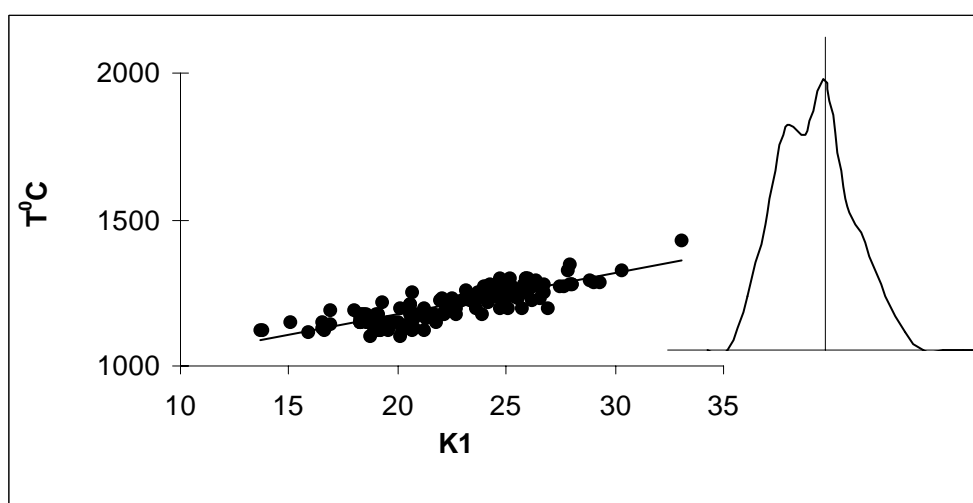


Рис. П.Ш.14.5 gl–срх–pl (формула PLVAT). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = T:12 + 2Ti_m + 0.6Al_m + 0.7Si_m - 2.4Ca_m + 0.3Mg_m$$

$$P = 0.5K_1 - 53.73(PLVAP)$$

Диапазон значений P 2–27 кб

Относительная ошибка 125–10 %

$$R = 0.75; N = 138; N_1 = 135; \text{сигма} = 2.5 \text{ кб}; \chi^2 = 0.94 (12)$$

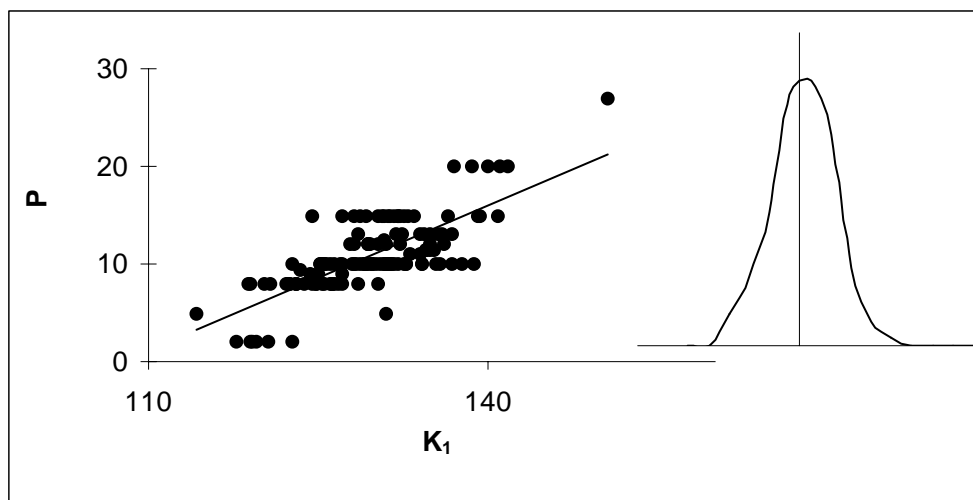


Рис. П.Ш.14.6 gl–срх–pl (формула PLVAP) Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Равновесное распределение элементов в расплаве

$$K_1 = Si_m - Ti_m:2 + (Na_m + K_m); K_2 = Mg_m + Fe^{2+}_m + T:60$$

$$K_2 = -0.71K_1 + 75.39(PLVAR)$$

Диапазон значений K2 26.3–42.6; K1 47.2–70.8

Относительная ошибка 6–4 %

$$R = -0.89; N = 138; N_1 = 135; \text{сигма} = 1.62; \chi^2 = 3.68 (12)$$

Диапазон давлений 2–27 кб

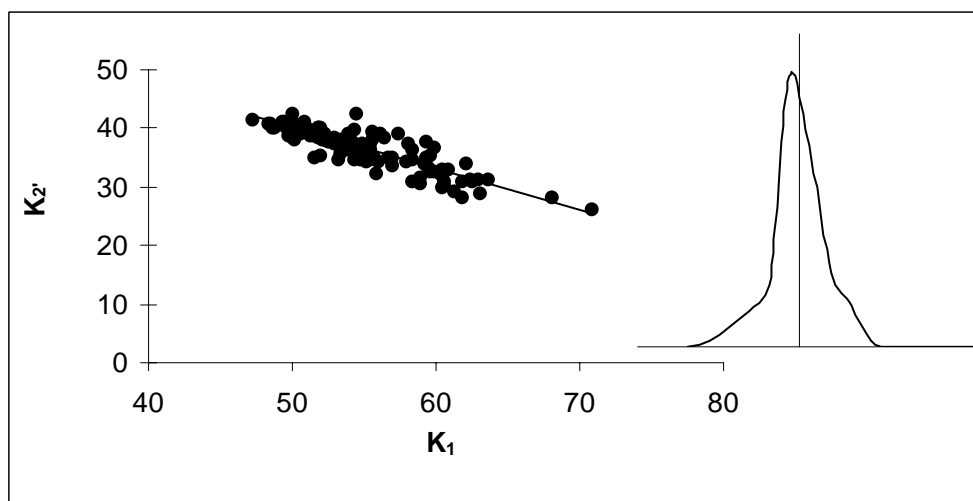


Рис. П.Ш.14.7 gl–срх–pl (формула PLVAR). Зависимость величины K2 от величины K1 и распределение среднеквадратичной ошибки.

6.15. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–ортопироксен–клинопироксен

Эта выборка представлена 214 точками. Для расчета титана были удалены точки с содержаниями $< 0.1\%$ – 192 т. Для расчета давления были удалены точки с давлениями < 7 кб – 206 т.

Таблица П.Ш.15.1 г1. Диапазоны составов стекол (расплавов), равновесных с оливином, ортопироксеном и авгитом.

PARO		Стекла	
SiO ₂	42.5–54.8	Si	40.29–49.95
TiO ₂	0–3.38	Ti	0–2.34
Al ₂ O ₃	7.84–21	Al	8.77–21.84
FeO	3.31–21.6	Fe	2.54–17.15
MnO	0–0.39	Mn	0–0.31
MgO	3.85–19.99	Mg	5.32–26.58
CaO	5.06–15.4	Ca	4.96–15.04
Na ₂ O	0–7.49	Na	0–12.82
K ₂ O	0–4.77	K	0–5.64
Cr ₂ O ₃	0–1.06	Cr	0–0.76
T °C	1125–1600	P, кб	1.5–35

Примечание. Диапазон для давлений кристаллизации P 1,5–3,5 кб, температур кристаллизации T 1125–1600 °C.

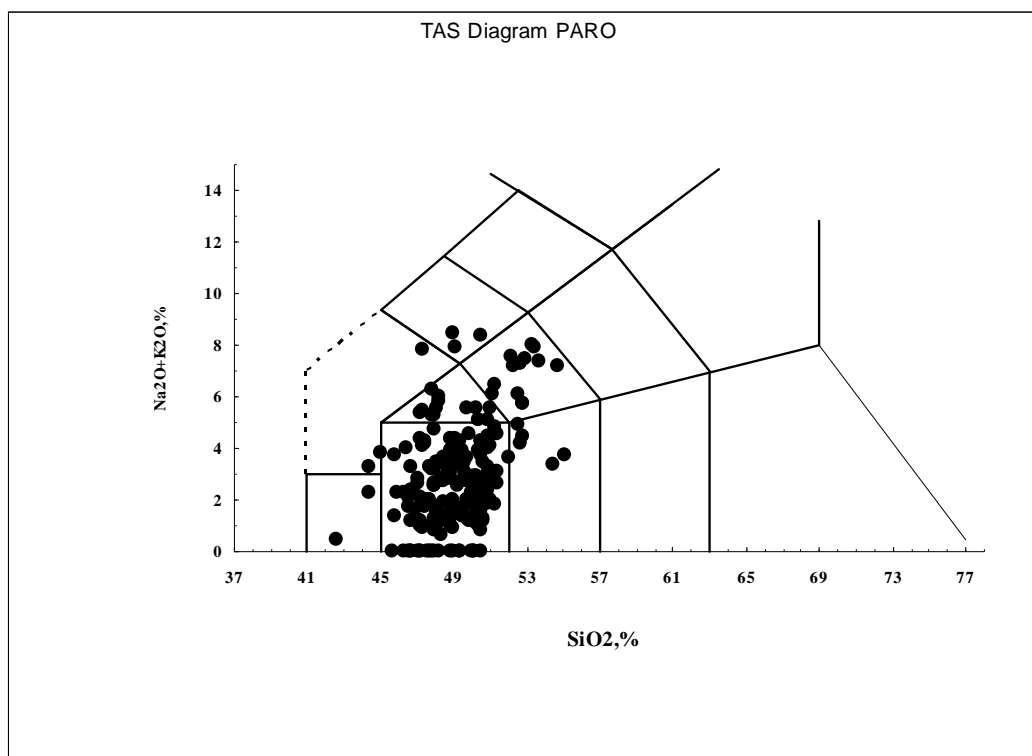


Рис. П.Ш.15.1 г1–ол–орх–срх. Распределение составов стекол (расплавов), равновесных с кристаллами оливина, ортопироксена, клинопироксена, в опытах с повышенным давлением по таксонам магматических пород на классификационной диаграмме **TAS**.

Расчет содержаний титана в расплаве

$$K_1 = Al_m:8 + Ca_m - Fe_m^{2+}:1.7 + P:9$$

$$Ti_m = -0.11K_1 + 1.72(PAROTi)$$

Диапазон значений Ti_m 0.1–2.1 (атом. %)

Относительная ошибка 200–10 %

$R = -0.79$; $N = 192$; $N_1 = 189$; $\sigma = 0.2$; $\chi^2 = 0.61$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

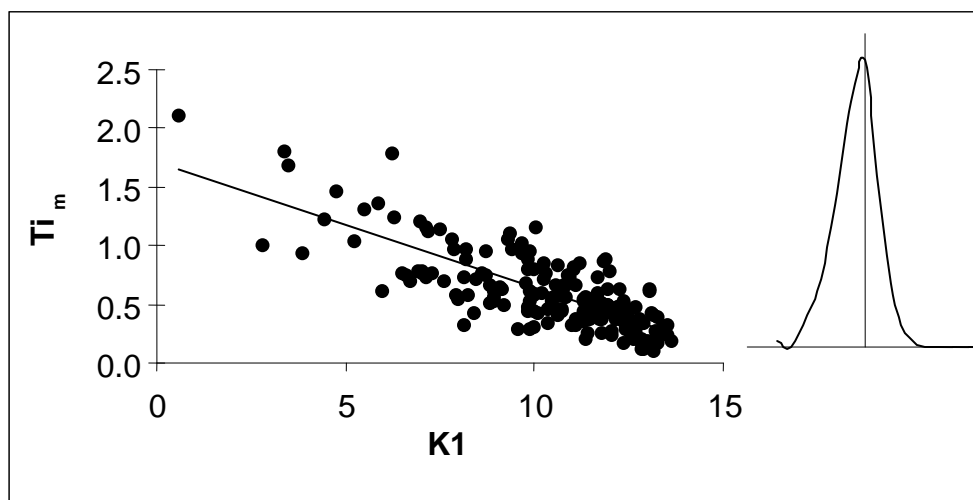


Рис. П.Ш.15.2 gl–ol–орх–срх (формула PAROTi). Зависимость содержаний Ti_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержаний магния в расплаве

$$K_1 = Si_m + Al_m + (Na_m + K_m) - P:7$$

$$Mg_m = -0.67 \times K_1 + 58.91(PAROM)$$

Диапазон значений Mg_m 5.3–26.6 (атом. %)

Относительная ошибка 23–5 %

$R = -0.95$; $N = 214$; $N_1 = 210$; $\sigma = 1.22$; $\chi^2 = 1.39$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

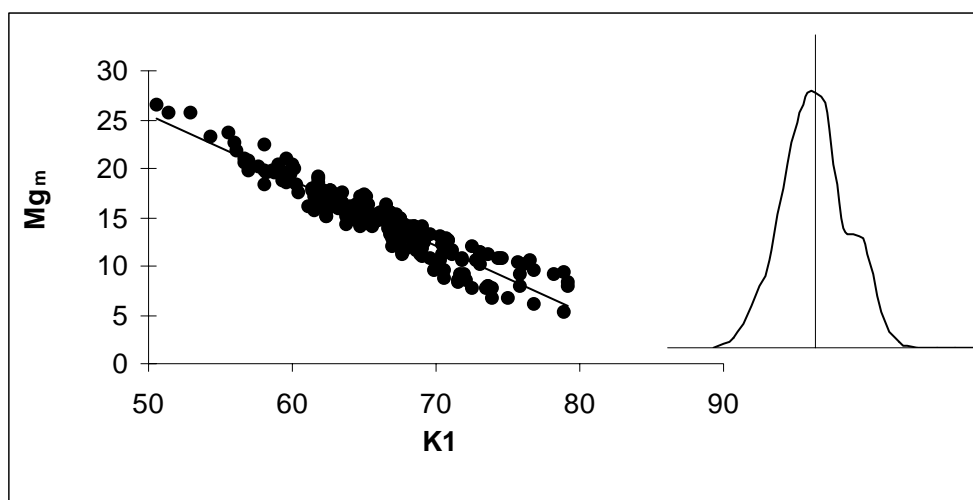


Рис. П.Ш.15.3 gl–ol–орх–срх (формула PAROM). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

$$K_1 = Ca_m - Al_m + T:24$$

$$Mg_m = 0.69K_1 - 18.02(PAROM1)$$

Диапазон значений Mg_m 5.3–26.6 (атом. %)

Относительная ошибка 25–5 %

$R = -0.94$; $N = 214$; $N_1 = 212$; $\sigma = 1.31$; $\chi^2 = 1.38$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

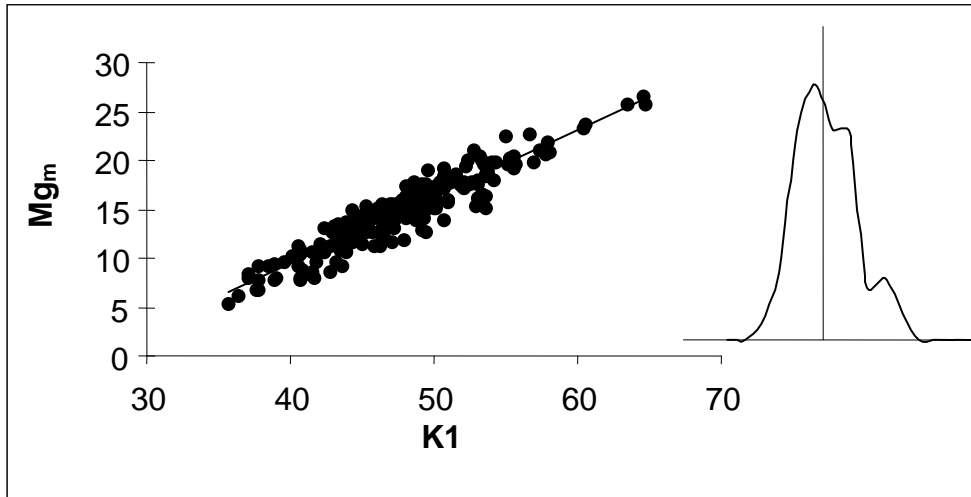


Рис. П.Ш.15.4 gl–ol–орх–срх (формула PAROM1). Зависимость содержаний Mg_m от состава расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет содержаний кальция в расплаве

$$K_1 = 2Ti_m + (Na_m + K_m) + P:9$$

$$Ca_m = -0.54K_1 + 14.67(PAROCA)$$

Диапазон значений Ca_m 5–15 (атом. %)

Относительная ошибка 10–3 %

$R = -0.97$; $N = 214$; $N_1 = 213$; $\sigma = 0.51$; $\chi^2 = 1.48$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

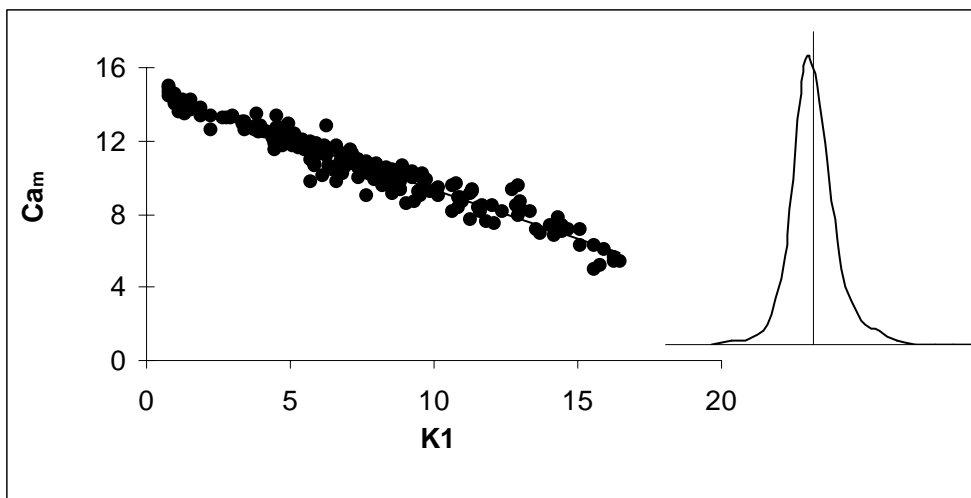


Рис. П.Ш.15.5 gl–ol–орх–срх (формула PAROCA). Зависимость содержаний Ca_m от состава расплава и распределение средноквадратичной ошибки.

Расчет температуры

$$K_1 = Si_m + Al_m:3 - Mg_m - (Na_m + K_m):2 - P:5$$

$$T = -12.29K_1 + 1705.06(PAROT)$$

Диапазон значений T 1125–1600 °C

Относительная ошибка 3–2 %

R = -0.88; N = 214; N₁ = 213; сигма = 34.2 °C; $\chi^2 = 1.88$ (12)

Диапазон давлений 1.5–35 кб

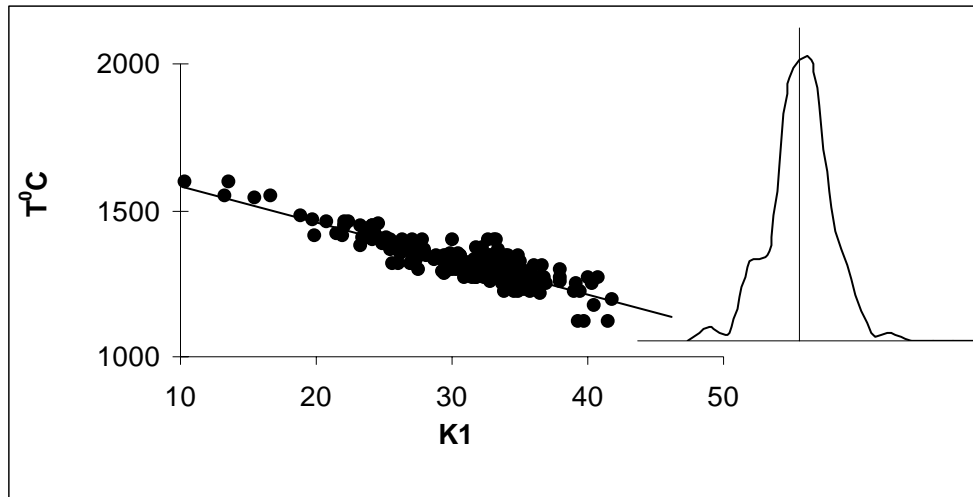


Рис. П.Ш.15.6 gl–ol–орх–срх (формула PAROT). Зависимость значения T от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет давления

$$K_1 = T:10 - 1.6Si_m - Al_m:2 - Mg_m:6 - 1.9Ca_m$$

$$P = 0.42K_1 + 1.19(PAROP)$$

Диапазон значений P 7–30 кб

Относительная ошибка 26–6 %

R = 0.91; N = 206; N₁ = 204; сигма = 1.7 кб; $\chi^2 = 2.31$ (12)

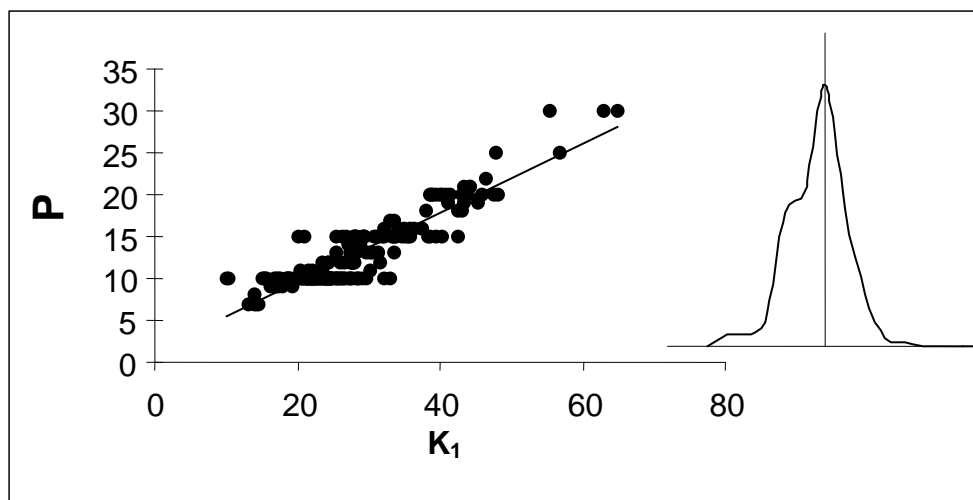


Рис. П.Ш.15.7 gl–ol–орх–срх (формула PAROP). Зависимость величины P от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Список литературы

Перечень источников экспериментальных данных, выбранных из базы данных «ИНФО-РЕКС» с сохранением первичной нумерации и вида. Русскоязычные статьи в базе данных набраны латинским шрифтом и идут в порядке общей нумерации:

6. Walker D., Longhi J., Lasaga A.C., Stolper E.M., Grove T.L., Hays J.F. Slowly cooled microgabbros 15555 and 15065 // In: Proc. Lunar Sci. Conf. 8th. Pergamon Press: 1977, V. 2, P. 1521-1547.
8. Akella J., Boyd F.R. Partitioning of Ti and Al between coexisting silicates, oxides and liquids // In: Proc. Lunar Sci. Conf. 4th. Pergamon Press: 1973, V. 1, P. 1049-1959.
18. Delano J.W. Chemistry and liquidus phase relations of Apollo 15 red glass: implications for the deep lunar interior // In: Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 11th. Pergamon Press: 1980, V. 1, P. 251-288.
19. Ringwood A.E. Limits on the bulk composition of the Moon // Icarus, 1976, V. 28, N 3, P. 325-349.
21. Grover J.E., Lindsley D.H., Bence A.E. Experimental phase relations of olivine vitrophyres from breccia 14321: the temperature and pressure-dependence of Fe/Mg partitioning for olivine and liquid in a highlands melt-rock // In: Proc. L.P.S.C.11th. Pergamon Press: 1980, V.1, P. 179-196.
23. Longhi J., Walker D., Hays J.F. The distribution of Fe and Mg between olivine and lunar basaltic liquid // Geochim. Cosmochim. Acta, 1978, V. 42, N 10, P. 1545-1558.
29. Mahood G.A., Baker D.R. Experimental constraints on depths of fractionation of mildly alkalic basalts and associated felsic rocks: Pantelleria, strait of Sicily // Contribs Mineral. and Petrol., 1986, V. 93, N 2, P. 251-264.
30. Tormey D.R., Grove T.L., Bryan W.B. Experimental petrology of normal MORB near the Kane Fracture Zone: 22-25 N, Mid-Atlantic Ridge // Contribs Mineral. and Petrol., 1987, V. 96, N 2, P. 121-139.
33. Thompson R.N. Primary basalts and magma genesis II. Snake river plain, Idaho, U.S.A. // Contribs Mineral. and Petrol., 1975, V. 52, N 13, P. 213-232.
34. Takahashi E., Scarfe Cr.M. Melting of peridotite to 14 GPa and the genesis of komatiite // Nature, 1985, V. 315, N 6020, P. 566-568.
35. Takahashi E. Melting of a dry peridotite KLB-1 up to 14 GPa: implications on the origin of peridotitic upper mantle // J. Geophys. Res., 1986, V. 91 B, N 9, P. 9367-9382.
36. Conrad W.K., Nicholls I.A., Wall V.J. Water-saturated and undersaturated melting of metaluminous and peraluminous crustal compositions at 1 kb: evidence for the origin of silicic magmas in the Taupo volcanic Zone, New Zealand, and other occurrences // J. Petrol., 1988, V. 29, Part 4, P. 765-803.
37. Elthon D., Scarfe C.M. High-pressure phase equilibria of a high-magnesia basalt and the genesis of primary oceanic basalts // Amer. Miner., 1984, V. 69, N 1/2, P. 1-15.
38. Stolper E. A phase diagram for mid-ocean ridge basalts: preliminary results and implications for petrogenesis // Contribs Mineral. and Petrol., 1980, V. 74, N 1, P. 13-27.
39. Takahashi E., Kushiro I. Melting of a dry peridotite at high pressures and basalt magma genesis // Amer. Miner., 1983, V. 68, N 9/10, P. 859-879.
41. Bender J.F., Hodges F.N., Bence A.E. Petrogenesis of basalts from the Project Famous Area: experimental study from 0 to 15 kbars / Earth and Planet. Sci. Lett., 1978, V. 41, N 3, P. 277-302.

42. Green D.H. Experimental melting studies on a model upper mantle composition at high pressure under water-saturated and water-undersaturated conditions // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1973, V. 19, N 1, P. 37-53.
43. Thompson R.N. Primary basalts and magma genesis I. Skye, north-west Scotland // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1974, V. 45, N 4, P. 317-341.
44. Bickle M.J., Ford C.E., Nisbet E.G. The petrogenesis of peridotitic komatiites: evidence from high-pressure melting experiments // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1977, V. 37, N 1, P. 97-106.
47. Fujii T., Bougault H. Melting relations of a magnesian abyssal tholeiite and the origin of MORBs // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1983, V. 62, N 2, P. 283-295.
48. Duncan R.A., Green D.H. The genesis of refractory melts in the formation of oceanic crust // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1987, V. 96, N 3, P. 326-342.
49. Falloon T.J., Green D.H. Anhydrous partial melting of MORB pyrolite and other peridotite compositions at 10 kbar: implications for the origin of primitive MORB glasses // *Miner. and Petrol.*, 1987, V. 37, N 3-4, P. 181-219.
50. Falloon T.J., Green D.H., Hatton C.J., Harris K.L. Anhydrous partial melting of a fertile and depleted peridotite from 2 to 30 kb and application to basalt petrogenesis // *J. Petrol.*, 1988, V. 29, Part 6, P. 1257-1282.
51. Sen G. Composition of basaltic liquids generated from a partially depleted lherzolite at 9 kbar pressure // *Nature*, 1982, V. 299, N 5881, P. 336-338.
52. Gust D.A., Perfit M.R. Phase relations of a high-Mg basalt from the Aleutian island arc: implications for primary island arc basalts and high-Al basalts // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1987, V. 97, N 1, P. 7-18.
53. Shimizu H., Sengen K., Masuda A. Experimental study on rare-earth partitioning in olivine and clinopyroxene formed at 10 and 20 kb in basaltic systems // *Geochem. J.*, 1982, V. 16, N 3, P. 107-117.
54. Baker D.R., Eggler D.H. Compositions of anhydrous and hydrous melts coexisting with plagioclase, augite, and olivine or low-Ca pyroxene from 1 atm to 8 kbar: application to the Aleutian volcanic centre of Atka // *Amer. Miner.*, 1987, V. 72, N 1/2, P. 12-28.
56. Johnston A.D. Anhydrous P-T phase relations of near-primary high-alumina basalt from the south Sandwich islands. Implications for the origin of island arcs and tonalite-trondhjemite series rocks // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1986, V. 92, N 3, P. 368-382.
57. Spulber S.D., Rutherford M.J. The origin of rhyolite and plagiogranite in oceanic crust: an experimental study // *J. Petrol.*, 1983, V. 24, Part 1, P. 1-25.
58. Mysen B.O., Kushiro I. Compositional variations of coexisting phases with degree of melting of peridotite in the upper mantle // *Amer. Miner.*, 1977, V. 62, N 9/10, P. 843-856.
59. Cawthorn R.G., Davies G. Experimental data at 3 kbars pressure on parental magma to the Bushveld complex // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1983, V. 83, N 1/2, P. 128-135.
66. Chen H.-K., Lindsley D.H. Apollo 14 very low titanium glasses: melting experiments in iron-platinum alloy capsules // In: *Proc. Lunar and Planet. Sci. Conf. 14th. J. Geophys. Res.*, 1983, V. 88 B, P. 335-342.
72. Biggar G.M. The composition of diopside solid solutions, and of liquids, in equilibrium with forsterite, plagioclase, and liquid in system $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ and in remelted rocks from 1 bar to 12 kbar // *Mineral. Magazine*, 1984, V. 48, Part 4, P. 481-494.

75. Bartels K.S., Grove T.L. High-pressure experiments on magnesian eucrite compositions: constraints on magmatic processes in the eucrite parent body // In: Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 21th, 1991, P. 351-365.
80. Thy P. High and low pressure phase equilibria of a mildly alkalic lava from the 1965 Surtsey eruption: Experimental results // *Lithos*, 1991, V. 26, P. 223-243.
82. Fram M.S., Longhi J. Phase equilibria of dikes associated with Proterozoic anorthosite complexes // *Amer. Miner.*, 1992, V. 77, N 5/6, P. 605-616.
84. Grove T.L., Kinzler R.J., Bryan W.B. Fractionation of mid-ocean ridge basalt. In RIDGE Summer Institute Volume, AGU Special Publication (in press).
- 85 Kinzler R.J., Grove T.L. Primary magmas of mid-ocean ridge basalts, I: Experiments and methods // *J. Geophys. Res.*, 1992, V. 97 B, N 5, P. 6885-6906.
86. Draper D.S., Johnston A.D. Experimental generation of arc-like high-alumina basalt from anhydrous, primitive olivine tholeiite: An experimental study from 1 atm to 20 kbar // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1992, V. 112, N 4, P. 501-519.
87. Meen J.K. Elevation of potassium content of basaltic magmas by fractional crystallization: the effect of pressure // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1990, V. 104, N 3, P. 309-331.
88. Meen J.K. Formation of shoshonites from calcalkaline basalt magmas: geochemical and experimental constraints from the type locality // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1987, V. 97, N 3, P. 333-351.
91. Bartels K.S., Kinzler R.J., Grove T.L. High pressure phase relations of primitive high-alumina basalts from Medicine Lake volcano, northern California // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1991, V. 108, N 3, P. 253-270.
92. Grove T.L., Kinzler R.J., Bryan W.B. 2. Natural and experimental phase relations of lavas from Serocki volcano // *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 1990, V. 106/109, P. 9-17.
93. Roeder P.L., Reynolds I. Crystallization of chromite and chromium solubility in basaltic melts // *J. Petrol.*, 1991, V. 32, Part 5, P. 909-934.
95. Eggins S.M. Petrogenesis of Hawaiian tholeiites: 1. Phase equilibria constraints // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1992, V. 110, N 2/3, P. 387-397.
98. Gaetani G.A., Grove T.L., Bryan W.B. Experimental phase relations of basaltic andesite from hole 839B under hydrous and anhydrous conditions // In: *Proc. ODP Sci. Results*, 1994, V. 135, P. 557-563.
103. Hirose K., Kushiro I. Partial melting of dry peridotites at high pressures: determination of compositions of melts segregated from peridotite using aggregates of diamond // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1993, V. 114, N 4, P. 477- 489.
108. Rutherford M.J. The May 18, 1980, Eruption of Mount St. Helens 1. Melt composition and experimental phase equilibria // *J. Geophys. Res.*, 1985, V. 90, N B 4, P. 2929-2947.
109. Olafsson M. Partial melting of peridotite in the presence of small amounts of volatiles, with special reference to the low-velocity zone // M.S. Thesis, Pennsylvania State University, 1980, 59 pp.
110. Johnston A.D., Wyllie P.J. Constraints on the origin of Archean trondhjemites based on phase relationships of Nuk gneiss with H₂O at 15 kbar // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1988, V. 100, N 1, P. 35-46.

111. Luhr J.F. Experimental phase relations of water- and sulfur-saturated arc magmas and the 1982 eruptions of El Chicon Volcano // *J. Petrol.*, 1990, Part 5, P. 1071-1114 Housh T.B., Luhr J.F. Plagioclase-melt equilibria in hydrous systems // *Amer. Miner.*, 1991, V. 76, P. 477-492.
112. Beard J.S., Lofgren G.E. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6-9 kb // *J. Petrol.*, 1991, V. 32, Part 2, P. 365-401.+ Unpublished data.
113. Patino D.A.E., Johnston A.D. Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites // *Contribs. Mineral. and Petrol.*, 1991, V. 107, P. 202-218.
114. Rushmer T. Partial melting of two amphibolites: contrasting experimental results under fluid-absent conditions // *Contribs. Mineral. and Petrol.*, 1991, V. 107, P. 41-59.
115. Holtz F., Pichavant M., Barbey P., Johannes W. Effects of H₂O on liquidus phase relations in the haplogranite system at 2 and 5 kbar // *Amer. Miner.*, 1992, V. 77, N 11/12, P. 1223-1241.
116. Gerke T.L., Kilinc A.I. Enrichment of SiO₂ in rhyolites by fractional crystallization: an experimental study of peraluminous granitic rocks from the St. Francois Mountains, Missouri, USA // *Lithos*, 1993, V. 29, N 3/4, P. 273-283.
117. Sisson T.W., Grove T.L. Temperatures and H₂O contents of low-MgO high-alumina basalts // *Contribs. Mineral. and Petrol.*, 1993, V. 113, N 2, P. 167-184.
118. Sisson T.W., Grove T.L. Experimental investigations of the role of H₂O in calc-alkaline differentiation and subduction zone magmatism // *Contribs. Mineral. and Petrol.*, 1993, V. 113, N 2, P. 143-166.
119. Sweeney R.J., Thompson A.B., Ulmer P. Phase relations of a natural MARID composition and implications for MARID genesis, lithospheric melting and mantle metasomatism // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1993, V. 115, P. 225-241.
120. Wolf M.B., Wyllie P.J. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1994, V. 115, P. 369-383.
121. Tatsumi Y. Melting experiments on a high-magnesian andesite // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1981, V. 54, P. 37-53.
123. Kushiro I. Partial melting of mantle wedge and evolution of island arc crust // *J. Geophys. Res.*, 1990, V. 95, N B10, P. 15929-15939.
126. Umino S., Kushiro I. Experimental studies on boninite petrogenesis // *Boninites* (ed. A.J. Crawford), London, Unwin Hyman, 1989, P. 89-111.
128. Mysen B.O., Boettcher A.L. Melting of a hydrous mantle: I. Phase relations of natural peridotite at high pressures and temperatures with controlled activities of water, carbon dioxide, and hydrogen // *J. Petrol.*, 1975, V. 16, Part 3, P. 520-548. + 129...(CONTINUED)
129. 128 (BEGINNING) + II. Geochemistry of crystals and liquids formed by anatexis of mantle peridotite at high pressures and temperatures as a function of controlled activities of water, hydrogen, and carbon dioxide // *J. Petrol.*, 1975, V. 16, Part 3, P. 549-593.
130. Mysen B.O., Boettcher A.L. Melting of a hydrous mantle: III. Phase relations of garnet websterite + H₂O at high pressures and temperatures // *J. Petrol.*, 1976, V. 17, Part 1, P. 1-14.
133. Helz R.T. Phase relations of basalts in their melting ranges at PH₂O = 5 kb as a function of oxygen fugacity. Part I. Mafic phases // *J. Petrol.*, 1973, V. 14, Part 2, P. 249-302. + Part II. Melt compositions // *J. Petrol.*, 1976, V. 17, Part 2, P. 139-193.

- 136/ Allen J.C., Boettcher A.L. Amphiboles in andesite and basalt: II. Stability as a function of P-T- $f_{\text{H}_2\text{O}}-f_{\text{O}_2}$ // Amer. Miner., 1975, V. 63, N 11/12, P. 1074-1087.
138. Sekine T., Wyllie P.J. The system granite-peridotite-H₂O at 30 kbar, with applications to hybridization in subduction zone magmatism // Contribs Mineral. and Petrol., 1982, V. 81, N 3, P. 190-202.
139. Carroll M.R., Wyllie P.J. The system tonalite-H₂O at 15 kbar and the genesis of calc-alkaline magmas // Amer. Miner., 1990, V. 75, N , P. 345-357.
140. Adam J. The geochemistry and experimental petrology of sodic alkaline basalts from Oatlands, Tasmania // J. Petrol., 1990, V. 31, Part 6, P. 1201-1223.
141. Burnham C.W., Jahns R.H. A method for determining the solubility of water in silicate melts // Amer. J. Sci., 1962, V. 260, N 10, P. 721-745.
142. Hamilton D.L., Burnham C.W., Osborn E.F. The solubility of water and effects of oxygen fugacity and water content on crystallization in mafic magmas // J. Petrol., 1964, V. 5, N 2, P. 21-39.
143. Khitarov N.I., Kadik A.A., Lebedev E.B. Solubility of water in basalt melt // Geokhimiya, 1968, N 7, P. 763-772 (in Russian).
145. Mironov A.G., Epel'baum M.B., Chekhmir A.S. Experimental determination of the relative water solubility in the granite and basalt melts at 900-1100°C and 2 kbar with tritium autoradiographic method // Geokhimiya, 1993, N 4, P. 487-498 (in Russian).
154. Fujii T., Scarfe C.M. Composition of liquids coexisting with spinel lherzolite at 10 kbar an the genesis of MORBs // Contrib. Mineral. and Petrol., 1985, V. 90, N 1, 18-28.
156. Canil D. Orthopyroxene stability along the peridotite solidus and the origin of cratonic lithosphere beneath southern Africa // Earth Planet. Sci. Lett., 1992, V. 111, N 1, P. 83-95.
157. Kadik A.A., Lebedev E.B, Khitarov N.I. The water in magmatic melts // Nauka Publishing House, Moscow, 1971, 267 P. (in Russian)
158. Baker M.B., Stolper E.M. Determining the composition of high-pressure mantle melts using the diamond aggregates // Geochim. Cosmochim. Acta, 1994, V. 58, N 13, P. 2811-2827.
159. Falloon T.J., Green D.H., Jaques A.L. Refractory magmas in back-arc basin settings: experimental constraints on a Lau Basin exemple // Miner. Magazine (Extended abstracts to V.M. Goldschmidt conference, Edinburg), 1994, V. 58A, P. 263-264.
160. Herzberg C., Gasparik T., Sawamoto H. Origin of Mantle Peridotite: Constraints From Melting Experiments to 16.5 GPa // J.Geophys. Res., 1990, V. 95, N B10, P. 15779-15803.
167. Walker D., Grove T. Ureilite smelting // Meteoritics, 1993, V. 28, N 5, P. 629-636.
168. Tronnes R.G., Canil D., Wei K. Element partitioning between silicate minerals and coexisting melts at pressures of 1-27 GPa, and implications for mantle evolution // Earth and Planet. Sci. Lett., 1992, V. 111, N 2/4, P. 241-255.
175. Bertka C.M., Holloway J.R. Anhydrous partial melting of an iron-rich mantle I: subsolidus phase assemblages and partial melting phase relations at 10 to 30 kbar. + II: primary melt compositions at 15 kbar
177. Auwera J.V., Longhi J. Experimental study of a jotunite (hypersthene monzodiorite): constraints on the parent magma composition and crystallization conditions (P, T, f_{O_2}) of the Bjerkreim-Sokndal layered intrusion (Norway) // Contrib.Mineral. and Petrol., 1994, V. 118, N 1, P. 60-78.
178. Baker M.B., Grove T.L., Price R. Primitive basalts and andesites from the Mt.Shasta region, N.California: products of varying melt fraction and water content // Contrib. Mineral. and Petrol., 1994, V. 118, N 2, P. 111-129.

180. Panjasawatwong Y., Danyushevsky L.V., Crawford A.J., Harris K.L. An experimental study of the effects of melt composition on plagioclase-melt equilibria at 5 and 10 kbar: implications for the origin of magmatic high-An plagioclase // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1995, V. 118, N 4, P. 420-432.
181. Longhi J. Liquidus equilibria of some primary lunar and terrestrial melts in the garnet stability field // *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1995, V. 59, N 11, P. 2375-2386.
182. Baker M.B., Hirschmann M.M., Ghiorso M.S., Stolper E.M. Compositions of near-solidus peridotite melts from experiments and thermodynamic calculations // *Nature*, 1995, V. 375, P. 308-311.
183. Kushiro I. Partial melting of a fertile mantle peridotite at high pressure: an experimental study using aggregates of diamond // *AGU Monograph 95. Earth processes: reading the isotopic code*. Eds A. Basu, S. Hart. 1996, P. 109-122.
184. Takahashi E. Melting of a Yamato L3 chondrite (Y-74191) up to 30 kb // *Proc. of 8th Symp. on Antarctic Meteorites, Mem. Nat. Inst. Polar Res., Spec. Issue N 30*, 1983, P. 168-180.
185. Kato T., Ringwood A.E., Irifune T. Experimental determination of element partitioning between silicate perovskites, garnets and liquids: constraints on early differentiation of the mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1988, V. 89, N 1, P. 123-145.
186. Yasuda A., Fujii T., Kurita K. Melting phase relations of an anhydrous mid-ocean ridge basalt from 3 to 20 GPa: implications for the behavior of subducted oceanic crust in the mantle // *J. Geophys. Res.*, 1994, V. 99, N B5, P. 9401-9414.
187. Zhang J., Herzberg C. Melting experiments on anhydrous peridotite KLB-1 from 5.0 to 22.5 GPa // *J. Geophys. Res.*, 1994, V. 99, N B9, P. 17729-17742.
188. Ohtani E., Nagata Y., Suzuki A., Kato T. Melting relations of peridotite and the density crossover in planetary mantles // *Chem. Geol.*, 1995, V. 120, N 3-4, P. 207-221.
192. Moore G., Righter K., Carmichael I.S.E. The effect of dissolved water on the oxidation state of iron in natural silicate liquids // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1995, V. 120, N 1, P. 170-179.
196. Hirose K., Kawamoto T. Hydrous partial melting of lherzolite at 1 GPa: The effect of H₂O on the genesis of basaltic magmas // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1995, V. 133, N , P. 463-473.
198. Klingenberg B.M.E.T., Kushiro I. Melting of a chromite-bearing harzburgite and generation of boninitic melts at low pressures under controlled oxygen fugacity // *Lithos*, 1996, V. 37, N , P. 1-13.
200. Dixon J.E., Stolper E.M., Holloway J.R. An experimental study of water and carbon dioxide solubilities in mid-ocean ridge basaltic liquids. Part 1: Calibration and solubility models // *J. Petrol.*, 1995, V. 36, N 6, P. 1607-1631.
201. Kadik A.A., Maksimov A.P., Ivanov B.V. Physical-chemical conditions of crystallization and the genesis of andesites (an example of the Klyuchevskoy group volcanoes) // *Moscow, Nauka publ.*, 1986. 158 p. (in Russian).
204. Putirka K., Johnson M., Kinzler R., Longhi J., Walker D. Thermobarometry of mafic igneous rocks based on clinopyroxene-liquid equilibria, 0-30 kbar // *Contribs Mineral. and Petrol.* 1996, V. 123, N ??, P. 92-108.
205. Righter K., Carmichael I.S.E. Phase equilibria of phlogopite lamprophyres from western Mexico: biotite-liquid equilibria and P-T estimates for biotite-bearing igneous rocks // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1996, V. 123, N 1, P. 1-21.
206. Merzbacher C., Egger D.H. A magmatic geohygrometer: Application to Mount St. Helens and other dacitic magmas // *Geology*, 1984. V. 12. N 10. P. 587-590.

208. Clemens J.D., Holloway J.R., White A.J.R. Origin of an A-type granite: Experimental constraints // *Amer. Miner.*, 1986, V. 71, N 3/4, P. 317-324.
209. Skjerlie K.P., Douce A.E.P., Johnston A.D. Fluid absent melting of a layered crustal protolith: implications for the generation of anatectic granites // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1993, V. 114, N 3, P. 365-378.
210. Skjerlie K.P., Douce A.E.P. Anatexis of interlayered amphibolites and pelite at 10 kbar: effect of diffusion of major components on phase relations and melt fraction // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1995, V. 122, N??, P. 62-78.
211. Beard J.S., Lofgren G.E., Sinha A.K., Tollo R.P. Partial melting of apatite-bearing charnockite, granulite, and diorite: Melt compositions, restite mineralogy, and petrologic implications // *J. Geophys. Res.*, 1994, V. 99, N 11B, P. 21591-21603.
213. Sen C., Dunn T. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolites at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1994, V. 117, N 4, P. 394-409.
214. Scaillet B., Pichavant M., Roux J. Experimental crystallization of leucogranite magmas // *J. Petrol.*, 1995, V. 36, N 3, P. 663-705.
215. Johnston A.D., Wyllie P.J. Interaction of granitic and basic magmas: experimental observations on contamination processes at 10 kbar with H₂O // *Contribs. Mineral. and Petrol.*, 1988, V. 98, N 3, P. 352-362.
216. Vielzeuf D., Holloway J.R. Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system (consequences for crustal differentiation) // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1988, V. 98, N 3, P. 257-276.
218. Wolf M.B., Wyllie P.J. Dehydration-melting of solid amphibolites at 10 kbar: Textural development, liquid interconnectivity and applications to the segregation of magmas // *Mineral. and Petrol.*, 1991, V. 44, N ??, P. 151-179.
221. Wolf M.B., Wyllie P.J. Garnet growth during amphibolite anatexis: Implications of a garnetiferous restite // *J. Geology*, 1993, V. 101, N ?, P. 357-373.
222. Rapp R.P., Watson E.B., Miller C.F. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites // *Precambrian Research*, 1991, V. 51, N 1-4, P. 1-25.
223. Holloway J.R., Burnham C.W. Melting relations of basalt with equilibrium water pressure less than total pressure // *J. Petrol.*, 1972, V. 13, Part 1, P. 1-29.
224. Allen J.C., Boettcher A.L. The stability of amphibole in andesite and basalt at high pressures // *Amer. Miner.*, 1983, V. 68, P. 307-314.
225. Hacker B.R. Amphibolite-facies-to-granulite-facies reactions in experimentally deformed, un-powdered amphibolite // *Amer. Miner.*, 1990, V. 75, N ??, P. 1349-1361.
226. Blank J.G., Stolper E.M., Carroll M.R. Solubilities of carbon dioxide and water in rhyolitic melt at 850°C and 750 bars // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1993, V. 119, N ??, P. 27-36.
227. Rutherford M.J., Devine J.D. The May 18, 1980, Eruption of Mount St. Helens: 3. Stability and chemistry of amphibole in the magma chamber // *J. Geophys. Res.*, 1988, V. 93B, N 10, P. 11949-11959.
228. Johnson M.C., Rutherford M.J. Experimentally determined conditions in the Fish Canyon Tuff, Colorado, Magma Chamber // *J. Petrol.*, 1989, V. 30, Part 3, P. 711-737.
229. Johnson M.C., Rutherford M.J., Hess P.C. Chassigny perthogenesis: melt compositions, intensive parameters, and water contents of Martian (?) magmas // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, V. 55, N 1, P. 349-366.

231. Baker L.L., Rutherford M.J. The effect of dissolved water on the oxidation state of silicic melts // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1996, V. 60, N 12, P. 2179-2187.
232. Beard J.S., Abitz R.J., Lofgren G.E. Experimental melting of crustal xenoliths from Kilbourne Hole, New Mexico and implications for the contamination and genesis of magmas // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1993, V. 115, N 1, P. 88-102.
237. Kawamoto T. Experimental constraints on differentiation and H₂O abundance of calc-alkaline magmas // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1996, V. 144, N ??, P. 577-589.
238. Khodorevskaya L.I., Zharikov V.A. Experimental simulation of amphibolites and ultrabasic rock interaction in subduction zones // *Petrology*, 1997, V. 5, N 1, P. 2-7.
239. Patino Douce A.E., Beard J.S. Effects of P, f_(O₂) and Mg/Fe ratio on dehydration melting of model metagreywackes // *J. Petrol.*, 1996, V. 37, N 5, P. 999-1024.
240. Patino Douce A.E. Effects of pressure and H₂O content on the compositions of primary crustal melts // *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1996, V. 87, N ??, P. 11-21.
241. Rapp R.P. Amphibole-out phase boundary in partially melted metabasalt, its control over liquid fraction and composition, and source permeability // *J. Geophys. Res.*, 1995, V. 100, N 8B, P. 15601-15610.
242. Grove T.L., Donnelly-Nolan J.M., Housh T. Magmatic processes that generated the rhyolite of Glass Mountain, Medicine Lake volcano, N. California // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1997, V. 127, N ??, P. 205-223.
243. Wagner T.P., Grove T.L. Experimental constraints on the origin of luna high-Ti ultramafic glasses // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997, V. 61, N 6, P. 1315-1327.
244. Gudfinnsson G.H., Presnall D.C. Melting relations of model lherzolite in the system CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ at 2.4-3.4 GPa and the generation of komatiites // *J. Geophys. Res.*, 1996, V. 101, N B12, P. 27701-27709.
245. Skjerlie K.P., Johnston A.D. Vapour-absent melting from 10 to 20 kbar of crustal rocks that contain multiple hydrous phases: Implications for anatexis in the deep to very deep continental crust and active continental margins // *J. Petrol.*, 1996, V. 37, N 3, P. 661-691.
246. Singh J., Johannes W. Dehydration melting of tonalites. Part II. Composition of melts and solids // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1996, V. 125, N 1, P. 26-44.
247. Kinzler R.J. Melting of mantle peridotite at pressures approaching the spinel to garnet transition: Application to mid-ocean ridge basalt petrogenesis // *J. Geophys. Res.*, 1997, V. 102, N B1, P. 853-874.
249. Edgar A.D., Vukadinovic D. Potassium-rich clinopyroxene in the mantle: An experimental investigation of a K-rich lamproite up to 60 kbar // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, V. 57, N 23/24, P. 5063-5072.
250. Edgar A.D., Mitchell R.H. Ultra high pressure-temperature melting experiments on an SiO₂-rich lamproite from Smoky Butte, Montana: Derivation of siliceous lamproite magmas from enriched sources deep in the continental mantle // *J. Petrol.*, 1997, V. 38, N 4, P. 457-477.
251. Patino Douce A.E. Experimental generation of hybrid silicic melts by reaction of high-Al basalt with metamorphic rocks // *J. Geophys. Res.*, 1995, V. 100, N B8, P. 15623-15639.
252. Rapp R.P., Watson E.B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling // *J. Petrol.*, 1995, V. 36, N 4, P. 891-931.
253. Hirose K. Melting experiment on lherzolite KLB-1 under hydrous conditions and generation of high-magnesian andesitic melts // *Geology*, 1997, V. 25, N 1, P. 42-44.

254. Walter M.J. Melting of garnet peridotite and the origin of komatiite and depleted lithosphere // *J. Petrol.*, 1998, V. 39, N 1, P. 29-60.
256. Khodorevskaya L.I., Zharikov V.A. Experimental study of amphibolite melting concerning to genesis of tonalite-trondhemite magmatic series // In: *Experimental and theoretical modelling of the processes of mineral formation (in Russian)*. Moscow, Nauka, 1998: p. 11-31.
257. Moore G., Carmichael I.S.E. The hydrous phase equilibria (to 3 kbar) of an andesite and basaltic andesite from western Mexico: constraints on water content and conditions of phenocryst growth // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1998, V. 130, N??, P. 304-319.
258. Falloon T.J., Green D.H., Jacques A.L., Hawkins J.W. Refractory magmas in Back-Arc basin settings - experimental constraints on the petrogenesis of a Lau Basin example // *J. Petrol.*, 1999, V. 40, N 2, P. 255-277.
260. Konzett J. Phase relations and chemistry of Ti-rich K-richrichterite-bearing mantle assemblages: an experimental study to 8.0 GPa in a Ti-KNCMASH system // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1997, V. 128, N 4, P. 385-404.
261. Nimis P., Ulmer P. Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks Part 1: An expanded structural geobarometer for anhydrous and hydrous, basic and ultrabasic systems // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1998, V. 133, N 1/2, P. 122-135.
262. Falloon T.J., Green D.H., O'Neill H.St.C., Hibberson W.O. Experimental tests of low degree peridotite partial melt compositions: implications for the nature of anhydrous near-solidus peridotite melts at 1 GPa // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1997, V. 152, N ??, P. 149-162.
263. Blatter D.L., Carmichael I.S.E. Plagioclase-free andesites from Zitacuaro (Michoacan), Mexico: petrology and experimental constraints // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1998, V.132, N??, P.121-138.
264. Kawamoto T., Holloway J.R. Melting temperature and partial melt chemistry of H₂O-saturated mantle peridotite to 11 Gigapascals // *Science*, 1997, V. 276, N??, P. 240-243.
266. Winther K.T. An experimentally based model for the origin of tonalitic and trondhjemitic melts // *Chem. Geol.*, 1996, V. 127, N. 1, P. 43-59.
267. Draper D.S., Green T.H. P-T phase relations of silicic, alkaline, aluminous mantle-xenolith glasses under anhydrous and C-O-H fluid-saturated conditions // *J. Petrol.*, 1997, V. 38, N 9, P. 1187-1224.
268. Herzberg C., Zhang J.Z. Melting experiments on komatiite analog compositions at 5 Gpa // *Amer. Miner.*, 1997, V. 82, N 3/4, P. 354-367.
269. Springer W., Seck H.A. Partial fusion of basic granulites at 5 to 15 kbar: implications for the origin of TTG magmas // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1997, V. 127, N 1/2, P. 30-45.
270. Metrich N., Rutherford M.J. Low pressure crystallization paths of H₂O-saturated basaltic-hawaiitic melts from Mt Etna: implications for open-system degassing of basaltic volcanoes // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1998, V. 62, N 7, P. 1195-1205.
271. Pineau F., Shilobreeva S., Kadik A., Javoy M. Water solubility and D/H fractionation in the system basaltic andesite-H₂O at 1250°C and between 0.5 and 3 kbars // *Chem. Geol.*, 1998, V. 147, N 1/2, P.173-184.
272. Robinson J.A.C., Wood B.J., Blundy J.D. The beginning of melting of fertile and depleted peridotite at 1.5 GPa // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1998, V. 155, N ??, P. 97-111.
273. Kogiso T., Hirose K., Takahashi E. Melting experiments on homogeneous mixtures of peridotite and basalt: application to the genesis of ocean island basalts // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1998, V. 162, N 1, P. 45-61.

274. Takahashi E., Nakajima K., Wright T.L. Origin of the Columbia River basalts: melting model of a heterogeneous plume head // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1998, V. 162, N 1/4, P. 63-80.
275. Kaszuba J.P., Wendlandt R.F. Effect of carbon dioxide on dehydration melting reactions and melt compositions in the lower crust and the origin of alkaline rocks // *J. Petrol.*, 2000, V. 41, N 3, P. 363-386.
276. Becker A., Holtz F., Johannes W. Liquidus temperatures and phase compositions in the system Qz-Ab-Or at 5 kbar and very low water activities // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1998, V. 130, P. 213-224.
277. Wagner T.P., Grove T.L. Melt/harzburgite reaction in the petrogenesis of tholeiitic magma from Kilauea volcano, Hawaii // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1998, V. 131, N 1, P. 1-12.
278. Putirka K. Garnet + liquid equilibrium // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1998, V. 131, N??, P. 273-288.
279. Gaetani G.A., Grove T.L. The influence of water on melting of mantle peridotite // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1998, V. 131, N ??, P. 323-346.
283. Sato H., Nakada S., Fujii T., Nakamura M., Suzuki-Kamata K. Groundmass pargasite in the 1991-1995 dacite of Unzen volcano: phase stability experiments and volcanological implications // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1999, V. 89, N 1/4, P. 197-212.
284. Rapp R.P., Shimizu N., Norman M.D., Applegate G.S. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa // *Chem. Geol.*, 1999, V. 160, N ?, P. 335-356.
285. Martel C., Pichavant M., Holtz F., Scaillet B. Effects of f_{O_2} and H_2O on andesite phase relations between 2 and 4 kbar // *J. Geophys. Res.*, 1999, V. 104B, N 12, P. 29453-29470.
286. Gardien V., Thompson A.B., Ulmer P. Melting of biotite+plagioclase+quartz gneisses: the role of H_2O in the stability of amphibole // *J. Petrol.*, 2000, V. 41, N 5, P. 651-666.
287. Cottrell E., Gardner J.E., Rutherford M.J. Petrologic and experimental evidence for the movement and heating of the pre-eruptive Minoan rhyodacite (Santorini, Greece) // *Contribs. Mineral. and Petrol.*, 1999, V. 135, N ??, P. 315-331.
288. Longhi J., Auwera J.V., Fram M.S., Duchesne J.-C. Some phase equilibrium constraints on the origin of proterozoic (massif) anorthosites and related rocks // *J. Petrol.*, 1999, V. 40, N 2, P. 339-362.
289. Scaillet B., Evans B.W. The 15 June 1991 eruption of Mount Pinatubo. I. Phase equilibria and pre-eruption P-T- f_{O_2} - f_{H_2O} conditions of the dacite magma // *J. Petrol.*, 1999, V. 40, N 3, P. 381-411.
291. Falloon T.J., Green D.H., Danyushevsky L.V., Faul U.H. Peridotite Melting at 1.0 and 1.5 GPa: An experimental evaluation of techniques using diamond aggregates and mineral mixes for determination of near-solidus melts // *J. Petrol.*, 1999, V. 40, N. 9, P. 1343-1375.
292. Falloon T.J., Danyushevsky L.V. Melting of refractory mantle at 1.5, 2 and 2.5 GPa under anhydrous and H_2O -undersaturated conditions: Implications for the petrogenesis of high-Ca boninites and the influence of subduction components on mantle melting // *J. Petrol.*, 2000, V. 41, P. 257-283.
294. Parman S.W., Dann J.C., Grove T.L., de Wit M.J. Emplacement conditions of komatiite magmas from the 3.49 Ga Komati Formation, Barberton Greenstone Belt, South Africa // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1997, V. 150, N ??, P. 303-323.
295. Ernst W.G., Liu Jun. Experimental phase-equilibrium study of Al- and Ti-contents of calcic amphibole in MORB—a semiquantitative thermobarometer // *Amer. Min.*, 1998, V. 83, P. 952-969 + Liu Jun et al. Stability of hydrous phases in subducting oceanic crust // *EPSL*, 1996, V. 143, N 1/4, P. 161-171.

296. Liu T.C., Chen B.R., Chen C.H. Melting experiment of a Wannienta basalt in the Kuanyinshan area, northern Taiwan, at pressures up to 2.0 GPa // *J. Asian Earth Sci.*, 2000, V. 18, P. 519-531.
297. Johnson M.C., Plank T. Dehydration and melting experiments constrain the fate of subducted sediments // *G.G.G.*, 1999, V. 1, N 1999 GC000014.
298. Pickering-Witter J., Johnston A.D. The effects of variable bulk composition on the melting systematics of fertile peridotitic assemblages // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 2000, V. 140, N ??, P. 190-211.
299. Falloon T.J., Danyushevsky L.V., Green D.H. Peridotite melting at 1 GPa: Reversal experiments on partial melt compositions produced by peridotite - basalt sandwich experiments // *J. Petrol.*, 2001, V. 42, N 12, P. 2363-2390.
300. Falloon T.J., Danyushevsky L.V., Green D.H. (299 continued): Appendix A + B.
301. Hermann J., Green D.H. Experimental constraints on high pressure melting in subducted crust // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, V. 188, N ??, P. 149-168.
302. Xirouchakis D., Hirschmann M.M., Simpson J.A. The effect of titanium on the silica content and on mineral-liquid partitioning of mantle-equilibrated melts // *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 2001, V. 65, N 14, P. 2201-2217.
303. Muntener O., Kelemen P.B., Grove T.L. The role of H₂O during crystallization of primitive arc magmas under uppermost mantle conditions and genesis of igneous pyroxenites: an experimental study // *Contribs Mineral. Petrol.*, 2001, V. 141, N ??, P. 643-658.
304. Kogiso T., Hirschmann M.M. Experimental study of clinopyroxenite partial melting and the origin of ultra-calcic melt inclusions // *Contribs Mineral. Petrol.*, 2001, V. 142, N ??, P. 347-360.
306. Hirose K., Fei Y. Subsolidus and melting phase relations of basaltic composition in the uppermost lower mantle // *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 2002, V. 66, N 12, P. 2099-2108.
307. Ulmer P., Sweeney R. Generation and differentiation of group II kimberlites: Constraints from a highpressure experimental study to 10 GPa // *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 2002, V. 66, N 12, P. 2139- 2153.
308. Pichavant M., Mysen B.O., MacDonald R. Source and H₂O content of high-MgO magmas in island arc settings: An experimental study of a primitive calc-alkaline basalt from St. Vincent, Lesser Antilles arc // *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 2002, V. 66, N 12, P. 2193-2209.
309. Schwab B.E., Johnston A.D. Melting systematics of modally variable, compositionally intermediate peridotites and the effects of mineral fertility // *J.Petrol.*, 2001, V. 42, N 10, P. 1789-1811.
310. Berndt J., Holtz F., Koepke J. Experimental constraints on storage conditions in the chemically zoned phonolitic magma chamber of the Laacher See volcano // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 2001, V. 140, N ??, P. 469-486.
314. Girnis A.V., Ryabchikov I.D., Bogatikov O.A. Genesis of komatiites and komatiitic basalts // Moscow: Nauka, 1987, 120 p. (in Russian).
315. Girnis A.V., Bulatov V.K., Brey G.P. Primary magmas of the high-magnesia basalts of Mauna Kea volcano, Hawaii: an experimental study // *Geochem. Intern.*, 2003, V. 41, N 4, P. 324-337.
316. Pichavant M., Martel C., Bourdier J.-L., Scaillet B. Physical conditions, structure, and dynamics of a zoned magma chamber: Mount Pelee (Martinique, Lesser Antilles Arc) // *J. Geophys. Res.*, 2002, V. 107, N B5, P. 2093-2121.
317. Koepke J., Sandrin T. Feig S.T., Snow J., Freise M. Petrogenesis of oceanic plagiogranites by partial melting of gabbros: an experimental study // *Contribs Mineral. and Petrol.*, 2004, V. 146, N?, P. 414-432.

318. Agee C.B., Draper D.S. Experimental constraints on the origin of Martian meteorites and the composition of the Martian mantle // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 2004, V. 224, N?, P. 415-429.
319. Pertermann M., Hirschmann M.M. Anhydrous partial melting experiments on MORB-like eclogite: phase relations, phase compositions and mineral - melt partitioning of major elements at 2 - 3 Gpa // *J. Petrol.*, 2003, V. 44, N 12, P. 2173-2201.
320. Kogiso T., Hirschmann M.M., Frost D.J. High-pressure partial melting of garnet pyroxenite: possible mafic lithologies in the source of ocean island basalts // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, V. 216, P. 603-617.
321. Hirschmann M.M., Kogiso T., Baker M.B., Stolper E.M. Alkalic magmas generated by partial melting of garnet pyroxenite // *Geology*, 2003, V. 31, N 6, P. 481-484.
322. Gudfinnsson G.H., Presnall D.C. Melting behaviour of model lherzolite in the system CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-FeO at 0.7-2.8 GPa // *J. Petrol.*, 2000, V. 41, N 8, P. 1241-1269.
323. Wasylenki L.E., Baker M.B., Kent A.J.R., Stolper E.M. Near-solidus melting of the shallow upper mantle: partial melting experiments on depleted peridotite // *J. Petrol.*, 2003, V. 44, N 7, P. 1163-1191.
324. Laporte D., Toplis M.J., Seyler M., Devidal J.-L. A new experimental technique for extracting liquids from peridotite at very low degrees of melting: application to partial melting of depleted peridotite // *Contribs. Mineral. and Petrol.*, 2004, V. 146, P. 463-484.
325. Parman S.W., Grove T.L. Harzburgite melting with and without H₂O: experimental data and predictive modeling // *J. Geophys. Res.*, 2004, V. 109, B02201, doi: 10.1029/2003/JB0025666.
327. Maaloe S. The PT-phase relations of an MgO-rich Hawaiian tholeiite: the compositions of primary Hawaiian tholeiites // *Contribs. Mineral. and Petrol.*, 2004, V. 148, N?, P. 236-246.
328. Putirka K.D., Mikaelian H., Ryerson F., Shaw H. New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic, evolved, and volatile-bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and the Snake River Plain, Idaho // *Amer. Miner.*, 2003, V. 88, N?, P. 1542-1554.
329. Izbekov P., Gardner J.E., Eichelberger J.C. Comagmatic granophyre and dacite from Karymsky volcanic center, Kamchatka: experimental constraints for magma storage conditions // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2004, V. 131, N 1, P. 1-18.
330. Esperanca S., Holloway J.R. The origin of the high-K latites from Camp Creek, Arizona: constraints from experiments with variable f_{O2} and aH₂O // *Contribs. Mineral. Petrol.*, 1986, V. 93, N ?, P. 504-512.
331. Klimm K., Holtz F., Johannes W., King P.L., Fractionation of metaluminous A-type granites: an experimental study of the Wangrah Suite, Lachlan Fold Belt, Australia // *Precam. Res.*, 2003, V. 124, N ?, P. 327-341.
332. Minitti M.E., Rutherford M.J. Genesis of the Mars Pathfinder "sulfur-free" rock from SNC parental liquids // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2000, V. 64, N 14, P. 2535-2547.
334. Morse S.A., Brady J.B., Sporleder B.A. Experimental petrology of the Kiglapait intrusion: co-tectonic trace for the Lower zone at 5 kbar in graphite // *J. Petrol.*, 2004, V. 45, N 11, P. 2225-2259.
335. Villiger S., Ulmer P., Muntener O., Thompson A.B. The liquid line of descent of anhydrous, mantle-derived, tholeiitic liquids by fractional and equilibrium crystallization - an experimental study at 1.0 Gpa // *J. Petrol.*, 2004, V. 45, N 12, P. 2369-2388.
336. Berndt J., Koepke J., Holtz F. An experimental investigation of the influence of water and oxygen fugacity on differentiation of MORB at 200 Mpa // *J. Petrol.*, 2005, V. 46, N 1, P. 135-167.

337. Keshav S., Gudfinnsson G.H., Sen G., Fei Y. High-pressure melting experiments on garnet clinopyroxenite and the alkalic to tholeiitic transition in ocean-island basalts // *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 2004, V. 223, P. 365-379.
338. Asahara Y., Ohtani E. Melting relations of the hydrous primitive mantle in the CMAS-H₂O system at high pressures and temperatures, and implications for generation of komatiites // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2001, V. 125, P. 31-44.
339. Xi Liu, O'Neill H.St.C. Partial melting of spinel lherzolite in the system CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂+/-K₂O at 1.1 Gpa // *J. Petrol.*, 2004, V. 45, N 7, P. 1339-1368.
340. Xi Liu, O'Neill H.St.C. The Effect of Cr₂O₃ on the Partial melting of spinel lherzolite in the System CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-Cr₂O₃ at 1.1 Gpa // *J. Petrol.*, 2004, V. 45, N 11, P. 2261-2286.
341. Rutherford M.J., Devine J.D. Magmatic conditions and magma ascent as indicated by hornblende phase equilibria and reactions in the 1995-2002 Soufriere Hills magma // *J. Petrol.*, 2003, V. 44, N 8, P. 1433-1454.
342. Couch S., Harford C.L., Sparks R.S.J., Carroll M.R. Experimental constraints on the conditions of formation of highly calcic plagioclase microlites at the Soufriere Hills Volcano, Montserrat // *J. Petrol.*, 2003, V. 44, N 8, P. 1455-1475.
344. Prouteau G., Scaillet B. Experimental constraints on the origin of the 1991 Pinatubo dacite // *J. Petrol.*, 2003, V. 44, N 12, P. 2203-2241.
345. Barclay J., Carmichael I.S.E. A hornblende basalt from Western Mexico: water-saturated phase relations constrain a pressure - temperature window of eruptibility // *J. Petrol.*, 2004, V. 45, N 3, P. 485-506.
346. Schmidt M.W., Green D.H., Hibberson W.O. Ultra-calcic magmas generated from Ca-depleted mantle: an experimental study on the origin of ankaramites // *J. Petrol.*, 2004, V. 45, N 3, P. 531-554.
347. Nekvasil H., Dondolini A., Horn J., Filiberto J., Long H., Lindsley D.H. The origin and evolution of silica-saturated alkalic suites: an experimental study // *J. Petrol.*, 2004, V. 45, N 4, P. 693-721.
348. Costa F., Scaillet B., Pichavant M. Petrological and experimental constraints on the pre-eruption conditions of holocene dacite from volcan San Pedro (36oS, Chilean Andes) and the importance of sulphur in silicic subduction-related magmas // *J. Petrol.*, 2004, V. 45, N 4, P. 855-881.
349. Holtz F., Sato H., Lewis J., Behrens H., Nakada S. Experimental petrology of the 1991-1995 Unzen dacite, Japan. Part I: phase relations, phase composition and pre-eruptive conditions // *J. Petrol.*, 2005, V. 46, N 2, P. 319-337.
351. Scaillet B., MacDonald R. Experimental constraints on the relationships between peralkaline rhyolites of the Kenya Rift Valley // *J. Petrol.*, 2003, V. 44, N 10, P. 1867-1894.
- D1. Tuff G., Takahashi E., Gibson S. A. Experimental constraints on the role of garnet pyroxenite in the genesis of high-Fe mantle plume derived melts // *J. Petrol.*, 2005, V. 46, N 10, P. 2023-2058.

Часть III

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Введение

Полученные выборки представлены двухфазными, трехфазными, четырехфазными и пятифазными системами, состоящими из расплава (стекла) и различных наборов минеральных фаз. Двухфазные системы представлены следующими выборками: основной-ультраосновной расплав-шпинель (далее вместо термина основной-ультраосновной расплав будет использоваться укороченный термин расплав), расплав-оливин, расплав-ортопироксен, расплав-клинопироксен (авгит), расплав-плагиоклаз. Для большинства выборок были выведены уравнения, связывающие интенсивные параметры в этих парагенезисах, представленных двух-, трех- и четырехфазными системами, содержащими 100 и более точек (581 уравнение). Трехфазные системы представлены 10 вариантами (выборками) расплав-двухминеральный парагенезис, исходя из формулы $C = 5!:[2!(5 - 2)!]$ числа сочетаний пяти минеральных видов по два вида. Это следующие системы: расплав-шпинель-оливин, расплав-шпинель-ортопироксен, расплав-шпинель-клинопироксен, расплав-шпинель-плагиоклаз, расплав-оливин-ортопироксен, расплав-оливин-клинопироксен, расплав-оливин-плагиоклаз, расплав-ортопироксен-клинопироксен, расплав-ортопироксен-плагиоклаз, расплав-клинопироксен-плагиоклаз. Две из этих систем, расплав-шпинель-плагиоклаз и расплав-ортопироксен-плагиоклаз, представлены немногочисленными данными (менее 100 т.), обработка которых не проводилась. Система расплав-шпинель-плагиоклаз в условиях атмосферного давления – менее 50 т.; в условиях повышенного давления – менее 50 т. Мы полагаем, что редкость минерального парагенезиса с расплавом в экспериментальных условиях, вероятно, указывает и на редкость этого парагенезиса в природных условиях. Это, в свою очередь, позволяет предположить, что диагностируемый по структурным признакам парагенезис шпинель-плагиоклаз в магматических породах будет изначально неравновесен по составу минералов. Система расплав-ортопироксен-плагиоклаз в условиях атмосферного давления представлена выборкой ~50 т.; в условиях повышенного давления представлена выборкой менее 100 т. Возможно, предположения по парагенезису шпинель-плагиоклаз могут быть распространены и на этот парагенезис. Четырехфазные системы, как и трехфазные, представлены 10 вариантами расплав-трехминеральный парагенезис, исходя из формулы $C = 5!:[3!(5 - 3)!]$ числа сочетаний 5 минеральных видов по 3 вида. По частоте встречаемости среди экспериментальных результатов их можно разбить на 3 группы:

I. расплав-оливин-ортопироксен-клинопироксен (250 т. в условиях повышенного давления); расплав-оливин-клинопироксен-плагиоклаз (350 т. в условиях атмосферного давления); для этих выборок были созданы уравнения, связывающие интенсивные параметры в системах);

II. шпинель-оливин-ортопироксен, шпинель-оливин-клинопироксен, шпинель-ортопироксен-клинопироксен, ортопироксен-клинопироксен-плагиоклаз (выборки, содержащие от 50 до ~100 т., обработка которых не проводилась, все эти эксперименты проводились под давлением);

III. шпинель-оливин-плагиоклаз, шпинель-ортопироксен-плагиоклаз, шпинель-клинопироксен-плагиоклаз, оливин-ортопироксен-плагиоклаз (выборки, представленные единичными результатами).

Исходя из приведенного выше деления, можно предположить, что природные равновесные минеральные парагенезисы, представленные в третьей группе, маловероятны. Среди пятифазных систем, которые могут быть представлены 5 вариантами $C = 5!:[4!(5 - 4)!]$, только одна — расплав-шпинель-оливин-ортопироксен-клинопироксен — представлена выборкой, приближающейся к 100 т. в условиях повышенного давления и, возможно, может быть равновесна в природных условиях.

Глава 7. Уравнения, полученные по двухфазной системе расплав–минерал

Обсуждение результатов исследований межфазного и внутрифазного распределений породообразующих элементов по данным экспериментальных исследований для систем расплав–минералы (шпинель, оливин, ортопироксен, клинопироксен (авгит), плагиоклаз).

В этой главе представлены обобщенные характеристики полученных нами эмпирических уравнений и результаты тестирования (на сформированных нами выборках из базы данных «ИНФОРЕКС») опубликованных наиболее используемых и известных уравнений для расчета равновесных температур, давлений и содержаний элементов в расплаве. Напоминаем читателю, что наряду с указанным минералом или минеральным парагенезисом и расплавом, равновесным с ними, может присутствовать еще + n других минеральных фаз в расплаве, но составы этих минералов не были использованы в расчетах.

7.1. Уравнения, полученные для системы расплав–шпинель

По данным Г.П. Пономарева и М.Ю. Пузанкова [18] на распределение железа и магния в системе расплав–шпинель влияет состав шпинели. Для кристаллов шпинели, содержащих > 50 атомных % Al распределение Fe^{2+}/Mg отношения описывается уравнением, отличным от подобного уравнения для системы с менее глиноземистой шпинелью. Для случая атмосферного давления выборка (300 т.) содержала 18 точек с высокоглиноземистой шпинелью, которые были отброшены и самостоятельно не обрабатывались. Для случая повышенного давления выборка (221 т.) была разделена на 2 части: 95 точек (< 50 %) и 126 точек (> 50 %). Это привело и к разделению массивов по давлениям, при которых проводились эксперименты: массив (95 т.) – интервал давлений 1–15 кб; массив (126 т.) – интервал давлений 10–28 кб.

Были получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин:

I. эксперименты в условиях атмосферного давления: концентрации в расплаве Ti – 4 уравнения, Al – 1 уравнение, Fe^{3+} – 2 уравнения, Fe^{2+} – 2 уравнения, Mg – 2 уравнения, Cr – 1 уравнение, сумма щелочей – 1 уравнение, Fe^{2+}/Mg отношение – 2 уравнения, $\Sigma Fe/Mg$ – 2 уравнения, Fe^{3+}/Fe^{2+} – 2 уравнения, T – 2 уравнения, f_{O_2} – 2 уравнения, равновесное распределение элементов в шпинели – 2 уравнения;

II. эксперименты в условиях повышенного давления: концентрации в расплаве Ti – по 1 уравнению для каждого массива; Al – по 1 уравнению для каждого массива; Fe: 95 т. – 2 уравнения, 126 т. – 1 уравнение; Mg – по 1 уравнению для каждого массива, Cr – по 1 уравнению для каждого массива, Fe^{2+}/Mg отношение: 95 т. – 1 уравнение, 126 т. – 2 уравнения; температура – по 1 уравнению для каждого массива; давление – 2 уравнения в диапазоне 1–28 кб; равновесное соотношение элементов в кристаллах шпинели – 1 уравнение для массива 95 т.

Расчет содержания титана в расплаве. Результаты расчетов по экспериментальным данным при атмосферном давлении (~260 т.) позволяют утверждать следующее: коэффициенты корреляции для полученных уравнений лежат в интервале 0.89–0.93, но значения χ^2 оставляют пригодными для расчетов только 2 уравнения. Это уравнение (**GSP2b**), где учитывается содержание магния в расплаве и распределение среднеквадратичной ошибки с вероятностью 0.99 соответствует нормальному распределению, а также уравнение (**GSP2d**), в котором учитывается влияние равновесной температуры, а предположение о нормальном распределении среднеквадратичной ошибки допустимо на уровне вероятности 0.9. В уравнения, полученные по экспериментальным точкам для обоих массивов при повышенных давлениях, входит величина давления, и они имеют соответственно коэффициенты корреляции 0.9 и 0.8. Значения χ^2 указывают, что с вероятностями 0.95 и 0.99 можно полагать нормальность распределений среднеквадратичной ошибки. Это позволяет использовать расчеты содержания титана при повышенном давлении. $K_D(sp-m)$ при атмосферном давлении пропорционален температуре (R 0.41), при давлениях 1–15 кб содержанию алюминия (R 0.5), а также P и T (R 0.35). Вели-

чина $K_D(sp-m)$ для титана в экспериментах при атмосферном давлении и при повышенных давлениях в интервале 1–28 кб меняется от 0.1 до 3.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Уравнение, полученное по массиву при атмосферном давлении, имеет R 0.84 и значение χ^2 1.7, что позволяет использовать его для расчетов. Уравнения, полученные по массивам при повышенных давлениях, имеют значения R 0.91 и 0.85, значения χ^2 2.04 и 2.47, соответственно. Величина χ^2 2.04 для интервала давлений 1–15 кб дает основание исключить предположение о нормальности распределения среднеквадратичной ошибки, тогда как для интервала 10–28 кб можно полагать с вероятностью 0.95, что распределение среднеквадратичной ошибки подчиняется закону нормального распределения. Поэтому уравнение для интервала 1–15 кб можно использовать как оценочное, тогда, как характеристики 2-го уравнения позволяют его использовать для расчетов. $K_D(sp-m)$ для алюминия при атмосферном давлении пропорционален (R 0.33) содержанию магния в расплаве. В экспериментах при повышенных давлениях его величина становится в основном прямо пропорционально зависимой от величины давления (1–15 кб, R 0.4; 10–28 кб, R 0.75). Величина $K_D(sp-m)$ для алюминия в условиях атмосферного давления лежит в интервале 0.6–2.5. В условиях повышенного давления она становится > 1 и увеличивается с ростом давления, принимая значения 1.6–3 в интервале давлений 1–15 кб и 2.7–4 в интервале давлений 10–28 кб.

Расчет содержания **железа Fe^{3+}** в расплаве. Выборка представлена только экспериментами в условиях атмосферного давления. Было получено 2 уравнения, для которых значения R 0.86 и 0.88, а величина χ^2 , соответственно, 4.1 и 1.59, что позволяет полагать на уровнях вероятности 0.9 и 0.99 соответствие нормальному распределению среднеквадратичной ошибки. $K_D(sp-m)$ для Fe^{3+} прямо пропорционален содержанию натрия в расплаве (R 0.32) и обратно пропорционален температуре (R 0.37). $K_D(sp-m)$ для $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ в интервале давлений 1–15 кб обратно пропорционально (R 0.25) содержанию кремния в расплаве. Величина $K_D(sp-m)$ для Fe^{3+} определена только в условиях атмосферного давления и принимает значения от 0.6 до 30.

Расчет содержания **железа Fe^{2+}** в расплаве. Для выборки по экспериментам в условиях атмосферного давления были получены следующие результаты: уравнения характеризуются значениями R 0.9 и 0.91, величина χ^2 имеет значения 1.18 и 1.34. Эти результаты позволяют полагать нормальность распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99, использовать эти уравнения для расчетов и судить о равновесности содержаний кремния и алюминия в расплаве. По выборкам при повышенном давлении получились следующие результаты: интервал 1–15 кб – 2 уравнения, характеризующиеся значениями R 0.97 и 0.98, величинами χ^2 1.24 и 7.24, соответственно; интервал 10–28 кб – полученное уравнение характеризуется R 0.91 и χ^2 0.59. Первое уравнение для интервала 1–15 кб по своим характеристикам может быть использовано для расчетов, во втором уравнении учет концентрации кремния в расплаве дал отрицательный результат. Уравнение для интервала 10–28 кб пригодно для расчетов, т. к. среднеквадратичная ошибка распределена нормально на уровне вероятности 0.99. $K_D(sp-m)$ для Fe^{2+} в условиях атмосферного давления обратно пропорционален содержанию магния в расплаве (R 0.6) и прямо пропорционален содержанию натрия в расплаве (R 0.52). При давлениях 1–15 кб $K_D(sp-m)$ для $Fe^{2+}/\Sigma Fe$ прямо пропорционален содержанию кремния в расплаве (R 0.71) и обратно пропорционален содержанию магния в расплаве (R 0.4). $K_D(sp-m)$ для $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ в этом же интервале давлений обратно пропорционален содержанию кремния в расплаве (R 0.25). При давлениях 10–28 кб $K_D(sp-m)$ для $Fe^{2+}/\Sigma Fe$ прямо пропорционален содержаниям кремния (R 0.8) и натрия (R 0.5) в расплаве и обратно пропорционален содержанию магния в расплаве (R 0.6), а также значениям температуры (R 0.6) и давления (R 0.4) при проведении экспериментов. При атмосферном давлении величина $K_D(sp-m)$ для $Fe^{2+}/\Sigma Fe$ лежит в интервале 0.8–5.8. При повышенных давлениях в интервале 1–15 кб K_D принимает значения 0.8–2.7, в интервале давлений 10–28 кб принимает значения 0.5–2.2.

Расчет содержания **магния** в расплаве. По выборке экспериментов при атмосферном давлении были получены 2 уравнения, имеющие R 0.93 и 0.95, для которых среднеквадратичная ошибка на уровне вероятности 0.99 распределена нормально (χ^2 0.81 и 1.27). Эти результаты позволяют использовать оба уравнения для количественных расчетов и оценивать достоверность расчетов равновесной температуры (численная величина температуры входит в одно из уравнений). Уравнения, полученные по выборкам для повышенных давлений, также характеризуются высокими значениями R (0.93 и 0.96), а распределение среднеквадратичной ошибки χ^2 (1.69 и 1.67) позволяет полагать, что на уровне вероятности 0.9 для интервала давлений 1–15 кб и на уровне вероятности 0.99 для интервала 10–28 кб соответствуют нормальному распределению. Эти результаты дают возможность также использовать оба этих уравнения для расчетов. $K_D(sp-m)$ для **магния** в условиях атмосферного давления прямо пропорционален содержанию алюминия (R 0.8) и натрия (R 0.7) в расплаве и обратно пропорционален содержаниям железа (R 0.5) и магния (R 0.6) в нем. В экспериментальных результатах при давлениях 1–15 кб картина сходная, но проявляется и влияние содержания кремния в расплаве (R 0.5). Для интервала давлений 10–28 кб усиливается влияние магния (R -0.93) и натрия (R 0.8) в расплаве, а влияние алюминия, кремния и натрия остается примерно на прежнем уровне. При атмосферном давлении величина $K_D(sp-m)$ для магния принимает значения 0.8–3.5. В условиях повышенного давления эта величина становится > 1 и при давлениях 1–15 кб лежит в диапазоне 1.02–2.4; при давлениях 10–28 кб – в диапазоне 1.2–3.4.

Расчет содержания **хрома** в расплаве. Параметры уравнения, полученного по выборке для атмосферного давления, позволяют использовать его только как оценочное. Аналогичный результат получился и для уравнения, полученного по выборке в интервале давлений 1–15 кб. Уравнение, полученное по выборке 10–28 кб, характеризуется значением R 0.9 и величиной χ^2 1.56, позволяет на уровне вероятности 0.9 полагать нормальное распределение среднеквадратичной ошибки, что делает его пригодным для расчетов.

$K_D(sp-m)$ для хрома в условиях атмосферного давления оказался прямо пропорционален содержанию натрия (R 0.71) в расплаве и обратно пропорционален содержанию магния (R 0.4) и величине температуры (R 0.42). В интервале давлений 1–15 кб величина $K_D(sp-m)$ для хрома обратно пропорциональна содержанию магния в расплаве, а также температуре и давлению со значениями $R \sim 0.3-0.5$. Величина $K_D(sp-m)$ для хрома при атмосферном давлении принимает значения 54–3000; при повышенном давлении в интервале 1–15 кб составляет 46–630; в интервале 10–28 кб – 10–250.

В условиях атмосферного давления выявилась зависимость содержания **суммы щелочей** в расплаве от состава шпинели. Уравнение (**GSP13a**) характеризуется значением R 0.75, но величина χ^2 2.19 указывает на возможность предположения о нормальности распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95. Это делает возможным использования этого уравнения для проверки предположений о щелочности расплава в магматических породах близповерхностного генезиса (1–3 км). В условиях повышенного давления (1–28 кб, 221т.) сумму щелочей в расплаве можно оценить как функцию от

$[(Al, Ti, Mg)_{sp} (Mg, Ti)_m P]$ с $R \sim 0.82$, что позволяет предположить отсутствие связи щелочности с содержанием Fe^{3+} в шпинели. Существование зависимости степени окисления железа в магме от щелочности [5], позволяет предположить, что в условиях давления корреляция между содержаниями Fe^{3+} в расплаве и кристалле шпинели слабая.

Расчет значений **железо-магниевого отношения** в расплаве. По выборке для экспериментов при атмосферном давлении было получено 2 уравнения, позволяющих рассчитывать величины Fe^{2+}/Mg или $(Fe^{2+} + Fe^{3+})/Mg$ без учета содержания титана в шпинели в аргументе функции и 2 уравнения с учетом его содержания в шпинели. Уравнения, в которых не учитывался титан, из-за больших значений χ^2 можно использовать только как оценочные, не-

смотря на высокие значения $R \sim 0.97$. Уравнения с учетом титана имеют значения $R \sim 0.97$, χ^2 3.51 и 2.98, позволяют на уровне вероятности 0.92–0.95 полагать нормальное распределение среднеквадратичной ошибки и могут быть использованы для расчетов. По выборке экспериментов при повышенном давлении было получено 3 уравнения: 1 для интервала 1–15 кб и 2 для интервала 10–28 кб. Уравнение для интервала 1–15 кб (R 0.99) из-за высоких значений χ^2 может быть использовано только как оценочное. Два уравнения для интервала 10–28 кб (R 0.93 и 0.99, χ^2 2.24 и 1.96) по этим характеристикам могут быть использованы для расчетов (на уровне вероятности 0.95 можно полагать нормальное распределение среднеквадратичной ошибки). Кроме того, учет при расчетах величины среднеквадратичной ошибки позволяет судить о равновесности содержаний алюминия в расплаве, т. к. его содержание учитывается в одной из формул. Величина $K_D(sp-m)$ для железо-магниевого отношения при атмосферном давлении принимает значения от 0.52 до 2.34 и обратно пропорционально содержанию алюминия в расплаве (R 0.4). При повышенном давлении в интервале 1–15 кб K_D принимает значения 0.5–1.3 и его величина сильно зависима от содержания алюминия в расплаве (R -0.71), что и сказалось на величине χ^2 . В интервале давлений 10–28 кб K_D принимает значения 0.3–0.86 и менее зависимо от содержания алюминия в расплаве (R -0.37).

Расчет значений **Fe^{3+}/Fe^{2+} отношения** в расплаве. Эти расчеты выполнены только для случая атмосферного давления. Два полученных уравнения характеризуются значениями R 0.88 и величинами χ^2 2.74 и 2.32, соответственно, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 нормальное распределение среднеквадратичной ошибки. Диапазон значений этого отношения 0.01–1.

Расчет значений **температуры** равновесия. По экспериментам в условиях атмосферного давления было получено 2 уравнения, характеризующиеся значениями R 0.85 и 0.86. Значение χ^2 5.92 для первого уравнения позволяет использовать это уравнение только как оценочное. Для второго уравнения значение χ^2 3.04 указывает на нормальность распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 и его можно использовать для расчетов. Диапазон рассчитываемых значений температур 1100–1500 °С. Для повышенного давления было рассчитано по одному уравнению для каждого из интервалов: 1–15 кб и 10–28 кб. Уравнения характеризуются значениями R 0.86 и 0.88. Значения величины χ^2 0.64 и 1.45 позволяют полагать, что среднеквадратичная ошибка на уровне вероятности 0.95 и 0.99, соответственно, распределена нормально, оба этих уравнения могут быть использованы для расчетов температуры. Получаемые значения температур лежат в интервале 1150–1600 °С.

Расчет значений **фугитивности кислорода (f_{O_2})**. Было получено 2 уравнения по выборке для атмосферного давления. Уравнения характеризуются значениями R 0.89 и 0.96, χ^2 2.17 и 6.04. Высокое значение χ^2 для второго уравнения позволяет использовать для расчетов только первое уравнение. Диапазон рассчитываемых значений фугитивности лежит в интервале от

-13.08 до -3.3.

Расчет величины **давления**. Было получено 2 уравнения, позволяющие рассчитывать величину давления в интервале 1–28 кб, отличающиеся наборами элементов из состава шпинели и расплава. Уравнения характеризуются значениями R 0.82 и 0.85, χ^2 11.24 и 6.8, что позволяет использовать эти уравнения только как оценочные.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав шпинели. Для условий атмосферного давления было получено 2 уравнения, характеризующиеся значениями R 0.87 и 0.89, χ^2 3.45 и 4.33, что позволяет на уровне вероятности 0.9 использовать эти уравнения для расчетов. Для интервала давлений 1–15 кб получено 1 уравнение, имеющее R 0.89 и χ^2 1.64, что позволяет использовать его для расчетов, т. к. на уровне вероятности 0.9 можно полагать нормальное распределение среднеквадратичной ошибки.

Обсуждение результатов

Минералы группы шпинели (имеются в виду, в основном, хром-алюминиевые разности и не рассматриваются титаномагнетиты) постоянно присутствуют в количестве ~0.1–2 объема процента в магматических породах основного-ультраосновного составов. Благодаря широкому изоморфизму большого числа порообразующих элементов, входящих в них, составы минералов этой группы рассматриваются, как индикаторы генезиса этих пород [17, 41]. Зависимости составов этих минералов от условий их кристаллизации в магматических расплавах основного-ультраосновного составов изучены в работах [;] и других. Зависимость содержания алюминия в составе шпинели от величины давления была выявлена и на природных объектах, в частности, при исследованиях ультраосновных ксенолитов из базальтоидов Камчатки [13]. Количественно же в настоящее время по составу шпинели и расплава в условиях атмосферного давления можно оценить температуру и значение фугитивности кислорода [5]. Полученные нами уравнения, связующие составы расплава и шпинели, позволяют количественно оценивать в более широком диапазоне условий (Т, Р) концентрации ряда элементов в расплаве и условия кристаллизации.

Связь содержания алюминия и магния, зависимость содержания алюминия в кристаллах шпинели от давления, вероятно, можно объяснить двойственностью структурного положения алюминия в кристаллах и расплаве [1, 72].

Для демонстрации соответствия модальных (полученных в эксперименте) содержаний Fe и Mg в расплаве и рассчитанных по формулам содержаний Fe (PSP5a1) и Mg (PGSP7a) в расплаве, равновесном с кристаллами шпинели при давлениях 1–15 кб, ниже представлен рис. III.1 sp–gl. На этом графике видно достаточно хорошее совпадение полей расчетных и реальных содержаний железа и магния в расплаве.

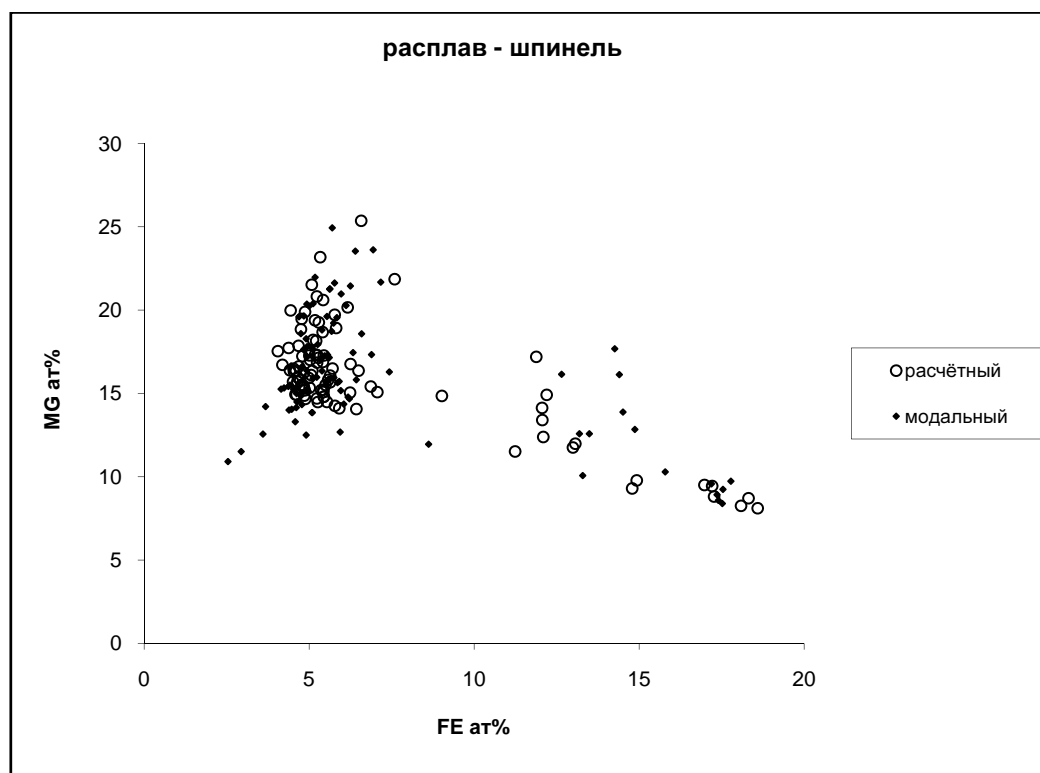


Рис. III.1. sp–gl. Поля распределения расчетных и модальных содержаний железа и магния в расплаве, равновесном со шпинелью при давлениях 1–15 кб.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитать численные значения в равновесной системе расплав–шпинель следующих величин:

- а) содержание **титана** в расплаве как в условиях атмосферного давления, так и при давлениях до 30 кб;
 - б) можно оценить равновесность содержания **магния** в расплаве при атмосферном давлении;
 - в) содержание **алюминия** в расплаве в условиях атмосферного давления и при давлениях от 10 до 28 кб;
 - г) содержание **железа Fe³⁺** в расплаве в условиях атмосферного давления;
 - д) содержание **железа Fe²⁺** в расплаве в условиях атмосферного давления и судить о равновесности концентраций алюминия и кремния в расплаве, а также при повышенных давлениях;
 - е) содержание **магния** в расплаве и оценить достоверность оценки величины равновесной температуры при атмосферном давлении и для повышенного до 28 кб давления;
 - ж) значение **железо-магниевого отношения** в расплаве в условиях атмосферного давления, а при давлениях в интервале 10–28 кб можно судить о равновесности содержания алюминия в расплаве;
 - з) значение **Fe³⁺/Fe²⁺ отношения** в расплаве в условиях атмосферного давления; значение температуры 1100–1600 °С как для условий при атмосферном давлении, так и во всем интервале давлений до 28 кб;
 - и) значение **фугитивности кислорода f_{O₂}** -13.08...-3.3 при атмосферном давлении;
- равновесные соотношения элементов**, входящих в состав шпинели в условиях атмосферного давления и в интервале давлений 1–15 кб.

2. Ряд полученных уравнений характеризуется высокими значениями χ^2 , что не позволяет использовать их для численных оценок. Они могут быть использованы, как оценочные. Это уравнения, позволяющие оценивать:

- а) содержание **хрома** в расплаве при атмосферном и повышенном давлении;
- б) содержание **щелочей** в расплаве;
- в) **железо-магниевое отношение** в интервале давлений 1–15 кб в расплаве;
- г) собственно величину **давления**.

3. В условиях повышенного давления кристаллизация шпинели приводит к обеднению алюминием расплава, т. к. $K_D(sp-m)$ для алюминия > 1 . С увеличением давления алюминий более охотно входит в состав шпинели при кристаллизации из расплава. В пользу этого косвенно свидетельствует уменьшение объема элементарной ячейки по данным, приводимым в справочнике Дира и др. [11], на ~10 % при переходе от хромистых разностей шпинелей к глиноземистым.

4. В условиях повышенного давления кристаллизация шпинели, также как и оливина, приводит к обеднению магнием расплава, т. к. величина $K_D(sp-m)$ для магния в условиях повышенного давления становится > 1 .

5. При кристаллизации шпинели независимо от давления происходит обеднение расплава хромом и с увеличением давления величина $K_D(sp-m)$ для хрома уменьшается.

6. Кристаллизация шпинели из расплава ограничена верхним значением давления < 30 кб. Кристаллы шпинели, выросшие при давлении > 10 –15 кб содержат, как правило, > 50 % (атом. кол.) алюминия в своем составе. Подобные разности могут образовываться и при более низких давлениях, вплоть до атмосферного, но из расплавов, содержащих > 19 –20 вес. %

Al₂O₃. Эти глиноземистые разности шпинелей содержат в большинстве случаев > 20 (атом. %) магнезия.

7.2. Уравнения, полученные для расплава, равновесного со шпинелью

Были получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин: эксперименты в условиях атмосферного давления (~250 т.) – концентрации в расплаве алюминия, магнезия и величины температуры и фугитивности кислорода; эксперименты в условиях повышенного давления (~210 т.) – концентрации железа, магнезия (2 уравнения), величины температуры и давления (2 уравнения), описывающие равновесные соотношения элементов в расплаве.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. С использованием выборки экспериментов при атмосферном давлении было получено уравнение, позволяющее рассчитать содержание алюминия в расплаве, равновесном с кристаллами шпинели. Это уравнение характеризуется значениями R -0.86 и χ^2 2.42, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 нормальное распределение среднеквадратичной ошибки и использовать это уравнение для расчетов. Отрицательное значение коэффициента корреляции указывает на обратную пропорциональную зависимость содержания алюминия в расплаве относительно титана, железа, магнезия и кремния в расплаве.

Расчет содержания **железа** в расплаве. По выборке при повышенном давлении было рассчитано уравнение, позволяющее по составу расплава, равновесного с кристаллами шпинели, рассчитать содержание железа в нем. Полученное уравнение характеризуется R -0.91 и χ^2 2.69, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие нормальному распределению и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **магнезия** в расплаве. По выборке при атмосферном давлении было получено уравнение, которое характеризуется значениями R 0.9 и χ^2 2.58, что позволяет на уровне вероятности 0.95 полагать нормальное распределение среднеквадратичной ошибки и использовать это уравнение для расчетов. По выборке при повышенном давлении было получено 2 уравнения с характеристиками R 0.91 и -0.88, χ^2 1.61 и 3.17, соответственно. Это позволяет полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятностей 0.99 и 0.95 нормальному распределению и использовать оба уравнения для расчетов. Во всех 3 уравнениях отчетливо видна прямо пропорциональная зависимость содержания магнезия в расплаве от температуры и обратно пропорциональная зависимость от содержаний в расплаве алюминия, железа и щелочей.

Расчеты значений **температуры** равновесия расплава. Уравнение по выборке при атмосферном давлении имеет характеристики R 0.83 и χ^2 7.03, что позволяет использовать его только как оценочное. По выборке экспериментов при повышенном давлении было получено уравнение с характеристиками R 0.87 и χ^2 1.44. Эти значения позволяют полагать на уровне вероятности 0.9 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать его для расчетов. В уравнениях использована прямая пропорциональная зависимость содержания магнезия от температуры расплава с учетом давления и содержаний в нем кремния, железа и щелочей.

Расчет значений **фугитивности кислорода** f_{O_2} . Было получено 1 уравнение по выборке для атмосферного давления. Уравнение характеризуется значениями R -0.93 и χ^2 4.12, что позволяет на уровне вероятности 0.9 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов. Диапазон рассчитываемых значений фугитивности лежит в интервале от -13.5 до -3.4.

Расчет величины **давления**. Было получено 1 уравнение, позволяющее рассчитывать величину давления в интервале 1–28 кб. Уравнение имеет характеристики R -0.85 и χ^2 2.95, что позволяет полагать нормальное распределение среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 и использовать его для расчетов с некоторой долей осторожности.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав расплава, находящегося в равновесии с кристаллами шпинели в интервале давлений 1–28 кб. Было получено 2 уравнения, характеризующие значения R -0.88; χ^2 2.18 и 2.6. Численные значения χ^2 позволяют на уровне вероятности 0.95 полагать, что распределение среднеквадратичной ошибки соответствует нормальному распределению, что позволяет эти уравнения использовать для расчетов. Равновесными в расплаве являются концентрации магния алюминия, железа и натрия с учетом температуры.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитать численные значения следующих величин в равновесном с кристаллами шпинели расплаве:
 - а) содержания **алюминия** в условиях атмосферного давления;
 - б) содержания **магния** в условиях атмосферного давления и давлений до 28 кб;
 - в) значение **температуры**, вычисляемое по составу расплава в условиях атмосферного давления и до давлений 28 кб;
 - г) численное значение **фугитивности** кислорода в условиях атмосферного давления;
 - д) величину **давления** кристаллизации по составу расплава;
 - е) **равновесные соотношения ряда элементов в расплаве** в условиях повышенного давления.
2. Численные значения температуры, полученные по уравнению для условий атмосферного давления, могут быть использованы только как оценочные, все остальные уравнения пригодны для расчетов.
3. Полученные уравнения для расчетов приводимых выше величин могут быть использованы для исследований составов расплавных включений. В купе с использованием уравнений, включающих в себя состав минерала–хозяина (шпинели) эти расчеты могут дать возможность судить о реальном составе расплавных включений.
4. Полученные уравнения пока не имеют аналогов.

7.3. Уравнения, полученные для системы расплав–оливин

Были получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин:

I. эксперименты в условиях атмосферного давления (1000 т.) – концентрации в расплаве Ti – 2 уравнения, Fe²⁺ – 2 уравнения; Mn, Mg – по 2 уравнения; Ca, Cr, Fe²⁺/Mg отношения – по 2 уравнения; K_D, температуры – по 6 уравнений;

II. эксперименты в условиях повышенного давления (760 т.) – концентрации в расплаве Ti – 2 уравнения, Al, Fe²⁺ – по 2 уравнения, Mn, Mg – по 2 уравнения, Ca, Cr, Fe/Mg отношения – по 2 уравнения, температуры – 6 уравнений.

Расчет содержания **титана** в расплаве. Результаты расчетов по экспериментальным данным при атмосферном давлении (~500 экспериментальных точек, 0.5 от выборки) позволяют утверждать следующее: коэффициенты корреляции для полученных уравнений лежат в окрестностях ~0.9, а распределение среднеквадратичной ошибки по критерию Пирсона на уровне вероятности 0.9 не противоречит предположению, что эта величина распределена нормально. Это позволяет использовать эти уравнения для оценок содержания Ti в расплаве. Кроме того, сравнение полученных значений по этим расчетам позволяет оценить степень равновесности расплава по соотношениям кремния и магния в нем. Уравнения, полученные по экспериментальным точкам при повышенных давлениях (~150 т., 1/5 выборки) имеют коэффициенты корреляции ~0.8 и могут быть, вероятно, использованы только как оценочные для различения высокотитанистых (2–3%) и низкотитанистых (~1%) разновидностей расплавов. K_D(ol–m) для титана практически не зависит от температуры и давления, значения его < 1 и лежат в интервале 0.01–0.2.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Результаты расчетов по экспериментальным данным (760 т.) в условиях повышенного давления (до 17.5 ГПа) дают возможность рассчитывать содержания алюминия в расплаве. Коэффициент корреляции для этой зависимости R –0.91, а величина значения χ^2 позволяет утверждать, что с вероятностью 0.99 распределение среднеквадратичной ошибки не противоречит предположению о нормальном ее распределении. K_D(ol–m) для алюминия практически не зависит от температуры, но зависит от давления (R~0.7), имеет значения < 1. С увеличением давления алюминий более охотно внедряется в решетку (?) оливина.

Расчет содержания **железа Fe²⁺** в расплаве. Для экспериментов при атмосферном давлении (890 т.) рассчитывалось содержание Fe²⁺ в расплаве и сравнивалось с вычисленным ранее по уравнениям А.А. Борисова и А.И. Шапкина [8]. Для экспериментов при повышенном давлении (720 т.) оценивалось общее содержание железа в предположении, что все оно находится в **двухвалентной форме**, т. к. пока отсутствуют методы расчетов содержаний разновалентных форм железа в расплаве при повышенных давлениях. Используемые для расчетов в обоих случаях 2 уравнения практически идентичны, что указывает на отсутствие ощутимого влияния давления на вхождение железа в оливин. Обе формулы имеют достаточно высокие коэффициенты корреляции > 0.9, но различаются значениями χ^2 при замене в формуле концентрации магния в расплаве на температуру и учете влияния концентраций алюминия и кальция в расплаве. Поэтому целесообразно для расчетов использовать формулу с $\chi^2 < 6$, означающее, что с вероятностью 0.95 величина среднеквадратичной ошибки распределена нормально. Формулу, учитывающую влияние содержания магния в расплаве, можно использовать как оценочную, а также для проверки предположений о равновесности состава расплава. Величина K_D(ol–m) для железа Fe²⁺ в случае атмосферного давления лежит в интервале 0.2–8 и зависит от содержаний в расплаве Si (0.57); Mg (-0.75); Ca (-0.6); Na (0.63), а также от температуры (0.67). В экспериментах при повышенном давлении, где железо не разделяется, диапазон значений сужается, лежит в интервале 0.4–3 и зависит от содержаний в расплаве Mg (0.46); Na (0.53), а также от температуры (-0.41).

Расчет содержания **марганца** в расплаве. Удовлетворительный результат (значения R 0.9 и χ^2 5.2) получен только для условий атмосферного давления (720 т.). Для повышенного давления (420 т.) рассчитанное значение содержания марганца в расплаве будет носить оценочный характер. $K_D(ol-m)$ для марганца зависит от температуры ($R \sim 0.3$). С уменьшением температуры марганец более охотно входит в решетку (?) оливина.

Величина $K_D(ol-m)$ для марганца независимо от давления лежит в интервале $\sim 0.2-8$.

Расчет содержания **магния** в расплаве. Два уравнения, полученные по экспериментальным данным при атмосферном давлении (1033 т.) обладают характеристиками R 0.93 и выше, а значения χ^2 позволяют предположить на уровне 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному распределению. Поэтому они могут быть использованы без ограничений, а также позволяют судить о равновесности расплава и достоверности оценок величин, входящих в эти уравнения (температуры, содержания Fe^{2+} в расплаве и т. д.). Два уравнения, рассчитанные по экспериментам при повышенном давлении (760 т.) также характеризуются высокими значениями $R \sim 0.95$ и низкими значениями χ^2 , допускающими аналогичное вышесказанному предположение на уровне вероятности 0.95. В формулах для повышенного давления были внесены изменения: в коэффициенте $K_1(GLOL7a)$ был изменен один из множителей, а уравнение (GLOL7b) было заменено из-за неудовлетворительных характеристик. Предполагаемыми причинами, приведшими к этим изменениям, могут быть влияние давления на строение расплава и характер вхождения магния в решетку оливина. Формулы для условий при повышенном давлении также без ограничений могут быть использованы для оценок равновесности расплава. Величина $K_D(ol-m)$ для магния > 1 , для экспериментов в условиях атмосферного давления принимает значения в диапазоне 2–26, для экспериментов в условиях повышенного давления лежит в интервале 1.3–12.

Расчет содержания **кальция** в расплаве. Уравнения для расчета содержания кальция в расплаве при атмосферном и повышенном давлении имеют значения $R \sim 0.9$, но отличаются содержательной частью. Распределение среднеквадратичной ошибки для случая атмосферного давления (1000 т.) не противоречит предположению о нормальности ее распределения на уровне вероятности 0.95; для случая повышенного давления (670 т.) величина χ^2 8.28 (больше критического – 7.04), что позволяет говорить о достоверности этого предположения с вероятностью 0.9. Эти данные позволяют считать, что обе формулы могут быть использованы для расчетов содержаний кальция в расплаве. $K_D(ol-m)$ для кальция зависит от температуры: в экспериментах при атмосферном давлении $R \sim 0.6$; в экспериментах при повышенном давлении $R \sim 0.2$. Давление практически не влияет на $K_D(ol-m)$ для кальция. В распределении кальция между расплавом и оливином есть интересная особенность, которая будет рассмотрена ниже при сравнении наших результатов с наиболее часто используемыми опубликованными уравнениями. Величина $K_D(ol-m)$ для кальция < 1 .

Расчет содержания **хрома** в расплаве. Уравнения, полученные как для случая атмосферного давления (470 т.), так и повышенного давления (410 т.), характеризуются достаточно высокими значениями $R \sim 0.9$, но очень высокими значениями $\chi^2 > 20$, указывающими на несоответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения. Поэтому эти формулы можно использовать только для оценочных результатов. Для хрома $K_D(ol-m)$ практически не зависит от температуры и давления. Величина $K_D(ol-m)$ для хрома в экспериментах при атмосферном давлении 0.1–12, в экспериментах при повышенном давлении 0.2–4.

Расчет значений **железо-магниевого отношения** в расплаве. Полученные уравнения для случая атмосферного давления (886 т., 2 уравнения) позволяют оценить величину Fe^{2+}/Mg отношения в расплаве и значение $K_D(Fe-Mg)$. Коэффициенты корреляции в уравнениях для расчета Fe^{2+}/Mg отношения высокие ($R \sim 0.98$), но величина χ^2 указывает на то, что только с вероятностью ~ 0.9 можно полагать нормальное распределение среднеквадратичной ошибки. Поэтому среднее значение $K_D(Fe-Mg) = 0.317$, полученное по выборке, используемой для расчета формулы (GLOL14b), может быть использовано только как оценочное. Значения оцениваемой величины K_D по формуле (GLOL14c) лежат в интервале 0.14–0.45 и рассчиты-

ваются с невысоким R 0.8, но величина χ^2 7.3 позволяет предполагать нормальность распределения ошибки на уровне 0.9. При атмосферном давлении величина $K_D(\text{Fe-Mg})$ (формула **GLOL14c**) прямо пропорциональна железистости оливина и содержанию кремния в расплаве и обратно пропорциональна содержаниям алюминия и щелочей в нем.

В условиях повышенного давления расчет Fe^{2+}/Mg отношения производился по двум формулам в интервале давления 1–20 кб (623 т.) и 20–175 кб (95 т.). Обе зависимости характеризуются высокими значениями R – 0.96 и 0.99, но очень большими величинами χ^2 – 43 и 11, что указывает на явное несоответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения. В экспериментах под давлением выявились, что значение $K_D(\text{Fe-Mg})$ прямо пропорционально содержанию магния ($R \sim 0.42$) в расплаве и обратно пропорционально содержанию титана ($R \sim -0.35$); с увеличением давления (интервал 20–175 кб) прямо пропорционально начинают влиять давление и температура ($R \sim 0.46$) и обратно пропорционально – содержание щелочей в расплаве. То есть в расплаве под давлением умеренное влияние оказывает магний, вытесняющий железо в кристалл оливина, чему способствует и температура, а присутствие титана и щелочей в расплаве препятствуют этому.

Расчет значений **температуры** равновесия. Для случая атмосферного давления (1033 т.) было выведено 6 уравнений, базирующихся на зависимостях распределений Fe^{2+} и Mg между расплавом и оливином, от температуры, впервые вычисленные П. Редером и Р. Эмсли [90]. В полученных нами уравнениях учитывается влияние на рассчитываемую величину температуры содержания пороодообразующих элементов в расплаве в различных вариантах их сочетаний. Коэффициенты корреляции для полученных уравнений лежат в интервале 0.93–0.95, а значения χ^2 позволяют на уровне вероятности 0.99, утверждать, что распределение среднеквадратичной ошибки соответствует закону нормального распределения. Расчеты по этим уравнениям дают возможность судить о равновесном содержании в расплаве магния, кальция, суммы щелочей и т. д. (по однородности вычисленных значений температуры в пределах одного (3–24.4 °C)* или двух значений среднеквадратичной ошибки), или неравновесности их содержаний при отклонении значения вычисленной температуры > 3 сигм.

Массив данных при повышенном давлении был разбит на две части с интервалами давлений 1–20 кб (623 т.) и 20–175 кб (95 т.) из-за нелинейности температурной зависимости. Для каждого интервала рассчитано по 3 уравнения. Для интервала 1–20 кб уравнения характеризуются значениями $R \sim 0.9$ –0.92, среднеквадратичная ошибка – 36–39 °C. Значения χ^2 на уровне вероятности 0.99 позволяют говорить о соответствии распределения среднеквадратичной ошибки нормальному распределению. Для интервала 20–175 кб уравнения характеризуются более высокими значениями $R \sim 0.93$ –0.95, среднеквадратичная ошибка – 52–62 °C, и можно полагать, что на уровне вероятности 0.9 распределение среднеквадратичной ошибки соответствует нормальному распределению. Значения среднеквадратичной ошибки позволяют судить о равновесных или неравновесных содержаниях кремния, алюминия и кальция в расплаве по отклонению рассчитанных значений температуры: для интервала 1–20 кб сигма* ~24 °C; для интервала 20–175 кб сигма* ~55 °C.

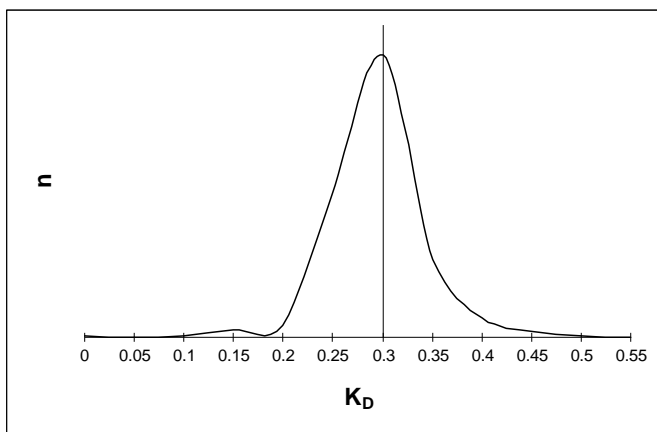
* Среднеквадратичная ошибка рассчитывалась попарно для трех, двух и одной пары уравнений.

Обсуждение результатов

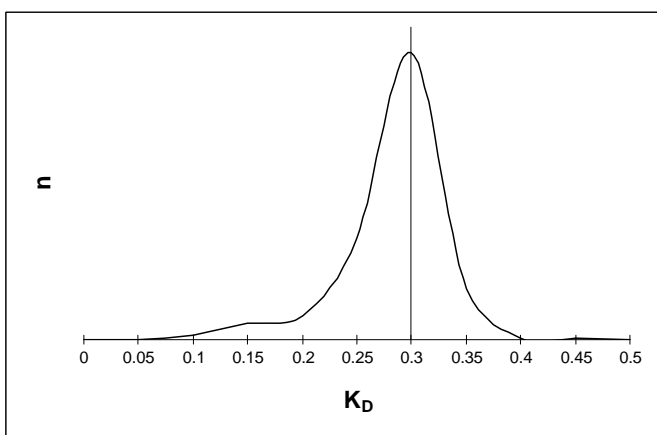
Система основной-ультраосновной расплав–оливин является базовой для реконструкции термической истории магматических систем и в разнообразных генетических моделях магомобразования. Исследуется с 20-х годов прошедшего столетия для оценок условий кристаллизации (температура, давление, состав, структура окружающего расплава и т. д.) природного оливина. Как правило, используются межфазные распределения следующих элементов и их соотношения: **Mg, Al, Ca, Cr, Mn, Fe²⁺, Co, Ni** [2; 25; 35; 45; 51; 62; 64; 69; 71; 90; 108 и другие]. Достоинства и недостатки различных геотермометров, построенных на основе системы основной-ультраосновной расплав–оливин, подробно рассмотрены в работах [43; 53; 85]. Для получения достоверных оценок температуры основная сложность заключается в знании равновесного состава расплава с данным оливином. Для коррекции составов расплавов широко практикуется использование фиксированного среднего значения $K_D(\text{Fe-Mg})$ расплав–оливин. Как будет показано нами ниже, использование среднего значения величины $K_D(\text{Fe-Mg})$ расплав–оливин некорректно, т. к. закон распределения численных значений этой величины не подчиняется закону нормального распределения. Расчет же температур по составу расплава на ликвидусе расплав–оливин требует доказательства равновесности природных расплавов и по другим элементам с оливином. В первую очередь это касается расплавных включений, коррекция составов которых происходит с использованием именно фиксированного значения величины $K_D(\text{Fe-Mg})$ расплав–оливин.

Для расчетов содержаний **магния** в расплаве и проверки предположения о **равновесности** расплава с оливином данного состава широко практикуется использование среднего ($0.3-0.33 \pm 0.03$) значения величины $K_D(\text{Fe-Mg})$ оливин–расплав. Впервые численное значение этой величины, как среднего, равного 0.3, было получено в 27 экспериментах П. Редером и Р. Эмсли [90], где ее значения колебались от 0,26 до 0.36. Значение $K_D(\text{Fe-Mg})$ 0.33 ± 0.112 , полученное на основе 1043 экспериментов, приводится Т. Сугавара [98]. В работе Е. Такахаши и И. Куширо [103] приводится значение 0.3 и указывается на положительное влияние давления на величину $K_D(\text{Fe-Mg})$. Прямо пропорциональная зависимость величины $K_D(\text{Fe-Mg})$ от давления была получена и в экспериментах П. Улмера [106] при давлениях до 30 кб. Экспериментальные результаты Дж. Лонгхи и др. [64] продемонстрировали зависимость величины $K_D(\text{Fe-Mg})$ от содержания титана в расплаве на примере высокотитанистых лунных базальтов. По результатам обработки выборки в 750 экспериментальных точек К. Путирка [88] заключил, что величина $K_D(\text{Fe-Mg})$ практически не зависит от состава расплава, но прямо пропорциональна величине давления. В обзоре К. Путирки [87] приводятся сведения о влиянии содержаний кремния, щелочности расплава и давления на величину $K_D(\text{Fe-Mg})$ оливин–расплав и предлагается величину K_D при давлениях < 3 ГПа (1504 т., включая и эксперименты с участием флюида) считать равной 0.299 ± 0.053 . Использование среднего значения величины предполагает ее нормальное распределение. Для выявления соответствия (критерий χ^2) закону нормального распределения величины $K_D(\text{Fe-Mg})$ в системе расплав–оливин нами были обследованы 3 выборки – при атмосферном давлении (886 т.), в интервале давлений 1–20 кб (623 т.) и 20–175 кб (95 т.), огибающие гистограмм которых представлены на рис. III.I.1. ol–gl.

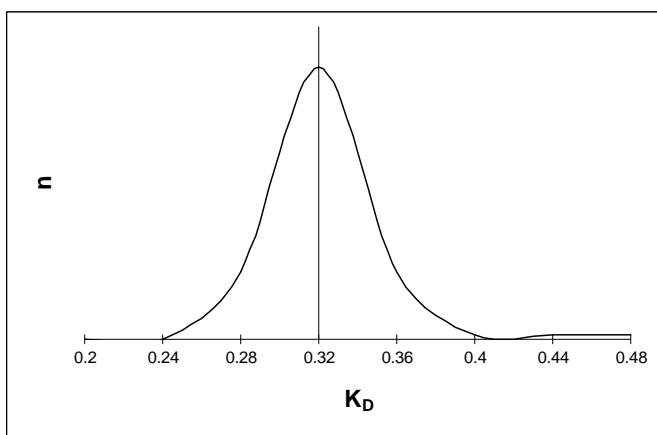
Были получены следующие значения χ^2 : 1. χ^2 16.29 (выборка представлена 886 т., разбита на 16 разрядов); 2. χ^2 11.88 (выборка представлена 623 т., разбита на 16 разрядов); 3. χ^2 9.53 (выборка представлена 95 т., разбита на 8 разрядов). Вычисленные значения в 1.5–2 раза (см. введение) превышают критические значения даже для 50 % уровня вероятности. Это позволяет практически однозначно утверждать, что использование среднего значения величины $K_D(\text{Fe-Mg})$ оливин–расплав (0.3–0.33) некорректно и судить по этой величине о равновесии расплава с оливином данного состава нельзя, хотя путем разбиения массива выборки на



1. OL886. Минимальный $K_D = 0.02$
 Максимальный $K_D = 0.54$
 Средний $K_D = 0.32$



2. OL623. Минимальный $K_D = 0.05$
 Максимальный $K_D = 0.49$
 Средний $K_D = 0.31$



3. OL95. Минимальный $K_D = 0.28$
 Максимальный $K_D = 0.52$
 Средний $K_D = 0.32$

Рис. III.1.1 ol–gl. Огибающие распределений значений величины $K_D(\text{Fe–Mg})$ оливин–расплав: 1. эксперименты при атмосферном давлении; 2. эксперименты в интервале давлений 1–20 кб; 3. эксперименты в интервале давлений 20–175 кб.

фрагменты (метод сплайнов), вероятно, можно достичь приемлемых значений. Эти результаты также дают основание не согласиться с предположением К. Путирки [88] о независимости величины $K_D(\text{Fe–Mg})$ оливин–расплав от состава расплава. Использование этой величины для расчета равновесного содержания магния в расплаве встречается в настоящее время с одной непреодолимой трудностью в условиях повышенного давления. Этой трудностью является необходимость знания содержания Fe^{2+} в расплаве, а в условиях повышенного давления при знании величины фугитивности кислорода и состава расплава эта проблема численного решения пока не имеет. В этой ситуации наши формулы (PLOL7a) и (PLOL7b) для расчета содержаний Mg в расплаве в условиях повышенного давления позволяют избежать этой трудности. Они имеют высокие значения $R \sim 0.95$ и низкие значения χ^2 , а также не

требуют знания концентрации Fe^{2+} в расплаве. Однако для получения приемлемого результата расчета необходимо оценить равновесность состава расплава и пересчитать имеющийся состав расплава (валовый состав породы, состав расплавленного включения и т. д.) в равновесный. Для этого необходимо создание программы, позволяющей рассчитать этот состав, путем решения системы уравнений, о чем будет сказано ниже, в заключении.

Кальций практически постоянно присутствует в составе природных оливинов и его содержания лежат, как правило, в интервале $\sim 0.01\text{--}0.1$ вес. окисные %, доходя иногда до первых %. Согласно мнению Т. Симкина, И. Смита [97] его содержание не зависит от состава оливина, определяется глубиной его образования. По результатам экспериментальных исследований А. Журевича и Е. Ватсона [57; 109] распределение кальция между расплавом и оливином зависит от содержания кальция в расплаве и доли фаялитового минала в оливине. Результаты экспериментов Г. Либорела [62], полученные в условиях атмосферного давления на 48 точках, позволили автору создать уравнение, описывающее распределение **Ca** в системе расплав–оливин и учитывающее только содержание кальция в расплаве. Мы протестировали это уравнение для случая атмосферного и повышенного давления (1–175 кб). Результаты представлены на рис. III.2. ol. Эта зависимость имеет следующие характеристики: 1. атмосферное давление – $R\ 0.92$, $N\ 1001$, $N_1\ 981$, сигма 0.22 , $\chi^2\ 6.71$ (16); 2. давление 1–175 кб – $R\ 0.59$, $N\ 666$, $N_1\ 654$, сигма 0.33 , $\chi^2\ 3.62$ (12).

По полученным характеристикам для случая атмосферного давления предлагаемое уравнение [62] можно использовать для расчетов содержания кальция в расплаве, хотя корреляция рассчитанного содержания кальция будет иметь худшие характеристики из-за неравнозначности отражений массивов друг в друге. В условиях повышенного давления это уравнение не пригодно, поэтому для расчета содержаний кальция в расплаве по его содержанию в оливине может быть использовано уравнение (**PLOL8**).

В распределении кальция между расплавом и оливином в интервале давлений 1–175 кб нами выявлена одна особенность, важная для понимания генезиса пород, содержащих оливин, представленная на рис. III.1.3 ol–gl. На графике отчетливо видно, что число точек с содержаниями CaO в оливине $< 0.1\%$ весьма незначительно. Если не принимать во внимание точки, обязанные своими значениями анализу, то остается 5 точек. Существование этих 5 точек в противовес всему остальному массиву позволяет с вероятностью 0.99 утверждать, что с расплавом, содержащим $> 4\text{--}5\%$ CaO при давлениях от 1 до 175 кб, будет равновесен оливин, содержащий $> 0.1\%$ CaO . Это равнозначно утверждению, что кристаллы оливина, образовавшиеся в равновесных условиях из расплавов основного-ультраосновного составов с содержаниями $> 4\text{--}5\%$ CaO при давлении 1–175 кб не могут содержать в своем составе $< 0.1\%$ CaO . Этот результат не совпадает с выводом Т. Симкина, И. Смита [97], полученным в результате обобщений данных по природным объектам, основанном на ошибочном предположении о магматической природе составов минеральных фаз, в частности оливина, интрузивных пород основного-ультраосновного составов.

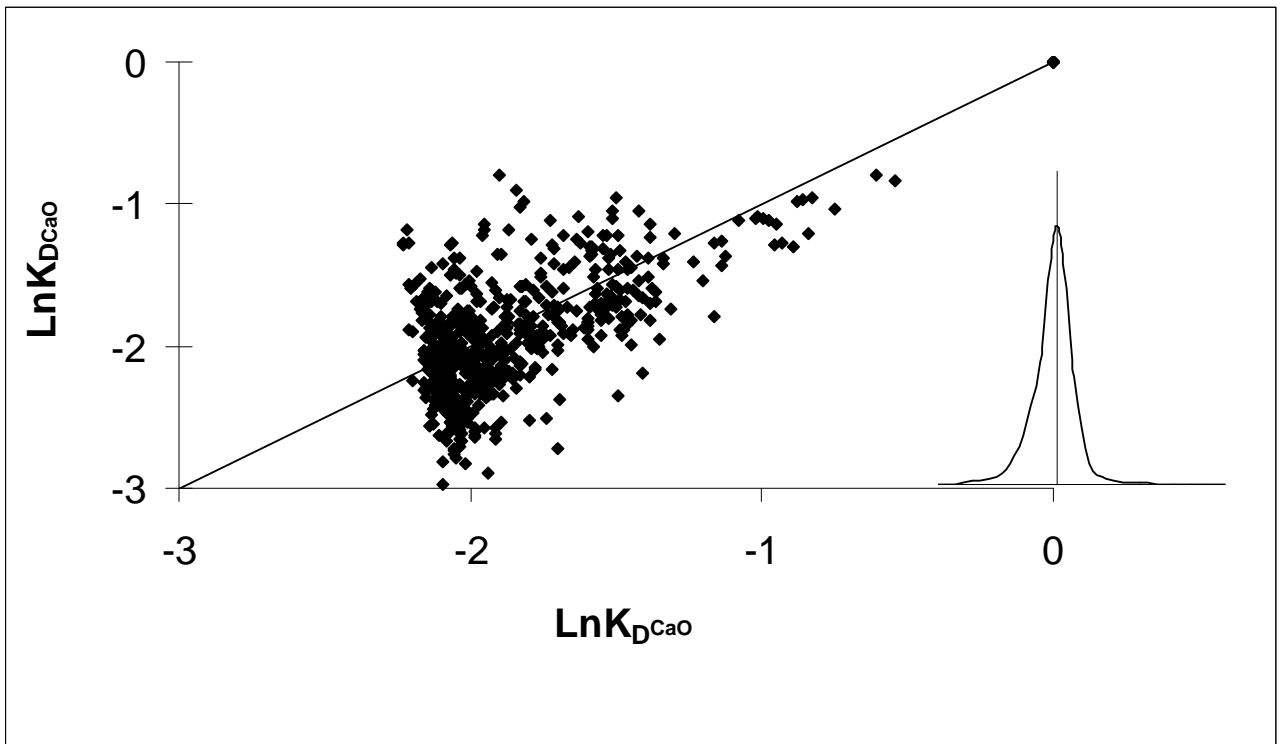
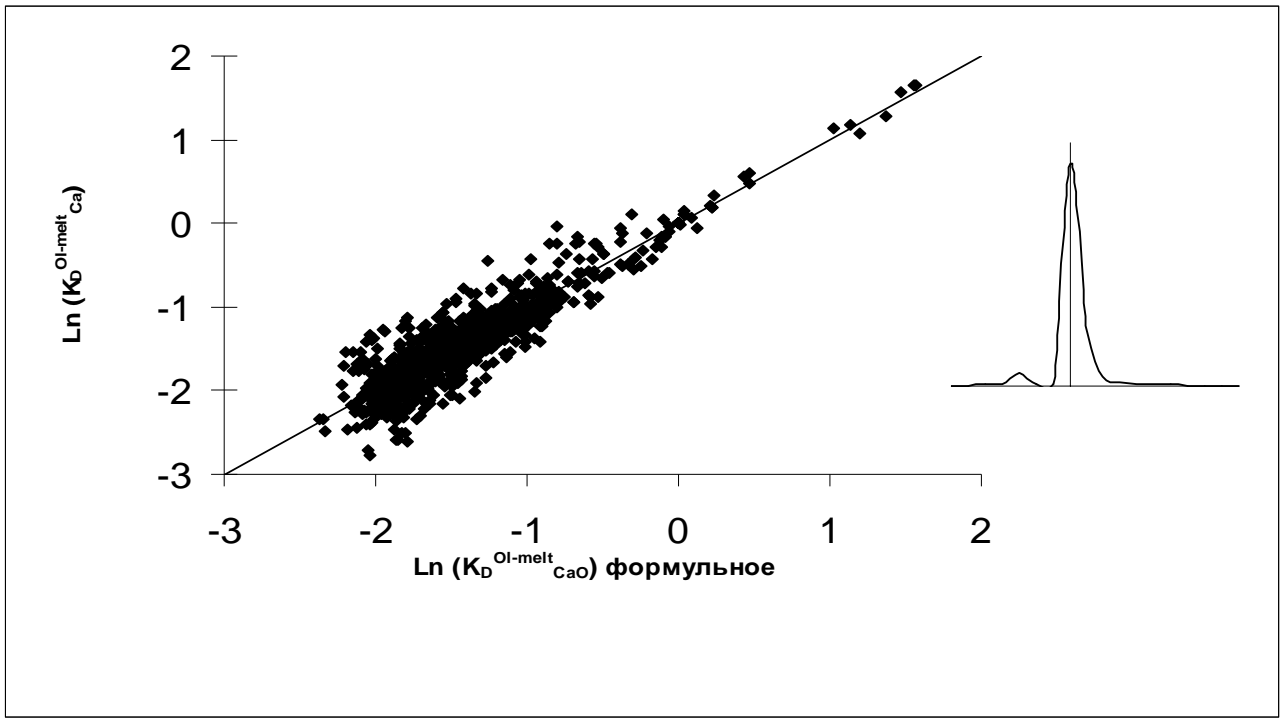


Рис. III.1.2. ol–gl. Зависимости рассчитанного по формуле Г. Либорела [62] и модального значений логарифма K_D для кальция в использованной нами выборке: 1. эксперименты при атмосферном давлении; 2. эксперименты при повышенном давлении.

Зависимость содержаний окиси кальция в оливине от его содержания в расплаве (763 т.)

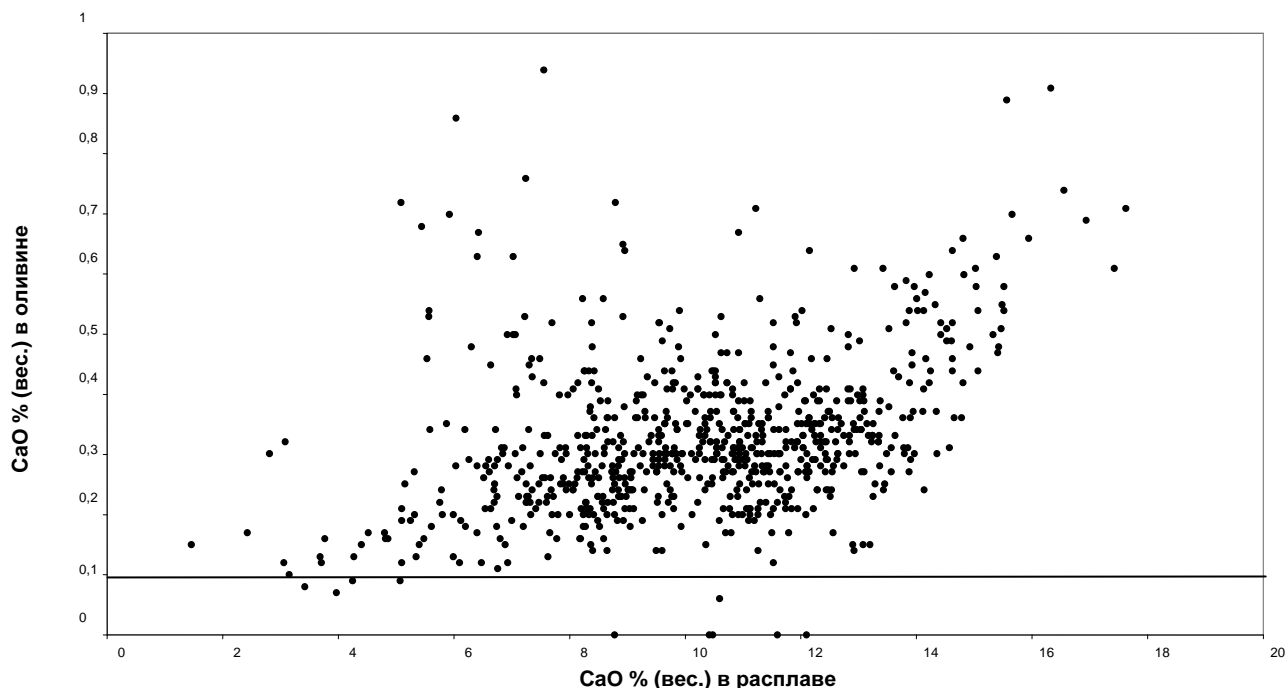


Рис. III.1.3 ol–gl. Зависимость содержаний окиси кальция в оливине от его содержания в расплаве (763 т.); 5 точек с содержаниями в оливине CaO от 1.1 % до 3.2 % были удалены для растяжения оси ординат.

Расчет **температуры** равновесия расплав–оливин. Было создано достаточно много вариантов геотермометров, в которых использовалось межфазное распределение элементов. Пионерской среди них является экспериментальная работа П. Редера и Р. Эмсли [90], продемонстрировавшая высокие корреляционные связи $K_D \text{Mg}$ и $K_D \text{Fe}$ с равновесной температурой. В дальнейшем было показано, что для использования подобных геотермометров в широком диапазоне составов расплавов необходимо учитывать и составы расплавов [6, 64]. Термодинамический подход (расчет термодинамических свойств миналов) был использован П. Бетти [33], хотя для расчета активности окиси кремния в расплаве была использована эмпирическая зависимость. Тестирование этого термометра на выборке экспериментальных данных при повышенном давлении (756 т.) продемонстрировало высокое значение R 0.96. Величина среднеквадратичной ошибки 45.8 °С больше приводимой автором в 3 раза, но распределение ошибки не соответствует нормальному закону (χ^2 30.44), что, вероятно, указывает на недоучет ряда факторов. Наиболее удачным (по использованию) среди имеющихся сейчас геотермометров, вероятно, можно считать уравнение, полученное Ц. Фордом и др. [45] на базе 747 экспериментальных точек для системы основной-ультраосновной расплав–оливин в «сухих» условиях. На рис. III.1.4 ol–gl представлены для сравнения результаты расчетов по Ц. Фордом и др. [45] и с использованием формул, полученных нами. Числовые характеристики расчетов: коэффициент корреляции R , среднеквадратичная ошибка и величина χ^2 свидетельствуют о лучшей результативности наших уравнений. Причем для интервала давлений 20–175 кб среднеквадратичная ошибка не подчиняется нормальному распределению, т. к. значение χ^2 3.81 больше критического (1.61) для уровня вероятности 0.9 [45].

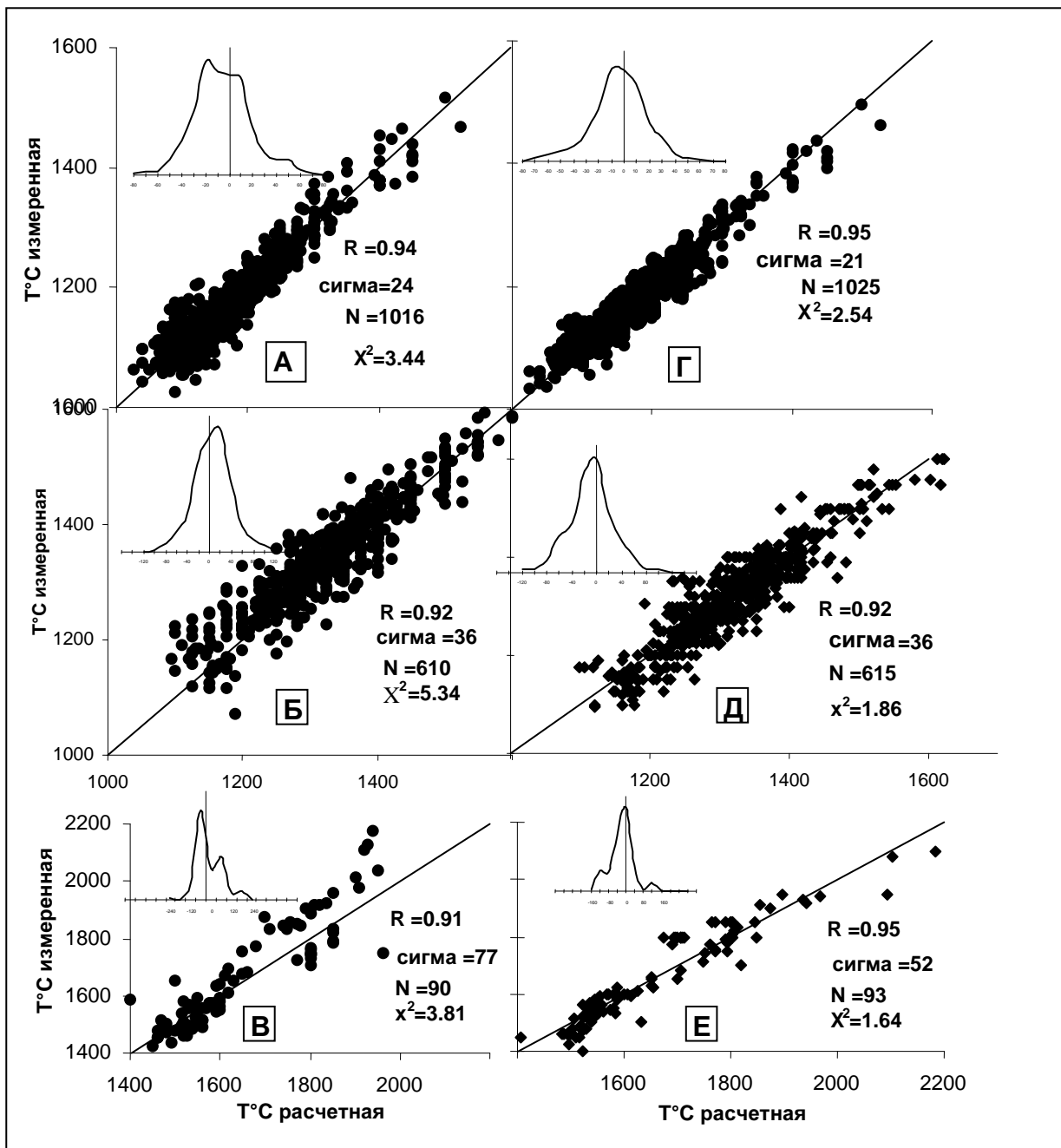


Рис. III.4 ol–gl. Сравнительная характеристика геотермометров Ц. Фордом и др. [45] (А, Б, В) и полученных нами (Г, Д, Е). А и Г – выборка (1033 т.) при атмосферном давлении; Б и Д – выборка (623 т.) интервал давлений 1–20 кб; В и Е – выборка (95 т.) в интервале давлений 20–175 кб. Тогда как расчеты по нашей формуле в этом интервале давлений укладываются в предположение о нормальности распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.9.

Судя по имеющимся экспериментальным данным поле кристаллизации оливина под давлением не испытывает разрывов при увеличении магнезиальности расплавов и лишнее подтверждает положение О’Хара об увеличении ультраосновности выплавов с глубиной.

Система расплав–оливин является одной из главных для исследований генезиса магматических пород основного–ультраосновного составов и качество расчетов содержаний железа и магния в расплаве, равновесном с оливином, очень важно. На рис. III.5 ol–gl представлено соответствие полей содержаний (модальных и расчетных) железа и магния в расплаве, равновесном с оливином при давлениях 1–175 кб. Для расчета содержаний железа в расплаве

была использована формула (PLOL5b), для расчета содержания магния в расплаве была использована формула (PLOL7a).

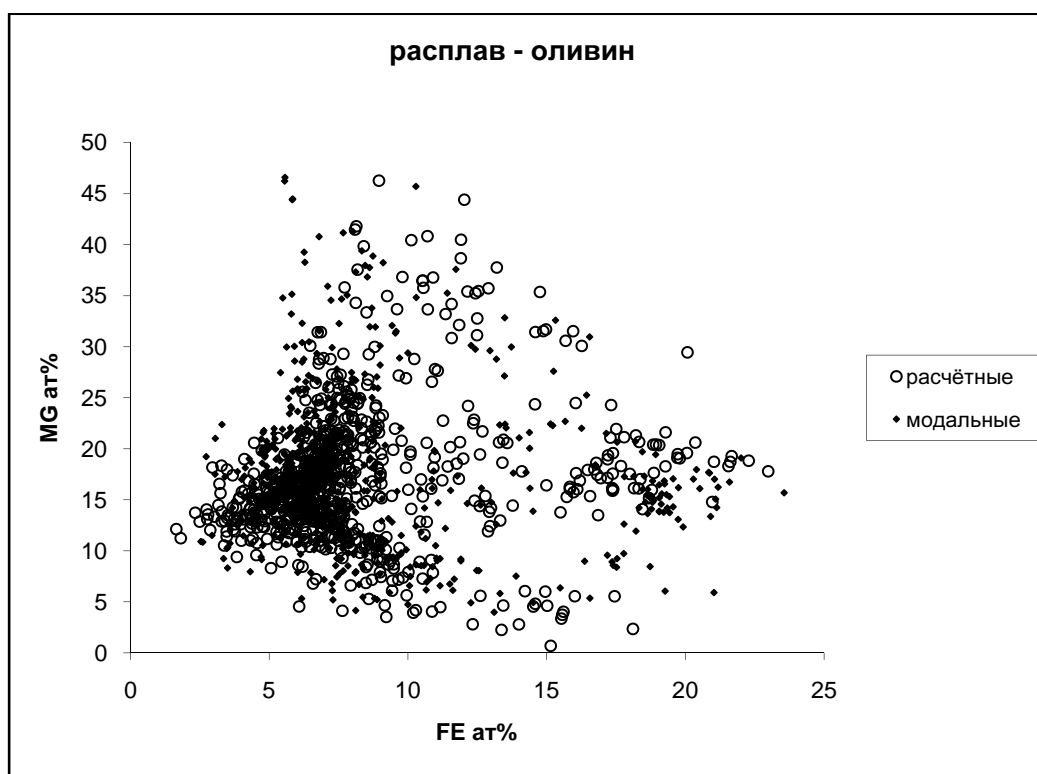


Рис. III.1.5 ol–gl. Поля распределения расчетных и модальных содержаний железа и магния в расплаве, равновесном с оливином при давлениях 1–175 кб.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие в равновесной системе расплав–оливин рассчитать:

содержание **титана** в расплаве при атмосферном давлении и оценить равновесность содержаний кремния и магния в расплаве, возможно, диапазон давлений может быть расширен до 1 кб;

содержание **алюминия** в расплаве в диапазоне давлений до 17.5 ГПа;

содержание **Fe²⁺** при атмосферном давлении и суммарного **железа** при повышенном давлении и оценить равновесность магния, алюминия, кальция в расплаве и правильность оценки равновесной температуры;

содержание **марганца** в расплаве при атмосферном давлении;

содержание **магния** в расплаве в условиях атмосферного и повышенного давлений, оценить равновесность расплава;

содержание **кальция** в расплаве в условиях атмосферного и повышенного давлений;

величину **равновесной температуры** в условиях атмосферного и повышенного давлений и оценить равновесность содержаний кремния, алюминия и кальция в расплаве.

2. Ряд полученных уравнений характеризуются высокими значениями χ^2 , что не позволяет их использовать для численных оценок. Эти уравнения, вероятно, могут быть использованы как **оценочные**. В частности, численные оценки величины $K_D(\text{Fe-Mg})$ в системе расплав–оливин, полученные как средние (0.3, или 0.33), пока не могут быть использованы из-за несоответствия распределения величины $K_D(\text{Fe-Mg})$ нормальному закону распределения.

3. На полученных выборках были протестированы уравнение для расчета содержаний кальция Г. Либорела [62] и уравнение для расчета температуры Ц. Форда и др. [45], которые имеют худшие статистические характеристики.

4. Оливин, равновесный с основными-ультраосновными расплавами в интервале давлений 1–175 кб и содержащими > 4–5 % окиси кальция, содержит в своем составе > 0.1 % CaO.

5. Судя по выборке, представленной системой расплав–оливин при повышенном давлении (803 т.), оливин (имеется в виду химический состав и не принимаются во внимание полиморфные модификации) может быть ликвидусной фазой в широком диапазоне температур (1100–2100 °С), давлений (1–175 кб) и составов магматических расплавов, вплоть до расплавов, относимых к породам среднего состава. Но при давлениях > ~25 кб расплавы, равновесные с оливином, представлены пикритовыми разностями, содержащими в себе $\text{SiO}_2 < 50\text{--}52\%$ и $\text{MgO} > 22\text{--}25\%$.

6. При кристаллизации оливина в достаточно широком диапазоне составов, как оливина, так и расплава (см. глава I, таблица I.1. ol и глава II, таблица II.1 ol), происходит обеднение расплава магнием ($K_D(\text{ol}-\text{m})$ для магния > 1). Для железа картина неоднозначная, т. к. $K_D(\text{ol}-\text{m})$ для железа может принимать значения как > 1, так и < 1.

7.4. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с оливином

Были получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин:

1. эксперименты в условиях атмосферного давления (~1000 т.): содержание магния в расплаве (1 уравнение), температур (3 уравнения), равновесные соотношения элементов в расплаве (1 уравнение);

2. эксперименты в условиях повышенного давления (~760 т.): содержание алюминия в расплаве (1 уравнение), содержание магния в расплаве (5 уравнений), температур (7 уравнений), давления (3 уравнения), равновесные соотношения элементов в расплаве.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. По выборке в интервале давлений 2–175 кб было получено уравнение, имеющее характеристики $R -0.9$ и $\chi^2 1.38$, что указывает на соответствие на уровне вероятности 0.99 распределения среднеквадратичной ошибки нормальному закону распределения и возможность его использования для расчетов.

Расчет содержания **магния** в расплаве. По выборке в условиях атмосферного давления было получено уравнение, в котором использована корреляционная связь содержания магния в расплаве и величины температуры расплава, находящегося в равновесии с кристаллами оливина. Это уравнение имеет характеристики $R 0.94$ и $\chi^2 3.28$, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов. По выборке в условиях повышенного давления было получено 5 уравнений. Два – для всего интервала давлений: в одном учитывалась только связь содержания магния в расплаве с температурой ($R 0.91$ и $\chi^2 1.59$), в другом дополнительно к температуре учитывались содержания титана, алюминия, щелочей в расплаве и давление ($R 0.95$ и $\chi^2 7.09$). Приведенные значения величин позволяют полагать на уровне вероятности 0.99 и 0.9 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов. Для интервала давлений 3–21 кб были рассчитаны также 2 уравнения, в которых использованы аналогичные корреляционные связи. Эти уравнения имеют характеристики $R 0.87$ и 0.91 , $\chi^2 0.87$ и 3.23 . Эти результаты позволяют полагать на уровне вероятности 0.99

соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать оба уравнения для расчетов, оценивая при этом равновесность самого расплава. Для интервала давлений 22–175 кб было получено одно уравнение, (в котором наряду с температурой учитываются и содержания алюминия и кальция в расплаве) имеющее характеристики R 0.91 и χ^2 1.96. Эти значения позволяют полагать с некоторой долей осторожности, что распределение среднеквадратичной ошибки на уровне ~ 0.9 соответствует нормальному закону распределения, и уравнение может быть использовано для расчетов.

Расчет значений **температуры** равновесия расплава. По выборке экспериментов в условиях атмосферного давления было получено 3 уравнения. Одно основано на связи содержания магния и температуры, а 2 других дополнительно учитывают влияние алюминия, кальция и щелочей в расплаве. Эти уравнения имеют характеристики R 0.94–0.95, χ^2 3.28; 2.42 и 3.58, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов. По выборке в условиях повышенного давления было получено 9 уравнений: 5 уравнений для всего интервала давлений (2–175 кб); 3 уравнения в интервале 3–21 кб; 1 уравнение для интервала 22–175 кб. Все уравнения включают в себя содержания магния, как базового аргумента функции с привлечением содержаний кремния, титана, алюминия, щелочей в расплаве, а также величины давления. Первые 5 уравнений имеют характеристики R 0.92–0.97 и χ^2 0.94–4.78. Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.95–0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов. Три уравнения для интервала давлений 3–21 кб имеют характеристики R 0.87 и 0.92; χ^2 1.55; 0.9 и 2.7. Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие нормальному закону распределения среднеквадратичной ошибки и использовать эти уравнения для расчетов. Уравнение для интервала 22–175 кб имеет характеристики R 0.94 и χ^2 0.51, что позволяет его использовать для расчетов, предполагая на уровне вероятности 0.99 нормальное распределение среднеквадратичной ошибки.

Расчет величины **давления**. Было сформировано 3 уравнения, позволяющих рассчитывать величину давления в интервале 6–140 кб, 5–21 кб и 22–175 кб. Уравнения имеют следующие характеристики R 0.87; 0.76 и 0.96; χ^2 8.96; 2.41 и 1.69. Первые 2 уравнения согласно своим характеристикам могут быть использованы как оценочные. Последнее уравнение можно использовать для расчетов, т. к. на уровне вероятности ~ 0.9 можно предположить соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав расплава, находящегося в равновесии с кристаллами оливина. Для выборок в условиях атмосферного давления и в условиях повышенного давления было получено по одному уравнению. Были использованы пропорциональные соотношения с одной стороны – титана, алюминия и щелочей, с другой стороны – содержаний железа, магния и величин температуры и давления. Эти уравнения имеют характеристики R -0.91 и -0.94; χ^2 3.21 и 1.94, что делает их пригодными для расчетов, полагая на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному распределению.

Обсуждение результатов

Идея соответствия состава магматического расплава, находящегося в равновесии с кристаллическими фазами, с физико-химическими условиями его существования (температурой, давлением, концентраций ряда элементов в нем) неоднократно высказывалась как отечественными, так и зарубежными исследователями. В работах [26; 46; 87; 98; 113] это предположение было доведено до стадии уравнений, позволяющих рассчитывать указанные величины

применительно к расплавам основного-ультраосновного составов. Интерес представляют уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения температуры в условиях повышенного давления и само давление. Поэтому тестировались результаты вышеперечисленных работ, за исключением результатов В. Фреша и Е. Камерона [46], т. к. эти диаграммы пригодны для условий атмосферного давления, и Х. Янга и др. [113], так как в этой работе исследовался расплав, равновесный с парагенезисом оливин–плагиоклаз–авгит. По результатам тестирования геотермометров были получены следующие характеристики использованных уравнений:

Ф. Альбарде: N 756, N₁ 750, R 0.9, сигма 63.4 °С, χ^2 6.28 (16) [26];

К. Путирка: модель 13 – N 756, N₁ 737, R 0.92, сигма 57 °С, χ^2 2.12 (16);

модель 14 – N 756, N₁ 741, R 0.95, сигма 47.9 °С, χ^2 1.75 (16);

модель 15 – N 756, N₁ 746, R 0.96, сигма 40.3 °С, χ^2 3.5 (16);

модель 16 – N 756, N₁ 743, R 0.88, сигма 74.2 °С, χ^2 27.12 (16) [87];

Т. Сугуvara: N 756, N₁ 746, R 0.96, сигма 42 °С, χ^2 3 (16) [98].

На рис. III.1.1 gl–ol представлен результат тестирования уравнения из работы Ф. Альбарде

[26]. Характеристики этого геотермометра, приведенные выше, позволяют полагать на уровне вероятности ~0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов. Нами было получено несколько уравнений для расчета температуры, позволяющих учитывать только содержание магния в расплаве, содержание магния и величину давления, содержание магния, кремния, титана и суммы щелочей в расплаве. Первые два уравнения имеют характеристики хуже, а последнее имеет более хорошие характеристики, в частности, значение среднеквадратичной ошибки 50 °С.

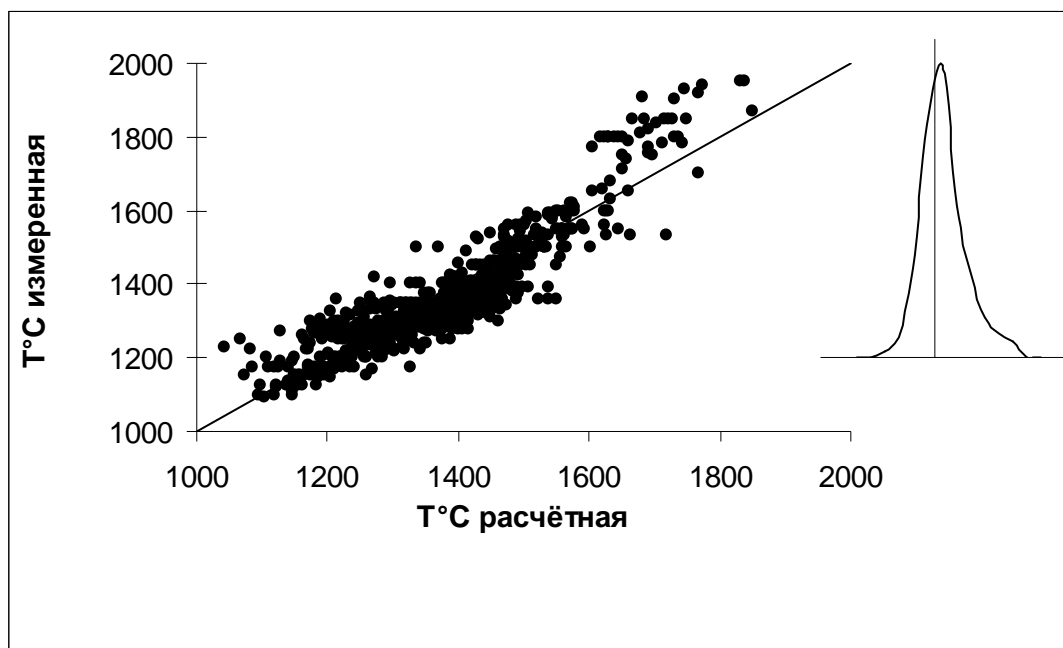


Рис. III.1.1. gl–ol. Соотношение рассчитанной по Ф. Альбарде [26] и измеренной температуры на выборке расплав–оливин в интервале давлений 1–175 кб (R 0.9, χ^2 6.28, сигма 63.4 °С).

Результаты тестирования геотермометров К. Путирки [87] позволяют использовать модели 13, 14, 15 для расчетов. Модель 16 (модернизированный термометр Х. Янга и др. [113]) для расчетов не пригодна, т. к. распределение среднеквадратичной ошибки не соответствует нормальному распределению. Лучший из геотермометров [87] представлен на рис. III.1.2 gl–ol.

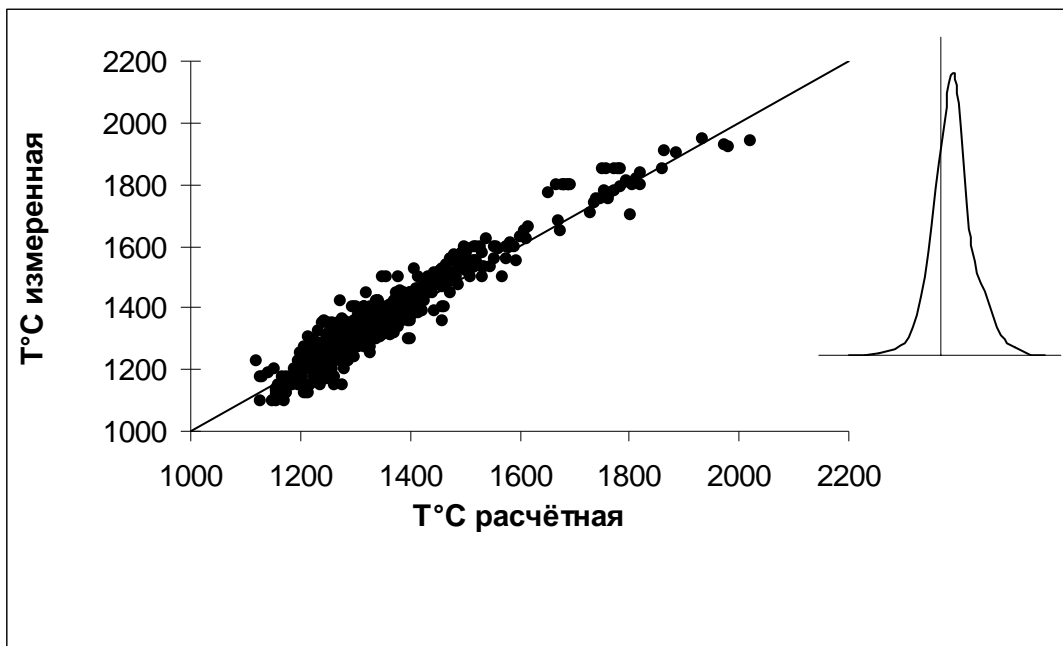


Рис. III.1.2 gl–ol. Соотношение рассчитанной К. Путиркой [87] и измеренной температуры на выборке расплав–оливин в интервале давлений 1–175 кб (R 0.96; χ^2 3.5; сигма 40.3 °С).

Результаты тестирования геотермометра Т. Сугувары [98] представлены на рис. III.1.3 gl–ol. Полученные характеристики дают возможность использовать это уравнение для расчетов. Это уравнение, в котором учитываются концентрации в расплаве кремния, железа, магния, кальция и давление, имеет лучшие характеристики в сравнении с полученными нами, учитывающими содержания кремния, титана, магния и суммы щелочей, но среднеквадратичная ошибка по результатам тестирования (42 °С) больше указанной автором (30 °С), хотя объем использованной выборки ~1040 точек.

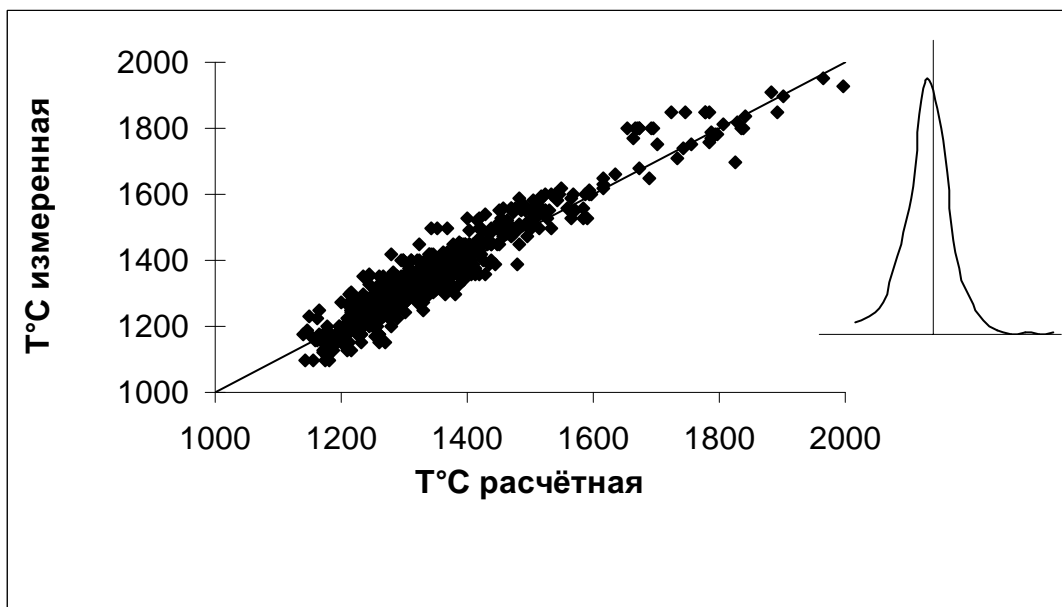


Рис. III.1.3. gl–ol. Соотношение рассчитанной Т. Сугувары [98] и измеренной температуры на выборке расплав–оливин в интервале давлений 1–175 кб (R 0.96; χ^2 3; сигма 42 °С).

Состав расплава может быть использован и для построения геобарометров. Были протестированы 2 геобарометра: 1. Ф. Альбаредо [26] и 2. К. Путирки (модель 42) [87] для трех интервалов давлений: 2–175 кб; 2–30 кб; 30–175 кб. Эти результаты имеют следующие числовые характеристики:

1. диапазон давлений до 175 кб: N 756; N_1 718; R 0.82; сигма 9.2 кб; χ^2 78.8 (16);
 давление меньше 30 кб: N 671; N_1 647; R 0.7; сигма 4.8 кб; χ^2 17.2(16);
 давление больше 30 кб: N 47; N_1 46; R 0.8; сигма 13.2 кб; χ^2 0.81 (9) [26];
2. диапазон давлений до 175 кб: N 756; N_1 743; R 0.91; сигма 4.8 кб; χ^2 24.3 (16);
 давление меньше 30 кб: N 706; N_1 686; R 0.84; сигма 3.16 кб; χ^2 6.52 (16);
 давление больше 30 кб: N 50; N_1 47; R 0.8; сигма 12.5 кб; χ^2 4.46 (8) [87].

Эти геобарометры, протестированные на разных диапазонах давлений по своим числовым характеристикам не пригодны для расчетов и могут быть использованы только для оценок. Результаты тестирования представлены ниже.

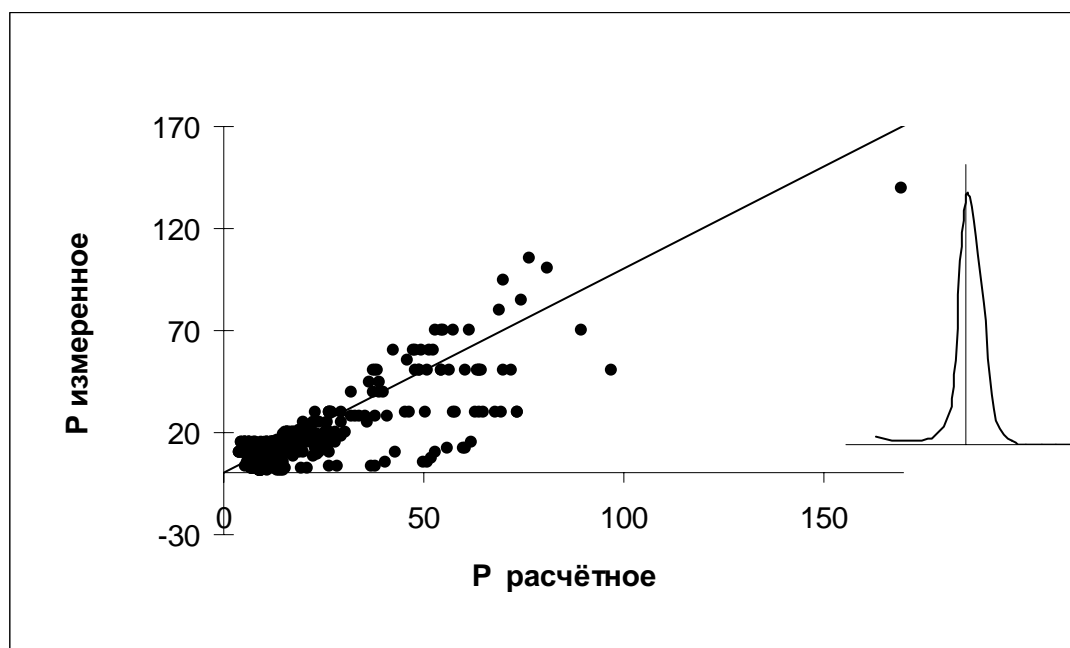


Рис. III.1.4 gl–ol. Соотношение рассчитанного Ф. Альбаредо [26] и измеренного давлений на выборке расплав–оливин в интервале давлений 1–175 кб (R 0.82; χ^2 78.8 (16); сигма 9.2 кб).

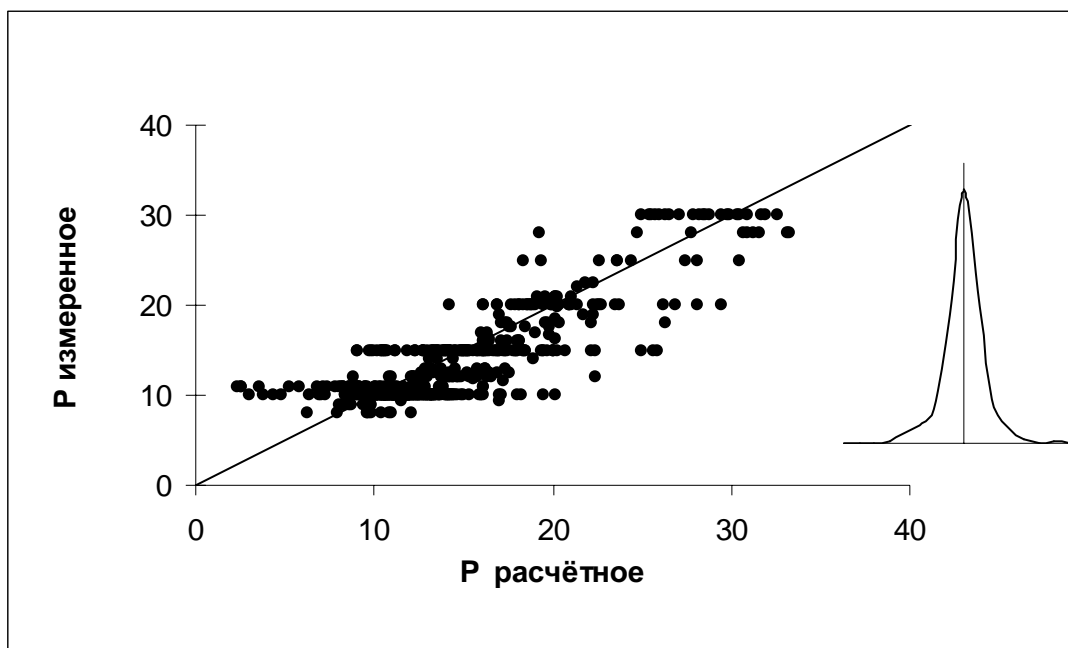


Рис. III.1.5 gl-ol. Соотношение рассчитанного К. Путиркой (модель 42) [87] и измеренного давлений на выборке расплав–оливин в интервале давлений меньше 30 кб (R 0.84; χ^2 6.52 (16); сигма 3.2 кб).

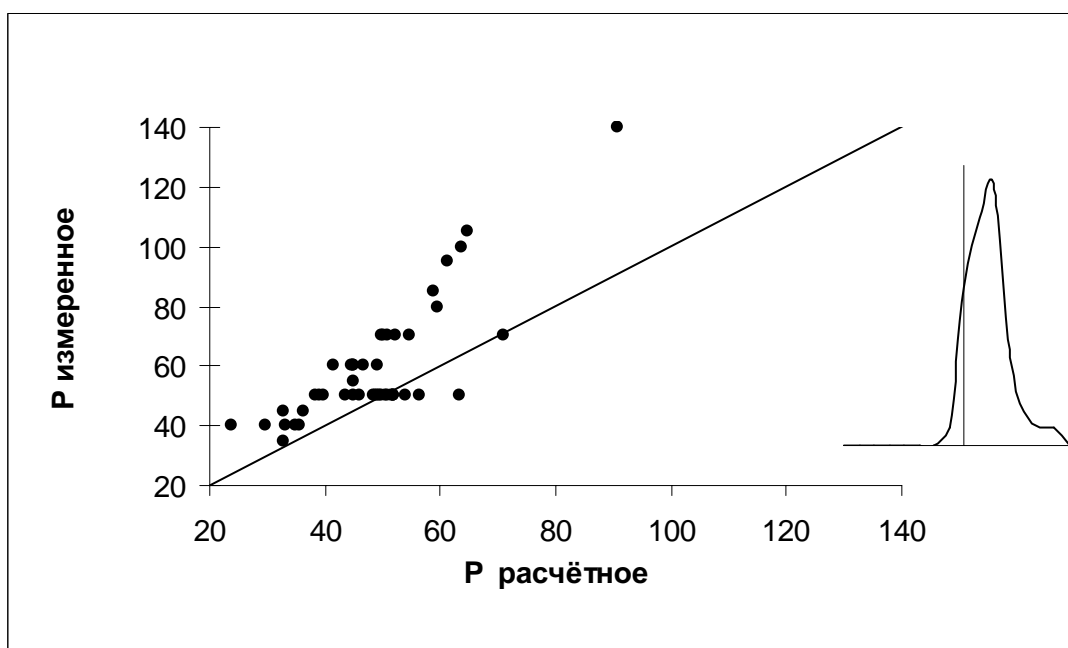


Рис. III.1.5 gl-ol. Соотношение рассчитанного К. Путиркой (модель 42) [87] и измеренного давлений на выборке расплав–оливин в интервале давлений больше 30 кб (R 0.8, χ^2 4.46 (8), сигма 12.5 кб).

Полученное нами уравнение (**формула PGOLPb**) для расчета давления в интервале значений 22–175 кб пригодна для расчетов. В графическом виде эта зависимость представлена ниже (рис. II.18 gl-ol).

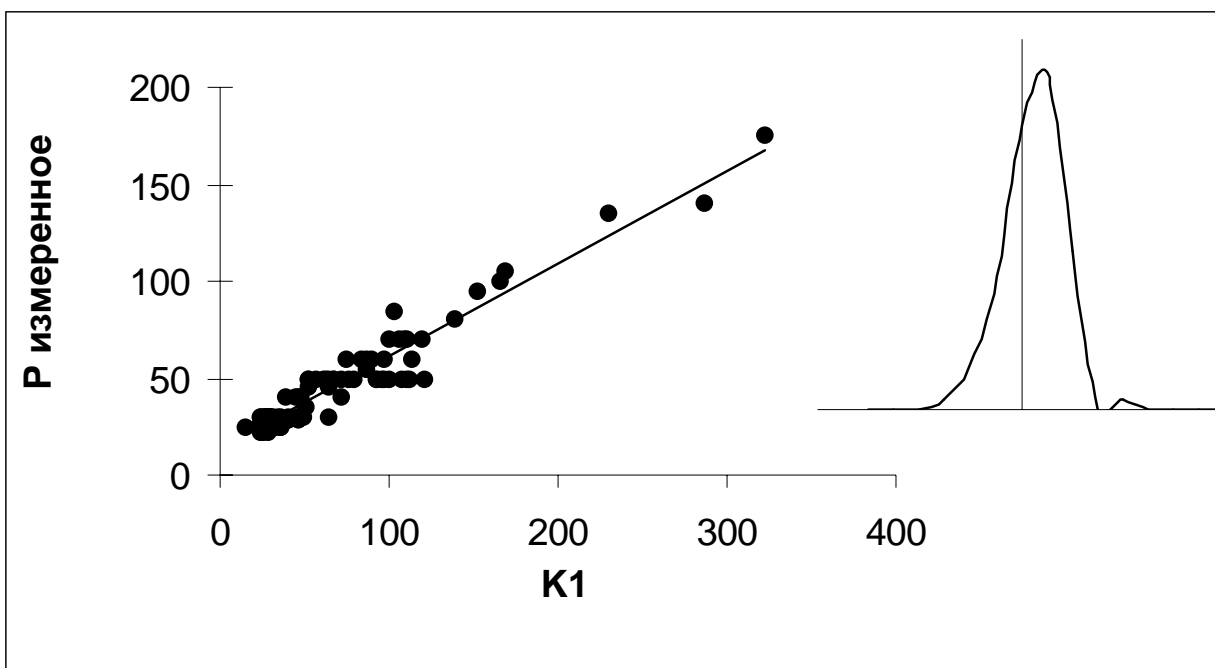


Рис. 11.18 gl–ol (формула **PGOLPb**). Зависимость величины **P** от состава расплава и распределение среднеквадратичной ошибки (R 0.96; χ^2 1.69 (8); сигма 7.27 кб).

Важным для генезиса основных-ультраосновных расплавов является проблема отличия расплава, равновесного с оливином, и неравновесного с ним, при повышенном давлении. С этой целью была сформирована выборка (446 т.) из экспериментальных точек при повышенном давлении (до ~175 кб), в которых оливин отсутствовал. В этой выборке были выявлены равновесные соотношения элементов в расплаве, позволяющие отличить такой расплав от равновесного с оливином. Некоторые различия удалось получить только для экспериментов при давлениях > 21 кб, представленные выборкой из 121 точки. Полученная зависимость имеет следующие характеристики:

$$K_1 = Si_m + 2Ti_m; K_2 = 100(Mg_m + Ca_m):T$$

$$K_1 = -12.3K_2 + 68.12(PGLSR)$$

Диапазон значений K_1 35.2–64.3; K_2 0.5–2.7;

Относительная ошибка 9–5%

$R = -0.91$; $N = 121$; $N_1 = 118$; сигма = 3.02 (12)

Диапазон давлений 22–180 кб

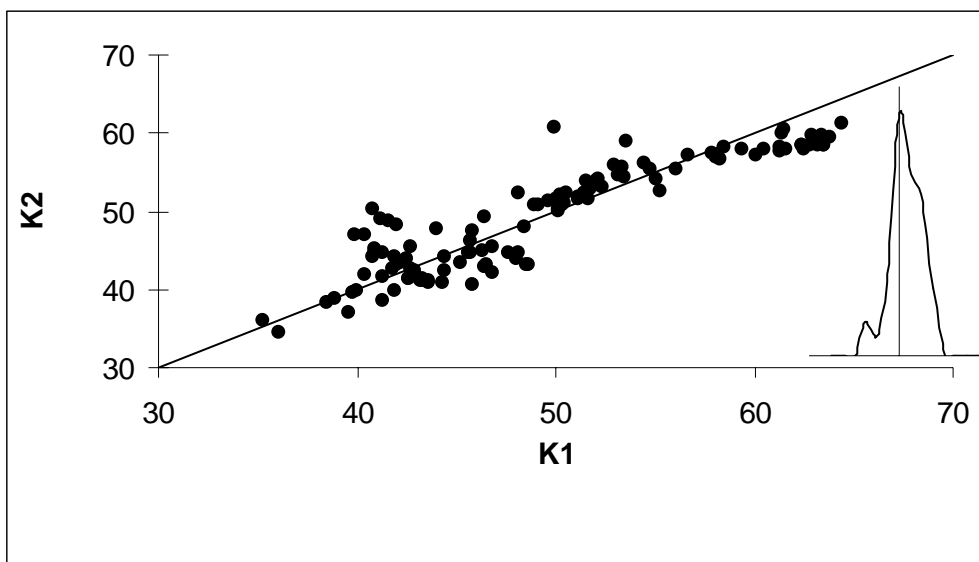


Рис. III.7 gl–ol (**формула PGLSR**). Соотношение величин K_1 и K_2 для выборки, представленной безоливиновым парагенезисом при давлениях 22–180 кб.

Ниже представлена эта зависимость на выборке для системы оливин–расплав в том же диапазоне давлений (22–175 кб).

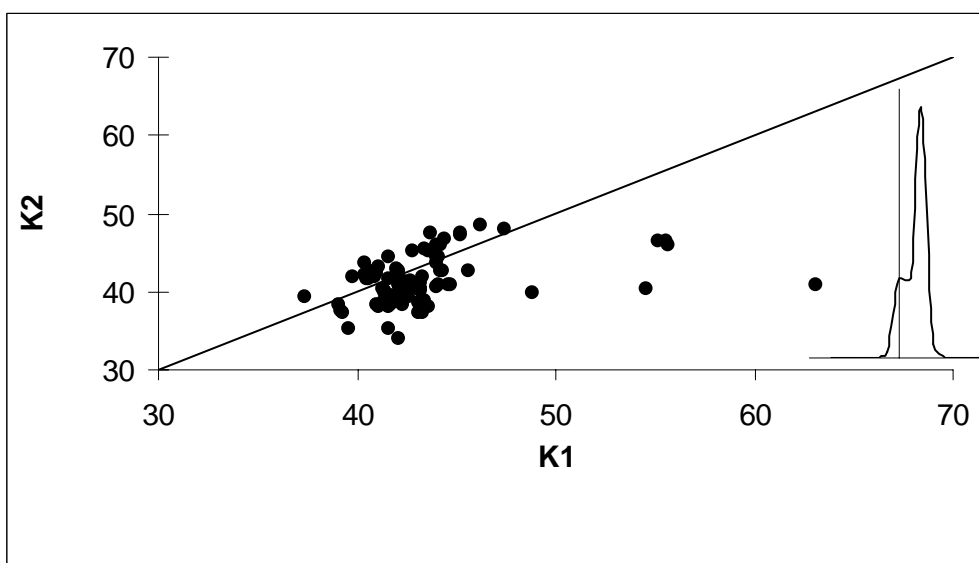


Рис. III.8 gl–ol (**формула PGLSR**). Соотношение величин K_1 и K_2 для выборки, представленной системой оливин–расплав в интервале давлений 22–175 кб [R 0.38; N 93; σ 3.8; χ^2 9.08 (8)].

Это соотношение элементов в расплаве на выборке, в которой расплав насыщен на ликвидусе оливином, позволяет полагать, что в интервале давлений 22–180 кб в «сухих условиях» расплавы среднего состава могут быть равновесны с пироксенитами, некоторыми разновидностями лерцолитов и неравновесны с перидотитами.

Выводы

1. Для системы основной-ультраосновной расплав + оливин + n кристаллических фаз, где n равно 0, 1, 2, 3, 4, выведен ряд уравнений (для условий атмосферного и повышенного давлений), позволяющих рассчитывать численные значения следующих величин:
содержание **алюминия** (1 уравнение) в расплаве в условиях повышенного давления; содержание **магния** в условиях атмосферного давления (1 уравнение) и для выборок в нескольких интервалах давлений (5 уравнений);
значение **температуры**, вычисляемое по составу расплава в условиях атмосферного давления (3 уравнения) и для нескольких интервалов давлений (8 уравнений);
величину **давления** (1 уравнение) по составу расплава в интервале давлений 22–175 кб; **равновесные соотношения ряда элементов в расплаве** в условиях атмосферного (1 уравнение) и повышенного давления (1 уравнение).
2. Для интервалов давлений 5–21 кб и 6–140 кб полученные уравнения можно использовать, только как оценочные.
3. На сформированных выборках были протестированы уравнения для расчетов температур и давлений из работ Ф. Альбарде, К. Путирки и Т. Сугувары [26; 87; 98].
4. Геотермометр Ф. Альбарде [26] может быть использован для расчетов, но использование полученного нами результата предпочтительнее из-за меньшей величины среднеквадратичной ошибки. Уравнение Ф. Альбарде [26], полученное для расчета давления, может быть использовано только для оценочных результатов.
5. Геотермометр Т. Сугувары [98] может быть использован для расчетов, но имеет худшие характеристики в сравнении с нашими результатами.
6. Геотермометр К. Путирки [87] может быть использован для расчетов, но также имеет худшие характеристики в сравнении с нашими результатами. Совместное использование геотермометров, полученных нами, и уравнений из работ К. Путирки и Т. Сугувары [87; 98], в которые входят различные наборы элементов из расплава с использованием значений среднеквадратичной ошибки, позволит судить о равновесности расплава.
7. Уравнения, полученные К. Путиркой [87] для расчетов давления по составу расплава, согласно их характеристикам можно использовать только как оценочные.
8. Выявлена зависимость равновесных содержаний элементов в расплаве, неравновесном с оливином, в интервале давлений 22–180 кб. Возможно, это уравнение поможет отличить расплавы, равновесные с лерцолит-гарцбургитовым реститом от иных мантийных источников.
9. Сильная корреляционная связь содержания магния в расплаве с температурой (в отличие от других элементов расплава), выявленная достаточно отчетливо, вероятно указывает на его особое структурное положение в расплавах, равновесных с оливином. Забегая вперед, можно утверждать, что это распространяется и на расплавы, равновесные с ортопироксеном и клинопироксеном. Слабеет эта связь в расплавах, равновесных с плагиоклазом.
10. Соотношения элементов в расплаве, равновесном с оливином при давлениях в интервале 22–175 кб, позволяют полагать, что образование расплавов среднего состава возможно при плавлении пироксенитов и некоторых типов лерцолитов в «сухих условиях».

7.5. Уравнения, полученные для системы расплав–ортопироксен

Были получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин:

I. эксперименты в условиях атмосферного давления (~150 т.): концентрации Si в расплаве (2 уравнения), Ti (1 уравнение), Al (1 уравнение), Fe²⁺ (1 уравнение), Mg (3 уравнения), Ca (1 уравнение), Cr (1 уравнение), Fe²⁺/Mg отношения (3 уравнения), температуру (8 уравнений);

II. эксперименты в условиях повышенного давления (~500 т.): концентрации в расплаве Si (2 уравнения), Ti (2 уравнения), Al (2 уравнения), Fe²⁺ (2 уравнения), Mg (3 уравнения), Ca (1 уравнение), Cr (1 уравнение), Fe²⁺/Mg отношения (2 уравнения), температуру (2 уравнения), давление (2 уравнения).

Расчет содержания **кремния** в расплаве. Два уравнения, полученные по экспериментальным данным при атмосферном давлении (~150 т.) имеют коэффициенты корреляции 0.88 и 0.86, значения χ^2 0.71 и 1.68. Это позволяет полагать соответствие среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 нормальному распределению и использовать оба уравнения для расчетов. Два уравнения, полученные по экспериментальным точкам (~520 т.) при повышенных давлениях (до 110 кб), имеют коэффициенты корреляции 0.92 и 0.93, значения χ^2 3.32 и 2.66. Это указывает на нормальность распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 и 0.95, что дает возможность использования этих уравнений для расчетов содержания кремния в расплаве.

$K_D(\text{ор}-\text{м})$ для кремния в условиях атмосферного давления лежит в интервале значений 0.8–1.1 и пропорционален содержаниям кремния (R -0.98), железа, магния и кальция (R 0.6–0.7), натрия и калия (R -0.77) в расплаве, а также температуре (R 0.56). Состав же самого ортопироксена на величину K_D практически не влияет. В условиях повышенного давления диапазон значений $K_D(\text{ор}-\text{м})$ лежит в интервале 0.6–1.5 и добавляется влияние давления (R 0.44) и содержания магния в ортопироксене (R 0.4).

Расчет содержания **титана** в расплаве. Уравнение, полученное по экспериментальным данным при атмосферном давлении, имеет коэффициент корреляции 0.94 и значение χ^2 1.9, что позволяет полагать соответствие среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 нормальному распределению. Значения этих величин позволяют использование этого уравнения для расчетов содержаний титана в расплаве. Уравнения, полученные по экспериментальным точкам при повышенных давлениях, имеют коэффициенты корреляции 0.86 и 0.85, значения χ^2 6.33 и 9.73, что не позволяет говорить о соответствии нормальному закону распределения. Уравнения могут быть использованы только как оценочные.

$K_D(\text{ор}-\text{м})$ для титана в условиях атмосферного давления лежит в интервале значений 0.1–2.8, слабо зависит от составов расплава, ортопироксена и P–T условий. В условиях повышенного давления интервал значений K_D сходен (0.3–2.3) и существует влияние содержаний в расплаве кремния (R 0.6) и магния (R -0.5), а также влияние содержаний в ортопироксене железа (R 0.66) и магния (R -0.7) и, соответственно температуры (R -0.5).

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Уравнение, полученное по массиву при атмосферном давлении, имеет R 0.83 и значение χ^2 2.06, что указывает на соответствие нормальному закону распределения на уровне вероятности 0.99, но низкое значение коэффициента корреляции допускает его использование только как оценочного. Уравнения, полученные по массивам при повышенных давлениях, имеют значения R 0.86 и -0.93, значения χ^2 3.68 и 7.07, соответственно. Величина χ^2 7.07 дает основание исключить предположение о нормальности распределения среднеквадратичной ошибки для формулы с R = -0.93. Поэтому для расчетов алюминия в расплаве в условиях повышенного давления может быть использована только одна формула. $K_D(\text{ор}-\text{м})$ для алюминия при атмосферном давлении меньше единицы, слабо зависит от состава расплава, обратно пропорционален (R -0.81) содержанию

кремния в кристалле ортопироксена и прямо пропорционален содержанию алюминия в нем (R 0.97). В экспериментах при повышенных давлениях его величина также зависима от содержания кремния (R -0.77) и алюминия (R 0.86) в ортопироксене.

Расчет содержания **железа Fe²⁺** в расплаве. Для экспериментов при атмосферном давлении рассчитывалось содержание **Fe²⁺** в расплаве и сравнивалось с вычисленным ранее по (А.А. Борисову и А.И. Шапкину [8]). Для экспериментов при повышенном давлении оценивалось общее содержание железа, полагая, что все оно находится в **двухвалентной форме**. Для условий атмосферного давления было получено 1 уравнение, имеющее характеристики R 0.94 и χ^2 2.16, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов. В условиях повышенного давления было получено 2 уравнения с характеристиками R 0.91 и 0.92, χ^2 11.9 и 8.2. Эти результаты исключают предположение о нормальности распределения среднеквадратичной ошибки, поэтому уравнения могут быть использованы только для оценочных данных. Величина $K_D(\text{ор}-\text{м})$ для железа **Fe²⁺** для случая атмосферного давления лежит в интервале значений 0.4–5, пропорциональна содержаниям в расплаве Si (0.75); Mg (-0.75); Ca (-0.64); Na (-0.71) и температуре (-0.71), а также зависит от содержания в кристалле ортопироксена железа (0.6). Для случая повышенного давления величина $K_D(\text{ор}-\text{м})$ для железа принимает значения в более широком диапазоне: 0.1–21, пропорциональна Si (0.76); Mg (-0.46); Ca (-0.52) в расплаве и температуре (-0.56). Кроме того, эта величина при повышенных давлениях зависит и от содержаний в кристалле ортопироксена железа (0.75) и магния (-0.74).

Расчет содержания **магния** в расплаве. Два уравнения, полученные по экспериментальным данным при атмосферном давлении, обладают характеристиками R 0.92 и 0.9, χ^2 3.24 и 1.57, что позволяет предположить на уровне вероятности 0.95 и 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному закону распределения и использовать эти уравнения для расчетов. Три уравнения, полученные по экспериментам при повышенном давлении, также характеризуются высокими значениями R (0.95; 0.91; 0.93) и χ^2 (2.37; 2.92; 0.74), позволяющими предположить на уровне вероятности 0.95–0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов. Величина $K_D(\text{ор}-\text{м})$ для магния при атмосферном давлении лежит в интервале 1.6–28; для экспериментов в условиях повышенного давления эта величина принимает значения в диапазоне 1–76. При атмосферном давлении K_D зависит от содержаний в расплаве кремния (0.76), магния (-0.75), кальция (-0.65), натрия (0.69), калия (0.88) и от температуры (-0.71). В условиях повышенного давления величина K_D пропорциональна содержаниям кремния (0.8), магния (-0.5), кальция (0.54) в расплаве, температуре (-0.57), а также содержаниям в кристалле ортопироксена железа (0.68) и магния (-0.68).

Расчет содержания **кальция** в расплаве. Для условий атмосферного давления было получено одно уравнение, обладающее характеристиками R -0.9 и χ^2 1.17, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения. Эти характеристики позволяют использовать это уравнение для расчетов. В условиях повышенного давления было получено одно уравнение, обладающее характеристиками R 0.9 и χ^2 1.78, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов. Величина $K_D(\text{ор}-\text{м})$ для кальция в условиях атмосферного давления лежит в интервале 0.1–0.9 и зависит от содержаний в расплаве кремния (0.67), магния (-0.76), кальция (-0.53), натрия (0.66), калия (0.81) и от равновесной температуры (-0.75). Она также чувствительна к содержаниям в составе ортопироксена железа (0.6) и магния (-0.65). Величина $K_D(\text{ор}-\text{м})$ для кальция в условиях повышенного давления лежит в

интервале 0.1–0.7 и зависима от содержаний в расплаве кремния (0.4), магния (-0.4), кальция (-0.4), а также от содержаний в составе ортопироксена железа (0.4) и магния (-0.5).

Расчет содержания **хрома** в расплаве. Для условий атмосферного давления было получено 1 уравнение, обладающее характеристиками R 0.85 и χ^2 2.46, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному закону распределения. Вероятно, это уравнение с некоторой долей осторожности (из-за низкого значения R) можно использовать для расчетов содержания хрома в расплаве. Для условий повышенного давления было получено 1 уравнение с характеристиками R 0.86 и χ^2 6.33, что позволяет его использовать только, как оценочное. Величина $K_D(\text{ор}-\text{м})$ для хрома, как при атмосферном давлении, так и в случае повышенного, лежит соответственно в интервале значений 1–30 и 1–23, слабо зависит от состава расплава и состава кристалла ортопироксена.

Расчет значений **железо-магниевого отношения** в расплаве. Для случая атмосферного давления было получено 3 уравнения, имеющие характеристики R 0.95–0.96; χ^2 8.1; 5.6 и 2.1. Только одно из них (с $\chi^2 = 2.1$), для которого распределение среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 соответствует нормальному распределению, может быть использовано для расчетов. Для экспериментов в условиях повышенного давления было получено 2 уравнения с характеристиками R 0.96–0.97; χ^2 40 и 18, что позволяет использовать эти уравнения только как оценочные.

Величина **$K_D\text{Fe-Mg}$** ортопироксен–расплав как для случая атмосферного давления, так и для экспериментов в условиях повышенного давления, лежит в интервале значений 0.1–0.5 и 0.1–0.7, соответственно. Распределение численного значения этой величины для массива в условиях повышенного давления не соответствует закону нормального распределения ($\chi^2 = 14$). Численное значение этой величины не зависит от давления и слабо зависит как от состава расплава, так и от состава ортопироксена, а также и температуры равновесного распределения (значения R меньше 0.5).

Расчеты значений **температуры** равновесия. Для случая атмосферного давления было получено 8 уравнений, характеризующихся коэффициентами корреляции R 0.88–0.96; χ^2 4.11–0.51, что позволяет полагать на уровне вероятности от 0.9 до 0.99 соответствие нормальному распределению среднеквадратичной ошибки и использовать эти уравнения для расчетов. Кроме того, сходство или различие вычисленных значений температуры с учетом среднеквадратичной ошибки позволяет оценить соответствие равновесному содержанию ряда элементов в расплаве. По массиву экспериментальных точек в условиях повышенных значений было получено 2 уравнения с характеристиками R 0.94; χ^2 1.85 и 2.78, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 и 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному распределению.

Расчеты величины **давления**. Было получено 3 формулы, 2 из которых позволяют рассчитывать численные значения давлений в интервале 3–30 кб, и одна – в интервале давлений 30–110 кб. Уравнения для интервала давлений 3–30 кб имеют характеристики R 0.85 и 0.86; χ^2 1.55 и 4.34. Из этих 2-х уравнений только первое с некоторой долей осторожности может быть использовано для расчетов, т. к. для него можно предположить на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному распределению. Уравнение для интервала давлений 30–110 кб имеет R 0.96 и χ^2 5.49, что указывает на несоответствие распределения среднеквадратичной ошибки, даже на уровне вероятности 0.9, нормальному закону. Это уравнение может быть использовано только как оценочное.

Обсуждение результатов

Уравнения, позволяющие рассчитывать значения температуры в системе расплав–низкокальциевый пироксен (в частности ортопироксен) и оценивать ее равновесность, представлены в работах [3; 7; 33; 34; 36; 48; 53; 74; 75; 87]. Однако широкого применения эти уравнения не нашли, что по нашему мнению, связано с двумя причинами. С одной стороны, точности расчетов температуры ограничены преимущественно областями составов, в рамках которых была выполнена калибровка, на что указано в работе А.А. Арискина, Г.С. Барминой [3]. С другой стороны, ортопироксен встречается ограниченно даже в породах толеитового семейства, на что обращено внимание в работе И.Д. Рябчикова, Л.Н. Когарко [20]. Отчасти первую сложность нам удалось преодолеть, используя максимально возможный объем имеющихся в настоящее время экспериментальных данных, что позволило наряду с Р–Т условиями рассчитывать и равновесные содержания ряда элементов в расплаве. Использование величины K_D^{Fe-Mg} для расчетов (с нашей точки зрения) в настоящее время затруднительно, что связано со значительным несоответствием распределения этой величины в системе основной–ультраосновной расплав–оливин, ортопироксен, клинопироксен (см. главы 1, 2) закону нормального распределения. В работе Дж. Бедарда [36] предлагается использовать для расчетов величину K_D^{Fe-Mg} ортопироксен–расплав полагая его величину 0.2–0.3, что некорректно, т. к. эта величина, например для условий повышенного давления, лежит в интервале 0.17–0.71, а из-за асимметрии графика (что хорошо видно) и хвоста в области значений выше среднего использование средней величины неправомерно (рис. III.1.1 орх–gl).

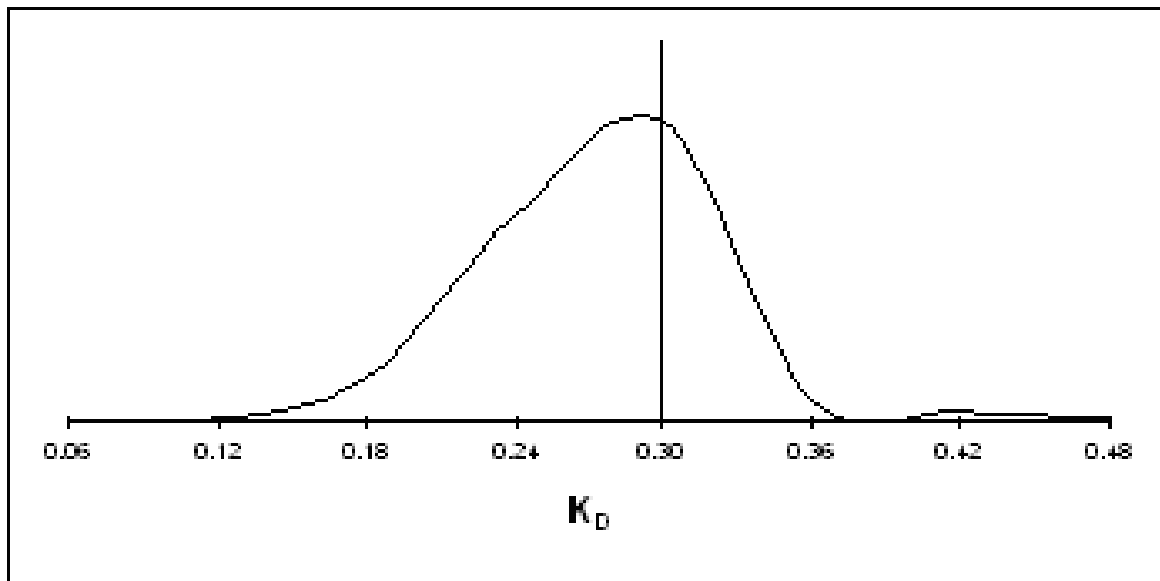


Рис. III.1.1 орх–gl. Распределение величины K_D^{Fe-Mg} в системе основной–ультраосновной расплав–ортопироксен в интервале давлений до ~100 кб. Минимальный $K_D = 0.17$, максимальный $K_D = 0.71$, средний $K_D = 0.30$.

Полученные уравнения при расчете одной и той же величины не всегда равнозначны, о чем говорилось выше, где полученные характеристики подробно рассмотрены.

В отличие от термометров в системе основной–ультраосновной расплав–ортопироксен модели барометров для этой системы более разработаны. Были протестированы 3 модели барометров из работы К. Путирки [87]. Протестированные формулы обладают следующими числовыми характеристиками: модель 29a – N 522; N_1 307; R 0.81; сигма 3.14 кб; χ^2 6.72 (12); модель 29b – N 522; N_1 440; R 0.88; сигма 2.49 кб; χ^2 3.8 (12); модель 29c – N 522; N_1 379; R 0.88; сигма 3.24 кб; χ^2 3.85 (12). По своим характеристикам модель 29b и модель 29c с некоторой долей осторожности могут быть использованы для расчетов.

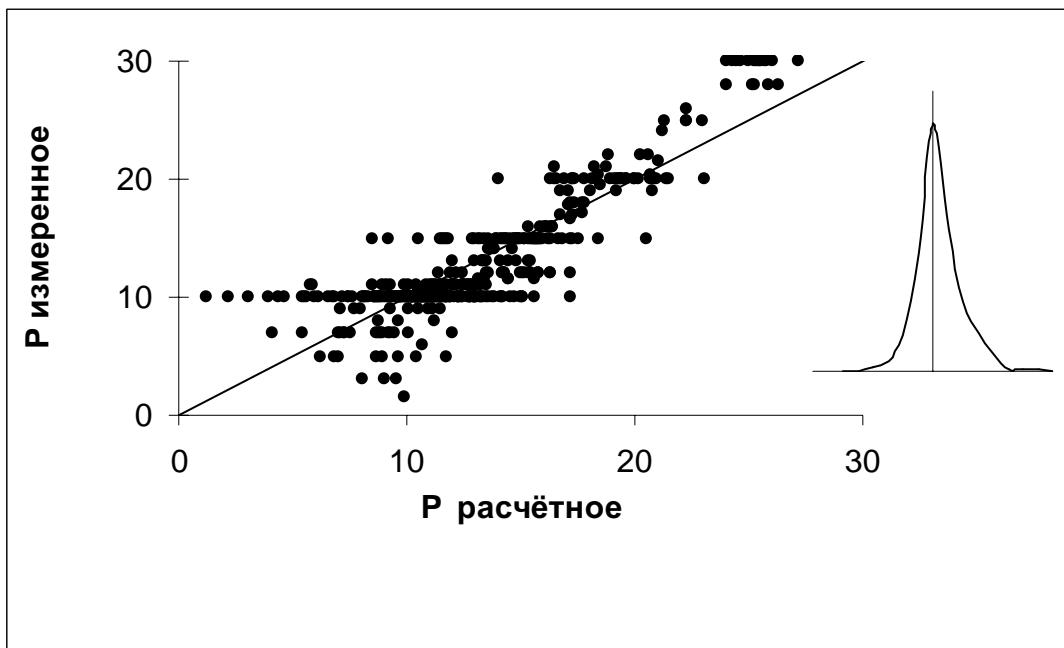


Рис. III.1.2 орх–gl. Зависимость расчетного и измеренного давлений по формуле из работы [87], модель 29b – N 522; N_1 440; R 0.88; сигма 2.49 кб; χ^2 3.8 (12).

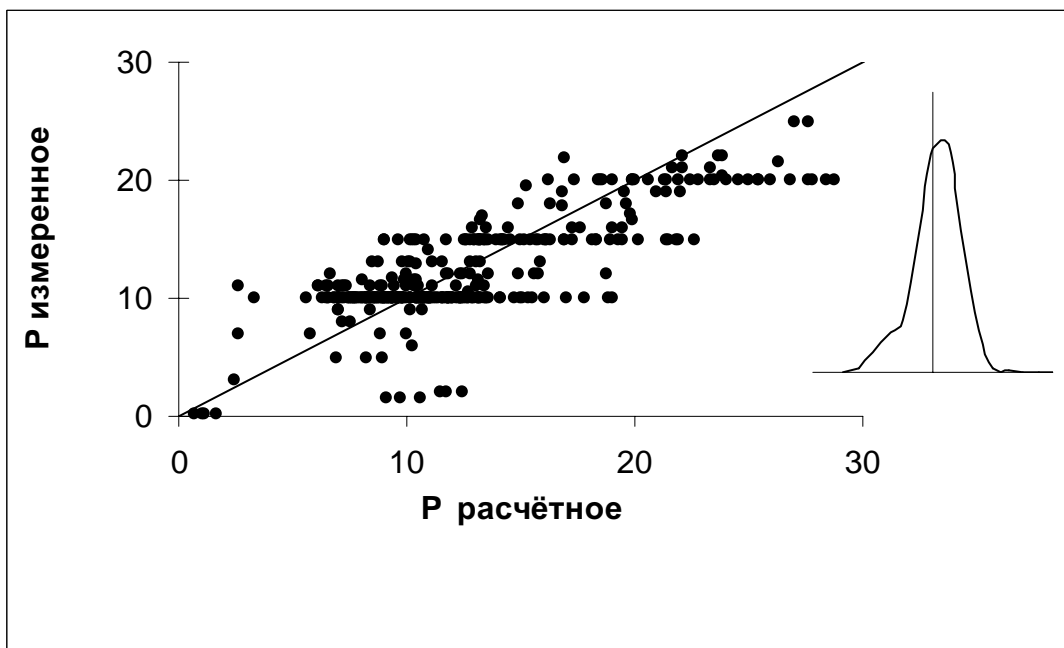


Рис. III.1.3 орх–gl. Зависимость расчетного и измеренного давлений по формуле из работы [87], модель 29c – N 522; N_1 379; R 0.88; сигма 3.24 кб; χ^2 3.85 (12).

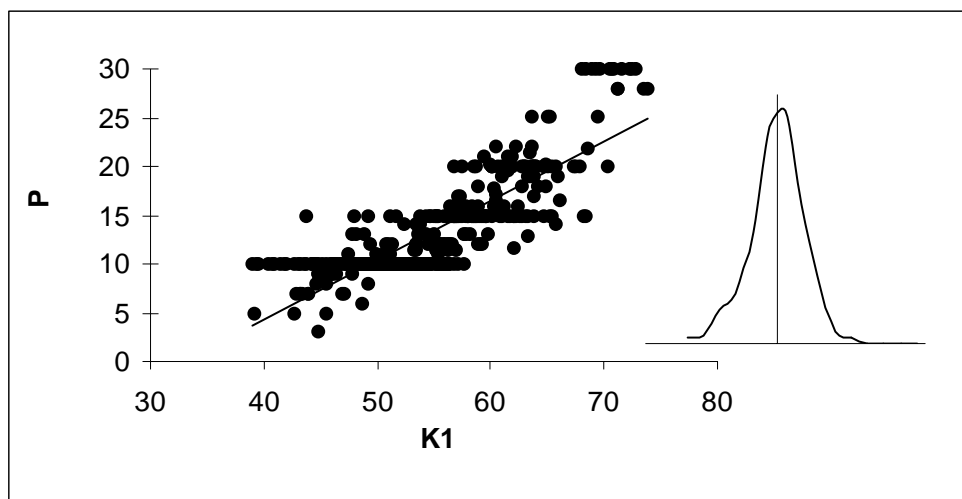


Рис. II.19 орх (формула PLOPPa). Зависимость величины **P** от состава ортопироксена, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки.

Представленные на рис. III.1.2 орх–gl и рис. III.1.3 орх–gl зависимости сходны с полученными нами рис. II.19 орх, а также формулы (PLOPPa) и (PLOPPb) (см. глава 2) для интервала давлений до 30 кб. Для интервала давлений 30–110 кб тестированные формулы дали неприемлемые результаты, а полученная нами формула (PLOPPc) (см. глава 2) может быть использована для оценочных результатов.

Интерес представляют особенности поведения величины $K_D(\text{ор–m})$ для кремния, магния и железа в системе расплав–ортопироксен. Были выявлены следующие особенности их распределения: обратно пропорциональная зависимость величины $K_D(\text{ор–m})$ для кремния и магния от их содержаний в расплаве с одной стороны, и прямая пропорциональная зависимость K_D кремния от содержания магния в расплаве, а также K_D магния от содержания кремния в расплаве. Эти зависимости указывают на различную роль этих элементов в строении расплавов, равновесных с ортопироксеном. Они являются антагонистами – увеличение в расплаве концентрации одного из них при кристаллизации ведет к уменьшению другого. Это хорошо укладывается в представления об отнесении кремния к сеткообразователям, а магния к модификаторам [3]. Для магния существует прямая пропорциональная зависимость между его содержанием в ортопироксене и концентрацией в расплаве ($R\ 0.66$). Для кремния такая зависимость отсутствует. Для железа K_D также прямо пропорционален содержанию кремния в расплаве, но от содержания железа зависимость нечеткая, существует только при атмосферном давлении ($R\ -0.44$).

Для титана, алюминия, кальция и хрома (входящих в состав ортопироксена, как правило, в небольших количествах) зависимости нечеткие, меняющиеся от выборки к выборке численно и по набору влияющих элементов.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитать численные значения следующих величин в равновесной системе расплав–ортопироксен:

содержание **кремния** в расплаве по 2 уравнениям при атмосферном давлении и по 2 уравнениям при повышенных давлениях;

содержание **титана** в расплаве можно рассчитать по одному уравнению в условиях атмосферного давления;

содержание **алюминия** по одному уравнению в условиях повышенного давления; содержание **железа** по одному уравнению при атмосферном давлении;

содержание **магния** по 2 уравнениям в условиях атмосферного давления и по 3 уравнениям в условиях повышенного давления;
содержание **кальция** по одному уравнению при атмосферном давлении и по 1 уравнению в условиях повышенного давления;
содержание **хрома** по одному уравнению при атмосферном давлении;
величину **железо-магниевого отношения** в расплаве по одному уравнению в условиях атмосферного давления;
значение равновесной **температуры** по 8 уравнениям при атмосферном давлении и по 2 уравнениям в условиях повышенного давления;
значение **давления** по 1 уравнению в интервале 3–30 кб.

2. Ряд полученных уравнений характеризуются невысокими значениями коэффициента корреляции и χ^2 , отклоняющими предположение о нормальности распределения среднеквадратичной ошибки. Эти уравнения могут быть использованы для получения **оценочных** значений. К ним относятся следующие уравнения: расчет содержания **титана** при повышенных давлениях; одно уравнение для расчета содержания **алюминия** в расплаве при повышенном давлении; оба уравнения для расчета содержания **железа** в расплаве при повышенных давлениях; уравнение для расчета содержания **хрома** при повышенном давлении в расплаве; два из трех уравнений для расчета величины **железо-магниевого отношения** в расплаве при атмосферном давлении и два уравнения для его расчета в условиях повышенного давления; одно уравнение для расчета величины давления в интервале 30–110 кб.

3. При кристаллизации ортопироксена, как в условиях атмосферного давления, так и при повышенном давлении, происходит удаление магния из расплава.

4. Соотношение объемов выборок при атмосферном давлении (~150 т.) и повышенном давлении (~520 т.) вероятно указывает на преимущественную кристаллизацию ортопироксена в глубинных условиях, в противовес плагиоклазу.

5. Обсуждены особенности величины $K_D(\text{ор}-\text{м})$ для породообразующих элементов, входящих в состав кристаллов ортопироксена, а также влияние на его величину состава расплава, температуры и давления и состава самого кристалла ортопироксена. Для $K_D(\text{ор}-\text{м})$ кремния, железа и магния общим является обратно пропорциональная зависимость от их содержания в расплаве. Влияние давления практически незаметно, тогда, как температура прямо пропорциональна величине $K_D(\text{ор}-\text{м})$ для кремния (он более охотно входит в состав кристалла). Для железа и магния влияние давления также практически незаметно, тогда, как температура с $K_D(\text{ор}-\text{м})$ для этих элементов связана обратно пропорциональной зависимостью (с увеличением температуры эти элементы менее охотно входят в решетку кристаллов ортопироксена). Численные значения $K_D(\text{ор}-\text{м})$ для железа могут быть как больше, так и меньше 1, тогда как для магния всегда > 1 .

6. Соотношение экспериментальных результатов, полученных в условиях атмосферного давления (150 т.) и повышенного давления (520 т.) для расплавов преимущественно основного состава позволяет предположить, что давление является благоприятным фактором при кристаллизации ортопироксена из расплава.

7.6. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с ортопироксеном

Были получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин:

I. эксперименты в условиях атмосферного давления (~150 т.) – содержание магния в расплаве (1 уравнение), величину температуры (1 уравнение), равновесные соотношения элементов в расплаве (1 уравнение);

II. в условиях повышенного давления (~500 т.) – содержание кремния в расплаве (1 уравнение), содержание алюминия в расплаве (1 уравнение), содержание магния в расплаве (3 уравнения), величину температуры (2 уравнения), величину давления (2 уравнения), равновесные соотношения элементов в расплаве (2 уравнения).

Расчет содержания **кремния** в расплаве. Уравнение, полученное по экспериментальным точкам (~520 т.) при повышенных давлениях (до 110 кб) имеет коэффициент корреляции

-0.83 и χ^2 1.28. Значение величины χ^2 указывает на нормальность распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99, но значение R -0.83 позволяет использовать это уравнение только как оценочное.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Полученное уравнение для условий повышенного давления имеет характеристики R -0.9 и χ^2 1.29, что указывает на соответствие на уровне вероятности 0.99 распределения среднеквадратичной ошибки нормальному закону распределения и позволяет использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **магния** в расплаве. По выборке в условиях атмосферного давления было получено одно уравнение, которое имеет характеристики R 0.95 и χ^2 3.12, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов. По выборке в условиях повышенного давления было получено 3 уравнения: одно для интервала 3–21 кб и два других для интервала 22–110 кб. Уравнение для интервала 3–21 кб имеет характеристики R 0.95 и χ^2 0.58, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов. Уравнения для интервала давлений 22–110 кб обладают характеристиками R 0.93 и 0.9; χ^2 0.54 и 0.4, соответственно. Эти характеристики указывают на соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения на уровне вероятности 0.99 и позволяют использовать оба уравнения для расчетов.

Расчет значений **температуры** равновесия. Для случая атмосферного давления было получено 1 уравнение с характеристиками R 0.95 и χ^2 2.05. Значение величины χ^2 позволяет на уровне вероятности 0.99 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и, соответственно, использовать это уравнение для расчетов. Для условий повышенного давления было получено 3 уравнения для интервалов давлений 3–21 кб, 22–110 кб и 0.1–80 кб с характеристиками R 0.91; 0.95 и 0.95; χ^2 0.77; 1.86 и 6.68, соответственно. Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.99 и ~0.9 соответствие распределений среднеквадратичной ошибки для этих уравнений нормальному закону распределения и использовать их для расчетов.

Расчеты величины **давления**. Было получено 2 формулы, первая из которых позволяет рассчитывать численные значения давлений в интервале 3–21 кб, вторая – в интервале

22–110 кб. Первая формула имеет характеристики R 0.75 и χ^2 4.04; вторая – R 0.92 и χ^2 4.11. Численные значения этих характеристик позволяют использовать эти уравнения только для оценок.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав расплава, равновесного с ортопироксеном. Для случая атмосферного давления получено 1 уравнение с характеристиками R 0.9; χ^2 3.87 и 0.95, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов. Для условий повышенного давления получено 2 уравнения с характеристиками R 0.9 и -0.98; χ^2 3.24 и 7.16, соответственно. Первое уравнение по своим число-

вым характеристикам может быть использовано для расчетов, второе может быть использовано только как оценочное.

Обсуждение результатов

Полученные нами уравнения, позволяющие по составу расплава, равновесного с ортопироксеном, рассчитать ряд параметров расплава (содержания алюминия, магния, величину температуры, давления, степень равновесности расплава) в основном пока аналогов не имеют. Исключением являются термометры и барометры, представленные в работах [26; 87; 98]. Результаты тестирования уравнений, позволяющих рассчитывать значения температуры при повышенных давлениях, характеризуются следующими величинами по уравнениям:

1. Ф. Альбарде: 522; N_1 521; R 0.89; сигма 67 °C; χ^2 5.48 (12) [26];
2. Т. Сугавара: N 522; N_1 503; R 0.95; сигма 39 °C; χ^2 3.2 (12) [98];
3. К. Путирка: модель 28a – N 522; N_1 517; R 0.95; сигма 46.8 °C; χ^2 7.79 (16); модель 28b – N 522; N_1 513; R 0.93; сигма 47.85 °C; χ^2 4.2 (16) [87].

Согласно этим результатам, для расчетов могут быть использованы только уравнение Т. Сугавары [98] и уравнение К. Путирки, модель 28b [87]. Результаты тестирования этих уравнений представлены на рис. III.1.1 gl–орх и рис. III.1.2 gl–орх.

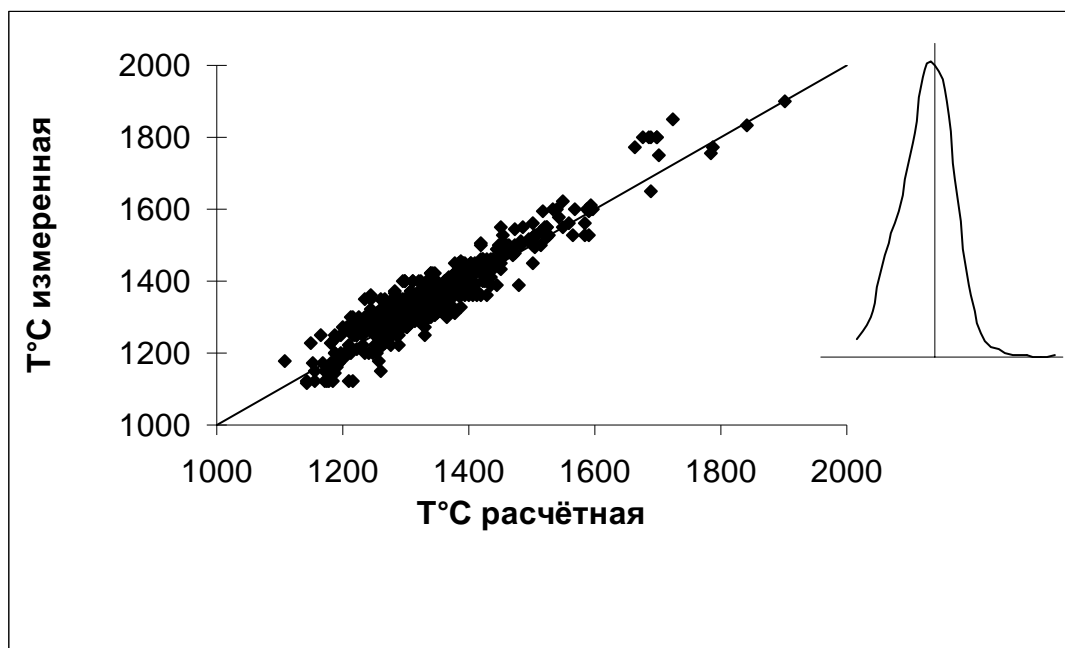


Рис. III.1.1 gl–орх. Соотношение рассчитанной [98] и измеренной температуры на выборке расплав–ортопироксен в интервале давлений до 110 кб (R 0.95; χ^2 3.2; сигма 39 °C).

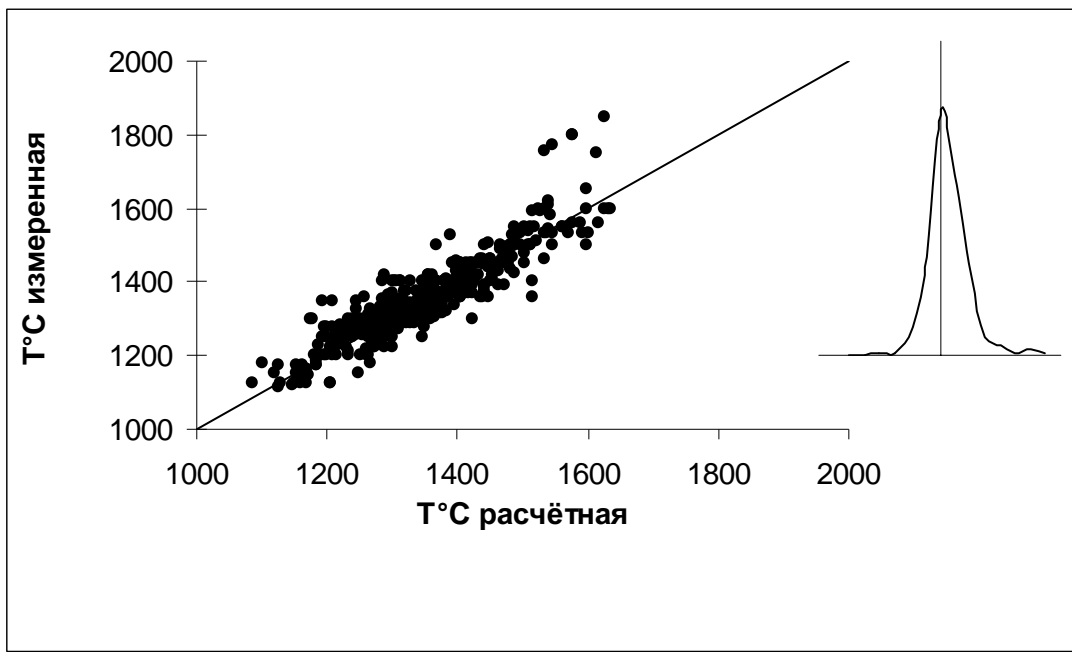


Рис. III.1.2 gl-орх. Соотношение рассчитанной (модель 28b) [87] и измеренной температуры на выборке расплав-ортопироксен в интервале давлений до 110 кб (R 0.93; χ^2 4.2; сигма 47.85 °C).

Результаты тестирования барометра Ф. Альбаредо [26] по выборке экспериментов при повышенном давлении системы расплав-ортопироксен дали результаты N 522; N₁ 511; R 0.86; сигма 5.4 кб; χ^2 58.7 (12).

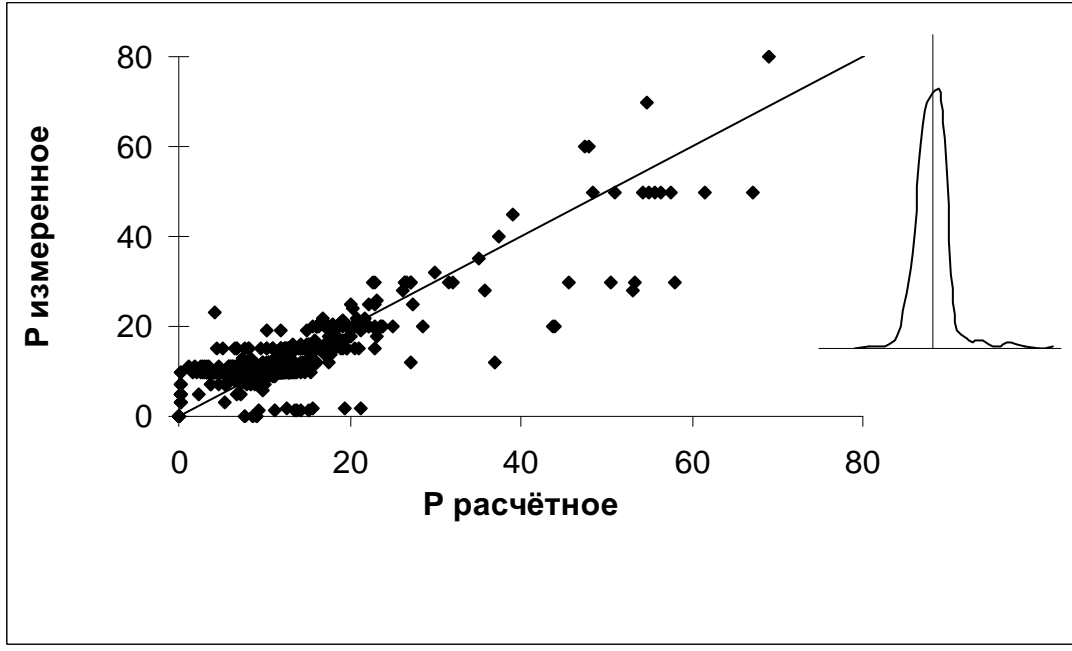


Рис. III.1.3 gl-орх. Соотношение рассчитанного [26] и измеренного давлений для выборки расплав-ортопироксен в интервале давлений до 80 кб (R 0.86; χ^2 58.7; сигма 5.4 кб).

Полученные нами уравнения для расчета давления выглядят более предпочтительными, но могут быть использованы только для оценок (см. выше).

Выводы

1. Получены уравнения, позволяющие по составу расплава, равновесного с кристаллами ортопироксена, рассчитывать следующие величины:
 - содержания в расплаве кремния и алюминия в условиях повышенного давления;
 - содержания магния как в условиях атмосферного давления, так и повышенного (110 кб.);
 - значения температуры как в условиях атмосферного давления, так и повышенного в интервалах 3–21 кб и 22–110 кб;
 - равновесные соотношения элементов в расплаве при атмосферном и повышенном давлении.
2. Расчеты величины давления по составу расплава могут носить только оценочный характер.
3. Тестирование ряда опубликованных уравнений для расчета величин температур и давлений имеют худшие статистические характеристики в сравнении с полученными нами.
4. Полученные уравнения для расчетов выше приводимых величин могут быть использованы для исследований составов расплавных включений. В купе с использованием уравнений, включающих в себя состав минерала-хозяина (ортопироксен), эти расчеты могут дать возможность судить о реальном составе расплавных включений.

7.7. Уравнения, полученные для системы расплав–клинопироксен

Были получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин:

I. эксперименты в условиях атмосферного давления (~530 т.) – концентрации Si в расплаве (2 уравнения), Ti (2 уравнения), Al (4 уравнения); Fe^{2+} (2 уравнения), Mn (1 уравнение), Mg (3 уравнения), Ca (2 уравнения), Na (1 уравнение), K (1 уравнение), Cr (1 уравнение), Fe^{2+}/Mg отношения (3 уравнения), температуры (3 уравнения), равновесного соотношения элементов внутри кристалла клинопироксена (7 уравнений);

II. эксперименты в условиях повышенного давления (~550 т.) – концентрации в расплаве Si (1 уравнение), Ti (1 уравнение), Al (1 уравнение), Fe^{2+} (1 уравнение), Mn (1 уравнение), Mg (2 уравнения), Ca (1 уравнение), Na (2 уравнения), Cr (1 уравнение), Fe^{2+}/Mg отношения (2 уравнения), температуры (5 уравнений), давления (5 уравнений), равновесного соотношения элементов внутри кристалла клинопироксена (2 уравнения).

Расчет содержания **кремния** в расплаве. Два уравнения, полученные по экспериментальным данным при атмосферном давлении, имеют коэффициенты корреляции (-0.91) и (-0.89), значения χ^2 3.3 и 3.53. Это позволяет полагать соответствие среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 нормальному распределению и использовать оба уравнения для расчетов. Уравнение, полученное по экспериментальным точкам при повышенных давлениях (до 75 кб), имеет коэффициент корреляции (-0.89) и значение χ^2 1.44. Величина χ^2 указывает на нормальность распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 и возможность использования этого уравнения для расчетов содержания кремния в расплаве.

$K_D(срх-m)$ для кремния в условиях атмосферного давления лежит в интервале значений 0.7–1.2 и пропорционален содержаниям в расплаве кремния (R -0.85), магния (0.5) и кальция (0.79), состав же самого клинопироксена на величину K_D практически не влияет. В условиях повышенного давления диапазон значений $K_D(срх-m)$ лежит в интервале 0.76–1.3 и зависит от содержаний в расплаве кремния (-0.92), алюминия (-0.52), магния (0.74); оказывает влияние и содержание в клинопироксене магния (0.65).

Расчет содержания **титана** в расплаве. Уравнения, полученные по экспериментальным данным при атмосферном давлении, имеют коэффициент корреляции 0.83 и 0.85, значения χ^2 2.6 и 3.28, что позволяет полагать соответствие среднеквадратичной ошибки, на уровне вероятности 0.95 нормальному распределению. Однако значения R не позволяют использование этих уравнений для расчетов содержаний титана в расплаве. Уравнение, полученное по экспериментальным точкам при повышенном давлении, имеет коэффициент корреляции 0.91 и значение χ^2 8.64, что не позволяет говорить о соответствии нормальному закону распределения и уравнение можно использовать только как оценочное. $K_D(\text{срх}-m)$ для титана в условиях атмосферного давления лежит в интервале значений 0.1–4.6, слабо зависит от составов расплава, но пропорционально содержаниям кремния (-0.73) и титана (0.68) в клинопироксене. В условиях повышенного давления интервал значений K_D сходен (0.1–2.6) и слабо чувствителен к составам расплава и клинопироксена.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Четыре уравнения, полученные по массиву точек при атмосферном давлении, имеют R -0.89; -0.86; 0.89; 0.89 и значения χ^2 2.69; 5.16; 1.08 и 5.45, что указывает на соответствие нормальному закону распределения на уровне вероятности 0.99–0.95 и позволяет использовать их для расчетов. Уравнение, полученное по массиву при повышенных давлениях, имеет значение R -0.87 и χ^2 5.68, что позволяет полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 нормальному распределению и использовать это уравнение для расчетов. Для алюминия $K_D(\text{срх}-m)$ при атмосферном давлении меньше единицы (0.05–0.88), зависит от состава расплава (кремний -0.6; алюминий 0.5), и состава клинопироксена (кремний -0.88; алюминий 0.96). В экспериментах при повышенных давлениях его величина лежит в интервале 0.1–2, зависит же в основном от состава клинопироксена (кремний -0.5; алюминий 0.81), магния (0.76), а также от давления (0.71).

Расчет содержания **железа Fe^{2+}** в расплаве. Для экспериментов при атмосферном давлении рассчитывалось содержание Fe^{2+} в расплаве и сравнивалось с вычисленным ранее по А.А. Борисову и А.И. Шапкину [8]. Для экспериментов при повышенном давлении оценивалось общее содержание железа, полагая, что все оно находится в **двухвалентной форме**. Для условий атмосферного давления было получено 2 уравнения, имеющие характеристики R 0.9; χ^2 1.59 и 4.27, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 и 0.9 соответствие распределений среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов. В условиях повышенного давления было получено 1 уравнение с характеристиками R -0.9 и χ^2 1.09, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному распределению и использовать это уравнение для расчетов. Величина $K_D(\text{срх}-m)$ железа Fe^{2+} для случая атмосферного давления лежит в интервале значений 0.1–4.2, пропорциональна содержаниям в расплаве Si (0.52); Mg (-0.6) и Ca (-0.68). Отчетливого влияния какого-либо из элементов, входящих в кристалл клинопироксена, не выявлено. Для случая повышенного давления величина $K_D(\text{срх}-m)$ железа принимает значения 0.3–4.5, пропорциональна содержаниям Si (0.57); Mg (-0.55); Ca (-0.52) в расплаве, а также пропорциональна содержанию железа в клинопироксене (0.52).

Расчет содержания **марганца** в расплаве. Получено 1 уравнение для условий атмосферного давления, характеризуемое R 0.8 и χ^2 3.25, что позволяет его использовать только как оценочное. Величина $K_D(\text{срх}-m)$ марганца для этих условий лежит в интервале значений 0.1–8.8 и пропорционально только содержанию марганца в кристалле клинопироксена (0.68). В условиях повышенного давления было получено 1 уравнение с характеристиками R 0.84 и χ^2 3.08, что позволяет его использовать только как оценочное. Величина $K_D(\text{срх}-m)$ для марганца в условиях повышенного давления принимает значения в интервале 0.1–4.6 и, как в случае атмосферного давления, пропорционально только содержанию марганца в кристалле клинопироксена (0.61).

Расчет содержания **магния** в расплаве. Три уравнения, полученные по экспериментальным данным при атмосферном давлении, обладают характеристиками R 0.95; 0.91; 0.93 и, соответственно, χ^2 4.05; 2.83; 1.86, что позволяет предположить на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному закону распределения и использовать эти уравнения для расчетов. Два уравнения, полученные по экспериментам при повышенном давлении, также характеризуются высокими значениями R 0.92; 0.9 и, соответственно, χ^2 2.87; 2.06, что позволяет предположить на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов. Величина $K_D(\text{срх}-m)$ для магния при атмосферном давлении лежит в интервале 1.3–18.4. Для экспериментов в условиях повышенного давления эта величина принимает значения в диапазоне 0.9–14.8. При атмосферном давлении K_D зависит от содержаний в расплаве кремния (0.68), магния (-0.73), кальция (-0.69) и температуры (-0.63). В условиях повышенного давления величина K_D пропорциональна содержаниям кремния (0.64), магния (-0.7) и кальция (-0.51) в расплаве.

Расчет содержания **кальция** в расплаве. Для условий атмосферного давления было получено 2 уравнения, обладающие характеристиками R -0.91; -0.94 и, соответственно χ^2 3.98; 4.51, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99–0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения. Эти характеристики позволяют использовать полученные уравнения для расчетов. В условиях повышенного давления было получено одно уравнение, обладающее характеристиками R 0.93; χ^2 5.54, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов. Величина $K_D(\text{срх}-m)$ для кальция в условиях атмосферного давления лежит в интервале 0.7–9.9 и зависит от содержаний в расплаве кремния (0.5), магния (-0.62), кальция (-0.73), натрия (0.52), калия (0.65), а также пропорциональна содержанию натрия в клинопироксене (0.56). Величина $K_D(\text{срх}-m)$ для кальция в условиях повышенного давления лежит в интервале 0.6–5.7 и зависима от содержаний в расплаве кремния (0.56), магния (-0.6), кальция (-0.65), натрия (0.56) и температуры (-0.56), а также от содержаний в составе клинопироксена магния (-0.59) и кальция (0.61).

Расчет содержания **натрия** в расплаве. По экспериментальным данным в условиях атмосферного давления было получено одно уравнение с характеристиками R 0.81; χ^2 4.9, которые позволяют использовать его только как оценочное. В условиях повышенного давления было получено 2 уравнения, характеризуемые значениями величин R -0.86; -0.88 и, соответственно χ^2 3.67 и 1.67, что позволяет на уровне вероятности 0.99 полагать соответствие распределений среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов содержаний натрия в расплаве, оценивая точность расчетов давления. Величина $K_D(\text{срх}-m)$ для натрия в условиях атмосферного давления лежит в интервале 0.1–0.4 и пропорциональна содержанию натрия в клинопироксене (0.52). В условиях повышенного давления величина $K_D(\text{срх}-m)$ для натрия принимает значения в интервале 0.1–1.6 и пропорциональна величинам давления (0.81), температуры (0.52), а также содержаниям алюминия (0.53) и натрия (0.85) в клинопироксене.

Расчет содержания **калия** в расплаве. Было получено 1 уравнение по экспериментальным точкам в условиях атмосферного давления с характеристиками R 0.91 и χ^2 0.79, что позволяет использовать его для расчетов. Величина $K_D(\text{срх}-m)$ меньше 0.1 и не зависит от состава расплава.

Расчет содержания **хрома** в расплаве. Для условий атмосферного давления было получено 1 уравнение, обладающее характеристиками R 0.78 и χ^2 8.87, что позволяет использовать его только как оценочное. Для условий повышенного давления было получено также 1 уравнение с характеристиками R 0.86 и χ^2 3.24, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать его для расчетов. Величина $K_D(\text{срх}-m)$ для хрома как при атмосферном давлении,

так и в случае повышенного, лежит соответственно в интервалах значений 0.п–93 и 1–41, слабо зависит от составов расплава, кристаллов клинопироксена и Р–Т условий.

Расчет значений **железо-магниевого отношения** в расплаве. Для случая атмосферного давления было получено 3 уравнения, имеющие характеристики R 0.92; 0.9; 0.87 и, соответственно, χ^2 12.7; 12.9 и 7.84. Высокие численные значения χ^2 позволяют использовать эти уравнения только как оценочные. В условиях повышенного давления было получено 2 уравнения с характеристиками R 0.94; χ^2 11.76 и 12.78. Высокие значения χ^2 не позволяют использовать эти уравнения для расчетов.

Величина K_D Fe–Mg клинопироксен–расплав для случая атмосферного давления принимает значения в интервале 0.15–1.6. Для экспериментов в условиях повышенного давления – 0.12–0.89, среднее значение этой величины – 0.28. Распределение численных значений этой величины в условиях повышенного давления не подчиняется закону нормального распределения, описывается значением χ^2 17.7 и представлено на рис. III.1.1 срх–gl.

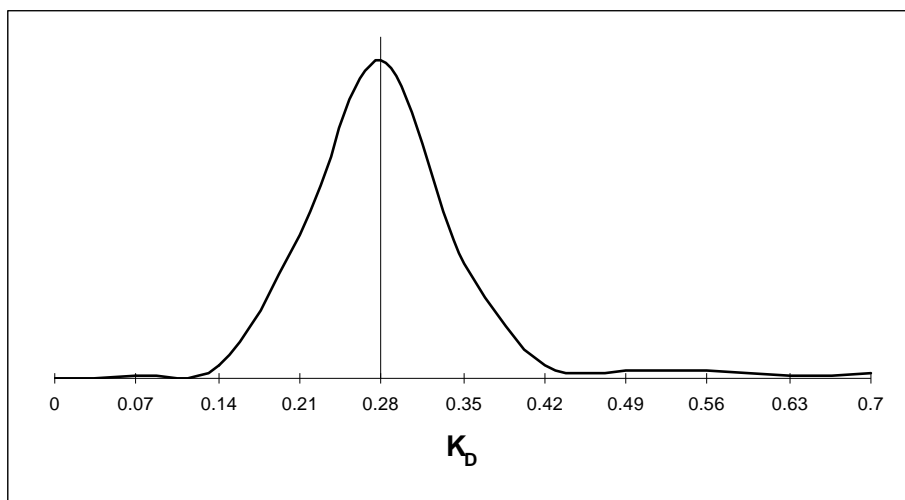


Рис. III.1.1 срх–gl. Огибающая распределений значений величины K_D Fe–Mg клинопироксен–расплав в интервале давлений до 110 кб. Минимальный $K_D = 0.12$, максимальный $K_D = 0.89$, средний $K_D = 0.28$.

Численное значение этой величины слабо чувствительно к составам расплава, клинопироксена, а также к температуре и давлению равновесного распределения (значения R меньше 0.5).

Расчеты значений **температуры** равновесия. Для случая атмосферного давления было получено 3 уравнения с характеристиками R 0.85; 0.91; 0.9 и χ^2 1.27; 1.08 и 5.63, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 и 0.95 соответствие нормальному распределению среднеквадратичной ошибки и использовать эти уравнения для расчетов. Кроме того, сходство или различие вычисленных значений температуры с учетом среднеквадратичной ошибки позволяет оценить соответствие содержания ряда элементов в расплаве равновесному. По массиву экспериментальных точек в условиях повышенных значений было получено 5 уравнений с характеристиками R -0.89; -0.91; 0.92; -0.9; -0.88 и χ^2 1.32; 1.5; 2.55; 3.73 и 2.21, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному распределению. Кроме того, различные варианты учета влияния элементов в расплаве в этих уравнениях позволяют оценить равновесность состава этого расплава, используемого для расчетов.

Расчеты величины **давления**. Было получено 5 уравнений, позволяющих рассчитывать величину давления до значений 7.5 ГПа. Уравнения имеют статистические характеристики R -0.85; -0.91; 0.93; 0.9; 0.9 и, соответственно, χ^2 2.97; 2.7; 0.85; 0.85; 4.27; 2.64; 1.89. Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.99–0.95, что распределение среднеквадратичной ошибки для полученных зависимостей соответствует закону нормального распределения, уравнения пригодны для расчетов давления и позволяют судить о равновесности расплава и правдоподобию оценки равновесной температуры.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав клинопироксена. Для условий атмосферного давления было получено 7 уравнений, характеризующихся значениями

R -0.95; -0.95; -0.95; -0.95; -0.95; -0.94 и, соответственно, χ^2 3.61; 1.51; 3.93; 1.73; 0.65; 1.92; 4.07, что позволяет на уровне вероятности 0.99 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному закону распределения и использовать эти уравнения для расчетов. Для условий повышенного давления получено 2 уравнения с характеристиками R 0.95; -0.92 и, соответственно, χ^2 2.64; 1.89. Значения этих величин позволяют использовать эти уравнения для расчетов.

Обсуждение результатов

Высококальциевые разности клинопироксенов (авгиты), равновесные с расплавами основного-ультраосновного составов, содержат в себе практически все порообразующие элементы, концентрации которых меняются в широких пределах, а их составы чувствительны к изменениям температуры и давления. Это позволило создать на их основе ряд геотермометров и барометров [2; 76; 77; 78; 87; 73; 83; 82; 86; 37 и др.]. Эти термометры и барометры были протестированы на выборке экспериментальных результатов при повышенном давлении (до ~80 кб). Результаты тестирования геотермометров выглядят следующим образом:

К. Путирка: 1. модель T₁ – N 552; N₁ 502; R 0.87; сигма 49.4 °C; χ^2 2.04 (16); модель T₂ – N 552; N₁ 501; R 0.91; сигма 42.8 °C; χ^2 1.38 (16) [86];

2. N 552; N1505; R 0.89; сигма 48.5 °C; χ^2 1.37(16) [83];

К. Путирка (модернизированный термометр приводится по [Nimis and Taylor, 2000]) N 552; N₁ 537; R 0.66; сигма 90.13 °C; χ^2 12.19 (16); модель 32d – N 552; N₁ 544; R 0.87; сигма 51.71 °C; χ^2 4.45 (16); модель 33 – N 552; N₁ 477; R 0.91; сигма 43.4 °C; χ^2 2.24 (12); модель 34 – N 552; N₁ 510; R 0.49; сигма 73.6 °C; χ^2 4.6 (16) [87]. Приведенные результаты тестирования геотермометров показывают, что часть их не пригодна для расчетов (низкие значения R и высокие χ^2), они могут быть использованы только как оценочные. В целом же все эти уравнения имеют худшие характеристики в сравнении с нашими результатами. Для визуального сравнения ниже представлены графики наилучшей зависимости, полученной нами (**формула PLAVTc**) и наилучшая из тестированных нами формул К. Путирки: модель T₂ [86] – рис. III.1.1 срх–gl.

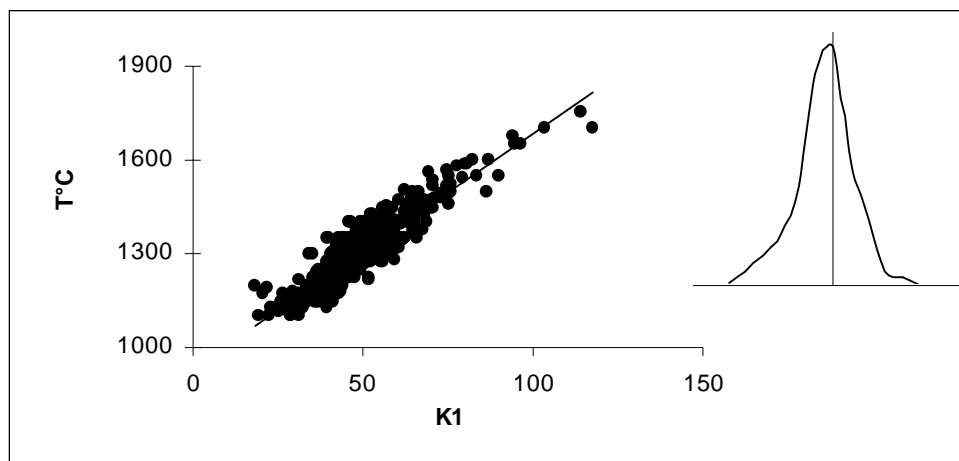


Рис. II.17 срх (**формула PLAVTc**). Зависимость значения **T** от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки [R 0.92; N 552; N₁ 544; сигма 40.1 °C; χ^2 2.55 (16)]. Диапазон давлений 1.5–75 кб.

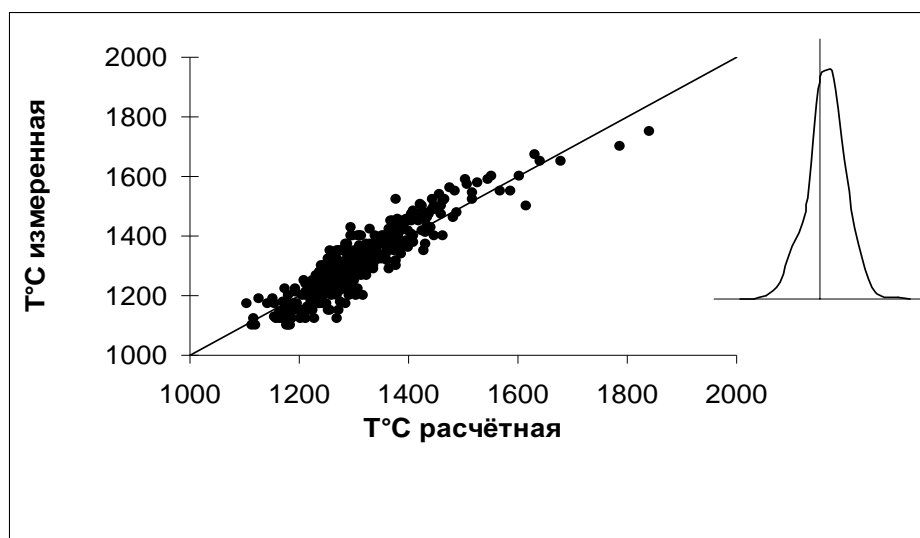


Рис. III.1.2 срх–gl. Зависимость расчетной и измеренной температуры по формуле из работы [86] модель T₂ [N 552; N₁ 501; R 0.91; сигма 42.8 °C; χ^2 1.38 (16)].

Результаты тестирования геобарометров представлены следующими данными:

П. Нимис: N 552; N₁ 536; R 0.7; сигма 5.08; χ^2 15.41 (16) [76];

П. Нимис, П. Улмер: N 552; N₁ 541; R 0.67; сигма 5.58; χ^2 16.21 (16) [78];

К. Путирка и др.: N 552; N₁ 495; R 0.88; сигма 3.64; χ^2 8.49(12) [86];

К. Путирка и др.: N 552; N₁ 494; R 0.83; сигма 4.2; χ^2 28.54 (12) [83];

К. Путирка: модель 30 – N 552; N₁ 402; R 0.89; сигма 3.44; χ^2 7.98 (12); модель 31 – N 552; N₁ 491; R 0.94; сигма 2.46; χ^2 4.64 (12); модель 32a (модернизированная формула П. Нимиса [76]) – N 552; N₁ 536; R 0.7; сигма 2.78; χ^2 5 (16); модель 32b (модернизированная формула П. Нимиса [76]) – N 552; N₁ 497; R 0.92; сигма 3.07; χ^2 7.27 (12); модель 32c (модернизированная формула [86] и ряда других авторов) – N 552; N₁ 537; R 0.93; сигма 2.91; χ^2 2.07 (16) [87].

Среди протестированных уравнений только модель 32a и модель 32c пригодны для расчетов, т. к. распределения среднеквадратичной ошибки для этих уравнений соответствует закону нормального распределения на уровне вероятности 0.95 и 0.99. Ниже представлен ряд графиков: наилучший из полученных нами – (**формула PLAVPb**) и результаты тестирования уравнений из работ П. Нимиса, П. Улмера [78] и К. Путирки (модель 32a и модель 32c) [87].

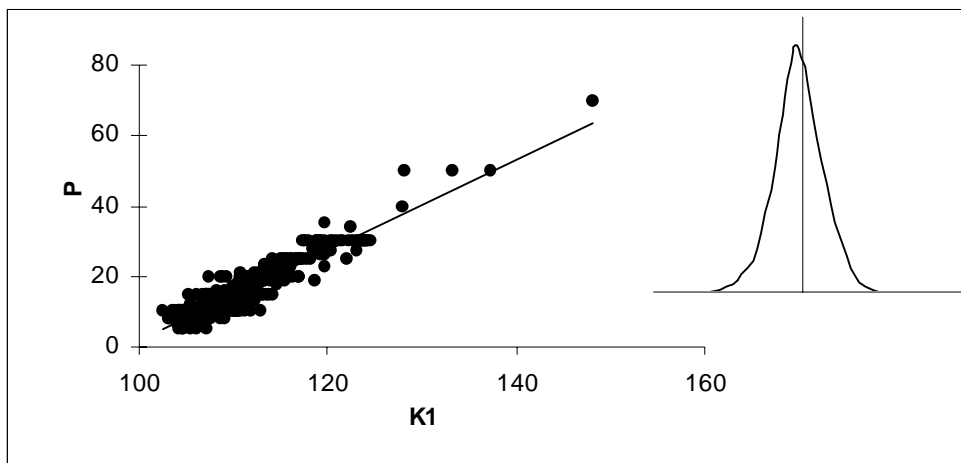


Рис. II.22 срх (формула $PLAVPb$). Зависимость величины P от состава авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки [N 552; N_1 527; R 0.93; сигма 2.6 кб; χ^2 0.85 (16)].

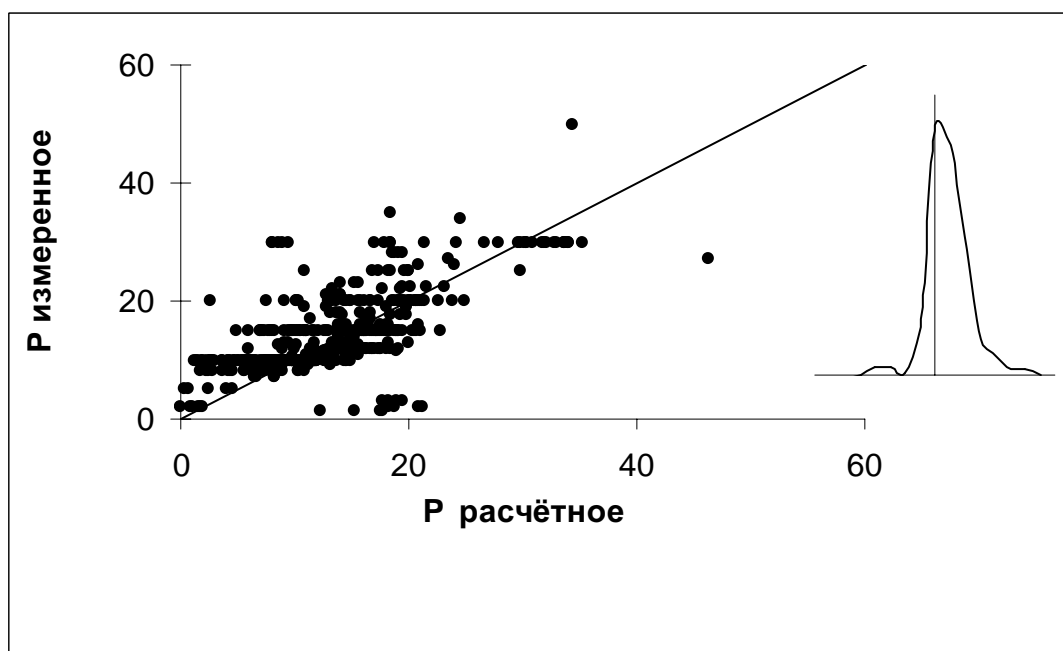


Рис. III.1.3 срх–gl. Зависимость расчетного и измеренного давлений по формуле из работы П. Нимиса, П. Улмера – N 552, N_1 541, R 0.67, сигма 5.58, χ^2 16.21 (16) [78].

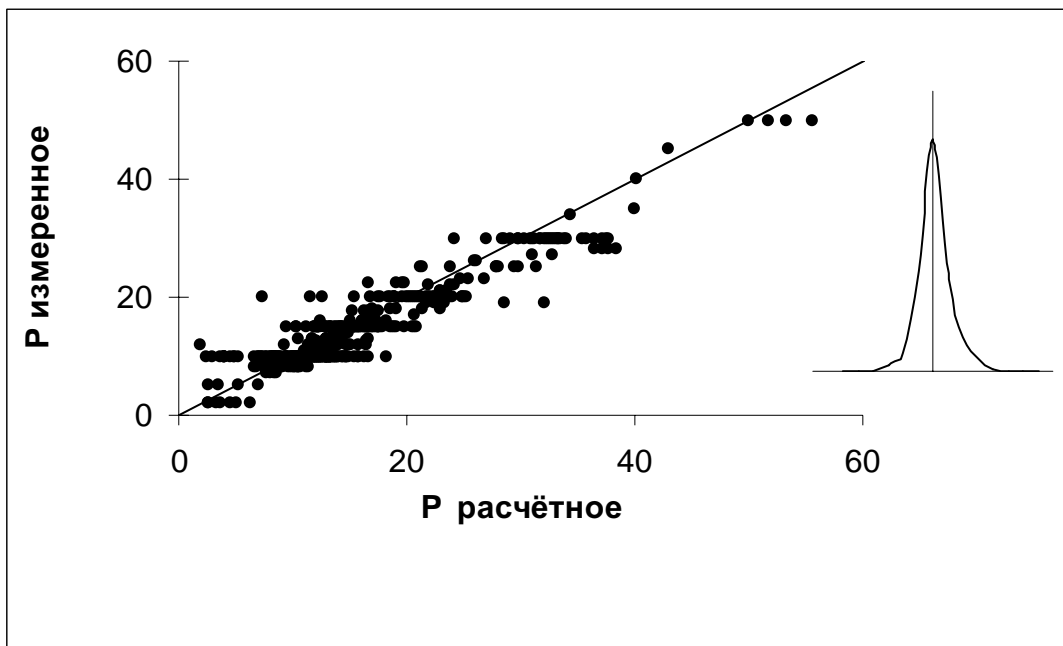


Рис. III.4 сrx–gl. Зависимость расчетного и измеренного давлений по формуле из работы К. Путирки: модель32a – N 552, N₁ 535, R 0.95, сигма 2.78, χ^2 5 (16) [87].

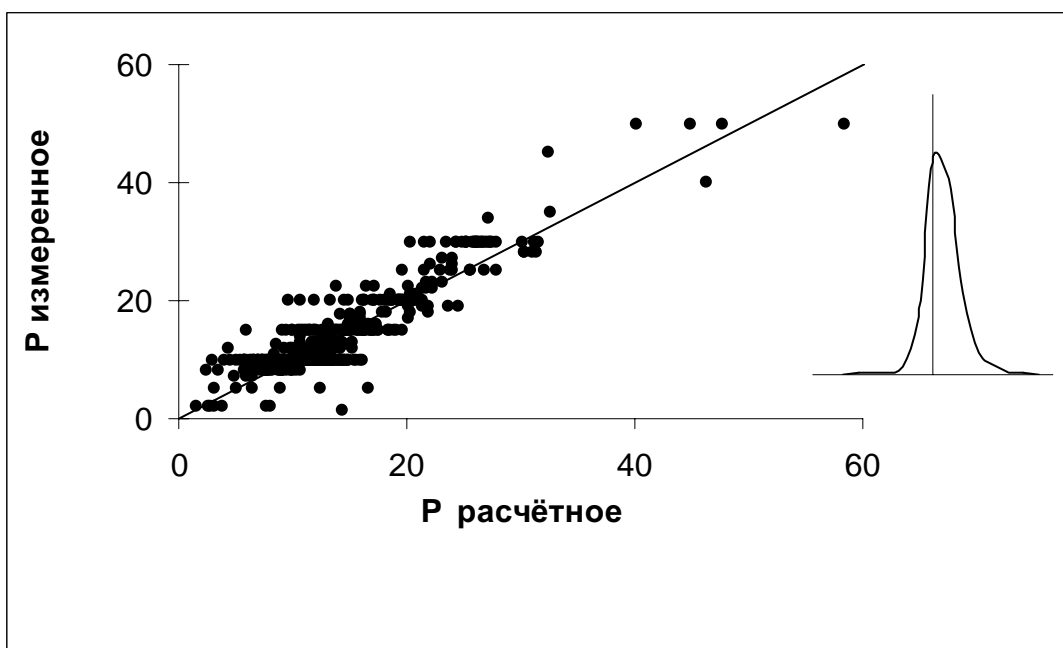


Рис. III.5 сrx–gl. Зависимость расчетного и измеренного давлений по формуле из работы К. Путирки: модель32c – N 552, N₁ 537, R 0.93, сигма 2.91, χ^2 2.07 (16) [87].

Существование зависимостей величины $K_D\text{Fe-Mg}$ клинопироксен–расплав от большого числа величин, включающих содержания практически всех элементов в расплаве, состава самого клинопироксена и P–T условий выявлено Дж. Бедардом [37]. Но все эти связи имеют значения коэффициента корреляции меньше 0.5, что совпадает с полученными нами результатами. Исключение, судя по данным Дж. Бедарда [37], составляет связь с температурой (R 0.58), полученная по 2937 экспериментам. Однако столь большой массив данных, возможно, свидетельствует о разнородности по качеству используемых экспериментальных данных, что может исказить результат.

Клинопироксен является породообразующим минералом в магматических породах основного-ультраосновного состава и качество расчетов составов расплавов, равновесных с ним, очень актуально. Для демонстрации соответствия расчетных и модальных содержаний были выбраны формулы для расчетов содержаний железа (PLAV5) и магния (PLAV7b) при давлениях в интервале 1.5–75 кб. На рис. III.6 srx–gl представлены массивы точек расчетных и модальных содержаний железа и магния в расплаве.



Рис. III.6 srx–gl. Поля распределения расчетных и модальных содержаний железа и магния в расплаве, равновесном с клинопироксеном при давлениях 1.5–75 кб.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитать численные значения следующих величин в равновесной системе расплав–клинопироксен:

содержание **кремния** в расплаве по 2 уравнениям при атмосферном давлении и по 1 уравнению при повышенных давлениях;

содержание **алюминия** по 4 уравнениям в условиях атмосферного давления и по 1 уравнению в условиях повышенного давления;

содержание **железа** по 2 уравнениям при атмосферном давлении и одному в условиях повышенного давления;

содержание **магния** по 3 уравнениям в условиях атмосферного давления и по 2 уравнениям в условиях повышенного давления;

содержание **кальция** по 2 уравнениям при атмосферном давлении и по 1 уравнению в условиях повышенного давления;

содержание **натрия** по 2 уравнениям в условиях повышенного давления;

содержание **хрома** по одному уравнению в условиях повышенного давления;

значение равновесной **температуры** по 3 уравнениям при атмосферном давлении и по 5 уравнениям в условиях повышенного давления;

значение **давления** по 5 уравнениям в интервале до 75 кб;

семь уравнений, позволяющих оценивать **равновесность** состава кристалла клинопироксена при атмосферном давлении и 2 уравнения для оценки **равновесности** состава кристалла клинопироксена при повышенном давлении.

2. Ряд полученных уравнений характеризуются невысокими значениями коэффициента корреляции и χ^2 , отклоняющими предположение о нормальности распределения среднеквадратичной ошибки. Эти уравнения могут быть использованы для получения **оценочных** значений. К ним относятся следующие уравнения: расчет содержания **титана** при атмосферном и повышенном давлении; по одному уравнению в условиях атмосферного и повышенного давлений для расчета содержаний **марганца** в расплаве; уравнение для расчета содержания **натрия** при атмосферном давлении; уравнение для расчета содержания **хрома** при атмосферном давлении в расплаве; три уравнения для расчета величины **железо-магниевого отношения** в расплаве при атмосферном давлении и два уравнения для его расчета в условиях повышенного давления.

3. При кристаллизации клинопироксена как в условиях атмосферного давления, так и при повышенном давлении, происходит удаление магния из расплава и обеднение им.

4. Обсуждены особенности величины $K_D(\text{срх}-\text{т})$ для породообразующих элементов, входящих в состав кристаллов клинопироксена, а также влияние на его величину состава расплава, температуры, давления и состава самого кристалла клинопироксена. Для

$K_D(\text{срх}-\text{т})$ кремния, железа, магния и кальция общим является обратно пропорциональная зависимость от их содержания в расплаве. Величина K_D для алюминия и натрия чувствительна к величине давления. Численные значения $K_D(\text{срх}-\text{т})$ для железа может быть как больше, так и меньше 1, тогда, как для магния практически всегда > 1 .

5. Протестированы наиболее используемые уравнения, позволяющие рассчитывать величины температуры и давления. Все они показали худшие характеристики относительно наших результатов и для расчетов могут быть использованы только некоторые из них. Все полученные нами уравнения могут быть использованы для расчетов температуры и давления, что позволяет повысить точность расчетов и выявить неравновесность как составов расплавов, так и самих кристаллов клинопироксена.

7.8. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с клинопироксеном

Были получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин:

1. в условиях атмосферного давления (~530 т.): содержание магния в расплаве (1 уравнение), температуры (1 уравнение), равновесные соотношения элементов в расплаве (2 уравнения);

2. эксперименты в условиях повышенного давления (~550 т.): содержание кремния в расплаве (1 уравнение), содержание алюминия в расплаве (1 уравнение), содержание магния в расплаве (2 уравнения), температуры (2 уравнения), давления (2 уравнения), равновесные соотношения элементов в расплаве (1 уравнение).

Расчет содержания **кремния** в расплаве. Уравнение, полученное по экспериментальным данным в условиях повышенного давления, имеет коэффициент корреляции $R -0.92$ и значение $\chi^2 2.59$, что позволяет полагать соответствие среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 нормальному распределению и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Полученное уравнение для условий повышенного давления имеет характеристики $R -0.85$ и $\chi^2 5.43$, что указывает на соответствие на уровне вероятности 0.95 распределения среднеквадратичной ошибки нормальному закону распределения. Однако низкое значение коэффициента корреляции позволяет использовать это уравнение только как оценочное.

Расчет содержания **магния** в расплаве. По выборке в условиях атмосферного давления было получено одно уравнение, которое имеет характеристики R 0.93 и χ^2 1.61, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов. По выборке в условиях повышенного давления было получено 2 уравнения для интервалов 1.5–70 кб и 22–75 кб, обладающие характеристиками R -0.94; R -0.96 и, соответственно, χ^2 1.3 и 2.3.

Характеристики первого уравнения позволяют использовать его для расчетов. Величина χ^2 для второго уравнения свидетельствует о неподчинении закону нормального распределения величины среднеквадратичной ошибки и это уравнение можно использовать только как оценочное.

Расчет значений **температуры** равновесия. Для случая атмосферного давления было получено 1 уравнение с характеристиками R 0.92, и χ^2 2.1. Значение

величины χ^2 позволяет на уровне вероятности 0.99 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и, соответственно, использовать это уравнение для расчетов. Для условий повышенного давления было получено 3 уравнения с характеристиками R 0.9; 0.89; 0.91 и, соответственно, χ^2 1.78, 2.38 и 3.39. Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределений среднеквадратичной ошибки для этих уравнений нормальному закону распределения и использование их для расчетов.

Расчеты величины **давления**. Было получено 2 формулы, первая из которых позволяет рассчитывать численные значения давлений в интервале 5–50 кб, вторая – в интервале

22–70 кб. Первая формула имеет характеристики R 0.9 и χ^2 1.46; вторая – R 0.85 и χ^2 2.93. Первая формула по своим характеристикам может быть использована для расчетов, т. к. величина χ^2 позволяет на уровне вероятности 0.99 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному распределению. Вторая может быть использована только для приблизительных оценок величины давления.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав расплава, равновесного с клинопироксеном. Для случая атмосферного давления получено 2 уравнения с характеристиками R -0.96; R -0.93 и, соответственно, χ^2 3.87\$ 4.89.

Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.99 и 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов. Для условий повышенного давления получено 1 уравнение с характеристиками R -0.92 и χ^2 0.97, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Обсуждение результатов

Полученные нами уравнения, позволяющие по составу расплава, равновесного с клинопироксеном (авгит), рассчитать содержания ряда элементов в расплаве, а также вычислить величину температуры и давления, в настоящее время аналогов не имеют. Исключение составляет геотермометр, аналоги для подобных расчетов опубликованы. В работе Т. Сугувары [98] представлено уравнение (выборка из 459 т.), позволяющее по составу расплава, равновесного с клинопироксеном (авгит), вычислить равновесную температуру. Это уравнение было протестировано на сформированной нами выборке (552 т.). Результат получился следующий – R 0.91; N 552; N_1 541; сигма 43 °C; χ^2 6.89 (12). Значение χ^2 свидетельствует, что распределение среднеквадратичной ошибки не соответствует нормальному закону распределения, и это уравнение может быть использовано только для оценок температуры. Зависимость расчетной, по формуле из работы [98], и измеренной в экспериментах температурой представлена на рис. III.1 gl–срх. Полученные нами уравнения для расчетов температуры по-

зволяют это делать с помощью всех трех уравнений, т. к. распределения среднеквадратичной ошибки для этих уравнений соответствует закону нормального распределения, а среднеквадратичная ошибка в одном из них – 41.1 °С.

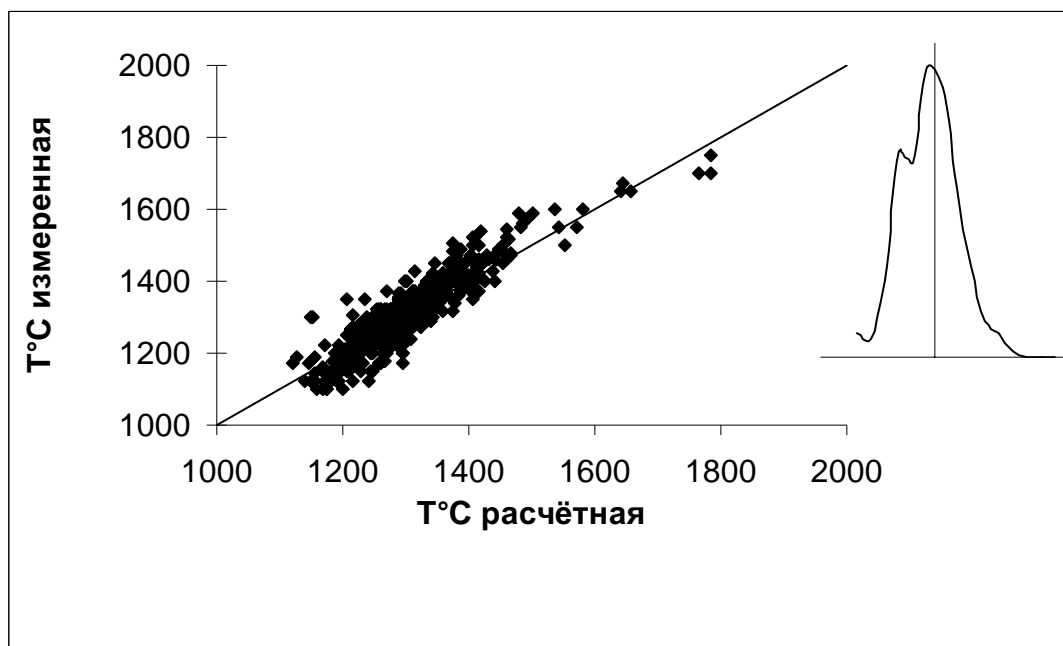


Рис. III.1.1 gl–срх. Зависимость расчетной по формуле из работы [98] и измеренной температуры и распределение среднеквадратичной ошибки.

Выводы

1. Получены уравнения, позволяющие по составу расплава, равновесного с кристаллами клинопироксена, рассчитывать следующие величины:

содержания в расплаве кремния в условиях повышенного давления;

содержания магния, как в условиях атмосферного давления, так и повышенного (70 кб); значения температуры, как в условиях атмосферного, так и повышенного давлений; величину давления до 50 кб;

равновесные соотношения элементов в расплаве при атмосферном и повышенном давлении.

2. По ряду уравнений (расчет содержаний алюминия в условиях повышенного давления; магния – в интервале давлений 22–75 кб; давления в интервале 22–70 кб) расчеты могут носить только оценочный характер.

3. Практически все полученные нами уравнения пока не имеют аналогов. Исключением является геотермометр [98]. Тестирование показало, что его статистические характеристики уступают аналогичным характеристикам наших уравнений.

4. Полученные уравнения для расчетов приводимых выше величин могут быть использованы для исследований составов расплавных включений. В купе с использованием уравнений, включающих в себя состав минерала–хозяина (клинопироксен), эти расчеты могут дать возможность судить о реальном составе расплавных включений.

7.9. Уравнения, полученные для системы расплав–плагноклаз

Были получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин:

I. эксперименты в условиях атмосферного давления (~770 т.) – концентрации в расплаве Si (2 уравнения), Al (2 уравнения), Ca (2 уравнения), Na (1 уравнение), K (1 уравнение), K/Na отношения (1 уравнение), температуры (2 уравнения);

II. эксперименты в условиях повышенного давления (~260 т.) – концентрации в расплаве Si (1 уравнение), Al (1 уравнение), Ca (1 уравнение), Na (1 уравнение), K (1 уравнение), K/Na отношения (1 уравнение), температуры (2 уравнения), давления (1 уравнение).

Расчет содержания **кремния** в расплаве. Два уравнения, полученные по экспериментальным данным при атмосферном давлении, имеют коэффициенты корреляции 0.88 и 0.92, значения χ^2 8 и 4.57. Первое уравнение из-за высокого значения χ^2 , указывающего на несоответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения, может быть использовано только как оценочное. Для второго уравнения значение χ^2 позволяет полагать соответствие среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 нормальному распределению и использовать это уравнение для расчетов. Уравнение, полученное по экспериментальным точкам при повышенных давлениях (до 20 кб), имеет коэффициент корреляции 0.97 и значение χ^2 1.72, что указывает на нормальность распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 и возможность использования этого уравнения для расчетов содержания кремния в расплаве.

$K_D(pI-m)$ для кремния в условиях атмосферного давления лежит в интервале значений 0.7–1.16 и пропорционален содержаниям в расплаве кремния (R -0.79), титана (0.42) и кальция (0.41), состав же самого плагноклаза на величину K_D практически не влияет. В условиях повышенного давления диапазон значений $K_D(pI-m)$ лежит в интервале 0.7–1.2, зависит от содержаний в расплаве кремния (-0.91), титана (0.59), железа (0.82) и магния (0.62); оказывает влияние на K_D и равновесная температура (0.68).

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Два уравнения, полученные по массиву точек при атмосферном давлении, имеют R 0.91; 0.85 и значения χ^2 4.56; 3.78, что указывает на соответствие нормальному закону распределения на уровне вероятности 0.95–0.99, что позволяет использовать их для расчетов. Уравнение, полученное по массиву при повышенных давлениях, имеют значения R 0.85 и χ^2 2.18, что позволяет полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 нормальному распределению и использовать это уравнение с некоторой долей осторожности (R 0.85) для расчетов.

$K_D(pI-m)$ для алюминия при атмосферном давлении лежит в интервале 1.3–3.3, зависит от состава расплава: алюминий (-0.79), железо (0.82), кальций (0.55), натрий (0.62). В экспериментах при повышенных давлениях его величина лежит в интервале 1.1–2.5, зависима от содержания алюминия (-0.78) в расплаве и от давления (-0.35).

Величина $K_D(pI-m)$ для железа Fe^{2+} при атмосферном давлении пропорциональна содержаниям железа в расплаве (-0.46) и его содержанию в кристалле плагноклаза (0.65). Для случая повышенного давления величина $K_D(pI-m)$ для железа пропорциональна содержаниям Si (0.75), Fe (-0.59), Mg (-0.57), Ca (-0.57) в расплаве, а также пропорциональна содержанию железа (0.42) в плагноклазе, температуре (-0.83) и давлению (0.24).

Расчет содержания **кальция** в расплаве. Для условий атмосферного давления было получено 2 уравнения, обладающие характеристиками R 0.9; 0.88 и, соответственно, χ^2 2.08; 0.67, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов. В условиях повышенного давления было получено одно уравнение, обладающее характеристиками R 0.93, χ^2 2.92, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 соответ-

ствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Величина $K_D(pI-m)$ для кальция в условиях атмосферного давления лежит в интервале 0.9–6.7 (точек со значениями меньше 1 ~2 %) и зависит от содержаний в расплаве кремния (0.6) и кальция (-0.66). Величина $K_D(pI-m)$ для кальция в условиях повышенного давления лежит в интервале 0.9–12 (точек со значениями меньше 1 не более 3 %) и зависима от содержаний в расплаве кремния (0.9), железа (-0.65), магния (-0.65), кальция (-0.77), давления (-0.28) и температуры (-0.83).

Расчет содержания **натрия** в расплаве. По экспериментальным данным в условиях атмосферного давления было получено одно уравнение с характеристиками R 0.85 и χ^2 1.24, которые позволяют с осторожностью использовать его для расчетов. В условиях повышенного давления было получено 1 уравнение, характеризуемое значениями величин R 0.82 и χ^2 1.24. Эти значения позволяют с некоторой долей осторожности (из-за невысокого R) на уровне вероятности 0.99 полагать соответствие распределений среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов содержаний натрия в расплаве.

Величина $K_D(pI-m)$ для натрия в условиях атмосферного давления лежит в интервале 0.2–7.2 и пропорциональна содержанию алюминия (-0.56) и натрия (-0.42) в расплаве. В условиях повышенного давления величина $K_D(pI-m)$ для натрия принимает значения в интервале 0.5–4 и пропорциональна содержаниям кремния (0.72), алюминия (-0.48), магния (-0.6), кальция (-0.61) в расплаве, а также содержаниям кремния (0.61), алюминия (-0.62), кальция (-0.61), натрия (0.62) в кристалле плагиоклаза; зависит также от температуры (-0.78) и давления (0.31).

Расчет содержания **калия** в расплаве. Было получено 1 уравнение по экспериментальным точкам в условиях атмосферного давления с характеристиками R 0.94 и χ^2 12.09, что позволяет использовать его только для оценок. В условиях повышенного давления было получено 1 уравнение с характеристиками R 0.91 и χ^2 7.7, что также позволяет использовать его только как оценочное.

Величина $K_D(pI-m)$ в условиях атмосферного давления принимает значения 0.1–1.9 (основная масса значений меньше 1) и слабо зависит от концентраций других элементов и $P-T$ условий. В условиях повышенного давления значения величины K_D лежат в интервале 0.1–1 и слабо чувствительны к физико-химическим параметрам системы расплав–плагиоклаз.

Расчет величины **K/Na** отношения. Как в условиях атмосферного, так и в условиях повышенного давления полученные уравнения характеризуются значениями R ~0.93 и χ^2 10.8, что позволяет использовать их только как оценочные.

Расчеты значений **температуры** равновесия. Для случая атмосферного давления было получено 2 уравнения с характеристиками R 0.88; -0.89 и χ^2 4.85; 6.33, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95–0.9 соответствие нормальному распределению среднеквадратичной ошибки и использовать эти уравнения для расчетов. Кроме того, сходство или различие вычисленных значений температуры с учетом среднеквадратичной ошибки позволяет оценить соответствие равновесному содержанию ряда элементов в расплаве. По массиву экспериментальных точек в условиях повышенных значений было получено 2 уравнения с характеристиками R -0.9; -0.93 и χ^2 2.15; 2.17, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному распределению и использовать эти уравнения для расчетов.

Расчеты величины **давления**. Было получено 1 уравнение, позволяющее рассчитывать величину давления до значений 27 кб. Уравнение имеет следующие статистические характеристики R 0.69; χ^2 1.8. Эти характеристики позволяют использовать уравнение только как оценочное.

Обсуждение результатов

Начиная с широко известной работы А. Кудо и Д. Вейла [60], система расплав–плаггиоклаз многосторонне исследуется [4; 50; 66; 80; 87; 88; 99; 100; 101 и др.] с целью создания геотермометров и барометров. Использование распределений содержаний магния и разновалентных форм железа [66; 99; 100] между расплавом и кристаллом плаггиоклаза в качестве геотермометра нам представляется маловероятным, так как в этом случае требуется высокая точность анализов в определении концентраций железа и магния в плаггиоклазе, а расчетные методы концентраций Fe^{3+} могут приводить к ошибкам.

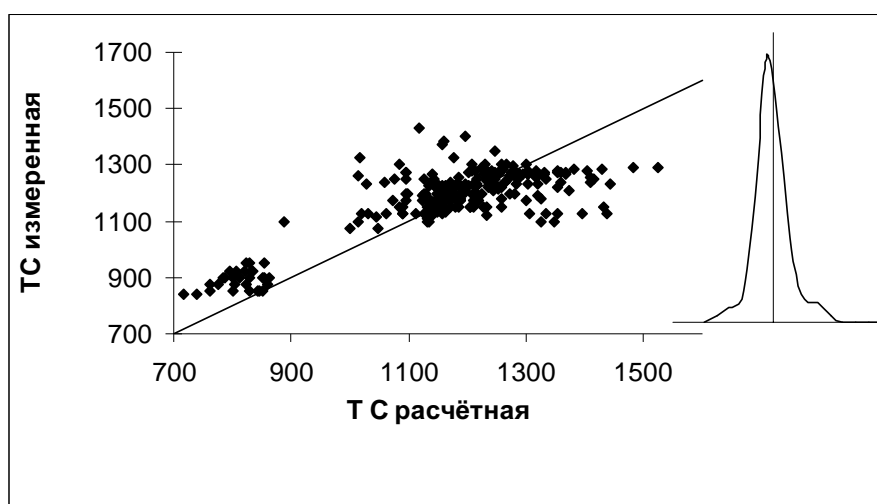


Рис. III.1.1 pl–gl. Зависимость расчетной и измеренной температуры по формуле из работы К. Путирки [88] – N 259; N_1 251; R 0.82; сигма 94 °С; χ^2 4.66 (12).

Для сравнения ниже представлена аналогичная зависимость, рассчитанная по формуле (PLPLTb).

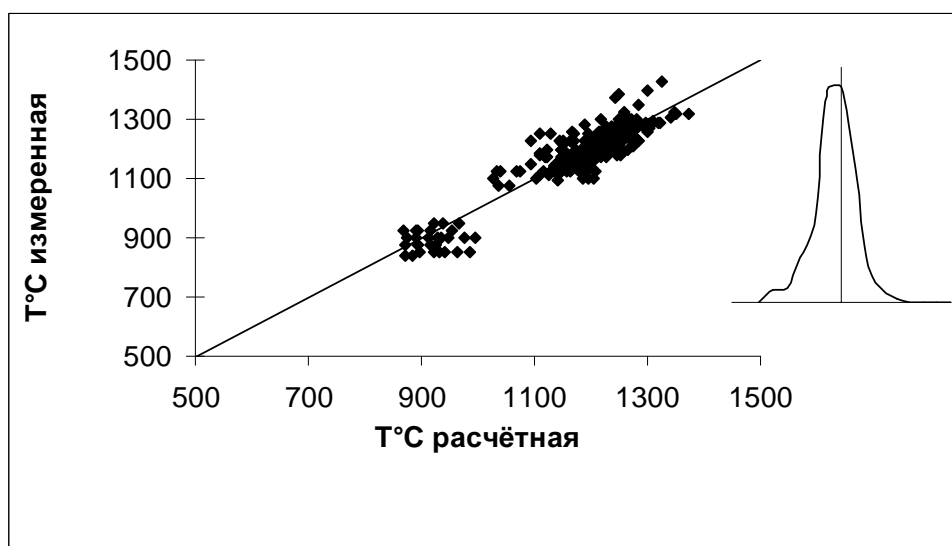


Рис. III.1.2 pl–gl. Зависимость расчетной и измеренной температуры по формуле (PLPLTb) – N 259; N_1 257; R 0.93; сигма 44.8 °С; χ^2 2.17(12).

Создать приемлемый барометр для системы расплав–плаггиоклаз нам не удалось. Предложенный в работе К. Путирки [88] подобный барометр, протестированный на использованной нами выборке, имеет следующий вид и характеристики.

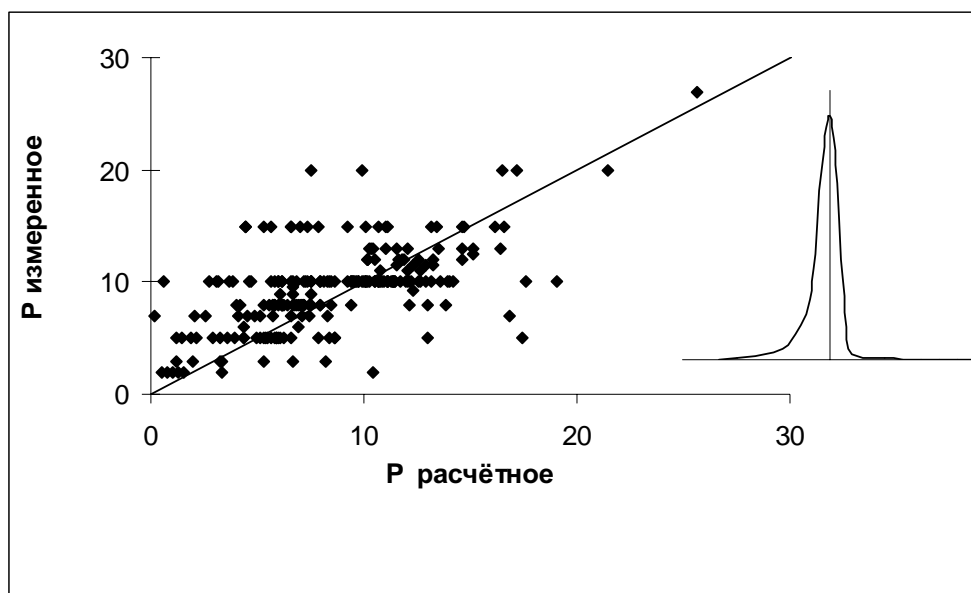


Рис. III.3 рl–gl. Зависимость расчетной и измеренной температуры по формуле (PLPLTb) – N 234; N₁ 234, R 0.6; сигма 3.6 кб; χ^2 4.86 (12).

Эти характеристики предложенного уравнения не позволяют использовать его даже как оценочное.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитать численные значения следующих величин в равновесной системе расплав–плаггиоклаз:

содержание **кремния** в расплаве по 1 уравнению при атмосферном давлении и по 1 уравнению при повышенных давлениях;

содержание **алюминия** по 2 уравнениям в условиях атмосферного давления и по 1 уравнению в условиях повышенного давления;

содержание **кальция** по 2 уравнениям при атмосферном давлении и по 1 уравнению в условиях повышенного давления;

содержание **натрия** по 1 уравнению в условиях атмосферного давления и 1 уравнению в условиях повышенного давления;

для **калий/натрового** отношения было получено 1 уравнение для условий атмосферного давления и 2 уравнения для условий повышенного давления;

значение равновесной **температуры** по 2 уравнениям при атмосферном давлении и по 2 уравнениям в условиях повышенного давления.

2. Ряд полученных уравнений характеризуются невысокими значениями коэффициента корреляции и χ^2 , отклоняющими предположение о нормальности распределения среднеквадратичной ошибки. Эти уравнения могут быть использованы для получения **оценочных** значений. К ним относятся следующие уравнения: одно уравнение для расчета содержания **кремния** в расплаве при атмосферном давлении; уравнения для расчета содержания **калия** в расплаве при атмосферном и повышенном давлении; уравнение для расчета **давления**.

3. При кристаллизации плаггиоклаза как в условиях атмосферного давления, так и при повышенном давлении, происходит удаление алюминия из расплава и обеднение им.

Сходная картина наблюдается и для кальция, хотя есть небольшое число точек со значениями K_D меньше единицы.

4. Обсуждены особенности величины $K_D(pI-m)$ для породообразующих элементов, входящих в состав кристаллов плагиоклаза, а также влияние на его величину состава расплава, температуры и давления и состава самого кристалла плагиоклаза. Для

$K_D(pI-m)$ кремния, алюминия и кальция общей является обратно пропорциональная зависимость от их содержания в расплаве. Давление в пределах ($\sim R 0.3$) влияет на величину K_D для алюминия, кальция и натрия.

5. Плагиоклаз, в противовес ортопироксену, судя по соотношению числа экспериментальных точек в условиях атмосферного давления и экспериментов в условиях повышенного давления (770/260), должен кристаллизоваться преимущественно в наземных или близповерхностных(?) условиях. Возможно, эта зависимость от давления играет роль и в преимущественном развитии диабазовых структур (относительно габбровых) в телах гипабиссальной фации глубинности. Основная масса точек экспериментов с присутствием плагиоклаза в результатах опытов под давлением не выходит за рамки давления ~ 14 кб.

6. Соотношение числа экспериментальных результатов, полученных в условиях атмосферного давления (770 т.) и под давлением (260 т.), позволяет полагать, что плагиоклаз кристаллизуется в магматических расплавах основного состава преимущественно в близповерхностных условиях.

7.10. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с плагиоклазом

Были получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин:

I. эксперименты в условиях атмосферного давления (~ 780 т.) – содержания кремния в расплаве (1 уравнение), содержания магния в расплаве (1 уравнение), температуры (1 уравнение), равновесных соотношений элементов в расплаве (1 уравнение);

II. в условиях повышенного давления (230 т.) – содержания кремния в расплаве (1 уравнение), содержания алюминия в расплаве (1 уравнение), содержания кальция в расплаве (1 уравнение), температуры (1 уравнение), давления (1 уравнение), равновесных соотношений элементов в расплаве (2 уравнения).

Расчет содержания **кремния** в расплаве. Одно уравнение, полученное по экспериментальным данным при атмосферном давлении, имеет коэффициент корреляции -0.91 и значение $\chi^2 2.65$. Значение χ^2 позволяет полагать соответствие среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 нормальному распределению и использовать это уравнение для расчетов. Уравнение, полученное по экспериментальным точкам при повышенных давлениях (20 кб), имеет коэффициент корреляции -0.94 и значение $\chi^2 0.89$, что указывает на нормальность распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 и возможность использования этого уравнения для расчетов содержания кремния в расплаве.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Уравнение, полученное по массиву при повышенных давлениях, имеет значения $R 0.82$ и $\chi^2 1.36$, что позволяет полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 нормальному распределению. Однако значение $R 0.82$ позволяет использовать это уравнение только для оценок.

Расчет содержания **магния** в расплаве. По выборке в условиях атмосферного давления было получено одно уравнение, которое имеет характеристики $R 0.93$ и $\chi^2 12.27$, что указывает на несоответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения. Это уравнение может быть использовано для оценочных результатов.

Расчет содержания **кальция** в расплаве. В условиях повышенного давления было получено одно уравнение, обладающее характеристиками $R -0.87$ и $\chi^2 1.64$, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчеты значений **температуры** равновесия. Для случая атмосферного давления было получено 1 уравнение с характеристиками $R 0.91$ и $\chi^2 4.81$, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие нормальному распределению среднеквадратичной ошибки и использовать это уравнение для расчетов. По массиву экспериментальных точек в условиях повышенных значений было получено 1 уравнение с характеристиками $R -0.93$ и $\chi^2 1.87$, что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному распределению и использовать это уравнение для расчетов.

Расчеты величины **давления**. Было получено 1 уравнение, позволяющее рассчитывать величину давления до значений 27 кб. Уравнение имеет следующие статистические характеристики $R 0.66$; $\chi^2 3.18$. Значение коэффициента корреляции (0.66) позволяет использовать это уравнение только как оценочное.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав расплава, равновесного с плагиоклазом. Для случая атмосферного давления получено 1 уравнение с характеристиками $R -0.95$ и $\chi^2 5.46$. Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов. Для условий повышенного давления получено 2 уравнения с характеристиками $R -0.89$; -0.98 и, соответственно, $\chi^2 1.36$ и 2.03 , что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов.

Выводы

1. Получены уравнения, позволяющие по составу расплава, равновесного с кристаллами плагиоклаза, рассчитывать следующие величины:
 - содержания в расплаве кремния как в условиях атмосферного, так и повышенного давлений;
 - содержания кальция в условиях повышенного давления;
 - температуры как в условиях атмосферного, так и повышенного давлений;
 - равновесного соотношения элементов в расплаве при атмосферном и повышенном давлении.
2. По ряду уравнений расчеты содержаний алюминия, магния и величины давления могут носить только оценочный характер.
3. Практически все полученные нами уравнения пока не имеют аналогов.
4. Полученные уравнения для расчетов выше приводимых величин могут быть использованы для исследований составов расплавных включений. В купе с использованием уравнений, включающих в себя состав минерала-хозяина (плагиоклаз) эти расчеты могут дать возможность судить о реальном составе расплавных включений.

7.11. Корреляционные зависимости величин K_D породообразующих элементов в двухфазной системе минерал–расплав

Были исследованы различные варианты корреляционных связей породообразующих и минералообразующих элементов (Cr), включая и величину K_D (содержание элемента в кристалле/содержание элемента в расплаве), входящих в составы минералов групп шпинели, оливина, ортопироксена, клинопироксена и плагиоклаза по выборкам расплав–минерал при атмосферном и повышенном давлении (до 17.5 ГПа). Каждая из выборок содержит в себе от 150 до 1000 экспериментальных результатов. Рассмотрены связи элементов внутри расплава, внутри минерала и между расплавом и минералом. Выявлялся диапазон изменений величины K_D и влияние различных величин (состава расплава и кристалла, P–T условий) на ее численное значение. При упоминании железа в тексте всегда имеется в виду Fe^{2+} , исключая раздел о шпинели, где разновалентные формы железа обсуждаются отдельно. Калий в расплаве присутствовал не во всех экспериментальных результатах, поэтому особенности его распределения обсуждаются выборочно. Ранее отчасти подобная работа [12] была проделана с использованием природных разностей орто- и клинопироксенов. В частности, было показано, что глиноземистость и натровость пироксенов зависят от температуры и давления.

Особенности K_D для породообразующих элементов в системе шпинель–основной–ультраосновной расплав представлены в таблице III.1.1.

Таблица. III.1.1. K_D элементов в системе шпинель–расплав.

Эл-т	Условия	K_D	Влияющие величины
Ti	P атм.	0.5–8.2	Ti_{sp} (0.65); Fe_{sp}^{2+} (0.67); T (-0.4);
	P повыш.	0.1–3.2	Al_m (-0.5); Fe_m (0.61); Ti_{sp} (0.9); Fe_{sp}^{2+} (0.74); P (-.43);
Al	P атм.	0.6–3.2	Al_{sp} (0.87);
	P повыш.	1.2–4.4	Si_m (-0.57); Al_m (0.49); Al_{sp} (0.9); P (0.68);
Fe^{3+}	P атм.	1–30	Na_m (0.42);
	P повыш.	–	–
Fe^{2+}	P атм.	0.8–6	Mg_m (-0.58); Na_m (0.6);
	P повыш.	0.5–2.7	Si_m (0.79); Al_{sp} (-0.53); Cr_{sp} (0.54); P (-0.42);
Mg	P атм.	0.7–3.5	Al_m (0.79); Mg_m (-0.6); Na_m (0.69);
	P повыш.	1–3.4	Al_m (0.76); Mg_m (-0.76); Na_m (0.78); Al_{sp} (0.61); Cr_{sp} (-0.61);
Cr	P атм.	350–2800	Na_m (0.4); Cr_m (-0.4);
	P повыш.	30–630	Al_{sp} (-0.51); Cr_m (0.5); P (-0.41);

Данные этой таблицы с учетом корреляционных связей между элементами внутри расплава и внутри шпинели дают основание для следующих предположений:

1. Содержание **титана** в кристаллах шпинели пропорционально его содержанию в расплаве (R 0.82) при атмосферном давлении. При кристаллизации под давлением связь становится более слабой (R 0.45). Содержание **титана** в самом расплаве в условиях давления связано с содержаниями магния (R -0.56) и натрия (R 0.63). Величина K_D в условиях давления прямо зависит от содержания железа в расплаве и кристаллах шпинели (см. табл. III.1.1), обратно пропорциональна давлению. Однако наибольшее влияние на величину K_D оказывает содержание титана в шпинели, которое, в свою очередь, пропорционально содержанию Fe^{2+} в шпинели (R 0.84).

2. Содержание **алюминия** в расплаве при атмосферном давлении не сильно сказывается на вхождение его в кристалл шпинели (R 0.57). В случае кристаллизации под давлением связь становится сильнее (R 0.81) и величина K_D в первую очередь становится зависимой от

вхождения алюминия (R 0.9) в кристалл шпинели. Содержание алюминия в шпинели, в свою очередь, зависит от давления (R 0.51). При кристаллизации шпинели под давлением расплав обедняется алюминием.

3. В условиях атмосферного давления содержание Fe^{3+} в кристалле шпинели сильно зависит (R 0.87) от его содержания в расплаве. Величина K_D для Fe^{3+} чувствительна (R 0.42) к содержанию натрия в расплаве и не зависит от концентрации Fe^{3+} в расплаве. При кристаллизации шпинели происходит обеднение расплава Fe^{3+} .

4. Содержание Fe^{2+} в шпинели отчетливо зависит от его содержания в расплаве как в условиях атмосферного давления (R 0.75), так и при повышенном давлении (R 0.88). Величина K_D для Fe^{2+} по-разному чувствительна в условиях атмосферного давления и в экспериментах под давлением (см. табл. III.1.1). В условиях давления она становится прямо зависимой от содержания кремния в расплаве, что совпадает с поведением аналогичного K_D для силикатных минералов (оливина, ортопироксена, клинопироксена).

5. В условиях атмосферного давления содержание **магния** в шпинели пропорционально (R 0.7) его содержанию в расплаве. В условиях повышенного давления связь становится слабее (R 0.46). Содержание **магния** в самом расплаве пропорционально содержанию натрия (R -0.72) и температуре (R 0.67). В условиях атмосферного давления величина K_D пропорциональна содержаниям алюминия (R 0.79), магния (R -0.6) и натрия (R 0.69) в расплаве. При повышенном давлении сохраняется влияние тех же элементов в расплаве: алюминия (R 0.76), магния (R -0.76) и натрия (R 0.78), появляется связь с содержанием хрома в шпинели (R -0.61). При кристаллизации шпинели из расплава в условиях повышенного давления расплав обедняется магнием.

6. Содержание **Cr** в шпинели в условиях атмосферного давления слабо зависит от его содержания в расплаве (R 0.4), но при кристаллизации шпинели под давлением зависимость становится более тесной (R 0.73). В условиях атмосферного давления K_D , несмотря на самый большой диапазон вариаций значений (см. табл. III.1.1), является величиной слабо зависящей от физико-химических условий кристаллизации: Na_m (R 0.39), Cr_m (R -0.38). В условиях повышенного давления величина K_D становится более чувствительной к содержанию хрома (R 0.5) в шпинели и давлению (R -0.41).

Полученные корреляционные связи позволяют высказать следующие положения:

а) состав кристаллов шпинели является барочувствительным;

б) с увеличением давления алюминий вытесняет в кристаллах шпинели, выросших из расплава, хром и трехвалентное железо, а титан и двухвалентное железо замещаются магнием. Можно предположить, что увеличение доли алюминия в составе шпинели приводит и к структурной перестройке, сказывающейся на поведении магния, двухвалентного железа и титана при формировании кристалла;

в) K_D в условиях давления для двухвалентного железа прямо пропорционален содержанию кремния в расплаве (R 0.78), а K_D магния обратно пропорционален его содержанию в расплаве (R -0.76), что отчасти совпадает с поведением этих элементов при кристаллизации оливина и пироксенов;

г) в расплаве, равновесном с кристаллами шпинели, содержание магния обратно пропорционально содержаниям титана и натрия в нем и прямо зависит от температуры расплава. Это позволяет предположить, что щелочные ультраосновные и основные расплавы имеют гибридное происхождение, и состав расплавов привнесом щелочей обязан флюидам.

Особенности K_D для породообразующих элементов в системе **оливин–основной–ультраосновной расплав** представлены в таблице III.1.2.

Приведенные в таблице результаты с учетом корреляционных связей внутри расплава и внутри кристаллов шпинели позволяют высказать следующие положения:

1. Содержание **кремния** в кристаллах оливина практически не зависит от его содержания в расплаве как в условиях атмосферного давления, так и при повышенном давлении. Концентрация **кремния** в расплаве под давлением обратно пропорциональна содержаниям титана ($R -0.71$) и железа ($R -0.67$). Величина же K_D сильно отрицательно зависима от его содержания в расплаве (см. табл. III.1.2) как в условиях атмосферного давления, так и в случае повышенного давления.

Таблица. III.1.2. K_D элементов в системе оливин–расплав.

Эл-т	Условия	K_D	Влияющие величины
Si	P атм.	0.5-1	$Si_m (-0.98)$; $Ca_m (-0.54)$;
	P повыш.	0.5-1.37	$Si_m (-0.94)$; $Ti_m (0.76)$; $Fe_m (0.6)$;
Fe^{2+}	P атм.	0.15-8.7	$Si_m (0.57)$; $Mg_m (-0.75)$; $Ca_m (-0.61)$; $Na_m (0.63)$; $T(-0.67)$;
	P повыш.	0.7-5.9	$Na_m (0.53)$; $Si_{ol} (0.51)$; $Fe_{ol} (0.65)$; $Mg_{ol} (-0.68)$; $T(-0.41)$;
Mg	P атм.	1.87-26.1	$Si_m (0.42)$; $Mg_m (-0.74)$; $Ca_m (-0.59)$; $Na_m (0.74)$; $T(-0.64)$;
	P повыш.	1.35-18.6	$Si_m (0.49)$; $Al_m (0.56)$; $Mg_m (-0.8)$; $Na_m (0.59)$; $P(-0.4)$; $T(-0.68)$;

2. Содержание двухвалентного **железа** в кристаллах оливина пропорционально его содержанию в расплаве при атмосферном давлении ($R 0.67$) и в условиях повышенного давления ($R 0.8$). Содержание **железа** в условиях атмосферного давления в расплаве пропорционально содержанию натрия в нем ($R -0.57$); в условиях повышенного давления содержание железа в расплаве практически независимо от других элементов. Величина K_D в условиях атмосферного давления прямо пропорциональна содержаниям кремния и натрия в расплаве и обратно пропорциональна содержаниям магния, кальция в расплаве и температуре (см. табл. III.1.2). В условиях повышенного давления зависимость от содержания натрия в расплаве и температуры сохраняется, но K_D становится чувствительным к составу оливина (см. табл. III.1.2), в котором ведущую роль играет магний из-за его более сильной температурной зависимости.

3. Содержание **магния** в кристаллах оливина пропорционально его содержаниям в расплаве и в условиях атмосферного давления ($R 0.6$), и при повышенном давлении ($R 0.51$). Содержание **магния** в расплаве наиболее чувствительно к температуре – ($R 0.93$) и ($R 0.91$) при атмосферном давлении и повышенных его значениях, соответственно. В условиях повышенного давления содержание **магния** в расплаве обратно пропорционально содержанию натрия ($R -0.6$) в нем. Величина K_D в обоих случаях наиболее сильно отрицательно зависима от содержания магния в расплаве и, соответственно, от температуры (см. табл. III.1.2). Интересным фактом является связь содержания натрия в расплаве с величиной K_D как для магния, так и для железа.

4. В условиях атмосферного давления зависимости между содержаниями элементов в кристаллах оливина и в расплаве выглядят следующим образом: титан – $R 0.7$; алюминий – зависимость отсутствует; марганец – $R 0.8$; кальций – $R 0.4$; и хром – $R 0.86$. В условиях повышенного давления пропорциональность существует только для титана ($R 0.88$) и марганца ($R 0.82$).

5. Величина K_D для этих элементов в первую очередь зависима от их содержания в кристалле оливина $R \sim 0.7-0.8$. Для алюминия эта зависимость в условиях атмосферного давления наиболее высокая ($R 0.97$), тогда, как в случае повышенного давления она падает ($R 0.85$) и становится чувствительной к давлению ($R 0.7$).

Особенности выявленных корреляционных связей между элементами в системе расплав–оливин и их отношения позволяют высказать следующие положения:

а) Величина K_D для кремния, будучи обратно пропорциональной его содержанию в расплаве, демонстрирует, что увеличение содержания кремния в расплаве препятствует его переходу в оливин.

б) Величина K_D для магния, будучи обратно пропорциональной его содержанию в расплаве, демонстрирует, что увеличение содержания магния в расплаве препятствует его переходу в оливин.

в) Содержание натрия в расплаве прямо пропорционально способности железа и магния переходить из расплава в кристалл оливина.

г) K_D алюминия чувствителен к давлению (R 0.7). К давлению чувствительно и содержание алюминия в расплаве, равновесном с оливином (R -0.54), хотя для магния эта связь выше (R 0.71) и зависит, в свою очередь, от температуры.

д) При кристаллизации оливина расплав обедняется магнием.

е) В расплаве при повышенном давлении содержание кремния обратно пропорционально содержаниям в нем титана и железа, а магния – обратно пропорционально натрию, что позволяет полагать привнос щелочей в базит-гипербазитовые расплавы.

Особенности K_D для породообразующих элементов в системе **ортопироксен–основной-ультраосновной расплав** представлены в таблице III.1.3.

Таблица. III.1.3. K_D элементов в системе ортопироксен–расплав.

Эл-т	Условия	K_D	Влияющие величины
Si	Р атм.	0.8-1	Si_m (-0.98); Fe_m (0.6); Mg_m (0.7); Ca_m (0.6); Na_m (-0.77); T (0.56)
	Р повыш.	0.6-1.5	Si_m (-0.94); Fe_m (0.6); Mg_m (0.66); T (0.71); P (0.44)
Ti	Р атм.	0.1-2.8	явно выделяющихся связей не найдено
	Р повыш.	0.3-2.3	Si_m (0.65); Mg_m (-0.5); $Mg_{орх}$ (-0.7); T (-0.52)
Al	Р атм.	<1	$Si_{орх}$ (-0.81); $Al_{орх}$ (0.97)
	Р повыш.	<1	$Si_{орх}$ (-0.77); $Al_{орх}$ (0.86)
Fe^{2+}	Р атм.	0.4-5	Si_m (0.75); Mg_m (-0.76); Ca_m (-0.64); Na_m (0.7); $Fe_{орх}$ (0.6); T (-0.71)
	Р повыш.	0.1-21	Si_m (0.76); Mg_m (-0.5); Ca_m (-0.5); $Fe_{орх}$ (0.75); T (-0.56)
Mg	Р атм.	1.6-28	Si_m (0.76); Mg_m (-0.75); Ca_m (-0.65); Na_m (0.69); T (-0.71)
	Р повыш.	1-76	Si_m (0.8); Mg_m (-0.5); Ca_m (-0.54); $Mg_{орх}$ (-0.68); T (-0.57)
Ca	Р атм.	0.1-0.9	Si_m (0.67); Mg_m (-0.76); Ca_m (-0.53); Na_m (0.66); $Mg_{орх}$ (-0.65); T (-0.75)
	Р повыш.	0.1-0.7	$Mg_{орх}$ (-0.5); $Ca_{орх}$ (0.5)

Приведенные результаты с учетом взаимоотношений элементов как внутри расплава, так и внутри кристаллов ортопироксена позволяют высказать следующие положения:

1. Содержание **кремния** в кристаллах ортопироксена практически не зависит от его содержания в расплаве как в условиях атмосферного давления, так и при повышенном давлении. Концентрация **кремния** в расплаве под давлением обратно пропорциональна содержаниям железа (R -0.5), магния (R -0.6) в расплаве, а также температуре (R -0.68) и давлению (R -0.4). Величина же K_D сильно отрицательно зависима от содержания кремния в расплаве (см. табл. III.1.3) как в условиях атмосферного давления, так и в случае повышенного давления, но прямо пропорционально зависит от содержания магния в расплаве и, соответственно, от температуры.

2. Содержание **титана** в кристаллах ортопироксена пропорционально его содержанию в расплаве (R 0.84) при атмосферном давлении и при кристаллизации под давлением (R 0.78). Содержание **титана** в самом расплаве в обоих случаях практически не коррелируется с другими величинами. Величина K_D в условиях атмосферного давления слабо зависима от равновесных физико-химических условий. В случае повышенного давления проявился ряд корреляционных связей (см. табл. III.1.3), в частности, увеличение содержания магния как в расплаве, так и в ортопироксене, вытесняет титан и из расплава, и из кристалла ортопироксена.

Это, с нашей точки зрения, указывает на привнос титана совместно со щелочами в основные-ультраосновные расплавы.

3. Содержание **алюминия** в кристаллах ортопироксена как в случае атмосферного давления, так и при повышенном давлении – (R 0.53) и (R 0.6), соответственно, зависит от его концентрации в расплаве. Содержание **алюминия** в расплаве в условиях повышенного давления зависит от содержаний в нем железа (R -0.51), и магния

(R -0.67), а также от температуры (R -0.58) и давления (R -0.52). Величина K_D для обоих вариантов с условиями по давлению зависит от состава кристалла ортопироксена (см. табл. III.1.3).

4. Содержание двухвалентного **железа** в кристаллах ортопироксена слабо зависимо от его содержания в расплаве как в случае атмосферного (R 0.35), так и в случае повышенного давления (R 0.4). В расплаве содержание **железа** зависит от содержания алюминия в расплаве: атмосферное P – R -0.44; повышенное P – R -0.51. Величина K_D , независимо от давления, в первую очередь пропорциональна концентрациям кремния и магния в расплаве, и содержанию железа в кристалле ортопироксена и температуре (см. табл. III.1.3). Последнее указывает на отсутствие отчетливого влияния какого-либо из факторов на распределение железа в системе расплав–ортопироксен.

5. Содержание **магния** в кристаллах ортопироксена чувствительно к его содержаниям в расплаве и в условиях атмосферного давления (R 0.67), и при повышенном давлении (R 0.66). Содержание магния в расплаве, равновесном с ортопироксеном, пропорционально содержанию натрия в этом же расплаве: атмосферное P – R -0.8, повышенное P – R -0.61. Но наиболее чувствительно оно к величине температуры – R 0.94 и R 0.9, соответственно, подобно аналогичным зависимостям для оливина.

Величина K_D в условиях атмосферного давления пропорциональна следующим величинам: содержаниям в расплаве кремния (R 0.76), магния (R -0.75), кальция (R -0.65), натрия (R (0.69) и температуре (R -0.71). В условиях повышенного давления величина K_D пропорциональна следующим величинам: содержаниям в расплаве кремния (R 0.8), магния (R -0.5), кальция (R -0.54), натрия (R 0.69); содержаниям в ортопироксене магния (R -0.68) и температуре (R-0.57).

6. Содержание **кальция** в кристаллах ортопироксена в условиях атмосферного давления пропорционально содержанию магния (R -0.58) в расплаве и величине температуры (R -0.64). В условиях повышенного давления пропорционально его содержанию (R 0.52) в расплаве. При атмосферном давлении содержание **кальция** в расплаве зависит с содержаниями в расплаве кремния (R -0.67) и натрия (R -0.58). В условиях повышенного давления есть только связи с содержаниями железа (R -0.59) и кальция (R 0.52) в кристаллах ортопироксена. Величина K_D в экспериментах при атмосферном давлении чувствительна как к составу расплава, так и составу ортопироксена и температуре (см. табл. III.1.3). В условиях повышенного давления сохраняются связи только с составом ортопироксена. Несмотря на невысокие содержания кальция в кристаллах ортопироксена в условиях атмосферного давления, имеется положительная связь величины K_D с содержанием кремния в расплаве и отрицательная связь с содержанием кальция в расплаве, подобно связям для K_D магния (см. табл. III.1.3).

7. Содержания **марганца** в кристаллах ортопироксена в условиях атмосферного давления наиболее чувствительно к его содержанию в расплаве (R 0.68). В экспериментах при повышенном давлении эта связь слабеет (R 0.46) и его содержание в кристалле ортопироксена в большей степени зависит (R 0.69) от содержания железа в кристалле ортопироксена. Величина K_D в условиях атмосферного давления принимает значения в интервале 1–8 и в наибольшей степени зависима от содержания марганца (R 0.7) в ортопироксене. В условиях повышенного давления величина K_D принимает значения в интервале 1–16 и зависима от содержаний марганца в ортопироксене (R 0.66) и магния (R -0.64) в нем.

8. Содержания **хрома** в кристаллах ортопироксена, независимо от давления, зависят преимущественно от его содержаний в расплаве R ~0.7. Величина K_D лежит в интервале 1–30 и практически независима от других величин.

Особенности выявленных корреляционных связей между элементами в системе расплав–ортопироксен и их отношения позволяют высказать следующие положения.

а) Величина K_D для кремния, будучи обратно пропорциональной его содержанию в расплаве, демонстрирует, что увеличение содержания кремния в расплаве препятствует его переходу в ортопироксен.

б) Величина K_D для магния, будучи обратно пропорциональной его содержанию в расплаве, демонстрирует, что увеличение содержания магния в расплаве препятствует его переходу в ортопироксен.

в) Увеличение содержания кремния в расплаве способствует переходу магния в кристаллическую фазу и наоборот; увеличение содержания магния в расплаве способствует переходу кремния в кристаллы ортопироксена.

г) Содержания титана, марганца и хрома в кристаллах ортопироксена преимущественно зависят от их содержаний в расплаве.

д) На содержаниях алюминия и кальция в кристаллах ортопироксена сказывается как их содержание в расплаве, так и железо-магниевое отношение в кристаллах ортопироксена.

е) При кристаллизации ортопироксена происходит обеднение расплава магнием.

ж) Содержание натрия в расплаве обратно пропорционально содержанию магния в расплаве, что указывает на гибридность ультраосновных щелочных магм.

з) Отрицательная связь содержания алюминия в расплаве с давлением указывает на обеднение им расплава при кристаллизации ортопироксена под давлением и невысокую вероятность существования высокоглиноземистых расплавов при равновесном плавлении мантийного вещества с участием ортопироксена.

Особенности K_D для породообразующих элементов в системе **клинопироксен (авгит)–основной-ультраосновной расплав** представлены в таблице III.1.4.

Таблица III.1.4. K_D элементов в системе клинопироксен–расплав.

Эл-т	Условия	K_D	Влияющие величины
Si	Р атм.	0.7-1.2	$Si_m (-0.85)$; $Mg_m (0.5)$; $Ca_m (0.79)$
	Р повыш.	0.8-1.3	$Si_m (-0.92)$; $Al_m (-0.52)$; $Mg_m (0.74)$; $Mg_{срх} (0.65)$
Ti	Р атм.	0.1-4.6	$Si_{срх} (-0.73)$; $Ti_{срх} (0.68)$; $Al_{срх} (0.63)$
	Р повыш.	0.1-2.6	явно выделяющихся связей не найдено
Al	Р атм.	0.05-0.9	$Si_m (-0.6)$; $Si_{срх} (-0.88)$; $Ti_{срх} (0.56)$; $Al_{срх} (0.96)$; $Ca_{срх} (0.52)$
	Р повыш.	0.1-2	$Al_{срх} (0.81)$; $Mg_{срх} (-0.51)$; $Na_{срх} (0.76)$; $P (0.71)$
Fe ²⁺	Р атм.	0.1-4.2	$Si_m (0.52)$; $Mg_m (-0.6)$; $Ca_m (-0.68)$
	Р повыш.	0.3-4.5	$Si_m (0.57)$; $Mg_m (-0.55)$; $Fe_{срх} (0.52)$
Mg	Р атм.	1.3-18.4	$Si_m (0.68)$; $Mg_m (-0.73)$; $Ca_m (-0.69)$; $T (-0.63)$
	Р повыш.	0.9-14.8	$Si_m (0.64)$; $Mg_m (-0.7)$; $Ca_m (-0.51)$; $T (-0.5)$
Ca	Р атм.	0.7-9.9	$Mg_m (-0.62)$; $Ca_m (-0.73)$; $Na_m (0.52)$; $Na_{срх} (0.56)$; $T (-0.5)$
	Р повыш.	0.6-5.7	$Si_m (0.56)$; $Mg_m (-0.6)$; $Ca_m (-0.65)$; $Na_m (0.56)$; $Mg_{срх} (-0.59)$; $Ca_{срх} (0.61)$; $T (-0.56)$
Na	Р атм.	0.1-0.4	$Na_{срх} (0.52)$
	Р повыш.	0.1-1.6	$Al_{срх} (0.53)$; $Na_{срх} (0.85)$; $P (0.081)$; $T (0.52)$

Данные таблицы и взаимоотношения элементов, как внутрифазные, так и межфазные, позволяют высказать следующие положения:

1. Содержание **кремния** в кристаллах клинопироксена практически не зависит от его содержания в расплаве как в условиях атмосферного давления, так и при повышенном давлении. Концентрация **кремния** в расплаве под давлением обратно пропорциональна содержанию магния ($R -0.67$) в расплаве и его содержанию в кристалле клинопироксена

(R 0.58). Величина же K_D сильно отрицательно зависима от содержания кремния в расплаве (см. табл. III.1.4) как в условиях атмосферного давления, так и в случае повышенного давления, но прямо пропорционально зависит от содержания магния и кальция в расплаве (см. табл. III.1.4) при атмосферном давлении. В условиях повышенного давления усиливается влияние кремния и магния (см. табл. III.1.4). Внутри кристаллов клинопироксена содержание **кремния** при атмосферном давлении обратно пропорционально содержаниям алюминия

(R -0.92) и титана (R -0.72). В условиях повышенного давления существенной остается связь только с алюминием (R -0.76). Это, вероятно, указывает на влияние давления на структуру кристаллов клинопироксена, сказывающееся на изоморфизме кремний–алюминий и изменении структурного положения (?) титана.

2. Содержание **титана** в клинопироксене в условиях атмосферного давления слабо зависит от его содержания в расплаве (R 0.58), в экспериментах при повышенном давлении связь усиливается (R 0.83). Содержание **титана** в расплаве практически не зависит от содержаний других элементов. Величина K_D в условиях атмосферного давления пропорциональна содержаниям кремния, титана и алюминия в кристаллах клинопироксена (см. табл. III.1.4); в условиях повышенного давления отчетливого влияния не выявилось. Внутри кристаллов клинопироксена при атмосферном давлении, кроме связи с кремнием, есть менее выраженные зависимости от содержаний алюминия (R 0.54) и магния (R -0.53). В условиях повышенного давления отчетливые зависимости не выявлены.

3. Содержание **алюминия** в клинопироксене в экспериментах при атмосферном давлении пропорционально его содержанию в расплаве (R 0.65); в условиях повышенного давления связь слабеет (R 0.43). В условиях атмосферного давления содержание **алюминия** в расплаве пропорционально содержаниям в нем железа (R -0.73) и натрия (R 0.61). При повышенном давлении связи слабеют и более или менее отчетливой остается только связь с содержанием железа (R -0.53). Величина K_D в условиях атмосферного давления в первую очередь зависит от содержания алюминия (R 0.96) и кремния (R -0.88) в кристаллах клинопироксена (см. табл. III.1.4). В условиях повышенного давления зависимость от содержания алюминия (R 0.81) слабеет и существенным становится влияние давления (R 0.71) (см. табл. III.1.4). Внутри кристаллов клинопироксена при атмосферном давлении кроме связи с содержанием кремния (см. раздел о кремнии) есть связь с титаном (R 0.54). При повышенном давлении кроме связи с кремнием выявлены связи с содержаниями магния (R -0.59) и натрия (R 0.68), а также влияние давления (R 0.4).

4. Содержание **железа** в клинопироксене в экспериментах при атмосферном давлении пропорционально его содержанию в расплаве (R 0.59); в условиях повышенного давления связь становится сильнее (R 0.67). Содержание железа в расплаве достаточно слабо связано с содержаниями других элементов: натрия (R 0.5) при атмосферном давлении; в условиях повышенного давления с железом коррелирует титан (R 0.6). Величина K_D в условиях атмосферного давления зависит от кремния и других элементов в расплаве (см. табл. III.1.4). В условиях повышенного давления сохраняются практически те же связи (см. табл. III.1.4) и появляется связь с содержанием железа (R 0.52) в кристалле клинопироксена. При атмосферном давлении содержание железа внутри кристалла клинопироксена слабо связано с содержанием в нем магния (R -0.47) и с температурой (R -0.62). В условиях повышенного давления содержание железа практически не связано с содержаниями других элементов в кристалле.

5. Содержание **магния** в клинопироксене в экспериментах при атмосферном давлении пропорционально его содержанию в расплаве (R 0.64); в условиях повышенного давления связь усиливается (R 0.78). Содержание **магния** в расплаве при атмосферном давлении пропорционально содержаниям кальция (R 0.73), натрия (R -0.55) в расплаве, и, в наибольшей степени, температуре (R 0.89). В условиях повышенного давления эти связи в расплаве слабо меняются для кальция (R 0.59) и натрия (R -0.66), зато резко слабеет связь с температурой (R 0.65). Величина K_D в условиях атмосферного давления зависит от содержания кремния и магния в расплаве (см. табл. III.1.4); в условиях повышенного давления связи практически не меняются. Внутри кристаллов клинопироксена при атмосферном давлении содержание маг-

ния чувствительно к температуре (R 0.6); в условиях повышенного давления наряду со связью с алюминием присутствует и корреляция с содержанием натрия (R -0.7) в кристалле.

6. Содержание **кальция** в клинопироксене практически не зависит от его содержания в расплаве и независимо от давления. Содержание кальция в расплаве пропорционально содержанию натрия в расплаве (R -0.53) и температуре (R 0.6) в условиях атмосферного давления. При повышенном давлении связь с содержанием натрия усиливается (R -0.76). Величина K_D в условиях атмосферного давления зависит от содержания кремния, кальция и магния в расплаве (см. табл. III.1.4); в условиях повышенного давления связи остаются практически те же, их сила также практически не меняется (см. табл. III.1.4). В условиях атмосферного давления содержание кальция в кристаллах клинопироксена практически не чувствительно к содержаниям других элементов, входящих в кристалл клинопироксена; в условиях повышенного давления появляется связь с температурой (R -0.51).

7. Содержание **натрия** в клинопироксене в экспериментах при атмосферном давлении пропорционально его содержанию в расплаве (R 0.74); в условиях повышенного давления связь слабеет (R 0.5). Содержание **натрия** в расплаве при атмосферном и повышенном давлении слабо связано с содержаниями других элементов в расплаве. Величина K_D в условиях атмосферного давления зависит от содержания натрия в клинопироксене (см. табл. III.1.4). В условиях повышенного давления эта связь усиливается и существенную роль начинает играть давление (см. табл. III.1.4). Внутри кристаллов клинопироксена содержание натрия при атмосферном давлении связано с содержанием титана (R0.5). При повышенном давлении возникают связи с алюминием (R0.68), магнием (R -0.7) и давлением (R 0.6).

8. Содержания **марганца** и **хрома** в кристаллах клинопироксена пропорциональны их содержаниям в расплаве. Эксперименты при атмосферном давлении – Mn (R 0.7); Cr (R 0.66). Эксперименты при повышенном давлении – Mn (R 0.69); Cr (R 0.74). Величина K_D для марганца в условиях атмосферного давления лежит в интервале 0.1–8.8, при повышенном давлении – 0.1–4.6 и пропорциональна в том и другом случаях содержанию марганца в кристаллах клинопироксена (R 0.68) и (R 0.61). Для хрома величина K_D принимает значения 0–93 и 1–41, соответственно, и слабо зависит от физико-химических условий равновесия.

Выявленные корреляционные связи между элементами в системе расплав–клинопироксен и их отношения позволяют высказать следующие положения:

А) Величина K_D для кремния, будучи обратно пропорциональной его содержанию в расплаве, демонстрирует, что увеличение содержания кремния в расплаве препятствует его переходу в клинопироксен.

Б) Величина K_D для магния, будучи обратно пропорциональной его содержанию в расплаве, демонстрирует, что увеличение содержания магния в расплаве препятствует его переходу в клинопироксен.

В) Величина K_D для кальция, будучи обратно пропорциональной его содержанию в расплаве, демонстрирует, что увеличение содержания кальция в расплаве препятствует его переходу в клинопироксен.

Г) Величина K_D для алюминия прямо пропорциональна его содержанию в кристалле клинопироксена и прямо пропорциональна величине давления. На влияние давления указывают и связи алюминия расплав–кристалл и связи между концентрациями элементов в кристаллах клинопироксена.

Д) При кристаллизации клинопироксена, как правило, происходит обеднение расплава магнием.

Особенности K_D для породообразующих элементов в системе **плаггиоклаз–основной-ультраосновной расплав** представлены в таблице III.1.5.

Приведенные в таблице данные с учетом внутрифазных и межфазных взаимоотношений элементов позволяют сделать следующие выводы:

1. Содержание **кремния** в кристаллах плаггиоклаза пропорционально его содержанию

Таблица. III.I.5. K_D элементов в системе плагиоклаз–расплав.

Эл-т	Условия	K_D	Влияющие величины
Si	P атм.	0.7-1.16	Si_m (-0.79)
	P повыш.	0.7-1.2	Si_m (-0.91); Ti_m (0.59); Fe_m (0.82); Mg_m (0.62); Ca_m (0.64); Na_m (0.5); T (0.68)
Al	P атм.	1.3-3.3	Al_m (-0.79); Fe_m (0.82); Ca_m (0.55); Na_m (-0.62)
	P повыш.	1.1-2.5	Al_m (-0.78); P (-0.35)
Ca	P атм.	0.9-6.7	Si_m (0.6); Ca_m (-0.66)
	P повыш.	0.9-12	Si_m (0.9); Fe_m (-0.65); Mg_m (-0.65); Ca_m (-0.77); T (-0.83); P (-0.28)
Na	P атм.	0.2-7.2	Al_m (-0.56); Na_m (-0.42)
	P повыш.	0.5-4	Si_m (0.72); Mg_m (-0.6); Ca_m (-0.6); Si_{pl} (0.61); Al_{pl} (-0.62); Ca_{pl} (-0.61); Na_{pl} (0.62); T (-0.78); P (-0.31)
K	P атм.	0.1-1.9	явно выделяющихся связей не найдено
	P повыш.	0.1-1	явно выделяющихся связей не найдено

в расплаве независимо от давления: эксперименты при атмосферном давлении – R 0.63, эксперименты при повышенном давлении – R 0.6. Концентрация **кремния** в расплаве в условиях атмосферного давления пропорциональна содержаниям магния (R -0.56) и кальция (R -0.76). В условиях давления эти обратно пропорциональные зависимости магния (R -0.8) и кальция (R -0.84) усиливаются и отчетливыми становятся связи с содержанием железа

(R -0.74) и температурой (R -0.84). Величина K_D для кремния, в первую очередь, отчетливо зависима от его содержания в расплаве (см. табл.), а в условиях давления еще от содержания и других элементов и температуры (см. табл. III.I.5). Внутри кристаллов плагиоклаза при атмосферном давлении содержание кремния, благодаря стехиометрии, имеет коэффициенты корреляции с кремнием, кальцием и натрием > 0.95 , с температурой – R -0.61. Аналогичные результаты получены и для условий повышенного давления, хотя связь с натрием слабее (R 0.87).

2. Содержание **алюминия** в кристаллах плагиоклаза слабо зависит от его содержания в расплаве независимо от давления: эксперименты в условиях атмосферного давления – R 0.36; эксперименты в условиях повышенного давления – R 0.45. Содержание **алюминия** в расплаве в условиях атмосферного давления пропорционально содержанию железа в расплаве (R -0.72) и температуре (R 0.59). В условиях повышенного давления содержание алюминия в расплаве пропорционально температуре (R 0.6) и давлению (R 0.4). Величина K_D независимо от давления чувствительна к содержанию алюминия и железа в расплаве и давлению (см. табл. III.I.5). Внутри кристаллов плагиоклаза, благодаря стехиометрии, коэффициенты корреляции алюминия с кремнием, кальцием, натрием > 0.9 независимо от давления. Более слабая связь с температурой (R 0.6). Связи в условиях повышенного давления слабеют, вероятно, благодаря его влиянию.

3. Содержание **кальция** в кристаллах плагиоклаза пропорционально его содержанию в расплаве (R 0.77) независимо от давления. Концентрация **кальция** в расплаве пропорциональна содержаниям щелочей в расплаве: эксперименты в условиях атмосферного давления – Na (R -0.57); K (R -0.56); эксперименты в условиях повышенного давления – Na (R -0.6); K (R -0.77), и в этом случае добавляется температурная зависимость (R 0.8). Величина K_D для кальция пропорциональна содержаниям кремния и кальция в расплаве, эти связи усиливаются при повышенном давлении и появляются связи с температурой и давлением (см. табл. III.I.5). Внутри кристаллов плагиоклаза стехиометрия кальция с кремнием, алюминием и натрием высокая (> 0.93) независимо от давления и есть влияние температуры (R 0.61).

4. Содержание **натрия** в кристаллах плагиоклаза умеренно зависит от его содержания в расплаве \sim (R 0.6) независимо от давления. Содержание **натрия** в расплаве при атмосферном давлении слабо чувствительно к содержанию алюминия в расплаве (R 0.53), а при повышен-

ном давлении есть незначительное влияние давления ($R = 0.24$). Величина K_D в условиях атмосферного давления чувствительна к содержанию алюминия в расплаве, а в условиях повышенного давления, в первую очередь, пропорциональна содержаниям кремния в расплаве и температуре (см. табл. III.1.5). Стехиометричные взаимоотношения натрия с кремнием, алюминием, кальцием в плагиоклазе при атмосферном давлении $R > 0.96$.

В условиях повышенного давления эти связи слабеют и лежат в интервале $R = 0.87-0.93$, что вероятно, связано с усилением влияния температуры (см. табл. III.1.5).

5. Содержание **калия** в плагиоклазе пропорционально только его содержанию в расплаве: эксперименты при атмосферном давлении – $R = 0.84$, при повышенном давлении – $R = 0.72$. Содержание **калия** в расплаве практически не чувствительно к физико-химическим условиям. Для величины K_D также не удалось выявить связей с условиями существования.

6. Содержание **железа** в кристаллах плагиоклаза практически не зависит от его содержания в расплаве независимо от давления. Содержание **железа** в расплаве практически независимо от содержаний других элементов в расплаве независимо от давления. Величина K_D для железа в условиях атмосферного давления пропорциональна его содержанию в плагиоклазе (см. табл. III.1.5). В условиях повышенного давления число влияющих величин становится больше и наиболее значимыми из них становятся содержание кремния в расплаве и температура (см. табл. III.1.5). Внутри кристаллов плагиоклаза содержание железа не зависит от содержаний других элементов, независимо от давления.

Выявленные корреляционные связи между элементами в системе расплав–плагиоклаз и их отношения позволяют высказать следующие положения:

а) Величина K_D для кремния, будучи обратно пропорциональной его содержанию в расплаве, отчетливо показывает, что увеличение содержания кремния в расплаве препятствует его переходу в плагиоклаз.

б) Величина K_D для алюминия, будучи обратно пропорциональной его содержанию в расплаве, демонстрирует, что увеличение содержания алюминия в расплаве препятствует его переходу в плагиоклаз.

в) Величина K_D для кальция, будучи обратно пропорциональной его содержанию в расплаве, демонстрирует, что увеличение содержания кальция в расплаве препятствует его переходу в плагиоклаз.

г) При кристаллизации плагиоклаза расплав обедняется алюминием.

Полученные закономерности по особенностям распределений элементов в системах основной-ультраосновной расплав, равновесный со шпинелью, оливином, ортопироксеном, клинопироксеном, плагиоклазом имеют ряд общих черт, что позволяет их обобщить. Существующие отрицательные связи в условиях повышенного давления между содержаниями магния и натрия в расплавах были исследованы более подробно. Была изучена связь содержаний магния в расплавах с величиной $(Na+K)$ с учетом величины давления. Связь стала более сильной и представлена следующими значениями R : расплав, равновесный со шпинелью – $R = -0.78$; расплав, равновесный с оливином – $R = -0.82$; расплав, равновесный с ортопироксеном – $R = -0.86$; расплав, равновесный с клинопироксеном –

$R = -0.82$; расплав, равновесный с плагиоклазом – $R = -0.69$.

Все полученные результаты обобщены нами следующим образом:

1. В диапазоне содержаний SiO_2 33–77 вес. % в силикатных магматических расплавах при равновесной кристаллизации оливина, ортопироксена, клинопироксена, плагиоклаза

пропорциональность между содержаниями кремния в расплаве и в вышеперечисленных минералах практически отсутствует, хотя для плагиоклаза на уровне значений ~ 0.6 корреляция есть. Величина межфазного распределения кремния (для указанных минералов) в виде коэффициента K_D на уровне значений $R = -0.9$ и выше зависима от содержания кремния в расплаве. Это позволяет полагать, что с увеличением содержаний кремния в расплаве он менее

охотно переходит в названные выше минералы. Это в свою очередь позволяет наметить причину, отчасти объясняющую ксеноморфизм кварца в гранитах.

2. Для алюминия, магния и кальция зависимости между их содержаниями в расплаве и в кристаллах указанных минералов более отчетливые; обратно пропорциональные связи K_D с содержаниями этих элементов в расплаве наоборот становятся слабее, чем связь K_D с содержанием кремния.

3. Выявленные нами особенности поведения кремния, алюминия, магния и кальция в многокомпонентной силикатной системе могут представлять и практический интерес. Распространяются ли подобные особенности на металлические расплавные системы, и есть ли зависимость степени связанности величины K_D и содержания элемента (различие в связанности с K_D между кремнием и алюминием, магнием, кальцием), покажут дальнейшие исследования.

4. При кристаллизации шпинели из расплава в условиях повышенного давления расплав обедняется алюминием и магнием. При кристаллизации из расплава оливина, ортопироксена и клинопироксена, независимо от давления, происходит обеднение расплава магнием. При кристаллизации из расплава плагиоклаза, независимо от давления, происходит обеднение расплава алюминием.

5. В системе основной-ультраосновной расплав–sp, ol, орх, срх, pl по корреляции с P–T условиями среди породообразующих элементов выделяются алюминий и магний. Первый наиболее чувствителен к давлению, второй к температуре. В системе основной-ультраосновной расплав–срх, pl чувствительным к давлению становится натрий.

6. В расплавах, равновесных со sp, ol, орх, срх, pl в условиях давления, содержания магния и щелочей связаны отрицательной обратной связью с довольно высокими численными значениями коэффициентов корреляции. Это позволяет полагать, что природные глубинные ультраосновные, возможно и основные расплавы, находящиеся в равновесии с вышеперечисленными минералами, практически не должны содержать в своем составе щелочных элементов. Однако существование подотрядов щелочных вулканических и плутонических пород, а также кимберлитовой и лампроитовой серий противоречит этому положению. Это дает основание предположить гибридный, в самом широком смысле этого слова, генезис этих расплавов и неравновесность их химических составов, и, как следствие, неравновесность минеральных парагенезисов в образовавшихся из них породах.

7. Особенности поведения кремния и щелочей при кристаллизации указанных минералов позволяют объяснить боуэновский тренд, характерный для островодужных серий, кристаллизационной дифференциацией.

8. Исследованные парагенезисы расплав–минерал не охватывают полностью набор основных породообразующих минералов. Неисследованными остались парагенезисы расплав–амфибол, расплав–пижонит и т. д. Поэтому полученные выводы не могут в полной мере быть исчерпывающими, но мы надеемся, что после изучения оставшихся парагенезисов выводы не претерпят принципиальных изменений.

9. Перечисленные выше особенности корреляционных связей элементов с физико-химическими условиями в системе расплав–минерал, вероятно, могут быть полезными в понимании структурных особенностей расплавов и минералов.

Выводы

Были рассмотрены разнообразные варианты распределений породообразующих элементов в системе основной-ультраосновной расплав–один из минералов (sp, ol, орх, срх, pl), которые позволили выявить следующие зависимости и связи:

I. Общие для всех указанных систем расплав–минерал:

1. Создана система уравнений, позволяющая рассчитывать содержания элементов* в расплаве и вычислять величину P–T значений. Уравнения позволяют получить числовое значе-

ние искомой величины и задаться ее границами, исходя из величины среднеквадратичной ошибки.

2. Для некоторых рассчитываемых величин создано несколько (до 8) уравнений, позволяющих рассчитывать данную величину, используя различные варианты наборов используемых содержаний элементов и P–T параметров. Это позволяет выявлять неравновесные концентрации элементов в минерале и расплаве, неравновесные значения температуры и давления.

3. Большинство полученных уравнений не имеют в настоящее время опубликованных аналогов. Тестирование наиболее используемых в настоящее время при петрологических исследованиях опубликованных уравнений показало их худшие статистические характеристики.

II. Зависимости, характерные для отдельных систем.

A. Расплав–шпинель.

1. Уравнения для расчета одной и той же величины для условий атмосферного и повышенных давлений отличаются друг от друга набором элементов и коэффициентами, что, вероятно, указывает на влияние давления на структуры кристаллов шпинели и расплава.

2. Шпинель является барочувствительным минералом и кристаллизуется из расплавов основного-ультраосновного составов до давлений ~30 кб. При давлениях выше 10–15 кб хром вытесняется из решетки шпинели и замещается алюминием, что сопровождается замещением железа магнием.

3. При кристаллизации шпинели под давлением расплав обедняется алюминием и магнием.

Б. Расплав–оливин.

1. Уравнения для расчета одной и той же величины в условиях атмосферного давления и для случая повышенного давления практически идентичны, что, вероятно, свидетельствует о стабильности (?) изоморфной емкости решетки оливина, несмотря на структурные перестройки под давлением (рингвудит, уэдслеит).

2. С увеличением давления оливин равновесен с все более магниезальными расплавами.

3. Содержание СаО в кристаллах оливина, выросших из расплава, содержащего больше 3–5 % СаО должно быть больше 0.1 %. Это позволяет полагать, что составы кристаллов оливина с содержаниями СаО меньше 0.1 вес. % в магматических породах имеют не расплавный генезис.

4. При кристаллизации оливина под давлением происходит обеднение расплава магнием.

В. Расплав–ортопироксен.

1. Уравнения для расчета одной и той же величины для условий атмосферного и повышенных давлений отличаются друг от друга набором элементов и коэффициентами, что, вероятно, отражает влияние давления на структуры кристаллов ортопироксена и расплава.

2. При кристаллизации ортопироксена происходит обеднение магнием расплава.

Г. Расплав–клинопироксен.

1. Уравнения для расчета одной и той же величины для условий атмосферного и повышенных давлений отличаются друг от друга набором элементов и коэффициентами, что, вероятно, отражает влияние давления на структуры клинопироксена и расплава.

2. При кристаллизации клинопироксена из расплава последний обедняется магнием.

Д. Расплав–плагноклаз.

1. Уравнения для расчета одной и той же величины для условий атмосферного и повышенных давлений отличаются друг от друга набором элементов и коэффициентами, что, вероятно, отражает влияние давления на структуры плагноклаза и расплава.

2. При кристаллизации плагноклаза происходит обеднение расплава алюминием и кальцием.

III. Особенности величины K_D .

1. Величина межфазного распределения **кремния** в системе расплав–оливин, расплав–ортопироксен, расплав–клинопироксен, расплав–плагиоклаз в виде коэффициента K_D на уровне значений $R = -0.9$ и выше обратно пропорционально зависима от содержания кремния в расплаве, в то время как связь между содержаниями кремния в расплаве и в каждом из выше названных минералов практически отсутствует. Это позволяет полагать, что с увеличением содержания кремния в расплаве он менее охотно переходит в названные выше минералы и стремится остаться в расплаве. Вероятно, это положение может быть использовано для объяснения поздней кристаллизации кварца в гранитах.

2. Для **алюминия, магния и кальция** обратно пропорциональная связь K_D для этих минералов с содержаниями этих элементов в расплаве становится слабее, но появляется положительная связь между их содержаниями в расплаве и минерале. Наблюдается, аналогично кремнию, стремление этих элементов с увеличением их содержания в расплаве противодействовать их переходу в кристаллическую фазу, но тенденция эта выражена слабее.

3. В свою очередь, содержание кремния прямо пропорционально величинам K_D для алюминия, магния и кальция при кристаллизации указанных минералов. И наоборот, содержания этих элементов в расплаве прямо пропорционально K_D для кремния.

4. Среди породообразующих элементов, наряду с разделением их на сеткообразователи и модификаторы, можно выделить элементы **барочувствительные** и **термочувствительные**. К первым можно отнести **алюминий**, имеющий положительные корреляционные связи с давлением практически во всех изученных нами кристаллических фазах и равновесных с ними расплавах, хотя связи эти в большинстве случаев меньше 0.5.

Термочувствительным элементом является **магний**, содержание которого в расплаве отчетливо пропорционально равновесной температуре. Термочувствительность магния в расплаве, возможно, связана, как и для алюминия, с двойственностью его структурного положения в расплаве и эстафетным механизмом изменения координационного числа с алюминием [9; 16].

5. Положения, высказанные в пунктах 1–4, могут быть полезными для исследований структурных особенностей минералов и расплавов.

6. Внутри самих расплавов, равновесных с указанными фазами, существует отчетливая **обратно пропорциональная связь** ($R \sim -0.7; -0.9$) между содержаниями **магния и суммой щелочей**. Это позволяет полагать, что высокомагнезиальные щелочные расплавы, например кимберлитовые, являются неравновесными и имеют гибридное происхождение. В свете этого антагонизма можно предположить, что повышенная щелочность (умеренно щелочные и щелочные подотряды) обязана привнесу щелочных элементов в расплавы основного-ультраосновного составов в случае их образования при равновесном плавлении.

IV. Барочувствительность породообразующих минералов. В качестве критерия было выбрано соотношение числа экспериментов (где присутствует равновесный данный минерал с расплавом), выполненных при атмосферном давлении (N_1), к числу экспериментов, выполненных в условиях повышенного давления (N_2). Естественно предположить, что равномерность в исследованиях экспериментальных систем (по составам, условиям и т. д.) отсутствует. Но эти результаты в первом приближении, возможно, отражают реальные соотношения.

Полученные соотношения:

Шпинель – $N_1/N_2 \sim 250 \text{ т.}/240 \text{ т.}$ – присутствует в экспериментальных результатах до давлений 30 кб; оливин (и его структурные разности) – $N_1/N_2 \sim 1030 \text{ т.}/760 \text{ т.}$ – присутствует в экспериментальных результатах до давлений 175 кб; ортопироксен – $N_1/N_2 \sim 150 \text{ т.}/550 \text{ т.}$ – присутствует в экспериментальных результатах до давления 110 кб; клинопироксен – $N_1/N_2 \sim 530 \text{ т.}/650 \text{ т.}$; плагиоклаз – $N_1/N_2 \sim 780 \text{ т.}/250 \text{ т.}$ Эти численные соотношения позволяют полагать, что ортопироксен в магмах основного-ультраосновного составов будет преимущественно кристаллизоваться в глубинных условиях, тогда, как плагиоклаз в этих магмах будет кристаллизоваться в приповерхностных условиях. Для шпинели, оливина и клинопироксена, исходя из использованных соотношений, предпочтительные условия не выявились.

Глава 8. Уравнения, полученные по трехфазным и четырехфазным системам расплав–минеральный парагенезис

8.1. Уравнения, полученные для системы расплав–шпинель–оливин

Были получены эмпирические уравнения, в которых используются составы кристаллов шпинели, оливина и расплава и позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин:

I. эксперименты в условиях атмосферного давления (~130 т.) – концентрации в расплаве Si, Ti, Fe³⁺, Fe²⁺, Mg, Fe²⁺/Mg отношение, температуры (4 уравнения), фугитивности кислорода, равновесного распределения элементов между кристаллами шпинели и оливина (3 уравнения);

II. эксперименты в условиях повышенного давления (~170 т.) – концентрации в расплаве Si, Ti (2 уравнения), Fe²⁺, Mg (2 уравнения), Fe²⁺/Mg отношения (2 уравнения), температуру (3 уравнения), P, равновесное распределение элементов между кристаллами шпинели и оливина (5 уравнений).

Расчет содержания **кремния** в расплаве. Уравнение, полученное по экспериментальным данным при атмосферном давлении (~120 т.) имеет коэффициент корреляции R 0.81 и значение χ^2 0.39 (12), что позволяет полагать соответствие среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 нормальному распределению. Низкое значение коэффициента корреляции, вероятно, позволяет использование этого уравнения, как оценочного. Уравнение, полученное по экспериментальным точкам при повышенных давлениях (2–28 кб, ~170 т.), имеет коэффициент корреляции R 0.87 и значение χ^2 2.18 (12), что указывает на нормальность распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 и возможность использования этого уравнения для расчетов содержания кремния в расплаве.

Расчет содержания **титана** в расплаве. Уравнение, полученное по экспериментальным данным при атмосферном давлении (~120 т.) имеет коэффициент корреляции R 0.89 и значение χ^2 1.57 (12), что позволяет полагать соответствие среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 нормальному распределению. Значения этих величин позволяет использование этого уравнения для расчетов содержания титана в расплаве. Уравнения, полученные по экспериментальным точкам при повышенных давлениях (2–28 кб, ~170 т.), имеют коэффициенты корреляции R 0.8; 0.82 и значения χ^2 1.66; 2.45 (12), что указывает на нормальность распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99–0.95 и возможность использования этих уравнений только как оценочных.

Расчет содержания **железа Fe³⁺**. Было получено уравнение (по выборке из экспериментов при атмосферном давлении) с характеристиками R 0.83 и χ^2 1.29 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие нормальному распределению среднеквадратичной ошибки. Низкое значение коэффициента корреляции предполагает использование этого уравнения только для оценочных результатов.

Расчет содержания **железа Fe²⁺** в расплаве. Для выборки по экспериментам в условиях атмосферного давления было получено уравнение, характеризуемое R 0.92 и χ^2 2.18 (12), что позволяет полагать нормальность распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 и использовать это уравнение для расчетов. Уравнение, полученное по выборке в условиях повышенного давления (2–28 кб), имеет значения R 0.93 и χ^2 2.57 (12), что на уровне вероятности 0.95 позволяет полагать нормальное распределение среднеквадратичной ошибки и использовать это уравнение для расчетов суммарного содержания железа в расплаве.

Расчет содержания **магния** в расплаве. По выборке экспериментов при атмосферном давлении было получено уравнение, имеющие характеристики R 0.91 и χ^2 0.92 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 нормальное распределение среднеквадратичной ошибки и использовать это уравнение для расчетов.

Уравнение, полученное по экспериментам в условиях повышенного давления, характеризуется R 0.91 и χ^2 2.74 (12), что позволяет на уровне вероятности 0.95 полагать нормальность распределения среднеквадратичной ошибки и использовать его для расчетов.

Расчет значений **железо-магниевого отношения** в расплаве. По выборке для экспериментов при атмосферном давлении было получено уравнение, позволяющие рассчитывать величины Fe^{2+}/Mg в расплаве. Основанием для этого является значение R 0.98 и χ^2 3.79 (12), что позволяет на уровне 0.9 полагать нормальное распределение среднеквадратичной ошибки. По экспериментам в условиях повышенного давления было рассчитано 2 уравнения, характеризующиеся R 0.96 и значениями χ^2 1.02 и 4.11 (12), что позволяет полагать на уровнях вероятности 0.99 и 0.9 нормальность распределения среднеквадратичной ошибки и использовать оба уравнения для расчетов. Кроме того, соответствие–несоответствие рассчитанных значений Fe^{2+}/Mg отношения в расплаве позволит судить о равновесности содержания титана в расплаве.

Распределение Fe^{2+} и Mg между шпинелью и оливином, равновесными с расплавом, особенности K_D железо-магниевого отношения. В экспериментах в условиях атмосферного давления величина отношение $Fe^{2+}_{ol}/Fe^{2+}_{sp}$ лежит в интервале 0.2–2, практически не зависит от состава расплава и температуры, чувствительна (R 0.66) к содержанию алюминия в шпинели. В экспериментах при повышенном давлении значения этой величины примерно те же – 0.6–2.1, но число влияющих величин и их роль возрастают – Al_m (R 0.62); Al_{sp} (R 0.86); Cr_{sp} (R 0.88); P (R 0.5). В экспериментах при атмосферном давлении численные значения величины Mg_{ol}/Mg_{sp} принимает значения в интервале 2–4.8 и зависит от содержаний Fe^{2+}_m (R -0.72), Mg_m (R -0.58) и T (R -0.88). В условиях повышенного давления диапазон значений величины Mg_{ol}/Mg_{sp} уже (1.9–2.9); отношение зависимо от величин Al_m (R -0.66); Fe^{2+}_m (R 0.53); Al_{sp} (R -0.65); Cr_{sp} (R 0.65). В экспериментах при атмосферном давлении $(Fe^{2+}/Mg)_{sp}/(Fe^{2+}/Mg)_{ol}$ отношение лежит в интервале 0.9–10 и зависит от содержаний Al_{sp} (R -0.76) и Cr_{sp} (R 0.51); в экспериментах при повышенном давлении это отношение численно ограничено интервалом 0.9–5.8 и чувствительно к величинам Al_m (R -0.75); Al_{sp} (R -0.91); Cr_{sp} (R 0.93); P (R -0.42).

Расчеты значений **температуры** равновесия. По экспериментам в условиях атмосферного давления было получено 4 уравнения, характеризующихся значениями R 0.93–0.95 и значениями χ^2 0.86–1.28 (12), что указывает на нормальность распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 и возможность использования этих уравнений для расчетов. Кроме того, сходство–различие полученных по этим уравнениям значений температуры, позволяют судить о равновесности концентраций кремния, алюминия и магния в расплаве. Диапазон рассчитываемых значений температур ~1100–1500 °С. Для повышенного давления были рассчитаны 3 уравнения, которые характеризуются значениями R 0.8–0.86 и χ^2 0.48–1.08 (12), позволяющими полагать, что среднеквадратичная ошибка на уровне вероятности 0.99 распределена нормально, что позволяет использовать эти уравнения для расчетов температуры. Одновременное использование этих уравнений позволяет оценить равновесность в расплаве содержаний магния, кальция и суммы щелочей. Получаемые значения температур лежат в интервале ~1200–1600 °С.

Расчет значений **фугитивности кислорода** (f_{O_2}). Было получено 2 уравнения по выборке для атмосферного давления. Уравнения характеризуются значениями R 0.9; 0.91 и χ^2 2.21 (12) и 3.32 (12), что позволяет на уровне вероятности 0.95 полагать нормальное распределение среднеквадратичной ошибки и использовать оба этих уравнения для расчетов. Диапазон рассчитываемых значений фугитивности лежит в интервале от -13.08 до -3.3.

Расчеты величины **давления**. Было получено 1 уравнение, позволяющее рассчитывать величину давления в интервале 2–28 кб. Уравнение характеризуется значениями R 0.83 и χ^2 1.31 (12), что позволяет полагать нормальность распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99, но низкое значение величины коэффициента корреляции позволяет использовать это уравнение, как оценочное.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав шпинели и оливина. Для экспериментов при атмосферном давлении были получены 3 уравнения, характеризующиеся значениями R 0.96–0.99 и χ^2 1.7–4.78 (12), что позволяет полагать нормальность распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.9–0.99 и использовать их для оценки равновесности этого парагенезиса. Для экспериментов в условиях повышенного давления было получено 5 уравнений (с учетом неравнозначности отражения множества **A** на множество **B** и наоборот), характеризующиеся значениями R 0.95–0.97 и χ^2 0.95–2.11 (12), что позволяет полагать нормальность распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 и все их использовать для оценки равновесности парагенезиса.

Обсуждение результатов

Совместное нахождение минералов групп шпинели и оливина в большинстве видов пород основного-ультраосновного составов является достаточно типичным явлением. В эффузивных разностях пород характерным структурным признаком являются включения мелких кристаллов шпинели во вкрапленники оливина; в интрузивных породах временные соотношения менее определенные и шпинель достаточно часто представлена мелкими кристаллами в интерстициях между более крупными порообразующими силикатными фазами. Этот минеральный парагенезис используется для расчетов значений температуры и фугитивности кислорода в широкой области температур и давлений, включая и область солидуса этого парагенезиса [27; 29; 32; 42; 89; 93; 108], рассматривался этот парагенезис и как геоспидометр [79]. На базе этой пары минералов созданы и достаточно экзотические термометры, например, основанный на распределении изотопов магния (^{24}Mg , ^{25}Mg , ^{26}Mg) [114]. Наиболее используемыми уравнениями для оценок фугитивности кислорода и температуры являются результаты, полученные Ц. Баллхаузом и др. [29].

На рисунке III.П.1 $sp-ol$ представлен результат тестирования уравнения для оценки фугитивности из этой работы на использованной нами выборке для атмосферного давления. В сравнении с двумя уравнениями, полученными нами (R 0.9–0.91; сигма 0.8–0.9 лог ед.; соответствие закону нормального распределения на уровне вероятности 0.95), это уравнение имеет характеристики хуже – N 99; R 0.83; сигма 1.42 лог ед.; χ^2 18 (8).

На рисунке III.П.2 $sp-ol$ представлены результаты тестирования уравнения Ц. Баллхауза и др. [29] для расчета температуры на выборке экспериментов при повышенном давлении – N 109; R 0.43; сигма 106 °C; χ^2 0.91. Эти характеристики (коэффициент корреляции, сигма) значительно хуже аналогичных для полученных нами уравнений на этой выборке и указывают на непригодность этого уравнения в столь широком диапазоне условий.

Расчет значений фугитивности и температуры по полученным нами уравнениям предполагает, что и оливин, и шпинель находятся в равновесии в области ликвидус–солидус. Для природных парагенезисов эти расчеты должны предваряться проверкой на равновесность с использованием 3 уравнений для случая атмосферного давления, или 5 уравнений для случая повышенного давления (2–28 кб). Эти уравнения позволяют судить о равновесности–

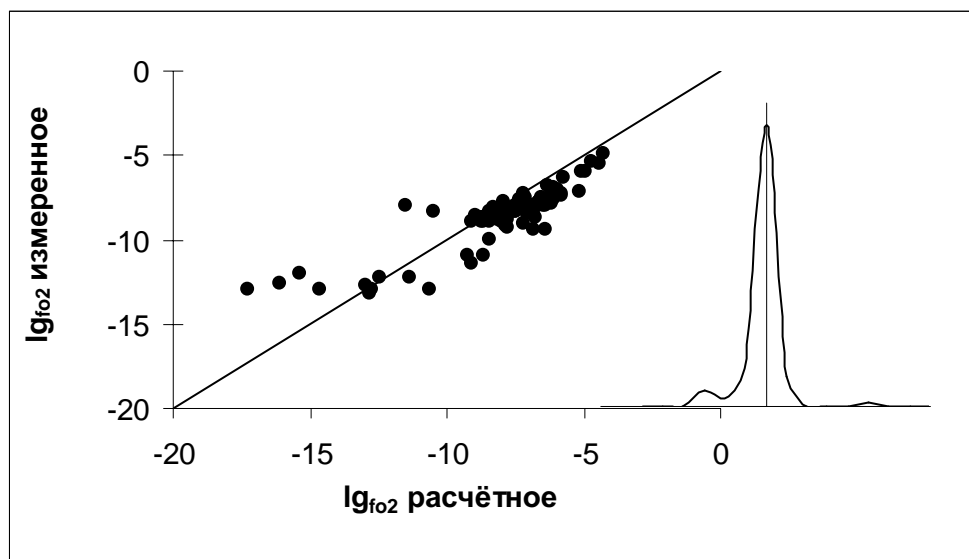


Рис. III.П.1 sp–ol. Зависимость рассчитанных по Ц. Баллхаузу и др. [29] и реальных (измеренных в экспериментах) значений фугитивности кислорода в условиях атмосферного давления.

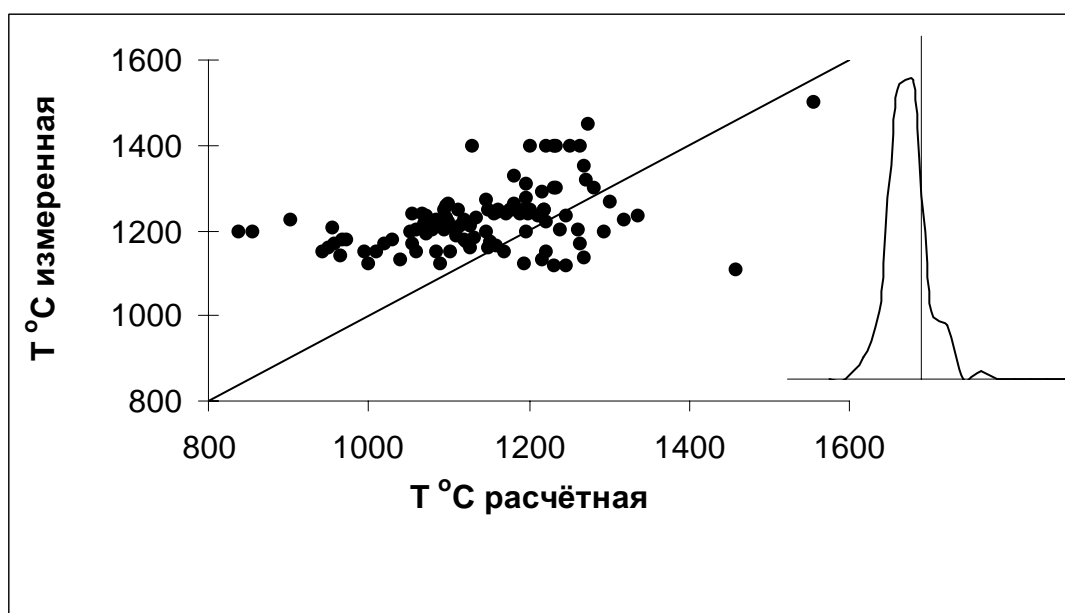


Рис. III.П.2 sp–ol. Зависимость рассчитанных по Ц. Баллхаузу и др. [29] и реальных (измеренных в экспериментах) значений температуры при повышенном давлении.

неравновесности составов минералов этого парагенезиса и о генезисе составов. Экспериментальные данные [61] с привлечением изученных особенностей составов природных ассоциаций этих минералов [19; 89; 95] позволяют по результатам этих расчетов по 5 полученным нами уравнениям судить и о направлении (нагрев или остывание) переуравновешивания шпинель–оливиновой пары. В случае остывания шпинель становится менее магниальной относительно равновесной с данным составом оливина, при нагревании магний наоборот диффундирует из оливина в шпинель. Полезной может быть и одновременная оценка внутреннего равновесия кристалла шпинели.

Парагенезис шпинель–оливин, вероятно, образуется одним из первых при кристаллизации магматических расплавов основного-ультраосновного составов. Поэтому расчеты содержаний железа и магния в расплаве, равновесном с этим парагенезисом, крайне интересны. На рис. III.П.2.2 sp–ol представлено соответствие массивов точек модальных содержаний железа и магния в расплаве, равновесном с этим парагенезисом, а также расчетные содержания железа по формуле (PSPOL5) и магния по формуле (PSPOL7) в этом расплаве в интервале давлений 2–28 кб.

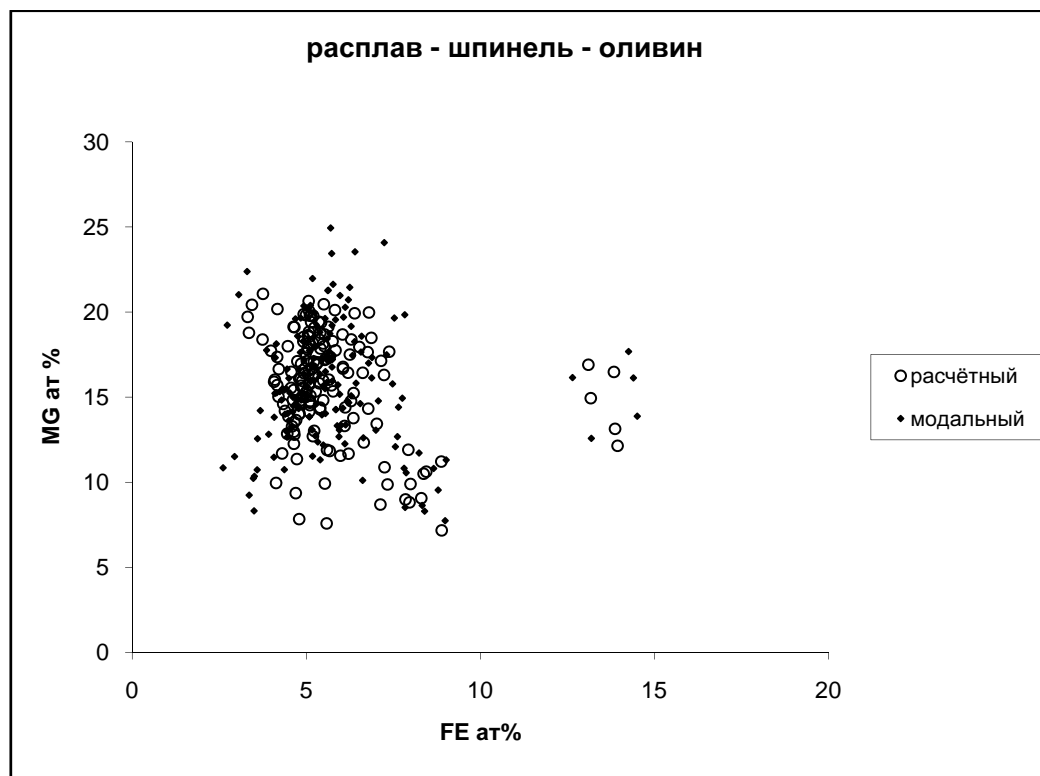


Рис. III.П.2.2 sp–ol. Поля модальных и расчетных содержаний железа и магния в расплаве, равновесном с парагенезисом шпинель–оливин.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин в равновесной системе расплав–шпинель–оливин:

содержание **титана** в расплаве как в условиях атмосферного давления, так и при давлениях до 30 кб; при атмосферном давлении можно также оценить равновесность содержания магния в расплаве;

содержание **алюминия** в расплаве в условиях атмосферного давления и при давлениях от 10 до 28 кб;

содержание **железа Fe³⁺** в расплаве в условиях атмосферного давления;

содержание **железа Fe²⁺** в расплаве в условиях атмосферного давления и судить о равновесности концентраций алюминия и кремния в расплаве, а также при повышенных давлениях;

содержание **магния** в расплаве при атмосферном давлении и оценить достоверность оценки величины равновесной температуры для повышенного давления до 28 кб;

значение **железо-магниевого отношения** в расплаве в условиях атмосферного давления, а при давлениях в интервале 10–28 кб можно судить о равновесности содержания алюминия в расплаве;

значение **Fe³⁺/Fe²⁺ отношения** в расплаве в условиях атмосферного давления;

значение **температуры** (1100–1600 °С) как для условий при атмосферном давлении, так и во всем интервале давлений до 28 кб;

значение **фугитивности кислорода** f_{O_2} (-13.08...-3.3) при атмосферном давлении;

равновесные соотношения элементов, входящих в состав шпинели в условиях атмосферного давления и в интервале давлений 1–15 кб.

2. Уравнение, позволяющее рассчитать величину давления в интервале 2–28 кб, характеризуется низким значением R 0.83 и χ^2 1.31, указывающим на нормальность распределения среднеквадратичной ошибки, равной 1.8 кб. Вероятно, это уравнение можно использовать для численных оценок.

3. Уравнения, позволяющие судить о равновесности–неравновесности составов оливин–шпинелевой пары, дают возможность судить о генезисе составов этих минералов и путях их эволюции.

4. Особенности распределения железа, магния и железо-магниевого отношения между шпинелью и оливином указывают на влияние алюминия и давления на характер этих распределений. В этой минеральной паре накопителем магния является оливин. Так как при кристаллизации основных-ультраосновных расплавов его объемная доля значительно превосходит содержания шпинели, то основным минералом, обедняющим расплав магнием на этапе равновесной кристаллизации этого парагенезиса, будет оливин.

5. На выборке экспериментальных точек, выполненных в условиях атмосферного давления, было протестировано уравнение Ц. Баллхауза и др. [29], позволяющее рассчитать численное значение фугитивности кислорода. В сравнении с полученными нами уравнениями оно имеет худшие характеристики.

6. На выборке экспериментальных точек, выполненных в условиях повышенного давления, было протестировано уравнение Ц. Баллхауза и др. [29], позволяющее рассчитать численную величину равновесной температуры. Тестирование продемонстрировало непригодность этого уравнения в диапазоне составов минералов и стекол этой выборки.

8.2. Уравнения, полученные для расплава, равновесного со шпинелью и оливином

Были получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин:

I. эксперименты в условиях атмосферного давления (~130 т.) – содержания титана в расплаве (1 уравнение);

II. эксперименты в условиях повышенного давления (~170 т.) – содержания магния в расплаве (2 уравнения), температуры (1 уравнение), давления (1 уравнение), равновесного соотношения элементов в расплаве (1 уравнение).

Расчет содержания **титана** в расплаве. По выборке при атмосферном давлении было рассчитано уравнение, позволяющее по составу расплава, равновесного с кристаллами шпинели и оливина, рассчитать содержание титана в нем. Полученное уравнение характеризуется R -0.92 и χ^2 2.74 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие среднеквадратичной ошибки нормальному распределению и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **магния** в расплаве. По выборке при повышенном давлении было получено 2 уравнения с характеристиками R -0.89 и -0.9; χ^2 0.91 и 2.98 (12). Это позволяет полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятностей 0.99

и 0.95 нормальному распределению и использовать оба уравнения для расчетов. Уравнения включают в себя 5 величин и отличаются друг от друга по набору величин в формулах. В первом случае используются температура и давление, во втором – содержания алюминия и кальция в расплаве, что позволяет судить о равновесности расплава.

Расчет значений **температуры** равновесия расплава. По выборке экспериментов при повышенном давлении было получено уравнение с характеристиками R 0.89 и χ^2 2.52 (12). Эти значения позволяют полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать его для расчетов. В уравнении использована прямая пропорциональная зависимость содержания магния от температуры расплава с учетом влияния давления.

Расчет величины **давления**. Было получено 1 уравнение, позволяющее рассчитывать величину давления в интервале 2–28 кб. Уравнение имеет характеристики R -0.84 и χ^2 3.48 (12), что позволяет использовать это уравнение только для оценок рассчитываемого давления.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав расплава, находящегося в равновесии с кристаллами шпинели и оливина в интервале давлений 2–28 кб. Было получено 1 уравнение, характеризуемое значениями величин R -0.94 и χ^2 1.33 (12). Численные значения χ^2 позволяют на уровне вероятности 0.99 полагать, что распределение среднеквадратичной ошибки соответствует нормальному распределению и использовать эти уравнения для расчетов. Равновесными в расплаве являются, с одной стороны, концентрации магния и кальция с учетом температуры, с другой – титана и суммы щелочей.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитать численные значения следующих величин в равновесном с кристаллами шпинели и оливина расплаве:

содержания **титана** в условиях атмосферного давления;

магния в условиях давлений до 28 кб;

значение **температуры**, вычисляемое по составу расплава до давлений 28 кб;

величину **давления** по составу расплава;

равновесные соотношения ряда элементов в расплаве в условиях повышенного давления.

2. Полученные уравнения могут быть использованы для расчетов указанных величин. Исключение составляет уравнение для расчета величины давления, которое может быть использовано только для оценок.

3. Полученные уравнения могут быть использованы совместно с уравнениями, использующими составы шпинели и оливина для расчета равновесного состава расплава с использованием итерационного метода. В частности, это позволит внести коррекцию в состав расплавных включений имеющих, как правило, достаточно большой разброс составов в пределах одного кристалла.

8.3. Уравнения, полученные для системы расплав–шпинель–ортопироксен

Были получены эмпирические уравнения, которые позволяют, используя составы кристаллов шпинели, ортопироксена и расплава, рассчитывать численные значения следующих величин в условиях повышенного (до 20 кб) давления (~160 т.) – концентрации в расплаве Ti , Al , Fe^{2+} , Mg (2 уравнения), Fe^{2+}/Mg отношения, температуры, P , равновесного распределения элементов между кристаллами шпинели и ортопироксена (3 уравнения).

Для условий атмосферного давления выборка малочисленна и представлена менее чем 50 т., поэтому расчеты для этого массива данных не проводились.

Расчет содержания **титана** в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики R 0.89 и χ^2 1.16 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 нормальность распределения среднеквадратичной ошибки и возможность использования этого уравнения для расчетов.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики R 0.9 и χ^2 1.28 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 нормальность распределения среднеквадратичной ошибки и возможность использования этого уравнения для расчетов.

Расчет содержания **железа** в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики R 0.92 и χ^2 1.29 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 нормальность распределения среднеквадратичной ошибки и возможность использования этого уравнения для расчетов.

Расчет содержания **магния** в расплаве. Было получено 2 уравнения, имеющие характеристики R 0.91; 0.9 и χ^2 1.29 (12); 2.08 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 и 0.95 нормальность распределения среднеквадратичной ошибки и возможность использования этих уравнений для расчетов.

Расчет значений **железо-магниевого отношения** в расплаве. По экспериментам в условиях повышенного давления было рассчитано 1 уравнение, характеризуемое R 0.97 и χ^2 6.51 (12), что позволяет использовать это уравнение только для оценочных результатов.

Распределение Fe^{2+} и **Mg** между шпинелью и ортопироксеном, равновесными с расплавом, особенности K_D железо-магниевого отношения. Величина отношения $Fe^{2+}_{op}/Fe^{2+}_{sp}$ лежит в интервале 0.4–1.4. Влияющие величины представлены Al_m (R 0.58); Al_{sp} (R 0.8); Cr_{sp}

(R -0.84); **P** (R 0.32), что подобно аналогичным связям для парагенезиса шпинель–оливин. Величина Mg_{op}/Mg_{sp} принимает значения в интервале 1.2–2.1 и зависима от величин Al_m

(R -0.64); Ti_{sp} (R 0.55); Al_{sp} (R -0.61); Fe^{3+}_{sp} (R 0.5); Cr_{sp} (R 0.57) и **P** (R -0.31). Величина отношения $(Fe^{2+}/Mg)_{op}/(Fe^{2+}/Mg)_{sp}$ лежит в интервале 0.25–1.1, зависит от Al_m (R 0.61); Al_{sp} (R 0.82); Cr_{sp} (R -0.82); **P** (R 0.36) и подобна по своим связям аналогичной обратной величине для парагенезиса шпинель–оливин.

Расчеты значений **температуры** равновесия. По экспериментальным результатам при повышенном давлении было рассчитано 1 уравнение, которое характеризуется значениями R 0.87 и χ^2 2.24 (12), позволяющим полагать нормальное распределение среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 и использовать это уравнение для расчетов температуры в интервале ~1200–1450 °С и диапазоне давлений 10–20 кб.

Создать приемлемое уравнение для расчета **давления** в системе расплав–шпинель–ортопироксен не удалось. Влияние давления на межфазное распределение элементов существует, но поднять коэффициент корреляции для полученной зависимости выше 0.84 не удалось.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав шпинели и ортопироксена. Было получено 3 уравнения с характеристиками R 0.95; 0.91 и 0.88; χ^2 1.79 (12); 1.18 (12); 1.58 (12). Эти характеристики свидетельствуют о соответствии распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 нормальному закону распределения и позволяют использовать эти уравнения для расчетов.

Обсуждение результатов

Для парагенезиса шпинель–ортопироксен предложено несколько геотермометров в области солидуса [63; 111], которые основаны на межфазном распределении железа, магния, кальция и алюминия и базируются на более ранних работах [47;49 и др.]. Для области ликвидуса уравнений, подобных полученным нами, пока нет.

Выводы

1. Получены уравнения, позволяющие рассчитывать величины содержания **титана, алюминия, железа, магния**, значения **температуры и равновесность** с расплавом шпинель–ортопироксенового парагенезиса.

2. Значение железо-магниевого отношения, полученное по соответствующему уравнению, можно использовать только как оценочное.

3. Численное значение (> 1) распределения магния между ортопироксеном и шпинелью можно использовать для выделения магматического парагенезиса.

4. Аналогов полученным уравнениям нет.

8.4. Уравнения, полученные для расплава, равновесного со шпинелью и ортопироксеном

Данные, полученные в условиях атмосферного давления малочисленны (< 50 т.), поэтому обработка их не производилась. По массиву данных, полученных в условиях повышенного давления (~ 160 т.) было получено 2 уравнения, позволяющих определять содержание магния в расплаве и величину давления.

Расчет содержания **магния** в расплаве. Было получено 1 уравнение с характеристиками R -0.93 и χ^2 2.27 (12). Это позволяет полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятностей 0.95 нормальному распределению и использовать оба уравнения для расчетов.

Расчет величины **давления**. Было получено 1 уравнение с характеристиками R 0.83 и χ^2 1.88 (12), что позволяет использовать это уравнение только для оценочных результатов.

Заключение

1. Получено уравнение, позволяющее рассчитывать содержание магния в расплаве.

2. Уравнение для определения давления может быть использовано только для оценочных результатов.

8.5. Уравнения, полученные для системы расплав–шпинель–клинопироксен

Были получены эмпирические уравнения, которые позволяют, используя составы кристаллов шпинели, клинопироксена и расплава, рассчитывать численные значения следующих величин в условиях повышенного (до 20 кб) давления (~ 150 т.) – концентрации в расплаве Ti , Al , Fe^{2+} , Mg (2 уравнения), Ca (3 уравнения), Na , Cr , Fe^{2+}/Mg отношения, температуры, P , равновесного распределения элементов между кристаллами шпинели и клинопироксена (3 уравнения).

Для условий атмосферного давления выборка малочисленна и представлена < 50 т., поэтому расчеты для этого массива данных не проводились.

Расчет содержания **титана** в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики R 0.91 и χ^2 2.7 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 нормальность распределения среднеквадратичной ошибки и возможность использования этого уравнения для расчетов.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики R 0.88 и χ^2 5.37 (12). Характеристики полученного уравнения указывают, что среднеквадратичная ошибка не подчиняется нормальному закону и данное уравнение можно использовать только для оценочных результатов.

Расчет содержания **железа** в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики R 0.95 и χ^2 4.3 (12). Характеристики показывают, что с некоторой долей осторожности данное уравнение может быть использовано для расчетов, т. к. на уровне вероятности ~ 0.9 можно допустить нормальность распределения среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержания **магния** в расплаве. Было получено 2 уравнения, имеющие характеристики R 0.95; 0.94 и χ^2 2.59 (12); 1.93 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 и 0.99 нормальность распределения среднеквадратичной ошибки и возможность использования этих уравнений для расчетов.

Расчет содержания **кальция** в расплаве. Было получено 3 уравнения, имеющие характеристики R -0.96; -0.93; -0.89 и χ^2 0.75 (12); 0.28 (12); 0.55 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 для всех этих уравнений нормальность распределения среднеквадратичной ошибки и возможность использования их для расчетов, оценивая при этом равновесность части элементов расплава и правильность расчетов давления.

Расчет содержания **натрия** в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики R 0.85 и χ^2 2.03 (12). Характеристики показывают, что с некоторой долей осторожности из-за низкого значения R данное уравнение может быть использовано для расчетов, т. к. на уровне вероятности 0.99 можно полагать нормальность распределения среднеквадратичной ошибки.

Расчет содержания **хрома** в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики R 0.88 и χ^2 2.42 (12). Характеристики показывают, что на уровне вероятности 0.95 можно полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет значений **железо-магниевого отношения** в расплаве. По экспериментам в условиях повышенного давления было рассчитано 1 уравнение, характеризующее R 0.96 и χ^2 5.69 (12), что позволяет использовать это уравнение только для оценочных результатов.

Распределение **Al**, **Fe²⁺** и **Mg** между шпинелью и клинопироксеном, равновесными с расплавом; особенности **K_D** железо-магниевого отношения. Значения отношения Al_{sp}/Al_{cpx} лежат в интервале 3.9–14.7. Влияющими величинами являются **Si_{cpx}** (R 0.7); **Al_{cpx}** (R -0.74); **P** (R -0.42). Величина отношения $Fe^{2+}_{cpx}/Fe^{2+}_{sp}$ лежит в интервале 0.9–3.3 (значения меньше 1 представлены всего несколькими точками). Влияющими величинами являются **Si_m** (R 0.47); **Al_{sp}** (R -0.8); **Cr_{sp}** (R 0.83); **Si_{av}** (R 0.62); **Al_{av}** (R -0.67); **Ca_{av}** (R 0.59); **Cr_{av}** (R 0.8); **P** (R -0.57) и отличаются от связей для парагенезиса шпинель–ортопироксен. Величины Mg_{av}/Mg_{sp} принимают значения в интервале 0.75–1.7 (значения меньше 1 составляют большинство) и зависят от **Al_m** (R -0.67); **Fe_m** (R 0.64); **Ti_{sp}** (R 0.61); **Fe³⁺_{sp}** (R 0.63); **Fe²⁺_{sp}** (R 0.72); **Mg_{sp}** (R -0.71); **Fe_{av}** (R 0.57); **Ca_{av}** (R -0.61). Величина отношения $(Fe^{2+}/Mg)_{op}/(Fe^{2+}/Mg)_{sp}$ лежит в интервале 0.3–1.2 (большинство значений меньше единицы) и зависит от **Al_m** (R 0.5); **Al_{sp}** (R 0.82); **Cr_{sp}** (R -0.84); **Si_{av}** (R -0.66); **Al_{av}** (R 0.71); **Cr_{av}** (R -0.8); **P** (R 0.36) и отчасти подобна своими связями парагенезису шпинель–ортопироксен.

Расчеты значений **температуры** равновесия. По экспериментальным результатам при повышенном давлении было рассчитано 1 уравнение, которое характеризуется значениями R 0.87 и χ^2 2.06 (12), позволяющими полагать, что среднеквадратичная ошибка на уровне вероятности 0.99 распределена нормально. Это уравнение можно использовать для расчетов температуры в интервале ~ 1150 – 1450 °C и диапазоне давлений 10–20 кб.

Расчет величины **давления**. В системе расплав–шпинель–клинопироксен удалось создать одно уравнение с характеристиками R 0.9 и χ^2 0.98 (8). Эти характеристики свидетельствуют

о соответствии распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 нормальному закону распределения и позволяют использовать это уравнение для расчетов.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав шпинели и клинопироксена. Было получено 3 уравнения с характеристиками R 0.97; 0.94 и 0.91; χ^2 1.35 (12); 4.14 (12) и 0.52 (12). Эти характеристики свидетельствуют о соответствии распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99, 0.9 и 0.99 нормальному закону распределения и позволяют использовать эти уравнения для расчетов.

Обсуждение результатов

В работе С. Вебба и Б. Вуда [110] была рассмотрена возможность использования распределения Al и Cr между равновесными шпинелью и клинопироксеном для температурной оценки равновесия, однако распространения этот геотермометр не получил. Полученные нами ликвидусные термометр и барометр пока аналогов не имеют.

Выводы

1. Получены уравнения, позволяющие рассчитывать следующие величины: содержания титана, железа, магния, кальция, натрия и хрома; значения температуры, давления и равновесности шпинель–клинопироксенового парагенезиса.
2. Значения железо-магниевого отношения и содержание алюминия в расплаве, полученные по соответствующим уравнениям, можно использовать только как оценочные.
3. Численное значение (> 1) распределения железа между авгитом и шпинелью можно использовать для выделения магматического парагенезиса.
4. Аналогов полученным уравнениям нет.

8.6. Уравнения, полученные для расплава, равновесного со шпинелью и клинопироксеном

Данные, полученные в условиях атмосферного давления малочисленны (< 50 т.), поэтому обработка их не производилась. По массиву данных, полученных в условиях повышенного давления (~ 150 т.) было получено 2 уравнения, позволяющих определять содержание магния в расплаве и величину давления.

Расчет содержания **магния** в расплаве. Было получено 1 уравнение с характеристиками R -0.93 и χ^2 2.27 (12). Это позволяет полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятностей 0.95 нормальному распределению и использовать оба уравнения для расчетов.

Расчет величины **давления**. Было получено 1 уравнение с характеристиками R 0.83 и χ^2 1.88 (12), что позволяет использовать это уравнение только для оценочных результатов.

Заключение

1. Получено уравнение, позволяющее рассчитывать содержание магния в расплаве.
2. Уравнение для определения давления может быть использовано только для оценочных результатов.

8.7. Уравнения, полученные для системы расплав–оливин–ортопироксен

Для выборки в условиях атмосферного давления (54 т.) были получены уравнения, позволяющие рассчитывать следующие величины: содержания в расплаве кремния (2 уравнения), железа, магния, кальция, хрома; значения температуры (3 уравнения); значение фугитивности кислорода и равновесное распределение элементов между оливином и ортопироксеном. Эти уравнения, за исключением уравнений для расчета содержаний кальция в расплаве, значений фугитивности кислорода и равновесного распределения элементов между минералами, могут быть использованы для расчетов.

Все эти уравнения далее не обсуждаются, т. к. объем использованной выборки 54 т.

В условиях повышенного давления (до 80 кб; ~400 т.) были получены уравнения, позволяющие производить расчеты концентрации в расплаве Si (2 уравнения), Ti, Al, Fe²⁺, Mg, Ca, Na, Cr, Fe/Mg отношения (2 уравнения), температуры (3 уравнения), P (2 уравнения), равновесного распределения элементов между кристаллами оливина и ортопироксена (3 уравнения).

Расчет содержания **кремния** в расплаве. Полученные два уравнения имеют коэффициенты корреляции R 0.82 и 0.84, значения χ^2 1.4 (12) и 1.09 (12). Несмотря на приемлемые для расчетов значения χ^2 , уравнения характеризуются низкими значениями R, что позволяет использовать оба уравнения только для оценочных результатов.

Расчет содержания **титана** в расплаве. Полученное уравнение имеет коэффициент корреляции 0.85 и значение χ^2 5,82, что не позволяет говорить о соответствии нормальному закону распределения среднеквадратичной ошибки и уравнение можно использовать только как оценочное.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Полученное уравнение имеет значение R -0.93 и χ^2 0.5 (12), что позволяет полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **железа Fe²⁺** в расплаве. Было получено 1 уравнение с характеристиками R 0.92 и χ^2 3.1 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному распределению и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **магния** в расплаве. Было получено одно уравнение, имеющее характеристики R 0.93 и χ^2 4.02 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.9 нормальность распределения среднеквадратичной ошибки и возможность использования этих уравнений для расчетов.

Расчет содержания **кальция** в расплаве. Было получено одно уравнение, имеющие характеристики R 0.92 и χ^2 1.45 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **натрия** в расплаве. Было получено одно уравнение, имеющие характеристики R -0.93 и χ^2 2.76 (12). Эти значения позволяют полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **хрома** в расплаве. Было получено одно уравнение, имеющие характеристики R 0.89 и χ^2 1.97 (12). Эти значения позволяют полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет значений **железо-магниевого отношения** в расплаве. Было рассчитано два уравнения с характеристиками R 0.97; 0.97 и значениями χ^2 12.32 (12) и 9.94 (12), что позволяет использовать эти уравнения только для оценочных результатов.

Распределение Fe^{2+} и Mg между оливином и ортопироксеном, равновесных с расплавом; особенности K_D железо-магниевого отношения. Величина отношение $Fe^{2+}_{ol}/Fe^{2+}_{op}$ лежит в интервале 0.83–2.6, значения меньше единицы имеют всего несколько точек. Отчетливо влияющих величин нет. Величина Mg_{ol}/Mg_{op} отношения принимает значения в интервале 1.2–1.7 и зависит от параметров Al_m (R 0.5); Si_{op} (R -0.61); Al_{op} (R 0.7); Cr_{op} (R 0.56). Величина отношения $(Fe^{2+}/Mg)_{ol}/(Fe^{2+}/Mg)_{op}$ лежит в интервале 0.5–1.8 и практически независима, т. к. все связи этой величины имеют значения R меньше 0.4.

Расчеты значений **температуры** равновесия. По имеющимся экспериментальным результатам были рассчитаны 3 уравнения, которые характеризуются значениями R 0.87; 0.93; 0.93 и χ^2 1.16 (12); 1.39 (12) и 2.6 (12), позволяющими полагать, что среднеквадратичная ошибка на уровне вероятности 0.99–0.95 распределена в соответствии с законом нормального распределения, и использовать эти уравнения для расчетов, а также судить о равновесности концентраций кремния, алюминия, магния и правдоподобия расчета величины давления.

Расчеты величины **давления**. Было получено 2 уравнения, позволяющие рассчитывать величину давления в интервалах 5–20 кб и 21–80 кб. Первое уравнение (интервал 5–20 кб) имеет характеристики R 0.82 и χ^2 3.05 (12), которые позволяют использовать его для получения только оценочных результатов. Второе уравнение (интервал 21–80 кб) обладает характеристиками R 0.97 и χ^2 1.48 (8), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.9 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав оливина и ортопироксена.

Было получено 3 уравнения, обладающих характеристиками R 0.98; 0.94; 0.98 и χ^2 12.34 (12); 2.5 (12); 12.31 (12). По этим результатам только второе уравнение может быть использовано для расчетов, первое и третье уравнения пригодны лишь для оценочных результатов.

Обсуждение результатов

Парагенезис оливин–ортопироксен достаточно типичен для магматических пород глубинного генезиса. Создан ряд геотермометров и геобарометров, использующих различные варианты распределений элементов между ними [10; 23; 33; 87; 96]. Из перечисленных выше к используемым можно отнести барометр, предложенный в работе К. Путирки, уравнение 42 [87]. Результаты тестирования этого уравнения представлены ниже. Тестированное уравнение для давлений меньше 30 кб (рис. III.1 ol–орх) имеет характеристики R 0.91 и χ^2 5.67 (12), что позволяет его использовать только для оценочных результатов. Полученное нами уравнение также может быть использовано только как оценочное. Тестирование в интервале давлений 30–80 кб. показало результаты R 0.81; χ^2 0.31 (9) и сигма 5.4 кб, что позволяет использовать это уравнение только, как оценочное. Полученное нами уравнение для этого интервала (см. главу II) имеет характеристики R 0.97, χ^2 1.48 (8) и сигма 4 кб, что позволяет использовать его для расчетов.

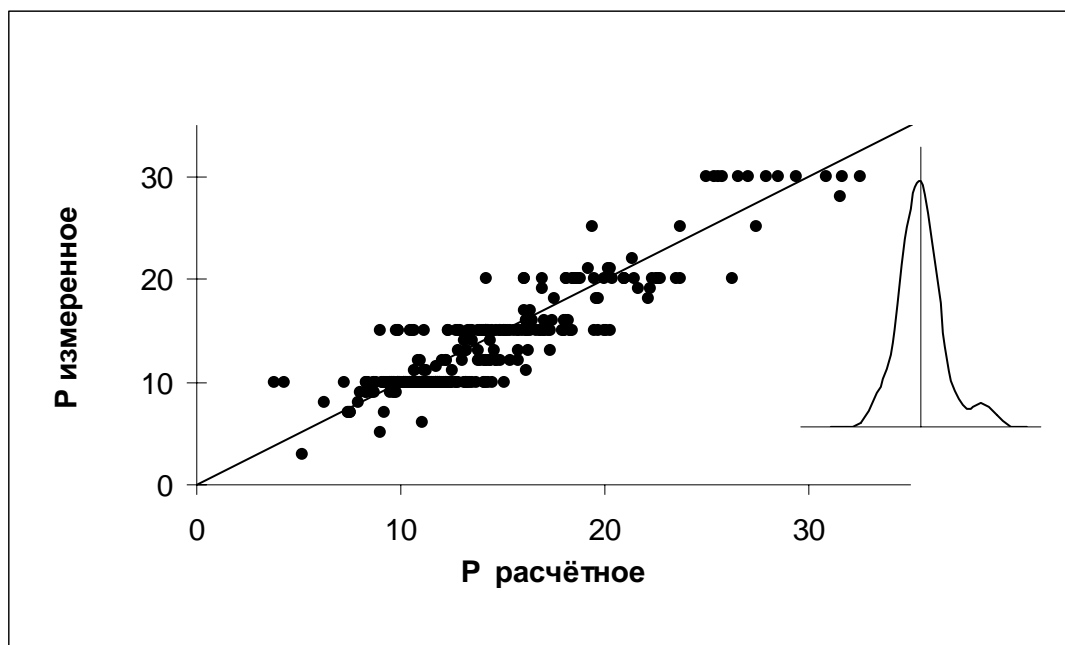


Рис. III.П.1 ol–орх. Зависимость рассчитанных по К. Путирка [87] и реальных (измеренных в экспериментах) значений давления [N 349, N₁ 347, R 0.91, сигма 2.09, χ^2 5.67(12)].

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин в равновесной системе расплав–оливин–ортопироксен, находящейся под давлением: содержания в расплаве алюминия, железа, магния (2 уравнения), кальция, натрия, хрома; температуры (3 уравнения), давления в интервале 21–80 кб, равновесного распределения элементов между оливином и ортопироксеном.

2. Уравнения, позволяющие рассчитать содержания кремния, титана, железо-магниевого отношения в расплаве, величину давления в интервале 3–20 кб, и два уравнения, позволяющие рассчитывать равновесное распределение элементов между оливином и ортопироксеном, можно использовать только как оценочные.

3. В этой минеральной паре (судя по K_D для железа и магния) накопителем магния и железа является оливин. Содержания и соотношения магния и железа в этих минералах могут служить указателем на последующие преобразования, т. к. ортопироксен более стоек ко вторичным изменениям. Это связано с тем, что в формуле оливина (в пересчете на 4 кислорода) на 1 ион кремния приходится 2 иона железа + магний, а в формуле ортопироксена (в пересчете на 6 кислорода) на 2 иона кремния приходится 2 иона магний + железо [11].

4. Тестирование барометрического уравнения К. Путирки [87] показало, что в интервале давлений 3–20 кб это уравнение, как и полученное нами, может быть использовано только как оценочное. В интервале давлений 20–80 кб тестируемое уравнение также может быть использовано только как оценочное. Полученное нами уравнение для интервала 20–80 кб может быть использовано для расчетов.

5. Уравнения, позволяющие рассчитывать содержания элементов в расплаве, пока аналогов не имеют.

Данные, полученные в условиях атмосферного давления малочисленны (~50 т.), поэтому обработка их не производилась. По массиву экспериментальных данных, полученных в ус-

ловиях повышенного давления (~400 т.) были получены уравнения, позволяющие рассчитывать следующие величины: содержание магния в расплаве, численные значения температуры и давления, равновесность состава расплава.

8.8. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с оливином–ортопироксеном

Содержание **магния** в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики R -0.92 и χ^2 4.7 (12), что позволяет, с некоторой долей осторожности, полагать на уровне вероятности 0.9 нормальность распределения среднеквадратичной ошибки и возможность использования этого уравнения для расчетов.

Расчет значений **температуры**. Уравнение для расчета температуры имеет характеристики R -0.93 и χ^2 2.97 (12). Значение χ^2 позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному распределению и использовать это уравнение для расчета температуры.

Расчет величины **давления**. Уравнение для расчета давления в пределах 80 кб имеет характеристики R 0.88 и χ^2 3 (12). Эти характеристики позволяют полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 нормальному закону распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Равновесные соотношения элементов в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики R -0.94 и χ^2 3.29 (12). Эти характеристики позволяют полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 нормальному закону распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Обсуждение результатов

На выборке расплав (стекло), равновесный с парагенезисом оливин–ортопироксен, было протестировано уравнение для расчета давления, предложенное в работе Ф. Альбарде [26]. Формула тестировалась на трех вариантах выборки: вся выборка до значений 80 кб; часть выборки до максимальных значений 30 кб; часть выборки в интервале значений 30–80 кб.

Были получены следующие результаты: полная выборка – R 0.9 и χ^2 8.94 (12); выборка, ограниченная значением 30 кб – R 0.93 и χ^2 6.6 (12); выборка в интервале 30–80 кб – R 0.66 и χ^2 0.2 (9). Полученные результаты свидетельствуют, что тестируемое уравнение может быть использовано только как оценочное для интервала давлений до 30 кб и не пригодно как для всего интервала, так и в случае давлений больше 30 кб. Ниже представлен график результатов тестирования по выборке в интервале давлений до 30 кб.

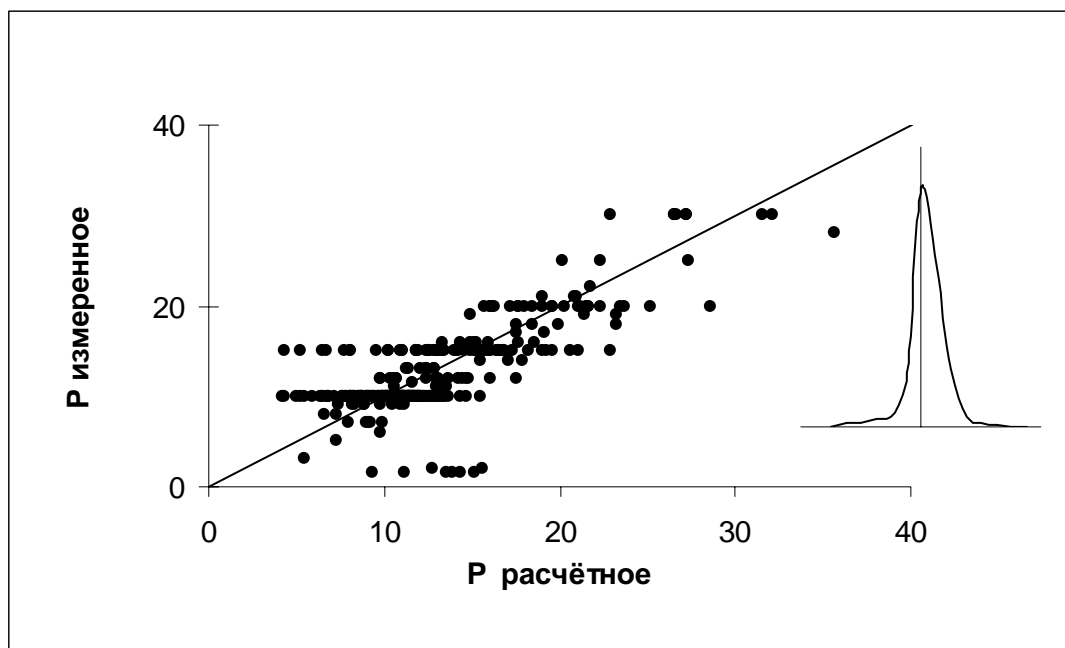


Рис. III.1.1 gl–ol–орх. Зависимость рассчитанных по Ф. Альбарде [26] и реальных (измеренных в экспериментах) значений давления [N 355; N_1 355; R 0.93; сигма 2.31; χ^2 6.6 (12)].

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин в равновесном с оливин–ортопироксеновым парагенезисом расплаве в условиях повышенного давления: содержание в расплаве **магния**, величину **температуры**, значение **давления** в интервале 21–0 кб и **равновесные** соотношения элементов в расплаве.
2. В диапазоне давлений до 20 кб по полученному нами уравнению возможны только оценочные результаты.
3. Тестирование барометрического уравнения Ф. Альбарде [26] показало, что оно может быть использовано для получения оценочных результатов для диапазона давлений до 30 кб.

8.9. Уравнения, полученные для системы расплав–оливин–клинопироксен

Для выборки в условиях атмосферного давления (~400 т.) были получены уравнения, позволяющие рассчитывать следующие величины: содержания в расплаве кремния, титана, алюминия (2 уравнения), железа (2 уравнения), магния (2 уравнения), кальция (2 уравнения), натрия, хрома, значения температуры (3 уравнения), равновесное распределение элементов между оливином и клинопироксеном (4 уравнения). В условиях повышенного давления (до 50 кб; ~350 т.) были получены уравнения, позволяющие производить следующие расчеты: концентрации в расплаве Si, Ti (2 уравнения), Al, Fe^{2+} , Mg (3 уравнения), Ca (2 уравнения), Na, $\Sigma(Na+K)$, Cr, Fe^{2+}/Mg отношение, величину температуры (3 уравнения), значение P (3 уравнения), равновесное распределение элементов между кристаллами оливина и клинопироксена (4 уравнения).

Расчет содержания **кремния** в расплаве. Уравнение, полученное для условий атмосферного давления, имеет характеристики R -0.91 и χ^2 2.82 (12), что позволяет полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов. Уравнение, полученное по экспериментальным дан-

ным в условиях повышенного давления, обладает близкими характеристиками R -0.87 и χ^2 2.91 (12), что также позволяет использовать его для расчетов.

Расчет содержания **титана** в расплаве. Уравнение, полученное по экспериментам в условиях атмосферного давления, имеет коэффициент корреляции 0.83 и значение χ^2 2.06 (12), что позволяет говорить о соответствии нормальному закону распределения среднеквадратичной ошибки, но низкое значение величины R свидетельствует о возможности использования этого уравнения только для получения оценочных результатов. Два уравнения, полученные по результатам экспериментов в условиях повышенного давления, имеют характеристики R 0.88; 0.92 и χ^2 4.21 (12); 1.67 (12). Эти статистические характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.99 и ~0.9 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать оба уравнения для расчетов, оценивая параллельно достоверность содержания железа в расплаве.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Уравнения, полученные для условий атмосферного давления, имеют характеристики R 0.89 и 0.9; χ^2 3.07 (12) и 2.89 (12). Эти характеристики позволяют полагать соответствие на уровне вероятности 0.95 распределений среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения, использовать эти уравнения для расчетов и судить о равновесности содержаний в расплаве магния и щелочей. Уравнение, полученное по экспериментальным результатам, проведенным под давлением, имеет характеристики R -0.87 и χ^2 2.07 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **железа** в расплаве. По результатам экспериментов, выполненных в условиях атмосферного давления, было получено 2 уравнения с характеристиками R -0.88 и 0.95; χ^2 3.5 (12) и 3.52 (12), что позволяет на уровне вероятности 0.9 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчета. Кроме того, расчеты по этим уравнениям позволят оценить равновесность содержаний магния и щелочей в расплаве. Два уравнения, полученные по экспериментальным результатам, выполненным под давлением, имеют характеристики R 0.92 и (0.95); χ^2 2.43 (12) и 3.48 (12), что указывает на соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 закону нормального распределения и использовать оба уравнения для расчетов. Кроме того, эти уравнения дают возможность судить о равновесности содержания кальция в расплаве и правдоподобии численной величины давления.

Расчет содержания **магния** в расплаве. Два уравнения, полученные по экспериментам, выполненным при атмосферном давлении, имеют характеристики R 0.93 и 0.94; χ^2 4.91 (12) и 2.01 (12). Эти характеристики позволяют использовать для расчетов только второе уравнение; первое пригодно только для оценочных результатов. По экспериментальным результатам, выполненным под давлением, было получено 3 уравнения с характеристиками R 0.9; 0.92; 0.93 и χ^2 2.37 (12); 7.21 (12); 2.63 (12). Первое и третье уравнения по своим характеристикам могут быть использованы для расчетов, полагая на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения для них среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения. Второе уравнение из-за величины χ^2 может быть использовано только для оценочных результатов. Первое и третье уравнения позволяют также судить о равновесности содержания кальция, щелочей и алюминия в расплаве и правдоподобии величины давления.

Расчет содержания **кальция** в расплаве. По экспериментальным результатам в условиях атмосферного давления было получено 2 уравнения с характеристиками R -0.85 и 0.95; χ^2 5.89 (12) и 5.65 (12). Численные значения χ^2 позволяют использовать результаты расчетов по этим формулам только для оценок предполагаемых концентраций.

Уравнения, полученные по экспериментальным результатам в условиях повышенного давления, имеют характеристики R 0.92 и -0.9; χ^2 7.42 (12) и 3.25 (12). Из этих уравнений только второе, согласно величине χ^2 , пригодно для расчетов.

Расчет содержания **натрия** в расплаве. Уравнение, полученное по выборке экспериментов в условиях атмосферного давления, имеет характеристики R 0.8 и χ^2 3.94 (12). Эти характеристики позволяют использовать его для получения только оценочных результатов. Уравнение, полученное по экспериментальным результатам в условиях повышенного давления, имеет характеристики R -0.87 и χ^2 3.35 (12). Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет $\Sigma(\text{Na}+\text{K})$ в расплаве. Было получено уравнение по экспериментам в условиях повышенного давления с характеристиками R -0.94 и χ^2 2.05 (12), которые позволяют использовать его для расчетов.

Содержание **хрома** в расплаве. Уравнение, полученное по экспериментальным результатам в условиях атмосферного давления, имеет характеристики R 0.88 и χ^2 2.03 (12), что позволяет использовать его для расчетов. Уравнение, полученное по экспериментальным результатам, выполненным под давлением, обладает характеристиками R 0.86 и χ^2 2.2 (12). Это позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет значений **железо-магниевого отношения** в расплаве. По выборке, созданной из экспериментальных результатов, полученных в условиях повышенного давления, было получено уравнение, характеризуемое значениями R 0.96 и χ^2 18.7 (12), что делает это уравнение пригодным только для расчета оценочных значений железо-магниевого отношения.

Распределение Fe^{2+} и Mg между оливином и клинопироксеном, равновесными с расплавом, особенности K_D железо-магниевого отношения. В экспериментах в условиях атмосферного давления значения отношения $\text{Fe}^{2+}_{\text{ол}}/\text{Fe}^{2+}_{\text{срх}}$ лежат в интервале 0.12–6.8 и слабо зависят от других величин; в экспериментальных результатах при повышенном давлении диапазон сужается и представлен значениями больше единицы (1–4). Влияющими величинами являются $\text{Mg}_{\text{срх}}$ (R -0.5); $\text{Ca}_{\text{срх}}$ (R 0.63); T (R -0.41); P (R -0.43). Величины $\text{Mg}_{\text{ол}}/\text{Mg}_{\text{срх}}$ в условиях атмосферного давления принимают значения в интервале 0.95–4.1; значения меньше единицы имеют всего несколько точек и зависят от величин Si_m (R -0.49); Al_m (R 0.68); Fe_m (R -0.61); $\text{Mg}_{\text{ол}}$ (R 0.72); $\text{Si}_{\text{срх}}$ (R -0.75); $\text{Al}_{\text{срх}}$ (R 0.75) и $\text{Ca}_{\text{срх}}$ (R 0.66). Величина отношения $\text{Mg}_{\text{ол}}/\text{Mg}_{\text{срх}}$ в условиях повышенного давления лежит в интервале 1.6–3.2 и зависима от величин $\text{Mg}_{\text{срх}}$ (R -0.79); $\text{Ca}_{\text{срх}}$ (R 0.8); T (R -0.48). Величина отношения $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{ол}}/(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{срх}}$ в экспериментах в условиях атмосферного давления лежит в интервале 0.04–3.2 и зависима от величин Fe_m (R 0.6); $\text{Mg}_{\text{ол}}$ (R -0.75). В экспериментах при повышенном давлении интервал значений 0.5–1.6 и слабо зависит от других величин.

Расчеты значений **температуры** равновесия. По выборке, представленной экспериментальными результатами, полученными в условиях атмосферного давления, было получено 3 уравнения, обладающих характеристиками R 0.82; 0.88; -0.91 и χ^2 2.66 (12); 5.3 (12); 2.15 (12). Из этих 3 уравнений первые два, из-за низкого значения R для первого и высокого значения χ^2 для второго, позволяют получать только оценочные значения. Последнее же уравнение по своим характеристикам позволяет использовать его для расчетов. По экспериментальным результатам, выполненным в условиях повышенного давления, получено 3 уравнения с характеристиками R 0.91; -0.92; -0.9 и χ^2 2.59 (12); 0.47 (12); 1.99 (12). Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.99–0.9 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов. Кроме того, эти уравнения позволяют оценить равновесность содержаний в расплаве кремния, магния, кальция, суммы щелочей и достоверность величины давления.

Расчет величины **давления**. Было создано 3 уравнения с характеристиками R 0.9; -0.89; 0.91 и χ^2 1.24 (12); 9.99 (12); 1.67 (12). Для расчетов, исходя из значений величин R и χ^2 , пригодны первое и третье уравнения, для которых можно предположить на уровне вероятности

0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения. Использование первого и третьего уравнений позволяет также судить о равновесности содержания алюминия в расплаве и точности расчетов температуры.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав оливина и клинопироксена. По экспериментам, полученным при атмосферном давлении, было рассчитано 4 уравнения с характеристиками R 0.92; 0.93; 0.96; 0.93 и χ^2 10.58 (12); 4.01 (12); 3.68 (12); 3.58 (12). За исключением 1 уравнения, последующие (2, 3, 4) могут быть использованы для расчетов, так как численные значения χ^2 позволяют полагать на уровне вероятности 0.9 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения. Для экспериментальных данных, полученных в условиях повышенного давления, было также рассчитано 4 уравнения с характеристиками R 0.95; 0.94; 0.93; 0.97 и χ^2 10.48 (12); 3.84 (12); 21.95 (12); 1.32 (12). Уравнения 1 и 3 из-за высоких численных значений χ^2 не пригодны для расчетов. Уравнения 2 и 4 могут быть использованы для расчетов равновесия сосуществующих оливина и клинопироксена.

Обсуждение результатов

Составы минеральных фаз в парагенезисе оливин–шпинель достаточно часто используются для оценок условий их образования. В работах [24; 59; 65] межфазные распределения кальция, магния и железа отградуированы для расчетов температур и давлений. Наиболее используемым в геологических публикациях является геотермометр Р. Лукса [65], основанный на межфазном распределении железа и магния. Ниже (рис. III.1 ol–срх) представлены результаты тестирования этого геотермометра на выборке экспериментальных результатов под давлением.

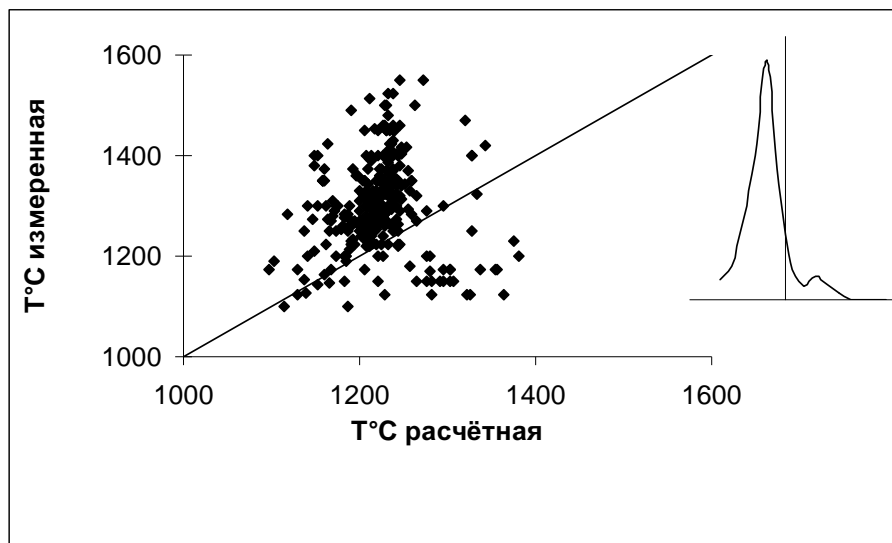


Рис. III.П.1 ol–срх. Зависимость рассчитанных по Р. Луксу [65] и реальных (измеренных в экспериментах) значений температуры [N 346; N₁ 333; R 0.1; сигма 92 °С, χ^2 9.07 (12)].

На рис. II.П.5.17 ol–срх представлен один из вариантов расчета температуры по нашим формулам.

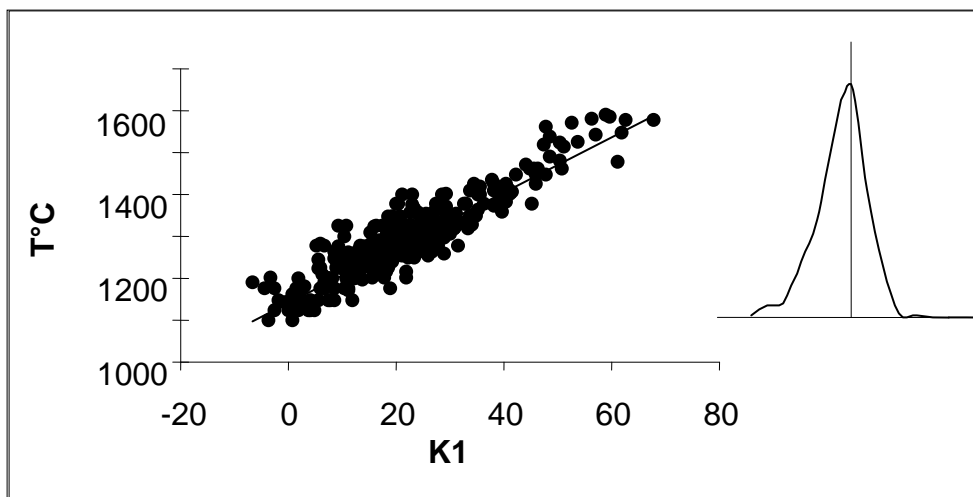


Рис. II.П.5.17 ol–срх (формула POLAT). Зависимость значения **T** от состава оливина, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки (R 0.91; N 346; N₁ 340; сигма 38.1 °C; χ^2 2.59 (12); диапазон давлений 1.5–40 кб).

Парагенезис оливин–клинопироксен, в случае его равновесности с расплавом, позволяет с помощью расчетов содержаний железа и магния судить о составах расплава при равновесном плавлении лерцолита, пиролита и т. д. На рис. III.П.2 ol–срх представлено соответствие расположения массивов точек модальных содержаний железа и магния в расплаве, равновесном с этим парагенезисом, и расчетные значения содержаний железа по формуле (POLA5a) и магния по формуле (POLA7c) в интервале давлений 1.5–40 кб.

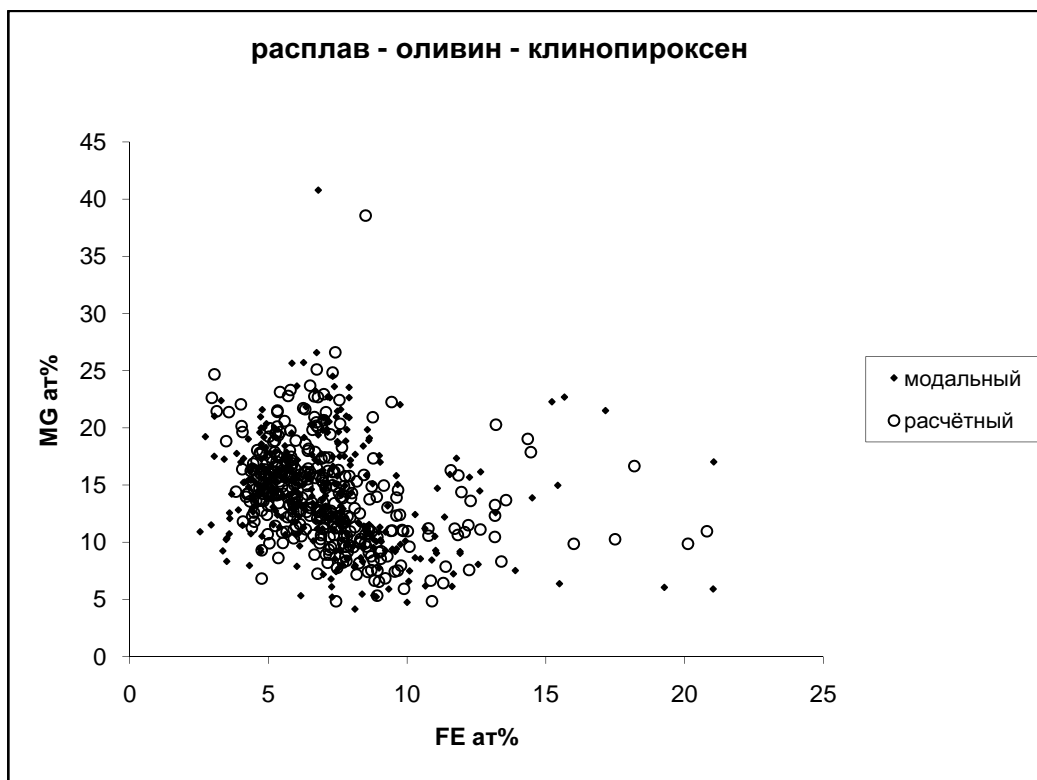


Рис. III.П.2 ol–срх. Соответствие модальных и расчетных содержаний железа и магния в расплаве, равновесном с оливин–клинопироксеновым парагенезисом.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин в равновесной системе расплав–оливин–клинопироксен: содержание кремния, алюминия, железа, магния, хрома в расплаве; величину температуры; равновесные распределения элементов в ассоциации оливин–авгит (в условиях атмосферного давления); содержание кремния, титана, алюминия, железа, магния, кальция, натрия, суммы щелочей, хрома в расплаве; величину температуры и давления; равновесные распределения элементов в ассоциации оливин–авгит (в условиях повышенного давления).

2. Часть уравнений позволяют получать только оценочные результаты для рассчитываемых величин: в условиях атмосферного давления – содержание титана, магния, кальция, натрия в расплаве, величину температуры, равновесное распределение элементов в ассоциации оливин–авгит; в условиях повышенного давления – содержание магния, кальция, железомagneзиевое отношение в расплаве, величину давления и равновесное распределение элементов в ассоциации оливин–авгит.

3. В условиях повышенного давления численные значения $Fe^{2+}_{ol}/Fe^{2+}_{срх}$ и $Mg_{ol}/Mg_{срх}$ принимают значения больше 1 и могут быть использованы для суждений о генезисе.

4. Геотермометр Р. Лукса [65], используемый в настоящее время, по результатам тестирования имеет худшие статистические характеристики.

5. Большинство полученных нами уравнений (расчеты содержаний элементов в расплаве и т. д.) в настоящее время аналогов не имеют.

8.10. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с оливином–клинопироксеном

Результаты обработки составов расплавов, равновесных с парагенезисом оливин–клинопироксен, в условиях атмосферного давления (400 т.) представлены одним уравнением, описывающим равновесное распределение элементов. Характеристики этого уравнения следующие – $R -0.94$ и $\chi^2 7.56$ (12). Высокое значение χ^2 указывает на несоответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и позволяет использовать это уравнение только для получения оценочных результатов. По массиву экспериментальных данных, полученных в условиях повышенного давления (350 т.), были получены уравнения, позволяющие рассчитывать следующие величины: содержания магния и кальция в расплаве, численные значения температуры и давления, равновесность состава расплава.

Содержание **магния** в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики $R 0.96$ и $\chi^2 1.11$ (12). Эти характеристики указывают на соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения на уровне вероятности 0.99 и дают возможность использовать это уравнение для расчетов.

Содержание **кальция** в расплаве. Полученное уравнение имеет $R -0.92$ и $\chi^2 18.85$ (12), что позволяет использовать это уравнение только для оценочных результатов.

Расчет значений **температуры**. Два уравнения для расчета температуры имеют характеристики $R -0.89$ и 0.87 ; $\chi^2 2.23$ (12) и 2.03 (12). Значение χ^2 позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 и 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки нормальному распределению и использовать эти уравнения для расчетов температуры. Кроме того, эти расчеты позволяют судить о равновесности содержаний в расплаве алюминия, кальция, и суммы щелочей.

Расчет величины **давления**. Уравнение для расчета давления в пределах 50 кб имеет характеристики $R 0.89$ и $\chi^2 2.12$ (12). Эти характеристики позволяют полагать соответствие

распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 нормальному закону распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Равновесные соотношения элементов в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики $R = -0.93$ и $\chi^2 = 8.86$ (12). Высокое значение χ^2 позволяет использовать это уравнение только для получения оценочных результатов.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин в равновесном с оливин–клинопироксеновым парагенезисом расплаве в условиях повышенного давления: содержание в расплаве **магния**, величину **температуры**, значение **давления** до 50 кб.

2. Уравнения для расчета кальция и уравнения для расчета равновесного распределения элементов в расплаве можно использовать только как оценочные.

8.11. Уравнения, полученные для системы расплав–оливин–плаггиоклаз

Для выборки в условиях атмосферного давления (~530 т.) были получены уравнения, позволяющие рассчитывать следующие величины: содержания в расплаве кремния (2 уравнения), алюминия, железа, магния, кальция, натрия, калия; значения температуры (2 уравнения); равновесное распределение элементов между оливином и плаггиоклазом (3 уравнения). В условиях повышенного давления (до 15 кб; ~100 т.) были получены уравнения, позволяющие производить следующие расчеты: концентрации в расплаве Fe^{2+} , Mg (2 уравнения), Ca, Na; величины температуры (3 уравнения), значения P ; равновесного распределения элементов между кристаллами оливина и плаггиоклаза (2 уравнения).

Расчет содержания **кремния** в расплаве. Уравнение, полученное для условий атмосферного давления, имеет характеристики $R = 0.82; 0.84$ и $\chi^2 = 1.94$ (16); 1.07 (16). Значения χ^2 позволяют полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения на уровне вероятности 0.99, но низкие значения R позволяют использовать эти уравнения только для получения оценочных результатов.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Полученное уравнение в условиях атмосферного давления имеет характеристики $R = -0.89$ и $\chi^2 = 1.32$ (16), что позволяет использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **железа** в расплаве. По экспериментам в условиях атмосферного давления было получено уравнение с характеристиками $R = 0.9$ и $\chi^2 = 5.2$ (16), что позволяет на уровне вероятности 0.95 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов. В условиях повышенного давления было получено уравнение с характеристиками $R = 0.86$ и $\chi^2 = 0.27$ (8), что позволяет на уровне вероятности 0.99 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **магния** в расплаве. В условиях атмосферного давления было получено уравнение с характеристиками R 0.91 и χ^2 3.21 (16), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

По экспериментальным результатам, полученным при повышенных давлениях, было получено два уравнения с характеристиками R 0.84 и 0.92; χ^2 3.56 (8) и 2.78 (8). По своим характеристикам оба уравнения могут быть использованы только для получения оценочных результатов.

Расчет содержания **кальция** в расплаве. По экспериментальным результатам в условиях атмосферного давления было получено уравнение с характеристиками R 0.9 и χ^2 2.05 (16), что позволяет использовать его для расчетов. Уравнение, полученное по экспериментальным результатам в условиях повышенного давления, обладает характеристиками R 0.87 и χ^2 0.78 (8), что позволяет на уровне вероятности 0.95 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **натрия** в расплаве. По экспериментальным данным для условий атмосферного давления было создано уравнение с характеристиками R 0.9 и χ^2 2.4 (16), что позволяет использовать это уравнение для расчетов. По данным в условиях повышенного давления было получено уравнение, обладающее характеристиками R 0.81 и χ^2 3.24 (8). Эти характеристики позволяют использовать его только как оценочное.

Расчет содержания **калия** в расплаве. По экспериментальным результатам в условиях атмосферного давления было получено уравнение с характеристиками R 0.95 и χ^2 17.49 (16). Высокое значение χ^2 позволяет использовать его только для получения оценочных результатов.

Расчет величины **температуры**. В условиях атмосферного давления было получено два уравнения с характеристиками R 0.9 и -0.92; χ^2 1.48 (16) и 2.61 (16). Эти характеристики позволяют на уровне вероятности 0.99 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать оба уравнения для расчетов. Для условий повышенного давления было получено три уравнения с характеристиками R -0.86; -0.9; -0.87 и χ^2 0.25 (8); 0.11 (8); 0.34 (8). Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов.

Расчет величины **давления**. Было получено одно уравнение для интервала давлений 2–15 кб с характеристиками R 0.85 и χ^2 0.81(8). Эти характеристики позволяют полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 закону нормального распределения, и значение R 0.85 позволяет с некоторой долей осторожности использовать это уравнение для расчетов.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав оливина и плагиоклаза. В условиях атмосферного давления было получено 3 уравнения с характеристиками R -0.98; 0.92; 0.95 и χ^2 1.76 (18); 2.94 (16); 5.66 (16). Эти характеристики позволяют на уровне вероятности 0.99–0.95 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов. В условиях повышенного давления было получено 2 уравнения с характеристиками R 0.9; 0.92 и χ^2 2.03 (8); 5.27 (8). Высокие значения χ^2 позволяют использовать эти уравнения только как оценочные.

Были также исследованы соотношения элементов Mg_{ol}/Ca_{pl} , Ca_{ol}/Ca_{pl} , Fe_{pl}/Fe_{ol} . Отношение Mg_{ol}/Ca_{pl} для экспериментальных данных в условиях атмосферного давления лежит в интервале 1.2–8.2, зависит от содержаний в расплаве Fe_m (-0.67); Ca_m (-0.56); Na_m (0.58) и в плагиоклазе Si_{pl} (0.59); Ca_{pl} (-0.65). В условиях повышенного давления принимает значения 2.5–7.3 и зависимо в расплаве от величин Si_m (0.53); Ca_m (-0.61); Na_m (0.52); в плагиоклазе от величин Si_{pl} (0.73); Ca_{pl} (-0.75). Отношение Ca_{ol}/Ca_{pl} всегда меньше 1 и в условиях атмосферного давления зависит от содержаний в оливине Mg_{ol} (-0.54); Ca_{ol} (0.84). В условиях повышенного давления это отношение также меньше 1 и зависимо от содержания Al_m (-0.53); Ca_{ol} (0.85); Ca_{pl} (-0.54) и температуры (-0.6). Величина Fe_{pl}/Fe_{ol} меньше 1 и в условиях атмосферного давления чувствительна к Fe_{pl} (0.66), в условиях повышенного давления зависима от Fe_{ol} (-0.57).

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин в равновесной системе расплав–оливин–плагиоклаз: содержание **кремния, алюминия, железа, магния, кальция, натрия** в расплаве, величину температуры, **равновесные распределения** элементов в ассоциации оливин–плагиоклаз (в условиях атмосферного давления); содержание **железа, кальция** в расплаве, величину **температуры, величину давления** (в условиях повышенного давления).

2. Часть уравнений позволяют получать только оценочные результаты для рассчитываемых величин: в условиях атмосферного давления – содержание калия в расплаве; в условиях повышенного давления – содержание магния, натрия, равновесное распределение элементов в ассоциации оливин–плагиоклаз.

3. Соотношение числа экспериментальных точек для системы расплав–оливин–плагиоклаз в условиях атмосферного давления (530 т.) и в условиях повышенного давления (100 т.) указывает на преимущественность кристаллизации этой минеральной ассоциации в расплавах основного-ультраосновного расплавов при давлениях, вероятно, менее 2–3 кб (?).

4. Большинство полученных нами уравнений (расчеты содержаний элементов расплаве и т. д.) в настоящее время аналогов не имеют.

8.12. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с оливином–плагиоклазом

Были получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин: эксперименты в условиях атмосферного давления (~530 т.) – равновесных соотношений элементов в расплаве (1 уравнение); в условиях повышенного давления (~100 т.) – содержаний алюминия и магния в расплаве, величины температуры и давления, а также равновесных содержаний элементов в расплаве.

Содержание **алюминия** в расплаве. По экспериментам в условиях повышенного давления было рассчитано уравнение с характеристиками R 0.9 и χ^2 1.68 (8), что позволяет с некоторой долей осторожности полагать на уровне вероятности 0.9 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Содержание **магния** в расплаве. По экспериментам в условиях повышенного давления было сформировано уравнение с характеристиками R 0.88 и χ^2 0.91 (8), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет величины **температуры**. По экспериментам в условиях повышенного давления было сформировано уравнение с характеристиками R 0.89 и χ^2 0.94 (8), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет величины **давления**. Было сформировано уравнение с характеристиками R 0.79 и χ^2 0.18 (8). Несмотря на приемлемое значение χ^2 , низкое значение R позволяет использовать это уравнение только для получения оценочных значений давления.

Равновесные соотношения элементов в расплаве. Для экспериментальных результатов в условиях атмосферного давления было получено уравнение с характеристиками R -0.96 и χ^2 5.02 (16), что позволяет использовать его для расчетов. Для экспериментальных результатов в условиях повышенного давления полученное уравнение обладает характеристиками R -0.94 и χ^2 1.18 (8), что также позволяет использовать его для расчетов.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин в равновесном с оливин–плаггиоклазовой ассоциацией расплаве по его составу в условиях повышенного давления: содержание **алюминия** и **магния** в расплаве, величину **температуры** и **равновесные распределения** элементов в расплаве как в условиях атмосферного давления, так и в условиях повышенного давления.

2. Характеристики уравнения для расчета давления позволяют использовать его только для оценочных результатов.

3. Полученных нами уравнений в настоящее время аналогов не имеют.

8.13. Уравнения, полученные для системы расплав–ортопироксен–клинопироксен

Обработка экспериментальных данных, полученных в условиях атмосферного давления, не проводилась из-за малочисленности (менее 50 т.) данных. Выборка экспериментальных результатов, полученных в условиях повышенного давления, представлена ~250 точками.

Были получены эмпирические уравнения, по которым (используя составы кристаллов ортопироксена, клинопироксена и расплава) можно рассчитывать численные значения следующих величин в условиях повышенного до 35 кб давления: концентрации в расплаве Si (2 уравнения), Ti, Al (2 уравнения), Fe^{2+} (2 уравнения), Mg (2 уравнения), Ca, Na, Cr; Fe^{2+}/Mg отношения; температуры (2 уравнения); P (2 уравнения); равновесного распределения элементов между кристаллами ортопироксена и клинопироксена (2 уравнения). Были также исследованы зависимости от различных величин следующих отношений элементов: $Fe_{орх}/Fe_{срх}$, $Mg_{орх}/Mg_{срх}$, $(Fe/Mg)_{орх}/(Fe/Mg)_{срх}$, $Ti_{орх}/Ti_{срх}$, $Al_{орх}/Al_{срх}$, $Ca_{орх}/Ca_{срх}$, $Cr_{орх}/Cr_{срх}$.

Расчет содержания **кремния** в расплаве. Было получено два уравнения с характеристиками R -0.86; -0.83 и χ^2 1.1 (12); 2.13 (12). Значения χ^2 позволяют полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения на уровне вероятности 0.99, и первое уравнение может быть использовано для расчетов. Для второго уравнения низкое значение R позволяет использовать его только для получения оценочных результатов.

Расчет содержания **титана** в расплаве. Было получено уравнение с характеристиками R 0.86 и χ^2 3.6 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.9 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Полученные два уравнения имеет характеристики R 0.88; 0.81 и χ^2 0.66 (12); 0.45 (12). Первое уравнение по своим характеристикам может быть использовано для расчетов. Второе уравнение, обладая низким значением R , может быть использовано только для получения оценочных результатов.

Расчет содержания **железа** в расплаве. Было получено два уравнения с характеристиками R -0.88; 0.84 и χ^2 1.14 (12); 3.27 (12). Значения величины χ^2 для обоих уравнений позволяют полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 и 0.95 закону нормального распределения. Первое уравнение, согласно своему значению R , может быть использовано для расчетов. Второе уравнение из-за низкого значения R может быть использовано только для оценочных расчетов.

Расчет содержания **магния** в расплаве. Было получено два уравнения с характеристиками R 0.95; 0.89 и χ^2 2.64 (12); 1.82 (12). Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.95 и 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать оба уравнения для расчетов.

Расчет содержания **кальция** в расплаве. Полученное уравнение обладает характеристиками R -0.91 и χ^2 1.69 (12). Эти характеристики позволяют использовать уравнение для расчетов.

Расчет содержания **натрия** в расплаве. Полученное уравнение обладает характеристиками R 0.86 и χ^2 2.2 (12). Эти характеристики позволяют использовать уравнение для расчетов.

Расчет содержания **хрома** в расплаве. Полученное уравнение обладает характеристиками R 0.8 и χ^2 5.95 (12). Численные значения обеих характеристик позволяют использовать это уравнение только для получения качественных оценок.

Расчет **железо-магниевого** отношения в расплаве. Полученное уравнение обладает характеристиками R 0.95 и χ^2 3.68 (12). Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.9 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Распределение **Ti, Al, Fe²⁺, Mg, Ca, Cr** между ортопироксеном и клинопироксеном, находящихся в равновесии с расплавом; особенности **K_D** железо-магниевого отношения. Величина **Fe_{орх}/Fe_{срх}** лежит в интервале значений 0.86–1.9 и зависима от величин **Si_m** (0.51); **Mg_{срх}** (0.55); **Ca_{срх}** (0.78); **P** (0.4); **T** (0.59). Величина **Mg_{орх}/Mg_{срх}** лежит в интервале 1.1–2.07 и зависима от величин **Si_m** (0.64); **Mg_m** (0.53); **Mg_{срх}** (0.81); **Ca_{срх}** (0.87); **P** (0.33); **T** (0.65). Величина **(Fe/Mg)_{орх}/(Fe/Mg)_{срх}** лежит в интервале 0.57–1.1 и практически не зависит от других величин. Величина **Ti_{орх}Ti_{срх}** лежит в интервале значений 0.2–1.7 и практически не зависит от других величин. Величина **Al_{орх}/Al_{срх}** меньше единицы и зависима от **Si_{орх}** (0.51); **Al_{орх}** (0.58). Величина **Ca_{орх}/Ca_{срх}** меньше единицы и зависима от **Si_m** (0.53); **Al_m** (0.5); **Fe²⁺_m** (0.5); **Ca_{орх}** (0.59); **Mg_{срх}** (0.65); **Ca_{срх}** (0.83); **P** (0.42); **T** (0.57). Величина **Cr_{орх}/Cr_{срх}** принимает значения в интервале 0.54–4.3 и практически не зависит от других величин

Расчет величины **температуры**. Было получено два уравнения с характеристиками R 0.91; 0.89 и χ^2 1.28 (12); 1.19 (12). Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать оба уравнения для расчетов.

Расчет величины **давления**. Было получено два уравнения с характеристиками R 0.88; 0.86 и χ^2 98 (12); 2.35 (12). Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.99 и 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать оба уравнения для расчетов.

Равновесное распределение элементов между ортопироксеном и клинопироксеном, равновесными с расплавом. Было получено два уравнения с характеристиками R 0.99; 0.9 и χ^2 7.2 (12); 1.54 (12). Второе уравнение по своим характеристикам может быть использовано для расчетов. Первое уравнение обладает высоким значением χ^2 , что позволяет использовать его только для получения оценочных результатов.

Обсуждение результатов

Минеральная ассоциация ортопироксен–клинопироксен (авгит), будучи широко распространенным парагенезисом в магматических породах основного-ультраосновного составов, широко используется для оценок условий их образования и существования. В работах [21; 22; 38; 39; 40; 94; 112 и т. д.] предлагаются, обсуждаются и сравниваются различные варианты распределений породообразующих элементов между ортопироксеном и авгитом. В последние годы с развитием аналитических методов для оценок условий образования начинают использоваться и коэффициенты распределения изотопов, например кальция [55]. Ниже представлен результат тестирования геотермометра Г. Брея, Т. Кохлера и др.[39].

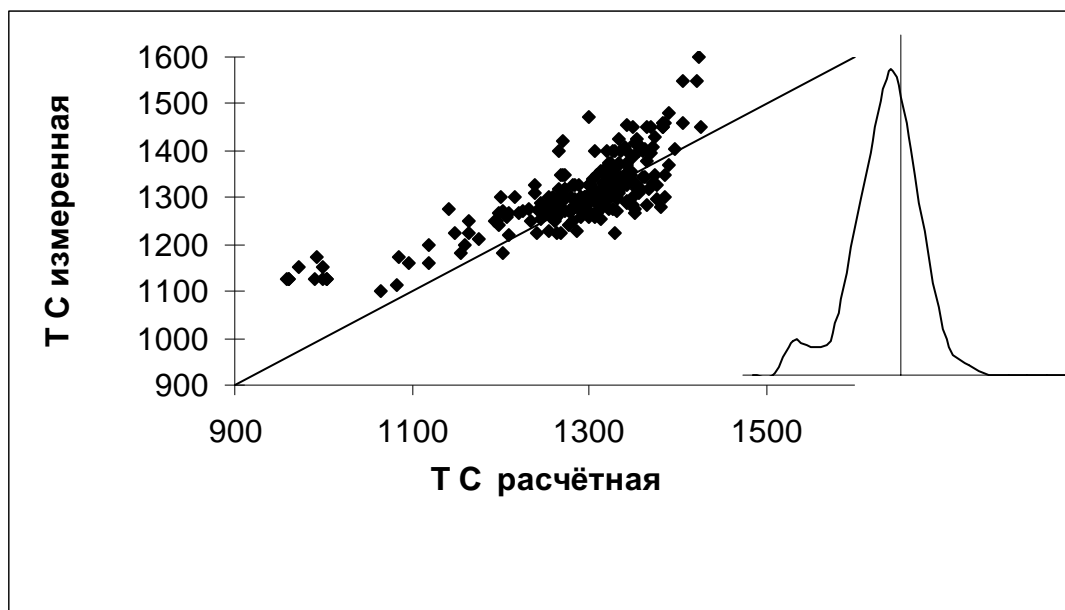


Рис. III.П.1 орх–срх. Зависимость рассчитанных по Г. Брею, Т. Кохлеру и др. [39] и реальных (измеренных в экспериментах) значений температуры (диапазон T 1100–1600 °С; диапазон P 1.5–35 кб; относительная ошибка 5–4%; R 0.79; N 246; N₁ 240; сигма 54 °С; χ^2 3.94).

На рис. III.П.7.15 орх–срх представлен один из вариантов расчета температуры по нашим формулам.

Ограничением для полученных нами геотермометров и иных инструментов для оценок условий образования этого парагенезиса является его равновесность с расплавом основного-ультраосновного составов.

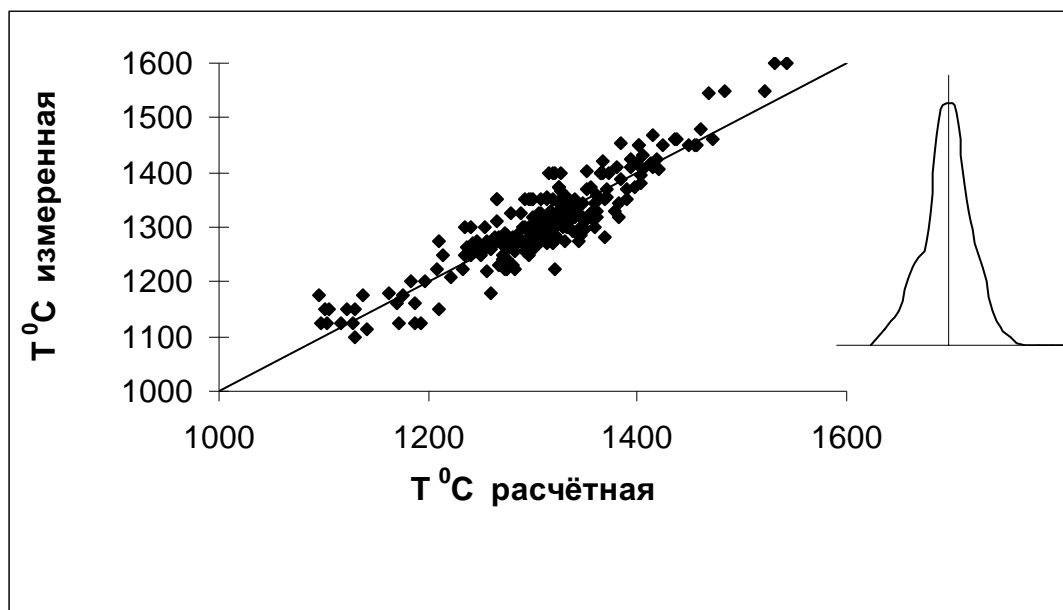


Рис. 11.11.7.15 орх–срх (формула РОАВТ). Зависимость значения T от состава ортопироксена, авгита, расплава и распределение среднеквадратичной ошибки. Диапазон значений T 1100–1600 °С. Диапазон давлений 1.5–35 кб; относительная ошибка 3–2 %; R 0.91; N 246; N_1 246; сигма 34.6 °С; χ^2 1.29.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин в равновесной системе расплав–ортопироксен–клинопироксен в условиях

повышенного давления до 35 кб: содержание **кремния, титана, алюминия, железа, магния, кальция, натрия; железо-магниевое отношение** в расплаве; величину **температуры; давление; равновесные распределения** элементов в ассоциации ортопироксен–авгит.

2. Часть уравнений позволяют получать только оценочные результаты для рассчитываемых величин – содержание алюминия, железа хрома в расплаве, равновесное распределение элементов в ассоциации ортопироксен–авгит.

3. В условиях повышенного давления численные значения $Mg_{орх}/Mg_{срх}$ принимают значения больше 1 и могут быть использованы для суждений о генезисе.

4. Геотермометр Г. Брея, Т. Кохлера и др.[39], достаточно широко используемый в настоящее время, по результатам тестирования имеет худшие статистические характеристики в условиях равновесия парагенезиса ортопироксен–клинопироксен с расплавом.

5. Большинство полученных нами уравнений в настоящее время аналогов не имеют (расчеты содержаний элементов в расплаве и т. д.).

6. Судя по соотношению количества экспериментальных результатов, полученных в условиях атмосферного (50 т.) и повышенного давлений (250 т.), в которых присутствует данный парагенезис, можно полагать, что этот парагенезис более типичен для магматических пород интрузивного облика. В эффузивах этот минеральный парагенезис будет представлен вкрапленниками, а ортопироксен должен быть нетипичен среди микролитов основной массы.

8.14. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с ортопироксеном–клинопироксеном

Данные, полученные в условиях атмосферного давления малочисленны (< 50 т.), поэтому обработка их не производилась. По массиву данных, полученных в условиях повышенного давления (~250 т.), были выведены уравнения, позволяющие определять следующие величины: содержания кремния, магния, кальция, суммы щелочей в расплаве, температуры и давления.

Расчет содержания **кремния** в расплаве. Было получено одно уравнение с характеристиками R -0.9 и χ^2 3.7 (12). Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.9 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **магния** в расплаве. Было получено 2 уравнения с характеристиками R -0.9; 0.93 и χ^2 1.52 (12); 1.85 (12). Это позволяет полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятностей 0.99 нормальному закону распределения и использовать оба уравнения для расчетов. Кроме того, близость рассчитанных концентраций магния позволяет судить о равновесности содержаний в расплаве кремния, алюминия, кальция и суммы щелочей.

Расчет содержания **кальция** в расплаве. Полученное уравнение обладает характеристиками R -0.97 и χ^2 6.23 (12). Высокое значение χ^2 позволяет использовать это уравнение только для получения оценочных результатов.

Расчет содержания **суммы щелочей**. Было получено уравнение с характеристиками R -0.95 и χ^2 2.34 (12). Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет величины **температуры**. Было получено два уравнения с характеристиками R 0.88;

-0.89 и χ^2 2.29 (12); 1.81 (12). Эти характеристики позволяют полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.95 и 0.99 закону нормального распределения и использовать оба уравнения для расчетов. Кроме того, соответствие рассчитанных температур позволяет судить о равновесности концентраций в расплаве кремния, алюминия и магния.

Расчет величины **давления**. Было получено 1 уравнение с характеристиками R 0.84 и χ^2 0.44 (12), что позволяет использовать это уравнение только как оценочное.

Для оценки **равновесности** расплава специального уравнения не создавалось, т. к. все вышеприведенные уравнения пригодны для многосторонней оценки равновесности.

Заключение

1. Были получены уравнения для расчета следующих величин: содержаний в расплаве **кремния, магния, суммы щелочей**, значений **температуры**.
 2. Уравнения для расчетов содержания кальция в расплаве и величины давления можно использовать только как оценочные.
 3. Аналогов полученным уравнениям в настоящее время нет.
3. Уравнение для определения давления может быть использовано только как оценочное.

8.15. Уравнения, полученные для системы расплав–клинопироксен–плаггиоклаз

Для выборки в условиях атмосферного давления (~400 т.) были получены уравнения, позволяющие рассчитывать следующие величины: содержания в расплаве кремния, титана, алюминия (2 уравнения), железа, магния (2 уравнения), кальция, натрия, калия (2 уравнения); температуру (3 уравнения); равновесное распределение элементов между клинопироксеном и плаггиоклазом (2 уравнения). В условиях повышенного до 27 кб давления (~150 т.) были получены уравнения, позволяющие производить следующие расчеты: концентрации в расплаве кремния (2 уравнения), титана, алюминия, железа, магния, кальция (2 уравнения), натрия, калия; величины температуры (2 уравнения); величины давления (2 уравнения); равновесного распределения элементов между клинопироксеном и плаггиоклазом (3 уравнения).

Расчет содержания **кремния** в расплаве. Уравнение, полученное в условиях атмосферного давления, имеет характеристики R 0.86 и χ^2 0.93 (12). Значения χ^2 позволяют полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения на уровне вероятности 0.99 и использовать это уравнение для расчетов. Два уравнения, полученные по экспериментальным данным в условиях повышенного давления, имеют характеристики R 0.85; 0.86 и χ^2 0.71 (12); 1.77 (12). Значения χ^2 позволяют полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов, но невысокие значения R указывают на то, что эти результаты надо использовать осторожно.

Расчет содержания **титана** в расплаве. Уравнение, полученное для условий атмосферного давления, обладает характеристиками R 0.85 и χ^2 1.1 (12). Уравнение, полученное для условий повышенного давления, характеризуется параметрами R 0.83 и χ^2 2.78 (12). Низкие значения R для обоих уравнений позволяют использовать их только для получения оценочных значений.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Полученные уравнения для условий атмосферного давления имеет характеристики R 0.8; 0.91 и χ^2 1.38 (12); 2.78(12). Первое уравнение из-за низкого значения R может быть использовано только для оценочных результатов, второе по своим характеристикам может быть использовано для расчетов.

Расчет содержания **железа** в расплаве. По экспериментам в условиях атмосферного давления было получено уравнение с характеристиками R 0.88 и χ^2 3.89 (12), что позволяет на уровне вероятности 0.9 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов. В условиях повышенного давления было получено уравнение с характеристиками R -0.88 и χ^2 0.77 (12), что позволяет на уровне вероятности 0.99 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **магния** в расплаве. В условиях атмосферного давления было получено два уравнения с характеристиками R 0.85; 0.95 и χ^2 3.53 (12); 1.95 (12). Первое уравнение по своим характеристикам, в частности значению R , может быть использовано только для получения оценочных результатов. Второе уравнение обладает характеристиками, позво-

ляющими использовать его для расчетов. По экспериментальным результатам, полученным при повышенных давлениях, было получено уравнение с характеристиками R 0.86 и χ^2 3.48 (12), что позволяет полагать на уровне вероятности 0.9 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **кальция** в расплаве. По экспериментальным результатам в условиях атмосферного давления было получено уравнение с характеристиками R 0.88 и χ^2 1.87 (12), что позволяет использовать его для расчетов. Два уравнения, полученные по экспериментальным результатам в условиях повышенного давления, обладают характеристиками R 0.81; 0.89 и χ^2 0.69 (12); 0.82 (12). Первое уравнение из-за низкого значения R может быть использовано только для оценочных результатов. Второе уравнение характеризуется соответствием распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 закону нормального распределения и может быть использовано для расчетов.

Расчет содержания **натрия** в расплаве. Уравнение, по экспериментальным данным, полученным в условиях атмосферного давления, обладает характеристиками R 0.89 и χ^2 4.29 (12). Высокое значение χ^2 позволяет использовать это уравнение только для получения оценочных результатов. Уравнение, полученное по экспериментальным результатам в условиях повышенного давления, имеет характеристики R -0.81 и χ^2 3.17 (12). Эти характеристики также указывают на возможность использования уравнения только для получения оценочных результатов.

Расчет содержания **калия** в расплаве. Два уравнения по экспериментальным данным, полученным в условиях атмосферного давления, обладают характеристиками R 0.91; 0.91 и χ^2 9.11 (12); 7.12 (12). Высокие значения χ^2 позволяют использовать эти уравнения только для получения оценочных результатов. Уравнение, полученное по экспериментальным результатам в условиях повышенного давления, имеет характеристики R -0.88 и χ^2 3.48 (12). Эти характеристики позволяют использовать уравнение для расчетов.

Распределение **Si, Al, Ca** между клинопироксеном и плагиоклазом, равновесных с расплавом. K_D для кремния в системе клинопироксен–плагиоклаз в условиях атмосферного давления лежит в интервале значений 0.8–1.2 и зависит от величин Mg_m (R 0.7); Ca_m (R 0.8); Na_m (R -0.7); $Ti_{срх}$ (R -0.61); $Na_{срх}$ (R -0.66); $Si_{пл}$ (R -0.81); $Ca_{пл}$ (R 0.85); T (R 0.67). В условиях повышенного давления величина K_D для кремния принимает близкие значения 0.78–1.1 и зависит от величин Mg_m (R 0.63); Ca_m (R 0.51); $Mg_{срх}$ (R 0.59); $Na_{срх}$ (R -0.64); $Si_{пл}$ (R -0.82); $Al_{пл}$ (R 0.76); $Na_{пл}$ (R -0.76); P (R -0.36). Величина K_D для алюминия в условиях атмосферного давления лежит в интервале значений 0.03–0.4 и зависит от величин Al_m (R 0.59); $Si_{срх}$ (R -0.93); $Ti_{срх}$ (R 0.59); $Al_{срх}$ (R 0.99). В условиях повышенного давления величина K_D алюминия принимает значения преимущественно в интервале 0.07–0.5, хотя единичные значения могут достигать значений 0.93, и зависит от величин $Si_{срх}$ (R -0.9); $Al_{срх}$ (R 0.99); $Na_{срх}$ (R 0.78); P (R 0.69); T (R 0.64). Величина K_D для кальция в условиях атмосферного давления лежит в интервале значений 0.4–3.2 и зависит от величин Mg_m (R -0.67); Ca_m (R -0.64); Na_m (R 0.67); $Mg_{срх}$ (R -0.53); $Na_{срх}$ (R 0.55); $Si_{пл}$ (R 0.73); $Ca_{пл}$ (R -0.78); T (R -0.57). Величина K_D для кальция в условиях повышенного давления лежит в интервале 0.8–2.9 и зависит от величин Si_m (R 0.57); Mg_m (R -0.56); Ca_m (R -0.63); $Mg_{срх}$ (R -0.66); $Ca_{срх}$ (R 0.74); $Si_{пл}$ (R 0.74); $Ca_{пл}$ (R -0.75); $Na_{пл}$ (R 0.71); P (R -0.36); T (R -0.63).

Расчет величины **температуры**. Уравнения, полученные в условиях атмосферного давления, имеют характеристики R -0.91; -0.89; -0.93 и χ^2 1.58 (12); 2.63 (12); 3.1 (12). Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.99–0.95 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов. Кроме того, сходимость полученных расчетов позволяет судить о равновесности содержания в расплаве магния и титана. Уравнения, полученные по экспериментальным результатам в условиях повышенного давления, обладают характеристиками R 0.85; 0.91 и χ^2 0.72 (12); 1.02 (12). Первое уравнение из-за низкого значения R, вероятно, может быть использовано только для получения оценочных значений. Второе уравнение по своим характеристикам может быть использовано для расчетов.

Расчет величины **давления**. Полученные уравнения обладают характеристиками R 0.78; 0.87; 0.88 и χ^2 3.23 (12); 2.33 (12); 1.46 (12). Первое уравнение, обладающее значением R 0.78, может быть использовано только для получения оценочных результатов. Два других, обладающих значениями χ^2 2.33 (12); 1.46 (12), позволяют полагать на уровне вероятности 0.95–0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать оба уравнения для расчетов.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав клинопироксена и плагиоклаза. Для случая атмосферного давления было получено два уравнения с характеристиками R -0.91; -0.9 и χ^2 4.93 (12); 2.36 (12). Первое уравнение из-за высокого значения χ^2 4.93 (12) может быть использовано только для получения оценочных значений. Второе уравнение по своим характеристикам может быть использовано для расчетов. Для уравнений, полученных по экспериментальным результатам, выполненным в условиях повышенного давления, были получены характеристики R 0.83; 0.88; 0.89 и χ^2 0.84 (12); 1.52 (12); 2.05 (12). Первое уравнение из-за низкого значения R 0.83 может быть использовано только для получения оценочных результатов, два других могут быть использованы для расчетов.

Обсуждение результатов

В литературе система основная расплав–клинопироксен–плагиоклаз обсуждается преимущественно в рамках системы основная расплав–оливин–клинопироксен–плагиоклаз. Эти исследования проводились с целью выяснения генезиса базальтов срединно-океанических хребтов [31; 58; 105; 107; 113]. Однако, нам не удалось найти в литературных источниках уравнения, позволяющие рассчитывать интенсивные параметры в равновесной системе основная расплав–клинопироксен–плагиоклаз для сравнения с полученными нами данными.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин в равновесной системе расплав–клинопироксен–плагиоклаз как в условиях атмосферного, так и в условиях повышенного давления (до 27 кб): содержание **кремния, алюминия, железа, магния, кальция, натрия, калия**; величину **температуры, давления; равновесные распределения** элементов в ассоциации авгит-плагиоклаз.

2. Часть уравнений позволяют получать только оценочные результаты для рассчитываемых величин: в условиях атмосферного давления – содержание титана, алюминия, натрия, калия; в условиях повышенного давления – титана и натрия в расплаве.

3. Исследованы особенности распределения кремния, алюминия, кальция между авгитом и плагиоклазом, находящихся в равновесии с расплавом основного состава как в условиях атмосферного давления, так и при повышенных давлениях (до 27 кб). Наиболее чувствительным к влиянию давления является K_D алюминия (коэффициент корреляции 0.69).

4. Большинство полученных уравнений аналогов не имеют.

8.16. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с клинопироксеном–плаггиоклазом

По данным, полученным по экспериментальным результатам в условиях атмосферного давления (~400 т.), были рассчитаны два уравнения, позволяющие судить о равновесности расплава. По данным экспериментальным результатов в условиях повышенного давления (~150 т.) были получены уравнения для расчетов содержаний алюминия, железа, кальция, величины температуры, давления и равновесного соотношения элементов.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. По экспериментам, выполненным под давлением, было получено одно уравнение с характеристиками R 0.8 и χ^2 1.75 (12). Низкое значение R для этого уравнения позволяет использовать его только для получения оценочных результатов.

Расчет содержания **железа** в расплаве. По экспериментам, выполненным под давлением, было получено одно уравнение с характеристиками R -0.81 и χ^2 3.01 (12). Низкое значение R для этого уравнения позволяет использовать его только как оценочное.

Расчет содержания **кальция** в расплаве. По экспериментам, выполненным под давлением, было получено одно уравнение с характеристиками R -0.93 и χ^2 0.92 (12). Эти значения позволяют полагать на уровне вероятности 0.99 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет величины **температуры**. По экспериментам, выполненным под давлением, было получено одно уравнение с характеристиками R 0.86 и χ^2 0.65 (12). Полученные характеристики позволяют использовать это уравнение для расчетов.

Расчет величины **давления**. Было получено одно уравнение с характеристиками R 0.75 и χ^2 0.94 (12). Низкое значение R для этого уравнения позволяет использовать его только для получения оценочных результатов.

Равновесные соотношения элементов в расплаве. По экспериментальным результатам в условиях атмосферного давления было получено два уравнения с характеристиками R -0.97; -0.95 и χ^2 1.34 (12); 3.57 (12). Значения χ^2 позволяют полагать на уровне вероятности 0.99–0.9 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать оба уравнения для расчетов. По экспериментальным результатам, выполненным в условиях повышенного давления, было получено уравнение с характеристиками R -0.89 и χ^2 3.68 (12). Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.9 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Обсуждение результатов

В работе С. Виллигера и др. [107] предложен геобарометр, построенный на зависимости от давления содержаний кальция и магния в расплаве (равновесном с клинопироксеном и плагиоклазом). Приводимое в работе значение коэффициента корреляции равно 0.96.

Зависимость величины давления от концентрации кальция в расплаве $R = -0.34$. Аналогичная зависимость для магния имеет еще более слабую связь ($R -0.17$). Исходя из приведенных величин, вряд ли стоит ожидать приводимого в указанной выше работе численного значения коэффициента корреляции.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин в равновесном с клинопироксен–плагиоклазовым парагенезисом расплаве: в условиях атмосферного давления – **равновесность** расплава; в условия повышенного давления – содержание **кальция**, величину **температуры**, **равновесность** расплава.

2. Уравнения для расчета содержаний алюминия, железа и величины давления можно использовать только для получения оценочных значений.

8.17. Уравнения, полученные для системы расплав–оливин–ортопироксен–клинопироксен

Выборка в условиях атмосферного давления представлена единичными случаями (< 10 т.) и поэтому не обрабатывалась. Выборка в условиях повышенного давления (до 35 кб) представлена ~250 т. После обработки этой выборки были получены уравнения для расчета следующих величин: содержания в расплаве кремния (3 уравнения), титана, алюминия (2 уравнения), железа (2 уравнения), марганца, магния (2 уравнения), кальция (2 уравнения), натрия (2 уравнения), хрома, железо-магниевого отношения, значения температуры (4 уравнения), величины давления, равновесного распределения элементов между оливином, ортопироксеном и клинопироксеном.

Расчет содержания **кремния** в расплаве. Полученные уравнения имеет характеристики R 0.79; -0.81; -0.86 и χ^2 0.94 (12); 3.98 (12); 4.3 (12). Низкие значения R , а в последнем уравнении и χ^2 , позволяют использовать эти уравнения только как оценочные.

Расчет содержания **титана** в расплаве. Было получено одно уравнение с характеристиками R 0.86 и χ^2 3.99 (12). Эти характеристики позволяют полагать на уровне вероятности 0.9 соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и с некоторой долей осторожности (из-за значения R) использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Было получено два уравнения с характеристиками R -0.82; -0.87 и χ^2 1.96 (12); 0.27 (12). Первое уравнение из-за низкого значения R может быть использовано только как оценочное. Второе, возможно, может быть использовано для расчетов.

Расчет содержания **железа** в расплаве. Было получено два уравнения с характеристиками R 0.91; 0.92 и χ^2 0.54 (12); 2.94 (12), что позволяет на уровне вероятности 0.99–0.95 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов. Использование обоих уравнений позволяет также оценить достоверность численного значения величины давления, так как в одном из них используется величина давления.

Расчет содержания **марганца** в расплаве. Было получено уравнение с характеристиками R 0.81 и χ^2 2.3 (12). Низкое значение R позволяет использовать это уравнение только для получения оценочных значений.

Расчет содержания **магния** в расплаве. Было получено два уравнения с характеристиками R 0.88; 0.94 и χ^2 1.84 (12); 0.52 (12), что позволяет на уровне вероятности 0.99 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов. Кроме того, сходство или различие полученных содержаний магния, с учетом среднеквадратичной ошибки, позволяет судить о равновесности содержаний в расплаве кремния, алюминия и суммы щелочей.

Расчет содержания **кальция** в расплаве. Было получено два уравнения с характеристиками R 0.87; 0.95 и χ^2 1.1 (12); 1.84 (12), что позволяет на уровне вероятности 0.99 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов. Кроме того, сходство или различие полученных содержаний кальция, с учетом среднеквадратичной ошибки, позволяет судить о равновесности содержаний в расплаве титана, натрия и калия.

Расчет содержания **натрия** в расплаве. Было получено два уравнения с характеристиками R 0.88; -0.94 и χ^2 2.4 (12); 1.32 (12), что позволяет на уровне вероятности 0.95–0.99 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать эти уравнения для расчетов. Кроме того, сходство или различие полученных содержаний натрия, с учетом среднеквадратичной ошибки, позволяет судить о равновесности содержаний в расплаве алюминия, магния и кальция.

Расчет содержания **хрома** в расплаве. Было получено уравнение с характеристиками: R 0.79 и χ^2 1.33 (12). Низкое значение R позволяет использовать это уравнение только для получения оценочных значений.

Величина **железо-магниевого отношения** в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики R 0.96 и χ^2 4.49 (12). Высокое численное значение χ^2 указывает на несоответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и позволяет использовать это уравнение только для получения оценочных результатов.

Расчет величины **температуры**. Было получено 4 уравнения с характеристиками R 0.88; -0.86; 0.88; 0.85 и χ^2 2.02 (12); 1.48 (12); 1 (12); 2.19 (12). Первые 3 уравнения по своим характеристикам могут быть использованы для расчетов. Последнее уравнение, в силу низкого значения R , может быть использовано только как оценочное. Использование первых трех уравнений позволяет судить о равновесности содержаний кремния, алюминия и магния в расплаве и достоверности величины давления.

Расчет величины **давления**. Полученное уравнение обладает характеристиками R -0.84 и χ^2 4.06 (12). Численные значения этих характеристик позволяют использовать его только для получения оценочных результатов.

Равновесное распределение элементов между оливином, ортопироксеном и авгитом. Полученное уравнение обладает характеристиками R 0.98 и χ^2 1.65 (12). Численные значения этих характеристик позволяют использовать уравнение для расчетов.

Парагенезис оливин–ортопироксен–клинопироксен рассматривается, как первичный мантийный материал, способный давать базальтовые расплавы, поэтому расчеты содержаний железа и магния в равновесном с этим парагенезисом расплаве представляют интерес. На рис. III.П. 01–орх–срх представлено соответствие расположений модальных и вычисленных содержаний железа (формула PORA5a) и магния (формула PORA 7a) в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–ортопироксен–клинопироксен.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин в равновесной системе расплав–оливин–ортопироксен–авгит в условиях повышенного давления: содержание **титана, алюминия, железа, магния, кальция, натрия**; величину **температуры**; **равновесные распределения** элементов в ассоциации оливин–ортопироксен–авгит.

2. Часть уравнений позволяют получать только оценочные результаты для рассчитываемых величин: в условиях атмосферного давления – содержание кремния, алюминия, марганца, магния, хрома, железо-магниевого отношения, величину температуры и давления.

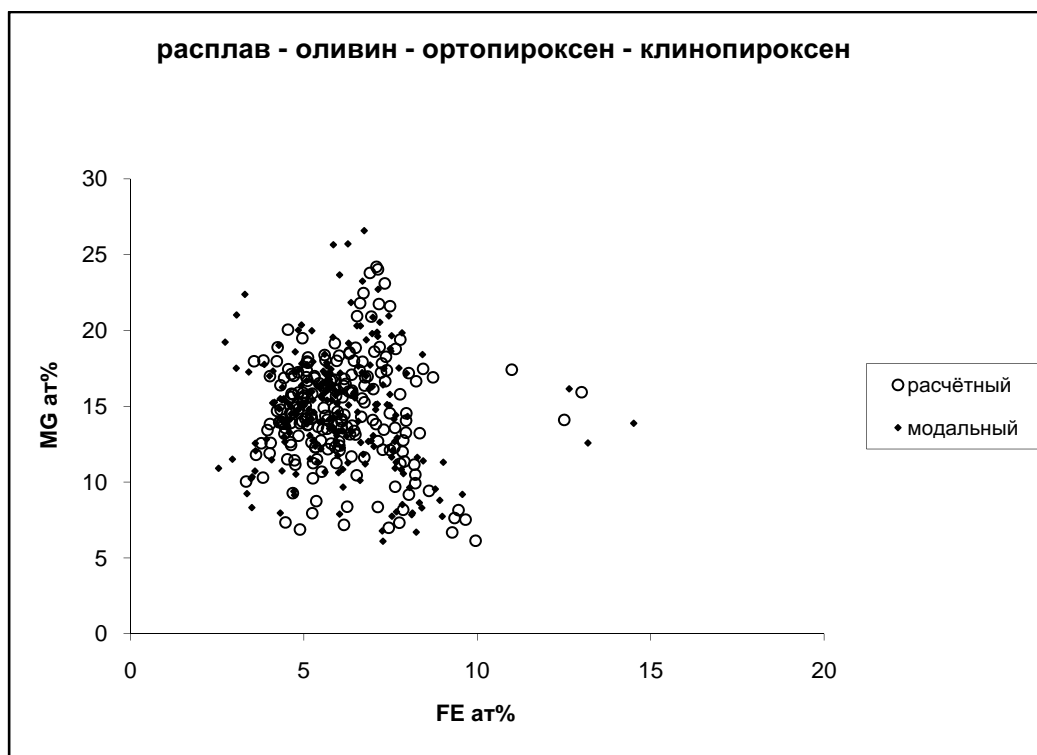


Рис. III.П ol–орх–срх. Наложение полей модальных и расчетных содержаний железа и магния в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–ортопироксен–клинопироксен.

3. Полученные уравнения позволяют получить численные характеристики далеко не всех интенсивных параметров в системе расплав–оливин–ортопироксен–клинопироксен. Эти пробелы могут быть компенсированы использованием уравнений для различных вариантов трехфазных парагенезисов.

4. Соотношения числа экспериментальных точек с равновесной ассоциацией расплав–оливин–ортопироксен–клинопироксен в условиях атмосферного давления (единичные точки) и повышенного (250 т.) позволяет предположить следующее: эта минеральная ассоциация расплавного генезиса кристаллизуется преимущественно в условиях повышенного давления и будет неравновесной с расплавом в условиях малых глубин.

5. Большинство полученных уравнений аналогов пока не имеют.

8.18. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с оливином–ортопироксеном–клинопироксеном

Экспериментальные данные в условиях атмосферного давления представлены единичными результатами. По массиву данных, полученных в условиях повышенного давления (~250 т.) были получены уравнения, позволяющие определять следующие величины: содержания титана, магния (2 уравнения), кальция, температуру и давление.

Расчет содержания **титана** в расплаве. Было получено одно уравнение с характеристиками $R -0.79$ и $\chi^2 0.61$ (12). Эти характеристики указывают на возможность использования этого уравнения только для получения оценочных результатов.

Расчет содержания **магния** в расплаве. Было получено 2 уравнения с характеристиками $R -0.94$; -0.97 и $\chi^2 1.48$ (12); 1.88 (12). Это позволяет полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятностей 0.99 нормальному закону распределения и использовать оба уравнения для расчетов. Кроме того, близость рассчитанных концентраций магния позволяет судить о равновесности содержаний в расплаве кремния, суммы щелочей и достоверности значений температуры и давления.

Расчет содержания **кальция** в расплаве. Полученное уравнение обладает характеристиками $R -0.97$ и $\chi^2 1.48$ (12). Значение χ^2 позволяет полагать, что распределение среднеквадратичной ошибки соответствует закону нормального распределения на уровне вероятности 0.99 и дает основание использовать это уравнение для расчетов.

Расчет величины **температуры**. Было получено уравнение с характеристиками $R -0.88$ и $\chi^2 1.88$ (12). Эти характеристики позволяют полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99 закону нормального распределения и использовать уравнение для расчетов.

Расчет величины **давления**. Было получено 1 уравнение с характеристиками $R 0.91$ и $\chi^2 2.31$ (12). Эти характеристики позволяют полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения на уровне вероятности 0.95 и использовать это уравнение для расчетов.

Для оценки **равновесности** расплава специального уравнения не создавалось, т. к. все вышеприведенные уравнения пригодны для многосторонней оценки равновесности. Кроме того, для выяснения равновесности расплава могут быть использованы уравнения для парных равновесных сочетаний оливина, ортопироксена и авгита.

Заключение

1. Были получены уравнения для расчета следующих величин: содержаний в расплаве **магния, кальция, значений температуры и давления**.

2. Уравнения для расчетов содержания титана в расплаве можно использовать только для получения оценочных результатов.

3. Аналогов полученным уравнениям в настоящее время нет.

8.19. Уравнения, полученные для системы расплав–оливин–клинопироксен–плагиоклаз

Для выборки в условиях атмосферного давления (~350 т.) были получены уравнения, позволяющие рассчитывать следующие величины: содержания в расплаве кремния, алюминия, железа, магния, кальция, натрия, калия, значения температуры (4 уравнения), равновесное распределение элементов между оливином, клинопироксеном и плагиоклазом. В условиях повышенного давления выборка небольшая по объему (~80 т.), поэтому обработка результатов не проводилась.

Расчет содержания **кремния** в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики R 0.84 и χ^2 1.53 (12). Значения χ^2 позволяют полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения на уровне вероятности 0.99, но низкие значения R ограничивают использование этих уравнения только для получения оценочных результатов.

Расчет содержания **алюминия** в расплаве. Полученное уравнение в условиях атмосферного давления имеет характеристики R 0.85 и χ^2 3.39 (12). Низкое значение R позволяет использовать это уравнение только для получения оценочных результатов.

Расчет содержания двухвалентного **железа** в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики R 0.89 и χ^2 1.38 (12), что позволяет на уровне вероятности 0.99 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **магния** в расплаве. Полученное уравнение обладает характеристиками R 0.92 и χ^2 4.39 (12). Высокое численное значение χ^2 позволяет использовать это уравнение только для получения оценочных значений.

Расчет содержания **кальция** в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики R 0.92 и χ^2 3.28 (12), что позволяет на уровне вероятности 0.95 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **натрия** в расплаве. Полученное уравнение имеет характеристики R 0.89 и χ^2 3.21 (12), что позволяет на уровне вероятности 0.95 полагать соответствие распределения среднеквадратичной ошибки закону нормального распределения и использовать это уравнение для расчетов.

Расчет содержания **калия** в расплаве. Полученное уравнение обладает характеристиками R 0.92 и χ^2 4.8 (12). Высокое численное значение χ^2 позволяет использовать это уравнение только для получения оценочных значений.

Расчет величины **температуры**. Было получено 4 уравнения с характеристиками R 0.91; 0.93; -0.9; -0.93 и χ^2 3.64 (12); 3.48 (12); 2.99 (12); 2.31 (12). Распределение среднеквадратичной ошибки при расчетах по этим уравнениям на уровне вероятности 0.95 соответствует нормальному распределению, и все эти уравнения могут быть использованы для расчетов. Кроме того, получаемые расчетами значения температуры позволяют судить о равновесности составов минералов парагенезиса и равновесности содержания магния в расплаве.

Равновесные соотношения элементов, входящих в состав оливина, клинопироксена, плагиоклаза. Было получено уравнение с характеристиками R -0.93 и χ^2 1.93 (12). Величина

χ^2 указывает на реальность предположения о нормальности распределения среднеквадратичной ошибки на уровне вероятности 0.99, что позволяет использовать это уравнение для расчетов.

Обсуждение результатов

Экспериментальные исследования системы основной расплав–оливин–авгит–плагиоклаз представлены в работах [52; 113] и других. Эти исследования связаны, в основном, с проблемой генезиса базальтов срединно-океанических хребтов, для которых этот минеральный ансамбль является типическим. Однако каких-либо уравнений авторы в своих публикациях не приводят.

Выводы

1. Получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать численные значения следующих величин в равновесной системе расплав–оливин–клинопироксен–плагиоклаз в условиях атмосферного давления: содержание **железа, кальция, натрия**, величину **температуры, равновесные распределения** элементов в ассоциации оливин–авгит–плагиоклаз.

2. Часть уравнений позволяют получать только оценочные результаты для рассчитываемых величин: в условиях атмосферного P – содержание кремния, алюминия, магния, калия.

3. Получено ограниченное число уравнений, связующих параметры системы основной–ультраосновной расплав–оливин–авгит–плагиоклаз. Этот недостаток может быть компенсирован использованием уравнений для трехфазных систем расплав–оливин–клинопироксен, расплав–оливин–плагиоклаз, расплав–авгит–плагиоклаз.

4. Соотношения числа экспериментальных точек с равновесной ассоциацией расплав–оливин–авгит–плагиоклаз в условиях атмосферного (350 т.) и повышенного давления (менее 100 т.) позволяет предположить следующее: эта минеральная ассоциация расплавного генезиса кристаллизуется преимущественно в условиях низких давлений; эта минеральная ассоциация, присутствующая в виде вкрапленников в вулканитах в большинстве случаев будет неравновесной.

5. Большинство полученных уравнений аналогов не имеют.

7.20. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с оливином–клинопироксеном–плагиоклазом

Обработка составов расплавов, равновесных с парагенезисом оливин–клинопироксен–плагиоклаз в условиях атмосферного давления каких либо новых связей не выявила, поэтому могут быть использованы связи, выявленные для трех парагенезисов. Например, уравнение для оценки распределения элементов в расплаве (SRAPR1), равновесном с парагенезисом клинопироксен–плагиоклаз дает значение R 0.97.

Выводы

1. Создана система уравнений, позволяющая рассчитывать содержания элементов в расплаве, величину температуры и давления, определять равновесность расплава с двухминеральными и трехминеральными парагенезисами.

2. Из 10 вариантов возможных двухминеральных парагенезисов для 5 породообразующих минералов (шпинель, оливин, ортопироксен, клинопироксен, плагиоклаз) 2 варианта (шпи-

нель–плагиоклаз и ортопироксен–плагиоклаз) встречаются в небольшом числе экспериментальных результатов. Наиболее отчетливо это видно для парагенезиса шпинель–плагиоклаз: в условиях атмосферного давления – менее 50 т.; в условиях повышенного давления – менее 50 т. Для парагенезиса ортопироксен–плагиоклаз: в условиях атмосферного давления – менее 50 т.; в условиях повышенного давления – менее 100 т. Вполне вероятно, что ассоциация шпинель–плагиоклаз, сосуществующая с расплавом в природных условиях, является изначально неравновесной. Возможно, это положение можно распространить и на ассоциацию ортопироксен–плагиоклаз в природных условиях. Оставшиеся восемь двухминеральных парагенезисов, равновесных с расплавом, можно разбить на несколько групп по чувствительности к давлению, отраженной в виде числа экспериментальных точек. Парагенезисы шпинель–ортопироксен, шпинель–клинопироксен, оливин–ортопироксен и ортопироксен–авгит являются равновесными с расплавом преимущественно в условиях повышенного давления. Среди трехминеральных парагенезисов, равновесных с расплавом, из возможных 10 вариантов для указанных выше 5 породообразующих минералов только 2 выборки содержат более 100 точек. Это парагенезисы оливин–ортопироксен–клинопироксен (авгит) и оливин–клинопироксен–плагиоклаз. Первый парагенезис встречается, в основном, в экспериментах под давлением (атмосферное давление – 10 т.; повышенное давление – 250 т.) и составы равновесных расплавов по содержанию SiO_2 лежат в интервале 42–55 вес %, по терминологии для интрузивных пород – в диапазоне от перидотитов до габбродиоритов (см. табл. II.Ш.15.1 gl). Этот диапазон составов расплава, равновесного с этим парагенезисом расплавно-генезиса, в общем, совпадает с диапазоном составов расплавов, образующихся при плавлении гранатового перидотита и нефелинита под давлением 20 кб, также находящегося в равновесии с этим же парагенезисом, например, в экспериментах Б. Мизена, И. Куширо [70]. Сопоставления составов равновесных расплавов с различными парагенезисами, как остаточных при кристаллизации, так и образующихся при плавлении, вероятно, могут указать путь на реальный состав мантийного вещества и условия плавления. Второй парагенезис встречается преимущественно в экспериментах в условиях атмосферного давления (атмосферное давление – 350 т.; повышенное давление – 80 т., основная масса экспериментальных результатов ограничена давлениями менее 10 кб) и составы равновесных расплавов по терминологии для эффузивных разностей пород ограничена составами от пикритов до дациандезитов (см. табл. I.П.б.1 ol–срх–pl). Парагенезис расплав (стекло)–оливин–клинопироксен–плагиоклаз, тяготеющий к условиям атмосферного давления, возможно, может быть равновесен в пикритовых разностях пород до гипабиссальной фации.

Заключение

С использованием базы данных «ИФОРЕКС» [3] были сформированы выборки со следующими ограничениями: по составам расплавов – преимущественно основные-ультраосновные; по набору минеральных фаз – шпинель, оливин, ортопироксен, клинопироксен (авгит), плагиоклаз; по условиям экспериментов – «сухие» и сформированные раздельно выборки для экспериментальных результатов в условиях атмосферного и повышенного давления.

В выборках представлены следующие системы:

двухфазные – основной-ультраосновной расплав (далее именуемый просто расплав) и одна из следующих минеральных фаз: шпинель, оливин, ортопироксен, клинопироксен (авгит), плагиоклаз (5 выборок);

трехфазные выборки – расплав и две минеральные фазы из указанных выше (10 выборок);

четырефазные выборки – расплав и три минеральные фазы из указанных выше (10 выборок);

пятифазные выборки – расплав и 4 минеральные фазы из указанных выше (5 выборок).

Более многофазные выборки представлены практически единичными экспериментальными результатами. Выборки различных систем неоднородны по количеству вошедших в них экспериментальных результатов и использованы для последующих расчетов, содержащих более 100 т.

Полученные выборки экспериментальных результатов были использованы для создания уравнений, позволяющих рассчитывать интенсивные параметры в ряде вышеуказанных систем и во вспомогательных уравнениях. Подготовка и обработка экспериментальных данных заключались в следующем.

Из выбранных составов были исключены анализы с суммами менее 98 % и более 102 %.

Составы расплавов (стекол) и минералов из весовых процентов пересчитывались на атомные катионные количества без кислорода и вновь нормировались на 100 %. Все эти результаты приводятся для каждой выборки в табличном и графическом виде (диаграммы TAS).

Данные в конечной форме использовались для создания корреляционных уравнений, связующих концентрации порообразующих элементов в фазах, температуру и давление.

Для создания уравнений был использован метод наименьших квадратов. Расчет выполнялся дважды. После первого раза отбрасывались анализы, для которых расчетный результат отличался от реального более чем на 3 сигмы (критерий Шовене). Оставшиеся данные считались **равновесными**. Затем расчет повторялся, и для каждого уравнения были получены и указаны следующие результаты: само линейное уравнение (вида $K_2 = SK_1 + B$, где K_2 – искомая величина, K_1 – переменная величина, куда входят различные интенсивные параметры изученной системы), а также ряд величин – **коэффициент корреляции; среднее квадратичное отклонение (ошибка, сигма); величина χ^2 , позволяющая судить о характере распределения численных значений среднеквадратичной ошибки**. Кроме того, для каждого уравнения наряду с аналитическим выражением, приводится его графический вид и огибающая численных значений среднеквадратичной ошибки. Созданные уравнения получены по выборкам, содержащим 100–1000 т. В число характеристик уравнения входит и число точек, первоначально использованных, и число точек, оставшихся после отбрасывания данных по критерию Шовене.

В итоге представлено **581 уравнение**, которые можно разбить на 4 группы по их предназначению:

1. уравнения, позволяющие рассчитывать **равновесные содержания** элементов в расплаве, названные нами **мелтометрами**;
2. уравнения, позволяющие рассчитывать величину **равновесной температуры** – геотермометры;
3. уравнения, позволяющие рассчитывать величину **равновесного давления** – геобарометры;
4. группа уравнений, позволяющих вычислять **равновесность как межфазного распределения элементов, так и внутрифазного распределения в расплавах** (стеклах), кристаллах шпинели и клинопироксена.

Создано также несколько уравнений для расчетов **фугитивности кислорода** по выборкам экспериментов в условиях атмосферного давления. Для выяснения равновесного содержания элементов в расплаве, минерале, равновесных величин температуры, давления могут быть использованы и несколько одноименных уравнений. Например, температуру в системе расплав–оливин в условиях атмосферного давления можно вычислять 6 уравнениями, что позволяет более объективно судить о величине рассчитываемой температуры и, используя величину среднеквадратичного отклонения, выявлять неравновесные концентрации элементов и других величин.

Как правило, полученные уравнения, обобщающие результаты в условиях атмосферного давления и в условиях повышенного давления, **отличаются коэффициентами, набором**

влияющих элементов и величин, так как простого учета влияния давления оказывается явно недостаточным. Исключение составляют уравнения для системы оливин–расплав. Влияние числа использованных экспериментальных точек, вероятно, можно исключить, так как большинство выборок содержит более 200 т. Можно предположить, что эти различия указывают на чувствительность структур присутствующих в экспериментальных результатах минеральных фаз, что и подтверждается составами фаз, их встречаемостью в исследованных системах. Вероятно, оливин среди обследованных фаз является наименее чувствительным к давлению. Однако, как влияет давление на поведение элементов в расплаве, пока не ясно. Использование различий между формулами, возможно, будет полезным для понимания структур расплавов.

Использованные нами выборки получены по предположительно **наибольшему количеству** имеющихся на сегодняшний день экспериментальных результатов. Тестирование на этих выборках наиболее используемых (опубликованных разными авторами) аналогичных уравнений (термометров, барометров) показало **их более плохие статистические характеристики**. Это связано с тем, что основная масса уравнений создана на небольшом числе экспериментальных данных. Этот вывод распространяется только на тестирование уравнений в области между ликвидусом и солидусом, тогда как многие из этих уравнений, в отличие от полученных нами, применимы также и к области солидуса.

Полноценное использование полученных нами уравнений возможно после создания **программы**, позволяющей решать системы, создаваемые из этих уравнений с подключением итераций, путем минимизации расхождений рассчитываемых величин. Это позволит рассчитать состав расплава и P–T условия, максимально приближенные к равновесным, например, корректировать состав расплавных включений.

Во всех полученных как нами, так и другими авторами уравнениях, связующих составы равновесных минеральных фаз и равновесных с ними расплавов с учетом температуры и давления, в рамках указываемой точности, удастся избежать учета влияния объемных долей фаз, участвующих в образовании системы. Это позволяет предположить наличие двух закономерностей у кристаллизующихся алюмосиликатных магматических расплавов.

Первой можно назвать предположительную **стехиометрию равновесных магматических расплавов**. В пользу этого положения свидетельствуют полученные нами уравнения, связующие интенсивные параметры собственно равновесного расплава. Это частные закономерности, но их наличие в широких диапазонах составов расплавов, P–T условий, разнообразия равновесных с этими расплавами минеральных парагенезисов свидетельствует в пользу этого предположения, хотя универсальный вид этой закономерности еще предстоит найти.

Второй закономерностью является наличие **количественной связи в равновесных системах интенсивных параметров и объемных долей минеральных фаз и расплава**. В пользу этой закономерности, распадающейся на ряд более частных, свидетельствуют результаты, опубликованные в пионерской (для этой области) работе Е.В. Коптева-Дворникова и Д.М. Хворова [14]. Числовые формы указанных закономерностей будут крайне полезны для генетических построений.

Выявлены особенности межфазного и внутрифазного распределения порообразующих элементов в системах основной-ультраосновной расплав–шпинель, оливин, ортопироксен, клинопироксен (авгит), плагиоклаз. К числу наиболее значимых результатов можно отнести следующие:

1. Среди порообразующих элементов наряду с сеткообразующими и модификаторами, выделены **барочувствительные** – алюминий, и **термочувствительные** – магний.

Особенности поведения этих элементов, возможно, обязаны их двойственному положению в структуре расплавов.

2. В расплавах, равновесных со шпинелью, оливином, ортопироксеном и клинопироксеном, выявлена **обратно пропорциональная связь** ($R \sim -0.7 \dots -0.9$) между содержаниями **магния** и **суммой щелочей**. Это соотношение позволяет полагать, что природные высокомагнезиальные и одновременно щелочные расплавы, например кимберлитовые, являются неравновесными и, возможно, имеют гибридное происхождение. В свете этого антагонизма можно предположить, что повышенная щелочность (умеренно щелочные и щелочные подотряды) обязана привнесу щелочных элементов в расплавы основного-ультраосновного составов в случае их образования при равновесном плавлении.

3. Величины K_D для кремния, алюминия, магния и кальция в системе минерал (оливин, ортопироксен, клинопироксен (авгит), плагиоклаз)—основной-ультраосновной расплав обратно пропорциональны содержанию этих элементов в расплаве. Является ли эта закономерность более универсальной, распространяясь, например, и на металлические системы с иными элементами, пока не ясно. Кроме того, величины K_D указанных элементов прямо пропорциональны содержанию кремния в расплаве, а величина K_D для кремния прямо пропорциональна содержаниям этих элементов в расплаве.

4. Широко практикуется использование в генетических построениях **среднего значения** величины K_D для железа и магния в системе оливин—расплав и получены числовые значения этой величины включительно по 4 знак после запятой. Однако распределение численных значений этой величины **не соответствует закону нормального распределения**, что делает использование полученных к настоящему времени средних значений **некорректным**.

5. Обобщение экспериментальных данных позволило выявить **граничное содержание кальция** в кристаллах оливина магматического генезиса. Кристаллы оливина, равновесные с расплавами основного-ультраосновного составов, содержащими не менее 3–5 % CaO, в свою очередь, содержат **не менее 0.1 % CaO** независимо от давления и собственного состава. Это позволяет полагать, что кристаллы оливина, содержащие менее 0.1 % CaO в своем составе, или имеют не магматическое происхождение, или изменили первоначальный состав.

6. **Содержание алюминия в кристаллах шпинели**, равновесных с расплавом, зависимо как от содержания его в расплаве, так и от давления. При прочих равных условиях кристаллы шпинели, содержащие **более 50 % атомных количеств алюминия** в своем составе, образуются из расплава при давлениях **более 15 кб**.

Шпинель, оливин, ортопироксен, клинопироксен (авгит), плагиоклаз расплавного генезиса, а также их различные парагенезисы **реагируют на величину давления** не только изменениями составов и структур, но также их **объемных долей**. Среди минералов к таковым можно отнести ортопироксен и плагиоклаз; среди двойных парагенезисов — шпинель—ортопироксен, шпинель—клинопироксен, оливин—ортопироксен, ортопироксен—клинопироксен и, возможно, клинопироксен—плагиоклаз; среди тройных парагенезисов — оливин—ортопироксен—клинопироксен и оливин—клинопироксен—плагиоклаз. Это заключение мы рассматриваем, как предварительное, требующее дальнейшего изучения. Связь различных минеральных парагенезисов как с составами равновесных с ними остаточных расплавов, так и образующихся при плавлении, а также учет связей объемных долей минеральных фаз с составами остаточных и образующихся расплавов может помочь в решении генезиса магм.

Список литературы

1. *Анфилов В.Н., Быков В.Н., Осипов А.А.* Силикатные расплавы. М.: Наука, 2005. 357 с.
2. *Арискин А.А., Бармина Г.С., Френкель М.Я.* ЭВМ–моделирование кристаллизации базальтовых расплавов в условиях заданной фугитивности кислорода // *Геохимия*. 1986. № 11. С. 1614–1628.
3. *Арискин А.А., Бармина Г.С.* Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: Наука, 2000. 362 с.
4. *Арискин А.А., Бармина Г.С.* Термометрия равновесий плагиоклазов с расплавами базальтов и андезитов // *Геохимия*. 1990. № 3. С. 441–447.
5. *Арискин А.А., Николаев Г.С.* Распределение Fe^{3+} и Fe^{2+} между хромшпинелидом и базальтовым расплавом в зависимости от состава, температуры и летучести кислорода // *Геохимия*. 1995. № 8. С. 1131–1139.
6. *Арискин А.А., Бармина Г.С., Френкель М.Я.* Геотермометры равновесий оливин–расплав и пироксен–расплав для лунных базальтов // *Геохимия*. 1989. № 10. С. 1418–1427.
7. *Болховская С.В., Васильева М.О., Коптев-Дворников Е.В.* Моделирование кристаллизации низкокальциевых пироксенов в базитовых системах // *Геохимия*. 1995. № 12. С. 1710–1727.
8. *Борисов А.А., Шапкин А.И.* Новое эмпирическое уравнение зависимости отношения Fe^{3+}/Fe^{2+} в природных расплавах от их состава, летучести кислорода и температуры // *Геохимия*. 1989. № 6. С. 892–897.
9. *Галант Е.И.* К вопросу о координационных числах магния в стекле // *ДАН СССР*. 1961. Т. 137. № 6. С. 1424–1427.
10. *Гирнис А.В.* Равновесие оливин–ортопироксен–расплав как термобарометр для мантийных магм // *Петрология*. 2003. Т. 11. № 2. С. 115–127.
11. *Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж.* Породообразующие минералы. М.: Из-во Мир, 1966. Т. 5. 406 с.
12. *Добрецов Н.Л., Кочкин Ю.Н., Кривенко А.П., Кутолин В.А.* Породообразующие пироксены. М.: Наука, 1971. 450 с.
13. *Колосков А.В., Пузанков М.Ю., Пирожкова Е.С.* Включения ультрамафитов в базальтоидах островных дуг: к проблеме состава и генезиса переходного слоя «корово-мантийной смеси» в островодужных системах // В сб. *Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы*. 2001. Петропавловск-Камчатский. ИВГиГ ДВО РАН. С. 123–152.
14. *Коптев-Дворников Е.В., Хворов Д.М.* Оценка пропорций кристаллизации и равновесности закалочных экспериментов в системах базитового состава. // *Геохимия*. 2011. № 1. С. 16–34.
15. *Коржинский Д.С.* Зависимость степени окисления железа в магме от щелочности. // *ДАН СССР*. 1978. Т. 238. № 4. С. 948–950.
16. *Михайлов М.А., Демина Е.В., Мамонтова С.Г., Богданова Л.А.* О механизме изменения координационных чисел Mg и Al в центральной части системы $MgO-FeO-Al_2O_3-SiO_2$ // Спец. выпуск «Записки Российского минералогического общества». 2007. С. 199–213.
17. *Плаксенко А.Н.* Типоморфизм акцессорных хромшпинелидов ультрамафит–мафитовых магматических формаций. Воронеж. Из-во Воронежского университета, 1989. 221 с.
18. *Пономарев Г.П., Пузанков М.Ю.* Распределение железа и магния в системе расплав–шпинель–оливин по экспериментальным данным. Геологические приложения. Петропавловск-Камчатский. Из-во КамГУ, 2002. 80 с.

19. Пустоветов А.А., Митина Е.А., Уханов А.В., Никольская Н.Е., Сенин В.Г. Неоднородность акцессорного хромшпинелида как возможный геотермометр // Геохимия. 1992. № 10. С. 1412–1422.
20. Рябчиков И.Д., Когарко Л.Н. Новый вариант шпинель–оливин–пироксенового оксибарометра и примеры крайней редокс-дифференциации в мантийных магматических системах // ДАН. 2010. Т. 430. № 6. С. 806–809.
21. Славинский В.В. Двупироксеновая барометрия пород верхней мантии // ДАН, 1994. Т. 335. № 1. С. 91–94.
22. Фонарев В.И., Графчиков А.А. Двупироксеновая геотермия // В сб. «Очерки физико-химической петрологии». М.: Н. 1987. Вып. 14. С. 118–136.
23. Adams E.G., Bishop F.C. Experimental investigation of Ca-Mg exchange between olivine, orthopyroxene and clinopyroxene: potential for geobarometry // Earth and Planetary Science Letter. 1982. Vol. 57. P. 241–250.
24. Adams G.E., Bishop F.C. The olivine–clinopyroxene geobarometer: experimental results in the CaO–FeO–MgO–SiO₂ system // Contrib. Mineral. Petrol. 1986. Vol. 94. P. 230–237.
25. Agee C.B., Walker D. Aluminum partitioning between olivine and ultrabasic silicate liquid to 6 GPa // Contrib. Mineral. Petrol. 1990. Vol. 105. P. 243–254.
26. Albarede F. How deep do common basaltic magmas form and differentiate? // Journal of geophysical research. 1992. Vol. 97, N B7. P. 10997–11009.
27. Andersen D.J., Bishop F.C., Lindsley D.H. Internally consistent solution models for Fe-Mg-Mn-Ti oxides and olivine // American mineralogist. 1991. Vol. 76, P. 427–444.
28. Ariskin A.A., Nikolaev G.S. An empirical model for the calculation of spinel–melt equilibria in mafic igneous systems at atmospheric pressure: 1. Chromian spinels // Contrib. Mineral. Petrol. 1996. Vol. 123. P. 282–292.
29. Ballhaus C., Berry R.F., Green D.H. // High pressure experimental calibration of the olivine–orthopyroxene–spinel oxygen geobarometer: implication for the oxidation state of upper mantle // Contrib. Mineral. Petrol. 1991. Vol. 107. P. 27–40.
30. Barnes S.J. The distribution of chromium among orthopyroxene, spinel and silicate liquid at atmospheric pressure. // Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986. Vol. 50. P. 1889–1909.
31. Bartels K.S., Kinzler R.J., Grove T.L. High pressure phase relations of primitive high-alumina basalts from Medicine Lake volcano, northern California // Contrib. Mineral. Petrol. 1991. Vol. 108. P. 253–270.
32. Basu A.R. Olivine–spinel equilibria in lherzolite xenoliths from San Quintin, Baja California // Earth and Planetary Science Letter. 1977. Vol. 33. P. 443–450.
33. Beattie P. Olivine–melt and orthopyroxene–melt equilibria // Contrib. Mineral. Petrol. 1993. Vol. 115. P. 103–111.
34. Beattie P., Ford C., Russell D. Partition coefficients for olivine–melt and orthopyroxene–melt systems // Contrib. Mineral. Petrol. 1991. Vol. 109. P. 212–224.
35. Bedard J.H. Partitioning coefficients between olivine and silicate melts // Lithos. 2005. Vol. 83, P. 394–419.
36. Bedard J.H. Trace element partitioning coefficients between silicate melts and orthopyroxene: Parameterizations of D variations // Chemical geology. 2007. Vol. 244. P. 263–303.
37. Bedard J. Parameterization of the Fe-Mg exchange coefficient (K_D) between clinopyroxene and silicate melts // Chemical Geology. 2010. Vol. 274. P. 169–176.
38. Bertrand P., Mercier J.C. The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for the natural system? // Earth and Planetary Science Letter. 1985/86. Vol. 76. P. 109–122.
39. Brey G.P., Kohler T., Nickel K.G. Geothermobarometry in four-phase lherzolites I. Experimental results from 10 to 60 kb // Journal of Petrology. 1990. Vol. 43. P. 1857–1883.

40. *Brey G.P., Kohler T., Nickel K.G.* Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers // *Journal of Petrology*. 1990. Vol. 31. P. 1353–1378.
41. *Dick H.J.B., Bullen T.* Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1984. Vol. 86. P. 54–76.
42. *Fabries J.* Spinel–olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1979. Vol. 69. P. 329–336.
43. *Falloon T.J., Danyushevsky L.V., Ariskin A.A., Green D.H., Ford C.E.* The application of olivine geothermometry to infer crystallization temperatures of parental liquids: implications for the temperature of MORB magmas // *Chemical Geology*. 2007. Vol. 241. P. 207–233.
44. *Fick M.R., Bence A.F.* Experimental crystallization of chrome spinel in Famous basalt 527–1–1 // *Earth and Planetary Science Letter*. 1980. Vol. 48. P. 111–123.
45. *Ford C.E., Russell D.G., Craven J.A. and Fisk M.R.* Olivine–liquid equilibria: temperature, pressure and composition dependence of the crystal/liquid cation partition coefficients for Mg, Fe²⁺, Ca and Mn // *Journal of petrology*. 1983. Vol. 24. Part 3. P. 256–269.
46. *French W.J., Cameron E.P.* Calculation of the temperature of crystallization of silicates from basaltic melts // *Mineralogical magazine*. 1981. Vol. 44. P. 19–26.
47. *Fujii T.* Solubility of Al₂O₃ in enstatite coexisting with forsterite and spinel. *Carnegie Inst. Washington Yearb.* 1976. Vol. 75. P. 566–571.
48. *Gasparik T.* Orthopyroxene thermobarometry in simple and complex systems // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1987. Vol. 96. P. 357–370.
49. *Gasparik T., Newton R.C.* The reversed alumina contents of orthopyroxene in equilibrium with spinel and forsterite in the system MgO–Al₂O₃–SiO₂ // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1984. Vol. 85. P. 186–196.
50. *Glazner A.F.* Activities of olivine and plagioclase components in silicate melts and their application to geothermometry // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1984. Vol. 88. P. 260–268.
51. *Hakli T., Wright T.L.* The fractionation of nickel between olivine and augite as a geothermometer // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1967. Vol. 31. P. 877–884.
52. *Herzberg C.* Partial crystallization of mid-ocean ridge basalts in the crust and mantle // *Journal of Petrology*. 2004. Vol. 45, N 12. P. 2389–2405.
53. *Herzberg C., O`Hara M.G.* Plume–associated ultramafic magmas of phanerozoic age // *Journal of Petrology*. 2002. Vol. 43. P. 1857–1883.
54. *Hill R.E.T., Roeder P.L.* The crystallization of spinel from basaltic liquid as a function of oxygen pressure // *J. Geol.* 1974. Vol. 82. P. 709–729.
55. *Huang S., Farkas J., Jacobsen S.B.* Calcium isotopic fractionation between clinopyroxene and orthopyroxene from mantle peridotites // *Earth and Planetary Science Letter*. 2010. Vol. 292. P. 337–344.
56. *Journal of Petrology* 1990. Vol. 31. P. 1313–1352.
57. *Jurewicz A.J.G., Watson E.B.* Cations in olivine. Part 1: Calcium partitioning and calcium–magnesium distribution between olivines and coexisting melts, with petrologic applications // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1988. Vol. 99. P. 176–185.
58. *Kinzler R.J., Grove T.L.* Primary magmas of mid-ocean ridge basalts: Experiments and Methods // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. P. 6885–6906.
59. *Kohler T.P., Brey G.P.* Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as a geothermobarometer for natural peridotites from 2 to 60 kb with applications // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1990. Vol. 54. P. 2375–2388.
60. *Kudo A.M., Weill D.F.* An igneous plagioclase thermometer // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1970. Vol. 25. P. 52–65.

61. *Lehmann J.* Diffusion between olivine and spinel: application to geothermometry // *Earth and Planetary Science Letter*. 1983. Vol. 64. P. 123–138.
62. *Libourel G.* Systematics of calcium partitioning between olivine and silicate melt: implications for melt structure and calcium content of magmatic olivines // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1999. Vol. 136. P. 63–80.
63. *Liermann H.P., Ganguly J.* Fe²⁺-Mg fractionation between orthopyroxene and spinel: experimental calibration in the system FeO–MgO–Al₂O₃–Cr₂O₃–SiO₂, and applications // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2003. Vol. 145. P. 217–227.
64. *Longhi J, Walker D., Hays J.* The distribution of Fe and Mg between olivine and lunar basaltic liquids // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1978. Vol. 42. P. 1545–1558.
65. *Loucks R.R.* A precise olivine–augite Mg–Fe-exchange geothermometer // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1996. Vol. 125. P. 140–150.
66. *Lundgaard K.L., Tegner C.* Partitioning of ferric and ferrous iron between plagioclase and silicate melt // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2004. Vol. 147. P. 470–483.
67. *Maurell C., Maurell P.* Etude experimentale de l'equilibre Fe²⁺-Fe³⁺ dans les spinelles chromiferes et les liquides silicates basiques coexistans a 1 atm // *CR Acad. Sci. Paris Ser II* 1982. Vol. 295. P. 209–212.
68. *Murck B.W., Campbell J.H.* The effects of temperature, oxygen fugacity and melt composition on the behaviour of chromium in basic and ultrabasic melts // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1986. Vol. 50. P. 1871–1887.
69. *Mysen B.O.* Olivine/melt transition metal partitioning, melt composition, and melt structure – Melt polymerization and Qn – speciation in alkaline earth silicate systems // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008. Vol. 72. P. 4796–4812.
70. *Mysen B.O., Kusiro I.* Compositional variations of coexisting phases with degree of melting of peridotite in the upper mantle // *Am. Mineralogist*. 1977. Vol. 62. P. 843–865.
71. *Mysen B.O., Dybinsky E.V.* Melt structural control on olivine/melt element partitioning of Ca and Mn. // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2004. Vol. 68, N 7. P. 1617–1633.
72. *Neuville D.R., de Ligny D., Cornier L., Henderson G.S., Roux G., Flank A.M., Lagarde P.* The crystal and melt structure of spinel and alumina at high temperature: An in-situ XANES study at the Al and Mg, K- edge // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009. Vol. 73. P. 3410–3422.
73. *Nielsen R.L., Davidson P.M., Grove T.L.* Pyroxene–melt equilibria: an updated model // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1988. Vol. 100. P. 361–373.
74. *Nielsen R.L., Drake M.J.* Pyroxene–melt equilibria // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1979. Vol. 43. P. 1259–1272.
75. *Nielsen R.L., Dungan M.A.* Low pressure mineral–melt equilibria in natural anhydrous mafic systems // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1983. Vol. 84. P. 310–326.
76. *Nimis P.* A clinopyroxene geobarometer for basaltic systems based on crystal–structure modeling // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1995. Vol. 121. P. 115–125.
77. *Nimis P.* Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks. Part 2. Structural geobarometers for basic to acid, tholeiitic and mildly alkaline magmatic systems // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1999. Vol. 135. P. 62–74.
78. *Nimis P., Ulmer P.* Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks. Part 1. An expanded structural geobarometer for anhydrous and hydrous, basic and ultrabasic systems // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1998. Vol. 133. P. 122–135.
79. *Ozawa K.* Olivine–spinel geospeedometry: analysis of diffusion – controlled Mg-Fe²⁺ exchange // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1984. Vol. 48. P. 2597–2611.
80. *Panjaswatwong Y., Danyushevski L.V., Crawford A.J., Harris K.L.* An experimental study of the effects of melt composition on plagioclase–melt equilibria at 5 and 10 kb: implications

- for the origin of magmatic high-An plagioclase // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1995. Vol. 118. P. 420–432.
81. *Poustovetov A.A., Roeder P.L.* Numerical modeling of major element distribution between chromian spinel and basaltic melt, with application to chromian spinel in MORBs // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2001. Vol. 142. P. 58–71.
 82. *Putirka K.* Clinopyroxene + liquid equilibria to 100 kb and 2450 K // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1999. Vol. 135. P. 151–163.
 83. *Putirka K.D., Mikaeian H., Ryerson F., Shaw H.* New clinopyroxene–liquid thermobarometers for mafic, evolved, and volatile-bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and the Snake River Plain, Idaho // *American Mineralogist.* 2003. Vol. 88. P. 1542–1554.
 84. *Putirka K.D., Perfit M., Ryerson F.J., Jackson M.G.* Ambient and excess mantle temperatures, olivine thermometry, and active vs. passive upwelling // *Chemical Geology.* 2007. Vol. 241. P. 177–206.
 85. *Putirka K.* Igneous thermometers and barometers based on plagioclase+liquid equilibria: Test of some existing models and new calibrations. // *American Mineralogist.* 2005. Vol. 90. P. 336–346.
 86. *Putirka K., Johnson M., Kinzler R., Longhi J., Walker D.* Thermobarometry of mafic igneous rocks based on clinopyroxene–liquid equilibria, 0–30 kb // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1996. Vol. 123. P. 92–108.
 87. *Putirka K.D.* Thermometers and barometers for volcanic systems// *Reviews in mineralogy and geochemistry* 2008. Vol. 69. P. 61–120.
 88. *Putirka K.D.* Mantle potential temperatures at Hawaii, Iceland, and the mid-ocean ridge system, as inferred from olivine phenocrysts: evidence for thermally driven mantle plumes // *Geochemistry Geophysics Geosystems* (an electronic journal of the earth sciences) 2005. Vol. 6, N 5. P. 1–14.
 89. *Roeder P.L., Campbell J.H., Jamieson H.E.* A re-evaluation of the olivine–spinel geothermometer // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1979. Vol. 68. P. 325–334.
 90. *Roeder P.L., Emslie R.F.* Olivine–liquid equilibrium // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1970. Vol. 29. P. 275–289.
 91. *Roeder P.L., Reynolds I.* Crystallization of chromite and chromium solubility in basaltic melts // *Journal of petrology.* 1991. Vol. 32. Part 5. P. 909–934.
 92. *Sack R.O., Ghiorso M.S.* An internally consistent model for the thermodynamic properties of Fe–Mg–titanomagnetite–aluminates spinels // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1991. Vol. 106. P. 474–505.
 93. *Sack R.O., Ghiorso M.S.* Chromian spinels as petrogenetic indicators: thermodynamics and petrological applications // *Amer. Miner.* 1991. Vol. 76. P. 827–847.
 94. *Saxena S.R.* Problems of two–pyroxene geothermometry // *Earth and Planetary Science Letter.* 1983. Vol. 65. P. 382–388.
 95. *Scowen P.A.H., Roeder P.L., Helz R.T.* Reequilibration of chromite within Kilauea Iki lava, Hawaii // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1991. Vol. 107. P. 8–20.
 96. *Seckendorff V., O`Neil H.St.C.* An experimental study of Fe–Mg partitioning between olivine and orthopyroxene at 1173, 1273 and 1423 K and 1.6 GPa // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1993. Vol. 113. P. 196–207.
 97. *Simkin T., Smith I.V.* Minor–element distribution in olivine // *J. Geology.* 1970. Vol. 78. N 3. P. 304–325.
 98. *Sugawara T.* Empirical relationship between temperature, pressure, and MgO content in olivine and pyroxene saturated liquid // *Journal of geophysical research.* 2000. Vol. 105. N B4. P. 8457–8472.

99. *Sugawara T.* Ferric iron partitioning between plagioclase and silicate liquid: thermodynamics and petrological applications // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2001. Vol. 141. P. 659–686.
100. *Sugawara T.* Thermodynamic analysis of Fe and Mg partitioning between plagioclase and silicate liquid // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2000. Vol. 138. P. 101–113.
101. *Takagi D., Sato H., Nakagawa M.* Experimental study of low-alkali tholeiite at 1–5 kb: optimal condition for the crystallization of high-An plagioclase in hydrous arc tholeiite // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2005. Vol. 149. P. 527–540.
102. *Takahashi E.* Partitioning of Ni^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} and Mg^{2+} between olivine and silicate melts: compositional dependence of partition coefficient // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 1978. Vol. 42. P. 1829–1844.
103. *Takahashi E., Kushiro I.* Melting of a dry peridotite at high pressures and basaltic magma genesis // *American Mineralogist*, 1983. Vol. 68. P. 859–879.
104. *Thy P.* Experimental constraints on the evolution of transitional and mildly alcalic basalts: crystallization of spinel // *Lithos.* 1995. Vol. 36. P. 103–114.
105. *Tormey D.R., Grove T.L., Bryan W.B.* Experimental petrology of normal MORB near the Kane Fracture Zone: 220–250 N, Mid-Atlantic ridge // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1987. Vol. 96. P. 121–139.
106. *Ulmer P.* The dependence of the Fe^{2+} -Mg cation – partitioning between olivine and basaltic liquid on pressure, temperature and composition // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1989. Vol. 101. P. 261–273.
107. *Villiger S., Muntener O., Ulmer P.* Crystallization pressures of mid-ocean ridge basalts derived from major elements variations of glasses from equilibrium and fractional crystallization experiments // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. P. b01202.
108. *Wan Z., Coogan L.A., Canil D.* Experimental calibration of aluminum partitioning between olivine and spinel as a geothermometer // *American mineralogist.* 2008. Vol. 93. P. 1142–1147.
109. *Watson E.B.* Calcium content of forsterite coexisting with silicate liquid in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ // *Amer. Mineral.* 1979. Vol. 64. P. 824–829.
110. *Webb S. A., Wood B. J.* Spinel–pyroxene–garnet relationship and their dependence on Cr/Al ratio. // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1986. Vol. 92. P. 471–480.
111. *Witt-Eickschen G., Seck H.A.* Solubility of Ca and Al in orthopyroxene from spinel peridotite: an improved version of an empirical geothermometer // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1991. Vol. 106. P. 431–439.
112. *Wood B. J., Banno S.* Garnet–orthopyroxene and orthopyroxene–clinopyroxene relationship in simple and complex systems // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1973. Vol. 42. P. 109–124.
113. *Yang H.J., Kinzler R.J., Grove T.L.* Experiments and models of anhydrous, basaltic olivine–plagioclase–augite saturated melts from 0.001 to 10 kb // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1996. Vol. 124. P. 1–18.
114. *Young E.D., Tonui E., Manning C.E., Schauble E., Macris C.A.* Spinel–olivine magnesium isotope thermometry in the mantle and implications for the Mg isotopic composition of Earth // *Earth and Planetary Science Letter.* 2009. Vol. 288. P. 524–533.

Часть IV

**Геологическое приложение.
Результаты использования полученных уравнений
и выявленных закономерностей
для природных парагенезисов**

Введение.

Ряд правил, допущений и задач, используемых при расчетах

1. Магматическая порода рассматривается как физико-химическая мультисистема, которую можно разбивать на ряд «равновесных» систем, используя структурные взаимоотношения фаз и их составы. В основе этого допущения лежит положение академика Д.С. Коржинского о существовании в породах так называемого «локального» или «мозаичного» равновесия. Проверка равновесности составов фаз в выделенной системе осуществлялась с помощью полученных нами уравнений. Кроме того, на равновесность составов исследовались минералы группы шпинели, подгруппы клинопироксенов (авгит) и сам расплав (стекло). В равновесной системе одна и та же величина может рассчитываться различными путями, с использованием одного или нескольких уравнений (до 6 шт.). Расчеты проводились в системе расплав–минерал; собственно по расплаву, равновесному с данной минеральной фазой; собственно по данной минеральной фазе; по расплаву и минеральному парагенезису (2–3 минерала); по минеральному парагенезису; по расплаву, равновесному с данным минеральным парагенезисом. Сравнение полученных результатов осуществлялось по величине среднеквадратичной ошибки. В идеальном случае расхождения численных значений искомой величины должны лежать в рамках среднеквадратичной ошибки.
2. Для расчетов интенсивных параметров наиболее ранних этапов эволюции магм, по возможности, использовались наиболее магнезиальные разности фаз в предположении, что они отвечают этим этапам. Хотя существует вероятность того, что наиболее магнезиальные разности фаз не были встречены при исследованиях.
3. Состав расплавных включений, преимущественно однофазных или гомогенизированных в данном минерале, отчасти совпадает с составом расплава и может быть использован в некоторых случаях для расчетов. Для расчетов может быть использован и валовый состав породы при допущении его соответствия первичному расплаву.
4. Исследовались преимущественно системы расплав–шпинель, расплав–оливин, расплав–шпинель–оливин, полагая их наиболее ранними фазами. Это связано с тем, что для полного исследования возможных вариантов систем в данном магматическом расплаве требуется очень значительный объем вычислительной работы, что возможно только после создания программы, позволяющей достаточно быстро исследовать большое число предполагаемых вариантов с использованием итерационных методов.

Глава 9. Вулканыты второго слоя современной океанической коры

Основные вулканыты второго слоя современной океанической коры, сформировавшиеся в широком возрастном диапазоне, по юрское время включительно, могут образовываться в трех геодинамических обстановках – растяжения, трансформного скольжения и как проявление внутриплитного магматизма, хотя существуют и другие геодинамические классификационные схемы. В рамках каждой из этих геодинамических обстановок вулканыты принимают участие в образовании и строении различных по масштабам сооружений (одиночные вулканические постройки, срединно-океанические хребты, рифтовые долины, поднятия, подводные плато и т. д.) и обладают определенными петрологическими и геохимическими признаками. В срединно-океанических хребтах присутствует несколько групп толеитовых базальтов, одинаковых по составам для атлантического и тихоокеанского сегментов СОХ, что, по мнению Л.В. Дмитриева [29], свидетельствует о постоянстве мантийного источника и одинаковости их образования в обоих океанах. В рамках Индо-Атлантического сегмента Земли толеитовый магматизм также неоднороден, и в нем выявлены тектономагматические провинции [94]. Однако по данным Ю.М. Пушаровского и Д.Ю. Пушаровского [73] существуют глубокие различия мантии под Тихоокеанским тектоническим сегментом и Индо-Атлантическим тектоническим сегментом. По мнению Б.И. Васильева [13], Тихоокеанская мегавпадина – уникальное явление, ее формирование началось в юрское время и аномально горячая легкая мантия присутствует под срединно-океаническими хребтами на глубинах ~250 км. Используя полученные нами формулы, были рассчитаны условия начала их кристаллизации по имеющимся опубликованным материалам фазового состава толеитов из зоны САХ и поднятия Афанасия Никитина.

9.1. Индо-Атлантический сегмент

Вулканыты зоны СОХ. Были использованы данные по фазовому составу лав: драгированные лавы рифтовой долины 43°N Срединно-Атлантического хребта из работы В.С. Каменецкого, А.А. Гуренко [223]; лавы (пикриты), вскрытые скважиной 332В, расположенной в 30 км к западу от оси хребта – М. Флавера и др. [180], Ф. Ходжеса, Дж. Пейпика [211]; лавы (пикриты), драгированные в разломе, пересекающем южную часть (54°S) Срединно-Атлантического хребта – Л. Ван Хидена, А. ле Роукса [307]; лавы, драгированные и собранные в районе FAMOUS Срединно-Атлантического хребта В. Бриана [151] и В.С. Каменецкого [33]. Выборочные составы фаз представлены в таблице 1–Атлантика.

Система расплав–шпинель–оливин. Было использовано 10 парных анализов парагенезиса шпинель–оливин (таблица 2 этой работы), 7 парных анализов взяты из работы [223] – MORB базальты. Анализы представляют включения шпинели и включающие их фенокристаллы оливина, среди которых авторы выделяют «аномальные» пары с повышенными содержаниями титана в шпинели и пониженными содержаниями кальция в оливине. Кроме того, были использованы следующие пары, сформированные из наиболее магнезиальных оливинов и шпинелей, а именно: из пикрита [180], из базальта с обильными вкрапленниками оливина [211], а также еще одна пара из пикрита [307]. Составы кристаллов шпинели из этих пар были проверены на равновесность их составов, а составы пар шпинель–оливин были проверены на равновесность составов реальных и предполагаемых парагенезисов. Результаты расчетов равновесий представлены в таблице 2–Атлантика.

Таблица. 1–Атлантика. Выборочные составы фаз и лав второго слоя океанической коры Атлантического сегмента.

Источник	№ п/п	Порода/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
I	1	sp		0.39	25.19	42.23	4.06	10.57	0.18	17.07			
	2	ol	40.69			0.09		8.82	0.14	49.9	0.28		
	3	орх	57.16	0.23	0.84	0.27		6.33	0.17	34.71	1.29	0.03	
	4	sp		4.68	22.62	34.79	5.95	13.32	0.07	16.95			
	5	ol	40.61					9.79	0.16	49.17	0.16		
	6	стекло корки за- калки	50.12	0.95	15.32			7.78	0.13	8.67	13.32	2.19	0.25
	7	стекло включения	50.17	0.99	14.55			8.05	0.15	8.87	13.99	1.96	0.34
II	9	sp		0.38	23.85	44.38	3.07	10.97	0.39	15.98			
	10	ol	39.96					10.61	0.17	48.35	0.37		
	11	стекло	50.09	0.76	16.34			9.32	0.2	8.92	12.29	2.05	0.11
	12	порода	47.7	0.56	13.76		2.75	6.45	0.16	16.15	10.50	1.78	0.15
III	13	sp		0.46	26.74	39.14		14.69	0.15	17.38			
	14	ol	40.95		0.09	0.07		9.78	0.17	48.07	0.27		
	15	стекло	50.12	2.13	14.8		1.54	10.27	0.14	6.95	10.3	2.96	0.19
	16	порода	47.65	1.85	12.5		1.55	10.33	0.19	13.62	8.89	2.69	0.24
IV	17	ol	45.7	0.44	9.8	0.14		11.1		23.9	8.4	0.6	0.01
	18	стекло	46.6	0.39	11.2	1.1		9	0.18	20	10.2	1.27	0.02
V	19	стекло	49.1	0.67	16.52			7.91	0.08	9.52	13.33	1.67	0.07
	20	включение	48.36	0.7	14.75			7.81	0.18	12.51	12.22	1.45	

Примечание. I – данные из работы В.С. Каменецкого, А.А. Гуренко [223]; 1, 2 – нормальная оливин–шпинелевая пара; 3, 4, 5 – «аномальная» оливин–шпинелевая пара и ортопироксен из включения; 6, 7 – предполагаемый первичный расплав. II – данные по скважине 332В из работы М. Флавера и др. [180]; 9, 10 – шпинель–оливиновая пара; 11, 12 – предполагаемый первичный расплав. III – данные из работы Л. Ван Хидена, А. ле Роукса [307]; 13, 14 – оливин–шпинелевая пара; 15, 16 – предполагаемый первичный состав. IV – данные из работы В Бриана [151] по зоне FAMOUS; 17 – состав оливина; 18 – состав стекла. V – данные из работы В.С. Каменецкого [33]; 19 – состав закалочного стекла; 20 – состав расплавного включения в шпинели.

Таблица. 2–Атлантика. Количественная оценка равновесности шпинель–оливинового парагенезиса из базальтов и пикритов Срединно-Атлантического хребта.

Источник	Формула	№ п/п	PSPRa	PSOLRa	PSOLRb	PSOLRc	PSOLRd	PSOLRf
В.С. Каменецкий, А.А. Гуренко [223]		1	0.02	0.02	-1.2	0.0	-0.03	-0.05
		2	-0.01	0.48	-1.42	0.0	-0.03	-0.07
		3	0.01	0.21	-1.1	0.0	-0.03	-0.06
		4	-0.04	0.86	-1.2	0.0	-0.05	-0.09
		5	-0.08	1.4	-1.2	-0.01	-0.06	-0.11
		6	-0.09	1.35	-1.23	-0.01	-0.05	-0.11
		7	-0.17	2.23	-0.7	-0.02	-0.07	-0.15
М. Флавер и др. [180]		8	0.03	-0.23	-0.99	-0.01	0.01	-0.02
Ф. Ходжес, Дж. Пейпик [211]		9	0.0	-0.59	-0.61	-0.01	0.03	-0.01
Л. Ван Хиден, А. ле Роукс [307]		10	0.01	-0.75	0.54	-0.01	0.02	0.0
Сигма			0.056	0.71	0.78	0.012	0.036	0.032

Расчеты по формуле (**PSPRa**), позволяющие выяснить равновесие собственно состава самого кристалла шпинели, показали, что за исключением одного из «аномальных» кристаллов (№ 7 – несоответствие по составу ~3 сигмы), составы шпинели можно считать равновесными. Возможно, это связано с тем, что содержание в этом кристалле окиси титана превышает граничное значение содержания TiO_2 (см. таблицу П. I.1.1 sp), использованное для расчета указанной формулы. Расчеты по формулам (**PSOLRa**, **PSOLRb**, **PSOLRc**, **PSOLRd**, **PSOLRf**), позволяющим судить о равновесности парагенезиса **sp–ol**, показали, что практически все выбранные и сформированные пары являются равновесными, включая и 3 пары, сформированные в пикритах. Несоответствие составов шпинель–оливиновых пар (в рамках 1.5 сигм) наблюдается при расчетах по формуле **PSOLRb** в данных из работы В.С. Каменецкого, А.А. Гуренко [223], что будет затронуто в разделе для Тихоокеанского сегмента. Исключения составляют «аномальные» пары, в которых кристаллы шпинели содержат концентрации алюминия, более высокие относительно равновесных с оливином, на что указывают расчеты по формулам (**PSOLRa**) и (**PSOLRf**). Одним из вариантов объяснения может быть низкая относительно равновесной фугитивность кислорода, приводящая к нехватке Fe^{3+} в расплаве и, соответственно, в шпинели. Этот вариант объяснения является на данном этапе исследований не единственным, но указывает на дифференциальную подвижность элементов внутри кристаллов шпинели. Исследования природных объектов, вероятно, смогут позволить различать причины, вызывающие подвижность того или иного элемента, входящего в состав кристаллов шпинели.

В работе В.С. Каменецкого, А.А. Гуренко [223] в кристаллах оливина наряду с включениями шпинели исследованы и включения ортопироксена, связанные с достаточно кислыми стеклами в расплавных включениях, а также присутствующие в «аномальном» оливине. Оливин–ортопироксеновая ассоциация была проверена на равновесность с помощью формул (**POLRRa**, **POLRRb**, **POLRRc**). Первая и последняя формулы по своим характеристикам пригодны только для качественных оценок, формула **POLRRb** пригодна для количественных оценок, но требует знания величины равновесной температуры. Расчеты по всем трем формулам продемонстрировали равновесность оливин–ортопироксеновых пар. Третья формула была использована для оценки равновесной температуры. Подставляя значения температуры в интервале 900–1200 °С с шагом 50 °С, рассчитывалось расхождение от равновесия составов оливина и ортопироксена. Минимальные значения расхождений по этой формуле были получены в интервале температур 950–1050 °С в зависимости от составов оливин–ортопироксеновых пар. Расчеты содержаний элементов в равновесном расплаве и его температуры с помощью разнообразных подходов (расчет по минеральной ассоциации с учетом состава расплава, по составу расплава и т. д.) показали неравновесность этого расплава и непригодность его для расчетов.

Составы 4 нормальных (см. таблицу 2–Атлантика, район 43°N Срединно-Атлантического хребта) и равновесных (см. таблицу 2–Атлантика) шпинель–оливиновых пар вместе с составами стекла корки закалки и наиболее магнезиального расплавного включения (см. анализы 6 и 7 таблицу 1–Атлантика) были использованы для расчетов содержаний магния в расплаве, равновесном с этими парами, а также температуры и давления кристаллизации этих пар [223]. Для расчетов были использованы варианты парагенезисов расплав–шпинель; расплав–оливин; расплав–шпинель–оливин; расплав, равновесный со шпинелью; расплав, равновесный с оливином; расплав, равновесный со шпинель–оливиновым парагенезисом.

Расчеты содержаний магния в расплаве по парагенезису расплав–шпинель. Была использована формула (**PGSP7a**), позволяющая рассчитать содержание магния с использованием содержаний алюминия и титана в расплаве в интервале давлений от 1 до 15 кб. Полученные результаты представлены в таблице 3–Атлантика.

Полученные расчетным путем содержания магния в расплаве, равновесном с кристаллами шпинели на 2–3 сигмы превышают реальные содержания магния в стекле.

Таблица. 3–Атлантика. Расчет содержания магния в расплаве, равновесном со шпинелью, по составу шпинели и расплава.

Расплав \ №	1	2	3	4
Стекло корки закалки	15.76	14.98	15.5	14.02
Расплавное включение	16.5	15.6	16.2	14.7
Сигма	1.3			

Примечание. Содержания магния представлены в виде атомных количеств в %. Содержание магния в стекле корки закалки – 12.05; в расплавном включении – 12.32.

Расчет содержания **магния** в расплаве по составу **расплава**, равновесному со шпинелью.

Были использованы 2 формулы – **PGLSM** и **PGLSMa**. В первой используются содержания алюминия, щелочей в расплаве и величина равновесной температуры. Для расчетов были использованы значения температуры в интервале значений 1150–1300 °С с шагом 50 °С. Содержания алюминия и щелочей взяты из данных по составам корки закалки и расплавного включения. Результаты расчетов представлены в таблице 4–Атлантика.

Таблица. 4–Атлантика. Расчет содержания магния в расплаве, равновесном со шпинелью, по составу расплава.

Расплав \ Т	1150 °С	1200 °С	1250 °С	1300 °С
Стекло корки закалки	11.9	12.94	13.99	15.03
Расплавное включение	12.46	13.51	14.55	15.53
Сигма	1.6			

Примечание. Содержания магния представлены в виде атомных количеств в %. Содержание магния в стекле корки закалки – 12.05; в расплавном включении – 12.32.

Для расчетов по формуле **PGLSMa** используются содержания в расплаве железа в двухвалентной форме, алюминия и щелочей. Были получены содержания магния в расплаве 15.63 и 16.22 (значение сигмы 1.8). Эти значения близки расчетным при температуре 1300 °С, в рамках сигмы соответствуют значениям, полученным по системе расплав–шпинель и выше реальных содержаний магния на 2–3 сигмы.

Расчеты содержаний **магния** в расплаве по парагенезису **расплав–оливин**. Были использованы 2 формулы (**PLOL7a**, **PLOL7b**), позволяющие с учетом состава расплава и температуры рассчитать численное значение содержания магния в расплаве. В первой формуле наряду с составом оливина учитывается величина равновесной температуры и содержания в расплаве кремния и алюминия; во второй формуле наряду с составом оливина учитываются содержания в расплаве кремния, алюминия, кальция и щелочей. Расчеты по первой формуле проводились в интервале температур 1100 – 1300 °С с шагом 50 °С. Результаты расчетов представлены в таблицах 5–Атлантика и 6–Атлантика.

Результаты расчета содержаний магния по формуле **PLOL7b** представлены в таблице 7–Атлантика.

Результаты, представленные в таблицах 5, 6, 7–Атлантика, однородны и совпадают (в рамках среднеквадратичной ошибки) с расчетами по системам расплав–шпинель и расплав, равновесный со шпинелью при температурах 1250–1300 °С. Результаты превышают реальные содержания магния в расплаве (закалочном стекле и расплавном включении).

Таблица. 5–Атлантика. Результаты расчетов содержания магния в расплаве по формуле (P_{LOL7a}).

Фаза	№	1100 °С	1150 °С	1200 °С	1250 °С	1300 °С
Стекло корки закалки	1	11.07	12.28	13.49	14.7	15.9
	2	10.82	12.03	13.23	14.4	15.6
	3	10.97	12.18	13.39	14.6	15.8
	4	11	12.2	13.41	14.6	15.7
	сигма	1.8				

Примечание. Содержания магния представлены в виде атомных количеств в %. Содержание магния в стекле корки закалки – 12.05; в расплавном включении – 12.32.

Таблица. 6–Атлантика. Результаты расчетов содержания магния в расплаве по формуле (P_{LOL7a}) для расплавного включения.

Фаза	№	1	2	3	4
Расплавное включение	1200 °С	13.37	13.71	13.9	13.9
	1250 °С	15.8	14.9	15.1	15.1
	сигма	1.8			

Примечание. Содержания магния представлены в виде атомных количеств в %. Содержание магния в стекле корки закалки – 12.05; в расплавном включении – 12.32.

Таблица. 7–Атлантика. Результаты расчетов содержаний магния в расплаве по формуле P_{LOL7b}.

№	1	2	3	4
Расплав				
Стекло корки закалки	14.9	14.6	14.8	14.8
Расплавное включение	14.65	14.3	14.6	14.5
Сигма	2.2			

Примечание. Содержания магния представлены в виде атомных количеств в %. Содержание магния в стекле корки закалки – 12.05; в расплавном включении – 12.32.

Расчеты содержаний **магния** в расплаве по **расплаву**, равновесному с оливином. Из 5 формул, позволяющих рассчитывать содержание магния в расплаве по составу самого расплава, допуская его равновесность, была выбрана формула **PGOLM4** (диапазон давлений 3–21 кб), дающая возможность рассчитать содержание магния по наличию хорошей связанности его содержания с содержаниями алюминия, щелочей в расплаве и величин равновесных температуры и давления. Расчеты проводились в диапазонах температур 1200–1300 °С с шагом 50 °С и давлений 4–8 кб с шагом 2 кб. Результаты этих расчетов представлены в таблицах 8 и 9–Атлантика.

Результаты расчетов содержания магния в расплаве по системе расплав–оливин и собственно расплаву дают схожие результаты. Эти результаты совпадают с аналогичными по системе расплав–шпинель и расплаву, равновесному со шпинелью; по P–T условиям отвечают значениям ~1300 °С и 8 кб. Расчетные содержания магния, как и во всех предыдущих расчетах, превышают реальные.

Расчеты содержаний **магния** в расплаве по парагенезису **расплав–шпинель–оливин**.

Для расчетов была использована формула **PSOL7**, учитывающая составы шпинели, оливина, а также содержание щелочей в расплаве и величину равновесного давления. Расчеты

проводились в интервале давлений 2–10 кб с шагом 2 кб. Результаты расчетов отдельно для стекла корки закалки и расплавного включения представлены в таблицах 10, 11–Атлантика.

Таблица. 8–Атлантика. Результаты расчетов содержаний магния в расплаве по формуле **PGOLM4** по составу стекла корки закалки.

T \ P	4 кб	6 кб	8 кб
1200 °С	12	11.4	10.7
1250 °С	14.4	13.8	13
1300 °С	16.8	16.1	15.5
Сигма	2.1		

Примечание. Содержания магния представлены в виде атомных количеств в %. Содержание магния в стекле корки закалки – 12.05; в расплавном включении – 12.32.

Таблица. 9–Атлантика. Результаты расчетов содержаний магния в расплаве по формуле **PGOLM4** по составу расплавного включения.

T \ P	4 кб	6 кб	8 кб
1200 °С	12.3	11.6	11
1250 °С	14.7	14	13.3
1300 °С	17	16.4	15.7
Сигма	2.1		

Примечание. Содержания магния представлены в виде атомных количеств в %. Содержание магния в стекле корки закалки – 12.05; в расплавном включении – 12.32.

Расчетные значения, представленные в таблицах 9, 10–Атлантика, близки к результатам различных вариантов расчетов, приводимых выше для случаев давления 4–8 кб, и выше реальных содержаний в расплавном включении.

Таблица. 10–Атлантика. Результаты расчетов содержаний магния в расплаве по формуле **PSPOL7** (стекло корки закалки).

P / №	1	2	3	4
2 кб	15.2	15.4	15.25	15.3
4 кб	15.7	15.8	15.7	15.8
6 кб	16.15	16.3	16.2	16.25
8 кб	16.6	16.8	16.6	16.7
10 кб	17.1	17.2	17.1	17.2
сигма	1.43			

Примечание. Содержания магния представлены в виде атомных количеств в %. Содержание магния в стекле корки закалки – 12.05.

Расчеты содержаний **магния** в расплаве по составу расплава, равновесного с парагенезисом **шпинель–оливин**. Были рассчитаны содержания магния в расплаве по формулам **PSOLMG** и **PSOLM1**. В расчетах по первой формуле наряду с содержаниями в расплаве титана и щелочей учитывается влияние температуры и давления. Соответственно, расчеты проводились в интервале температур 1200–1300 °С с шагом 50 °С и в интервале давлений 4–8 кб с шагом 2 кб. В формуле **PSOLM1** учитываются только содержания элементов в рас-

плаве, в число которых входят титан, алюминий, кальций и щелочи. Результаты расчетов по формуле **PSOLMG** представлены в таблицах 12, 13–Атлантика.

Таблица. 11–Атлантика. Результаты расчетов содержаний магния в расплаве по формуле **PSPOL7** (расплавное включение).

Р / №	1	2	3	4
2 кб	15.5	15.65	15.5	15.6
4 кб	16	16.1	16	16.1
6 кб	16.4	16.6	16.45	16.5
8 кб	16.9	17	16.9	17
10 кб	17.3	17.5	17.4	17.45
Сигма	1.43			

Примечание. Содержания магния представлены в виде атомных количеств в %. Содержание магния в расплавном включении – 12.32.

Таблица. 12–Атлантика. Результаты расчетов содержаний магния в расплаве по формуле **PGOLMG** по составу стекла корки закалки.

Т \ Р	4 кб	6 кб	8 кб
1200 °С	12.5	12.85	13.15
1250 °С	13	13.4	13.7
1300 °С	13.6	13.9	14.2
Сигма	1.6		

Примечание. Содержания магния представлены в виде атомных количеств в %. Содержание магния в стекле корки закалки – 12.05; в расплавном включении – 12.32.

Таблица. 13–Атлантика. Результаты расчетов содержаний магния в расплаве по формуле **PGOLMG** по составу расплавного включения.

Т \ Р	4 кб	6 кб	8 кб
1200 °С	12.8	13.1	13.4
1250 °С	13.3	13.6	13.9
1300 °С	13.8	14.1	14.4
Сигма	1.6		

Примечание. Содержания магния представлены в виде атомных количеств в %. Содержание магния в стекле корки закалки – 12.05; в расплавном включении – 12.32.

Расчеты по формуле **PSOLM1** дали следующие результаты: стекло корки закалки – 15.3; расплавное включение – 15.9 (сигма 1.5).

Полученные значения хорошо совпадают с предыдущими расчетами и также превышают реальные содержания магния как в закалочном стекле, так и в расплавном включении.

Для расчета величины **равновесной температуры** были использованы парагенезисы расплав–шпинель, расплав–оливин и расплав–шпинель–оливин, полагая, что минералы являются более стабильными фазами относительно состава расплава.

Для расчета величины **температуры** по парагенезису расплав–шпинель была использована формула **PSPTa1**, в которой используется только состав кристаллов шпинели и величина давления. Были рассчитаны значения равновесной температуры для давлений 4, 6 и 8 кб, представленные в таблице 14–Атлантика.

Таблица. 14–Атлантика. Результаты расчетов величины температуры по формуле **PSPTa1**.

Р / №	1	2	3	4
4 кб	1296 °С	1302 °С	1298 °С	1302 °С
6 кб	1313 °С	1318 °С	1315 °С	1319 °С
8 кб	1329 °С	1335 °С	1331 °С	1335 °С
Сигма	30 °С			

Полученные значения различаются в пределах среднеквадратичной ошибки в интервале используемых величин давлений и в целом совпадают с предполагаемыми (~1300 °С) температурами, исходя из расчетных содержаний магния.

Для расчетов величины **температуры** по парагенезису расплав–оливин были использованы следующие формулы: **POLTa1**, **POLTb1**, **POLTf1**. В формулах **POLTa1**, **POLTb1** наряду с составом оливина, учитываются содержания в расплаве магния, кремния, щелочей и давления. Поэтому расчеты были выполнены для содержаний магния в расплаве 14 и 16 атом. % и давлений 4, 6 и 8 кб. Расчеты были выполнены только для состава стекла корки закалки, учитывая близость этого состава и состава расплавленного включения. Результаты расчетов по формуле **POLTa1** представлены в таблицах 15, 16–Атлантика; результаты расчетов по формуле **POLTb1** представлены в таблицах 17, 18–Атлантика.

Полученные значения лежат в рамках среднеквадратичной ошибки; предпочтительными, вероятно, являются значения, полученные для давлений 6–8 кб и содержаний магния 16 атом. %.

Таблица. 15–Атлантика. Результаты расчетов величины температуры по формуле **POLTa1** (стекло корки закалки). Содержание магния в расплаве 14 атом. %.

Р / №	1	2	3	4
4 кб	1274 °С	1268 °С	1272 °С	1276 °С
6 кб	1283 °С	1277 °С	1281 °С	1285 °С
8 кб	1292 °С	1286 °С	1290 °С	1294 °С
Сигма	36 °С			

Таблица. 16–Атлантика. Результаты расчетов величины температуры по формуле **POLTa1** (стекло корки закалки). Содержание магния в расплаве 16 атом. %.

Р / №	1	2	3	4
4 кб	1304 °С	1298 °С	1302 °С	1306 °С
6 кб	1313 °С	1307 °С	1311 °С	1315 °С
8 кб	1322 °С	1316 °С	1320 °С	1324 °С
Сигма	36 °С			

Таблица.17–Атлантика. Результаты расчетов величины температуры по формуле **POLТb1** (стекло корки закалки). Содержание магния в расплаве 14 атом. %.

Р / №	1	2	3	4
4 кб	1272 °С	1265 °С	1270 °С	1274 °С
6 кб	1281 °С	1274 °С	1279 °С	1283 °С
8 кб	1290 °С	1283 °С	1287 °С	1292 °С
Сигма	36 °С			

Таблица. 18–Атлантика. Результаты расчетов величины температуры по формуле **POLТb1** (стекло корки закалки). Содержание магния в расплаве 16 атом. %.

Р / №	1	2	3	4
4 кб	1301 °С	1295 °С	1299 °С	1304 °С
6 кб	1310 °С	1304 °С	1308 °С	1312 °С
8 кб	1319 °С	1312 °С	1317 °С	1321 °С
Сигма	36 °С			

Расчеты по формуле **POLТf1**, учитывающей наряду с составом оливина содержания кремния, титана, железа в двухвалентной форме, кальция и щелочей и давление, были выполнены для составов стекла корки закалки и расплавного включения в интервале давлений 4–8 кб. Полученные значения представлены в таблицах 19, 20–Атлантика.

Таблица. 19–Атлантика. Результаты расчетов величины температуры по формуле **POLТf1** (стекло корки закалки).

Р / №	1	2	3	4
4 кб	1309 °С	1289 °С	1305 °С	1300 °С
6 кб	1311 °С	1292 °С	1307 °С	1302 °С
8 кб	1314 °С	1295 °С	1310 °С	1305 °С
Сигма	39 °С			

Таблица. 20–Атлантика. Результаты расчетов величины температуры по формуле **POLТf1** (расплавное включение).

Р / №	1	2	3	4
4 кб	1317 °С	1297 °С	1313 °С	1308 °С
6 кб	1320 °С	1300 °С	1316 °С	1311 °С
8 кб	1323 °С	1303 °С	1319 °С	1314 °С
Сигма	39 °С			

Полученные значения температуры по формулам **POLТa1** и **POLТb1** для случаев содержания магния в расплаве 16 атом. % и величины давления 6–8 кб практически идентичны аналогичным расчетам по системе расплав–шпинель. Рассчитанные значения температуры по формуле **POLТf1**, учитывающей содержание железа в расплаве в двухвалентной форме как для стекла корки закалки, так и для расплавного включения, практически не отличаются от значений рассчитанных по другим формулам. Это, по нашему мнению, указывает на невысокую степень окисленности железа.

Для оценки величины **фугитивности кислорода** применительно к условиям атмосферного давления были выполнены расчеты для системы расплав–шпинель и системы расплав–шпинель–оливин.

Для вычисления численного значения величины фугитивности кислорода в системе расплав–шпинель в условиях атмосферного давления были использованы следующие формулы:

GSPfa – используется состав шпинели, содержание кремния в расплаве и величина температуры (использован состав стекла корки закалки и величина температуры 1300 °С); **GSPfb** – используются содержания двухвалентной и трехвалентной форм железа в расплаве и величина температуры (1300 °С);

GSP5b – позволяющая рассчитать концентрацию Fe^{2+} в расплаве по составу шпинели и содержаниям кремния и алюминия в расплаве (использован состав стекла корки закалки). Результаты этих расчетов представлены ниже в таблицах 21, 22, 23–Атлантика.

Таблица. 21–Атлантика. Величина фугитивности кислорода, рассчитанная по формуле **GSPfa**.

№ п/п	1	2	3	4
f_{O_2}	-7.23	-7.52	-7.32	-7.71
Сигма	0.8			

Таблица. 22–Атлантика. Содержание Fe^{2+} в расплаве, вычисленное по формуле **GSP5b**.

№ п/п	1	2	3	4
Содержание Fe^{2+}	5.41	5.64	5.47	5.58
Сигма	1.4			

Примечание. Содержания железа представлены в виде атомных количеств в %. Содержание суммарного железа в двухвалентной форме в стекле корки закалки – 6.07 атом. %. Расчет трехвалентной формы железа проводился по разности, равной 6.07 (содержание железа в расплаве в двухвалентной форме) – содержание Fe^{2+} . Содержание трехвалентного железа составляет ~1/3 от величины сигмы (1.4), но близость конечных результатов значений фугитивности указывает на правдоподобие концентраций трехвалентного железа.

Таблица. 23–Атлантика. Величина фугитивности кислорода, рассчитанная по формуле **GSPfb**.

№ п/п	1	2	3	4
f_{O_2}	-7.39	-8.38	-7.62	-8.08
Сигма	0.5			

Полученные значения фугитивности достаточно близки и все значения лежат в рамках среднеквадратичной ошибки.

Расчет значений фугитивности кислорода в системе расплав–шпинель–оливин в условиях атмосферного давления проводился по 2 формулам – **SPOLfa** и **SPOLfb**. В первой формуле наряду с составами шпинели и оливина учитываются содержания в расплаве титана, алюминия и щелочей; во второй вместе с составами шпинели и оливина используется содержание Fe^{2+} в расплаве. Результаты расчетов по этим формулам представлены в таблицах 24, 25–Атлантика.

Таблица. 24–Атлантика. Величина фугитивности кислорода, рассчитанная по формуле **SPOLfa**.

№ п/п	1	2	3	4
f_{O_2}	-7.32	-7.51	-7.36	-7.39
Сигма	0.8			

Таблица. 25–Атлантика. Величина фугитивности кислорода, рассчитанная по формуле **SPOLfb**.

№ п/п	1	2	3	4
f_{O_2}	-8.02	-8.33	-8.09	-8.13
Сигма	0.9			

Обобщая все полученные значения фугитивности кислорода, можно утверждать, что все они в рамках среднеквадратичной ошибки лежат в окрестностях значения фугитивности кислорода для буфера QFM или WM при температуре 1300 °С.

Расчет величины **давления** проводился для парагенезисов расплав–шпинель (формула **PSPPb**) и расплав–шпинель–оливин (формула **PSOLP**). Обе формулы по своим характеристикам позволяют получать только оценочные значения рассчитываемой величины давления. В первой формуле, кроме состава шпинели, учитываются щелочность расплава и величина равновесной температуры в интервале 1200–1300 °С. Расчеты проводились для двух составов по щелочности – стекло корки закалки и расплавное включение. Результаты расчетов представлены в таблицах 26, 27–Атлантика.

Таблица. 26–Атлантика. Рассчитанные величины давлений (формула **PSPPb**) по составу шпинели и стекла корки закалки.

№ \ T	1	2	3	4
1200 °С	3	2.5	2.8	1.8
1250 °С	5.3	5	5.1	4
1300 °С	7.7	7.2	7.5	6.4
Сигма	2 кб			

Таблица. 27–Атлантика. Рассчитанные величины давлений (формула **PSPPb**) по составу шпинели и расплавному включению.

№ \ T	1	2	3	4
1200 °С	2.8	2.4	2.6	1.6
1250 °С	5.2	4.7	5	3.9
1300 °С	7.5	7	7.3	6.3
Сигма	2 кб			

В формуле **PSOLP** кроме составов шпинели и оливина учитывается величина температуры и содержания титана, алюминия и магния (16 атом. %) в расплаве. Расчеты проводились с учетом содержания этих элементов в стекле корки закалки и расплавного включения. Результаты расчетов представлены в таблицах 28, 29–Атлантика.

Таблица. 28–Атлантика. Рассчитанные величины давлений по формуле **PSOLP** с учетом состава стекла корки закалки.

T \ №	1	2	3	4
1200 °С	3.1	2.8	3	3.2
1250 °С	5.5	5.2	5.4	5.5
1300 °С	7.9	7.5	7.8	7.9
Сигма	1.8 кб			

Таблица. 29–Атлантика. Рассчитанные величины давлений по формуле **PSOLP** с учетом состава расплавленного включения.

Т \ №	1	2	3	4
1200 °С	3.2	2.9	3.1	3.3
1250 °С	5.6	5.3	5.5	5.7
1300 °С	8	7.7	7.9	8.1
Сигма	1.8 кб			

Рассчитанные величины давления при температуре 1300 °С лежат в интервале 7–8 кб и являются оценочными значениями, а не достоверными численными значениями, в силу статистических характеристик формул, с помощью которых они получены. Однако расчеты численных значений температуры и содержаний магния при различных величинах давления указывают на сходное значение давления $\sim 8 \pm 2$ кб при содержаниях магния $\sim 16 \pm 2$ атом. % (~ 11.5 вес. % MgO) и температуре ~ 1300 °С.

Вышеприведенные расчеты проводились на 4 реальных **равновесных** шпинель–оливиновых парагенезисах с привлечением составов закалочного стекла и расплавленного включения. Эти расчеты показали, что расплавы, равновесные с этим парагенезисом, оказались более **магнезиальными** относительно составов закалочных стекол и расплавленных включений в оливине. С целью проверки этого положения на других участках зоны САХ была рассмотрена система расплав–оливин в **толеитах** и **пикритах** из других участков Срединно-Атлантического хребта. В связи с тем, что в большинстве публикаций не приводятся составы реальных парагенезисов, мы вынуждены формировать предполагаемые ассоциации исходя из допущения, что наиболее магнезиальные составы фаз наиболее ранние и предположительно равновесные. Эти **составленные** ассоциации (расплав–оливин), представлены следующими вариантами. Базальты зоны FAMOUS: наиболее магнезиальные оливин и стекло [151]; этот же состав оливина, наиболее магнезиальное закаленное стекло и магнезиальное расплавленное включение из шпинели [33]. Пикриты скважины 332В, пробуренной в 30 км к западу от оси Срединно-Атлантического хребта: выше показано (см. таблицу 2–Атлантика), что составленные из наиболее магнезиальных разностей шпинель – оливиновые ассоциации из этих пикритов [180; 211] являются равновесными. Ассоциация расплав–оливин была составлена из наиболее магнезиальных разностей породы, стекла и оливина по данным из работы М. Флавера и др. [180], в которой приведены составы пород и стекол. По данным составов фаз пикритов 54°S Срединно-Атлантического хребта [307] были сформированы ассоциации из наиболее магнезиальных разностей оливина, породы и стекла. Сформированная таким образом шпинель–оливиновая ассоциация является равновесной (см. таблицу 2–Атлантика).

Для расчетов содержания магния в расплаве были использованы 2 формулы: **PLOL7a**, в которой наряду с содержанием магния в оливине учитываются величина равновесной температуры, содержания кремния и алюминия в расплаве; **PLOL7b**, в которую входят содержания железа и магния в оливине, содержания в расплаве кремния, алюминия, кальция и щелочей. В первой формуле было использовано предположительное равновесное значение температуры 1300 °С. Это значение было получено нами при расчетах различными способами. Из-за высокой однородности наиболее магнезиальных разностей закалочных стекол и составов оливина, использованных в работах, можно предположить, что температуры начала кристаллизации этих толеитовых расплавов лежат в окрестностях этой величины. К этому значению близко и значение температуры кристаллизации (1310 °С) первичного расплава, приводимое в работе В.С. Каменецкого [33]. Рассчитанные и реальные содержания магния в стеклах, расплавленных включениях и породе представлены в таблицах 30, 31–Атлантика.

Таблица. 30–Атлантика. Результаты расчетов содержания магния в расплаве по формуле (P_{LOL7a}).

Содержание Mg / № п/п	1	2	3	4	5	6	7
Расчетное содержание магния	15.55	15.3	16.45	17.05	14.9	15.36	17.43
Реальное содержание магния	14.3	13.2	17.35	21.7	12.3	9.74	18.6
Сигма	1.8						

Примечание. Содержания магния представлены в виде атомных количеств в %. Номера 1, 2, 3 – зона FАM-OUS, стекла из образцов пикритов и пикритовых базальтов: 1 – наиболее магнезиальное закалочное стекло – из работы В. Бриана [151]; 2 – наиболее магнезиальное закалочное стекло – из работы В.С. Каменецкого [33], 3 – закаленное расплавленное включения из кристалла шпинели – из работы В.С. Каменецкого [33]. Номера 4, 5 – скважина 332В, пикритовые базальты: 4 – порода; 5 – закалочное стекло; анализы 4 и 5 заимствованы – из работы М. Флавера и др. [180]. Номера 6, 7 – 54 °S Срединно-Атлантического хребта, пикритовые базальты: 6 – закалочное стекло; 7 – порода; анализы заимствованы из работы Л. Ван Хидена, А. ле Роукса [307].

Таблица. 31–Атлантика. Результаты расчетов содержания магния в расплаве по формуле (P_{LOL7b}).

Содержание Mg / №	1	2	3	4	5	6	7
Расчетное содержание магния	15.25	15.3	17.31	18.7	15.15	15.43	18.88
Реальное содержание магния	14.3	13.2	17.35	21.7	12.3	9.74	18.6
сигма	2.2						

Примечание. Содержания магния представлены в виде атомных количеств в %. Номера 1, 2, 3 – зона FАM-OUS, стекла из образцов пикритов и пикритовых базальтов: 1 – наиболее магнезиальное закалочное стекло – из работы В. Бриана [151]; 2 – наиболее магнезиальное закалочное стекло – из работы В.С. Каменецкого [33]. 3 – закаленное расплавленное включение из кристалла шпинели – из работы В.С. Каменецкого [33]. Номера 4, 5 – скважина 332В, пикритовые базальты: 4 – порода; 5 – закалочное стекло; анализы 4 и 5 заимствованы из работы М. Флавера и др. [180]. Номера 6, 7 – 54°S Срединно-Атлантического хребта, пикритовые базальты: 6 – закалочное стекло; 7 – порода; анализы заимствованы из работы Л. Ван Хидена, А. ле Роукса [307].

Результаты расчетов по обеим формулам достаточно близки, расхождения между ними укладываются в рамки среднеквадратичной ошибки. Результаты расчетов с использованием составов стекол превышают реальные содержания магния, исключением является включение в шпинели. В случае использования составов пород картина обратная, или значения близки. По нашему мнению, близость значений связана с искажением содержаний используемых элементов в расплаве, обусловленным излишним количеством оливина в породе за счет его отсадки. Для выяснения равновесности состава используемого расплава (стекло, порода) были проведены расчеты по формуле (P_{GOL1}), учитывающей кроме состава также P–T параметры равновесия и позволяющей выяснить равновесность состава расплава, равновесного с оливином. Составы пород, обогащенных оливином неравновесны в рамках 2–3 сигм, составы стекол не выходят за рамки 1–2 сигм. Расчеты по содержанию магния в расплаве по составу системы расплав–оливин и данные по равновесности составов предполагаемых расплавов отчетливо указывают на кумулятивную природу пикритовых базальтов в зоне САХ и потерю в большинстве случаев части оливина излившимися магмами.

Полученные результаты и выводы

1. Используя литературные данные, с помощью ряда уравнений, полученных нами, были исследованы парагенезисы расплав–шпинель, расплав–оливин, расплав–шпинель–оливин и другие из пикритовых разностей базальтов ряда участков САХ и проявлений внутриплитного вулканизма в Индо-Атлантическом сегменте океанической коры.

2. С помощью 5 уравнений, позволяющих выявить их, были исследованы равновесные составы кристаллов, образовавшихся из магматического расплава, и неравновесных – претерпевших последующие солидусные и метаморфические преобразования составов. Исследовались 10 шпинель–оливиновых минеральных ассоциаций, из которых 7 являются реальными парагенезисами, а 3 – сформированными на основании их максимальной магнезиальности. Эти исследования показали, что парагенезисы из базальтов и пикритов различных участков САХ, как правило, равновесны. Исключением являются высокотитанистые разновидности шпинели, включенные в низкокальциевый оливин. Равновесность указывает на то, что с момента образования эти ойкокристаллы оливина и хадакристаллы шпинели не испытали «длительных» изменений температуры. Под «длительностью» понимаются промежутки времени меньше ~30 дней, исходя из экспериментальных данных Дж. Лехмана [238] по возникновению зональности, в частности, по железу-магнию контактирующих кристаллов шпинели и оливина. Однако, как количественно влияют амплитуды изменения температур относительно первоначальной температуры образования, как влияют составы фаз и последующие солидусные преобразования, каковы величины температур закрытия обменных реакций и т.д. – пока не ясно. Необходимы экспериментальные исследования граничных условий возникновения зональности, что позволит, вероятно, решить ряд проблем генерации базальтов как СОХ, так и других.

На этом этапе исследований мы не располагаем данными о влиянии различных факторов на скорость переуравновешивания. Тем не менее, равновесность исследованных шпинель–оливиновых пар без учета этих данных позволяет предположить, что расплавы в зонах САХ путь от места кристаллизации шпинель–оливиновой ассоциации (~8 км, соответствующее глубинам ~20-25 км, см ниже) проходят за время менее 30 дней. Исходя из этого, можно заключить, что скорость движения расплава к поверхности в океанической коре под рифтовыми долинами СОХ варьирует от 30 до 85 м/час (без учета существования конвективных ячеек). Условия для расплава на этом пути после кристаллизации можно считать адиабатическими. Это позволяет, в свою очередь, допустить малую вероятность существования устойчивых магматических очагов – камер на пути подъема расплавов в зонах САХ (в рифтовых долинах). В рамках второго слоя океанической коры подводящие каналы представлены дайковыми комплексами. В третьем слое океанической коры, верхней частью которого можно предположительно считать габбро-перидотитовый блок, слагающий массив Atlantis [44; 173; 259], существовало большое число длительно остывавших магматических тел. Среди интрузивных пород, составляющих в массиве 91 %, присутствуют пачки тонкочередующихся между собой дунитов, троктолитов, дунитовых троктолитов и гарцбургитов, которые, по нашим представлениям, можно отчасти уподобить ультрамафитовой зоне Стиллуотерской интрузии или базальной зоне Бушвельдского массива. Подобное геологическое строение указывает на спокойные условия кристаллизации с формированием кумулятивного оливина в этих телах и показывает, что конвекция вряд ли имела место. Используя составы оливин–шпинелевой ассоциации, приводимые в работе М. Друина и др. [173], мы выявили, что составы этих фаз разбалансированы, а оливин содержит менее 0.1 вес. % СаО, что указывает на изменение его состава. Этот комплекс пород, кроме того, подвергся метасоматическим преобразованиям, приуроченным к трещинам, по которым циркулировал флюид. Местами метасоматические преобразования достигают уровня амфиболитовой фации [259]. Поэтому достаточно сложно сказать, на каком этапе произошла разбалансировка составов и что является ее причиной. Совокупность фактов — высокая скорость отсадки оливина (присутствие кумулятивного оливина в подушечных телах известно во многих офиолитовых комплексах); предполагаемая скорость поступления расплава и условия формирования шпинель–оливиновой ассоциации, присутствие пикритовых разностей среди пород современного второго слоя современной океанической коры (см. ниже); наличие расслоенности среди пород массива Atlantis — указывает на то, что эти тела вряд ли можно рассматривать, как бывшие магматические камеры. Они являют собой «отшнурованные» от подводящих каналов камеры, возможно, представляющие собой разнообразные силы (?). Питающую зону можно пред-

ставить как дайкообразное тело весьма жидкой магмы, окруженное, возможно не повсеместно, длительно остывающими силлообразными телами. Подобное строение питающих систем достаточно типично и для наземных аппаратов. Так, в работе В.С. Шеймовича и М.Г. Патоки [115] на примерах строения вулканов Огониглы, Оччамо, Агинский, Белоголовский, Большая Ипелька, Жировской, Правая Ходутка, Скалистый на полуострове Камчатка показано, что дайково-силловые поля широко развиты, в центральных частях вулканических построек. Потому на уровне третьего слоя питающая система рифтовой долины выглядит как некая зона жидкой магмы (где идет периодическая кристаллизация оливина и его осаждение), окруженная остывающими затвердевающими телами, имеющими слоистую ультрабазитовую зону в нижних частях. В итоге вся эта толща, сложенная каналом жидкой магмы, окруженной затвердевающими силлами размером по горизонтали, вероятно, несколько километров, а затем только твердыми породами. Полагая в первом приближении равенство мощностей 2-го и 3-го слоев океанической коры, можно предположить, что только $\sim 1/2$ часть образовавшегося толеитового расплава достигает дна рифтовых долин в зонах СОХ. Вторая половина затвердевает в виде интрузивных тел. Поступление же расплава в рифтовые долины идет из мантии, вероятно, по дайкообразным телам, которые по представлениям Е. Кэнон-Тепи [155], могут начинаться на глубинах до 50 км без отстаивания в предполагаемых очагах. Причем скорости движения расплава к поверхности на глубинах более 30 км должны быть сопоставимы, вероятно, с предполагаемыми нами – более 30м/час, т. к. базальты СОХ должны быть изолированы от окружающих их мантийных лерцолитов, чтобы не переуравновеситься с ортопироксеном на глубинах более 30 км [8; 78]. Хотя это положение нуждается в более точной формулировке, т. к. выборки расплав–оливин–ортопироксен в условиях «сухого» давления, сформированные нами на основании данных базы «ИФОРЕКС», имеют следующие характеристики: в интервале давлений до 20 кб этот минеральный парагенезис равновесен с расплавами основного и ультраосновного составов (340 т.); в интервале давлений 21–80 кб этот парагенезис равновесен только с расплавом ультраосновного состава (30 т.). Эти особенности системы расплав–оливин–ортопироксен хорошо совпадают и с поведением более простой «сухой» системы расплав–оливин под давлением (см. глава III, часть I, раздел 3, выводы, пункт 5).

3. На примере четырех шпинель–оливиновых пар по 3 подсистемам в толеитовых магмах СОХ — расплав–шпинель, расплав–оливин, расплав–шпинель–оливин (в качестве расплава использованы составы стекла корок закалки и расплавное включение) — были рассчитаны: содержание магния в расплаве, равновесном с перечисленными выше фазами; величины значений равновесной температуры; оценочные значения давления, которые по совокупности результатов близки реальным; предположительные оценки фугитивности кислорода применительно к условиям атмосферного давления.

4. Полученные данные на основании выполненных расчетов имеют следующие численные значения на начало кристаллизации: содержание окиси магния в расплаве ~ 11.5 вес. %; температура 1300 °С; давление 8 кб; фугитивность кислорода – в окрестностях буфера QFM или WM при указанной температуре (среднеквадратичная ошибка для всех этих значений лежит в среднем в рамках ~ 10 –15 относительных %). Это в первом приближении частичный состав первичного расплава и условия начала его кристаллизации для САХ.

5. Расчеты содержаний магния в расплаве по системе расплав–оливин из толеитов и пикритовых базальтов, а также вычисления равновесности используемых для расчетов предполагаемых расплавов достаточно отчетливо показали кумулятивную природу пикритов из САХ, что совпадает с выводами авторов использованных работ.

6. Приведенные численные значения содержания MgO в расплаве и т. д. не в полной мере соответствуют равновесным значениям. Это связано с рядом причин. В частности, составы

разности пикритовых пород приводят к завышению содержаний магния и уменьшению содержаний кремния, алюминия, щелочей, что искажает последующие расчеты. Истинные равновесные значения с учетом среднеквадратичной ошибки могут быть получены только путем решения большого числа приводимых в главах I и II уравнений с объединением их в системы, позволяющие рассчитать максимальное число интересующих величин с привлечением итерационных методов. Однако это требует значительных объемов вычислений и возможно только после создания программы, позволяющей использовать различные варианты систем уравнений и решать их, минимизируя величины среднеквадратичных ошибок.

Вулканыты плато Кергелен и поднятия Афанасия Никитина. Проявления внутриплитного вулканизма на океаническом дне образуют разнообразные по масштабам структуры – плато, поднятия, архипелаги, острова и т. д. В качестве примеров в Индо-Атлантическом сегменте выбраны названные выше сооружения, а из базальтов, их слагающих, исследованы оливиновые. Это связано с тем, что пикритовые разности считаются наиболее примитивными и, в отличие от других разностей базальтов, в них достаточно подробно исследован фазовый состав [12; 146; 147].

Выборочные составы использованных для расчетов фаз представлены в таблице 32–Атлантика.

Таблица. 32–Атлантика. Составы фаз из оливиновых базальтов плато Кергелен и поднятия Афанасия Никитина.

Источник	№ п/п	Порода/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
I	1	sp		3.53	12.04	41.24	12.54	18.91	0.72	11.3			
	2	ol	39.98			0.08		15.11	0.19	45.39	0.3		
	3	sp		9.03	11.91	21.82	18.93	27.84	0.3	8.61			
	4	ol	39.05					19.44	0.19	40.25	0.24		
	5	исправленный состав стекла расплавного включения	47.46	4.02	11.93	0.22			11.06	0.13	9.58	10.42	2.5
II	6	sp		0.97	23.41	38.86	7.97	14.91	0.2	14.14			
	7	ol	40.26					12.76	0.19	46.98	0.28		
	8	исправленный состав стекла расплавного включения	52.84	1.22	14.74		1.15	7.78	0.03	9.48	9.83	1.67	0.98

Примечание. I – данные из работы А.Ю. Борисовой и др. [147]: 1, 2 – наиболее магнезиальный оливин из приведенных 22 пар в этой работе и включенная в него шпинель; 3, 4 – наименее магнезиальный оливин из 22 пар, приведенных в этой работе и включенная в него шпинель; 5 – скорректированный состав наиболее магнезиального расплавного включения (таблица 5, анализы 5–25а [там же]). II – данные из работ А.Ю. Борисовой и др. [12; 146]: 6, 7 – средние составы шпинель–оливиновой пары из образца М1/34-5 в таблице 2 [12]; 8 – состав пересчитанного наиболее магнезиального расплавного включения из оливина образца М1/34-5 [146].

Система расплав–шпинель–оливин. Было использовано 24 парных анализа парагенезиса шпинель–оливин, исследованных в оливиновых базальтах: данные по плато Кергелен (Индийский океан), использовано 22 парных анализа шпинель–оливиновой ассоциации [147]; данные по поднятию Афанасия Никитина (Индийский океан), использовано 2 пары средних составов шпинель–оливиновой ассоциации [12]. Эти 24 пары, представленные вкрапленниками оливина с включенными в них кристаллами шпинели, были исследованы на равновесность составов собственно кристаллов шпинели (формула **PSPRa**) и равновесность

шпинель–оливиновых пар (формулы **PSOLRa**, **PSOLRb**, **PSOLRc**, **PSOLRd**, **PSOLRf**). Результаты расчетов равновесий представлены в таблице 33–Атлантика.

Таблица. 33–Атлантика. Количественная оценка равновесности шпинель–оливинового парагенезиса из оливиновых базальтов плато Кергелен и поднятия Афанасия Никитина.

Источник \ Формула	№ п/п	PSPRa	PSOLRa	PSOLRb	PSOLRc	PSOLRd	PSOLRf
I	1	-0.6	4.56	-4.85	-0.19	-0.15	-0.42
	2	-0.6	4.37	-4.85	-0.21	-0.15	-0.45
	3	-0.77	4.73	-4.39	-0.18	0.11	-0.39
	4	-0.74	6.2	-5.14	-0.2	-0.26	-0.58
	5	-0.69	5.52	-4.77	-0.18	-0.19	-0.49
	6	-1.35	9.71	-7.14	-0.26	-0.57	-1.19
	7	-0.64	4.68	-4.51	-0.18	-0.14	-0.39
	8	-0.57	3.95	-4.08	-0.18	-0.09	-0.36
	9	-1.27	8.73	-5.68	-0.2	-0.3	-0.79
	10	-0.72	4.96	-4.73	-0.19	-0.14	-0.48
	11	-1	8	-5.24	-0.21	-0.33	-0.76
	12	-0.73	5.61	-4.57	-0.18	-0.19	-0.49
	13	-0.65	3.94	-4.78	-0.17	-0.08	-0.37
	14	-0.62	3.37	-4.77	-0.18	-0.05	-0.35
	15	-0.61	3.98	-4.71	-0.17	-0.1	-0.38
	16	-0.71	4.23	-5.04	-0.17	-0.1	-0.41
	17	-0.67	3.86	-5.32	-0.19	-0.1	-0.42
	18	-0.91	6.48	-6.29	-0.24	-0.31	-0.81
	19	-0.64	3.59	-4.98	-0.18	-0.07	-0.36
	20	-0.74	4.24	-5.01	-0.18	-0.09	-0.43
	21	-0.72	4.55	-3.49	-0.19	-0.12	-0.4
	22	-0.74	6.63	-6.42	-0.21	-0.32	-0.7
II	23	-0.1	1.85	-3.29	-0.14	-0.06	-0.17
	24	-0.11	2.3	-3.06	-0.14	-0.09	-0.19
Сигма		0.056	0.71	0.78	0.012	0.036	0.032

Примечание. I – данные из работы А.Ю. Борисовой и др. [147] по оливиновым базальтам плато Кергелен; II – данные из работы А.Ю. Борисовой и др. [12]: по оливиновым базальтам поднятия Афанасия Никитина.

Расхождения рассчитанных и реальных значений величин для всех 24 пар шпинель–оливинового парагенезиса превышают величину сигмы от двух до десяти раз и указывают, что разбалансировка составов происходила в условиях остывания. На направление процесса указывают положительные значения, полученные по формуле **PSOLRa** и отрицательные, полученные по формуле **PSOLRb**. В первом случае расчетное содержание железа в оливине больше, чем реальное; во втором случае расчетное содержание магния меньше, чем реальное. Это говорит о том, что расчетный состав оливина, равновесного с данным составом шпинели, должен быть более железистым. Такое направление разбалансировки состава кристалла шпинели (имеющего массу на несколько порядков меньше массы вмещающего оливина, состав которого можно считать постоянным в данном случае), судя по экспериментальным данным Дж. Лехмана [238], указывает на остывание. На возможный диффузионный обмен кристаллов шпинели и кристаллов оливина, включающих шпинель, указывают и результаты расчетов равновесности состава самой шпинели по формуле **PSPRa**, где превыше-

ния сигмы составляют 2–20 раз. Все эти результаты указывают на существование периферических магматических очагов, где происходит остывание магмы, содержащей кристаллы оливина с включенными в них кристаллами шпинели, и диффузионное переуравнивание составов этого парагенезиса.

Содержания TiO_2 довольно высокие как в лавах оливиновых базальтов плато Кергелен (2–4 вес. %), так и в кристаллах шпинели, включенных в кристаллы-вкрапленники оливина (3 до 9 вес. %) [147]. Эти значения превосходят верхние границы содержания TiO_2 для расплава и шпинели, использованные для получения перечисленных формул (см. табличные данные в главе II), что дает основания с осторожностью относиться к выводу о неравновесности шпинель–оливинового парагенезиса. Однако разбалансированность составов шпинель–оливинового парагенезиса в лавах поднятия Афанасия Никитина свидетельствует в пользу правомерности этого вывода и для плато Кергелен.

По парагенезису расплав–оливин (шпинель в данном случае не пригодна из-за изменения состава) были рассчитаны содержания магния в расплаве и температура, а также оценена величина давления. Для расчетов были выбраны наиболее магнезиальные составы оливина и пересчитанные составы расплавных включений.

Расчеты содержаний магния в расплаве по парагенезису **расплав–оливин**. Для расчетов была использована формула **PLOL7a**, позволяющая вычислять содержание магния в расплаве с точностью до 1.8 атом. %, и формула **PLOL7b**, позволяющая получать значения с точностью, равной 2.2 атом. %. По формуле **PLOL7a** были получены следующие значения: плато Кергелен – расчетное содержание магния в расплаве 15.1 атом. % (реальное содержание 13.49 атом. %); поднятие Афанасия Никитина – расчетное содержание магния в расплаве 14.3 атом. % (реальное содержание 13.11 атом. %). По формуле **PLOL7b** были получены близкие результаты по плато Кергелен – 13.4 атом. % (реальное 13.49) и поднятию Афанасия Никитина – 15.5 атом. % (реальное 13.11). Для расчетов по формуле **PLOL7a** необходимо знание величин температуры: для плато Кергелен были приняты 1262 °С; для поднятия Афанасия Никитина – 1290 °С. Основания для выбора этих значений представлены в тексте ниже.

Расчеты содержаний магния в расплаве по собственно **расплаву**. Расчеты были выполнены по формуле **PGOLM4** (диапазон давлений 3–21 кб, величина ошибки 3.2 атом. %), дающей возможность рассчитать содержание магния по наличию хорошей связанности его содержания с содержаниями алюминия, щелочей в расплаве и величин равновесных температуры и давления. Используются те же величины температуры, что для формулы **PLOL7a**; величина давления принята равной 2 кб. Получены следующие результаты: плато Кергелен – 14.6 атом. %; поднятие Афанасия Никитина – 15.2 атом. %.

Оценки предполагаемых равновесных температур и давлений проводилась с помощью формулы **PGOL1**, позволяющей по составу расплава с учетом температуры и давления выявить равновесность расплава, равновесного с оливином. Для плато Кергелен минимальное расхождение, лежащее в рамках сигмы, было получено для температуры 1262 °С и давления 2 кб. Для поднятия Афанасия Никитина – для температуры 1290 °С и давления 2 кб. Наилучшим содержанием магния в расплаве оказалось 15.5 атом. %.

Для расчетов величины **температуры** по парагенезису расплав–оливин были использованы формулы **POLTa1**, **POL Tb1** и **POL Tf1**. В этих формулах учитывается величина давления, поэтому расчеты проводились для давления 2, 4, 6 и 8 кб. Результаты этих расчетов представлены в таблицах 34, 35, 36–Атлантика.

Полученные значения температуры для каждой величины давления достаточно близки и не выходят за рамки величины среднеквадратичной ошибки. Однако значения, полученные по формуле **POL Tf1** с использованием содержания железа в расплаве, несколько ниже значений, полученных по двум другим формулам. Вероятно, это указывает на заниженность содержания железа и низкую степень окисленности железа в расплаве.

Таблица. 34–Атлантика. Расчет величины температуры по формуле **POLTa1**.

Объект \ P	2 кб	4 кб	6 кб	7 кб
Плато Кергелен	1262 °С	1271 °С	1280 °С	1289 °С
Поднятие Афанасия Никитина	1290 °С	1302 °С	1312 °С	1321 °С
Сигма	36 °С			

Примечание. При расчетах для поднятия Афанасия Никитина содержание магния в расплаве принималось 15.5 атом. %, как наиболее соответствующее равновесию.

Таблица. 35–Атлантика. Расчет величины температуры по формуле **POLTb1**.

Объект \ P	2 кб	4 кб	6 кб	7 кб
Плато Кергелен	1263 °С	1272 °С	1281 °С	1290 °С
Поднятие Афанасия Никитина	1287 °С	1296 °С	1305 °С	1314 °С
Сигма	36 °С			

Примечание. При расчетах для поднятия Афанасия Никитина содержание магния в расплаве принималось 15.5 атом. %, как наиболее соответствующее равновесию.

Таблица. 36–Атлантика. Расчет величины температуры по формуле **POLTf1**.

Объект \ P	2 кб	4 кб	6 кб	7 кб
Плато Кергелен	1246 °С	1257 °С	1270 °С	1281 °С
Поднятие Афанасия Никитина	1265 °С	1277 °С	1288 °С	1300 °С
Сигма	39 °С			

Расчеты величины равновесной температуры по составу расплава, равновесного с оливином, по формуле **PGOLTe** (сигма 35 °С), учитывающей состав расплава и величину давления (использовано значение 2 кб), дали следующие результаты: плато Кергелен – 1230 °С; поднятие Афанасия Никитина – 1245 °С.

Полученные результаты позволяют сделать следующие **выводы**:

1. Составы кристаллов шпинель–оливинового парагенезиса, представленные включениями кристаллов шпинели в значительно более крупные кристаллы оливина, перенормированы в условиях остывания магмы. Это позволяет полагать, что в структурах внутриплитного проявления магматизма на океаническом дне (плато, поднятия), в отличие от рифтовых долин СОХ, лишенных периферических магматических очагов, сообщающихся с океаническим дном, существуют периферические магматические очаги на глубинах 6 и менее километров.

2. Оливиновые базальты внутриплитных проявлений магматизма на океаническом дне имеют кумулятивную природу.

3. Первичные расплавы внутриплитных базальтов на примерах плато Кергелен и поднятия Афанасия Никитина содержали больше магния относительно излившихся расплавов, что, вероятно, связано с отсадкой оливина.

9.2. Тихоокеанский сегмент

Для исследований были использованы опубликованные данные по фазовому составу пород: оливиновых базальтов из района трансформного разлома Сикейрос (Восточно-Тихоокеанское поднятие) [162]; островных толеитов, бонинитов, базальтов СОХ хребта Хантер из разломной зоны Хантер [292]; базальтов хребта Горда, расположенного к югу от трансформного разлома Мендосино [164]; базальтах Коста-Риканского рифта СКВ. 501, 504В, 505 [186; 253].

Единственной из названных выше, где представлены парные анализы реальных шпинель–оливиновых парагенезисов, является работа И. Сигурдсона и др. [292]. Поэтому из нее были выбраны, а из данных, приводимых в работах [162;164; 253], сформированы парные анализы шпинели и оливина. В общей сложности было использовано 38 парных анализов, а также 43 анализа кристаллов шпинели, взятых из работы [186]. Нумерация образцов, приводимая в этих статьях, сохранена. Выборочные составы минеральных фаз и предполагаемых расплавов, равновесных с ними, представлены в таблице 1–Тихий.

Таблица. 1–Тихий. Выборочные составы фаз и лав второго слоя океанической коры Тихоокеанского сегмента.

Источник	№ п/п	Порода/ стекло/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
I	1	sp		0.29	38.32	28.38	3.89	9.08	0.06	18.83			
	2	ol	40.53					9.06	0.15	49.31	0.29		
	3	sp		0.01	62.9	2.8	3.39	6.12	0.07	22.23			
	4	ol	40.89					9.6	0.15	48.61	0.29		
	5	исправленный состав стекла расплавного включения	48.26	0.86	16.16	0.082		8.23	0.14	12.02	12.22	1.97	0.02
	6	исправленный состав стекла расплавного включения	47.73	0.04	18.47	0.023		8.13	0.11	11.11	13.39	0.97	0.003
II	7	sp		0.28	42.45	22.73	4.68	9.58	0.09	18.94			
	8	ol	40.43					11.17		48.16	0.25		
	9	sp		0.18	8.96	44.03	17.41	21.63	0.22	7.56			
	10	ol	39.05					18.18		42.01	0.18		
	11	базальт MORB	50.53	1.4	14.91			10.65	0.11	7.75	12.33	2.26	0.06
	12	базальт ост- ровов	51.23	0.42	15.74			9.25	0.17	7.09	12.69	1.47	0.22
III	13	sp		0.52	30.7	33.5	6.53	10.7	0.23	17			
	14	ol	39.9					12.2	0.2	46.6	0.28		
	15	базальтовое стекло	51	1.73	14.9			9.66	0.17	7.62	11.2	2.74	0.12
IV	16	sp		0.29	29.25	39.92	3.69	11.69	0.13	16.72			
	17	ol	39.94					11.32	0.22	48.37	0.31		
	18	базальтовое стекло	49.33	0.81	16.99			8.6		9.31	12.86	2.13	0.05
V	19	sp		0.53	24.81	38.92		18.24	0.71	15.03			
	20	базальтовое стекло	49.54	0.96	16.08			9.53	0.15	8.7	12.68	2.01	0.05

Примечание. I – данные из работы И. Данишевского и др. [162] по оливиновым базальтам из района трансформного разлома Сикейрос; 3, 4 – вторая шпинель–оливиновая пара; в ней шпинель находится в расплавном

включении внутри оливина и неравновесна с оливином; 6 – состав стекла из этого включения. II – данные из работы И. Сигурдсона и др. [292]: 7, 8 – шпинель–оливиновая пара из базальтов MORB; (9, 10 – шпинель–оливиновая пара из базальтов островов; 11 и 12 – соответственно, базальт MORB и базальт островов. III – данные из работы А. Дэвиса, Д. Клаги [164]: 13 и 14 – равновесная шпинель–оливиновая пара; 15 – состав базальтового стекла. IV – данные из работы Дж. Натланда и др. [253]. 16, 17 – равновесная шпинель–оливиновая пара; 18 – состав базальтового стекла. V – данные из работы Т. Фуруты и др. [186]; 19 – равновесная шпинель; 20 – базальтовое стекло (среднее из 10 анализов).

Было сформировано 43 пары расплав–шпинель и 38 пар шпинель–оливин для системы расплав–шпинель–оливин, что связано с отсутствием данных по составам оливина в работе [186].

Система расплав–шпинель. Составы кристаллов шпинели с помощью формулы **PSPRa**

были проверены на равновесность их составов с расплавом. Результаты 38 анализов, для которых есть парные оливины, представлены в таблице 5–Тихий. Результаты 5 анализов по базальтам из скважины 505 в Коста-Риканском рифте из работы Т. Фуруты и др. [186] имеют значения -0.03; -0.06; -0.05; -0.05; -0.04 (величина сигмы 0.056) и, судя по численным значениям, являются равновесными с расплавом. Равновесными с расплавом являются и составы шпинелей, приводимые в работе Дж. Натланда и др. [253], скв. 501 и 504В в Коста-Риканском рифте (см. таблицу 5–Тихий). Равновесными составами обладают и шпинели (за исключением анализа № 6, таблица 5–Тихий) из базальтов района трансформного разлома Сикейрос (Восточно-Тихоокеанское поднятие) [162] и базальтов хребта Горда, расположенного к югу от трансформного разлома Мендосино [164]. Совсем иная картина наблюдается для разломной зоны Хантер (данные И. Сигурдсона и др. [292]). Составы шпинелей из бонинитов и островных базальтов неравновесны с расплавом, тогда как составы шпинелей из базальтов MORB и E–MORB преимущественно равновесны (см. таблицу 5–Тихий), хотя переуровненные разности кристаллов шпинелей присутствуют и в них. Исходя из полученных выше данных для Атлантического сегмента, можно предположить, что зона Хантер имеет сложное геологическое строение, что позволяет формироваться периферическим магматическим очагам, в которых происходит переуровновывание составов кристаллов шпинели.

По равновесным составам пяти кристаллов шпинели из работы Т. Фуруты и др. [186] (скв. 505, Коста-Риканский рифт) с помощью формул (**PGSP7a**) и (**PGSP7b**) было рассчитано содержание магния в расплаве с учетом содержаний ряда элементов в равновесном расплаве. Использован средний состав 10 свежих базальтов, приводимый в этой работе, см. анализ № 20, таблице 1–Тихий. Полученные результаты представлены в таблице 2–Тихий.

Таблица. 2–Тихий. Содержание магния в расплаве, рассчитанное по формулам (**PGSP7a**) и (**PGSP7b**).

Формула	сигма	1	2	3	4	5
PGSP7a	1.3	13.33	13.31	12.97	12.9	13.4
PGSP7b	1	13.41	13.38	12.87	12.77	13.52

Полученные численные значения отличаются от реального содержания магния в расплаве, равного 12.03 атом. % в большую сторону, хотя различия лежат в окрестностях величин среднеквадратичных ошибок. Вероятно, как и в случае базальтов из рифтовых долин зоны САХ, можно говорить о некоторой потере магния за счет отсадки оливина.

Эти же составы шпинелей были использованы для расчетов величин температуры по формулам **PSPTa1** и **PSPTa2**, в которых в расчетах принимает участие величина давления. Для расчетов были использованы величины давления в интервале 2–8 кб с шагом 2 кб. Результаты расчетов величин температуры по указанным формулам представлены в таблицах 3 и 4–Тихий.

Таблица. 3–Тихий. Величины температур, рассчитанные по формуле **PSPTa1** в интервале давлений 2–8 кб.

№ п/п \ P	2 кб	4 кб	6 кб	8 кб
1	1255 °С	1272 °С	1289 °С	1305 °С
2	1225 °С	1242 °С	1259 °С	1275 °С
3	1223 °С	1240 °С	1257 °С	1273 °С
4	1231 °С	1248 °С	1265 °С	1282 °С
5	1222 °С	1238 °С	1255 °С	1272 °С

Примечание. Сигма 30 °С.

Таблица. 4–Тихий. Величины температур, рассчитанные по формуле **PSPTa2** в интервале давлений 2–8 кб.

№ п/п \ P	2 кб	4 кб	6 кб	8 кб
1	1200 °С	1221 °С	1242 °С	1263 °С
2	1192 °С	1213 °С	1234 °С	1255 °С
3	1191 °С	1212 °С	1233 °С	1254 °С
4	1191 °С	1212 °С	1233 °С	1254 °С
5	1194 °С	1215 °С	1236 °С	1257 °С

Примечание. Сигма 27 °С.

Расхождения в расчетных значениях температуры по двум формулам не выходят за рамки двух сигм и, вероятно, более реалистичными выглядят значения, полученные по формуле

PSPTa2, т. к. кроме состава кристалла шпинели учитывается и величина содержания магния в расплаве, принятая из расчетов равным 13.3 атом.%.

Расчет величины давления проводился по формулам **PSPPa** и **PSPPb**, позволяющим по своим характеристикам получать только оценочные значения. Расчеты проводились для 2 значений температуры, входящей в формулу расчета – 1200 °С и 1250 °С. Полученные величины давления по формуле **PSPPa** для температуры 1200 °С лежат в интервале 5.8–6.4 кб; для температуры 1250 °С – 7–7.9 кб. Полученные величины давления по формуле **PSPPb**, для температуры 1200 °С лежат в интервале 2.7–4 кб; для температуры 1250 °С – 5.1–6.3 кб.

Система расплав–шпинель–оливин. Реальные и сформированные шпинель–оливиновые парагенезисы, представленные 38 парами, были проверены на равновесность с расплавом собственно составов шпинели по формуле **PSPRa**. Равновесность шпинель–оливиновых пар была проверена с помощью формул **PSOLRa**, **PSOLRb**, **PSOLRc**, **PSOLRd** и **PSOLRf**. Эти результаты представлены в таблице 5–Тихий.

Полученные данные по равновесности с расплавом составов кристаллов шпинели и их равновесности с оливином, исходя из структурных взаимоотношений, позволяют высказать следующие положения для шпинель–оливиновой ассоциации из четырех районов Тихоокеанского сегмента. Небольшая разбалансировка (~1.5 сигмы) составов (магний–хром), в равновесной шпинель–оливиновой ассоциации, имеющей расплавный генезис, полученная для Индо-Атлантического сегмента, присутствует и в этом парагенезисе из базальтов Тихоокеанского сегмента. В Тихоокеанском сегменте выявилась еще одна особенность шпинель–оливинового парагенезиса, имеющего расплавный генезис – **неравновесность** составов шпинели с данными разностями оливина при **одновременной равновесности** этих же составов

Таблица. 5–Тихий. Количественная оценка степени равновесности составов шпинелей и шпинель–оливиновых пар в Тихоокеанском сегменте.

Источник	№ п/п	PSPRa	PSOLRa	PSOLRb	PSOLRc	PSOLRd	PSOLRf
И. Данишевский и др. [162]	1	-0.02	0.39	-1.16	0.02	0	-0.05
	2	-0.02	0.15	-0.94	0.01	0.01	-0.04
	3	-0.02	0.27	-0.95	0.01	0	-0.04
	4	-0.06	0.39	-1.02	0.02	0.01	-0.03
	5	-0.07	0.26	-0.91	0.02	0.01	-0.02
	6	-0.14	-0.17	-0.68	0	0.05	0.03
	7	-0.04	0.26	-0.9	0.01	0.01	-0.03
И. Сигурдсон и др. [292]	8	-0.26	3.05	-6.6	0.04	-0.22	-0.43
	9	-0.25	2.62	-5.27	0	-0.1	-0.25
	10	-0.11	2.14	-4.55	0.03	-0.1	-0.21
	11	-0.39	1.91	-3.53	-0.02	-0.06	-0.15
	12	-0.88	3.99	-8.12	-0.05	-0.33	-0.7
	13	-0.14	1.84	-4.71	0.01	-0.08	-0.22
	14	-0.74	0.78	-2.52	-0.04	0.04	-0.06
	15	-0.62	3.24	-6.71	-0.03	-0.12	-0.39
	16	-0.56	2.03	-3.25	-0.02	-0.06	-0.13
	17	-0.99	2.24	-4.75	-0.04	-0.02	-0.17
	18	-0.06	-0.22	-0.75	0.01	0.03	-0.02
	19	-0.05	1.33	-2.65	0.03	-0.05	-0.11
	20	-0.07	0.55	-1.25	0.02	0	-0.05
	21	-0.18	2.64	-5.07	0.02	-0.13	-0.28
	22	-0.15	3.3	-5.33	0.03	-0.17	-0.28
	23	-0.11	2.44	-4.13	0.01	-0.11	-0.19
	24	-0.14	1.52	-2.83	0	-0.07	-0.14
	25	-0.12	0.91	-2.12	0.02	-0.03	-0.11
	26	-0.07	0.7	-2.41	0	0	-0.09
	27	-0.05	1.31	-2.48	0.01	-0.04	-0.12
А. Дэвис, Д. Клагги [164]	28	-0.04	1.11	-2.36	0.03	-0.04	-0.1
	29	-0.02	-1.11	-0.12	-0.02	0.02	0.01
	30	-0.01	-4.56	3.5	-0.09	0.28	0.23
	31	-0.06	-1.44	-0.05	-0.03	0.1	0.03
	32	0.02	-2	1.01	-0.02	0.1	0.05
	33	-0.06	2.33	-3.83	0.04	-0.11	-0.19
Дж. На- гланд и др. [253]	34	-0.04	0.45	-1.68	0.02	0	-0.05
	35	-0.04	1.09	-2.48	0.03	-0.04	-0.08
	36	0.01	0.13	-1.53	0	0.01	-0.04
	37	-0.05	1.18	-2.89	0.03	-0.04	-0.11
	38	-0.06	1.12	-3.13	0.01	-0.04	-0.12
Сигма		0.056	0.71	0.78	0.012	0.036	0.032

шпинели с расплавом (формула **PSPRa**). Это позволяет расширить число объяснений этого несоответствия. Например, ранним ростом кристаллов шпинели в апикальных частях магматической колонны и их отсадкой с последующим гетерогенным ростом на них оливина.

Очень важно, что это явление, выраженное в равновесности состава шпинели с расплавом и неравновесности с оливином, существует в базальтах MORB. Представляет интерес выяснения распространенности этого явления. Для геологически сложно устроенной зоны Хантер [292], где присутствует достаточно широкий спектр пород, наблюдается одновременное не-

соответствие составов кристаллов шпинели с расплавом и оливином. Исключением опять же для этой зоны являются базальты MORB. Для хребта Горда (использованы данные из работы А. Дэвиса, Д. Клаги [164] также наблюдается равновесие составов кристаллов шпинели с расплавом и их же неравновесность с кристаллами оливина, но данных мало и они неоднородны.

Шпинель–оливиновая пара (№ 5, таблица 5–Тихий) [160], которую можно считать равновесной по расчетам с использованием всех формул, была использована для расчетов содержаний магния в расплаве и температуры. Для расчета содержания магния была использована формула **PSPOL7**, кроме составов шпинели и оливина учитывающая также содержания суммы щелочей в расплаве (анализы № 5, 6 из таблицы 1–Тихий). Расчеты проводились в интервале давлений 2–8 кб и представлены в таблице 6–Тихий.

Таблица. 6–Тихий. Содержания магния в расплаве, равновесном со шпинель–оливиновым парагенезисом, формула (**PSPOL7**).

Состав	P			
	2 кб	4 кб	6 кб	8 кб
Состав стекла расплавного включения № 5; содержание магния 16.3 атом. %	14.1	14.6	15	15.5
Состав стекла расплавного включения № 6; содержание магния 15.2 атом. %	15.7	16.2	16.7	17.1
Сигма	1.43			

Полученные значения различаются в рамках 1.5 сигм как при разных давлениях, так и при разных составах расплава. Сузить рамки возможно только при использовании программного варианта расчетов.

Для расчетов величины температуры в системе **расплав–шпинель–оливин** были использованы формулы **PSOLTa**, **PSOLTb** и **PSOLTc**, различающиеся наборами используемых величин как состава минеральных фаз, так и расплава. Наибольшее число величин используется в формулах **PSOLTb** и **PSOLTc**. Результаты расчетов представлены в таблицах 7, 8, 9–Тихий.

Таблица. 7–Тихий. Значения температуры, полученные по формуле **PSOLTa**.

Состав	P			
	2 кб	4 кб	6 кб	8 кб
Состав стекла расплавного включения № 5; содержание магния 16.3 атом. %	1273 °C	1287 °C	1300 °C	1313 °C
Состав стекла расплавного включения № 6; содержание магния 15.2 атом. %	1267 °C	1281 °C	1294 °C	1308 °C
Сигма	26 °C			

Таблица. 8–Тихий. Значения температуры, полученные по формуле **PSOLTb**.

Состав	P			
	2 кб	4 кб	6 кб	8 кб
Состав стекла расплавного включения № 5; содержание магния 16.3 атом. %	1238 °C	1258 °C	1279 °C	1300 °C
Состав стекла расплавного включения № 6; содержание магния 15.2 атом. %	1237 °C	1258 °C	1279 °C	1300 °C
Сигма	30 °C			

Таблица. 9–Тихий. Значения температуры, полученные по формуле **PSOLTc**.

Состав	P			
	2 кб	4 кб	6 кб	8 кб
Состав стекла расплавного включения № 5; содержание магния 16.3 атом. %	1237 °C	1257 °C	1278 °C	1299 °C
Состав стекла расплавного включения № 6; содержание магния 15.2 атом. %	1240 °C	1261 °C	1282 °C	1303 °C
Сигма	26 °C			

Полученные с помощью различных формул значения температуры в целом укладываются в рамки сигмы с учетом одинаковых значений давления. Более правдоподобными, с нашей точки зрения, выглядят значения температуры, полученные по формулам **PSOLTb**, **PSOLTc**. Эти величины достаточно близки, а в формулах используется наибольшее число элементов из составов сосуществующих фаз (расплав–шпинель–оливин).

По составам фаз в системе **расплав–шпинель–оливин** с помощью формулы **PSOLP** была рассчитана величина давления. Численные значения давления были получены по составам шпинель–оливиновой пары (№ 5, табл. 5–Тихий) и стекол двух использованных расплавленных включений для фиксированных значений температуры 1240 °C и 1300 °C. Это уравнение по своим характеристикам позволяет получать только оценочные значения величины температуры. Были получены следующие результаты: **sp–ol**, равновесная с расплавом, имеющим состав первого расплавного включения – 1240 °C – 7.2 кб; 1300 °C – 10 кб; **sp–ol**, равновесная с расплавом, имеющим состав второго расплавного включения – 1240 °C – 5.9 кб; 1300 °C – 8.8 кб. Опираясь на данные, полученные по Атлантическому сегменту, можно допустить, что величины 1300 °C и 8.8 кб являются верхней границей начала кристаллизации базальтовых расплавов в Тихоокеанском сегменте.

Расчет значений фугитивности кислорода был выполнен с помощью формулы **POLTf1**, позволяющей в последующем по разности температур оценить содержание Fe^{3+} в расплаве и, приравняв условия к атмосферным, по соотношению разновалентных форм железа использовать формулу **GSPfb** (расчет значений фугитивности с учетом температуры), позволяющую получить численную величину фугитивности кислорода.

Полученная величина равна -8.24, что равно $\sim QFM+1$ при температуре 1300 °C.

Выводы

1. Используя литературные источники, были исследованы фазовые составы различных типов базальтов океанической коры из ряда спрединговых зон Тихоокеанского сегмента. Как и в случае Индо-Атлантического сегмента, изучались парагенезисы расплав–шпинель, расплав–оливин и расплав–шпинель–оливин, исходя из положения о наиболее раннем этапе их кристаллизации.

2. В сравнении с Индо-Атлантическим сегментом картина оказалась более пестрой.

Собственно кристаллы шпинели имеют равновесные составы (за исключением случаев в зоне Хантер) для пород, имеющих сложный генезис, например, гибридный для бонинитов. Однако выявилось, что в базальтах MORB Тихоокеанского сегмента, наряду с равновесностью составов шпинели, могут быть одновременные случаи как равновесности кристаллов шпинели с кристаллами оливина (зона разлома Сикейрос), так и частичной разбалансированности их составов (Коста-Риканская рифтовая зона). Вариантов объяснения достаточно много – отсадка кристаллов шпинели с последующей кристаллизацией на них оливина, зависимость условий кристаллизации от скоростей спрединга (медленно – спрединговые хребты Атлантики и быстро – спрединговые хребты Восточно-Тихоокеанского поднятия). Для реального объяснения необходимы исследования контактовых зон этих минералов в природных и экспериментальных условиях и районирование по этим характеристикам базальтов океанического дна.

3. Максимальные условия кристаллизации (~1300 °С и 8 кб; фугитивность в окрестностях буфера QFM) базальтовых магм, вероятно, совпадают как в Индо-Атлантическом, так и Тихоокеанском сегментах. Но для большей убедительности необходимо провести систематичную и объемную подборку материала.

9.3. Проявления внутриплитного магматизма в Тихоокеанском сегменте (базальты, пикриты, дуниты, базаниты, нефелиниты Гавайских островов)

Среди вулканитов Гавайских островов можно найти (по литературным данным) исследованные геологические тела, остывавшие и затвердевавшие в широком диапазоне условий – лавовые озера, лавовые потоки, кумулятивные образования, шлаки и т. д.

С помощью полученных нами формул были рассмотрены опубликованные данные по составам фаз из следующих пород: оливиновых базальтов лавового озера Kilauea Iki, полученных с помощью бурения на этом озере [284]; базальтов, извергнутых жерлом Pu'u'Ō'o [275]; оливиновых базальтов лавовых потоков Mauna Loa, Mauna Kea и редких дунитовых ксенолитов в этих потоках, полученных в результате бурения [126]; единичных пикритовых разностей лав и оливиновых нодулей [88; 314]; щелочных разностей пород – базанитов, нефелинитов [88; 188].

Таблица. 10–Тихий. Составы минералов, расплавных включений, стекол и пород Гавайских островов.

Источник	№ п/п	Порода/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
I	1	sp		1.2	12.09	50.49	6.76	17.73		11.14			
	2	ol	39.46					12.72	0.2	45.67	0.18		
	3	стекло	51.87	5.27	12.68			11.59	0.22	4.65	8.42	3.15	1.21
II	4	sp		2.7	10.1	37.8	14.1	26.6	0.31	5.1			
	5	ol	38.6					19.8	0.28	40.8	0.16		
	6	ор	52.7	0.76	1.1	0.06		15.9	0.33	26.7	2.2		
	7	сп	52.7	1.3	2.2	0.51		7.7	0.19	17.2	18.8	0.33	
	8	порода	45.32	1.58	8.28			14.4	0.21	20.75	7.28	1.41	0.19
III	9	порода	48.83	1.6	12.63			12.67	0.19	11.97	9.33	2.26	0.4
	10	sp		2.13	14.31	42.99		29.46	0.31	10.53			
	11	стекло	51.45	2.41	13.2	0.06		10.9	0.16	7.12	10.58	2.3	0.41
	12	порода	44.7	0.79	5.5			12.08	0.17	30.6	4.3	0.88	0.17
	13	sp		1.35	13.43	47.79	8.92	15.18	0.16	13.21			
	14	ol	40.35		0.05	0.05		13.72	0.23	45.19	0.25		
	15	включение	46.38	1.75	11.35			11.65	0.24	17.88	8.6	1.75	0.17
	16	включение	50.78	1.51	10.74			12.01	0.18	13.91	7.97	1.84	0.31
	17	орх	54.38	0.27	1.82	0.52		9.66	0.23	30.92	2.18	0.02	
	18	срх	51.9	0.72	3.57	1		5.44	0.11	17.4	19.7	0.35	
IV	19	порода	40.1	0.4	2.9	0.46		15	0.21	36.5	2.1	2.5	0.2
	20	sp		0.15	27.99	23.64	17.81	13.72	0.18	15.53			
	21	ol	40.1					14.49	0.2	45.32	0.27		
	22	срх	50.22	0.71	5.09	0.87		5.03	0.09	15.26	21.43	0.56	
	23	включение	48.51	1.85	16.63			10.55	0.15	8.3	7.51	4.32	1.79
	24	sp		0.12	44.07	17.07	9.53	7.55	0.06	20.35			
	25	ol	40.24					13.04	0.17	46.46	0.24		
	26	орх	54.1	0.13	5.23	0.36		6.44	0.17	33.05	0.93	0.16	
	27	срх	47.22	2.59	7.26	0.06		8.55	0.1	10.92	20.98	0.68	
	28	порода	41.7	2.56	12.2	0.07		13.7	0.2	12.7	11	2.9	0.8
V	29	sp		0.61	59.14	1.53	6.18	13.79		18.36			
	30	ol	39.32					13.61	0.18	46.36	0.25		

Примечание. I – данные П. Скovensы и др. [284]. II – данные Р. МкКартера и др. [245]. III – данные П. Редера и др. [275]. IV – данные А.В. Соболева, И.К. Никогосяна [88]: 12–18 – составы фаз в пикритах; 13–14 – вкрапленники; 15 – включение в шпинели; 16 – включение в оливине; 17–18 – вкрапленники; 19–23 – составы фаз в дунитовом нодуле; 24–28 составы фаз в базаните; V – данные М. Гарсиа и др. [188].

Лавовое озеро Kilauea Iki образовалось в результате извержения 1959 года, и его термическая история изучалась с помощью периодического бурения закаленной верхней части. Образцы отбирались на контакте затвердевшей лавы и расплава. Были исследованы составы б шпинель–оливиновых пар, представленных включениями шпинели во вкрапленники оливина. Эти данные были заимствованы из работы П. Скovensы и др. [284]. Исследованные нами пары были отобраны в 1979 и 1981 годах при различных закалочных температурах из забоев скважин. Для исследований были выбраны наименее титанистые разности шпинелей (составы фаз представлены в таблице 10–Тихий, № 1 и 2). Результаты расчетов с использованием формулы **PSPRa**, позволяющей выявить равновесность состава самой шпинели, и формул **PSOLRa**, **PSOLRb**, **PSOLRc**, **PSOLRd** и **PSOLRf**, свидетельствующих о равновесности шпинель–оливиновых пар, представлены в таблице 11–Тихий.

Таблица. 11–Тихий. Количественная оценка равновесности составов шпинелей и шпинель–оливиновых пар.

№ п/п	PSPRa	PSOLRa	PSOLRb	PSOLRc	PSOLRd	PSOLRf
1	-0.57	2.2	-4.22	-0.08	-0.07	-0.06
2	-0.57	4.97	-7.06	-0.02	-0.35	-0.49
3	-0.41	-0.09	-0.83	-0.11	0.24	0.79
4	-0.41	3.95	-5.1	-0.02	-0.15	-0.09
5	-0.53	3.27	-5.18	-0.04	-0.14	-0.39
6	-0.53	3.92	-5.99	-0.03	-0.2	-0.46
Сигма	0.056	0.71	0.78	0.012	0.036	0.032

Полученные расчеты позволяют достаточно уверенно утверждать, что как сами кристаллы шпинели, так и шпинель–оливиновые пары являются неравновесными. Кристаллы шпинели неравновесны с расплавом, а в парагенезисе с кристаллами оливина (по структурным взаимоотношениям) кристаллы шпинели неравновесны с ними и окружающим их расплавом. Могут возникнуть сомнения в правомочности этого вывода, т. к. составы кристаллов шпинели по содержанию титана выходят за рамки составов, использованных для расчетов формул (см. таблицу II.П.1 sp–ol). Однако содержания титана в шпинели используются только в одной из формул (**PSOLRc**), расчеты по которой не противоречат расчетам по другим формулам. Величины численных значений указывают, что перенормирование происходило в условиях остывания и имеющиеся составы кристаллов шпинели равновесны с оливинами, менее магнезиальными, чем включающие их.

Неравновесность шпинель–оливиновых пар, представленная зональностью кристаллов шпинели и оливина в этом лавовом озере, выявленная в работах Б. Эванса, Т. Райта [179] и П. Скovensы и др. [284], также указывает на переуравновешивание в условиях остывания. Если принять во внимание более высокую магнезиальность шпинели в шлаках (данные представлены только в графическом виде [284]), то можно предположить два этапа переуравновешивания. Первоначально шпинель–оливиновая ассоциация была перенормирована в периферическом очаге, а затем этот процесс продолжился в остывающем лавовом озере.

По формулам (**SOLR1**, **SROLP3**, **SROLR4**), позволяющим вести расчеты для условий атмосферного Р, используя составы стекол, приводимые в работе П. Скovensа и др. [284] (полагая их равновесными с оливином, а условия кристаллизации в лавовом озере по Р близкими атмосферным), были рассчитаны значения температуры и равновесность расплава. Полученные значения представлены в таблице 12–Тихий.

Таблица. 12–Тихий. Значения температуры и величины расхождения равновесности, рассчитанные по формулам **SROLP3**, **SROLR4** и **SOLR1**.

№ п/п	SROLP3	SROLR4	SOLR1
1	1135 °С	1137 °С	0.86
2	1157 °С	1159 °С	0.68
Сигма	21 °С	22 °С	0.77

Полученные численные значения температуры близки между собой, хотя используются для расчетов разные наборы элементов, входящих в расплав (см. главу I); Величина рассчитанного по формуле (**SOLR1**) расхождения для расчета равновесности близка к среднеквадратичному отклонению. Приводимые в работе П. Скovensа и др. [284] расчетные значения температуры равны, соответственно, 1110 °С и 1135 °С. Вычисленные по формулам значения температуры отличаются на величину сигмы и систематически выше.

Лавы жерла Pu'u'Ō'Ō. В вулканическом стекле пород этого извержения [275] найдены микрофенокристаллы шпинели размером 5–50 мк, образующие цепочки из сросшихся кристаллов, окруженные стеклом. В работе представлены составы стекол и кристаллов шпинели (отобранные хронологически), по которым рассчитаны условия становления этих кристаллов. Использовано 7 составов стекол и 19 одноименных составов шпинелей, позволивших взять для расчетов 19 парных анализов. Составы стекол (7 анализов) были проверены на равновесность путем расчетов содержаний алюминия и магния в расплаве по составу самого расплава, полагая его равновесным с кристаллами шпинели и используя величину температуры 1160–1180 °С, которая применяется в обеих формулах. Расчеты по формуле (**SRSSR1**), позволяющей вычислить содержание алюминия в расплаве, дали следующие результаты: расхождения между реальным и расчетным содержанием алюминия в расплаве (в атом. %) лежат в интервале 0.47–0.27 и примерно в 3 раза меньше среднеквадратичного отклонения (сигма 1.13). Расчеты по формуле (**SRSSR2**), позволяющей вычислить содержание магния в расплаве по составу расплава, лежат в интервале 1.39–0.61, что существенно меньше среднеквадратичной ошибки (сигма 1.9). Значения температуры, полученные по формуле (**SRSSR3**), лежат в интервале 1168–1154 °С (сигма 39 °С). Вычисленные значения температуры, приводимые в использованной работе П. Редера [275], лежат в интервале 1174–1150 °С. Составы использованных кристаллов шпинели были проверены на внутреннюю равновесность с помощью формулы (**GSPR**), учитывающей только состав кристаллов шпинели, и формулы (**GSPRa**), учитывающей также и величину температуры. Большинство кристаллов являются равновесными, причем при учете температуры практически все кристаллы равновесны. По первой формуле в 5 составах расчетная величина превышает значение сигмы в 1.5–2 раза. Это позволяет полагать, что кристаллы шпинели, в большинстве своем, практически не испытали переуравновешивания. Парные составы стекло–шпинель были использованы для расчетов содержаний в расплаве титана, алюминия и магния, фугитивности кислорода, и величины температуры. Для титана, алюминия и магния расхождения между расчетными и реальными содержаниями в 2–3 раза меньше величины среднеквадратичной ошибки, что позволяет полагать равновесность системы расплав–шпинель. Расчеты температуры по формулам (**GSPTa**, **GSPTb**), использующим составы кристаллов шпинели и расплава, дали значения температуры в интервале 1212–1229 °С (сигма 37 °С) и 1216–1223 °С (сигма 37 °С). Расхождения между значениями температуры, полученными по расплаву, и системе рас-

плав–шпинель (с учетом значений среднеквадратичных ошибок), в общем, перекрываются, но причина этих расхождений пока не ясна. Расчет значений фугитивности кислорода по формуле (**GSPfa**) при значениях температуры 1160 °С дает значения в интервале (-7.63...-8.35); при значениях температуры 1190 °С, соответственно, (-7.46...-8.25). Приводимые в работе П. Редера и др.[275] значения фугитивности кислорода, полученные по расплаву, лежат в интервале -9.2...-9.9, отличаются от полученных нами на величину ~2 сигмы (сигма 0.8). По данным Т. Герлаха [189] значения фугитивности кислорода в извергаемых вулканом Килауэа базальтах лежат между буферами NNO и QFM. Получается следующая картина: температурные оценки и оценки значений фугитивности по расплавам (стеклам) отличаются от расчетов этих параметров по системе расплав–шпинель для природных объектов в сторону меньших значений. Причина этого расхождения требует дополнительных исследований.

Полученные результаты, несмотря на расхождения по ряду рассчитанных параметров с данными П. Редера и др.[275], позволяют полагать, что в базальтовых стеклах могут присутствовать равновесные кристаллы шпинели, и система расплав–шпинель может быть равновесной в природных условиях при коротких промежутках (?) времени.

Размеры кристаллов, характер их сростаний (близкий к дендритному), очень слабо выраженная зональность, все это подтверждает равновесность

составов в системе шпинель–расплав и указывает на короткий промежуток времени от образования кристаллов в расплаве до затвердевания магмы.

Эти результаты подтверждают правомочность нашего вывода о связи равновесности фаз в породе и высокой скорости поступления образовавших их магм на океаническое дно в рифтовых долинах СОХ. К сожалению, в работе не приводятся данные по составам фенокристаллов оливина, также присутствующих в стекле и включающих кристаллы шпинели. Это позволило бы выяснить более раннюю историю этого расплава. Для оценки временного промежутка, вероятно, могут быть использованы сейсмические данные.

Оливиновые базальты лавовых потоков Мауна Лоа, Мауна Кеа и редкие **дунитовые ксенолиты** в этих потоках, полученные по результатам бурения. Была исследована шпинель–оливиновая ассоциация из этих геологических тел по данным М. Бакера [126]. Исследовано 18 составов шпинель–оливиновых пар (шпинель в большинстве случаев – включения в кристаллы оливина) на равновесность как самих кристаллов шпинели (полагая их равновесными с расплавом) с помощью формулы (**PSPRa**), так и на равновесность этих составов между собой с помощью формул (**PSOLRa**), (**PSOLRb**), (**PSOLRc**), (**PSOLRd**) и (**PSOLRf**). Расчеты по формуле (**PSPRa**) показали следующие результаты: отклонения от равновесности составов шпинели Мауна Лоа 0.12–0.39; шпинели Мауна Кеа 0.3–0.58; дунитовых нодулей 0.22–1.62. Величина среднеквадратичной ошибки для расчетов по этой формуле 0.056. Значения расхождения превышают величину среднеквадратичной ошибки от 4 до 45 раз, что явно указывает на переуравновешивание составов кристаллов шпинели. С некоторой осторожностью, т. к. данных мало, можно предположить, что продолжительность отстаивания магмы в периферическом очаге Мауна Кеа была больше, чем в подобном периферическом очаге Мауна Лоа. По формулам для расчета равновесия по шпинель–оливиновым парам были получены следующие результаты. Формула **PSOLRa** (сигма 0.71): Мауна Лоа 1.9–4.2; Мауна Кеа 2.94–7.19; дунитовый нодуль 1.74–10.61. Формула **PSOLRb** (сигма 0.78): Мауна Лоа -3.11...-5.44; Мауна Кеа -4.06...-8.64; дунитовые нодули -2.52...-8.86. Формула **PSOLRc** (сигма 0.012): Мауна Лоа 0.1–0.16; Мауна Кеа 0.11–0.24; дунитовый нодуль 0.11–0.26. Формула **PSOLRd** (сигма 0.036): Мауна Лоа 0.03–0.16; Мауна Кеа 0.08–0.54; дунитовый нодуль 0.02–0.74. Формула **PSOLRf** (сигма 0.032): Мауна Лоа 0.16–0.38; Мауна Кеа 0.22–0.78; дунитовый нодуль 0.14–1.44.

Расчеты по пяти формулам показали неравновесность изученных пар и то, что переуравновешивание происходило в условиях остывания. Несколько особняком стоят значения, полученные по формуле **PSOLRd**, часть из которых, вероятно, можно считать равновесными,

что, возможно, связано с особенностями поведения алюминия в шпинели, содержание которого учитываются в этой формуле.

Данные по фазовому составу **пикритов** были заимствованы из работ А.В. Соболева, И.К. Никогосяна [88] и Дж. Вилкинсона, Х. Хенсела [315]. Пикритами представлены единичные лавовые потоки в вулканических постройках. Основной объем вкрапленников в них представлен кристаллами оливина, встречаются также единичные кристаллы-вкрапленники ортопироксена, клинопироксена, плагиоклаза и шпинели. Кристаллы оливина, как правило, содержат микрокристаллы шпинели и раскристаллизованные расплавные включения. Были исследованы различные варианты пар **sp-ol** ассоциации (включения шпинели в кристаллах оливина и вкрапленники шпинели с вкрапленниками оливина).

Все кристаллы шпинели, согласно расчетам, оказались в различной степени переуравновешены в условиях остывания (несоответствие составов зачастую > 3 сигм). Это демонстрирует и зональность включений шпинели в оливине по данным Дж. Вилкинсона, Х. Хенсела [315]. Допуская, что некоторые **sp-ol** пары (когда оба минерала представлены вкрапленниками) имеют квазиравновесные составы (в 3 из 5 уравнений по оценке равновесности их составов расхождение ~ 1 сигма), были рассчитаны условия кристаллизации: температура 1340 ± 57 °C– 1390 ± 30 °C; давление 10 ± 2 кб– 12 ± 2.5 кб; состав расплава SiO_2 $47.6\text{--}48.1 \pm 1.3\%$; TiO_2 $1.45 \pm 0.15\%$; FeO $12.9\text{--}10.5 \pm 1.4\%$; MgO $13.3\text{--}11.9 \pm 1.6\%$; CaO $8.7 \pm 1.3\%$. Диапазон расчетных содержаний **MgO** лежит в интервале 10–15%. Пересчитанные составы расплавных включений, приводимые в работе А.В. Соболева, И.К. Никогосяна [88], были проверены на равновесность их составов, и выяснилось, что составы пересчитанных включений, в частности наиболее магнезиальных включений в кристаллах шпинели, сильно неравновесны (расхождение по внутреннему равновесию > 3 сигм). Оценки температуры кристаллизации по наиболее магнезиальным оливинам (**Fo** ~ 90) с использованием составов расплавных включений $1380\text{--}1390$ °C ± 36.4 °C. Ассоциация вкрапленников **орх-срх** (равновесная в пределах 2 сигм) образовалась при температуре 1220 °C ± 35 °C и давлении $7\text{--}8 \pm 2$ кб. Условия кристаллизации по составу расплавного включения из ортопироксена – температура 1230 °C ± 57 °C; давление 9 ± 2.3 кб.

Дунитовый нодуль (из лавового потока вулкана Уалалаи) по данным А.В. Соболева, И.К. Никогосяна [88]. Были исследованы условия кристаллизации **sp-ol** и **ol-px** пар. Первая ассоциация представлена включениями шпинелей в оливине. Комбинируя различные варианты пар **sp-ol** из приводимых составов, была выявлена квазиравновесная пара (расхождения $\sim 1\text{--}2$ сигмы в 4 уравнениях из 5), хотя по расчетам составы всех кристаллов шпинели неравновесны с расплавом. Рассчитанные условия кристаллизации: температура $1220\text{--}1270$ °C ± 30 °C; давление $5\text{--}7$ кб ± 2 кб. Различные варианты пар для **ol-срх** ассоциации можно считать равновесными (расхождения $1\text{--}2$ сигмы), ориентировочные условия кристаллизации следующие: SiO_2 51.7 %; TiO_2 1.22 %; Al_2O_3 15.8 %; FeO 9.34 %; MgO 6.9 %; CaO 9.5 %; Na_2O 3.52 %; K_2O 1.82 %; T $1230\text{--}1250$ °C; P 7–9 кб.

Наряду с дунитовыми нодулями гавайские вулканы выносят на дневную поверхность обломки грубо- и среднезернистых пород, представленных **габброноритами** и **габбро**, которые рассматриваются, как продукты кристаллизации в лавовых озерах

Р. МкКартером и др. [245]. Фазовый состав этих пород, найденных в вершинной части вулкана Мауна Лоа, из этой работы был использован для расчетов. На равновесность были проверены различные варианты сочетаний шпинели, оливина, ортопироксена и клинопироксена из образца Мб. На внутреннюю равновесность были исследованы составы кристаллов шпинели и клинопироксена применительно к условиям атмосферного давления. Состав шпинели, исследованный с помощью формулы (**GSPR**), показал неравновесность ее состава (~ 3 сигмы). Состав кристаллов клинопироксена был исследован с помощью 7 формул (**GLAVRa, GLAVRb, GLAVRc, GLAVRd, GLAVRe, GLAVRf, GLAVRg**), выявлена равно-

весность составов (расхождения менее 1 сигмы). Минеральная ассоциация **ol–op** исследовалась на равновесность формулой (**OLOPRa**), расчеты по которой показали неравновесность составов этих фаз с многократным превышением величины сигмы. Неравновесной оказалась и ортопироксен–клинопироксеновая ассоциация. Исследования оливин–клинопироксеновой ассоциации показали ее равновесность. Были использованы 4 формулы (**OLAVRa**, **OLAVRb**, **OLAVRc**, **OLAVRd**), расчеты по которым показали, что равновесность составов этих фаз во всех случаях менее 1 сигмы. Опираясь на равновесность составов оливин–клинопироксенового парагенезиса были, рассчитаны величины содержания магния в расплаве и температуры. Для расчетов содержания магния в расплаве, равновесном с этим парагенезисом, были использованы формулы (**OLAV7a**, **OLAV7b**), в которых учитывается, кроме составов оливина и клинопироксена, содержания в расплаве кальция и щелочей. Для расчетов были использованы составы оливинового габбронорита и габбронорита (см. таблицу 10–Тихий). Были получены следующие результаты. Расчеты по первой формуле (**OLAV7a**) с использованием разных содержаний кальция дали содержания MgO в расплаве 5.8–6.4 вес. %. Расчеты по второй формуле (**OLAV7b**) дали

содержания окиси магния 6.8–9.3 вес. %. Расчеты по этим формулам показали с одной стороны, неравновесность использованных расплавов, т. к. расхождения в расчетах ~2 сигмы; с другой стороны, отчетливую кумулятивную природу высоких содержаний магния в породах. На это указывают расхождения реальных и расчетных содержаний магния в породе. Расчеты значений температуры по 3 формулам: 1. использующей только составы оливина и клинопироксена (**OLAVTa**); 2. учитывающей еще и содержание кальция в расплаве (**OLAVTb**); 3. учитывающей также содержания титана, алюминия и кальция в расплаве (**OLAVTc**) дали следующие значения: 1150 °C ± 24 °C; 1134–1144 °C ± 19 °C и 1161 °C ± 17 °C. Полученные численные значения близки приводимым авторами этой публикации, хотя используемый авторами геотермометр (двупироксеновый) вряд ли пригоден, т. к. по нашим оценкам эта минеральная ассоциация неравновесна. Кроме того, расхождения в температурах, полученных по разным формулам (~20–30 °C), указывают на некоторую неравновесность состава габброноритов, предположительно, в результате отсадки оливина. Барометрическая оценка условий кристаллизации, приводимая авторами, также вряд ли возможна с такой точностью определения величины (250 бар), исходя из результатов тестирования различных барометров, приводимые в главе III.

Базанит (лавовый поток вулкана Кулау) по данным А.В. Соболева, И.К. Никогосяна [88]. Были исследованы на равновесность следующие минеральные пары: **sp–ol** (включения шпинели в оливине); **sp–opx** (включение шпинели в ортопироксене); **ol–opx**; **ol–cpx** и **opx–cpx** – эти минералы представлены вкрапленниками.

Для расчетов парагенезисов с участием оливина был использован состав оливина из этой породы, содержащий 0.24 вес. % CaO. Второй приводимый для этой породы состав оливина содержит менее 0.1 вес. % CaO и, согласно нашим данным, имеет состав (по содержанию кальция), не соответствующий магматическому генезису. Были сформированы 2 **sp–ol** пары; проверка на равновесность самих шпинелей из этих пар показала их внутреннюю неравновесность, выходящую за рамки 3 сигм. Также неравновесными (более 3 сигм) оказались и составы минералов этих **sp–ol** пар. В этих парах шпинель в одном случае равновесна с более железистым оливином, а в другом – с более магнезиальным. Пара **sp–opx**, представленная включением шпинели в ортопироксен, неравновесна (расхождение составов составляет ~1.5 сигмы). Неравновесным является и сам состав шпинели. Однако, в силу высокой глиноземистости шпинели (Al₂O₃ 46.34 вес. %), что достаточно редко для эффузивов, были сделаны оценки условий кристаллизации этой ассоциации: температура ~1315 °C и давление ~13 кб. На равновесность были проверены составы в различных сочетаниях (по 2 минерала) из набора минералов: оливин, ортопироксен и клинопироксен. Ассоциация **ol–opx** была проверена с помощью 3 уравнений, два из которых позволяют получать только оценочные результаты. Проверка показала неравновесность составов, в 4–6 раз превышающих величину средне-

квадратичной ошибки. Проверка составов **ol–срх** ассоциации с помощью 3 уравнений (2 из которых позволяют получать только оценочные значения) также показала их неравновесность – численное расхождение составов превышает величину сигмы в 10 раз. Неравновесной оказалась и **орх–срх** пара, величина расхождения, рассчитанная по двум уравнениям, превышает сигму от 4 до 10 раз. Одним из вариантов объяснения неравновесности практически всех составов вкрапленников, вероятно, может быть гибридность магмы, породившей базанит.

Высокоглиноземистые разности шпинели, согласно данным М. Гарсия и др.[188], были обнаружены и в **нефелините** острова Kaula. Кристаллы оливина и шпинели присутствуют в этой породе в качестве вкрапленников. Для расчетов были использованы четыре кристалла оливина с содержанием окиси кальция больше 0.1 вес. %, т. к. подобно базаниту, в породе есть разности наиболее магнезиального оливина с содержаниями окиси кальция менее 0.1 вес. %. Было сформировано 4 пары из составов высокоглиноземистой шпинели и оливинов. Проверка равновесности состава этой высокоглиноземистой шпинели и равновесности ее состава с оливином показала неравновесность как самой шпинели, так и шпинели с кристаллами оливина. Причем по расчетам эта шпинель равновесна с разностью оливина даже более железистой, чем приводимой для этой породы в работе М. Гарсия и др.[188]. Расхождения превышают среднеквадратичную ошибку от 3 до 10 раз. Полученные данные не позволяют выявить условия образования фенокристаллов этой шпинели.

Для оценок возможных условий кристаллизации высокоглиноземистой шпинели, присутствующей в **нефелините** острова Kaula Hawaii, были использованы данные по составам фаз из миоцен-плиоценовых лав вулкана Tchabal Nganha (Камерун) А. Ноно и др. [258], среди которых присутствуют и **анкарамиты**. Для оценок были использованы две пары из подобной высокоглиноземистой шпинели и клинопироксена с разной магнезиальностью. Одну из пар в этой ассоциации, с участием наименее магнезиального клинопироксена, можно считать условно равновесной с расхождением составов примерно в 3 раза относительно величины среднеквадратичной ошибки (сигма 0.022), тогда как в другой паре расхождение превышает величину сигмы примерно в 10 раз. Полученные величины: температура ~1300–1320 °С; давление ~22–24 кб. Если принять эти численные значения, то можно предположить, что подобные условия кристаллизации существовали и в случае нефелинита. Эти оценочные значения указывают на более глубокие условия начала кристаллизации расплавов, породивших породы нефелинитовой серии относительно расплавов, породивших оливиновые базальты и их производные. Большие глубины образования нефелинитовых расплавов относительно расплавов толеитовой серии предполагаются и в работе А.В. Соболева, И.К. Никогосьяна [88].

Это позволяет в свою очередь предположить, что различные щелочные разности пород являются производными смешения расплавов из разноглубинных источников.

Выводы

1. В целом можно довольно уверенно утверждать, что шпинель–оливиновые пары в лавах Гавайских островов перенормированы в условиях остывания.

2. В гавайских лавах (лавы жерла Pu'u'Ō'o) могут быть случаи находок перенормированных в условиях остывания составов хромистых шпинелей, которые по морфологическим особенностям близки к условиям дендритной кристаллизации. Расчеты условий кристаллизации по стеклу и парагенезису стекло–шпинель отличаются в рамках сигмы, но систематичность отклонений указывает на обусловленность этих отклонений.

3. Щелочные лавы содержат высокоглиноземистые разности кристаллов шпинели, что по результатам исследований экспериментальных данных указывает на высокобарические (бо-

лее 15 кб, см. главу III) условия. Оценки, полученные по анкарамитовым лавам Камеруна, полагая их подобие нефелинитам гавайских островов (хотя геодинамически это различные условия), позволяют предположить глубины начала кристаллизации этих расплавов под Гавайскими островами ~62–68 км.

4. Щелочные разности пород Гавайских островов можно рассматривать как результат гибридизма – смешения магм из разноглубинных источников.

Глава 10. Неоген-четвертичные проявления вулканизма зоны перехода континент-океан (активные континентальные окраины и островные дуги)

Были рассмотрены на примерах вулкана Парикутин и ряда вулканов Курило-Камчатской островной дуги. Расчеты, выполненные для вулкана Парикутин, представлены достаточно подробно для отслеживания читателем схемы расчетов. Расчеты для вулканов Курило-Камчатской островной дуги представлены, в основном, конечными результатами, без детализации этих расчетов.

10.1. Транс-Мексиканский вулканический пояс

Базальтовые андезиты и андезиты вулкана Парикутин по данным В. Банистера и др. [130]; А. МкБирни и др. [244]. Вулкан Парикутин является одним из более чем 200 моногенных шлаковых конусов, расположенных в западной части Транс-Мексиканского вулканического пояса. Извержение из этого конуса продолжалось с 1943 по 1952 год. В период с 1943 по начало 1947 года изливались магнезиальные андезиты, содержащие 2–6 % макрофенокристаллов оливина, затем до конца извержения изливались андезиты, содержащие 1–2 % макрофенокристаллов ортопироксена. В работе В. Банистера и др. [130] приводятся составы вкрапленников оливина и включенных в них микрокристаллов хромита, составы которых представлены в таблице П–1. В ней также представлены составы пород из работы А. МкБирни и др. [244], включающих эти минеральные фазы.

Таблица. П–1. Составы фаз и пород первого этапа извержения.

№ п/п	Минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
1	ol	39.63	0.05	0.27	0.013		16.27	0.28	43.28	0.16		
2	ol	38.27		0.36	0.016		23.11	0.34	37.5	0.2		
3	sp		1.51	17.95	32.73		32.9	0.26	10.5			
4	sp		1.66	17.84	32.34		34.23	0.31	10.23			
5	sp		1.47	18.38	33.14		32.1	0.08	10.58			
6	ol	39.67	0.04	0.36	0.012		15.7	0.3	43.53	0.17		
7	ol	37.9		0.41	0.014		21.88	0.43	37.49	0.24		
8	порода	55.71	1.01	17.24		2.01	5.48	0.13	5.61	6.98	3.99	1.18
9	порода	57.05	0.89	17.27		1.42	5.21	0.12	5.64	6.94	3.71	1.23

Примечание. 8 – состав лавы, излившейся в 1944–46 гг.; 1–4 – составы фаз из лав: 1, 2 – состав центральной и краевой части вкрапленника оливина; 3, 4 – составы включений шпинели в оливине.

9 – состав лавы, излившейся в апреле 1947 г.; 5 – включение шпинели в оливине, 6 – центральная часть включающего кристалла оливина; 7 – краевая часть этого кристалла, обрастающего каймой ортопироксена.

Были сформированы 4 варианта **sp–ol** пар для анализов 1–4 (см. таблицу П–1) и 2 варианта для анализов 5–7 этой таблицы. Для всех этих пар была оценена равновесность их составов

(5 формул для оценки равновесия в условиях давления для **sp-ol** ассоциации и одна формула для оценки внутреннего равновесия составов кристаллов шпинели под давлением), исходя из величины среднеквадратичной ошибки (сигма). Эти результаты представлены в таблице П–2.

Таблица. П–2. Разности рассчитанных и реальных значений составов для **sp-ol** пар.

№ п/п	№ парных анализов	Формула 1 P _{solra}	Формула 2 P _{solrb}	Формула 3 P _{solrc}	Формула 4 P _{solrd}	Формула 5 P _{solrf}	Формула 6 P _{spra}
1	3-1	3.31	-5.14	-0.02	-0.22	-0.41	-0.32
2	4-1	3.99	-5.78	-0.01	-0.28	-0.49	-0.35
3	3-2	-2.09	0.42	-0.15	0.23	0.04	-0.32
4	4-2	-1.41	-0.22	-0.14	0.17	-0.04	-0.35
5	5-6	3.78	-5.28	-0.01	-0.25	-0.43	-0.31
6	5-7	-1.3	0.05	-0.13	0.16	-0.01	-0.31
7	сигма	0.71	0.77	0.012	0.036	0.032	0.056

Примечание. Приводимые численные значения представляют собой разности между реальными и рассчитанными значениями составов оливина и шпинели. Рассчитываемые значения: по формуле 1 – содержание железа в оливине; по формуле 2 – содержание магния в оливине; по формуле 3 – железо-магниевое отношение в оливине; формулы 4 и 5 – железо-магниевое отношение в шпинели.

В целом все полученные значения позволяют утверждать следующее: кристаллы шпинели внутренне неравновесны (по содержаниям магния, железа, алюминия и хрома) и неравновесны с включающими их кристаллами оливина. Относительно внутренних частей кристалла оливина шпинели более железистые, менее хромистые и менее глиноземистые; относительно железистой каймы оливина они более магнизальные. Все это указывает на переуравновешивание кристаллов шпинели в условиях остывания. В отношении возникновения внутреннего неравновесия кристаллов шпинели невозможно выяснить время его возникновения – до или после попадания в кристаллы оливина, для этого нужны данные по составу оливина в зоне 10–30 мк вокруг кристаллов шпинели. Все это позволяет утверждать, что состав кристаллов шпинели не пригоден для оценок условий кристаллизации. Для оценок нижней границы условий кристаллизации оливина был использован состав краевых частей кристаллов. Образовались ли эти железистые каймы в процессе дорастания из расплава или за счет диффузионного обмена железом и магнием кристалла с окружающим расплавом, решить сложно, располагая только имеющимися данными. Но, исходя из аналогии с характером диффузионного обмена оливина из ультраосновных ксенолитов на контакте с основным расплавом по данным Г.П. Пономарева [64], можно предположить, что это диффузионный обмен, приводящий к равновесию с расплавом. Для расчетов условий кристаллизации этой каймы были использованы уравнения для оценки температуры в системе расплав–оливин в условиях «сухого» давления (**POLTa1**, **POLTb1**, **POLTf1**). Результаты этих расчетов в интервале давлений 2–8 кб представлены в таблице П–3.

Расхождения между рассчитанными значениями величин температуры по этим формулам в случае равновесия расплав–оливин и равновесности внутри самого расплава не должны превышать в среднем 24 °С. В нашем случае эта величина превышена в 2 раза. С нашей точки зрения вероятной причиной занижения температур при расчете по формуле (**POLTf1**) связано с использованием в этой формуле (в отличие от двух других, учитывающих влияние содержания магния в расплаве) содержания железа в расплаве (анализ 8, таблица П–1), которое ниже равновесного.

Таблица. П–3. Рассчитанные значения температуры для системы край оливина (анализ 2 в таблице П–1) и расплав (анализ 8 в таблице П–1).

№ п/п	P	POLTa1	POLTy1	POLTf1
1	2 кб	1196 °С	1190 °С	1130 °С
2	4 кб	1201 °С	1195 °С	1140 °С
3	6 кб	1213 °С	1204 °С	1150 °С
4	8 кб	1223 °С	1213 °С	1162 °С
Сигма		± 36.4 °С	± 36.1 °С	± 39 °С

Об этом же свидетельствует и расчетное значение Fe^{2+}/Mg отношения (1.1) по оливину и реальное (0.72). Оценка частичного состава расплава по составу краевой части оливина (анализ 2, таблица П–1) и составу породы (анализ 8, таблица П–1) представлена следующими значениями: FeO 8.47 % (**PLOL5a**); FeO 8.34 % (1140 °С); 8.47 % (1150 °С); 8.6 % (1170 °С); 8.96 % (1190 °С); 9.23 % (1200 °С); 9.35 % (1210 °С) (**PLOL5b**); MgO 4.18 % (**PLOL7b**); CaO 8.79 % (**PLOL8**). Расплав, равновесный с краевой частью оливина, является более железистым (что совпадает с предположениями по температурным оценкам), менее магниальным и более кальциевым относительно валового состава породы. В целом же, как состав породы, так и состав расплава, перерасчитанный на вариант частичного равновесия с железистой каймой оливина, внутренне неравновесны (**PGOL1**). Относительно составов внутренних частей вкрапленников оливина (анализы 1; 6, таблица П–1) можно утверждать, что состав их неравновесен с валовым составом породы первого этапа извержения, расхождение > 3 сигм (формулы **POLGRa**, **POLGRb** из главы III). Расчеты по этим формулам позволяют оценить равновесность–неравновесность оливина данного состава с составом расплава (в данном случае составом породы). Оценка условий кристаллизации по **ol–орх** паре, представленной железистой оливиновой каймой (анализ 2, таблица П–1), обрастающей ортопироксеном (анализ 1, таблица П–4) также неправомерно из-за их неравновесности (расхождение по уравнениям **POLRRa**, **POLRRb**, **POLRRc** >>3 сигм).

Пары **sp–орх**, составы которых представлены в таблице П–4, также не могут быть использованы для расчетов условий кристаллизации из-за переуравновешивания кристаллов шпинели, которые стали более железистыми относительно равновесных (**PSOPRa**, **PSOPRb**, **PSOPRc** > 3 сигм). Для оценок условий кристаллизации вкрапленников из лав второй стадии извержения (**орх–melt**) были использованы составы вкрапленников ортопироксена и валовый состав породы (см. таблицу П–4).

Таблица. П–4. Составы фаз в лавах второго этапа извержения.

№п/п	Минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
1	орх	54.0 2	0.35	1.16	0.041		15.1	0.42	25.54	2.31	0.15	0.02
2	sp		1.87	14.95	32.51		39.62	0.13	7.48			
3	орх	55.6 4	0.17	1.46	0.41		11.78	0.33	29.49	1.58	0.14	0.03
4	орх	54.2 5	0.19	2.61	0.45		11.92	0.22	28.64	1.36	0.18	0.04
5	порода	59.7 7	0.83	17.29		1.21	4.95	0.11	3.72	6.28	3.74	1.67

Примечание. 1 – состав ортопироксена, нарастающего на железистый оливин (анализ 7, таблица 2); 2 – кристалл шпинели, включенный в кристалл ортопироксена; 3 и 4 – составы центральной части кристалла ортопироксена по данным из работы В. Баннистера и др. [130]; 5 – состав лавы, извергшейся в 1949 г. и включающей вкрапленники ортопироксена (3; 4 из таблицы 1), содержащие включения шпинели (2 из таблицы 1) из работы А. МкБирнея и др. [244].

В зависимости от состава используемого вкрапленника и используемого уравнения (т. к. в разных уравнениях учитываются разные разные интенсивные параметры и разные породообразующие окислы, входящие как в состав минерала, так и в состав расплава), были получены диапазоны составов, представленные в таблице П–5.

Таблица П–5. Состав предполагаемого расплава, равновесного с ортопироксеном.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO
	56.3–59.24 %	0.62–0.73 %	14.6–17.22 %	5.25–5.51 %	4.56–6.87 %	9–9.2 %
Сигма	~2 %	~0.3 %	~1.6 %	~1 %	~2.5 %	~1 %
Формула	Plop1a Plop1b	Plop2b	Plop3a Plop3b	Plop5 Plop5a	Plop7a Plop7b Plop7c	Plop8

Примечание. Расчеты содержаний алюминия проводились в диапазоне от 2 до 6 кб; расчеты содержаний магния проводились в диапазоне давлений 2–6 кб и температур 1130–1210 °С.

Наиболее существенные различия рассчитанных составов расплавов с валовым составом породы (анализ 5, таблица П–4) в содержании кальция – лежащие в окрестностях трех сигм. Но отсутствие данных по составам расплавных включений не позволяет уточнить рассчитанные значения. Используя составы вкрапленников ортопироксена и скорректированные составы расплава, были оценены значения температуры их равновесия, представление в таблице П–6.

Таблица. П–6. Значения равновесной температуры.

№ п/п	P	T	T
1	2 кб	1166–1180 °С	1168–1190 °С
2	4 кб	1170–1190 °С	1176–1200 °С
3	6 кб	1180–1200 °С	1208–1226 °С
Формула и (сигма)		PLOPTa (± 41. 3 °С)	PLOPTb (± 38. 5 °С)

Примечание. Значения температуры рассчитывались с использованием разных составов ортопироксена (анализы 3, 4 в таблице П–4) и рассчитанных содержаний алюминия, магния и кальция (таблица П–5) при давлениях 2, 4, 6 кб.

Аналогичные оценки были выполнены для значений **P**, представленных в таблице П–7.

Таблица. П–7. Значения равновесного давления.

№ п/п	T	P	T	P
1	1170 °С	4.6–5.7 кб	1170 °С	3–4.2 кб
2	1180 °С	5–6.1 кб	1180 °С	3.4–4.6 кб
3	1190 °С	5.4–6.5 кб	1190 °С	3.8–4.8 кб
4	1200 °С	5.8–6.9 кб	1200 °С °С	4.1–5.4 кб
5	1210 °С	6.2–7.3 кб	1210 °С	4.5–5.8 кб
Формула и сигма	PLOPPa ± 2.6 кб		PLOPPb ± 2.6 кб	

Примечание. Значения давления рассчитывались с использованием разных составов ортопироксена (анализы 3, 4 в таблице П–4) и рассчитанных содержаний алюминия и магния (таблица П–5) при температурах 1170–1210 °С.

В целом полученные нами результаты позволяют предположить следующую схему этого извержения. В коровый очаг (?), расположенный на глубинах ~7–18 км, заполненный андезитовым расплавом без кристаллической фазы, при температурах 1130–1210 °С внедрилась порция базальтового расплава, близкого по температуре, и содержащего вкрапленники оли-

вина ($Fe_{0.82}$) с включениями кристаллов шпинели, составы которых были перенормированы в процессе остывания. Занижение расчетных температур по формуле (**POLTF1**), вероятно, объяснено доокислением части железа и занижению количества его двухвалентной формы. Это внедрение и послужило толчком к началу извержения. В последующем поступление базальтового расплава прекратилось и, на втором этапе, расходовалась только андезитовая магма. В ней происходил рост вкрапленников ортопироксена на кристаллах шпинели, составы орх были изменены в процессе остывания расплава, содержащего эти вкрапленники.

10.2. Курило-Камчатская островная дуга

Вкрапленники в лавах магнезиальных базальтов вулкана Шивелуч были исследованы О.Н. Волынцом и др. [17]. Используемые нами составы пород и минералов представлены в таблице 1. Вулкан Шивелуч расположен на сочленении Алеутской и Курило-Камчатской островных дуг и является самым северным действующим вулканическим сооружением Курило-Камчатской островодужной системы. Эксплозивный центр Молодой Шивелуч в голоценовое время извергал умереннокалиевые андезиты, но дважды за этот период им извергались магнезиальные базальты, представленные умереннокалиевыми (7600 лет назад) и высококалиевыми (3600 лет назад) разностями, извергнутыми в периоды усилению региональной вулканической активности. Кроме того, обломки высококалиевых базальтов, подобных тефре, извергнутой 3600 лет назад, найдены в Байдарном отроге. Вкрапленники (см. таблицу 1) в высококалиевых базальтах тефры и обломков лавы представлены оливином с включениями кристаллов шпинели, клинопироксеном, плагиоклазом и амфиболом, присутствует флогопит. Наиболее магнезиальные разности вкрапленников оливина $100Mg:(Fe + Mn + Mg) = 91-92.5$ представлены кристаллами двух разновидностей: содержащих $CaO < 0.1 \%$ и $CaO > 0.1 \%$. Первые, исходя из выявленной нами зависимости содержания CaO в оливине от состава расплава, не могут образоваться из расплава содержащего более 3 % CaO , что позволяет предположить их немагматический, вероятно, реститовый генезис. Кристаллы, содержащие более 0.1 % CaO , являются производными содержащего их расплава. Эти особенности составов позволяют предположить, что условия плавления субстрата, давшего эти высококалиевые базальты, и начала кристаллизации этих базальтов близки. Оливин-пинелевый парагенезис, представленный вкрапленниками оливина с включениями шпинели (по 5 уравнениям), неравновесен и переуравновешивался в условиях остывания. Неравновесными с кристаллами оливина являются и кристаллы авгита, образовавшиеся при температуре ~ 1300 °С и давлении $\sim 10-11 \pm 3$ кб. По ассоциации оливин-расплав были рассчитаны содержания кальция и магния в расплаве, что позволило допустить равновесность этой ассоциации. Рассчитанные значения температуры кристаллизации оливина в этом расплаве лежат в интервале 1360–1370 °С, давление составляло $\sim 10-12$ кб.

Андезиты катастрофического извержения 1964 года по данным М.Л. Толстых и др. [98]. Вкрапленники в них представлены оливином, пироксеном, амфиболом, плагиоклазом (таблица 1), последний преобладает среди вкрапленников. Пара **ol-орх** по нашим оценкам сильно неравновесна, ортопироксен образовался позже в менее магнезиальном расплаве, тогда как оливин мог расти из расплава, соответствующего валовому составу породы. Условия роста плагиоклаза ($An_{37.1}$) по составу наиболее магнезиального расплава включения для «сухих» условий: температура ~ 910 °С; давление $\sim 2-3$ кб.

Андезиодациты лавового потока, вытекшего из экструзивного купола в мае 2004 года по данным Н.В. Горбач [22]. Предположительно наиболее ранними минеральными фазами в этих лавах являются клинопироксен и плагиоклаз ($An_{83.6}$) (таблица 1). Этот минеральный парагенезис является сильно неравновесным. Клинопироксен мог формироваться из магмы, соответствующей составу андезита экструзивного купола 2003 г. при температуре

1200 ± 50 °С и давлении 11 ± 2 кб. Плагноклаз указанного выше состава при этих условиях может образоваться из расплава основного состава, содержащего ~52 % SiO₂.

В свете полученных нами данных существенный интерес для дальнейших исследований представляют условия образования и существования неравновесного (?) кортландитового парагенезиса в магнезиальных базальтах тефры, извергнутой 7600 и 3600 лет назад.

Таблица. 1. Составы пород и минеральных фаз вулкана Шивелуч.

Источник	№ п/п	Порода/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
I	1	порода	50.06	0.67	12.27		3.12	5.52	0.13	15.02	8.46	2.31	1.68
	2	sp		0.41	11.93	54.25	8.62	17.44	0.45	10.91			
	3	ol	40.18					8.64	0.11	49.32	0.13		
	4	срх	54.28	0.1	1.44	0.49		4.84	0.16	18.26	20.85	0.05	
	5	ol	40.8					6.46	0.15	51.02			
II	6	порода	56.94	0.64	16.67			5.97	0.12	5.51	7.1	4.21	1.1
	7	включение	66.94	0.32	12.96			2.03	0.08	1	1.54	4.81	4.07
	8	ol	40.03					13.63	0.19	44.55	0.16		
	9	орх	54.28	1.35	0.61			14.67	0.21	27.71	1.51		
III	10	порода	60.76	0.58	16.09		2.9	2.31	0.13	4.62	6.93	4.07	1.42
	11	срх	53.16	0.25	1.45			7.01	0.11	16.15	20.89	0.31	0.02
	12	pl	47.59		33.44			0.59			16.77	1.78	0.05

Примечание. I – данные О.Н. Волынца и др. [17]: 1–5 – продукты извержения 3600 лет назад; II – данные М.Л. Толстых и др. [98]: 6–9 продукты катастрофического извержения 1964 г., 7 – расплавное включение в плагноклазе. III – данные Н.В. Горбач [22]: 10 – порода купола; 11–12 – вкрапленники в потоке.

Магнезиальные базальты вулканов Харчинский и Заречный по данным О.Н. Волынца и др. [16]. Использованные составы пород и минералов представлены в таблице 2. Расположены эти постройки в северной группе вулканов Камчатки в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островодужных систем. Магнезиальные базальты являются преобладающим типом пород, слагающих эти постройки. В большинстве своем это порфировые породы, содержащие до 20 % вкрапленников оливина и клинопироксена (таблица 2). Зерна оливина обычно содержат включения кристаллов шпинели, в базальтах вулкана Заречного вкрапленники клинопироксена включают в себя ортопироксен, в некоторых разностях пород (вулкан Заречный) найдены редкие вкрапленники амфибола, замещенные магнетит-пироксен-плагноклазовым агрегатом. В лавах вулкана Заречного встречаются редкие лерцолитовые включения. Особняком стоят породы «некка» в вершинной части вулкана Харчинского, представленные абсарокитом, среди вкрапленников в этой породе существенную роль играет амфибол. Нами были обработаны результаты аналитических исследований вкрапленников и включений в них из магнезиальных базальтов и лерцолитового включения в лавах вулкана Заречного. Шпинели, включенные в кристаллы оливина из лав этих вулканов, являются более железистыми относительно равновесных (< 3 сигм) и, вероятно, как и в случае с базальтами Шивелуча, являются перенормированными. По содержанию CaO среди оливинов присутствуют 2 разности: предположительно реститовые и образовавшиеся из расплава (CaO > 0.1 %). Те и другие достаточно близки по магнезиальности, что говорит о близости условий плавления и кристаллизации оливина. Ассоциации **ol-орх**, **ol-срх**, **орх-срх** в лавах по большинству параметров равновесны; **ol-срх** парагенезис из лерцолитового включения также равновесен, хотя оливин, судя по содержанию CaO, немагматического происхождения. Для оценок температур и давлений был использован широкий набор корреляционных связей составов минералов, включая и распределения хрома, с использованием состава расплавного включения. Состав расплавного включения близок к равновесному, в пределах двух сигм, и

мог быть материнским расплавом, из которого росли эти минералы. Оценки содержаний кремния, алюминия, железа, магния, кальция в расплаве по вышеуказанным парагенезисам совпадают с составом включения в пределах двух среднеквадратичных ошибок. Не удалось найти должного объяснения высоким содержаниям Cr_2O_3 в расплавленном включении, так оценки содержаний хрома в расплаве близки к его содержаниям в породе. Несоответствия состава включений и породы, по нашим представлениям, свидетельствует о гравитационно-кристаллизационной дифференциации в магмах. В результате порода, образовавшаяся из зоны кумуляции кристаллов в расплаве, приобрела состав магнезиального базальта. Нельзя исключить и влияние этого процесса на состав магнезиальных базальтов тефры вулкана Шивелуч, тогда оценки **P–T** условий по составу породы являются завышенными. Условия кристаллизации **ol–орх**, **ol–срх**, **орх–срх** парагенезисов и существования расплава, соответствующего включению: $1210–1240 \pm 40$ °С и давление $10–11 \pm 2.5$ кб.

Таблица. 2. Составы пород и минералов вулканов Харчинский и Заречный.

Источник	№ п/п	Порода/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
I	1	в. Заречный базальт	52.54	0.86	12.37	0.1	3.08	5.7	0.16	11.48	8.5	2.84	1.42
	2	Харчинская зона шлаковых конусов базальт	50.76	0.67	10.61	0.2	1.97	6.39	0.23	18.68	6.5	2.13	0.92
	3	включение	55.7	0.22	18.26	0.27		4.12	0.1	7.83	6.47	4.34	0.47
	4	sp		0.49	16.01	46.34		21.87	0.26	12.76			
	5	ol (базальт)	40.34			0.05		10.27	0.17	48.29	0.11		
	6	ol (лерцолит)	40.22					12.31		46.65	0.09		
	7	орх	55.32	0.06	2.62	0.48		8.34	0.22	30.47	1.19		
	8	срх (базальт)	53.41	0.15	2.73	0.51		5.01	0.17	16.61	19.58	0.32	
	9	срх (лерцолит)	54.21	0.15	1.2	1.25		4.8		17.91	19.12	0.3	

Примечание. I – данные О.Н. Волынца и др. [16]: 1–9 – составы пород, минералов, расплавленных включений.

Вкрапленники в лавах Ключевского вулкана. Этот вулкан является самым активным вулканом Курило-Камчатской островодужной системы, поставляя на дневную поверхность ежегодно $\sim 60 \cdot 10^6$ т/год вулканитов, что составляет 1/2 материала, извергаемого всеми остальными вулканами этой дуги. Вместе с 12 другими вулканами он объединен в Северную группу вулканов, регионально приуроченную к грабен-синклинали Центрально-Камчатской депрессии. С другой стороны, эта группа расположена в зоне сочленения вулканно-тектонических структур более высокого ранга (Курило-Камчатской и Алеутской островодужных систем). По петрохимическим характеристикам вулканиты Ключевского вулкана принадлежат к нормальному ряду известково-щелочной серии и разбиваются по содержаниям **MgO** и **Al₂O₃** на 4 разности: высокомагнезиальные, магнезиальные, глиноземистые и высокоглиноземистые базальты [3].

Высокомагнезиальные базальты по данным С.А. Хубуная и др.[110]; С.А. Хубуная, А.В. Соболева [111]. Использованные составы пород и минералов представлены в таблице 4. Высокомагнезиальные базальты содержат вкрапленники оливина и клинопироксена, суммарное содержание которых может достигать ~ 15 % (прорыв Булочка). В кристаллах оливина характерны микровключения шпинели и клинопироксена (таблица 4). Данными для расчетов послужили наиболее магнезиальные разности минералов и включений в них. Ассоциация **ol–sp** (включения мелких кристаллов шпинели в оливине) является неравновесной. Проверка с помощью 5 формул показала, что расчетная величина превышает среднеквадратич-

ную ошибку от двух до 10 раз, и переуравновешена в условиях остывания. Ассоциация **ol-cpx** является равновесной (проверка по трем формулам показала расхождения < 1 сигмы), также равновесным является и сам кристалл клинопироксена. Расчеты величины давления проводились по 3 формулам, в 2 из которых учитывается состав расплава. В качестве первичных составов расплава использовались составы базальта прорыва Булочка и расчетный состав расплава из работы С.А. Хубуная, А.В. Соболева [111]. В интервале температур 1250–1350 °С давления принимают значения от 5.5 до 9.2 кб, среднеквадратичная ошибка в этих расчетах 2.7–3 кб.

Расчеты давления по собственно пироксену (2 формулы с учетом состава расплава) дали значения в том же температурном интервале 6.2–9 кб. Парагенезис **ol-cpx** был использован и для расчетов величины температуры (таблица 3).

Таблица. 3. Температурные условия кристаллизации **ol-cpx** парагенезиса.

Формула	Расплав	6 кб	9 кб	11 кб
POLAT сигма 38 °С	базальт прорыва Булочка	1287 °С	1305 °С	1320 °С
	первичный расплав	1307 °С	1327 °С	1340 °С
POLATa сигма 38 °С	базальт прорыва Булочка	1265 °С	1274 °С	1279 °С
	первичный расплав	1287 °С	1296 °С	1300 °С

Примечание. Базальт прорыва Булочка – анализ 1 (см. ниже в таблице 4); первичный расплав – анализ 6 (см. ниже в таблице 4).

Были выполнены также расчеты значений температуры, используя только составы клинопироксена и расплава. Расчетные значения температуры подобны указанным в таблице 3. По расчетам С.А. Хубуная, А.В. Соболева [111] температура первичного расплава, с учетом содержания воды в расплаве (~2–3 вес. %) ~1320–1280 °С, давление ~15–20 кб.

Таблица. 4. Составы пород и минеральных фаз магниезальных базальтов.

Источник	№ п/п	Порода/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
I	1	порода	51.43	0.9	13.6		2.5	6.42	0.16	11.92	9.44	2.49	0.85
	2	sp		0.3	10.3	54.97	8.27	10.01	0.38	15.87			
	3	ol	40.31					8.83	0.01	48.79	0.14		
	4	cpx	53.59	0.17	2.11	0.13		3.41	1.04	20.95	17.89	0.09	
II	5	Включение в оливине	49.13	0.9	15.29			8.27	0.14	9.85	10.31	2.64	0.55
	6	первичный расплав	49.8	0.85	14.52			8.59	0.13	13.15	9.79	2.51	0.52

Примечание. I – данные С.А. Хубуная и др. [110]. II – данные С.А. Хубуная, А.В. Соболева [111].

Высокоглиноземистые базальты по данным Н.Л. Миронова и др.[53]. Использованные составы пород и минералов представлены в таблице 7. Этот тип базальтов Ключевского вулкана был достаточно детально исследован на примере лавового потока побочного прорыва Апохончич, произошедшего на восточном склоне Ключевского вулкана в 1946 году. Вкрап-

ленники представлены оливином, клинопироксеном и плагиоклазом. В свою очередь, они содержат в себе включения шпинели, оливина, ортопироксена, клинопироксена, амфибола, плагиоклаза и расплавные включения. Для оценок условий кристаллизации были использованы составы минералов-вкрапленников и включений в них (минералов и расплавных включений), представленных в указанной выше работе. Были исследованы следующие парагенезисы (вкрапленник–включение): **ol–sp**, **ol–орх**, **ol–срх**, **ol–pl**, **срх–орх**, **срх–pl**, **pl–орх**. **Ol–sp** пара по всем пяти уравнениям является неравновесной (расхождение составов > 3 сигм) и шпинель является более железистой относительно равновесной, что указывает, по нашему мнению, на переуравновешивание этой пары в магматическом расплаве после ее образования. Пара **ol–орх** равновесна по 3 уравнениям из 2 при температуре ~1200 °С. Пары **ol–срх**, независимо от того, кто является минералом–хозяином, равновесны. Расчеты по этому парагенезису не проводились из-за того, что не приводятся содержания щелочей, участвующих в клинопироксене во многих используемых зависимостях. Равновесными является также **ol–pl** и **срх–орх** пары. Пара **срх–pl** с учетом состава расплава (по расплавному включению) близка к равновесию, (несоответствие < 2сигм). Равновесие пары **pl–орх** оценить сложно, так как выборка из базы данных «ИНФОРЕКС» для ортопироксен–плагиоклазовой ассоциации содержит < 50 экспериментальных парных точек в условиях «сухого» давления и не обрабатывалась. Равновесность состава расплавного включения в плагиоклазе с той и другой минеральной фазой позволяет предположить равновесность этого парагенезиса.

Для расчетов составов расплавов, равновесных той или иной минеральной ассоциации, использовались скорректированные составы расплавных включений из минерала–хозяина, приводимые авторами используемой публикации. Проверка на равновесность использованных нами расплавных включений в оливине, клинопироксене и плагиоклазе показала, что скорректированные составы расплавных включений в оливине являются более равновесными (~1 сигма) относительно первичных составов(> 3 сигм); для включений из клинопироксена и плагиоклаза различия численных значений для оценки равновесности лежат в пределах 1 сигмы.

С учетом откорректированного состава расплавного включения в оливине состав расплава равновесного с **ol–орх** ассоциацией приведен в таблице 5.

Таблица. 5. Состав равновесного расплава с **ol–орх** парагенезисом.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	T	P
1	53.5–54.9	2	13.1–14.3	12.8–11.7	0.1	6.6–5.8	6.2–6.3	4.5	1220–1200 °С	9–7 кб
Сигма	1.2	0.25	1.6	1		2	0.9	1	40 ⁰ С	2

Примечание. Сигма – среднеквадратичная ошибка.

Составы, полученные по нашим зависимостям, имеют ряд отличий от использованных данных. В них больше титана, меньше алюминия и больше магния. Эти различия лежат в рамках 2 среднеквадратичных отклонений. Температурные оценки и значение давления для этого парагенезиса авторы используемой работы не приводят.

Парагенезис **ol–pl**, представленный включением плагиоклаза в оливин, является равновесным, и условия его образования, по нашим оценкам следующие: P–T 8 ± 2 кб, 1230–1200 °С ± 27 °С; SiO₂ 50.5 % ± 2.2 %; Al₂O₃ 16.4 % ± 1.3 %; MgO 6.6 % ± 1.1 %; CaO 10.1 % ± 1.2 %.

Парагенезис **срх–орх**, представленный включением ортопироксена в клинопироксен, является равновесным и условия его образования представлены в таблице 6.

Таблица. 6. Состав равновесного расплава с **срх–орх** парагенезисом.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	T	P
1	53.8 6	1.6	18	8.9	0	6	7.8		1230–1200 °С	8 кб
Сигма	2.4	0.3	1.7	1.3		1.3	1		39 °С	2

Примечание. Сигма – среднеквадратичная ошибка.

Условия образования парагенезиса **срх–pl**, представленного включением плагиоклаза в клинопироксен, оценены с рядом допущений, т. к. содержания щелочей в клинопироксене не приводятся, а в расчетах они фигурируют в ряде зависимостей. Эта пара является равновесной при температуре 1160 ± 25 °С и давлении 6 ± 2 кб; содержание Al₂O₃ 16.5 %.

Составы скорректированных расплавных включений в оливине, клинопироксене, плагиоклазе и расчетные равновесные расплавы (таблицы 5, 6) были использованы для оценок **P–T** условий, их равновесности и содержаний ряда элементов в расплаве. Эти расчеты показали хорошую сходимость результатов с оценками по минеральным парагенезисам составам расплавных включений и расчетных составов в пределах 1–2 сигм.

Таблица. 7. Составы пород и минеральных фаз высокоглиноземистых базальтов.

Источник	№ п/п	Порода/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
I	1	базальт (Апохончич)	53.26	1.08	17.52			8.55	0.16	5.62	8.45	3.25	1.14
	2	сп в оливине		0.79	15.98	43.89		27.42		11.5			
	3	орх в оливине	53.54	0.44	1.42			15.03		27.0 2	1.66		
	4	срх в оливине	49.27	0.87	4.71			10.52		14.5 3	19.3 1		
	5	pl в оливине	50.17		30.67			1.29			14.2 6	3.27	0.09
	6	скорректированный состав включения в оливине	52.62	1.05	18.19			9.54	0.28	5.38	8.81	3.22	0.91
	7	скорректированный состав включения в клинопироксене	55.04	1.1	17.27			7.99		5.14	8.78	3.76	0.92
	8	скорректированный состав включения в плагиоклазе	55.23	1.77	15.04			10.81	0.22	4.29	7.67	3.53	1.44

Примечание. I – данные Н.Л. Миронова и др. [53]: 1–8 – составы пород, минералов, расплавных включений.

Базальты БТТИ. Это извержение, происходило в 1975–76 гг. в южной зоне шлаковых конусов вулкана Плоский Толбачик, входящего в Ключевскую группу вулканов. Образовалось 2 прорыва, удаленных друг от друга на расстояние ~10 км. Среди лав Северного прорыва (СП) преобладающим типом являются магнезиальные базальты умеренной щелочности. Они содержат единичные кристаллы-вкрапленники пироксена, оливина, плагиоклаза. Преобладающими разностями среди лав Южного прорыва (ЮП) являются глиноземистые субщелочные базальты. Фенокристаллы оливина и пироксена встречаются редко, а преобладающими среди вкрапленников являются кристаллы плагиоклаза, содержание которых может достигать 20 %, а размеры доходить до 25 мм. Для оценок условий кристаллизации магм были использованы составы пород и минералов по данным Г.Б. Флерова и др. [105], представ-

ленные в таблице 8. В связи с отсутствием данных о составах расплавных включений в минералах базальтов БТТИ, в качестве предполагаемых первичных расплавов были использованы составы пород. Составы расплавов (см. таблицу 8), соответствующие валовым составам пород магнезиальных и глиноземистых базальтов, равновесны с оливином (как одной из первых фаз) при следующих **P–T** условиях: 11 ± 2.5 кб; $1330\text{--}1320$ °C ± 44 °C; содержание окиси алюминия 4.7 ± 1.7 % (Северный прорыв); 9 ± 2.5 кб; $1200\text{--}1190$ °C ± 44 °C; содержание окиси алюминия 17 ± 1.7 % (Южный прорыв). Ассоциация **ol–sp**, как в лавах Северного, так и лавах Южного прорывов сильно (> 3 сигм) неравновесна по всем 5 уравнениям. Но, в отличие от всех приведенных выше примеров, кристаллы шпинели являются более магнезиальными относительно равновесных. Одним из вариантов объяснения этого несоответствия может быть повторный нагрев остывающего, кристаллизующегося расплава, давший импульс для последующего извержения. Ассоциацию **ol–sp** для обоих прорывов можно считать квазиравновесной (расхождения 1–2 сигмы). Условия кристаллизации следующие: Северный прорыв 1320 °C ± 40 °C; $7\text{--}8 \pm 2.5$ кб; Южный прорыв 1190 °C ± 40 °C; 6 ± 2.5 кб. Вероятно, подъем магмы Южного прорыва в интервале давлений $9\text{--}6$ кб был достаточно быстрым, без существенных теплопотерь. **Срх–орх** ассоциация в Южном прорыве является равновесной и росла при температуре 1140 ± 40 °C и давлении 6 ± 2 кб. Частичный состав расплава был следующий: SiO₂ $52,6 \pm 1,3$ %; Al₂O₃ $16,8 \pm 1,2$ %; FeO $10,2 \pm 1$ %; MgO 6 ± 1 %; CaO $6,8 \pm 1$ %. Эти данные указывают на возможность существования на глубине примерно 18 км магматического очага, где расплав достаточно быстро остывал. Условия начала кристаллизации плагиоклаза в магме Южного прорыва следующие (для расчетов был использован валовый состав фенокристаллов Южного прорыва): температура 1200 °C ± 45 °C; давление $8\text{--}9 \pm 3$ кб.

Таблица. 8. Составы пород и минералов Северного (СП) и Южного (ЮП) прорывов.

Источник	№ п/п	Порода/минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
I	СП	1 базальт	49.92	0.97	12.5		3.65	6.06	0.16	11.39	12.41	2.18	0.93
		2 sp		0.87	10.48	46.92	15.96	10.74	0.13	15.46			
		3 ol	36.9	0.03				11.18		49.29	0.22		
		4 срх	52.9	0.11	1.32	0.42		4.38		18.04	23.33	0.11	0.007
	ЮП	1 базальт	50.8	1.93	16.89		4.11	6.12	0.19	5.83	8.23	3.32	2
		2 sp		1.42	7.99	8	52.71	21.8		7.81			
		3 ol	38.77					21.92		38.68	0.19		
		4 орх	55.6	0.28	1.32	0.04		15.5		26.3	1.57		
		5 срх	50.5	0.95	2.59	0.13		10.03		15.61	18.85	0.4	0.02
		6 pl	50.65	0.06	31.09			0.89		0.24	14.85	2.7	0.13

Примечание. I – данные Г.Б. Флерова и др. [105]: СП 1–4, ЮП 1–6 – составы пород и минералов.

Оливинсодержащие базальты Карымского вулканического центра по данным Е.Н. Гриб [24], Е.Н. Гриб, А.Б. Перепелова [25], В.Б. Наумова и др. [55]. Использованные составы

пород и минералов представлены в таблице 9. Карымский вулканический центр расположен в центральной части Восточного вулканического пояса Камчатского полуострова. Является длительно живущей, начиная с плиоцена, сложной вулканно-тектонической структурой, в строении которой принимают участие постройки стратовулканов и кальдер различной степени сохранности. На протяжении геологической истории структуры базальтовый вулканизм проявлялся в ней неоднократно, последним (в 1996 г.) было субаэральное извержение в северной части озера Карымского, расположенного в кальдере Академии Наук. Базальты Карымского центра представлены низко- и умереннокалиевыми базальтами островодужного типа. Вкрапленники представлены оливином, клинопироксеном и плагиоклазом, зачастую преобладающим среди вкрапленников, ортопироксен встречается спорадически. Содержание вкрапленников может достигать 30–40 %. Шпинель встречается преимущественно в виде включений во вкрапленниках вышеперечисленных минералов.

Были исследованы составы **ol-sp** пар из лав вулкана Стена; тефры, извергнутой 4800 лет назад (береговой обрыв о. Карымского), и тефры извержения 1996 года. Состав шпинелей во всех этих парагенезисах является более железистыми относительно равновесных с вмещающими их оливинами (по 5 корреляционным уравнениям, связующим составы этих

минералов, расхождение превышает 3 сигмы), что, по нашим представлениям, указывает на достаточно длительное остывание, хотя продолжительность зависит от дальнейшей температурной истории этой магмы. Ассоциации **ol-cpx** в исследованных вулканитах являются равновесными, ошибка в пределах 1–2 сигм. Оценки условий кристаллизации магмы с использованием составов парагенезиса **ol-cpx** и внутреннего равновесия в клинопироксенах дали следующие результаты. Базальт вулкана Стена: 7 ± 3 кб; $1180 \text{ }^\circ\text{C} \pm 46 \text{ }^\circ\text{C}$; MgO 6.2 % \pm 1.3 %; CaO 11.5 % \pm 0.9 %; (Na₂O + K₂O) 3.45 % \pm 0.6 %. Базальтовая тефра извержения 4800 лет назад: 7 ± 3 кб; $1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 46 \text{ }^\circ\text{C}$; MgO 7.1 % \pm 1.3 %; CaO 10.4 % \pm 0.9 %; (Na₂O + K₂O) 4% \pm 0.6%. Базальтовая тефра извержения 1996 г.: 9 ± 3 кб; $1180^\circ\text{C} \pm 46^\circ\text{C}$; MgO 5.7% \pm 1.3%; CaO 12.4 % \pm 0.9 %; (Na₂O + K₂O) 2.63 % \pm 0.6 %. Расчеты температуры кристаллизации по равновесному с оливином расплаву дают следующие значения: базальт вулкана Стена $1200 \text{ }^\circ\text{C}$; базальтовая тефра извержения 4800 лет назад $1200 \text{ }^\circ\text{C}$; базальтовая тефра извержения 1996 г. $1220 \text{ }^\circ\text{C}$; среднеквадратичная ошибка $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Полученные результаты позволяют предположить, что высокая магнезиальность базальтов вулкана Стена обязана аккумуляции вкрапленников темноцветных минералов, на что косвенно указывает высокое содержание вкрапленников, достигающее 35–45 %. Оценка неравновесности состава базальта вулкана Стена, исходя из предположения о равновесии его с оливином, 2 сигмы. Величина содержания MgO в расплаве, исходя из состава этого базальта и условий кристаллизации (7 кб, $1180 \text{ }^\circ\text{C}$) равна $\sim 7.5 \text{ } \%$ \pm 1.5 %. Эти расчеты также указывают на реальность предположения о гравитационной природе высокой магнезиальности этого базальта.

Парагенезис **ol-pl** является равновесным (расхождение 1 сигма) только в базальте извержения 4800 лет назад, в базальтах же вулкана Стена и извержения 1996 года расхождение превышает 3 сигмы. Условия кристаллизации этого парагенезиса в расплаве извержения 4800 лет назад: давление 8 ± 2 кб; температура $1250 \pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Подобное расхождение с оценками температуры, приводимыми выше ($1200 \text{ }^\circ\text{C}$), вероятно, обязано неравномерности влияния водного флюида на понижение температур кристаллизации породообразующих минералов в расплавах [3]. Причиной неравновесности этого парагенезиса в базальтах вулкана Стена и извержения 1996 года может быть одновременность кристаллизации или смешение расплавов.

Пары **cpx-pl** во всех исследованных парагенезисах сильно (>3 сигм) неравновесны

Оценки температуры кристаллизации плагиоклаза по его составу дают значения в окрестностях $\sim 1250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Многие минералы-вкрапленники, в частности оливины, содержат раскристаллизованные расплавные включения. Дочерние фазы в этих включениях, в большинстве своем, представлены фассаитом (зачастую зональным) в ассоциации с глиноземистой шпинелью и остаточным стеклом. Парагенезис фассаит–глиноземистая шпинель неравновесен (расхождение $>$

Зсигм) для всех составов зонального кристалла фассаита из оливина в базальте вулкана Стена. Также неравновесными являются и составы дочернего плагиоклаза со стеклом из включения в оливине из базальта извержения 1996 года. Температурная оценка по составу остаточного расплава (вулкан Стена) дает следующие величины: расплав, предположительно равновесный с фассаитом: 1050–1100 °С ± 45 °С. Остаточный расплав во включении с дочерним плагиоклазом (извержение 1996 г.) неравновесен с ним (> 3 сигм). Содержания SiO₂ в гомогенизированных расплавных включениях с максимальными содержаниями магния (см. таблицу 9) по данным В.Б. Наумова и др. [55] из плагиоклазов в базальтовой тефре извержения 1996 г. изменяется от 47 % до 55 %. Состав включения с содержанием SiO₂ 47 % является неравновесным (расхождение > 3сигм), состав включения с содержанием SiO₂ 54.7 % равновесен с плагиоклазом и его захват происходил при давлении 7–8 ± 3 кб и температуре 1120–1140 °С ± 43 °С. Полученные оценки могут отличаться от реальных, так как расчеты велись для «сухих» условий. В некоторых случаях поправка может быть несущественной, так содержание алюминия в шпинели пропорционально его содержанию в окружающем стекле раскристаллизованного расплавного включения.

Таблица. 9. Составы пород и минералов базальтов вулкана Стена извержения 4800 лет назад и 1996 года.

Источник	№ п/п	Порода/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
I	1	порода	47.37	0.63	16.22		4.3	7.72	0.19	11.09	10.7	1.81	0.3
	2	sp		0.83	39.28	12.57	15.49	20.1	0.23	12.16			
	3	ol	39.29					18.36	0.21	41.59	0.16		
	4	срх	52.05	0.32	2.35	0.09		7.77	0.04	15.7	20.53	0.15	
	5	pl	44.83		33.39			0.64			18.68	0.67	0.02
	6	sp		0.18	54.11		11	24.54		10.58			
	7	срх (ц.)	41.74	2.05	16.5			11.35		9.06	21.08	0.24	
	8	срх (к)	47.78	0.51	7.04			9.88		13.53	18.6	0.37	
	9	стекло	64.22	0.15	18.75			1.52		0.28	3.78	5.23	3.35
	10	стекло	67.49	0.13	18.27			1.23		0.24	3.25	3.65	3.49
	11	порода	51.34	0.83	15.29		3.13	7.04	0.2	6.9	9.93	2.66	0.69
	12	sp		0.31	15.44	48.09	8.85	14.78	0.5	12.91			
	13	ol	42.1					10.62	0.1	47.12	0.14		
	14	срх	52.25	0.18	2.59	0.18		6.06	0.09	16.63	21.29	0.03	
	15	pl	45.09		34.74			0.77			18.15	1.31	0.01
	16	порода	51.08	0.88	19.71		1.71	7.26	0.13	5.34	10.12	2.45	0.69
	17	sp		0.37	13.37	46.40	10.04	20.44	0.4	6.83			
	18	ol	38.31					23.91	0.17	38.11			
	19	срх	52.33	0.37	2.22			9.27	0.05	15.56	19.38	0.34	
	20	pl	45.63		34.67			0.33			18.51	1.35	0.06
	21	pl	46.61		33.89			1.26			18.2	1.51	0.04
	22	стекло	45.16	1.32	11.21			14.4		7.87	21.68	0.36	
II	23	стекло	47.44	0.73	19.67			6.83	0.13	5.19	10.82	7.4	0.44
	24	стекло	54.87	0.83	14.41			8.98	0.14	6.59	8.21	4.6	0.68

Примечание. I – данные Е.Н. Гриб [24]; Е.Н. Гриб, А.Б. Перепелова [25]: 1–10 – данные по вулкану Стена; 6–10 – составы фаз из раскристаллизованных включений; 11–15 – данные по извержению 4800 лет назад; 16–22 – данные по извержению 1996 г.; 21–22 – составы фаз из включения; II – В.Б. Наумова и др.[55]: 23–24 – составы гомогенизированных стекол из включений в плагиоклазе.

Магнезиальные базальты и ультрамафические включения Авачинского вулкана по данным С.А. Щека [117], С.А. Щека и др. [118], М.Л. Толстых и др. [97], М.В. Портнягин и

др. [67; 68], С. Ишимару и др. [218]. Использованные составы пород и минералов представлены в таблице 10. Вулкан расположен в южном окончании Восточного вулканического пояса. Он входит в состав Авачинско-Корякской группы вулканов, вытянутой в северо-западном направлении. Является наиболее активным вулканом в этой группе и представляет собой постройку типа Сомма-Везувий, заложившуюся в позднеплейстоценовое время. Породы, слагающие постройку, представлены базальтами, андезибазальтами, андезитами, дацитами и риолитами. В голоценовое время вулкан извергал преимущественно андезиты и андезибазальты. Наряду с ними, среди вулканических продуктов присутствуют в очень ограниченном количестве высокомагнезиальные (пикритовые) базальты, получившие впоследствии название авачиты. Первенство их находки принадлежит А.А. Овсянникову в 1973 году. Впоследствии они были найдены вторично и впервые описаны О.Н. Волынцом [118], хотя в некоторых работах [67; 68] первым, нашедшим эти породы на Авачинском вулкане, называется академик А.Н. Заварицкий. Их геологическое положение в постройке вулкана и время образования во многом остается неопределенным из-за отсутствия находок их коренного залегания. Вкрапленники в этой породе составляют от 35 до 55 % и представлены, в основном, оливином и клинопироксеном. Иногда присутствуют также вкрапленники ортопироксена, плагиоклаза и шпинели, среди акцессорных минералов найдена разновидность алмаза – карбонадо [23]. Ультрамафические включения встречаются в виде глыб и обломков дунитов, гарцбургитов и пироксенитов, преимущественно в раннеголоценовой пирокластике, реже среди пород молодого конуса, образовавшегося ~3600 лет назад, еще реже в виде включений в средних лавах плейстоценовых экструзий и даек. Были исследованы составы **sp-ol** и **sp-cpx** пар, представленных включениями хромистой шпинели во вкрапленниках оливина и клинопироксена. Первая минеральная ассоциация является неравновесной по 5 использованным зависимостям, более железистый состав шпинели относительно равновесной указывает на переуравновешивание в процессе остывания магмы с уже образовавшимися вкрапленниками в промежуточном очаге. Выявлена зональность во включениях шпинели в оливине по уменьшению содержания магния от края к центру кристалла, что, по нашим представлениям, свидетельствует о повторном нагреве этой магмы (флюидным импульсом ?) после образования в ней оливина, включающего шпинель. Включения шпинели в **sp-cpx** ассоциации близки по составу к шпинелям включений в оливине и равновесны по Fe^{2+}/Mg отношению с вмещающим клинопироксеном, но неравновесны (> 3 сигм) по распределению хрома между ойко- и хадакристаллами (содержание хрома в клинопироксене меньше равновесного). Это тоже указывает на изменение температуры магмы, но направление этого процесса пока не ясно. Парагенезис **ol-cpx**, представленный тремя наиболее ранними (по условиям кристаллизации) парами можно считать отчасти равновесным – численные оценки равновесности лежат в рамках 2 сигм. Однако некоторые оценки условий образования клинопироксена позволяют предположить его переуравновешивание. Оценки условий кристаллизации по расплаву, равновесному с оливином по оценочному родоначальному составу и частично гомогенизированным расплавленным включениям в оливине лежат в интервале температур $\sim 1350\text{--}1370\text{ }^\circ\text{C} \pm 50\text{ }^\circ\text{C}$ и давлений $11\text{--}12\text{ кб} \pm 2.5\text{ кб}$. Расчет температуры по оливин–расплавному геотермометру, с использованием состава оценочного родоначального расплава $\sim 1380\text{ }^\circ\text{C}$. Численные значения условий кристаллизации оливин–клинопироксеновых пар лежат в области более низких значений интенсивных параметров $\sim 1240 \pm 45\text{ }^\circ\text{C}$ и $6\text{--}9\text{ кб} \pm 2.5\text{ кб}$. Расчеты по клинопироксену дают значения в интервале $1250\text{--}1300\text{ }^\circ\text{C} \pm 40\text{--}46\text{ }^\circ\text{C}$. Эти рассчитанные значения температур и давлений при участии клинопироксена позволяют предположить его переуравновешивание по мере эволюции магмы при подъеме к дневной поверхности.

Среди **ультрамафических ксенолитов** преобладающими являются гарцбургиты, состоящие из оливина (~80 %), ортопироксена (~17 %), шпинели + клинопироксена (~2 %). Кристаллы оливина, за исключением единичных анализов, содержат $< 0.1\%$ CaO, что свидетельствует против их кумулятивного происхождения и не исключает предположение о реститовом генезисе породы. Они могут быть равновесными с расплавом содержащим $\sim 11 \pm 2\%$ MgO при температуре $\sim 1310 \pm 50\text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $\sim 11 \pm 4\text{ кб}$. Кристаллы шпинели в виде червеобразных

выделений тяготеют к интерстициям между кристаллами оливина или включены в них. Оливин–шпинелевый парагенезис является неравновесным (расхождение > 3 сигм) и шпинель равновесна с более железистым оливином. Также неравновесным является и шпинель–клинопироксеновый парагенезис. Состав кристаллов шпинели является внутренне равновесным по соотношениям хрома, алюминия, железа и магния (~1 сигма), но эти же кристаллы являются неравновесными (>3 сигм) по соотношению хрома и алюминия. Ассоциация **sp–срх** является неравновесной (>> 3 сигм) по распределению хрома.

Таблица.10. Составы минералов и расплавов авачитов и гарцбургитов Авачинского вулкана.

Источник	№ п/п	Порода/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
I	1	sp	0.58	0.34	9.59	53.77	8.08	15.31	0.27	12.49			
	2	ol	41.61					8.81	0.12	49.43	0.21		
	3	sp											
	4	срх											
	5	ol	40.7					9.37	0.15	49.15	0.22		
	6	срх	53.23	0.11	1.23	0.71		2.82	0.11	18.28	22.79	0.19	
	7	авачит	50.89	0.52	9.68		2.21	6.15	0.16	16.1	11.56	1.57	0.36
	8	расплав	52.1	0.62	11.9			8.4	0.2	13.1	11.1	1.95	0.46
II	9	sp			17.96	50.03	5.07	13.36	0.28	13.99			
	10	ol	41.06					8.51	0.12	51.07	0.05		
	11	орх	58.39		1.31	0.45		5.73	0.12	35.12	0.52		
	12	срх	54.62		1.99	0.66		2.45	0.04	17.7	23.65	0.25	
	13	стекло	57.45	0.53	19.61	4.06		4.07	0.05	3.41	7.04	4.49	0.79

Примечание. I – данные М.В. Портнягин и др. [67; 68]: 1–6 – минералы авачитов, средний состав авачита; 8 – родоначальный расплав авачита. II – данные С. Ишимару и др. [218]: 9–12 – составы минералов; 13 – состав стекла в трещине кристалла шпинели.

Ассоциации **ol–орх**, **ol–срх** и **орх–срх** можно считать равновесными (расхождение 1–2 сигмы) и как реститовые парагенезисы они могут быть равновесны с расплавом при температуре 1200–1220 °С ± 47 °С.

Внутри кристаллов шпинели встречаются расплавные включения. По нашим оценкам составы этих включений неравновесны (> 3 сигм) с минералом-хозяином. Они являются неравновесными и по критериям для расплава, равновесного с кристаллической фазой. Условия существования этих расплавов лежат в интервале ~1100–1200 °С при давлениях ~2–10 кб.

Базальты вулканов Горелый и Мутновский по данным Ю.А. Мартынова, А.А. Чашина [52] и А.А. Чашина [112]. Эти вулканы расположены в Вилючинской вулcano-тектонической структуре в Южно-Камчатской вулканической зоне, отделяемой от других зон Малко-Петропавловской зоной поперечных дислокаций. Вулкан **Горелый** является сложным кальдерным стратовулканом, начавшим формироваться в раннем плейстоцене. В его развитии выделяются 3 этапа вулканической активности. Базальты на вулкане Горелом развиты неравномерно – в основном они присутствуют в докальдерном комплексе и в современной постройке. В большинстве случаев содержание MgO в них лежит в окрестностях 5–6 вес. %, но встречаются разности, содержащие до 10–11 вес. %. Вулкан **Мутновский** расположен в 13 км от вулкана Горелый и состоит из 4 слившихся стратовулканов. В его истории выделяется 4 цикла развития начиная, с верхнего плейстоцена. Базальты на вулкане также представлены неравномерно во времени и имеют сходный характер преобладания в древней и современной постройке.

Базальты вулкана **Горелый** (I–III цикл развития современной постройки) содержат в виде вкрапленников плагиоклаз, оливин, клинопироксен, иногда дающие гломеропорфировые сростки. Шпинель встречается в виде включений в оливине. Для расчетов были использованы не реальные, а предполагаемые парагенезисы. Были использованы реальные составы минералов (наиболее магнезиальные для темноцветных и наиболее кальциевые разности для плагиоклаза). Парагенезис **sp–ol** неравновесен ($\gg 3$ сигм по 5 уравнениям) и не ясно направление переуравновешивания из-за сильной внутренней неравновесности кристалла шпинели. Парагенезис **ol–pl** равновесен (~1 сигма) и с учетом состава расплава (использовался валовый состав породы) образовывался из расплава, содержащего FeO 8.6 ± 1.2 %; MgO 7.6 ± 0.8 %; CaO 9.6 ± 1.3 %; Na₂O 3.4 ± 0.7 %. Условия кристаллизации были следующие: температура 1250 ± 27 °C и давление 11.5 ± 2 кб. Парагенезис **ор–срх** равновесен в рамках 3 сигм (клинопироксен внутренне равновесен) и рос из расплава содержащего Al₂O₃ $16;3 \pm 1$ %; CaO $9;1 \pm 1$ % при давлении 8 ± 2 кб и температуре 1210 ± 35 °C. Парагенезис **ol–срх** равновесен в рамках 3 сигм и образовывался при температуре 1210 ± 30 °C и давлении 8 ± 2 кб.

Эти расчетные величины позволяют полагать; что кристаллизация пироксенов была относительно оливина при более низкой температуре. Исходя из близости расчетных значений содержаний вышеуказанных окислов элементов и реальных содержаний этих же элементов в породе и равновесности валового состава породы (1–2 сигмы) как предполагаемого первичного расплава, равновесного с оливином и плагиоклазом, оценены условия кристаллизации этого расплава: 1210 ± 25 °C; 11 кб ± 2 кб.

Базальты вулкана **Мутновский** (молодая постройка Мутновский IV). Были исследованы парагенезисы **ol–pl**, **ol–срх**, **срх–pl**, которые оказались сильно неравновесными. Для оценок условий кристаллизации были использованы составы кристалла клинопироксена (внутренне равновесного – 1 сигма) и валовый состав породы. Основанием для использования валового состава, как первичного, послужило его внутреннее равновесие (~1–2 сигмы). Условия кристаллизации клинопироксена: температура 1200 ± 40 °C; давление $10–8 \pm 4$ кб. Расплав на момент кристаллизации клинопироксена содержал SiO₂ 50.5 ± 1.4 %; Al₂O₃ 17.8 ± 1.6 %; имел температуру $1190–1200$ °C ± 40 °C и находился под давлением 8.5 ± 2.5 кб.

Таблица. 11. Составы минералов и пород вулканов Горелый и Мутновский.

Вулкан	№ п/п	Порода/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Горелый	1	sp		0.33	30.83	19.99	19.1	12.54	0.2	15.49			
	2	ol	39.66					16.77	0.31	43.84	0.12		
	3	орх	53.91	0.27	1.36			15.37	0.26	27.01	1.96		
	4	срх	52.37	0.58	1.9			9.44	0.16	18.13	18.21	0.18	
	5	pl	50.22		30.61			0.87			14.09	3.63	0.16
	6	баз-т	53.62	0.99	17.41		3.28	5.15	0.14	5	8.55	3.4	1.43
Мутновский	7	ol	39.06					20.8	0.39	39.48	0.23		
	8	срх	51.73	0.62	2.18			11.71	0.29	18.15	15.33		
	9	pl	45.51		34.93			0.46			18.38	0.85	0.04
	10	баз-т	51.38	0.95	18.05		3.69	6.11	0.17	5.26	9.71	2.84	0.54

Примечание. Данные А.А. Чашина [112]: 1–6 – минеральные фазы и порода вулкана Горелый; 7–10 – минеральные фазы и порода вулкана Мутновский.

Оливин-анортитовые (алливалиты) включения вулкана Ксудач по данным О.Н. Волынца и др. [18], Т.И. Фроловой и др. [107], Т.И. Фроловой и др. [108], П.Ю. Плечова и др. [62]. Составы минералов и пород представлены в таблице 12. Вулкан Ксудач расположен в восточной вулканической подзоне Южной Камчатки. Это сложная кальдерообразующая вулканическая постройка начала формироваться в позднем плейстоцене и в ее развитии просле-

живается отчетливая ритмичность, когда каждый из 5 этапов ее развития заканчивался образованием кальдеры. В историческое время было только одно мощное извержение (1907 г.), в результате которого на дневную поверхность кислыми пемзовыми пирокластическими потоками было вынесено большое количество обломков (включений) полнокристаллических пород, представленных рядом алливалит–эвкрит. Подобные анортитсодержащие полнокристаллические породы найдены в вулканитах многих вулканических построек Камчатки, Курильских островов и Северной Японии. Собственно алливалиты распространены преимущественно в вулканитах построек, наиболее выдвинутых в сторону океана. Главными фазами алливалитов являются плагиоклаз, оливин, клинопироксен и стекло. Составы плагиоклазов и оливинов в пределах одного образца варьируют в пределах 3 номеров. Были исследованы составы **sp–ol**, **ol–pl**, **ol–crx** пар и состав предполагаемого первичного расплава алливалитов. Оливин–шпинелевая ассоциация, представленная включениями шпинелей в оливинах (3 пары), является сильно неравновесной (> 3 сигм) и, вероятно, переуравновешены в процессе остывания в солидусной области. Сильно неравновесными внутренне являются и составы самих кристаллов шпинели (> 3 сигм). Ассоциация **ol–pl** также является сильно неравновесной (>>3 сигм). Парагенезис **ol–crx** по 4 уравнениям, позволяющим оценивать равновесность этой минеральной пары, можно считать условно равновесным (диапазон величины равновесности 1–3 сигмы). Условия кристаллизации этой пары, по нашим оценкам, следующие: температура 1150–1130 °С ± 40 °С; давление < 3–4 кб; SiO₂ 50.3 ± 1.3 %; FeO 12 ± 1.4 %; MgO 6.5 ± 1.9 %; CaO 11.9 ± 0.9 %. Расплав, равновесный с кристаллами плагиоклаза, при давлениях 3–4 кб имеет температуру ~1190 °С и содержит SiO₂ 49.1 ± 2.8 %; Al₂O₃ 16.3 ± 1.2 %; CaO 11.5 ± 1.1 %.

Базальты вулкана Кудрявый (кальдера Медвежья, остров Итуруп, Курильские острова) по данным М.Л. Толстых и др. [96], В.И. Коваленко и др. [37], Пономарев и др. [66]. Действующий вулкан Кудрявый стал широко известен в геологических кругах благодаря находке в 90-х годах прошедшего столетия среди возгонов на фумарольных полях в его кратерной части собственного минерала элемента рения (одного из самых рассеянных в земной коре), названного рениитом. Кальдера Медвежья расположена в северной части острова Итуруп, она сформировалась в ранне-среднеплейстоценовое время в прибрежно-морских условиях. Начиная с позднего плейстоцена, в ней возобновилась вулканическая

Таблица. 12. Составы минералов и пород вулкана Ксудач.

Вулкан	№ п/п	Порода/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Ксудач	1	sp		2.03	34.53	10.98	21.14	20.82	0.22	12.11			
	2	ol	38.2					19.25	0.31	41.9	0.21		
	3	crx	50.85	0.45	3.49			7.02	0.24	15.12	22.24	0.2	
	4	pl	43.71		35.76			0.54			19.47	0.55	
	5	расплав	50.35	0.83	16.89			9.93	0.25	6.67	12.74	2.05	0.29

Примечание. Данные П.Ю. Плечова и др. [62]: 1–4 минеральные фазы, 5 – родоначальный расплав алливалитов в. Ксудач.

деятельность, проявившаяся в виде экструзивных куполов, стратовулканов и шлаковых конусов, слившихся в небольшой хребет внутри нее, вытянутый в субширотном направлении. Вулканы Кудрявый и Меньшой Брат являются составными частями этого хребта. Породы, слагающие вулкан, представлены базальтами, андезибазальтами и андезитами. Вкрапленники в базальтах и андезибазальтах представлены оливином (с включениями шпинели), ортопироксеном, клинопироксеном и плагиоклазом. Ассоциация **sp–ol** является сильно неравновесной (>>3сигм), составы минералов указывают на переуравновешивание в солидусной об-

ласти, неравновесным является и состав самих кристаллов шпинели. Неравновесной (>>3сигм) является и пара **sp–ol**, где оливин является минералом-хозяином, а шпинель является новообразованной фазой в раскристаллизованном расплавленном включении из этого кристалла оливина. Неравновесными (>>3сигм) являются и ассоциации **ol–cpx**, где клинопироксен представлен как вкрапленником, так и новообразованием в выше указанном расплавленном включении в оливине. Оценка условий кристаллизации вкрапленника клинопироксена по его составу дает следующие результаты: 1100 ± 50 °С; 8 ± 3.8 кб.

Таблица. 13. Составы минералов и пород кальдеры Медвежья.

Вулкан	№ п/п	Порода/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Малой Брат, Кудрявый	1	sp		0.44	28.99	29.1	12.48	16.32	0.31	13.44			
	2	ol	40.23					10.97	0.13	49.07	0.21		
	3	sp		0.18	57.52		11.3	12.64	0.23	18.55			
	4	ol	40.07					10.69	0.14	48.36	0.16		
	5	cpx	51.04	0.59	1.71			13.76	0.5	13.9	18.19	0.29	
	6	cpx	42.52	1.66	14.28			9.36	0.15	10.81	20.99	0.34	0.01
	7	расплав	42.99	0.84	16.3			10.72	0.17	13.82	12.37	1.91	0.35
	8	андезибаза́лт	57.09	0.68	18.92			7.45	0.16	3.5	9.3	2.55	0.57

Примечание. Данные М.Л. Толстых и др. [96]: 1–2 – включение шпинели в оливине из андезибаза́лта (лавовый поток) в. Кудрявый. Данные В.И. Коваленко и др. [37], в. Меньшой Брат, базальтовый лавовый поток: 3–4 – шпинель из раскристаллизованного расплавленного включения в оливине и предполагаемый (наиболее магнезиальный) кристалл-хозяин; 5–6 – вкрапленник и кристалл из раскристаллизованного расплавленного включения, указанного выше; 7 – средний состав 13 стекол с поправкой по K_D ; 8 – андезибаза́лт в. Кудрявый.

Условия кристаллизации наиболее магнезиального оливина с использованием составов оливина и расплавленного включения: по парагенезису оливин–расплав Fe^{2+}/Mg_m в расплаве 0.44; по ассоциации оливин–расплав – 0.42 (сигма 0.11); Al_2O_3 13.5 ± 1.6 %; FeO 10.75 ± 1.4 %; MgO 12.2 ± 2.1 %; MgO 14.01 ± 1.6 %; CaO 9.92 ± 1.6 %; температура 1390 ± 36 °С; 1380 ± 36 °С; по составу расплава – MgO 12.78 ± 1.6 %; Al_2O_3 13.5 ± 1.6 %; температура 1380 ± 57 °С; 1370 ± 35 °С; давление 14 ± 2.5 кб. Имеются расхождения (~2–3 сигмы) в оценках содержания Al_2O_3 (в сторону уменьшения) относительно его содержания в стекле расплавленных включений, скорректированных с учетом K_D .

Глава 11. Щелочно-ультраосновные комплексы тектоно-магматической активизации стабилизированных областей и докембрийские ультраосновные эффузивы (коматииты)

11.1. Меймечиты Маймеча-Котуйской субпровинции и меймечиты арктического фрагмента магматической провинции Карру

Меймечиты. В разряд меймечитов (являющихся редким видом), генезис которых активно обсуждается, помещают высокотитанистые разности пикритов согласно Петрографическому кодексу [61], хотя в работе Магматические горные породы, т. 5 [51] основной упор в различиях меймечитов и субщелочных и щелочных разностей пикритов делается на количественно-минералогические и петрохимические различия, в частности, указывается сумма

щелочей. Для оценок условий формирования этих пород были использованы данные по составам фаз из сибирских меймечитов пермского возраста и юрских субщелочных меймечитов антарктического фрагмента магматической провинции Карру.

Сибирские меймечиты представлены двумя фашиальными разностями (вулканиты и дайковые тела) в Маймеча-Котуйской субпровинции. Данные по составам фаз из этих пород заимствованы из работ А.В. Соболева, А.Б. Слуцкого [90], И.Д. Рябчикова и др. [75], А.В. Соболева и др. [91]; Н. Арндта и др. [124], Л. Елкинс-Тантона и др. [178]. Были выделены следующие системы: расплав–оливин, расплав–шпинель–оливин; расплав–оливин–клинопироксен (таблица 1–меймечит), для которых рассчитывались условия их равновесной кристаллизации.

Система расплав–оливин. Для расчетов условий кристаллизации были использованы результаты анализов гомогенизированных расплавных включений и содержащих их кристаллов оливина из работ И.Д. Рябчикова и др. [75], А.В. Соболева и др. [91]. Для каждой из фаз были выбраны представительные анализы как крайних членов ряда по магнезиальности гомогенизированных стекол и исправленных составов этих стекол, так и наиболее характерные. Из работы А.В. Соболева и др. [91] были использованы как составы закаленных расплавных включений из таблицы 3, так и **пересчитанных до равновесия** с оливином-хозяином из таблицы 4. Составы фаз (гомогенизированного стекла и кристаллов оливина) представлены в таблице 1–меймечит.

Была сформирована выборка из 78 парных (состав расплава + состав оливина) анализов, включающая следующие данные: 7 пар – первичные составы гомогенизированных расплавных включений, 7 пар – пересчитанные составы расплавных включений [91]; 64 парных анализа, составы кристаллов оливина (1, 2, 3, 5 из таблицы 1–меймечит); каждый объединялся с 16 составами закаленных стекол (анализы 22–37 из таблицы 2), полученных по одному и тому же образцу [75]. Используя эти парные анализы, с помощью полученных нами уравнений для системы расплав–оливин, были рассчитаны численные значения следующих величин: содержания в расплаве титана, алюминия, железа, марганца, магния, кальция, хрома, величины температуры. С использованием только составов расплавных включений были рассчитаны следующие величины: содержание в расплаве алюминия, магния, величина температуры, величина давления, равновесное распределение элементов.

Содержание **титана** в расплаве можно рассчитать по 2 уравнениям, позволяющим получать только оценочные значения (см. главу III), поэтому укажем только некоторые особенности полученных величин. Для первого уравнения величина сигмы 0.67. Средняя величина расхождения между содержаниями титана, полученными аналитически, и рассчитанными для 7 гомогенизированных расплавных включений – 1.7; для 7 исправленных составов эта величина 0.48, что составляет 15–20 % от исправленного содержания титана. Для остальных 64 использованных составов расхождения превышают величину сигмы (0.67) от 3 до 10 и более раз. Сходная картина и для второго уравнения.

Содержание **алюминия** в расплаве. Было рассчитано по 2 уравнениям, в первом уравнении использовались составы расплава и оливина, во втором только состав расплава.

Все рассчитанные значения больше реальных, включая и исправленные. Наименьшие расхождения наблюдаются для исправленных концентраций. Для первого уравнения расхождения составляют 2–3 сигмы (сигма 1.7), относительная ошибка может достигать до 70–90 %. Для неисправленных концентраций расхождение составляет 3–6 сигм. Для расчета собственно по расплаву, для случая исправленных величин ошибка меньше и составляет 1.38 (сигма 1.82). Относительная ошибка лежит в окрестностях 50 %, для неисправленных значений расхождения составляют 3–6 сигм. Величина расхождений значений для первого и второго уравнений обратно пропорционально зависит от содержания железа и магния в расплаве, а также и давления.

Содержание суммарного **железа** в расплаве. Для расчета содержания железа (суммарного) использованы 2 формулы. Первая формула пригодна для получения оценочных значений.

Таблица. 1–меймечит. Выборочные составы фаз, использованные для расчетов.

Источник	№ п/п	Порода/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
I	1	стекло	40.78	6.33	7.3	0.18		15.04	0.18	8.66	15.26	3.19	1.79
	2	стекло	41.61	4.69	6.3	0.08		11.3	0.14	14.77	12.54	2.54	2.27
	3	стекло	40.13	4.32	4.99	0.14		15.84	0.18	19.66	10.37	2.14	1.2
	4	стекло	41.11	3.37	4.5	0.06		15.12	0.13	22	8.99	1.8	1.61
	5	ol	40.5	0.06	0.06	0.13		9.06	0.15	49.22	0.38		
	6	ol	40.66	0.04	0.06	0.1		7.58	0.13	50.66	0.35		
II	7	ol	40.41	0.03	0.06	0.11		7.93	0.13	49.61	0.34		
	8	sp		5.3	9.62	44.02	8.94	14.78	0.26	15.18			
	9	ol	37.95	0.5	0.3	0.11		15.16	0.23	43.48	0.64		
	10	sp		7.09	4.97	33.94	17.28	23.81	0.37	8.94			
III	11	ol	40.22	0.04	0.03	0.06		10.27	0.16	49.15	0.45		
	12	sp		6.53	5.62	30.62		44.45	0.35	9.7			
	13	sp		4.18	6.51	49.45		24.85	0.21	14.4			
II	14	срх	49.01	2.19	2.26	0.48	2.94	3.06	0.09	14.78	22.83	0.38	
III	15	срх	47.33	3.37	4.1	0.07		6.9	0.1	13.45	23.25	0.58	
III	16	срх	51.24	1.44	1.67	0.09		5.36	0.1	16.71	22.72	0.33	

Примечание. I – данные А.В. Соболева и др. [91]: 1, 2 – составы гомогенизированных расплавных включений, наиболее и наименее магнезиальных (таблица 3); 3, 4 – пересчитанные составы этих включений (таблица 4); 5, 6 – составы кристаллов-хозяев оливина, содержащих эти включения (таблица 3). II – данные И.Д. Рябчикова и др. [75], таблица 2: 7, 8 – оливин вкрапленник и включенный в него кристалл шпинели; 9, 10 – кристаллы оливина и шпинели, расположенные рядом и включенные в кристалл клинопироксена. III – данные Л. Елкинс-Тантона и др. [178], таблица 2, обр. М1: 11 – состав фенокристаллов оливина (среднее); 12 – низкохромистая шпинель, включенная в оливин; 13 – высокохромистая шпинель, включенная в оливин; II – данные И.Д. Рябчикова и др. [75]: 14 – кристалл клинопироксена, включающий в себя кристалл оливина (анализ 9 этой таблицы) и кристалл шпинели (анализ 10 этой таблицы), расположенные рядом. III – данные Л. Елкинс-Тантона и др. [178], таблица 2, обр. 2FG-32, 2FG-45: 15 – низкомагнезиальный клинопироксен; 16 – высокомагнезиальный клинопироксен.

Полученные по ней значения для исправленных составов расплавных включений составляет ~2.4 сигмы, что составляет ~20 % от суммарного содержания железа в расплаве. Расчетные значения, как правило, меньше реальных значений. Расчеты по второй формуле при заданной температуре 1400 °С дают расхождение ~1 сигма, а при 1500 °С меньше 0.5 сигмы, что составляет менее 10 %. Во всех случаях, исключая исправленные составы, расхождения превышают величину сигмы, во многих случаях до 10 раз.

Содержание **марганца** в расплаве. Расчет по формуле позволяет получать только оценочные значения. Существенных изменений после исправления составов расплавных включений нет и расхождения в виде относительной ошибки могут составлять до 90 %.

Содержание **магния** в расплаве. Для расчетов были использованы две формулы, в которых учитываются составы расплава и кристаллов оливина. В первой (**PLOL7a**) необходимо знание температуры, во второй (**PLOL7b**) используется иной набор элементов, позволяющий избежать учета влияния температуры. Были рассчитаны варианты содержания магния в расплаве с использованием вычисленных температур, указанных в таблице 4 из работы А.В. Соболева и др. [91].

В строках 6 и 7 (таблица 2–меймечит) представлены результаты расчетов и сравнения содержаний магния по второй формуле (**PLOL7b**), практически не выходящие за рамки среднеквадратичной ошибки. Расхождения расчетных содержаний магния по 2 вышеуказанным

формулам и его содержаниями в неисправленных составах расплавных включений, как правило, превышают в 3 и более раз величину среднеквадратичной ошибки.

Таблица. 2–меймечит. Вычисленные содержания магния в расплаве.

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7
1	24.13	23.53	21.53	26.94	27.9	28.93	29.83
2	1465 °С	1458 °С	1418 °С	1496 °С	1507 °С	1533 °С	1539 °С
3	26.37	26.09	23.97	28.15	28.72	29.93	30.16
4	2.24	2.57	2.44	1.21	0.82	1.01	0.29
5	средняя квадратичная ошибка 1.8 атом. %						
6	25.03	24.61	22.54	28.27	29.44	31.32	32.11
7	0.9	1.08	1.01	1.33	1.54	2.39	2.24
8	средняя квадратичная ошибка 2.2 атом. %						

Примечание. По вертикали – частичные характеристики 7составов **пересчитанных** расплавных включений из работы А.В. Соболева и др. [91] и рассчитанные содержания магния с использованием формул (**PLOL7a** и **PLOL7b**). По горизонтали: 1 – содержания магния (атом. %) в исправленных составах расплавных включений из таблицы 4 указанной работы. 2 – значения температуры из таблицы 4; 3 – содержания магния, вычисленные по первой формуле; 4 – разница между значениями из строк 1 и 3; 5 – величина среднеквадратичной ошибки для этой формулы; 6 – содержания магния, вычисленные по второй формуле; 7 – разница между значениями из строк 1 и 6; 8 – величина среднеквадратичной ошибки для второй формулы.

Расчеты содержания магния в расплаве, равновесном с кристаллами оливина, можно рассчитывать и по составу самого расплава. Была использована формула (**PGOLM3**), позволяющая рассчитать содержание магния в расплаве, исходя из величины температуры. Значения температуры были заимствованы из работы А.В. Соболева и др. [91]. Другой вариант расчета, с использованием содержаний алюминия, суммы щелочей и величины давления, был получен по формуле (**PGOLM4**). Величины давления были рассчитаны по формуле (**PGOLPa**), позволяющей получать только оценочные значения и характеризуемой величиной сигмы 2.4 кб. Результаты расчетов представлены в таблице 3–меймечит.

Содержания **магния**, вычисленные по составу расплава, систематически меньше значений, приводимых в работе А.В. Соболева и др. [91]. Расчеты по формуле (**PGOLM3**) показывают, что расхождения (строка 5) лежат в окрестностях среднеквадратичной ошибки, и связь содержаний магния в расплаве и температуры позволяет полагать близость их значений к реальным. Расчеты, выполненные по формуле (**PGOLM4**), позволяют предположить неполное соответствие равновесным концентрациям величин содержаний в расплаве алюминия и щелочей, а также рассчитанного значения давления. Учитывая особенности формулы (**PGOLA**) для расчета содержаний алюминия в расплаве (по составу расплава), можно предположить, что причиной систематических расхождений расчетных содержаний алюминия и магния с исправленными составами расплавных включений является завышенное содержание в исправленных составах расплавов суммы щелочей.

Содержание **кальция** в расплаве. Для расчетов была использована формула (**PLOL8**), позволяющая получать только оценочные значения. Расхождение между исправленными содержаниями кальция и рассчитанными по указанной формуле содержаниями составляют в среднем ~3.5 сигмы и относительная ошибка составляет 35 %. Кроме того, все рассчитанные значения систематически меньше исправленных.

Содержание **хрома** в расплаве. Для расчетов была использована формула (**PLOL11**), позволяющая получать только оценочные значения. Расхождение реальных и полученных расчетным путем значений в среднем ~0.8 сигмы, составляющей 0.1 атом. %.

Таблица. 3–меймечит. Содержания магния в расплаве, вычисленные по составу расплава с учетом значений температуры и давления.

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7
1	24.13	23.53	21.53	26.94	27.9	28.93	29.83
2	1465 °С	1458 °С	1418 °С	1496 °С	1507 °С	1533 °С	1539 °С
3	16.3 кб	15.8 кб	14.1 кб	17.6 кб	18.4 кб	18.8 кб	19.8 кб
4	22.5	22.2	20.2	24.1	24.6	26	26.5
5	-1.6	-1.3	-1.3	-2.8	-3.2	-3	-3.6
6	средняя квадратичная ошибка 2.5						
7	20.7	20.5	19.1	22.2	22.6	23.8	23.8
8	-3.4	-3.1	-2.4	-4.7	-5.3	-5.1	-6.1
9	средняя квадратичная ошибка 2.1						

Примечание. По горизонтали: 1 – содержания магния (атом. %) в исправленных составах расплавных включений из таблицы 4, из работы А.В. Соболева и др. [91]; 2 – значения температуры из таблицы 4; 3 – величины давления (кб), вычисленные по формуле (**PGOLPa**); 4 – содержания магния, вычисленные по формуле (**PGOLM3**); 5 – разница между значениями из строк 1 и 4; 6 – величина среднеквадратичной ошибки для этой формулы; 7 – содержания магния, вычисленные по формуле (**PGOLM4**); 8 – разница между значениями из строк 1 и 7; 9 – величина среднеквадратичной ошибки для этой формулы.

Величина **равновесной** температуры. Для расчетов величины температуры в двухфазной системе расплав–оливин было использовано 3 уравнения (**POLTa1**, **POLTy1**, **POLTf1**), включающих также и учет величины давления. Значения величины давления представлены в таблице 4–меймечит (строка 2) и будет обсуждено ниже. Рассчитанные значения температуры представлены в таблице 4–меймечит.

Таблица. 4–меймечит. Значения температуры, вычисленные по составам оливина и расплава с учетом значений давления.

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7
1	1465 °С	1458 °С	1418 °С	1496 °С	1507 °С	1533 °С	1539 °С
2	16.3 кб	15.8 кб	14.1 кб	17.6 кб	18.4 кб	18.8 кб	19.8 кб
3	1460 °С	1449 °С	1408 °С	1507 °С	1526 °С	1538 °С	1559 °С
4	-4 °С	-8 °С	-10 °С	12 °С	20 °С	6 °С	20 °С
5	средняя квадратичная ошибка 36 °С						
6	1466 °С	1454 °С	1410 °С	1515 °С	1534 °С	1545 °С	1564 °С
7	1 °С	-4 °С	-8 °С	19 °С	27 °С	12 °С	25 °С
8	средняя квадратичная ошибка 36 °С						
9	1578 °С	1558 °С	1498 °С	1646 °С	1684 °С	1747 °С	1763 °С
10	-113 °С	-100 °С	-80 °С	-150 °С	-177 °С	-214 °С	-224 °С
11	средняя квадратичная ошибка 39 °С						

Примечание. По горизонтали: 1 – значения температуры для исправленных составах расплавных включений из таблицы 4, из работы А.В. Соболева и др. [91]; 2 – величины давления (кб), вычисленные по формуле (**PGOLPa**); 3, 6, 9 – значения температуры, вычисленные по указанным выше формулам; 4, 7, 10 – разница между величинами температуры из работы А.В. Соболева и др. [91] (ряд 1) и рассчитанными значениями температуры (ряды 3, 6, 9).

Если предположить, что значения температуры, приводимые в ряду 1, близки к реальным, то наблюдается хорошее соответствие им вычисленных по нашим формулам (**POLTa1**, **POLTy1**) значений, приведенных в рядах 4 и 6. Наибольшие различия, в пределах 3–6 сигм, получились для значений температуры, полученных по формуле (**POLTf1**). Отличие этой формулы заключается в том, что в ней учитываются концентрации **SiO₂** и обеих форм железа

в расплаве в виде FeO . По данным И.Д. Рябчикова и др. [75] и А.В. Соболева и др. [91] трехвалентная форма железа в расплаве присутствует. Исключение ее должно привести к уменьшению рассчитываемого значения температуры. В предположении, что значение равновесной температуры для наиболее магнезильного состава расплавленного включения (колонка 7) примерно равно ~ 1550 °С, было рассчитано содержание двухвалентного железа и значение фугитивности кислорода, о чем будет идти речь ниже.

Для расчета значений температуры были также использованы три уравнения, в которых учитывается состав расплава, равновесного с кристаллами оливина, а также влияние температуры и давления. Эти результаты представлены в таблице 5–меймечит. В уравнении **PGOLTe** используется только связь температуры и содержания магния в расплаве. В уравнении **PGOLTd** учитываются содержание магния и величина давления. В уравнении **PGOLTe** наряду с содержанием магния и величины давления учитываются влияния практически всех порообразующих элементов, исключая железо. Расчеты по первым двум уравнениям демонстрируют хорошую сходимость с данными из работы А.В. Соболева и др. [91]. Расчеты по третьему уравнению отличаются на величину ~ 2 –3 сигмы.

Таблица. 5–меймечит. Значения температуры, вычисленные по составу расплава с учетом значений давления.

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7
1	1465 °С	1458 °С	1418 °С	1496 °С	1507 °С	1533 °С	1539 °С
2	16.3 кб	15.8 кб	14.1 кб	17.6 кб	18.4 кб	18.8 кб	19.8 кб
3	1450 °С	1441 °С	1411 °С	1493 °С	1507 °С	1522 °С	1537 °С
4	15 °С	17 °С	7 °С	3 °С	0 °С	11 °С	2 °С
5	средняя квадратичная ошибка 44 °С						
6	1464 °С	1453 °С	1417 °С	1510 °С	1527 °С	1544 °С	1562 °С
7	-1 °С	-5 °С	-1 °С	14 °С	20 °С	11 °С	23 °С
8	средняя квадратичная ошибка 35 °С						
9	1515 °С	1500 °С	1447 °С	1573 °С	1591 °С	1612 °С	1636 °С
10	50 °С	42 °С	29 °С	77 °С	84 °С	79 °С	97 °С
11	средняя квадратичная ошибка 35 °С						

Примечание. По горизонтали: 1 – значения температуры для исправленных составов расплавленных включений из таблицы 4, из работы А.В. Соболева и др. [91]; 2 – величины давления (кб), вычисленные по формуле (**PGOLPa**); 3, 6, 9 – значения температуры, вычисленные по указанным выше формулам; 4, 7, 10 – разница между величинами температуры из работы А.В. Соболева и др. [91] (ряд 1) и рассчитанными значениями температуры (ряды 3, 6, 9).

С нашей точки зрения, в результатах расчетов по формуле (**PGOLTe**) в данном случае достаточно отчетливо видна неравновесность исправленных составов расплавленных включений. На возможность разбалансировки составов расплавленных включений, как нам представляется, указывают серпентинизация по трещинам вкрапленников оливина и зональность вкрапленников оливина по содержаниям кальция, хрома, титана, марганца, никеля, описанные в работе А.В. Соболева и др. [91]. Правда, время появления зональности неясно. Выполненные нами расчеты не учитывают влияние летучих компонентов, тогда, как по данным И.Д. Рябчикова и др. [75] газовые обособления во включениях могут занимать от 6 до 16 % их объема. Присутствие летучих должно приводить к иным соотношениям элементов в расплаве, равновесном с оливином. Эти оценки станут возможными после создания уравнений, подобных используемым, но в которых будет учитываться влияние флюидной составляющей магм.

Величина **давления** оценивалась по формуле (**PGOLPa**), в которой используются только содержания элементов в расплаве, равновесном с кристаллами оливина, и позволяющей получать только оценочные значения искомой величины. Величина среднеквадратичной ошибки невелика 2.4 кб, что в окрестностях 20 кб составляет ~12 %, но невысокое значение $R = 0.76$ указывает на возможность использования рассчитанных величин только для оценок. Однако отсутствие иных способов расчета давления вынуждает использовать полученные значения, представленные в таблицах 4 и 5–меймечит.

Определение **равновесности** содержания элементов в расплаве. Для этих целей была использована формула **PGOL1**, учитывающая величины температуры и давления, а также содержания порообразующих элементов в расплаве, исключая кремний, в диапазоне давлений до 175 кб, что делает ее достаточно общей, в отличие от выше указанных формул, ограниченных диапазоном давлений 2–21 кб. Было выполнено два варианта расчетов: все железо в двухвалентной форме и с вычлененной из общей суммы собственно двухвалентной формой железа. Для первого варианта расхождения составляют 2–2.5 сигмы; для второго лежат в окрестностях 1–1.5 сигм.

Расчет **фугитивности кислорода**. Расчет был выполнен для включения G1-25-1a (наиболее магнезиального и высокотемпературного) из таблицы 4 работы А.В. Соболева и др. [91]. Величина равновесной температуры была принята равной 1550 °С (см. раздел величина равновесной температуры). Используя формулу (**POLTf1**), было подобрано содержание железа, удовлетворяющее расчетной величине температуры 1550 °С. Разница между суммарным содержанием железа, и соответствующим расчетной величине температуры 1550 °С, должна соответствовать содержанию в расплаве трехвалентной формы железа. Были получены следующие содержания: Fe^{3+} 3.4 атом. %; Fe^{2+} 8.2 атом. % Была использована формула (**GSPfb**), позволяющая вычислить величину фугитивности кислорода для условий атмосферного давления, учитывая соотношение разновалентных форм железа и величину температуры. Полученное соотношение разновалентных форм железа с учетом температуры в условиях атмосферного давления соответствует фугитивности кислорода, равной $QFM + 1.5 \pm 0.5$ (сигма).

Система расплав–шпинель–оливин. Кристаллы-вкрапленники оливина меймечитов, в большинстве своем, как правило, содержат включения кристаллов шпинели, парные составы которых из работ А.В. Соболева, А.Б. Слуцкого [90], И.Д. Рябчикова и др. [75], Н. Арндта и др. [124], Л. Елкинс-Тантона и др. [178] были использованы для расчетов. Сформированы следующие пары (14 парных анализов): И.Д. Рябчиков и др. [75]: первая пара – вкрапленник оливина, содержащий включение шпинели; вторая пара – кристаллы оливина и хромита, включенные в кристалл клинопироксена; А.В. Соболев, А.Б. Слуцкий [90]: 1 пара – вкрапленник оливина, кристалл шпинели (структурная принадлежность не указана); Н. Арндт и др. [124] – сформированы 4 пары парных анализов из двух анализов оливина и двух анализов шпинели (структурные взаимоотношения не указаны), имеющих одинаковые номера (47-3) в таблице 2 использованной работы; Л. Елкинс-Тантон и др. [178]: 6 пар парных анализов в виде различных сочетаний трех составов оливинов (фенокристаллы) и двух составов шпинелей из образца M1; 1 парный анализ из образца 2FG-32, представленный средним составом оливина вкрапленников и включением хромита.

Одним из необходимых условий использования составов этих фаз для расчетов является равновесность шпинель–оливинового парагенезиса. С помощью 5 уравнений (**PSOLRa**, **PSOLRb**, **PSOLRc**, **PSOLRd**, **PSOLRf**), использующих различные варианты соотношений элементов, входящих в составы оливина и шпинели, была оценена равновесность их составов. В основе этих соотношений лежат содержания железа и магния в этих минеральных фазах с учетом влияния содержаний титана, алюминия и хрома в кристаллах шпинели. Для всех пяти уравнений во всех 14 парах расхождения в составах на порядок и более превышают среднеквадратичную ошибку (сигма) для каждого из этих уравнений. Полученные результа-

ты свидетельствует о переуравновешивании составов оливин–шпинелевой ассоциации меймечитов независимо от их структурных принадлежностей, например, оливин и шпинель, включенные в кристалл клинопироксена. Неравновесными являются и собственно составы кристаллов шпинели, проверенные по формуле (**PSPRa**). Их составы также на порядок и более разбалансированы относительно равновесных. Используя экспериментальные результаты (см. раздел шпинель–оливин главы IV), можно указать и направление хода температуры. Во всех случаях без исключения шпинель является более железистой и менее магниальной относительно равновесной. Это свидетельствует о переуравновешивании в области солидуса при понижении температуры. Неравновесность шпинель–оливиновой ассоциации и собственно шпинелей, возникающая в процессе остывания на примере неоген–четвертичных эффузивов Камчатки, не выходит за рамки 5–6 сигм, тогда как в данном случае расхождения разнятся на порядок и более. Это дает основание предположить, что видимая серпентинизация (образование новообразованной минеральной фазы) в основной массе и по трещинам в кристаллах-вкрапленниках оливина сопровождается изменениями химических составов как кристаллов-вкрапленников оливина, так и включенных в них кристаллов шпинели.

Система расплав–оливин–клинопироксен. В отличие от парагенезиса шпинель–оливин с ясными структурными взаимоотношениями минералов, парагенезис оливин–клинопироксен относится к разряду предполагаемых из-за отсутствия, в большинстве случаев, структурных взаимоотношений этих минералов в породе, поэтому были сформированы различные возможные сочетания этих минералов. С целью найти равновесные сочетания этих минералов из работы А.В. Соболева, А.Б. Слуцкого [90] были выбраны 22 парных анализа. Из первого анализа оливина и нескольких анализов клинопироксена, представленных в таблице 1 этой работы, было сформировано 3 парных анализа; И.Д. Рябчиков и др. [75] – сформирована 1 пара, состоящая из кристалла оливина, включенного в кристалл клинопироксена, представленных в таблице 1 этой работы; Н. Арндт и др. [124] – из 3 анализов клинопироксена и 3 анализов оливина, представленных в таблице 2 этой работы, было сформировано 9 парных анализов; Л. Елкинс-Тантон и др. [178], таблица 2 – из анализов образца 2FG-32 было сформировано 3 парных анализа, из анализов образца 2FG-45 было сформировано 6 парных анализов. Все эти парные анализы (22 шт.) были исследованы с помощью 3 уравнений (**POLARa**, **POLARb**, **POLARd**) для выявления равновесных пар. Были получены следующие результаты. Расчеты по формуле (**POLARa**) выявили только одну близкую к равновесию пару, сформированную по анализам из работы Н. Арндт и др. [124], в которой состав клинопироксена близок к составу анализа 16, таблицы 1–меймечит, а оливин является еще менее магниальным, чем анализ 9 той же таблицы; все остальные пары оказались неравновесными. Во всех неравновесных парах имеющимся составам клинопироксена будут соответствовать более железистые оливины.

Расчеты по формуле **POLARb** выявили 4 пары анализов, равновесные в рамках 2 сигм, в число которых попала пара из работы И.Д. Рябчиков и др. [75], представленная включением оливина в кристалл клинопироксена. Во всех случаях клинопироксен был бы равновесен с менее магниальным оливином. Расчеты по формуле **POLARd** добавили к имеющимся 4 парам, равновесным по формуле **POLARb**, еще 4 пары, равновесные в рамках 2 сигм. Кроме того, выбранные составы кристаллов авгита были также проверены на равновесность с помощью уравнений (**PLAVRa**, **PLAVRb**). Расчеты по этим формулам показали, что практически все кристаллы авгитов в исследованных меймечитах можно отнести к разряду равновесных по своим составам. Расчеты в интервале давлений от 14 (наименьшая величина для расплавных включений, см. таблицу 3–меймечит) до 8 кб с шагом 2 кб показали, что с уменьшением давления неравновесность составов увеличивается. Неравновесными по составу становятся кристаллы авгита, содержащие ~13.5 % MgO. Полагая равновесными по одной паре анализов из работ И.Д. Рябчикова и др. [75] и Н. Арндта и др. [124], по их составам были выполнены расчеты содержания титана в расплаве и величины температуры. По формуле **POLA2a**, в которой используются только составы кристаллических фаз, были получены сле-

дующие значения: расплав, равновесный с клинопироксеном и включенным в него оливином из работы [75] содержит 2.82 вес. % TiO_2 ; расплав, равновесный с парой из образца 47–3 (содержащего 3.84 вес. % TiO_2) из работы [124], содержит 2.15 вес. % TiO_2 .

Среди полученных уравнений для системы **расплав–клинопироксен** есть 2 уравнения (**PLAVTa**, **PLAVTd**), позволяющие рассчитать величину температуры, используя только состав кристаллов клинопироксена и величину равновесного давления. Задавая давление в интервале 14–8 кб с шагом 2 кб для двух составов клинопироксенов, предположительно равновесных с оливином, были вычислены температуры. По формуле **PLAVTa** получились следующие результаты: первый кристалл – 14 кб – 1222 °С; 8 кб – 1178 °С; второй кристалл – 14 кб – 1259 °С, 8 кб – 1215 °С. По формуле **PLAVTd** получились следующие результаты: первый кристалл – 14 кб – 1101 °С, 8 кб – 1062 °С; второй кристалл – 14 кб – 1148 °С, 8 кб – 1110 °С. Расхождения между рассчитанными значениями по 2 формулам составляет ~120 °С (2.2 сигмы), что, вероятно, связано с изменениями химических составов кристаллов клинопироксена.

Выводы

По литературным аналитическим данным с учетом структурно-текстурных особенностей эффузивной и субвулканической фаций сибирских меймечитов были сформированы реальные и предполагаемые парагенезисы: расплав–оливин, расплав–шпинель–оливин, расплав–оливин–клинопироксен, расплав–пироксен. Используя составы указанных минеральных фаз и расплавов, равновесных с этими фазами (составы пересчитанных гомогенизированных расплавных включений), с помощью полученных нами формул были вычислены равновесные условия кристаллизации, или отклонения от этих условий.

Были получены следующие результаты.

1. Парагенезис **шпинель–оливин**, представленный включениями шпинели в кристаллы оливина, по результатам наших оценок сильно неравновесен, далеко выходя за рамки 3 сигм, ограничивающих неравновесность в основных эффузивах на примере четвертичных вулкаников Курило-Камчатского региона. Неравновесность выражается в уменьшении магнезиальности шпинели, новый состав которой соответствует менее магнезиальным разностям оливина. Несоответствие составов оливина и шпинели, выходящее за рамки 3 сигм, указывает на возможное участие метаморфических процессов в изменениях составов кристаллов и делает составы кристаллов этой ассоциации не пригодными для оценок условий их расплавного генезиса. Возможным указателем на участие метаморфических процессов в становлении составов, например, оливинов, является их зональность, показанная в работе А.В. Соболева и др. [91].

2. Для парагенезиса **оливин–клинопироксен** большинство кристаллов клинопироксена неравновесны с кристаллами оливина в породе. В этой минеральной ассоциации так же, как и в шпинель–оливиновой, авгит становится равновесен с менее магнезиальным оливином.

3. Допуская некоторую близость имеющихся составов кристаллов оливина их первичным расплавленным составам, на что, например, указывает высокое содержание кальция в оливине, и используя исправленные составы расплавных включений в оливине, были рассчитаны содержания титана, алюминия, железа (суммарного), марганца, магния, кальция, хрома, величины температуры, давления и фугитивности кислорода в расплаве, равновесном с кристаллами оливина в системе расплав–оливин.

4. Рассчитанные значения величин находятся в удовлетворительном согласии (расхождения в пределах 2 сигм) с составами пересчитанных расплавных включений. Расхождения

рассчитанных содержаний элементов с содержаниями их в непересчитанных составах расплавных включений могут превышать 10 сигм и более.

5. Составы пересчитанных расплавных включений не в полной мере адекватны первичному магматическому расплаву, так как авторы публикаций вводили поправки только по содержаниям железа и магния с перерасчетом состава. На неполную идентичность составов расплавных включений и первичного расплава косвенно указывает и неравновесность с оливином составов кристаллов шпинели, включенных в них. Что позволяет предположить диффузионное переуравнивание составов разного рода включений и минерала-хозяина. Более точные оценки состава равновесного расплава могут быть получены после создания программы, позволяющей решать системы созданных уравнений, минимизируя расхождения, опираясь на значения среднеквадратичной ошибки.

6. Максимальные значения равновесного давления начала кристаллизации вкрапленников оливина ~20 кб были рассчитаны по составу расплава. Этой величине давления противоречит содержание алюминия в кристаллах шпинели.

7. Обобщения, полученные нами (см. главу III), основанные на экспериментальных данных (39 публикаций, 313 анализов в интервале давлений 1–28 кб) в условиях «сухого» давления по особенностям составов кристаллов шпинелей и барической границы их роста из расплавов основного-ультраосновного составов, позволили сделать следующие выводы (см. главу II, часть I, раздел 1): верхняя граница существования шпинелей в расплаве ограничена 30 кб; магматические шпинели, образовавшиеся при давлениях более 15 кб, должны быть представлены высокоглиноземистыми разновидностями, содержащими более 50 атом. % алюминия (более 48 вес. % Al_2O_3). Кристаллы шпинелей, включенные в кристаллы вкрапленники оливина (см. таблицу 1–меймечит) содержат менее 10 вес. % Al_2O_3 . В перечне возможных причин этого несоответствия можно назвать следующие: изменения составов фаз при остывании в солидусной области и последующие метаморфические преобразования; изначально низкие содержания глинозема в меймечитовых расплавах (ниже на 1–2 % относительно использованных нами для обобщений экспериментальных результатов). Не вносят ясности и результаты экспериментальных исследований сибирских меймечитов Л. Елкинс-Тантоном и др. [178]: в таблице 3 этой работы приводятся составы всех закалочных фаз, но составы шпинели не приводятся, тогда как на рис. 9 этой же работы шпинели присутствуют среди закалочных фаз до 55 кб. Пока ясности в причинах этого несоответствия нет.

8. Исходя из составов включений шпинели во вкрапленники оливина, опираясь на наши результаты, можно полагать, что образование включений и минерала-хозяина происходило на глубинах менее 40 км, подъем магмы происходил быстро, расплав был перегрет, и кристаллизация шла в неравновесных по давлению условиях.

9. Два варианта расчетов температуры по составу клинопироксена показали различия в рассчитанных температурах в 2.2 сигмы, что также указывает на возможное участие метаморфических преобразований составов кристаллов клинопироксена, хотя видимых вторичных фаз, развивающихся по клинопироксену (судя по литературным источникам), нет.

10. В целом можно предположить, что метаморфические преобразования – серпентинизация, хлоритизация слагающих породу фаз предварялась диффузионными процессами, разбалансировавшими составы всех фаз, включая расплавные включения. Это дает основание для допущения некоей открытости системы, как породы в целом, так и слагающих ее фаз, включая и расплавные включения. Количественные масштабы этих изменений можно выявить, используя системы полученных нами уравнений.

Субщелочные меймечиты арктического фрагмента магматической провинции Карру. Находки меймечитов за пределами Маймеча-Котуйской субпровинции, судя по литературным данным, являются единичными. К числу достаточно подробно изученных можно отнести юрские субщелочные меймечиты Vestfjella в арктическом фрагменте магматической провинции Кагоо, представленные дайковыми телами [205]. Используя данные из этой работы, были сформированы парные анализы следующих парагенезисов: первичный расплав–оливин (2 парных анализа; состав первичного расплава заимствован из таблицы 6 для условий 30 и 1 % воды; состав оливина из таблицы 2 – B1b/2/r3/46 и B8a/ol 27); расплав–шпинель–оливин (2 парных анализа; номера составов оливина указаны выше, составы кристаллов шпинели заимствованы из таблицы 3 – B1b/2/r6/32 и B8a/sp 33), расплав–клинопироксен (состав заимствован из таблицы 4 – B1b/2/r6/32, наиболее магниальный из приводимых в таблице). По результатам расчетов были получены следующие данные. Равновесная температура для системы первичный расплав–оливин при давлении 30 кб ~1660–1680 °С; равновесная температура, приводимая авторами – 1677 °С для условий 30 кб; значения равновесной температуры, полученные по составу расплава, лежат в интервале ~1600–1660 °С. Составленные шпинель–оливиновые парагенезисы можно считать неравновесными, так как в 3 из 5 формул расхождения превышают 3 сигмы. Расчеты равновесной температуры по составу клинопироксена с применением формул, использующих разные наборы элементов, входящих в состав кристаллов клинопироксена, дали такие результаты: 1391 °С и 1322 °С (сигма 46 °С). Это, по нашему мнению, указывает изменения состава клинопироксена, но менее существенные, чем в случае сибирских меймечитов.

Несмотря на некоторые отличия между меймечитами Маймеча-Котуйской субпровинции и меймечитов Vestfjella, для тех и других общими являются следующие особенности: неравновесность составов шпинель–оливиновых пар; несоответствие составов шпинелей и предполагаемым барическим условиям роста оливина, их включающего; неравновесность составов клинопироксена, исходя из предположения о его магматическом генезисе; неравновесность рассчитанных первичных расплавов, хотя имеется близость температур, рассчитанных с помощью различных геотермометров.

11.2 Ультрабазиты докембрийских зеленокаменных поясов

Коматииты. Архейские вулканиты. Типическими признаками коматиитов обычно считаются следующие: 1 – это лавовые потоки подушечного или массивного сложения; 2 – как правило, входящие в состав докембрийских зеленокаменных поясов и измененных в диапазоне от зеленых сланцев до эпидот-амфиболитовой фации с различной степенью сохранности структурно-текстурных признаков первичной породы; 3 – зональное строение лавовых тел, включая и отдельные подушки: корка закалки, зона со структурой спинифекс, кумулятивная зона; 4 – высокое содержание окиси магния, более 18 вес.% MgO в пересчете на сухой остаток. К числу типичных признаков коматиитов, вероятно, можно отнести и высокую степень корреляции содержаний H_2O^+ и MgO в породе. Подушечные лавы, сложенные спилитами, имеют ряд структурно-текстурных черт, сходных с коматиитами – зональность подушечных тел, спинифексоподобные структуры, длинные пластинчатые кристаллы пироксена и т. д. Примерами могут служить спилиты Новой Зеландии [9] и Курило-Камчатского региона [64]. Для спилитов достаточно типичной является амигдалоидная структура, тогда, как для лав, слагающих второй слой современной океанической коры, заполнение пор зависит от возраста и степени измененности. Для спилитовых подушечных потоков характерным признаком также является заполнение межшаровых пространств яшмами, обязанными своим происхождением вторичным изменениям подушечных тел с выносом кремнезема и формированием химической зональности подушечных тел [64]. В случае коматиитов замещение стекловатой фазы, а также темноцветных минералов хлоритом и серпентином также должно приводить к выносу кремнезема. В работе Н. Арндта и др. [124] описаны амигдалоиды, выполненные тонкокристаллическим кварцем в перидотитовых коматиитах пояса Абитиби.

Хотя пористость, судя по описаниям коматиитов в Австралии, Африке, Канаде, России (см. список литературы ниже) не характерна, что вероятно связано с низкой вязкостью коматиитовых расплавов. К сожалению, в литературе нам не удалось найти сведений о существовании межшаровых пространств в коматиитовых подушечных лавовых потоках и об их заполнителе. Вполне вероятно, что высокие температуры коматиитовых расплавов, на 200–300 °С превышающие температуры базальтовых расплавов, обеспечивают их высокую жидкотекучесть и плотное заполнение пространства без межшаровых пространств, типичных для спилитовых подушечных потоков. Представляется, что является актуальной проблема фиксации кремнезема, выносимого из коматиитов, как породы, в процессе метаморфических преобразований, а также постоянство или изменение изотопного состава кремния и кислорода в этом процессе.

Для исследований особенностей становления коматиитов как породы с помощью полученных нами формул были использованы опубликованные данные по архейским вулканитам зеленокаменного пояса Abitibi (Канада) [124; 131; 133]; зеленокаменного пояса Swayze (Канада) [156]; зеленокаменного пояса Barberton (Африка) [265]; коматиитовые базальты Ветрового пояса, Балтийского щита (Россия) [70]. По коматиитам Ветрового пояса опубликовано достаточно много данных, но составы фаз приводятся в публикациях фрагментарно. Поэтому наиболее подходящей для наших целей оказалась работа по коматиитовым базальтам И.С.Пухтеля и др. [70]. Выборочные составы фаз, использованные для расчетов, представлены в таблице 1–коматиит.

Таблица. 1–коматиит. Выборочные составы фаз, слагающих архейские коматииты.

Источник	№ п/п	Порода/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
I	1	ol	40.96					8.47	0.1	48.87	0.19		
	2	срх	51.18	0.22	3.51	0.77		9.27	0.22	20.92	13		
	3	стекло	48.55	0.48	9.61			13.41	0.21	21.22	9.27	0.03	0.05
	4	стекло	46.82	0.62	11.18			12.1	0.14	11.92	16.88	0.13	0.05
II	5	sp		0.29	15.09	49.8		23.92		11.12			
	6	ol	39.2		0.52			14.38	0.19	46.02	0.17		
	7	срх	50.62	0.28	3.11	0.67		5.92	0.26	18.14	19.63		
	8	стекло	46.59	0.4	8.37			10.5	0.2	24.87	8.75		
III	9	sp		0.41	11.18	54.9		21.18	0.4	10.79			
	10	ol	41.4	0.04	0.08	0.24		9.02	0.13	49.41	0.31		
	11	срх	52.2	0.44	3.25	0.33		5.21	0.16	17.98	19.68	0.16	
IV	12	ol	41		0.09	0.1		6.3	0.14	51.5	0.19		
	13	срх	53.8	0.26	1.81	0.84		6.52	0.16	17.7	20.1	0.24	
V	14	sp		0.26– 0.69	14– 13.8	56.2– 39.5	3.28 –14	12.5– 28.3	0.24– 0.96	14.3– 3.76			
	15	ol	40.8– 41.2					6.1– 13.8		51.5– 44.1			
	16	срх	51.6– 47.9	0.35– 0.96	3.1– 7.8			9.48– 8.3		17.2– 12.4	17.2– 21.6	0.13– 0.17	
VI	17	sp		0.45– 0.52	13.7– 15	47.4– 43.7		32.7– 36.2		3– 0.54			
	18	ol	40.28– 39.63					10.67 –16		48.1– 42.5	0.3– 0.3		
	19	срх	52.8– 50.6	0.4– 0.6	1.7– 6.7	0.25– 0.62		8.9– 7.7		21.5– 14	13.3– 19.23		
	20	стекло	53.16	0.9	18	0.02		9.6	0.2	4.96	8.72	4.03	0.2
	21	расплав	50.3	0.6	11.1			12.1	0.2	14.6	9	1.63	0.4

Примечание. I – С.-Дж. Барнес и др. [133]: 1 – оливин из зоны оливинового спинифекса (таблица 2); 2 – клинопироксен из зоны оливинового спинифекса (таблица 2); 3 – модельный состав зоны А3 оливинового спинифекса (таблица 5); 4 – модельный состав зоны пироксенового спинифекса (таблица 5). II – С.-Дж. Барнес и др. [133]: 5, 6, 7 – составы шпинели, оливина, клинопироксена из обр. Ах-58 (таблица 1), 8 – средний состав закаленной зоны (А1, таблица 3). III – А. Каттел, Н. Арндт [156]: 9, 10, 11 – составы шпинели, оливина, клинопироксена из кумулятивной зоны. IV – С. Парман и др. [265]: 12, 13 – составы оливина и клинопироксена. V – Н. Арндт и др. [124]: диапазоны составов шпинели, оливина и клинопироксена в лавовых потоках пояса Абитиби; VI – И.С.Пухтеля и др. [70]: 17,18,19 – диапазоны составов шпинели, оливина, клинопироксена в коматиитовых базальтах; 20 – состав внутри скелетного оливина; 21 – состав излившегося расплава.

Используя аналитические данные по составам фаз, опубликованные в вышеперечисленных работах, были сформированы и исследованы следующие парагенезисы: расплав–оливин, расплав–шпинель–оливин, расплав–оливин–клинопироксен, а также равновесность составов шпинели и клинопироксена.

Система расплав-оливин. Было сформировано 5 парных анализов: С.-Дж. Барнес и др. [133]: пара 1 – модельный состав зоны А3 и оливин из зоны оливинового спинифекса; И.С.Пухтеля и др. [70]: пара 2 – предполагаемый первичный расплав (см. таблицу 1–коматиит, анализ 21) и наиболее магнезиальный оливин; пара 3 – состав основной массы и оливин промежуточного состава; пара 4 – «стекло» (91105) из полости внутри скелетного кристалла и скелетный кристалл (91105 – наименее магнезиальный из кристаллов под этим номером); Н. Арндт и др. [124]: пара 5 – девитрифицированное стекло из кумулятивной зоны с наибольшим содержанием щелочей (предположительно наименее измененное, т. к. рядом авторов предполагается активный вынос щелочей из коматиитов) и оливин из кумулятивной зоны. Эти сформированные пары равновесны предположительно, поэтому полученные расчетные значения скорее можно отнести к разряду оценочных, но как первые подобные результаты они приемлемы. С использованием составов расплава и оливина по 6 формулам были рассчитаны значения температуры (для условий атмосферного давления). В этих формулах использовались различные наборы элементов, входящих в состав расплава и оливина. Полученные значения температур представлены в таблице 2–коматиит.

Таблица. 2–коматиит. Расчетные значения температуры.

Формула	Сигма	Пара 1	Пара 2	Пара 3	Пара 4	Пара 5
PGOLTa	23 °С	1390 °С	1305 °С	1202 °С	1150 °С	1308 °С
PGOLTb	21 °С	1426 °С	1324 °С	1207 °С	1144 °С	1340 °С
PGOLTc	21 °С	1427 °С	1324 °С	1205 °С	1145 °С	1336 °С
PGOLTd	24 °С	1439 °С	1348 °С	1271 °С	1204 °С	1364 °С
PGOLTe	21 °С	1466 °С	1369 °С	1293 °С	1217 °С	1406 °С
PGOLTf	21 °С	1466 °С	1365 °С	1286 °С	1208 °С	1399 °С

Для полученных значений температур можно выделить несколько особенностей: 1. расхождения вычисленных значений температуры по разным формулам для каждой пары лежат в пределах 2–3 сигм, что указывает на реальность равновесности сформированных пар 2. для изливающихся расплавов характерны высокие значения температур, превышающие на 200–300 °С температуры базальтовых расплавов, излившихся в голоцене. Например: температура базальтовых лав БТТИ на излиянии была 1060–1070 °С [83]; 3. в формулах PGOLTd – PGOLTf учитывается содержание железа в двухвалентной форме, а при расчетах использовалось все железо без выделения трехвалентной формы, что приводит к завышению рассчитанных значений температуры. Это завышение менее значительное, чем в случае меймечитов (см. выше), что позволяет предположить более низкую степень окисленности железа в коматиитовых расплавах, на что указывает и их более низкая щелочность.

Сформированные пары были использованы для расчетов содержаний магния и кальция в расплаве. Для расчетов содержаний магния в расплаве по парагенезису расплав–оливин в ус-

ловиях атмосферного давления было использовано две формулы, в одной из которых кроме прочих величин учитывается влияние температуры (GLOL7a), в другой (GLOL7b) – содержание двухвалентного железа в расплаве. Для расчетов по первой формуле были использованы рассчитанные значения температуры, представленные в таблице 2–коматиит. Результаты в виде разности рассчитанного содержания магния и реального содержания представлены в таблице 3–коматиит.

Таблица. 3–коматиит. Разности рассчитанных и реальных содержаний магния в расплаве.

Формула	Пара 1	Пара 2	Пара 3	Пара 4	Пара 5
PGOLTa	-5.68	-1.93	-0.72	-0.63	-7.2
PGOLTb	-5.02	-1.59	-0.64	-0.74	-6.6
PGOLTc	-5	-1.57	-0.68	-0.72	-6.67
PGOLTd	-4.79	-1.17	0.44	0.22	-6.15
PGOLTe	-4.3	-0.8	0.81	0.44	-5.36
PGOLTf	-4.3	-0.87	0.68	0.3	-5.49

Примечание. Значения сигмы для формулы (GLOL7a) равно 1.6 атом. %.

Результаты этих расчетов позволяют сделать следующие выводы: 1. расчетные содержания магния в расплаве, равновесном с оливином, меньше реальных на величину ~3 сигмы и больше, чем в коматиитах зеленокаменного пояса Abitibi (первая и пятая пары), расхождение реальных и расчетных содержаний лежит в области 1 сигмы для коматиитов Ветрового пояса; 2. этот результат позволяет предположить завышенное содержание магния в коматиитах зеленокаменного пояса Abitibi и близкое к расплавному содержание магния в породе, представленной коматиитовым базальтом Ветрового пояса.

Расчеты по формуле (GLOL7b) дали следующие результаты: 1 – 1.16; 2 – 2.95; 3 – 5.72; 4 – 4.53; 5 – 2.86 (первая цифра номер пары, вторая разница расчетного и реального содержания магния). Величина сигмы для этой формулы 1 атом. %. Расчеты по этой формуле демонстрируют, наоборот, завышение расчетных содержаний магния, причем для коматиитов пояса Abitibi разница близка к величине сигмы, тогда как для коматиитовых базальтов Ветрового пояса разница превышает 3 сигмы. Это указывает на слабую степень окисленности коматиитовых расплавов и более высокую степень окисленности расплавов коматиитовых базальтов.

Результаты расчетов содержания кальция в расплаве, равновесном с оливином, по формуле (GLOL8), учитывающей величину температуры, представлены в таблице 4–коматиит.

Таблица. 4–коматиит. Разности реальных и расчетных содержаний кальция в расплаве.

Формула	Пара 1	Пара 2	Пара 3	Пара 4	Пара 5
PGOLTa	1.83	1.98	0.37	-0.75	-0.77
PGOLTb	1.48	1.79	0.32	-0.68	-1.08
PGOLTc	1.47	1.79	0.34	-0.7	-1.05
PGOLTd	1.36	1.56	-0.3	-1.26	-1.32
PGOLTe	1.1	1.37	-0.51	-1.39	-1.72
PGOLTf	1.1	1.4	-0.43	-1.3	-1.66

Все рассчитанные значения отличаются от реальных содержаний кальция в породе на величину не более 2 сигм (сигма 1.26). Вероятно, можно предположить, что в исследованных коматиитах за период с докембрийского времени и поныне кардинальных изменений в содержании кальция, первоначально в расплаве, равновесном с оливином, а затем и в породе, претерпевшей метаморфические преобразования, не произошло.

Для наглядной демонстрации правдоподобия приводимых в таблице 2–коматиит расчетных величин температуры, содержаний магния и кальция в расплаве, ниже представлены аналогичные результаты расчетов с использованием этих же формул для экспериментальных данных по исследованиям фазовых равновесий при кристаллизации коматиитовых расплавов в условиях атмосферного давления. Для экспериментов были использованы образцы пород из зеленокаменного пояса Barberton (Африка) С. Парман и др. [265]. Результаты этих экспериментальных исследований входят в число данных, включенных в базу «ИНФОРЕКС» и, соответственно, в число данных, формирующих выборочные массивы, по которым велись расчеты, поэтому не являются совершенно независимыми. В качестве примеров были выбраны 2 экспериментальные точки (таблица 4) С. Парман и др. [265] со следующими характеристиками: ВК1 – парагенезис расплав–оливин, температура 1420 °С; ВК10 – парагенезис расплав–оливин–клинопироксен, температура 1275 °С, оба эксперимента проводились в «сухих» условиях при атмосферном давлении.

Таблица. 5–коматиит. Разности реальных и расчетных значений температуры.

	PGOLTa	PGOLTb	PGOLTc	PGOLTd	PGOLTe	PGOLTf
ВК1	26 °С	-1 °С	-7 °С	12 °С	1 °С	1 °С
ВК10	-19 °С	-12 °С	-21 °С	39 °С	24 °С	23 °С
Сигма	23 °С	21 °С	20 °С	24 °С	21 °С	21 °С

Результаты, представленные в таблице 5–коматиит, демонстрируют хорошую сходимость измеренной и расчетной температур, расхождения между которыми укладываются в рамки 1 сигмы, за исключением одной точки. Эти результаты позволяют полагать, что рассчитанные значения температур равновесия расплав–оливин, приводимые в таблице 2–коматиит близки к реальным.

Расчеты содержания магния в расплаве по формуле (GLOL7a), учитывающей влияние температуры в виде разности расчетных и реальных значений, представлены в таблице 6–коматиит.

Таблица. 6–коматиит. Разности расчетных (по формуле GLOL7a) и реальных содержаний магния в экспериментальном расплаве.

	PGOLTa	PGOLTb	PGOLTc	PGOLTd	PGOLTe	PGOLTf
ВК1	-1.81	-1.33	-1.21	-1.55	-1.36	1.35
ВК10	2.3	2.19	2.35	2.67	2.39	2.39
Сигма	1.6					

Расчеты содержания магния по формуле (GLOL7b), не учитывающей влияние температуры, дают следующие расхождения: ВК1 – -0.07; ВК10 – 1.82; сигма – 1 (атом. количества в %). В целом эти результаты позволяют полагать, что рассчитанные содержания магния для 5 парных парагенезисов в коматиитах и коматиитовых базальтах (см. таблицу 3–коматиит) и результаты расчетов по формуле GLOL7b) и выводы по ним можно считать правдоподобными.

Расчеты содержания кальция в экспериментальных парах по формуле (GLOL8) представлены в таблице 7–коматиит.

Таблица. 7–коматиит. Разности расчетных и реальных содержаний кальция в экспериментальных расплавах.

	PGOLTa	PGOLTb	PGOLTc	PGOLTd	PGOLTe	PGOLTf
ВК1	3.27	3.01	2.95	3.13	3.03	3.03
ВК10	-1.05	-0.99	-1.07	-1.25	-1.1	-1.1
сигма	1.26					

Полученные расхождения между расчетными и реальными содержаниями кальция в целом несколько хуже аналогичных расчетов для магния – есть систематичность в ошибках и для эксперимента ВК1, расхождение лежит в интервале 2–3 сигмы, хотя характер этих погрешностей, может быть, и не связан с несовершенством этой формулы. Однако пока нет лучшего уравнения и расчеты по имеющемуся уравнению по своим характеристикам позволяют его использование.

Система расплав–шпинель–оливин. Используя данные из работ С.-Дж. Барнеса [131];

А. Каттел, Н. Арндт [156]; Н. Арндт и др. [124]; И.С. Пухтель и др. [70] было сформировано 10 вариантов возможных парагенезисов шпинель–оливин, равновесных между собой и с расплавом. Проверка на равновесность с помощью 3 формул (**SPOLRa**, **SPOLRb**, **SPOLRc**, для условий атмосферного давления) этих парагенезисов показала следующее: 1. равновесными парагенезисами в рамках 2 сигм можно считать сочетания наиболее магнезиальных шпинелей с содержаниями MgO 11–14 вес. % и наименее магнезиальные оливины с содержаниями MgO 44–46 вес. %; примерами могут служить оливин–шпинелевые парагенезисы из коматиитов зеленокаменного пояса Abitibi; 2. шпинели, содержащие менее 11 вес. % MgO (имеются разности с содержаниями менее 1 % MgO) являются сильно неравновесными (Ветровой пояс); 3. потери магния кристаллами шпинели значительно превосходят потери, обязанные переуравновешиванию в процессе остывания, примером могут служить коматиитовые базальты Ветрового пояса, в которых хромистые шпинели содержат 1–3 вес. % MgO; 4. наиболее вероятной причиной низких содержаний MgO можно назвать метаморфические преобразования, приводящие к изменению составов кристаллов шпинели. Шпинели с низкими содержаниями MgO (от 10 % до 1 %) достаточно типичны для коматиитов. Например, в работе С.-Дж. Барнеса [131] приводятся 76 анализов хромитов коматиитов из блока Vilgarn (Западная Австралия), срезы которых 38 приводимых анализов содержания MgO попадают в этот интервал. Составы кристаллов шпинели с такими содержаниями магния, исходя из формул для оценки равновесности составов парагенезиса шпинель–оливин, имеют явное метаморфическое происхождение.

Используя формулы (**SPOL7**) и (**SPOLTa**), позволяющие только по составам оливина и шпинели вычислить содержания магния в расплаве, равновесном с данным парагенезисом, и температуру его кристаллизации, были получены следующие величины для коматиитовых расплавов зеленокаменного пояса Abitibi: содержания MgO в расплаве ~10 и 16.5 вес. %; температуры равновесной кристаллизации – 1237 °С и 1280 °С.

Система расплав–оливин–клинопироксен. По данным из работ С.-Дж. Барнеса [131];

А. Каттел, Н. Арндт [156]; Н. Арндт и др. [124]; И.С. Пухтель и др. [70] были сформированы 11 парных анализов. Эти минеральные пары были первоначально проверены на равновесность с помощью формул (**OLAVRb**, **OLAVRd**). Выявлено 5 парных анализов, в которых расхождения составов укладываются в рамки 2 сигм. Ими оказались оливин–клинопироксеновые пары из зеленокаменного пояса Abitibi, зеленокаменного пояса Swayze и Ветрового пояса. Также с помощью формул (**GLAVRa**, **GLAVRc**, **GLAVRg**) были проверены на равновесность собственно составы кристаллов клинопироксена, которые также можно считать равновесными в рамках 2 сигм в 5 парах, выявленных ранее. Исключение составляет

авгит из коматиитовых базальтов Ветрового пояса, в котором неравновесность расширяется до 3 сигм при учете содержания кальция в нем.

Для расчетов содержаний магния, кальция и величины температуры были использованы 3 оливин–клинопироксеновые пары из коматиитовых базальтов Ветрового пояса. Содержания магния в расплаве, равновесном с оливин–клинопироксеновым парагенезисом, рассчитывались по 2 формулам: **OLAV7a** и **OLAV7b**. В первой из них учитывается содержание кальция в расплаве, во второй – содержание щелочей в расплаве. В таблице 8–коматиит представлены результаты расчетов содержания магния по формуле **OLAV7a** для содержаний CaO от 7 до 9 вес % в расплаве.

Таблица. 8–коматиит. Расчетные содержания магния в расплаве по формуле **OLAV7a**.

Содержание Са в атом. %	Пара 1. Расчетное содержание Mg в атом. % в расплаве	Пара 2. Расчетное содержание Mg в атом. % в расплаве	Пара 3. Расчетное содержание Mg в атом. % в расплаве
7.2	12.42	7.52	6.54
8.7	13.4	8.1	7
9	13.6	8.2	7.14
Содержание магния в атом.% в предполагаемом расплаве	19.9	11.1	6.85

Примечание. Пара 1 – наиболее магнезиальные разности; пара 2 – умеренно магнезиальные разности; пара 3 – наименее магнезиальные разности. Содержания магния в атом. %: 1 – в предполагаемом первичном расплаве, таблица 5, анализ 91110 [70]; 2 – в расплаве, соответствующем составу наиболее магнезиальной основной массы, таблица 4, анализ 91105 (1) [70]; 3 – расплав (стекло) в полости скелетного кристалла оливина, таблица 4, анализ 91105 (2) [70].

В таблице 9–коматиит представлены результаты расчетов содержания магния по формуле **OLAV7b**, включающей в себя сумму щелочей в расплаве. Были рассчитаны 3 варианта с разными содержаниями щелочей в расплаве из анализов, указанных под номерами 1, 2, 3 в примечании к таблице 8–коматиит.

Таблица. 9–коматиит. Расчетные содержания магния в расплаве по формуле **OLAV7b**.

Содержание щелочей в расплаве в атом. %	Пара 1. Расчетное содержание Mg в атом. % в расплаве	Пара 2. Расчетное содержание Mg в атом. % в расплаве	Пара 3. Расчетное содержание Mg в атом. % в расплаве
3.4	15.23	9.5	8.3
6.4	13.2	8.2	7.14
7.5	12.6	7.9	7
Содержание магния в атом.% в предполагаемом расплаве	19.9	11.1	6.85

Величина среднеквадратичной ошибки (сигма) для обеих формул лежит в окрестностях единицы. Обе формулы включают в себя содержания магния в оливине и авгите, и содержание кремния в авгите. Различаются тем, что в первой учитывается содержание кальция в расплаве, а во второй сумма щелочей в расплаве и содержание кальция в оливине. Расчет по наиболее магнезиальной паре отличается от содержания магния в расплаве на 4–6 сигм. К числу вероятных причин такого расхождения можно отнести метаморфические преобразования как породы в целом, так и минералов: 1. обогащение магнием стекловатой матрицы за

счет выноса из нее ряда элементов путем новообразования серпентина, хлорита и смектитов по стеклу; 2. латентное изменение состава клинопироксена за счет процессов диффузии без образования вторичных фаз по пироксену (на возможность диффузионных преобразований авгита указывает и увеличение неравновесности оливин-авгитовых пар до 3 сигм при учете содержания кальция в клинопироксене, что отмечалось выше); 3. латентное преобразование оливина; 4. эти преобразования, вероятно, носят мозаичный характер, на что указывает разница в расхождениях расчетных и реальных содержаний магния в 3 парах. Однако латентные изменения оливина и авгита не выходят за рамки чувствительности уравнений для суждений о равновесности этих минералов, поэтому, вероятно, идут оба процесса: замещение вторичными минералами матрицы (стекла) и диффузионные преобразования породообразующих минералов.

Содержания кальция по оливин–авгитовому парагенезису рассчитывалось по 2 формулам. В формуле **OLAV8a** используются только содержания элементов в оливине и авгите, но невысокое значение коэффициента корреляции (0.85) для этой формулы позволяет рассматривать эти значения только как оценочные. В формуле **OLAV8b** кроме элементов, входящих в состав оливина и авгита, учитываются и содержания магния и суммы щелочей в расплаве. Были использованы различные варианты расчетов по содержаниям в расплаве магния и суммы щелочей и во всех случаях расчетные значения превышают на величину 2–3 и более сигм (сигма ~1 атом. %) реальные содержания кальция в породе (предполагаемом расплаве). Превышения расчетных содержаний кальция над реальными позволяют предположить, что в результате метаморфических преобразований кальций был частично вынесен из породы.

Величина температуры рассчитывалась по 3 формулам. В формуле **OLAVTa** используются только содержания элементов, входящих в этот минеральный парагенезис, и полученные расчетные значения носят оценочный характер из-за невысокого коэффициента корреляции (0.82). В формуле **OLAVTb** дополнительно учитывается содержания кальция в расплаве; в формулу **OLAVTc**, кроме содержания кальция в расплаве, входят содержания титана и алюминия в расплаве. Были выполнены расчеты с различными вариантами содержаний титана, алюминия и кальция в расплаве. Рассчитанные значения температур по всем трем формулам лежат в окрестностях 1200 °С для первой, 1170 °С для второй, и 1160 °С для третьей пары оливин–авгит. Это также указывает на высокую вероятность латентного изменения состава авгита.

Для убеждения читателя в правдоподобии расчетов содержаний магния, кальция в расплаве и величины температуры по составу минералов оливин–авгитового парагенезиса ниже показаны результаты расчетов по экспериментальным данным С. Парман и др. [265], упомянутые выше (см. раздел Система расплав–оливин). Были использованы составы оливин–авгитового парагенезиса и равновесного с ними расплава из экспериментальной точки ВК10 – парагенезис расплав–оливин–клинопироксен, температура 1275 °С, «сухие» условия при атмосферном давлении. Проверка показала, что отличие составов минералов от равновесных по двум формулам составляет менее 1 сигмы. Расчетные содержания магния в расплаве по формулам **OLAV7a** и **OLAV7b**: 18.77 атом. % (сигма 1.1 атом. %); 16.6 атом. % (сигма 1 атом. %); реальное содержание 18.5 атом. %.

Расчетные содержания кальция по формулам **OLAV8a** и **OLAV8b**: 13.51 атом. % (сигма 1.7 атом. %); 17.8 атом. % (сигма 1 атом. %); реальное содержание 16.58 атом. %. Расчеты величины температуры по 2 формулам — **OLAVTa** (расчет оценочных значений из-за R 0.82) и **OLAVTc** — дали следующие результаты: 1211 °С (сигма 23 °С); 1237 °С (сигма 17 °С); измеренное значение температуры в эксперименте – 1275 °С. Результаты тестирования экспериментальных результатов говорят о том, что составы пироксенов в коматиитах могли претерпеть латентное изменение.

Выводы

В целом по результатам исследования фазовых соотношений в **коматиитах** можно сделать следующие выводы.

1. Во многих случаях составы ряда фаз (шпинели, клинопироксена) не соответствуют первоначальным составам для случая расплавного генезиса.

2. Состав стекол основной массы также изменен.

3. Имеются как отдельные случаи потери кальция кристаллами оливина Н. Арндт и др. [124], так и практически тотальный вынос кальция из всех кристаллов оливина [210]. Более того, наряду с полной потерей кальция магматическим оливином описаны примеры новообразования метаморфического безкальциевого оливина в позднеархейских коматиитах на северо-западе Кольского региона [86].

4. Имеются существенные расхождения между расчетными содержаниями магния в первичном расплаве и реальными содержаниями магния в породе. Эти результаты позволяют полагать, что оценки содержаний MgO в первичных архейских коматиитовых расплавах являются завышенными из-за несоответствия состава породы составу первичного расплава. О реальности увеличения содержания магния в измененном базальтовом стекле свидетельствуют данные исследований гиалокластитов и раскристаллизованных базальтов на современном активном гидротермальном поле Sea Cliff в районе хребта Корда [317]. При магнезиальном метасоматозе происходит замещение хлорит-смектитовым агрегатом гиалокластитов раскристаллизованных базальтов. Под действием флюида, смешанного с морской водой, происходит почти двукратное увеличение содержания магния относительно первоначально в породе, и подвижными становятся практически все элементы, включая титан и алюминий.

5. Используемые нами для расчетов парагенезисы были в ряде случаев предположительными. Для составления отчетливых парагенезисов нужны дальнейшие исследования коматиитов с целью поисков фаз с ясными структурно-текстурными взаимоотношениями в породе, что позволит однозначно рассчитать составы расплавов.

6. Находки сростаний минеральных фаз и включений в них возможны в кумулятивной зоне, где присутствуют хорошо ограненные кристаллы, в отличие от зон со структурой спинифекс.

Меловые коматииты о. Горгона. Данные по структурно-текстурным особенностям этих пород и условиям их становления были заимствованы работ Л. Ечевери [176]; В. Дитрича и др. [171]; Б. Эйткина, Л. Ечевери [120]; А. Керра и др. [227]; К. Шимизу и др. [291]; В. Каме-нецкого и др. [224]. Коматииты о. Горгона (Колумбия) являются пока единственной находкой ультраосновных эффузивов-коматиитов, образовавшихся в послекембрийское время, возраст которых ~90 млн. лет. Имеется несколько публикаций [194; 202] по пермотриасовым коматиитам Вьетнама, но, по приводимым данным, эти породы не обладают главным признаком коматиитов – структурой спинифекс. Типичные коматииты обладают структурой спинифекс с кристаллами оливина, которые достигают десятки сантиметров в длину и практически не затронуты вторичными изменениями, чем выгодно отличаются от архейских коматиитов с точки зрения реконструкции их становления от расплава до современного облика породы. Используя указанные литературные источники, были оценены равновесия минеральных фаз и минеральных ассоциаций и сформированы парагенезисы: расплав–шпинель–оливин; расплав–шпинель; расплав–оливин; расплав–оливин–клинопироксен. В качестве составов первичных расплавов были использованы наиболее магнезиальные валовые составы пород, приводимые в перечисленных работах. Составы использованных фаз представлены в таблице 10–коматиит.

Система расплав–шпинель–оливин. Из работ Л. Ечевери [176] и В. Дитрича и др. [171] было сформировано 8 парных анализов из самых магнезиальных магнезиохромитов в соче-

таниях с оливинами различной магнезиальности. Проверка равновесности составов этих минералов с помощью формул (**SPOLRa**, **SPOLRb**, **SPOLRc**) показала, что равновесными являются наиболее магнезиальные разности обеих минеральных фаз (расхождения лежат в рамках сигмы: **SPOLRa** – сигма 1.56; **SPOLRb** – сигма 1.14; **SPOLRc** – сигма 0.17).

Таблица. 10–коматиит. Выборочные составы фаз, слагающих коматииты острова Горгона.

Источник	№ п/п	Порода/ минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
I	1	sp		0.32	21.6	43.2	6.22	8.39	0.34	17.6			
	2	ol	41		0.12	0.12		10.4	0.18	49.1	0.34		
	3	ol	39.6			0.04		16	0.25	45.2	0.21		
	4	срх	47.1	0.74	9.45	0.55		11	0.27	14.9	15.9	0.23	
	5	срх	51.7	0.84	2.79			5	0.13	16.6	21.5	0.28	
	6	порода	46.5	0.67	12.3			11.3	0.38	17.1	10.5	1.33	0.02
II	7	sp		0.41	20.28	46.41	6.06	9.62	0.29	16.67			
	8	ol	40.6			0.12		10	0.16	48.6	0.33		
	9	ol	39.5					14.6	0.18	44.4	0.18		
	10	срх	53.2	0.26	2.6	0.32		7.3	0.23	17.7	19.1	0.16	
	11	срх	49.4	0.98	3.8			14.7	0.31	12.8	18.9	0.16	
	12	порода	44.2	0.66	12		3.2	8.2	0.18	15.9	10.1	1.13	0.02
III	13	ol	41.6					9		49.5	0.25		
	14	срх	49.6	0.67	4.7	0.47		8.5	0.14	14.6	20.2		
	15	порода	45.7	0.44	9.8	0.14		11.1		23.9	8.4	0.6	0.01
IV	16	расплавное включение	46.6	0.39	11.2	1.1		9	0.18	20	10.2	1.27	0.02

Примечание. Составы фаз и пород, представленные в таблице, заимствованы из работ: I – Л. Ечевери [176]; II – В. Дитрич и др. [171]; III – Б. Эйткин, Л. Ечевери [120]; IV – К. Шимизу и др. [291]. Анализы фаз, позволяющих формировать минеральные парагенезисы, использованные для расчетов, подобраны с учетом авторской нумерации в таблицах.

По этим равновесным составам с помощью формулы (**SPOL7**), в которой учитываются только элементы, входящие в составы шпинели и оливина, были рассчитаны содержания магния в расплаве, равновесном с данными фазами. Были получены следующие результаты: по данным из работы В. Дитрича и др. [171] – 18.5 атом. %. Самое высокое содержание магния в расплаве, приводимое в этой работе – 22.5 атом. % (сигма 2.2 атом. %). По данным из работы Л. Ечевери [176] – 19 атом. %. Самое высокое содержание магния в расплаве, приводимое в этой работе – 23.1 атом. % (сигма 2.2 атом. %). Расхождения реальных и расчетных содержаний магния в расплаве лежат в рамках двух сигм, расчетные в обоих случаях меньше реальных. Для выяснения реальных причин этих расхождений необходимо решать ряд систем уравнений.

С помощью 3 формул: **SPOLTa** (сигма 28 °С), учитывающей только составы минеральных фаз, **SPOL Tb** (сигма 23 °С), учитывающей кроме составов минеральных фаз содержание магния в равновесном расплаве и **SPOL Tc** (сигма 24 °С), учитывающей составы минеральных фаз, а также содержания алюминия и магния в равновесном расплаве, были рассчитаны величины значений равновесной температуры, представленные в таблице 11–коматиит. Хотя расхождения между рассчитанными значениями лежат в пределах среднеквадратичной ошибки, наиболее близкими к реальным можно считать значения, рассчитанные по формуле **SPOL Tc**, учитывающей наибольшее число компонентов как в минеральных фазах, так и в расплаве, полагая, что содержания компонентов в расплаве (стекле или валовом составе породы) не претерпели существенных изменений. Расхождения между рассчитанными температурами по данным из работ В. Дитрича и др. [171] и Л. Ечевери [176]

составляют ~30 °С. Наиболее вероятной причиной расхождения является присутствие 4 вес. % воды в анализе из работы В. Дитрича и др. [171].

Таблица. 11–коматиит. Расчетные значения равновесной температуры.

Источники	Формула	SPOLTa	SPOLTb	SPOLTc
В. Дитрич и др. [171]		1297 °С	1317 °С	1318 °С
Л. Ечевери [176]		1325 °С	1340 °С	1341 °С
Сигма		28 °С	23 °С	24 °С

В работе В.С. Каменецкого и др. [224] приводится величина ликвидусной температуры 1390 °С для «сухих» коматиитовых расплавов о. Горгона. Реальная же температура, по оценкам авторов этой работы, составляет 1330–1340 К. Шимизу и др. [291] благодаря присутствию в расплаве 0.2–1 вес. % H₂O.

С использованием составов шпинели и оливина, а также содержания в расплаве титана, алюминия и суммы щелочей по формуле (**SPOLfa**) (сигма 0.83) были рассчитаны значения фугитивности кислорода: по В. Дитричу и др. [171] – -7.41, что для температуры ~1300 °С (см. таблицу 11–коматиит) соответствует буферу QFM (1300 °С – $f_{O_2} = -7.36$); по Л. Ечевери [176] – -7, для температуры 1350 °С соответствует буферу QFM (1350 °С – $f_{O_2} = -6.9$).

Рассчитать содержания магния в расплаве и численное значение температуры возможно и по фазовому составу системы **расплав–шпинель**. В работе К. Шимизу и др. [279] представлены 54 анализа расплавных включений из кристаллов хромистой шпинели. Для расчетов был использован состав наиболее магнезиального включения с содержанием MgO 20 вес. %. Используя этот состав и составы наиболее магнезиальных разностей шпинели из работ Л. Ечевери [176] и В. Дитрича и др. [171] были рассчитаны содержания магния в расплаве по формуле (**GSP7a**), в которой учитывается содержание алюминия в расплаве, а также по формуле (**GSP7b**), в которой наряду с алюминием учитывается величина равновесной температуры. Полученные значения представлены в таблице 12–коматиит.

Таблица. 12–коматиит. Расчетные значения содержания магния в расплаве.

Источники	Формула	GSP7a	GSP7b
В. Дитрич и др. [171]		22.06	22.8
Л. Ечевери [176]		23.5	24.2
Сигма		1.7	1.4

Примечание. Содержания магния и значения среднеквадратичной ошибки (сигма) представлены в виде атомных процентов.

Полученные содержания магния близки максимальным содержаниям в породах – 22.5 [171] и 23.1 [176], но отличаются от максимального содержания MgO, равного 26.61 атом. % (что соответствует 20 вес. % в расплавном включении [291]), на величину менее двух сигм для расчетов по формуле **GSP7b**, позволяющей получать более точные результаты. Возможным вариантом объяснения отличий расчетных значений от реального в сторону уменьшения может быть диффузионный перенос магния из кристалла шпинели во включение (см. раздел Особенности составов фаз природного шпинель–оливинового парагенезиса).

При расчете температуры по формуле (**GSPTb**) (в которой кроме состава шпинели учитываются содержания кремния, магния, кальция и щелочей в расплаве) для данных из обеих работ [171; 176] получена величина ~1375 ± 37 °С.

Расчет содержания магния в расплаве и величины равновесной температуры по парагенезису **расплав–оливин**. В одной из формул (**GLOL7b**), позволяющей рассчитать содержание магния в расплаве по составам расплава и равновесного оливина, используется содержание

двухвалентного железа в расплаве. Для этого с использованием состава равновесной шпинели, данных по составу расплава и величине температуры было рассчитано содержание в расплаве трехвалентного железа. Затем по этой величине были рассчитаны значения фугитивности кислорода по формуле (**GSPfb**). По данным, использованным из работы В. Дитрича и др. [171] величина фугитивности кислорода равна -7.1, а рассчитанное значение трехвалентного железа (0.8 атом. %) значительно меньше приводимого в таблице 5 этой же работы (2.54 атом. %, что соответствует 3.2 вес. % FeO). Это, по нашему мнению, указывает на более высокую степень окисленности железа в породе относительно расплава. По данным из работы Л. Ечевери [176], где все железо в породе приводится в двухвалентной форме, значение фугитивности кислорода равно -6.5. Рассчитанные значения фугитивности по системе расплав–шпинель в пределах среднеквадратичной ошибки совпали со значениями, полученными по парагенезису расплав–шпинель–оливин (см. выше по тексту) и соответствуют численным значениям величины фугитивности кислорода для буфера QFM при соответствующих значениях температуры. Для расчета содержания магния в расплаве были использованы 2 формулы (**GLOL7a**, **GLOL7b**), величина среднеквадратичной ошибки для которых соответственно 1.6 и 1 атом. %. Рассчитанные по формуле (**GLOL7a**) содержания магния при разных значениях температуры представлены в таблице 13–коматиит.

Таблица. 13–коматиит. Содержания магния в расплаве, рассчитанные по формуле (**GLOL7a**).

Т	Источник	В. Дитрич и др. [171]	Л. Ечевери [176]
	1300 °С		17.4
1320 °С		17.7	18.2
1350 °С		18.1	18.6
1390 °С		19	19.5

Примечание. Содержания магния представлены в виде атомных процентов. Максимальное содержание магния в породе из работы В. Дитрича и др. [171] – 22.52; из работы Л. Ечевери [176] – 23.1.

Рассчитанные значения отличаются от максимальных значений содержания магния в породе на величину 2-3 сигмы. Расчеты по формуле (**GLOL7b**) дали следующие значения содержания магния в расплаве по В. Дитричу и др. [171] – 19.7 атом. %; по Л. Ечевери [176] – 23.2 атом. %. Полученные значения ближе к максимальным содержаниям магния в породе относительно расчетов по формуле (**GLOL7a**).

Расчеты температуры были выполнены с использованием 6 формул (**GLOLTa**, **GLOLTb**, **GLOLTc**, **GLOLTd**, **GLOLTe**, **GLOLTf**), использующих разные наборы элементов из составов оливина и расплава. Полученные значения температуры представлены в таблице 14–коматиит.

Таблица 14–коматиит. Значения температуры, рассчитанные по составам фаз в системе расплав–оливин.

Источники	Формула					
	GLOLTa	GLOLTb	GLOLTc	GLOLTd	GLOLTe	GLOLTf
В. Дитрич и др. [171]	1329 °С	1353 °С	1352 °С	1310 °С	1330 °С	1329 °С
Л. Ечевери [176]	1335 °С	1359 °С	1360 °С	1359 °С	1379 °С	1376 °С
Сигма	23 °С	21 °С	20 °С	24 °С	21 °С	21 °С

Если предположить, что наиболее приближенными к реальным являются значения температур, полученные с учетом максимального числа компонентов расплава, то это должны быть значения, полученные по формулам **GLOLTc**, **GLOLTe**, **GLOLTf**. Правда, необходи-

мым является допущение, что валовый состав породы и расплава идентичен, т. е. состав породы в дальнейшем не изменялся. В опубликованных анализах из работ Л. Ечевери [176] и Б. Эйткина, Л. Ечевери [120] содержания воды в породах не приводятся, в стеклах из коматиитов содержание H_2O^+ может составлять ~2 % [176], содержания воды в расплавных включениях из шпинелей в коматиитах не превышают 1% [291]. Однако согласно данным по валовым составам коматиитов из работы В. Дитрича и др. [171] и А. Керра и др. [227]. в коматиитах о. Горгона содержится от 2 до 3 % H_2O^+ в породе, доходя до 4 %.

Расчет содержания магния и величины температуры по парагенезису **расплав–оливин–авгит**. Были использованы данные из работ Л. Ечевери [176], Б. Эйткина, Л. Ечевери [120] и

В. Дитрича и др. [171]. Из приводимых в этих публикациях составов минеральных фаз было сформировано 6 парных анализов. Предварительно составы клинопироксена были проверены на равновесность с расплавом с помощью 5 формул (**GLAVRa, GLAVRb, GLAVRc, GLAVRe, GLAVRg**), показавших, что в пределах 2 сигм все отобранные составы равновесны с расплавом. Затем выбранные составы оливинов и клинопироксенов были проверены на равновесность с помощью 3 формул (**OLAVRa, OLAVRb, OLAVRd**), позволивших сделать следующие выводы: наиболее магнезиальные разности оливинов, содержащие ~49–50 вес. % MgO в своем составе, неравновесны с наиболее магнезиальными разностями авгита, содержащими до ~17 вес. % MgO. Последние равновесны с оливинами, содержащими 45 вес. % MgO и менее. Равновесной оказалась единственная пара оливин–авгитового парагенезиса [176], представленная мелким кристаллом оливина (содержание MgO 45.2 вес. %), включенным в авгит из перидотитовой зоны коматиитового потока. Содержание MgO в расплаве, равновесном с этим оливин–авгитовым парагенезисом, составляет ~8–9 вес. % MgO. Расчет проводился по формулам (**OLAV7a, OLAV7b**), учитывающим содержания кальция и щелочей в расплаве. Расчет температуры по формуле (**OLAV7c**), учитывающей содержания титана, алюминия и кальция в расплаве, дал значения 1218 ± 17 °C.

Выводы

1. Наиболее магнезиальные разности **шпинель–оливиновых** пар являются равновесными, их можно также считать равновесными с расплавом. Полученные расчетным путем содержания магния в расплаве отличаются от максимальных содержаний магния в породе на величину ~2.2 сигмы в меньшую сторону. Максимальные рассчитанные значения температур составляют ~1340 °C. Окислительно-восстановительные условия кристаллизации шпинель–оливинового парагенезиса соответствуют буферу QFM.

2. Расчетные содержания магния в расплаве по парагенезису **расплав–шпинель** отличаются от его содержания в породе на величину меньше сигмы, и меньше максимального содержания магния в расплавном включении из кристаллов шпинели. Расчетная величина максимальной температуры ~1375 °C.

3. Расчетные содержания магния в расплаве по парагенезису **расплав–оливин** меньше его содержания в породе на величину ~2–3 сигмы. Окислительно-восстановительные условия соответствуют буферу QFM, окисленность железа в породе выше, чем в предполагаемом расплаве. Расчетная величина максимальной температуры ~1379 °C.

4. Несоответствие расчетных и реальных содержаний магния в расплаве и породе, также как и для более древних разностей коматиитов, объяснимы метасоматическими преобразованиями породы. Вероятно, замещение стекла в коматиитах о. Горгона также имело место, как и в случае с фаціальными разностями базальтов, подвергшихся воздействию смешанного с морской водой флюида на современном гидротермальном поле в районе хребта Горда [317].

5. Среди сформированных пар (6 шт.) оливин–авгит равновесной оказалась единственная пара с ясными структурными взаимоотношениями, в которой оливин включен в более крупный кристалл клинопироксена. Наиболее магнезиальные разности авгита равновесны с умеренно магнезиальными кристаллами оливина, содержащими ~45 вес. % MgO.

Литературные данные и полученные нами результаты по меймечитам, докембрийским коматиитам и палеогеновым коматиитам о. Горгона позволяют сделать ряд обобщений и предположений, позволяющих понять некоторые особенности их генезиса:

1. Если расположить исследованные породы в порядке уменьшения их затронутости вторичными преобразованиями, как фациально, так и количественно, то получится следующий ряд: докембрийские коматииты, юрские и пермские меймечиты и палеогеновые коматииты острова Горгона. Для докембрийских коматиитов критерием их измененности служат породы рамы, измененные в диапазоне от фации зеленых сланцев до амфиболитовой. Для меймечитов указаны замещения оливина серпентином и хлоритом. В коматиитах о. Горгона, по литературным данным, новообразования вторичных минералов отсутствуют. В этом ряду синхронно уменьшается такой параметр, как неравновесность различных минеральных и расплав–минеральных парагенезисов. Уменьшается расхождение между расчетным содержанием магния в предполагаемом первичном расплаве и его реальное содержание в породе. В докембрийских коматиитах, по результатам наших расчетов, практически все фазы (шпинель, оливин, авгит, стекло?) изменили состав и стали неравновесными. Для оливина коматиитов докембрия дополнительным критерием может служить вынос кальция из его решетки, который проявлен не повсеместно. Совокупность результатов расчетов и геологических данных (серпентинизация, хлоритизация, смектитизация приводят к обогащению породы магнием и водой, выносу кремния и всех других элементов) позволяет утверждать, что содержание магния во всех 3 типах пород выше, чем в расплавах, породивших эти породы. Для палеогеновых коматиитов это расхождение лежит в пределах нескольких процентов. Хорошим показателем измененности состава породы служат потери при прокаливании. В частности, для докембрийских коматиитов выявлена высокая корреляционная зависимость содержания магния и плюсовой воды [65], что также указывает на то, что содержания магния в коматиите как породе завышены относительно расплавов, из которых они формировались. Для палеогеновых коматиитов о. Горгона существует **несоответствие** между содержаниями воды в расплавных включениях и в породе. Данные по содержаниям воды в расплавных включениях из шпинелей и оливинов коматиитов о. Горгона [224; 291] свидетельствуют, что в расплавах, образовавших эти коматииты, содержания воды не более 1 вес.%. В ранних работах В.И. Коваленко и др. [36] и В.Б. Наумов и др. [54] по изучению содержаний летучих компонентов в магматических расплавах из различных геодинамических обстановок было показано соответствие содержаний летучих в расплавных включениях и закалочных стеклах. Это позволило в дальнейшем объединить большой цикл работ этих авторов в одну выборку [35; 36]. Для случаев таких геодинамических обстановок, как срединно-океанические хребты и океанические острова, предположительно соответствующих условиям формирования коматиитов о. Горгона [171], содержания воды в основных расплавах не должны превышать 1 вес.%. Тогда как в коматиитах о. Горгона (как в породе) содержания связанной воды 2–3 вес. % по данным А. Керра [227] и 3–4 вес. % по данным В. Дитрича и др. [171]. Основная масса коматиитов о. Горгона, судя по описаниям, сложена микролитами оливина, клинопироксена, шпинели и связующей ткани, интерпретируемой как стекло. Если бы это было действительно закалочное стекло, то и в породе содержания воды однозначно были бы менее 1 вес. %, так как значительный объем основной массы составляют пречисленные выше микролиты, не содержащие воду. Это несоответствие в содержаниях воды в породе и предполагаемом расплаве позволяет достаточно уверенно утверждать, что палеогеновые коматииты о. Горгона также, как их аналоги докембрийского возраста или меймечиты претерпели вторичные изменения, и содержание магния в породе завышено относительно его содержания в расплаве.

2. В отличие от докембрийского времени, представленного бесспорными находками меймечитов и коматиитов (по литературным данным), в палеозое, мезозое и кайнозое проявления ультраосновного вулканизма представлены ограниченным числом находок. Описанные в литературе многочисленные находки пикритов, образовавшихся в послекембрийское время в офиолитовых комплексах складчатых областей, в трапповых комплексах и в континентальных рифтовых областях далеко не всегда являются изначально высокомагнезиальными породами, образовавшимися из высокомагнезиальных расплавов. Аккумуляция оливина в расплаве (примером могут служить пикрит и дунит Гавайских островов, рассмотренные выше), серпентинизация, хлоритизация пород в офиолитовых комплексах – это процессы, приводящие к увеличению содержания магния в породе относительно первичного расплава. Поэтому находки пикритов требуют проверки на первичность высокой магнезиальности расплава. Немногочисленность находок ультраосновных эффузивов указывает на невысокую вероятность достижения земной поверхности собственно мантийными расплавами в послепротерозойское время. В 2 случаях ультраосновные вулканиды пространственно связаны с интрузивными массивами: 1. меймечиты Сибирской платформы генетически связаны с оливинитами Гулинского плутона, для которых предполагается кумулятивная природа из меймечитового или близкого по составу расплава [87]; 2. коматииты и ультраосновные породы (дуниты и связанные с ними верлиты, габбро, возможно имеющие кумулятивную природу [171]) о. Горгона генетически связаны единым источником первичной магмы [273]. Связаны ли дайковые тела, слагаемые меймечитами в арктическом фрагменте магматической провинции Кагоо с каким либо крупным интрузивным массивом, не ясно. Тесная пространственная и генетическая связь послепротерозойских ультраосновных вулканидов с ультраосновными интрузивными массивами позволяет предположить, что небольшая часть расплавов из этих массивов в период их становления, будучи в той или иной степени дифференциатами, могла достигать земной поверхности. Это указывает на то, что в послепротерозойское время только достаточно крупные объемы мантийных выделок могли проникать в кору. Тогда как в докембрийское время мантийные расплавы без ограничений по объему достигали земной поверхности. Это также позволяет полагать, что небольшие по размеру ультраосновные массивы (~10–15 км в диаметре и менее (?), хотя размер зависит от глубины эрозионного среза), образовавшиеся в послекембрийское время, скорее всего, имеют протрузивную природу. Среди пикритов трапповых формаций и континентальных рифтовых областей (например, Восточно-Африканская рифтовая область) несомненно присутствуют производные высокомагнезиальных расплавов, но необходимо отделить их от кумулятивных разностей.

Глава 12. Особенности содержания кальция в кристаллах оливина различного генезиса

Обобщение экспериментальных результатов (см. главу III) позволяет утверждать, что независимо от давления (в интервале значений P от 1 атм. до 175 кб) кристалл оливина, выросший в «сухих» условиях из основного-ультраосновного расплава, содержащего более 3–5 вес. % СаО, в свою очередь, будет содержать 0.1 или более вес. % СаО. Это позволяет полагать, что кристаллы оливина, содержащие менее 0.1 вес. % СаО в магматических основных-ультраосновных породах с содержаниями СаО более 3–5 вес. % являются ксеногенными или изменили свой состав. Обобщение данных по содержаниям СаО в оливинах из магматических пород дало основание Т. Симкину, И. Смиту [293] сделать следующие выводы: 1. содержание кальция в оливине пропорционально содержанию железа в нем; 2. в большинстве плутонических пород содержание СаО менее 0.1 вес. %; 3. в кристаллах оливина из эффузивных и гипабиссальных пород содержания СаО более 0.1 вес. %; 4. на содержание кальция в оливине в первую очередь влияет глубина кристаллизации, хотя влияние температуры кристаллизации также существует. Результаты обобщения Т. Симкина, И. Смита [293] для природных оливинов по пункту о влиянии давления противоречат нашему обобщению экспериментальных данных. Это несоответствие связано с тем, что на состав природных оливинов

вливают как условия образования кристаллов оливина из расплава, так и последующие процессы в условиях солидуса для данного состава оливина (условия затвердевания расплава, включающего данный кристалл оливина и последующего становления породы). Ниже на фациальных разностях магматических и метаморфических пород мы продемонстрируем влияние этих факторов на содержания кальция в оливине. Для удобства в дальнейшем кристаллы, содержащие 0.1 и более вес. % CaO мы будем называть **кальцийсодержащими**, а менее – **низкокальциевыми**. В связи с отсутствием общепринятой классификационной схемы для расчленения интрузивных разностей пород основного и ультраосновного составов, мы, опираясь на имеющиеся петрографические и генетические классификации, для удобства изложения разделили используемые данные на следующие таксоны: эффузивные и интрузивные разности; основные и ультраосновные породы. В свою очередь, интрузивные тела были разделены по следующей схеме: 1. расслоенные интрузивные комплексы; 2. интрузивные породы второго и третьего слоев современной океанической коры; 3. ультраосновные и основные породы в интрузивных массивах офиолитовых комплексов; 4. в отдельную группу (**габброидную**) были выделены массивы, сложенные габброидами, и субвулканические тела, сложенные долеритами, для которых условия их формирования (геодинамическая обстановка) не однозначны; 5. дунит-клинопироксенит-габбровые массивы урало-аляскинского типа; 6. ультрабазиты щелочно-ультраосновных комплексов; 7. основные интрузивные массивы трапповой формации; 8. кимберлиты; 9. ксенолиты в основных и ультраосновных породах. В каждом из этих подразделений мы стремились отдельно рассмотреть составы оливинов в основных породах, в которых кристаллы оливина должны быть первоначально кальцийсодержащими (исходя из полученной нами зависимости). В ультраосновных породах, представленных кумулатами, первоначальный состав оливинов также должен относиться к кальцийсодержащим разностям.

Эффузивные разности пород основного-ультраосновного составов различных геодинамических обстановок. Вывод Т. Симкина, И. Смита [293]) о том, что в оливинах (как правило, вкрапленниках) из эффузивных и гипабиссальных разностей пород содержания CaO более 0.1 вес. %, находится в хорошем согласии с многочисленными данными, полученными за время, прошедшее с момента выхода их работы. Сюда можно отнести результаты изучения базальтов из различных современных и палеогеодинамических обстановок (СОХ, островные дуги, активные континентальные окраины, различные примеры внутриплитного магматизма – траппы, плато базальты и т. д.), среди которых очень значительный объем составляют данные изучения образцов, полученных по результатам научного глубоководного бурения и драгирования второго слоя современной океанической коры. Пикритовые разности базальтов, находки которых достаточно многочисленны среди эффузивов, слагающих океанический сегмент современной земной коры, имеют кумулятивное происхождение (по мнению большинства исследователей). Судя по литературным данным [235; 236; 255], палеогеновые пикриты из различных участков Гренландии содержат только кальцийсодержащий оливин (общее число – 65 анализов). Отдельно остановимся на эффузивах офиолитовых комплексов. Было просмотрено ~400 публикаций и выяснилось, что систематических данных по составам кристаллов оливина из эффузивных разностей пород офиолитовых комплексов практически нет. Единственным исключением является серия публикаций Соболева и др. [89; 92] и М.В. Портнягина и др. [269] по ультрамафитовым лавам массива Троодос. В этих работах приводится в общем 32 анализа кристаллов оливина, и все эти кристаллы являются кальцийсодержащими. С некоторой долей осторожности, несмотря на единичные данные по лавам из офиолитов Семейла, Урала и т. д., мы допускаем, что кальцийсодержащие оливины типичны и в лавах офиолитовых комплексов.

Кроме того, в указанных фациальных разностях пород, наряду с подавляющим большинством разностей кальцийсодержащего оливина, находят и отдельные кристаллы низкокальциевого оливина, которые обычно авторами работ считаются ксеногенными. В эффузивных разностях пород ультраосновного состава (коматииты зеленокаменных поясов, меловые ко-

матииты о. Горгона, меймечиты) кристаллы оливина (как вкрапленники, так и микролитовой фазы) являются кальцийсодержащими, хотя встречаются отдельные низкокальциевые кристаллы (см. выше раздел коматииты).

Все эти данные говорят о том, что несмотря на кристаллизацию вкрапленников оливина под давлением, ограниченным значением 15 кб (исходя из составов включенных в них кристаллов шпинели), они являются кальцийсодержащими разностями. За время подъема магмы к поверхности и последующих вторичных изменений пород эффузивной фации в различных палеогеодинамических и современных обстановках в интервале от цеолитовой до низов амфиболитовой фации, содержание кальция в кристаллах оливина в подавляющем большинстве случаев практически не претерпевает изменений.

Интрузивные массивы. Среди большого разнообразия интрузивных массивов как по внутреннему строению, так и по условиям становления, наиболее отчетливо диагностируемыми являются расслоенные интрузивные массивы и зональные дунит-клинопироксенит-габбровые комплексы. Наиболее показательными по особенностям содержания кальция в кристаллах оливина являются **расслоенные интрузивные массивы**. В них первичный расплав имел основной состав (исходя из составов пород краевой группы, присутствующей во многих массивах) и кристаллы оливина, участвующие в образовании кумулатов из расслоенного комплекса, образовались из этого первичного расплава. Исходя из зависимости, полученной нами, эти оливины должны быть кальцийсодержащими. Среди наиболее известных и исследованных интрузивных тел можно назвать Бушвельдский массив, возраст которого ~2 млрд. лет и третичный массив острова Рам.

Расслоенный комплекс третичного возраста острова Рам. Данные по этому массиву магматических пород были заимствованы из работ Л. Уэджера, Г. Брауна [102]; А. Дунхама, В. Водсворта [174]; Дж. Бевана [140]; Б. Аптона и др. [306]; М. Холниса и др. [212]. Это интрузивный массив раннетретичного возраста, представленный кумулятивным расслоенным комплексом, сложенным преимущественно ультраосновными породами. На основании геологических данных предполагается, что в свое время это была магматическая камера, заполненная базальтовым расплавом под вулканической постройкой. При кристаллизации базальтового расплава в донной части этой камеры сформировался расслоенный комплекс. Основанием для предположения о базальтовом составе расплава (так как породы краевой фации не были найдены) служат пластовые тела тонкозернистых габбро и расчетов состава порового расплава Л. Уэджером и Г. Брауном [102]. Использованные из работ А. Дунхама, В. Водсворта [174]; Дж. Бевана [140]; Б. Аптона и др. [306]; М. Холниса и др. [212] составы кристаллов оливина были разделены на 2 группы по указанной выше градации. Полученные результаты представлены в таблице 1 оливин–Рам.

Таблица. 1 оливин–Рам. Соотношения низкокальциевых и кальцийсодержащих оливинов.

	I	II	III	IV
Число низкокальциевых оливинов	5	20	1	22
Число кальцийсодержащих оливинов	0	10	3	21

Примечание. Данные из работ: I – Дж. Беван [140]; II – А. Дунхам, В. Водсворт [174]; III – Б. Аптон и др. [306]; IV – М. Холнис и др. [212].

Приведенные данные демонстрируют отчетливое присутствие в породах расслоенного комплекса и пикритовых дайках, связанных с этим комплексом, двух групп кристаллов оливина по содержанию в нем кальция, причем соотношение их может приближаться к единице. Как было показано выше, в базальтовых лавах из различных геодинамических обстановок низкокальциевая разность оливина представлена единичными кристаллами. Это позволяет предположить, что вынос кальция из кристаллов оливина в затвердевающем интрузивном

массиве происходил в солидусную стадию для кристаллов оливина и без видимой закономерности (в настоящее время) в теле массива, судя по данным, заимствованным из работы М. Холнуса и др. [212]. Наиболее вероятной причиной выноса кальция из кристаллов оливина в остывающем массиве был, вероятно, флюидопоток, распределенный неравномерно внутри массива.

Изверженный комплекс Cuillin из ультраосновной расслоенной интрузии, возраст 60 млн. лет, о. Скай, Шотландия, по данным Б. Белла, Р. Клайдона [140]. В работе приводятся 7 составов кристаллов оливина, 6 из которых относятся к низкокальциевым разностям.

Скергаардский интрузив. Он входит в состав третичного плутонического комплекса [102]. По данным, собранным из работ Х. Нейсланда [252], Дж. Ховера [213], Ц. Вайта и др. [312] оливины в породах краевой группы и макродайки из края интрузива представлены преимущественно кальцийсодержащими разностями (13 из 15 приведенных составов).

Расслоенный интрузивный массив, связанный с анортозитовым комплексом Nain, Лабрадор, возраста 1.3 млрд. лет [314] и нодули из протерозойских базальтовых даек, прорывающих анортозитовый комплекс [313]. В расслоенной интрузии приводимые 13 составов относятся к низкокальциевым оливинам; в нодулях из протерозойской дайки приводимые 5 анализов соответствуют кальцийсодержащим разностям оливинов.

В оливинах из метаморфических пород (перидотитов) архейского возраста пояса Isua (Западная Гренландия), низкокальциевым разностям отвечают все 18 составов, приводимых в работе Р. Даймека и др. [175].

Бушвельдский плутон, возраст ~2 млрд. лет. Данные по содержанию кальция в оливине были заимствованы: Базальная зона – из работы Е. Камерона [152]; Критическая зона – Р. Скуна [280]; Р. Скуна, В. Де Клерка [282]; Северный лимб (Platreef) (Критическая зона?) – Ц. Гарриса, Дж. Чоумба [204]; дунитовые трубки и дискордантные пегматиты – Н. Рудашевского и др. [277]; Р. Скуна, А. Митчелла [283]; Д. Рейда, И. Бейсона [272]; Р. Скуна [281]. Эти результаты представлены в таблице 2 оливин–Бушвельд. По данным таблицы отчетливо видно, что оливины Бушвельдского плутона, образовавшиеся в достаточно разнообразных условиях, но из базальтовой магмы, практически лишены кальция. Его содержания лежат преимущественно в интервале 0.01–0.04 вес. % СаО, включая и железистые разности кристаллов оливина из дунитовых трубок и дискордантных пегматитов. Несмотря на значительный возраст массива, породы и минералы (по литературным данным) в большинстве своем слабо затронуты вторичными изменениями и кристаллы оливина должны бы являться кальцийсодержащими. Поэтому низкие содержания кальция в кристаллах оливина из этого массива, вероятно, обусловлены локальными процессами, подобными вызывающим мозаичное распределение низкокальциевых и кальцийсодержащих оливинов в массиве острова Рам.

Таблица. 2 оливин–Бушвельд. Соотношения низкокальциевых и кальцийсодержащих оливинов.

	Базальная зона	Критическая зона	Северный лимб	Дунитовые трубки и пегматиты
Число низкокальциевых оливинов	7	24		Дунитовые трубки – 22; пегматиты – 6
Число кальцийсодержащих оливинов	нет	1	1	Дунитовые трубки – 1; Пегматиты – 1

Ритмично-расслоенный интрузив раннепротерозойского возраста – массив горы Генеральской, Кольский полуостров [26]. Ритмические единицы в комплексе сложены представителями семейства габброидов и пироксенитов. Приводимые в работе составы 10 кристаллов оливина в 9 случаях являются низкокальциевыми разностями, несмотря на умеренную магнетиальность. Обращает на себя внимание и сильная разбалансированность составов шпиль–оливиновой ассоциации.

Бураковский расслоенный интрузивный массив, возраст 2.44 млрд. лет по данным М.М. Лаврова [45]. В работе приводятся 27 анализов составов кристаллов оливина из дунитов, перидотитов, пироксенитов, габбро-норитов периферийной зоны. Все составы кристаллов относятся к кальцийсодержащим разностям. В работе А.В. Чистякова, Е.В. Шаркова [113] также приводятся 27 составов оливинов практически из тех же разностей пород массива, но соотношение кальцийсодержащих и низкокальциевых разностей обратное: 25 низкокальциевых кристаллов и 2 – кальцийсодержащих. Несмотря на противоречивые результаты, можно полагать, что кальцийсодержащие разности оливина, образовавшиеся из базальтовой магмы, могут сохраняться и в столь древних массивах, вмещающая рама которых изменена как минимум до фации зеленых сланцев.

Пильгуярвинский габбро-верлитовый интрузив (Печенга) раннепротерозойского возраста по данным В.Ф. Смолькин [85], Р.М. Латыпов и др. [46]. Никеленосные интрузии Печенги имеют первичное дифференцированное строение (снизу вверх): верлиты, пироксениты, габбро. В работе [85] приводится 8 составов кристаллов оливина, все являющиеся кальцийсодержащими разностями.

Перидотит-габбровый плутон Нуичау (север Вьетнама) пермо-триасового возраста по данным Г.В. Полякова и др. [63]. Плутон достаточно изучен и является одним из ряда расслоенных перидотит-габбровых массивов в этом районе. В работе приводятся 10 анализов кристаллов оливина и все они являются низкокальциевыми разностями.

Габбровая группа. Были собраны данные по 15 интрузивным массивам (Канады, Китая, Италии, Франции и т. д.), включая силлы и дайки. В 11 случаях подавляющее большинство кристаллов оливина представлено низкокальциевыми разностями. Но встречены случаи, когда это соотношение нарушается:

1. Габбро-габбро-норитовая интрузия Duluth, возраст ~1.1 млрд. лет (США) по данным Ц. Челокву, Н. Гранта [158]. В работе приводится 8 анализов кристаллов оливина, 6 из которых являются кальцийсодержащими.

Щелочная долеритовая дайка, возраст 200–230 млн. лет (США) по данным О. Дона Гермеса и др. [172]. Представлены 4 анализа составов двух кристаллов оливина (центр, край) являющихся кальцийсодержащими разностями.

Небольшие интрузивные тела с тектоническими контактами, сложенные расслоенными меланогаббро, предположительно триасового возраста (Италия) по данным М. Де Файно и др. [165]. Представлены 9 анализов кристаллов оливина, 8 из которых – кальцийсодержащие разности.

Силл Siant Isles Main, сложенный пикритами, пикродолеритами, тешенитами палеоценового возраста (Шотландия) по данным Ф. Гибба, С. Хендерсона [191]. В работе представлено 34 анализа 17 кристаллов оливина (центр, край): из 17 кристаллов только один является низкокальциевой разностью.

Интрузивные породы 2-го и 3-го слоев современной океанической коры. В настоящее время предложен ряд классификационных схем для пород ультрабазит-базитового ряда, входящих в состав одноименных комплексов в складчатых областях и срединно-океанических хребтах [6; 58; 109]. Имеющиеся обобщения Ф.П. Леснов и др. [49] по особенностям составов оливинов свидетельствуют только о возможности выявления типоморфных особенно-

стей оливина в указанных комплексах. Поэтому использовано небольшое число градаций: по глубинности (лавы и интрузивные разности), по составу (ультраосновные и основные породы), по возрасту (офиолитовые комплексы и современный океанический сегмент земной коры) и две разности оливина по содержанию кальция. Просмотрено порядка 250 публикаций из периодической печати, в которых представлены данные по этим породам, за исключением данных по глубоководному бурению за последние ~15 лет, из-за их труднодоступности. Сложности подбора данных связаны и с тем, что в большинстве публикаций приводятся, как правило, только геохимические данные по породам, без химического состава фаз, слагающих эту породу. Из этого числа публикаций было выбрано около 40 работ, в которых представлены составы кристаллов оливина. К сожалению, несмотря на большое число аналитических данных, полученных по кристаллам оливина, в ряде работ составы приводятся или в виде доли форстеритового минала, или содержание кальция в кристаллах оливина, в отличие от других элементов, не анализировалось. В итоге были использованы аналитические данные из 35 публикаций [77; 81; 82; 95; 114; 123; 134; 142; 145; 154; 163; 169; 170; 173; 184; 200; 207; 248; 259; 261; 267; 287; 289; 294]. Здесь указаны только работы, из которых было заимствовано более 5 анализов, из 11 неуказанных работ было заимствовано по 1 анализу. Данные из отобранных публикаций, в основном, касаются сведений о составах эффузивных и интрузивных пород таких крупных структурных элементов океанической коры как СОХ, трансформные разломы, глубоководные желоба. Несмотря на то что, в этом разделе мы обсуждаем интрузивные разности пород, обращаем внимание читателя, что в некоторых из использованных публикаций приводятся составы оливинов из базальтов (образующих единый комплекс с интрузивными породами), которые представлены только кальцийсодержащей разностью. Используемые данные, представленные ~450 опубликованными анализами, географически и количественно распределены неравномерно – большая их часть приходится на Срединно-Атлантический хребет, меньшая – на срединно-океанические хребты в Тихом и Индийском океанах, а также другие структурные элементы, что, вероятно, может вносить некоторые искажения в выводы.

Интрузивные породы были разбиты на две группы: основного состава (129 анализов), куда вошли разности габброидов, диабазов и долеритов; ультраосновного состава (334 анализа), куда вошли породы, относимые к дунитовому и перидотитовому семействам. В таблице 3 оливин–океаническая кора представлены собранные и сгруппированные данные.

Таблица. 3 оливин–океаническая кора. Число низкокальциевых и кальцийсодержащих оливинов.

Порода	Основные интрузивные породы		Ультраосновные интрузивные породы	
	низкокальциевый оливин	кальцийсодержащий оливин	низкокальциевый оливин	кальцийсодержащий оливин
Количество	96 кристаллов	33 кристаллов	305 кристаллов	29 кристаллов

Для основных пород содержания низкокальциевых и кальцийсодержащих кристаллов оливина ближе к отношению этих разностей в массиве острова Рам. В ультраосновных породах океанической коры резко преобладают низкокальциевые оливины. Как правило, ультраосновные породы океанической коры в различной степени подверглись вторичным преобразованиям – серпентинизации, амфиболизации, перекристаллизации с образованием необласт оливина с содержаниями окиси кальция до 0.45 вес. % [77], что противоречит другим данным по метаморфическому оливину и будет обсуждено далее. Все эти процессы ведут к потерям первичным оливином кальция, что будет показано далее на ряде примеров. Если полагать, что первичный оливин, образовавшийся из основных расплавов, должен быть кальцийсодержащим, то присутствие низкокальциевого оливина в габброидах может указывать на флюидную проработку кристаллов оливина. Примером, вероятно, могут служить данные по составу оливина из практически не затронутых вторичными процессами основных интрузивных пород массива Atlantis [173]. Из приведенных 29 анализов оливина все они являются

низкокальциевыми и, судя по ряду дополнительных анализов, обеднены LREE элементами, что свидетельствует в пользу предположения о флюидном воздействии. Однако остаточные фрагменты оливина (из перидотита в Индийском срединно-океаническом хребте), сохранившиеся при вторичном минералообразовании (серпентинизация оливина), также теряют кальция, но серпентинизация приводит к увеличению содержаний LREE элементов в замещенной части кристалла [251].

Для сравнения был использован небольшой объем данных по составам оливинов из основных интрузивных пород Исландии, который приводится в работе Ю.С. Геншафта, А.Я. Салтыковского [19], хотя магматизм Исландии не является подобием магматизма срединно-океанических хребтов [19; 50]. По данным из работы [19] в различных видах габброидов из 11 приводимых анализов оливина в 7 случаях кристаллы оливина можно отнести к низкокальциевым разностям; в гомеогенных включениях, которые можно считать интрузивными аналогами лав, все 12 приводимых анализов можно отнести к кальцийсодержащей разности. Эти данные также указывают на вынос кальция из кристаллов оливина в интрузивных телах в Исландии в солидусную стадию.

Интрузивные породы офиолитовых комплексов. Среди пород, слагающих офиолитовые комплексы, могут присутствовать разности, образовавшиеся в зонах СОХ, трансформных разломах, океанических островах, зонах спрединга (островные дуги, активные континентальные окраины) и т. д. Исследования по особенностям составов этих пород в основном опираются на петрохимические и геохимические результаты исследований. Данные по составам оливинов из пород семейств габброидов и пироксенитов в офиолитовых комплексах ограничены. В таблице 4 оливин–офиолиты представлены собранные данные.

Таблица. 4 оливин–офиолиты. Число низкокальциевых и кальцийсодержащих оливинов в габброидах офиолитовых комплексов.

	I	II	III	IV	V
Низкокальциевый оливин	50	28	3	14	3
Кальцийсодержащий оливин	1	6		2	15

Примечание. Данные из работ: I – С. Комора, Д. Элтона [230]; II – С. Комора и др. [232]; III – Ц. Марчези и др. [240]; IV – Дж. Паллистера, Ц. Хопсона [264]; V – Г. Пиккардо, Л. Гварнери [268].

Данные по составам оливинов из пород семейств перидотитов и дунитов достаточно многочисленны, но однообразны и представлены низкокальциевыми разностями оливина.

В таблице 5 оливин–офиолиты представлены данные по содержаниям кальция в оливинах ультраосновных пород некоторых офиолитовых комплексов.

Таблица. 5 оливин–офиолиты. Число низкокальциевых и кальцийсодержащих оливинов в ультрабазитах офиолитовых комплексов.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Низкокальциевый оливин	52	13	14	23	40	7	27	15	23	7	12
Кальцийсодержащий оливин	2	5	2		4	3				6	

Примечание. Данные из работ: I – С. Комора и др. [231]; II – Ц. Марчези и др. [240]; III – Дж. Паллистера, Ц. Хопсона [264]; IV – Б.А. Базылева и др. [5]; V – Г.Н. Савельевой [76]; VI – Р. Харриса [203]; VII – Р. Пейджа и др. [263]; VIII – Е. Алданмаза и др. [121]; IX – М. Мазучелли и др. [243]; X – Е. Рампоне [271]; XI – Е. Пуга и др. [270].

Данные этой таблицы можно дополнить 414 анализами только низкокальциевого оливина из перидотитового массива Lherz (французские Пиренеи) по данным Дж. Ричеса, Н. Рогерса [274]. В данных по Кемпирсайскому массиву Ф. Мельшера и др. [247] все разности оливинов (из гарцбургитов, дунитов и хромитов) представлены низкокальциевыми разностями (4 анализа). В породах полосчатой серии Хадатского габбро-гипербазитового массива М.Н. Костюхина, Д.Н. Ремизова [40] кристаллы оливина (3 анализа) представлены кальцийсодержащими разностями. В офиолитовом массиве Маяри-Баракоа (Куба) по данным А.В. Уханова и др. [101] в перидотитах оливины (7 анализов) относятся к низкокальциевым разностям, тогда как в габброидном комплексе из приводимых 4 анализов 3 кристалла являются кальцийсодержащими.

На фоне устойчивого преобладания низкокальциевых разностей оливина в ультраосновных и основных породах офиолитовых комплексов различного возраста и географического положения встречаются и породы с преобладанием кальцийсодержащего оливина (таблица 4 оливин-офиолиты, колонка V) или с практически равными содержаниями обеих разностей (таблица 5 оливин-офиолиты, колонка X). В габброидах больше вероятности встретить кальцийсодержащий оливин, что генетически объяснимо.

Дунит-клинопироксенит-габбровые массивы урало-аляскинского типов (сокращенно ДКГ). Эта группа массивов рассмотрена на примере ряда массивов на Аляске [201] и в Уральском платиноносном поясе: Нижнетагильский [32; 104; 71; 15] и Уктусский [72]. Кроме того, в Уральском платиноносном поясе имеется ряд ультрамафит-габбровых массивов, входящих в него, но генетически относимых к офиолитовым комплексам, примерами которых могут служить: Хорасюрский массив [116] и массив Кытлым [60]. В Корякско-Камчатском регионе наиболее изученными дунит-клинопироксенит-габбровыми массивами являются Гальмознанский [7; 39] и Сейнавский [39]. Кроме того, также как и в Уральском платиноносном поясе, присутствуют гипербазит-базитовые массивы, относимые к офиолитовой группе, примером которых может служить Эпильчикская группа массивов [39]. Данные по содержаниям CaO в оливинах комплексах Blaske Islands, Kane Peak, Ked Bluff Bay и Union Bay на **Аляске** ~раннемелового возраста представлены в таблице 6 оливин-ДКГ.

Таблица 6 оливин-ДКГ. Число низкокальциевых и кальцийсодержащих оливинов в комплексах Аляски.

	Blaske Islands	Kane Peak	Ked Bluff Bay	Union Bay
Низкокальциевый оливин	5	12	5	5
Кальцийсодержащий оливин	6			2

Отметим также, что шпинель-оливиновая ассоциация перенормирована в режиме остывания.

ДКГ и ультрамафит-габбровые массивы **Урала** имеют возраст предположительно ордовик-силур. Данные по Нижнетагильскому массиву представлены в таблице 7 оливин-ДКГ.

Таблица. 7 оливин–ДКГ Число низкокальциевых и кальцийсодержащих оливинов в породах Нижнетагильского массива.

	Оливин в хромитах	Оливин в цементе платиновой руды	Оливин из тылаитов	Оливин из дунитовых пегматитов
Низкокальциевый оливин	9		1	
Кальцийсодержащий оливин		14	6	8

Данные по содержаниям кальция в оливинах Уктусского ДКГ массива представлены в таблице 8 оливин–ДКГ.

Таблица. 8 оливин–ДКГ Число низкокальциевых и кальцийсодержащих оливинов в породах Уктусского массива.

	Дуниты Южного поля	Тылаиты	Клинопироксениты	Габбро
Низкокальциевый оливин	42	4	14	4
Кальцийсодержащий оливин	46		2	

В массивах ультрамафит-габбровой ассоциации Харасюрский и Кытлым, входящих, в платиноносный пояс, но одновременно являющихся и представителями офиолитов, низкокальциевые и кальцийсодержащие разности распределились следующим образом. Харасюрский массив – все 8 приводимых анализов относятся к низкокальциевым разностям. В массиве Кытлым 16 из приводимых анализов относятся к низкокальциевым, а 4 – к кальцийсодержащим разностям.

Для перечисленных выше массивов типичным является перенормирование шпинель–оливиновой ассоциации в условиях остывания. Кроме того, среди кристаллов шпинели встречаются единичные алюминийсодержащие разности (Al_2O_3 в кристаллах более 50 вес. %), но с невысокими содержаниями магния, что по нашим данным указывает на высокобарический метаморфический их генезис.

Массивы **Корякско-Камчатского** региона. Данные рассмотрены на примерах Эпильчикской группы, относимой к офиолитовым базит-гипербазитовым массивам, и Сейнав-Гальмоэнанской группы, являющейся представителем дунит-пироксенит-габбровой формации. Приводимые анализы оливинов из дунитов и верлитов Эпильчикской группы распределились следующим образом: 23 кристалла являются низкокальциевыми разностями и 13 – кальцийсодержащими. В Гальмоэнанском массиве 30 кристаллов представлено низкокальциевыми разностями и 8 – кальцийсодержащими. Оливины из дунитов представлены двумя разностями, тогда как в габброидах оливины являются низкокальциевыми. В Сейнавском массиве, судя по приводимым анализам, есть только низкокальциевые разности оливина. В указанных массивах шпинель–оливиновая ассоциация является перенормированной в условиях остывания и среди кристаллов шпинели встречаются единичные глиноземистые разности, как и в массивах Урала.

Щелочно-ультраосновные интрузивные комплексы рассмотрены на примерах массивов Алданского щита – Кондер, Чад, Инагли; Маймеч-Котуйской провинции – Гулинский плутон; севера Сибирской платформы – Бор-Урях и Сыбах; Батийского щита Карело-Кольской провинции – Лесная Варака. Данные по массиву Кондер, имеющего послерифейский возраст,

были заимствованы из работ В.С. Приходько, Г.П. Пономарева [69], И.Я. Некрасова и др. [56], Н.С. Рудашевского и др. [74]; по массивам Инагли и Чад (послепротерозойский возраст) – из работ Ю.Р. Васильева [14], И.Я. Некрасова и др. [56]; данные по Гулинскому плутону, возникшему на границе пермь-триас, и массивам Бор-Урях и Сыбах – из работ Ю.Р. Васильева [14], И.Я. Некрасова и др. [56]; по массиву Лесная Варака, который сформировался в послепалеозойское время – из работы Ю.Р. Васильева [14]. Обобщение данных из перечисленных работ дало результаты, приводимые ниже в виде таблиц. В таблице 9 оливин–Кондер представлены данные по особенностям оливина из различных фациальных разностей в этом массиве.

Таблица. 9 оливин–Кондер. Число низкокальциевых и кальцийсодержащих оливинов в породах массива Кондер.

	Дунит ядерной части	Дунит краевой части	Пироксениты	Дайки пироксенитов и габбро	Хромитовая руда	Включения в платину
Низкокальциевый оливин	13		10	4	2	
Кальцийсодержащий оливин	147	26	4	1		13

В массиве Чад в дунитах найдены только кальцийсодержащие разности оливина (14 анализов); в пироксенитах и габброноритах преобладают низкокальциевые разности – в 19 случаях из 21 это низкокальциевые разности. Оливин из дунитов массива Инагли по усредненному составу из 17 анализов относится к кальцийсодержащим разностям.

Оливин в дунитах Гулинского плутона, представленный средним из 12 анализов, относится к кальцийсодержащим разностям. В дунитах массива Сыбах все 11 составов относятся к низкокальциевым разностям; в пироксенитах 4 кристалла являются кальцийсодержащими и 4 представлены низкокальциевыми разностями. Состав оливина в оливинитах массива Бор-Урях относится к кальцийсодержащим разностям (среднее из 17 анализов).

Оливин из оливинитов массива Лесная Варака по среднему из 16 анализов является кальцийсодержащим.

Для всех вышеназванных массивов наблюдается отчетливая перенормировка составов шпинель–оливиновой ассоциации в условиях остывания. В экзоконтактовых зонах, окружающих массивы, обнаружены отдельные кристаллы высокоглиноземистой шпинели.

Основные интрузивные массивы трапповой формации. Особенности составов оливина в интрузивных телах трапповой формации рассмотрены преимущественно на примере траппов Сибирской платформы. Данные были собраны из работ В.В. Золотухина и др. [30]; Н.А. Криволицкой и др. [41]; Н.А. Криволицкой и др. [42; 43]; В.В. Золотухина и др. [31]; М.Д. Томшина и др. [100]; В.С. Аплонова, А.А. Золотарева [2]; С.Ф. Служеникина и др. [84]. Основное число трапповых интрузивных тел образовалось в пермско-триасовое время. Большинство тел имеет мощности в пределах до 100 м, хотя встречаются случаи раздувов в телах до 0.6 км. Данные по составам оливинов из разных интрузивных массивов Сибирской платформы представлены в таблице 10 оливин–траппы.

По отдельным массивам имеющиеся составы шпинели и оливина указывают на перенормировку составов в условиях остывания.

Таблица. 10 оливин–траппы. Число низкокальциевых и кальцийсодержащих оливинов в интрузивных массивах Сибирской платформы.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Низкокальциевый оливин			?	1		1		
Кальцийсодержащий оливин	21	среднее из 497 проб	диапазоны 1. 0.07–0.21 2. 0.14–0.32	165	43	28	10	24

Примечание. Данные из работ: I. Н.А. Криволицкой и др. [41] – Талнахский интрузив. II. В.С. Апполонова, А.А. Золотарева [2] – Талнахское месторождение. III. С.Ф. Служеникина и др. [84] – 1. Нижнеталнахское и Нижненорильское интрузивные тела; 2. Зеленогневский массив. IV. Н.А. Криволицкой и др. [42] – Микчангдинский массив. V. Н.А. Криволицкой и др. [43] – Микчангдинский массив. VI. М.Д. Томшина и др. [100] – Маркока-Мархаратский силл. VII. В.В. Золотухина и др. [31] – Северо-Ванаварский лакколлит. VIII. В.В. Золотухина и др. [30] – Ворогорское расслоенное интрузивное тело.

Для сравнения были использованы данные по составам оливина из мезопротерозойских пород многочисленных маломощных субвулканических тел долеритов и пикритов Ишлинско-Шатакской грабеновой зоны. По геохимическим характеристикам породы подобны проявлениям наземного внутриплитного магматизма [57] и ультрамафитового интрузивного тела Jinbaodhan пермского возраста, входящего в состав большой магматической провинции Emeishan, представленной жидкими континентальными базальтами и связанными с ними основными-ультраосновными интрузивными телами [310]. По данным из работы А.А. Носовой и др. [57] по составу оливинов 32 кристалла являются кальцийсодержащими, 13 кристаллов – низкокальциевыми разностями. Данные из работы Ц. Ванга и др. [310] имеют, соответственно, следующие численные значения: кальцийсодержащие разности – 15 кристаллов, низкокальциевые разности – 2 кристалла. Приводимые в этих работах данные по составам шпинелей указывают на перенормировку составов шпинель–оливиновой ассоциации в условиях остывания.

Алмазоносные породы (кимберлиты, лампроиты). Собранные из литературных источников данные по содержаниям кальция в кристаллах оливина согласно структурно-текстурным особенностям этих пород были разделены на 3 группы: 1. кристаллы оливина, включенные в кристаллы алмаза; 2. кристаллы оливина в породе; 3) кристаллы оливина из ксенолитов в кимберлитах и лампроитах (рассмотренных в разделе ксенолиты). Кроме того, были рассмотрены составы оливинов из экспериментальных исследований кимберлитовых расплавов.

Данные по содержаниям кальция в оливинах, включенных в кристаллы алмаза, были в первую очередь заимствованы из сводной работы А.В. Соболева и др. [87] и дополнены малочисленными данными из других публикаций. В этой работе [87] представлены данные из Якутской (9 трубок) и Архангельской провинций (две трубки), Канадской (Snap lake рудник), и Австралийской провинций (трубка Argyle), а также Индии (Majhgawan рудник). Исследования проводились на одном приборе. Все кристаллы оливина, включенные в ~500 исследованных кристаллов алмаза, попадают в низкокальциевые разности и содержат менее 0.1 вес. % СаО. В работе В. Гриффина и др. [199] приводятся данные по оливинам из африканских алмазов (52 анализа), среди которых 5 кристаллов относятся к кальцийсодержащим разностям. Более подробные данные, приводимые в работе П. Дейнеса и др. [166], представленные 20 анализами кристаллов оливина из алмазов кимберлитового поля Огара, Ботсвана также свидетельствуют о присутствии только низкокальциевых разностей. Собранные нами литературные данные по включениям оливина в алмазы из других районов Африканской платформы (кимберлиты Ганы, Гвинеи, ЮАР, Зимбабве, Танзании, Намибии и т. д. ~70 анализов)

также представлены низкокальциевыми разностями оливина. Особняком стоят составы оливинов из алмазов Buffalo Head Hills и Alberta (Канада) [129]. Включающие кристаллы алмазов относятся к редкому малоазотистому типу. Согласно анализам 2 кристалла из 4 относятся к кальцийсодержащим разностям. Эти результаты требуют проверки.

Кристаллы оливина в породе. Среди самостоятельных кристаллов оливина в кимберлитах различают мегакристаллы, вкрапленники и микролиты. В работе А.В. Соболева и др. [87] приводятся составы 67 мегакристаллов оливина (трубка Удачная, Сибирская платформа), все представители которых относятся к низкокальциевой разности. В работе М. Паттерсона и др.

[266] представлены данные по оливинам из кимберлитов поля Foxtrot (Канада). Исследованные кристаллы оливина в различной степени серпентинизированы, размеры их лежат в диапазоне от 100 мк до 10 мм. Из 964 анализов только 68 кристаллов можно отнести к кальцийсодержащим разностям. В работе В.С. Каменецкого и др. [225] приводятся данные об особенностях составов кристаллов оливина из кимберлитов трубки Удачная (Якутия). Авторами выделяются 2 генерации кристаллов оливина с учетом ряда характеристик, включая размеры (больше 0.5-0.8 мм и меньше 0.5-0.8 мм). Кристаллы первой генерации (173 кристалла), которые условно можно назвать вкрапленниками, по аналитическим данным относятся к низкокальциевой разности, только 9 из них являются кальцийсодержащими. Кристаллы второй генерации (44 кристалла), которые можно интерпретировать как микролиты, по результатам изучения так же, как в первой генерации, относятся к низкокальциевой разности оливина, исключение составляет 1 анализ. Иначе выглядят результаты изучения интрузии на Кольском полуострове, сложенной кимберлитами и милелититами [135]. Из приведенных 15 анализов в 10 случаях кристаллы представлены кальцийсодержащими разностями, а породы в сильнейшей степени обогащены LREE. Небольшое число данных (8 анализов) приводится по составам 2 генераций оливина из лампроитов западного Кимберли (Австралия) [27]. Приводимые анализы показывают, что вкрапленники оливина представлены низкокальциевой разностью, а оливины второй генерации являются кальцийсодержащими, на это указывают и распределения кальция по профилям вдоль кристаллов. В работе Р. Бретта и др. [148] обсуждаются результаты исследования кристаллов оливина из кимберлитов площади Las de Gras кратона Slave (Канада). Авторы этой работы, следуя В.С. Каменецкому и др. [225], также выделили кристаллы оливина первой и второй генерации. Данные по составам кристаллов оливина первой генерации представлены 174 анализами, из которых 157 являются низкокальциевыми разностями. Кристаллы второй генерации (213 анализов) также представлены в основном (189 анализов) низкокальциевыми разностями. В работе П. Тхайя и др. [302] приводятся данные (5 анализов) по составам оливина (макрокристаллы и микролиты) из кимберлитов и лампроитов области Sisimuit (Гренландия), которые являются низкокальциевыми разностями. Подобны им и 5 анализов оливинов из группы кимберлитовых тел Renard (Канада) из работы Т. Биркетта и др. [141]. В работе А.В. Головина и др. [21] приводятся данные по составам (4 анализа) кристаллов оливина из раскристаллизованных расплавных включений, которые являются кальцийсодержащими разностями, в отличие от кристаллов оливина, содержащих эти включения (5 анализов – низкокальциевые разности). Отличными от всех приводимых данных в этом разделе являются результаты, полученные по оливинам из вулканокластических кимберлитов трубки Muskoх (Канада) [254] и интрузивных кимберлитов Wajrakarur (Индия) [157]. В этих работах приводятся особенности составов серпентинизированных оливинов. По данным П. Неймана и др. [254] среди 16 анализов свежих оливинов только 1 является кальцийсодержащим. Из 31 серпентинизированного кристалла оливина 26 кристаллов являются кальцийсодержащими и содержат также повышенное количество алюминия. В работе Н. Чаларати и др. [157] приводятся 13 анализов серпентинизированных кристаллов оливина. Эти кристаллы содержат повышенные содержания алюминия и суммы содержаний элементов меньше 100 % на величину от 2–3 % до 10%, что указывает на неполное соответствие этих псевдоморфоз (в нашем понимании) первоначальному составу оливина.

Особенности содержаний кальция в оливинах в экспериментах с кимберлитовыми расплавами. В работе А.В. Боброва, Ю.А. Литвина [10] исследованы фазовые соотношения в перидотит-эклогит-карбонатитовой системе при давлениях 70–85 кб и температурах 1200–1800 °С. Образованные кристаллы (2 анализа) являются кальцийсодержащими, в отличие от низкокальциевого оливина, использованного в стартовом материале. При исследованиях металл-силикатно-углеродной системы [103] при давлениях 55–60 кб и температурах 1450–1550 °С образовавшиеся кристаллы оливина (5 анализов) являются кальцийсодержащими. В экспериментальных результатах с пиролитовой мантией (KLB-1) [209] при давлениях 200–220 кб и температурах 1600–2200 °С рингвудит и магниевый рингвудит в 9 из 11 анализов являются кальцийсодержащими. В экспериментах с афанитовым кимберлитом из южной Африки [249] при давлениях 50–120 кб и температурах 900–1400 °С оливины, равновесные с расплавом, в 10 из 11 анализов являются кальцийсодержащими. В экспериментах с кимберлитовым расплавом при атмосферном давлении, контролируемой фугитивности кислорода и температуре 1130–1360 °С [153] во всех случаях (22 анализа) оливин является кальцийсодержащим. В экспериментальных исследованиях модельного кимберлитового расплава (с использованием низкокальциевого оливина) при давлениях 60 и 80 кб, температурах 1500 °С и 1600 °С с участием углекислого газа и воды [193] новообразованный оливин (2 случая) является кальцийсодержащим. При исследованиях системы оливин–CaCO₃–Na₂CO₃–NaCl и системы «кимберлитовый нодуль» при давлении 55 кб, температурах в интервале ~1100–1600 °С [278] во всех 16 экспериментальных результатах оливин представлен кальцийсодержащими разностями.

Ксенолиты. Мы будем рассматривать только ксенолиты основного-ультраосновного составов, родственные магматическим породам. Традиционно рассматривают отдельно ксенолиты, выносимые базальтовыми магмами различной щелочности, кимберлитовыми и лампроитовыми магмами. Среди ксенолитов, выносимых базальтовыми магмами, различают: 1. гомеогенные включения преимущественно основного состава; 2. в этот же разряд можно поместить кумулятивные разности, состав которых может быть и ультраосновным; 3. собственно ксенолиты, представленные ультраосновными породами и разного рода пироксенитами. Так же, как во всех предыдущих случаях, мы будем различать кальцийсодержащие и низкокальциевые разности оливина в ксенолитах.

Гомеогенные включения и кумулаты базальтовых магм. Ксенолиты, представленные гомеогенными включениями достаточно типичны в продуктах извержений и рассмотрены на ряде примеров: Канарские острова [256; 257]; Азорские острова [242]; Эоловые острова [241]; остров Ustica, Тирренское море [122]; остров Adak, Алеутские острова [309]; вулкан Arenal, Коста-Рика [137]; остров St. Vincent, Антильские острова [305]. Эти ксенолиты сложены представителями семейства габброидов и приводимые в перечисленных выше работах анализы кристаллов оливина, в большинстве своем, относятся к кальцийсодержащим разностям. Обычно в работе приводится от 5 до 20 анализов. Исключение составляют оливины из ксенолитов Fuerteventura, Канарские острова [257], которые практически лишены кальция: из 9 анализов 8 представляют низкокальциевые разности, а ортопироксен и клинопироксен породы обеднены LREE. Это, по нашим представлениям, указывает на локальность проработки водным флюидом остывающих интрузивных тел (подобно массиву острова Рам), так как по данным Е.-Р. Неумана и др. [256] габбровые ксенолиты с островов La Palma, Tenerife, Lanzarote содержат преимущественно кальцийсодержащие оливины (32 анализа, из которых только 6 относятся к низкокальциевым разностям).

Ксенолиты из вулканитов Гавайских островов представлены перидотитами, пироксенитами и габброидами. Данные по ксенолитам, представленным породами группы габбро, заимствованы из работ Р. Фодора, П. Галара [181] и П. Шамбергера, Дж. Хаммера [288] – из 35 приводимых анализов только 3 относятся к кальцийсодержащим разностям.

Данные по оливинам из ксенолитов, представленных дунитами, перидотитами и пироксенитами (некоторые из которых гранатсодержащие) были собраны из работ А. Гото, К. Иокоямы [197]; С. Кеснава и др. [229]; Г. Сена [285]; Ц.-Х. Чена [159]; В. Бохрсона, Д. Клакью

[144]; Г. Сена, Д. Пресналла [286]; Д. Клакью [160], Р. Фодора, П. Галара [181]. Полученные суммарные результаты выглядят следующим образом: кальцийсодержащие разности – 106 анализов; низкокальциевые разности – 109 анализов.

Ксенолиты кимберлитов и лампроитов. Имеющиеся в нашем распоряжении данные по составам оливинов мантийных ксенолитов были сгруппированы по приуроченности к платформам. Собранные данные выглядят следующим образом: Сибирская платформа [93; 199] – 23 анализа, все представлены низкокальциевой разностью оливина; Европейская платформа (Кольский полуостров) [136] – 19 анализов, из которых 17 – низкокальциевые разности, а 2 – кальцийсодержащие, относящиеся к вторичным оливинам; Североамериканская платформа [234; 239; 279;] – в 54 анализах представлены низкокальциевые разности оливинов и в 1 – кальцийсодержащий кристалл; Австралийская платформа [222] – все 24 анализа изученных кристаллов относятся к низкокальциевой разности. Наибольшее число данных удалось собрать по Африканской платформе. Обобщающие данные по отдельным кратонам [192; 221] выглядят следующим образом: кратон Каарваал [192] – все 13 анализов представляют низкокальциевые разности; Южно-Африканский кратон [221] – 70 анализов относятся к низкокальциевым разностям, 25 – к кальцийсодержащим. Наибольшее число данных удалось собрать по провинции Гибсон, Намибия. По данным Л. Франца и др. [106] – составы первичных оливинов распределены следующим образом: из 29 анализов 19 являются низкокальциевыми; выявлена зональность кристаллов оливина по кальцию с увеличением его содержания в краевых частях кристаллов; вторичные оливины (4 анализа) относятся к кальцийсодержащим разностям. Данные Р. Митчелла [250], Л. Френза и др. [183] – 55 из 64 анализов относятся к низкокальциевым разностям.

Оливины ксенолитов из кимберлитов Кении [220] представлены преимущественно низкокальциевыми разностями (16 из 20 анализов). Оливины из ксенолитов кимберлитов Ботсваны [299] относятся к низкокальциевым разностям (5 из 6 анализов).

Ксенолиты основных и ультраосновных пород, выносимые щелочными разностями базальтов. Данные из ~600 публикаций (в которых приводятся содержания кальция в кристаллах оливина из ксенолитов в различных регионах земной поверхности) позволяют нам утверждать, что в большинстве случаев оливин в ксенолитах, выносимых базальтами различной щелочности, является низконизкокальциевым.

Например, в работе И.В. Ащепкова [4] представлены результаты исследований глубинных включений в кайнозойских щелочных базальтоидах Байкальской рифтовой зоны. Приводится 212 анализов кристаллов оливина, среди которых кальцийсодержащие разности встречаются только в 24 случаях. В публикации В.А. Глебовицкого и др. [20] приводятся данные по содержанию кальция в оливине ксенолитов на более обширной территории, но более редкой сетью (Байкало-Монгольский регион), однако преобладание низкокальциевых разностей оливина сохраняется – из 32 приведенных анализов в 5 представлены кальцийсодержащие разности. В монографии А.В. Колоскова [38] рассмотрены различные аспекты проблемы ксенолитов на примерах ряда регионов Восточно-Азиатской окраины. Соотношение кальцийсодержащих и низкокальциевых разностей оливинов, в общем, соответствует общей тенденции преобладания низкокальциевых разностей. Однако, по приводимым А.В. Колосковым [38] данным, имеется ряд мест (мыс Наварин, Чукотка; западная часть Вывенско-Валоваямской вулканической зоны, Корякия), где число кальцийсодержащих кристаллов оливина возрастает. По данным П. Кепешинскаса и др. [226] к низкокальциевой разности относится только 1 из 17 анализов оливина ксенолитов района р. Валоваям. Кроме того, А.В. Колосков [38] обнаружил в кристаллах оливина из ксенолитов мыса Наварин включения никелистого железа. Эта находка, а также наличие кальцийсодержащих разностей оливина в ксенолитах и присутствие габброидных включений, с нашей точки зрения, может указывать на возможность нахождения в этом районе интрузивных массивов с медно-никелевым сульфидным оруденением норильского типа, не выведенных на дневную поверхность.

Существуют и более обширные ареалы базальтовых излияний, выносящих и мегакристаллы оливина, и ксенолиты, в которых среди кристаллов оливина много кальцийсодержа-

щих разностей. Примером могут служить щелочные базальтоиды Тонкинско-го Становика, занимающие площадь ~210 кв. км по данным В.Г. Семенова и др. [79]. В этой работе приводятся составы 8 кристаллов оливинов из разных типов включений в этих базальтах. За исключением одного анализа, все относятся к кальцийсодержащему типу. В более поздней работе этих же авторов В.Г. Семенова и др. [80] приводятся результаты более детальных исследований, где показано, что не затронутые явлениями плавления оливины являются низкокальциевыми разностями. С этими данными совпадают и результаты изучения перидотитовых включений из этих же лав Д.А. Ионовым и др. [217]. Из приводимых 5 анализов оливинов разных генераций кальцийсодержащим является только мелкокристаллический оливин в тонкокристаллическом агрегате.

Однако встречаются и ксенолиты с кальцийсодержащими первичными оливинами.

Примером могут служить ксенолиты оливиновых вебстеритов, вынесенных палеогеновыми базальтами на территории Сербии [161]. По мнению авторов этой работы, мантия под Сербией пережила не менее 2 этапов метасоматических преобразований, что, как нам представляется, и является причиной существования кальцийсодержащих первичных оливинов в породе. Хотя это явление крайне редкое, исходя из преимущественного распространения низкокальциевых оливинов в мантийных ксенолитах.

В ультраосновных ксенолитах, выносимых магматическими расплавами, довольно часто обнаруживаются следы плавления (карманы плавления) и кристаллизации этих расплавов с образованием новых кристаллических фаз, в частности, оливина. Образовавшийся расплав взаимодействует с ранее существовавшими кристаллами оливина с образованием краевых зон, приближающихся по составу к новообразованным кристаллам оливина из этого расплава. Эти явления, изученные в достаточно большом числе ксенолитов, можно разбить на 2 группы по составу образующихся стекол: силикатные стекла и щелочные карбонатно-силикатные стекла. Причем оба типа стекол, образовавшихся в результате плавления и кальциевого щелочного метасоматоза в ксенолитах, могут встречаться и в рамках одного вулканического ареала. Примером могут служить вулканы четвертичных вулканов Gees, west Eifel, Германия [177; 318]. Явление плавления ксенолитов с образованием силикатных стекол и их кристаллизации описано по результатам исследований ксенолитов Эйфеля, Германия; поля San Luis Potosi, Мексика; вулканического поля Cima, США; западной Виктории, Австралия; вулкана Labait, Танзания [177; 206; 233; 308; 316]. Первичные оливины из этих ксенолитов, судя по приводимым анализам, в подавляющем большинстве случаев являются низкокальциевыми разностями. Краевые части этих кристаллов, контактирующие с областями расплава или жилами расплава, становятся кальцийсодержащими. Вновь образованные кристаллы оливина из возникшего расплава все без исключения являются кальцийсодержащими. Явления, возникающие в ультраосновных ксенолитах при щелочном кальциевом метасоматозе, описаны в работах [167; 214; 216; 237; 276; 318]: гора Melbourne, Антарктида; Эйфель, Германия; четвертичные вулканы. Шпицберген; вулкан Labait, Танзания; острова Kerguelen (Индийский океан); вулкан Vulture, Италия. Несмотря на различия в составах стекол, особенности содержания кальция в кристаллах оливина подобны. Аналогичная картина зональности по содержанию кальция первичных кристаллов оливина, по данным Г.П. Пономарева [64] и А. Гото, К. Иокоямы [197] наблюдается в краевых частях ксенолитов, контактирующих с вмещающим расплавом.

Обсуждение особенностей распределения кальция в оливинах. Рассмотренные выше особенности вхождения кальция в кристаллы оливина из пород различного генезиса в обобщенном виде можно представить следующими тезисами:

1. В эффузивах основного и ультраосновного составов различного возраста, сформировавшихся в различных геодинамических обстановках, кристаллы оливина в подавляющем большинстве случаев являются кальцийсодержащими.

2. В расслоенных интрузивных комплексах различного возраста, за исключением третичного массива о. Рам, большинство кристаллов оливина являются низкокальциевыми.

3. Среди интрузивных массивов, сложенных породами основного состава, не единичными являются массивы с кальцийсодержащими кристаллами оливина.

4. В интрузивных породах 2-го и 3-го слоев современной океанической коры, разделенных на 2 группы по составу (основные и ультраосновные), получены следующие соотношения: в основных породах отношение кальцийсодержащих разностей оливина к низкокальциевым примерно 1:3; в ультраосновных резко преобладают низкокальциевые разности оливина.

5. В интрузивных породах (также разделенных по составу на 2 группы) офиолитовых комплексов, независимо от состава породы, преобладают низкокальциевые разности оливинов; однако среди массивов, сложенных породами основного состава, могут встречаться массивы с кальцийсодержащим оливином.

6. В интрузивных массивах дунит-пироксенит-габбровой формации встречаются массивы с преобладанием кристаллов оливина как кальцийсодержащих, так низкокальциевых разностей.

7. В ультраосновных породах щелочно-ультраосновных комплексов, рассмотренных преимущественно на примерах массивов Алданского щита, преобладают породы с кальцийсодержащим оливином, хотя, вероятно, наложенные метаморфические процессы приводят к потере оливином кальция.

8. В основных интрузивных породах трапповой формации (данные преимущественно по Сибирской платформе) количество кальцийсодержащих разностей оливина является подавляющим.

9. В кимберлитах и лампроитах:

а) среди кристаллов оливина, включенных в кристаллы алмаза, в подавляющем большинстве случаев представлены низкокальциевые разности;

б) кристаллы оливина в породе (кимберлит, лампроит), как вкрапленники, так и микролитовая фаза (граница по размерам), представлены низкокальциевой разностью оливина в подавляющем большинстве случаев;

в) кристаллы оливина из ксенолитов в кимберлитах и лампроитах представлены низкокальциевыми разностями в подавляющем большинстве случаев.

10. Кристаллы оливина в ксенолитах, выносимых щелочными разностями базальтов:

а) как правило, оливины представлены низкокальциевыми разностями;

б) имеются случаи выноса ксенолитов, сложенных кальцийсодержащим оливином;

в) в участках плавления в ксенолитах первичный оливин с краев обогащается кальцием, становясь кальцийсодержащим; новообразованные кристаллы оливина в участках плавления изначально являются кальцийсодержащими.

11. В ряде случаев существует зависимость между содержанием кальция в кристаллах оливина и содержанием LREE в породе.

Перечисленные выше положения позволяют сделать следующие **выводы**:

1. В эффузивах основного-ультраосновного составов, измененных вплоть до уровня амфиболитовой фации, кальций в кристаллах оливина остается практически неподвижным после образования этих кристаллов.

2. Особенности составов шпинелей, включенных в кристаллы оливина, указывают на максимальные глубины кристаллизации этой ассоциации при давлении менее 14 кб. Независимо от последующих условий затвердевания расплава, можно полагать, что в интрузивных массивах типа массива о. Рам (бывшим предположительно магматическим очагом), а также в расслоенных интрузивных массивах кальций в оливине становится подвижным и выносится из кристаллов. Наиболее вероятной причиной этой подвижности являются потоки водного флюида при высокой температуре в теле массива. В пользу участия водного флюида свидетельствует связь содержаний LREE с содержаниями кальция в оливине, на которую указывалось выше для ряда массивов.

3. В тех интрузивных массивах, где потоки водного флюида отсутствуют (силлы, дайки, малые тела), в период остывания кальций остается в кристаллах оливина. Примерами могут служить интрузивные массивы трапповой формации.

4. Толщи пород основного и ультраосновного составов современной океанической коры в рифтовой зоне пронизаны циркуляционными гидротермальными системами (см. ниже). Это приводит к потере кальция кристаллами оливина в остывающих интрузивных телах и практически не затрагивает эффузивы. В ультраосновных породах этот процесс проявлен сильнее. Данные по офиолитам хорошо укладываются в рамки этого положения. В сравнении с кальцийсодержащими оливинами эффузивов это указывает на потерю кальция оливинами в результате циркуляции флюидопотоков до масштабных изменений, или, отчасти, одновременно с региональным метаморфизмом.

5. Содержание кальция в оливинах из интрузивных массивов дунит-пироксенит-габбровой формации указывает на их магматический генезис.

6. Интрузивные массивы щелочно-ультраосновных комплексов можно рассматривать как протрузию с центральной ранее пластичной массой, сложенной преимущественно кальцийсодержащим оливином, равновесным с щелочно-базальтовым расплавом, впоследствии отжатым на периферию этого тела.

7. Преимущественное распространение низкокальциевых разностей оливина в кимберлитах и лампроитах (включенных в кристаллы алмаза, в породе, в ксенолитах) указывает на немагматический генезис кристаллов алмаза в кимберлитах. Это подтверждается и особенностями поведения кальция в кристаллах оливина при плавлении ксенолитов. В пользу нерасплавного генезиса кристаллов алмаза свидетельствует и присутствие среди включений в кристаллы алмаза кристаллов шпинели, что противоречит барической границе шпинелевой фации глубинности в солидусных условиях. Кроме того, невысокие содержания глинозема в этих кристаллах противоречат и расплавному происхождению кристаллов шпинели в условиях алмазной фации глубинности.

8. Присутствие преимущественно низкокальциевых разностей оливина в ксенолитах ультраосновных пород, выносимых кимберлитами и базальтовыми расплавами, указывает на нерасплавную природу составов этих оливинов.

9. Имеются редкие случаи выноса базальтовыми расплавами ультраосновных ксенолитов с кальцийсодержащими оливинами, природа которых может представлять промышленный интерес (медно-никелевое орудуновение).

10. Связь содержания кальция в оливине и содержания LREE в породе была исследована на примере ксенолита шпинелевого лерцолита палеовулкана Шаварын-Царам [47; 48]. Было показано, что воздействие флюидов из выносящего ксенолит расплава ведет к выносу кальция из оливина и неравномерному обогащению самого ксенолита LREE. Подобный процесс идет и в случае серпентинизации – с выносом кальция и увеличением содержаний LREE в замещенной части кристалла [251]. Однако, из-за разной подвижности «контаминанта» и кальция в кристалле оливина эта связь будет проявляться не во всех случаях. Например, кри-

сталлы оливина в эффузивах офиолитовых комплексов не теряют кальций, несмотря на флюидное воздействие, приведшее к изменениям породы на уровне фации зеленых сланцев.

Некоторые из этих положений нуждаются в ограничениях и уточнениях. В первую очередь, это касается влияния флюидов на особенности поведения кальция в оливине при участии флюида от коровых до мантийных условий. Экспериментально установлено, что водный флюид при мантийных условиях является эффективной алмазообразующей средой [59]. Для обоснования вывода о немагматическом генезисе алмазов были собраны экспериментальные данные с участием флюидов и присутствием оливина среди образованных в экспериментах фаз.

Экспериментальные данные мы разнесли по 2 группам: 1. кристаллизация оливина в базальтовых расплавах с участием водного флюида; 2. новообразованный оливин в области субсолидуса при плавлении перидотитов с участием флюидов; новообразованный оливин в солидусной области.

По данным Дж. Берндта и др. [139] и Е. Медарда, Т. Грове [246] при кристаллизации базальтовых расплавов, содержащих воду от ~0.3 до 5 вес. % в условиях давления от атмосферного до 10 кб, во всех 41 эксперименте образовался кальцийсодержащий оливин. Эти данные вполне отчетливо демонстрируют, что и в присутствии водного флюида из базальтовых расплавов кристаллизуются кальцийсодержащие разновидности оливина, хотя имеющееся количество этих данных не является исчерпывающим обоснованием.

Экспериментальные данные по исследованию перидотитов в солидусной и субсолидусной областях в широком интервале температур и давлений с частичным плавлением и участием флюидов были собраны из следующих работ: Г. Брей и др. [149] – плавление карбонатизированного перидотита (60–100 кб, 1300–1700 °С) – из 35 экспериментов в 14 случаях образовались высококальциевые оливины; С. Фолей и др. [182] – плавление перидотита (40–60 кб, 1090–1290 °С, 0.5–0.6 вес. % H₂O, 2–3.2 вес. % CO₂) – из 13 экспериментов в 5 случаях оливин кальцийсодержащий; Ц. Тилл и др. [303] плавление перидотита (32–60 кб, 740–1200 °С, содержание H₂O до 14.5 вес. %) – из 29 экспериментов в 5 случаях образовались кальцийсодержащие оливины; Т. Теннер и др. [301] – солидус смеси оливин и низкокальциевый пироксен (содержание CaO в смеси менее 3.8 вес. %) (100–130 кб, 1350–1450 °С) во всех 14 экспериментах оливин, вадслеит, рингвудит представлены низкокальциевыми разновидностями; С. Кеснав и др. [229] – упрощенный карбонатизированный перидотит (системы SMAS–CO₂, CMS–CO₂) (содержание CaO 10–20 вес. %, 100–260 кб, 1525–1900 °С) – во всех 20 экспериментах оливин, вадслеит, рингвудит представлены кальцийсодержащими разновидностями; С. Гош и др. [190] – солидус, модельный карбонатизированный перидотит (содержание CaO–3.6 вес. %, 100–200 кб, 1300–1600 °С) – в 17 экспериментах оливин, вадслеит, рингвудит представлены низкокальциевой разновидностью; Дж. Балта и др. [127] – (30 кб, 1375 °С) плавление гранатового перидотита (CaO 8–9 вес. %; H₂O 2–6 вес. %; CO₂ 0.1–0.3 вес. %) – во всех 10 экспериментах оливин представлен кальцийсодержащей разновидностью; П. Фумагалли, С. Поли [185] – солидус модельного гидратированного перидотита (среди фаз наряду с оливином присутствуют хлорит и амфибол) (NCFMASH) – (содержания CaO 8.32 вес. % и 3.11 вес. %, 20–65 кб, 680–800 °С) – 11 составов оливина в экспериментах, где содержания CaO 8.32 вес. %, представлены кальцийсодержащим оливином; в 4 экспериментах, где содержания CaO 3.11 вес. %, оливин представлен низкокальциевой разновидностью.

Экспериментальные результаты Г. Брея и др. [149], С. Фолей и др. [182], Ц. Тилла и др. [303], Т. Теннера и др. [301] С. Гоша и др. [190], в которых в субсолидусной и солидусной областях образовался преимущественно низкокальциевый оливин, указывают на образование оливина кимберлитов в солидусной области и образование алмаза в твердофазной среде. Эксперименты С. Кеснава и др. [229], Дж. Балта и др. [127], в которых кальцийсодержащий оливин равновесен с высококальциевым расплавом, с другой стороны, также указывают на образование алмаза в твердофазной среде, т. к. (см. выше) все разновидности оливина в кимберлитах являются низкокальциевыми фазами.

В пользу твердофазного генезиса оливинов различных генераций в кимберлитах и быстрого достижения кимберлитовыми магмами дневной поверхности свидетельствуют данные по диффузии кальция в оливине San Carlos [298], исследованного при температуре 1300 °С и контролируемой фугитивности кислорода за период времени 25 суток. За этот срок кальций проник в изначально низкокальциевый кристалл оливина на глубину ~50 мк. В кристаллах оливина из кимберлитов, погруженных в хлорит-серпентин-карбонатную основную массу, вероятно, подобную первичному расплаву, такой зональности нет, несмотря на попытки ее найти.

Экспериментальные данные П. Фумагалли, С. Поли [185] находятся в противоречии с данными по преимущественному низкокальциевому составу оливина из интрузивных пород как современной океанической коры, так и офиолитовых комплексов (см. выше). По данным

Ю.А. Богданова [11] в низкосрединговых хребтах системы СОХ существуют две гидротермальные циркуляционные системы, одна из которых пересекает всю океаническую кору. В офиолитовых комплексах породы, как правило, изменены в диапазоне от фации зеленых сланцев до амфиболитовой фации, и оливины, согласно нашим обзорам, представлены низкокальциевой разностью. Это несоответствие, вероятно, связано с более высокими барическими условиями в экспериментах П. Фумагалли, С. Поли [185]. Возможно, отчасти аналогом этих экспериментальных результатов можно считать деформированные, серпентинизированные мантийные ксенолиты Fuerteventura Канарских островов, исследованных М. Абу Эль-Русом и др. [119], в которых 13 из 20 анализов – кальцийсодержащая разность оливина. Хотя можно допустить, что в условиях серпентинизации кальций не выносятся из оливина.

Поведение кальция в оливине при метаморфических изменениях породы в коровых условиях на сегодня выглядит достаточно запутанным из-за разнообразия влияющих величин. Некоторые особенности этих изменений приведены ниже:

а) Фациальный уровень вторичных изменений породы. Оливин в образцах габбро, поднятых в Каймановом желобе, начинает замещаться в 14 из 19 образцов [219]. Авторами минералогически зафиксирован тренд метаморфизма с максимумом, приходящимся на амфиболитовую фацию (~700 °С), при активном участии морской воды. Приводимые анализы кристаллов оливина (2 анализа) представлены низкокальциевыми разностями. Это, по нашему предположению, указывает на вынос кальция из кристаллов оливина, предваряющий собственно замещение оливина вторичными минералами. Идет ли этот процесс при более низких степенях метаморфизма, оценить сложно. Судя по офиолитовым комплексам и зеленокаменным поясам архея, где изменения на уровне фации зеленых сланцев достаточно широко распространены, затрагивая как эффузивные, так и интрузивные разности пород, оливин представлен низкокальциевой разностью только в интрузивных породах. Неясно, является ли зеленосланцевый метаморфизм максимальным уровнем, или соответствует ретроградной ветви метаморфизма. Непонятным является и факт сохранности кальция в оливине эффузивов офиолитов и зеленокаменных поясов (см. выше пункт 1 выводов раздела). Косвенно на влияние температурных условий, возможно, указывает преобладание низкокальциевых разностей оливина в интрузивных породах ультраосновного состава относительно габброидов во втором и третьем слоях современной океанической коры.

б) Оливины с друзитовыми (коронарными) образованиями вокруг них. Коронарные структуры в большинстве случаев образуются на контакте кристаллов оливина с кристаллами плагиоклаза, хотя первичными фазами для подобных структур могут быть и другие минералы. Эти коронарные структуры развиты преимущественно в габброидных массивах протерозойского возраста и найдены практически во всех структурах протерозойского возраста на территориях многих стран (было собрано порядка 60 публикаций по различным регионам, в которых приводятся составы кристаллов оливина).

Встречаются коронарные структуры вокруг оливина как в анортозитовых массивах [99], так и в интрузивных массивах более позднего возраста [195; 215]. Приводимые во всех работах анализы оливина представлены низкокальциевой разностью, что указывает на потерю кальция кристаллами оливина.

в) Влияние состава кристаллов оливина. Меловой интрузивный комплекс Mont Saint-Hilaire (Канада) [290] сложен 3 группами пород – габбро, диоритами и сиенитами, испытывавшими метаморфизм на уровне цеолитовой фации при температурах менее 400 °С.

Кристаллы оливина присутствуют в габбро и диоритах, причем в габбро они более магнезиальные. В габбро, согласно приведенным в указанной работе 6 анализам, оливины относятся к низкокальциевой разности, тогда как оливины из диоритов (38 анализов) за исключением 2 анализов, представлены кальцийсодержащими разностями. По нашим представлениям, в теле этого массива существовали флюидопотоки в период его остывания, и в габбро произошла потеря кальция кристаллами оливина, тогда как более железистые оливины из диоритов его удержали. Вероятно, кроме прямой экспериментальной проверки этого явления, полезными могут оказаться данные подвижности LREE в этих породах и минеральных фазах, их слагающих.

г) Вторичный оливин. Необласти оливина образуются при метасоматических преобразованиях ультраосновных пород. В качестве примеров были выбраны: ультрамафитовое тело; предположительно фрагмент коматиитового потока (Австралия) [196]; тела перидотитов и дунитов из диатрем плато Colorado США [295]. Новообразованные области оливина (низкокальциевые), образовавшиеся по ортокоматииту в парагенезисе с энстатитом, тремолитом, кумингтонитом, тальком и хлоритом (минеральный состав меняется по разрезу тела), сформировались при температуре ~550 °С и давлении ~3 кб [196]. Безкальциевыми являются и области оливина, образовавшиеся по интрузивным гипербазитам (антигоритовый перидотит – 2 анализа; перидотиты – 8 анализов) [295]. Аналогичные результаты (все 7 анализов являются низкокальциевыми разностями) наблюдаются при высокобарической дегидратации серпентинита, переходящего в хлоритизированный гарцбургит в ультраосновном комплексе Cerro del Almirante, Nevado-Filabride, Испания [262].

д) Метасоматический оливин скарнов. Были использованы данные по скарнам, образованным на контакте известняков с основными расплавами (Довыренский массив, Россия [311]; интрузивный массив в вулканическом районе Colli Albani, Италия [187]) и с кислыми расплавами (гранодиориты района Sierra Nevada, США [168]; гранитоиды Los Santos-Valdelacasa, Испания [304]). В случае контакта с основными породами образуется оливин с содержанием форстеритового минала ~80–90 %, и в 19 анализах только три представлены низкокальциевыми разностями. При контакте с кислыми расплавами образуются практически чистые форстериты, с мизерными содержаниями кальция (12 анализов, из которых только 2 представлены кальцийсодержащей разностью).

Оливины массива Ронда (Испания), сложенного высокобарическими ультрамафитами. Составы кристаллов оливина были заимствованы из работ Дж.-Л. Бодинера и др. [143]; В. Соустелле и др. [297]. Магнезиальность приводимых 19 анализов кристаллов оливина колеблется в диапазоне ~80–90 % форстеритового минала и все они являются низкокальциевыми разностями. Все кристаллы содержат очень мало кальция, что сближает их с оливинами скарнов, образовавшихся на контакте с кислыми расплавами. Отсутствие кальция в кристаллах оливина указывает на немагматический их состав.

Однако в келифитовых каемках, существующих в гранатовых пироксенитах массива, по данным М. Обата [260] новообразованный оливин – кальцийсодержащий, что, по нашему мнению, свидетельствует о следах плавления, подобных карманам плавления в ксенолитах.

В целом, все эти результаты указывают на то, что преимущественно низкокальциевый состав оливинов образуется немагматическим путем. Для скарнов поведение кальция в оливине выглядит более сложно и, вероятно, зависит от основности контактирующего магматического расплава.

Список литературы

1. *Авдейко Г.П., Ванде-Кирков Ю.В., Дмитриенко Н.К., Малетв Е.Ф., Пономарев Г.П., Флоренский И.В.* Вулканогенно-кремнистые формации Камчатки. Новосибирск: Наука, 1974. 114 с.
2. *Аглонов В.С., Золотарев А.А.* Особенности химического состава оливина Талнахского платиноидно-медно-никелевого месторождения (северо-запад Сибирской платформы) // ЗРМО. 2008. Т. 6. С. 98–110.
3. *Арискин А.А., Бармина Г.С., Озеров А.Ю., Нильсен Р.Л.* Генезис высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана // Петрология. 1995. Т. 3. № 5. С. 496–521.
4. *Ащепков И.В.* Глубинные ксенолиты Байкальского рифта. Новосибирск: Наука, 1991. 158 с.
5. *Базылев Б.А., Магакян Р., Силантьев С.А., Игнатенко К.И., Ромашева Т.В. Ксенофонтос К.* Петрология гипербазитов комплекса Мамония, юго-западный Кипр // Петрология. 1993. Т. 1. № 4. С. 348–378.
6. *Базылев Б.А.* Петрология и геохимия океанических и альпинотипных шпинелевых перидотитов в связи с проблемой эволюции мантийного вещества. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. М., 2003. 49 с.
7. *Батанова В.А., Астраханцев О.В., Сидоров Е.Г.* Дуниты Гальмознанского гипербазит-габбрового массива (Корякское нагорье) // Известия АН СССР. Сер. геол. 1991. № 1. С. 24–35.
8. *Батанова В.Г., Савельева Г.Н.* Миграция расплавов в мантии под зонами спрединга и образование дунитов замещения: обзор проблемы // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 9. С. 992–1012.
9. *Батти М.Х.* Петрогенезис новозеландской спилитовой серии // Проблемы вулканизма. М.: ИЛ. 1963. С. 137–157.
10. *Бобров А.В., Литвин Ю.А.* Перидотит-эклогит-карбонатитовые системы при 7.0–8.5 ГПа: Концентрационный барьер нуклеации алмаза и сингенезис его силикатных и карбонатных включений // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 12. С. 1571–1587.
11. *Богданов Ю.А.* Гидротермальные рудопроявления рифтов Срединно-Атлантического хребта. М.: Научный Мир, 1997. 164 с.
12. *Борисова А.Ю., Портнягин М.В., Суцневская Н.М., Цехоня Т.И., Кононкова Н.Н.* Исследование оливиновых базальтов поднятия Афанасия Никитина (Индийский океан): петрология и особенности вторичных изменений // Геохимия. 1997. № 4. С. 398–412.
13. *Васильев Б.И.* Геологическое строение и происхождение Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2009. 560 с.
14. *Васильев Ю.Р.* Природа оливинов в щелочно-ультраосновных интрузивных комплексах // Петрология гипербазитов и базитов Сибири, Дальнего Востока и Монголии. Новосибирск: Наука, 1980. С. 103–120.
15. *Волченко Ю.А., Иванов К.С., Коротеев В.А., Оже Т.* Структурно-вещественная эволюция комплексов платиноносного пояса Урала при формировании хромит-платиновых месторождений уральского типа. Часть II // Литосфера. 2007. № 4. С. 73–101.
16. *Волынец О.Н., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Ягодзински Дз.М.* Харчинский и Заречный вулканы – уникальные центры позднеплейстоценовых магнезиальных базаль-

- тов на Камчатке: вещественный состав вулканических пород // Вулканология и сейсмология. 1999. № 1. С.31–45.
17. *Вольнец О.Н., Пономарева В.В., Бабанский А.Д.* Магнезиальные базальты андезитового вулкана Шивелуч, Камчатка // Петрология. 1997. Т. 5. № 2. С. 206–221.
 18. *Вольнец О.Н., Щека С.А., Дубик Ю.М.* Оливин-анортитовые включения вулканов Камчатки и Курил // Включения в вулканических породах Курило-Камчатской островной дуги. М.: Наука, 1978. С. 124–167.
 19. *Геншафт Ю.С., Салтыковский А.Я.* Исландия: глубинное строение, эволюция и интрузивный магматизм. М.: ГЕОС, 1999. 363 с.
 20. *Глебовицкий В.А., Никитина Л.П., Салтыкова А.К., Пушкарев Ю.Д., Овчинников Н.О., Бабушкина М.С., Ащепков И.В.* Термальная и химическая неоднородность верхней мантии Байкало-Монгольского региона // Петрология. 2007. Т. 15. № 1. С. 61–92.
 21. *Головин А.В., Шарыгин В.В., Похиленко Н.П.* Расплавные включения во вкрапленниках оливина из неизменных кимберлитов трубки Удачная (Восточная Якутия): некоторые аспекты эволюции кимберлитовых магм на поздних стадиях кристаллизации // Петрология. 2007. Т. 15. № 2. С. 178–195.
 22. *Горбач Н.В.* Первый лавовый поток на экструзивном куполе вулкана Шивелуч, 2004 // Вулканология и сейсмология, 2006. № 2. С. 9–16.
 23. *Горшков А.И., Селиверстов В.А., Байков А.И., Аникин Л.П., Сивцов А.В., Дунин-Барковский Р.Л.* Кристаллохимия и генезис карбонадо из меланократовых базальтоидов вулкана Авача на Камчатке // Геология рудных месторождений. 1995. Т. 37. № 1. С. 54–66.
 24. *Гриб Е.Н.* Минералогические особенности оливинсодержащих базальтов Карымского вулканического центра // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 2. С.17–33.
 25. *Гриб Е.Н., Перепелов А.Б.* Оливинсодержащие базальты Карымского вулканического центра: минералогия, петрогенезис и источники магм // Вулканология и сейсмология. 2008. № 4. С.14–35.
 26. *Гроховская Т.Л., Шарков Е.В., Тевелев А.В., Смолькин В.Ф., Чистяков А.В., Лапутина И.П., Муравицкая Г.Н.* Петрология расслоенного интрузива горы Генеральской, Кольский полуостров // Петрология. 1999. Т. 7. № 5. С. 539–558.
 27. *Джэйкс А., Луис Дж., Смит К.* Кимберлиты и лампроиты западной Австралии. М.: Наука, 428 с.
 28. *Дмитриев Л.В.* Вариации состава базальтов срединно-океанических хребтов как функция геодинамической обстановки их формирования // Петрология. 1998. Т. 6. № 4. С. 340–362.
 29. *Ермаков В.А., Фарберов А.И., Хотин М.Ю., Ванде-Кирков Ю.В.* Включения габброидов и амфиболитов в вулканических породах Камчатки // Включения в вулканических породах Курило-Камчатской островной дуги. М.: Наука, 1978. С. 67–123.
 30. *Золотухин В.В., Васильев В.Р., Дюжиков О.А.* Многообразие траппов и исходные магмы (на примере Сибирской платформы). Новосибирск: Наука, 1989. 245 с.
 31. *Золотухин В.В., Карнов Г.П., Ткаченко Н.А.* Петрология Северо-Ванаварского базитового лакколита // Труды ИГГ. Петрология гипербазитов и базитов. 1990. № 758. С. 200–225.
 32. *Иванов О.К.* Ультрамафические пегматиты пироксен-дунитовых массивов платиноносного пояса Урала. Свердловск. Препринт. 1986. 57 с.

33. *Каменецкий В.С.* Новый метод определения примитивных расплавов на примере изучения расплавных включений в шпинели толеитов района FAMOUS, Срединно-Атлантический хребет // *Петрология*. 1995. Т. 3. № 5. С. 522–526.
34. *Коваленко В.И., Наумов В.Б., Гирнис А.В., Дорофеева В.А., Ярмолюк В.В.* Летучие компоненты в базальтовых магмах и мантийных источниках океанских островов: II. Оценка содержаний в мантийных резервуарах // *Геохимия*. 2007. № 4. С. 355–369.
35. *Коваленко В.И., Наумов В.Б., Гирнис А.В., Дорофеева В.А., Ярмолюк В.В.* Средние составы магм мантии срединно-океанических хребтов и внутриплитных океанических и континентальных обстановок по данным изучения расплавных включений и закалочных стекол базальтов. *Петрология*. 2007. Т. 15. № 4. С. 361–396.
36. *Коваленко В.И., Наумов В.Б., Ярмолюк В.В., Дорофеева В.А.* Летучие компоненты (H₂O, CO₂, Cl, F, S) в базитовых магмах различных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений и закалочных стекол // *Петрология*. 2000. Т. 8. № 2. С. 131–164.
37. *Коваленко В.И., Наумов В.Б., Толстых М.Л., Царева Г.М., Кононкова Н.Н.* Состав и источники магм кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) по данным изучения расплавных включений // *Геохимия*. 2004. № 5. С. 467–487.
38. *Колосков А.В.* Ультраосновные включения и вулканиты как саморегулирующаяся геологическая система. М.: Научный Мир, 1999. 222 с.
39. *Корякско-Камчатский регион – новая платиноносная провинция России.* Коллектив авторов. СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2002. 383 с. + 3 вкл. (ЗАО «Коряк-геолдобыча»).
40. *Костюхин М.Н., Ремизов Д.Н.* Петрология офиолитов Хадатинского габбро-перидотитового массива (Полярный Урал). СПб.: Наука, 1995. 117 с.
41. *Криволицкая Н.А., Арискин А.А., Служеникин С.Ф., Туровцев Д.М.* Геохимическая термометрия пород Талнахского интрузива: оценка состава расплава и степени раскристаллизованности исходной магмы // *Петрология*. 2001. Т. 9. № 5. С. 451–479.
42. *Криволицкая Н.А., Михайлов Н.М., Снисар С.Г., Гонгальский Б.И.* Внутреннее строение и состав Микчангдинского ультрабазит-базитового массива в Норильском рудном районе (Сибирская трапповая провинция) // *Вестник КРАУНЦ*. 2009б. № 2. Вып.14. С. 29–43.
43. *Криволицкая Н.А., Соболев А.В., Кузьмин Д.В., Свирская Н.М.* Уникальные зональные оливины из ультрабазит-базитового массива Норильского района // *ДАН*. 2009а. Т. 429. № 4. С. 518–522.
44. *Куприн П.Н.* Геодинамика земной коры океанического типа (к вопросу о структуре океанической коры) // *Отечественная геология*. 2010. № 6. С. 65–74.
45. *Лавров М.М.* Оливины и пироксены Бураковской рассленной интрузии // *Минералогия магматических и метаморфических пород докембрия Карелии*. Петрозаводск. 1994. С. 7–41.
46. *Латыпов Р.М., Смолькин В.Ф., Алапиеви Т.Т.* Тренд дифференциации и состав исходного расплава никеленосных интрузий габбро-верлитов Печенги, Кольский полуостров. *Петрология*. 2001. Т. 9. № 4. С. 381–397.
47. *Леснов Ф.П., Козьменко О.А., Николаева И.В., Палесский С.В.* Формы нахождения несовместимых элементов-примесей в крупном ксенолите в щелочных базальтах палеовулкана Шаварын Царам-1 (Западная Монголия) // *Геология и геофизика*. 2009б. Т. 50. № 12. С. 1371–1384.

48. *Леснов Ф.П., Палесский С.В., Николаева И.В., Козьменко О.А., Кучкин А.М., Королюк В.Н.* Детальные минералого-геохимические исследования крупного ксенолита шпинелевых перцолитов из щелочных базальтов палеовулкана Шаварын Царам (Монголия) // *Геохимия*. 2009а. № 1. С. 21–44.
49. *Леснов Ф.П., Чернышов А.И., Истомин В.Е.* Геохимические свойства и типоморфизм оливинов из гетерогенных ультрамафитовых пород // *Геохимия*. 2005. № 4. С. 395–414.
50. Магматические горные породы. Т. 3. М.: Наука, 1985. 485 с.
51. Магматические горные породы. Т. 5. М.: Наука, 1988. 508 с.
52. *Мартынов Ю.А., Чащин А.А.* Породообразующие минералы основных эффузивов Мутновского геотермального района // Новые данные по петрологии магматических и метаморфических пород Камчатки. Владивосток. 1989. С. 112–128.
53. *Мионов Н.Л., Портнягин М.В., Плечов П.Ю., Хубуная С.А.* Заключительные этапы эволюции магм Ключевского вулкана (Камчатка) по данным изучения расплавных включений в минералах высокоглиноземистых базальтов // *Петрология*. 2001. Т. 9. № 1. С. 51–69.
54. *Наумов В.Б., Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Дорофеева В.А.* Концентрация летучих компонентов (H₂O, Cl, F, S, CO₂) в магматических расплавах различных геодинамических обстановок // *Геохимия*. 2000. № 5. С. 555–564.
55. *Наумов В.Б., Толстых Е.Н., Гриб Е.Н., Леонов В.Л., Кононкова Н.Н.* Химический состав, летучие компоненты и элементы-примеси расплавов Карымского вулканического центра (Камчатка) и вулкана Головнина (о. Кунашир) по данным изучения расплавных включений в минералах // *Петрология*. 2008. Т.16. № 1. С. 3–20.
56. *Некрасов И.Я., Ленников А.М., Октябрьский Р.А., Залищак Б.Л., Сапин В.И.* Петрология и платиноносность колцевых щелочно-ультраосновных комплексов. 1994. М.: Наука, 381 с.
57. *Носова А.А., Сазонова Л.В., Горожанин В.М., Кузьменкова О.Ф., Дубинина Е.О.* Мезопротерозойские оливиновые габбро-нориты Башкирского антиклинория, Южный Урал: родоначальные расплавы и особенности эволюции магм // *Петрология*. 2010. Т. 18. № 1. С. 53–87.
58. *Паланджян С.А.* Особенности строения и состава океанической литосферы, формировавшейся при различных скоростях спрединга // *Геотектоника*. 2007. № 6. С. 78–94.
59. *Пальянов Ю.М., Сокол А.Г.* Экспериментальное моделирование процессов образования алмаза во флюидных средах // Тезисы докладов XVI Российского совещания по экспериментальной минералогии. Черноголовка. 2010. С. 63.
60. *Перцев А.Н., Савельева Г.Н., Астраханцев О.В.* Магматическая природа ультрамафит-габбровой ассоциации массива Кытлым, платиноносный пояс Урала // *Петрология*. 2000. Т. 8. № 4. С. 370–393.
61. Петрографический кодекс. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. 2009. 200 с.
62. *Плечов П.Ю., Шишкина Т.А., Ермаков В.А., Портнягин М.В.* Условия формирования алливалитов – оливин-анортитовых кристаллических включений в вулканиках Курило-Камчатской дуги // *Петрология*. Т. 16. № 3. С. 248–276.
63. *Поляков Г.В., Шелепаев Р.А., Хоа Ч., Изох А.Э., Балыкин П.А., Фьонг Н.Т., Хунг Ч.К., Ньен Б.А.* Расслоенный перидотит-габбровый Плутон Нуйчуа как проявление пермско-триасового мантийного плюма на севере Вьетнама // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. № 6. С. 653–669.

64. *Пономарев Г.П.* Петроструктурные и минералогические показатели генетических особенностей гипербазитов и базитов островодужных и океанических областей // Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Петропавловск-Камчатский, 1995. 62 с.
65. *Пономарев Г.П., Пузанков М.Ю.* Распределение железа и магния в системе расплав–шпинель–оливин по экспериментальным данным. Геологические приложения. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ, 2002. 80 с.
66. *Пономарев Г.П., Павлюков В.К., Абдурахманов А.И., Рыбин А.В., Бородин О.С.* Распределение радиоактивных изотопов в отложениях на фумарольных полях вулкана Кудрявый (остров Итуруп, Курильские острова) // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога 27–29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 213–225.
67. *Портнягин М.В., Миронов Н.Л., Матвеев С.В., Плечов П.Ю.* Петрология «авачитов» – высокомагнезиальных базальтов Авачинского вулкана (Камчатка): II. Расплавные включения в оливине // Петрология. Т. 13. № 4. 2005. С. 358–388.
68. *Портнягин М.В., Плечов П.Ю., Матвеев С.В., Осипенко А.Б., Миронов Н.Л.* Петрология «авачитов» – высокомагнезиальных базальтов Авачинского вулкана (Камчатка): I. Общая характеристика, состав пород и минералов // Петрология. Т. 13. № 2. 2005. С. 115–138.
69. *Приходько В.С., Пономарев Г.П.* Составы породообразующих минералов дунитов Кондерского массива // Тихоокеанская геология. 1990. № 2. С. 59–69.
70. *Пухтель И.С., Богатилов О.А., Куликов В.С., Щипанский А.А.* Петрология палеопротерозойского лавового озера в районе горы Большая Левгора, центральная часть Ветрового Пояса, Балтийский щит // Петрология. 1997. Т. 5. № 4. С. 339–361.
71. *Пушкарёв Е.В.* Петрология Уктусского дунит-клинопироксенит-габбрового массива (Средний Урал). Екатеринбург. УРО РАН. 2000. С. 296.
72. *Пушкарёв Е.В., Аникина Е.В., Гарути Д., Заккарини Ф.* Хромит-платиновое оруденение нижнетагильского типа на Урале: структурно-вещественная характеристика и проблема генезиса // Литосфера. 2007. № 3. С. 28–65.
73. *Пуцаровский Ю.М., Пуцаровский Д.Ю.* Геология мантии Земли. М.: ГЕОС, 2010. 140 с.
74. *Рудашевский Н.С., Мочалов А.Г., Орлова М.П.* Включения силикатов в природных железо-платиновых сплавах Кондерского массива // ДАН СССР. 1982. Т. 266. № 4. С. 977–981.
75. *Рябчиков И.Д., Козарко Л.Н., Соловова И.П.* Физико-химические условия магмаобразования в основании сибирского плюма по данным исследования расплавных микровключений в меймечитах и щелочных пикритах Маймеча-Котуйской провинции // Петрология. 2009. Т. 17. № 3. С. 311–323.
76. *Савельева Г.Н.* Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре. М.: Наука, 1987. 245 с.
77. *Савельева Г.Н., Бортников Н.С., Пейве А.А., Сколотнев С.Г.* Ультраосновные породы впадины Маркова, рифтовая долина Срединно-Атлантического хребта // Геохимия. 2006. № 11. С. 1192–1208.
78. *Савельева Г.Н., Соболев А.В., Батанова В.Г., Суслов П.В., Брюгманн Г.* Структура каналов течения расплавов в мантии // Геотектоника. 2008. № 6. С. 25–45.
79. *Семенова В.Г., Соловьева Л.В., Владимиров Б.М.* Глубинные включения в щелочных базальтоидах Тонкинского Становика. Новосибирск: Наука, 1984. 110 с.

80. Семенова В.Г., Соловьева Л.П., Владимиров Б.М., Завьялова Л.Л., Баранкевич В.Г. Стекла и закалочные фазы в глубинных включениях из щелочных базальтоидов Тонкинского Становика // Глубинные ксенолиты и строение литосферы. М.: Наука, 1987. С. 73–95.
81. Силантьев С.А., Краснова Е.А., Канат М., Бортников Н.С., Конникова Н.Н., Бельтнев В.Е. Перидотит-габбро-трондьемитовая ассоциация пород Срединно-Атлантического хребта в районе $12^{\circ}58' - 14^{\circ}45'$ с. ш.: гидротермальные поля Ашадзаде и Логачев // Геохимия. 2011. № 4. С. 339–372.
82. Симонов В.А., Колобов В.Ю., Пейве А.А. Петрология и геохимия геодинамических процессов в Центральной Атлантике. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 1999. 224 с.
83. Слезин Ю.Б. Физические характеристики извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984. С. 143–176.
84. Служеникин С.Ф., Туровцев Д.М., Криволицкая Н.А., Покровский Б.Г., Журавлев Д.З. Петрология, метаморфизм и оруденение массивов Нижнеталнахского типа (Норильский район) // Современные проблемы формационного анализа, петрология и рудоносность магматических образований. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2003. С. 312–313.
85. Смолькин В.Ф. Оливин и клинопироксен Пильгуярвинского габбро-верлитового интрузива (Печенга) // Минералы и парагенезисы минералов. Ленинград: Наука, 1978. С.55–71.
86. Смолькин В.Ф., Борисова В.В., Светов С.А., Борисов А.Е. Позднеархейские коматииты Урагубско-Титовской структуры, северо-запад Кольского региона // Петрология. 2000. Т. 8. № 2. С. 199–204.
87. Соболев А.В., Криволицкая Н.А., Кузьмин Д.В. Петрология родоначальных расплавов и мантийных источников магм Сибирской трапповой провинции // Петрология. 2009. Т. 17. № 3. С. 276–310.
88. Соболев А.В., Никогосян И.К. Петрология магматизма долгоживущих мантийных струй: Гавайские о-ва (Тихий океан) и о-в Реюньон (Индийский океан) // Петрология. 1994. Т. 2. № 2. С. 131–168.
89. Соболев А.В., Портнягин М.В., Дмитриев Л.В., Цамерян О.П., Данюшевский Л.В., Конникова Н.Н., Шимизу Н., Робинсон П. Петрология ультрамафитовых лав и ассоциирующих пород массива Троодос, о-в Кипр // Петрология. 1993б. № 4. С. 379–412.
90. Соболев А.В., Слуцкий А.Б. Состав и условия кристаллизации исходного расплава сибирских меймечитов в связи с общей проблемой ультраосновных магм // Геология и геофизика. 1984. № 12. С. 97–110.
91. Соболев А.В., Соболев С.В., Кузьмин Д.В., Малич К.Н., Петрунин А.Г. Механизм образования сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 12. С. 1293–1334.
92. Соболев А.В., Цамерян О.П., Портнягин М.В., Каменецкий В.С., Данюшевский Л.В., Дмитриев Л.В., Жорон Ж.-Л. Ультрамафические магмы офиолитового массива Троодос (о. Кипр) геохимия и минералогия // Геохимия. 1993а. № 2. С.189–207.
93. Соловьева Л.В., Лаврентьев Ю.Г., Егоров К.Н., Костровицкий С.И., Королюк В.Н., Суворова Л.Ф. Генетическая связь деформированных перидотитов и мегакристов граната из кимберлитов с астеносферными расплавами // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 4. С. 281–301.

94. *Суцевская Н.М.* Толеитовый магматизм Индо-Атлантического сегмента Земли // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Москва, 2007. 56 с.
95. *Тарарин И.А., Чубаров В.М., Филосова Т.М.* Петрология и генезис габброидных пород офиолитового комплекса зоны разлома Хантер (Тихий океан) // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22. № 3. С. 74–92.
96. *Толстых М.Л., Наумов В.Б., Кононкова Н.Н.* Три типа расплавов, участвующих в формировании андезитобазальтов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, южные Курилы) // Геохимия. 1997. № 4. С. 391–397.
97. *Толстых М.Л., Бабанский А.Д., Наумов В.Б., Базанова Л.И., Кононкова Н.Н.* Химический состав, элементы-примеси и летучие компоненты расплавных включений в минералах андезитов вулкана Авачинский, Камчатка // Геохимия. № 11. 2002. С. 1229–1237.
98. *Толстых М.Л., Наумов В.Б., Бабанский А.Д., Хубуная С.А., Кононкова Н.Н.* Состав расплава и условия кристаллизации андезитов вулкана Шивелуч (Камчатка) по данным изучения включений в минералах // ДАН, 1998. Т. 359. № 5. С. 676–679.
99. *Томиленко А.А., Ковязин С.В.* Формирование коронарных структур вокруг оливина в анортозитах Коростеньского плутона, Украинский щит: минералогия, геохимия, флюидные включения // Петрология. 2008. Т. 16. № 1. С. 92–109.
100. *Томишин М.Д., Копылова А.Г., Тянь О.А.* Петрохимическое разнообразие траппов восточной периферии Тунгусской синеклизы // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 1. С. 72–82.
101. *Уханов А.В., Козарко Л.Н., Кононкова Н.Н., Кригман Л.Д., Мериньо Х., Норман А.* О происхождении хромитовых руд у контакта перидотитов с габброидами: пример месторождения Мерседита, Куба // Геохимия. 1985. № 1. С. 59–68.
102. *Уэйдджер Л., Браун Г.* Расслоенные изверженные породы. М.: Мир, 1970. 551 с.
103. *Федоров И.И., Чепурнов А.И., Сонин В.М., Чепурнов А.А., Логвинова А.М.* Экспериментальное и термодинамическое изучение кристаллизации алмаза и силикатов в металл-силикатно-углеродной системе // Геохимия. 2008. № 4. С. 376–386.
104. *Феритатер Г.Б., Пушкарев Е.Б.* Нефелинсодержащие тылаиты в дунит-клинопироксенит-габбровой формации платиноносного пояса Урала // Известия АН СССР. Сер. геол. 1992. № 4. С. 74–84.
105. *Флеров Г.Б., Андреев В.Н., Будников В.А., Цюрупа А.И.* Петрология продуктов извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984. С. 223–284.
106. *Франц Л., Брай Г.П., Окруш М.* Смещение минерального равновесия при метасоматозе в мантийных ксенолитах из кимберлитовой провинции Гибсон (Намибия) // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 1. С. 245–259.
107. *Фролова Т.И., Бейли Д., Бурикова И.А., Дриль С.И.* О генетической общности низкокремнеземистых оливин-анортитовых включений и вмещающих пород Курильской островной дуги // Тихоокеанская геология. №5. 1988. С. 27–35.
108. *Фролова Т.И., Плечов П.Ю., Тихомиров П.Л., Чураков С.В.* Расплавные включения в минералах алливалитов Курило-Камчатской островной дуги // Геохимия. 2001. № 4. С. 382–393.
109. *Хаин Е.В., Ремизов Д.Н.* Шесть типов ультрабазит-базитовых комплексов в складчатых сооружениях или проблема существования астеносферных окон под континентальными окраинами, испытавшими субдукцию офиолитов // Ультрабазит-базитовые

- комплексы складчатых областей и связанных с ними месторождений. Екатеринбург. 2009. Т. 2. С. 237–242.
110. *Хубуная С.А., Богоявленский С.О., Новгородцева Т.Ю., Округина А.М.* Минералогические особенности магнезиальных базальтов как отражение фракционирования в магматической камере Ключевского вулкана // *Вулканология и сейсмология*. 1993. № 3. С. 46–68.
 111. *Хубуная С.А., Соболев А.В.* Первичные расплавы известково-щелочных магнезиальных базальтов Ключевского вулкана (Камчатка) // *ДАН*. Т. 360. № 1. С. 100–102.
 112. *Чащин А.А.* Петрология пород вулканов Горелый и Мутновский (Южная Камчатка) // *Диссертация на соискание ученой степени канд. геол.-минерал. наук*. Владивосток, 2008. 306 с.
 113. *Чистяков А.В., Шарков Е.В.* Петрология раннепалеопротерозойского Бураковского комплекса, Южная Карелия // *Петрология*. 2008. Т. 16. № 1. С. 66–91.
 114. *Шарков Е.В., Бортников Н.С., Богатиков О.А., Зингер Т.Ф., Бельтнев В.Е., Чистяков А.В.* Третий слой океанической коры в осевой части Срединно-Атлантического хребта (полигон Сьерра-Леоне, 60° с. ш.) // *Петрология*. 2005. Т. 13. № 6. С. 592–625.
 115. *Шеймович В.С., Патока М.Г.* Геологическое строение зон активного кайнозойского вулканизма. М.: Недра, 1989. 206 с.
 116. *Шмелев В.Р.* Структура и петрология Хорасюрского габбро-гипербазитового массива, приполярный Урал // *Петрология*. 1994. Т. 2. № 5. С. 495–510.
 117. *Щека С.А.* Некоторые аспекты проблемы генезиса включений в вулканитах островных дуг // *Включения в вулканических породах Курило-Камчатской островной дуги*. М.: Наука, 1978. С. 5–35.
 118. *Щека С.А., Куренцова Н.А., Вольнец О.Н.* Гипербазитовый парагенезис вкрапленников базальтов // *Типоморфные особенности породообразующих минералов*. Владивосток. 1978. С. 5–41.
 119. *Abu El-Rus M.A., Neumann E.-R., Peters V.* Serpentinization and dehydration in the upper mantle beneath Fuerteventura (eastern Canary islands): evidence from mantle xenoliths // *Lithos*. 2006. Vol. 89. P. 24–46.
 120. *Aitken B.G., Echeverria L.M.* Petrology and geochemistry of komatiites and tholeites from Gorgona island, Colombia // *Contrib. Mineral. Petrol*. 1984. Vol. 86. P. 94–105.
 121. *Aldanmaz E., Schmidt M.W., Gourgaud A., Meisel T.* Mid-ocean ridge and supra-subduction geochemical signatures in spinel-peridotites from the Neotethyan ophiolites in SW Turkey: implication for upper mantle melting processes // *Lithos*. 2009. Vol. 113. P. 691–708.
 122. *Alletti M., Pompilio M., Rotolo S.G.* Mafic and ultramafic enclaves in Ustica island lavas: inferences on composition of lower crust and magmatic processes // *Lithos*. 2005. Vol. 84. P. 151–167.
 123. *Arai S., Fujii T.* Petrology of ultramafic rocks from site 395 // *Initial reports of the Deep Sea Drilling Project*. Wash. (D. C.): Gov. print. Off., 1979. Vol. 65. P. 587–594.
 124. *Arndt N., Lehnert K., Vasiliev Y.* Meimechites: highly magnesian lithosphere – contaminated alkalint magmas from deep subcontinental mantle // *Lithos*. 1995. Vol. 34. P. 41–59.
 125. *Arndt N.T., Naldrett A.J., Pyke D.R.* Komatiitic and iron-rich tholeitic lavas of Munro Township, northeast Ontario // *Journal of Petrology*. 1977. Vol. 18. N 2. P. 319–369.

126. *Baker M.B., Alves S., Stolper E.M.* Petrography and petrology of the Hawaii Scientific Drilling Project lavas: inferences from olivine phenocryst abundances and compositions // Journal of geophysical research. 1996. Vol. 101, № B5. P. 11715–11727.
127. *Balta J.B., Asimowandjed P.D., Mostnfelder L.* Hydrous, low-carbon melting of garnet peridotite // Journal of Petrology. 2011. Vol. 52. N 11. P. 2079–2105.
128. *Ban M., Witt-Eickschen G., Klein M., Seck H.A.* The origin of glasses in hydrous mantle xenoliths from west Eifel, Germany: incongruent break down of amphibole // Contrib. Mineral. Petrol. 2005. Vol. 148. P. 521–523.
129. *Banas A., Stachel T., Muehlenbachs K., McCandless.* Diamond from the Buffalo Head Hills, Alberta: formation in a non-conventional setting // Lithos. 2007. Vol. 93. P. 199–213.
130. *Bannister V., Roeder P., Poustovetov A.* Chromite in Paricutin lava flows (1943-1952) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1998. Vol. 87. P. 151–171.
131. *Barnes S.-J.* The petrography and geochemistry of komatiite flows from the Abitibi greenstone belts and a model from their formation // Lithos. 1985. Vol. 18. P. 241–270.
132. *Barnes S.-J.* Chromite in komatiites, 1. magmatic controls on crystallization and composition // Journal of Petrology/ 1998. Vol. 39. P. 1689–1720.
133. *Barnes S.-J., Gorton M.P., Naldrett A. J.* A comparative study of olivine and clinopyroxene spinifex flows from Alexo, Abitibi greenstone belt, Ontario, Canada // Contrib. Mineral. Petrol. 1983. Vol. 83. P. 293–308.
134. *Batiza R., Vanko D.A.* Petrologic evolution of large Failed rifts in the eastern Pasific: petrology of volcanic and plutonic rocks from the Mathematician ridge area and the Guadalupe trough // Journal of Petrology. 1985. Vol. 26. P. 564–602.
135. *Beard A.D., Downes H., Hegner E., Sablukov S.M., Vetrin V.R., Balogh K.* Mineralogy and geochemistry of Devonian ultramafic minor intrusions of the southern Kola peninsula, Russia: implications for the petrogenesis of kimberlites and melilities // Contrib. Mineral. Petrol. 1998. Vol.130. P. 288–303.
136. *Beard A. D., Downes H., Mason P.R.D., Vetrin V.R.* Depletion and enrichment processes in the lithospheric mantle beneath the Kola peninsula (Russia): evidence from spinel lherzolite and wehrlite xenoliths // Lithos. 2007. Vol. 94. P. 1–24.
137. *Beard J.S., Borgia A.* Temporal variation of mineralogy and petrology in cognate gabbroic enclaves at Arenal volcano, Costa Rica // Contrib. Mineral. Petrol. 1989. Vol.103. P. 110–122.
138. *Bell B.R., Claydon R.C.* The cumulus and post-cumulus evolution of chrome-spinels in ultrabasic layered intrusions: evidence from the Cuillin igneous complex, Isle of Skye, Scotland // Contrib. Mineral. Petrol. 1992. Vol.112. P. 242–253.
139. *Berndt J., Koepke J., Holtz F.* An experimental investigation of the influence of water and oxygen fugacity on differentiation of MORB at 200 mpa // Journal of Petrology. 2005. Vol. 46. N 1. P. 135–167.
140. *Bevan J.C.* Reaction rims of orthopyroxene and plagioclase around chrome spinels in olivine from Skye and Rhum (NW Scotland) // Contrib. Mineral. Petrol. 1982. Vol.79. P. 124–129.
141. *Birkett T.C., McCandless T.E., Hood C.T.* Petrology of Renard igneous bodies: host rocks for diamond in the northern Otish mountains region, Quebec // Lithos. 2004. Vol. 76. P. 475–490.
142. *Bloomer S., Natland J.H., Fisher R.L.* Mineral relationship in gabbroic rocks from fracture zones of Indian Ocean ridges: evidence for extensive fractionation, parental diversity and

- boundary-layer recrystallization // *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. Special Publication. 1989. Vol. 42. P. 107–124.
143. *Bodinier J.-L., Garrido C.J., Chanefo I., Bruguier O., Gervilla F.* Origin of pyroxenite-peridotite veined mantle by refertilization reactions: evidence from the Ronda peridotite (southern Spain) // *Journal of Petrology*. 2008. Vol. 49, N 5. P. 999–1025.
 144. *Bohrson W.A., Clague D.* Origin of ultramafic xenoliths containing evolved pyroxenes from Hualai volcano, Hawaii // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1988. Vol. 100. P. 139–155.
 145. *Bonatti E., Ottonello G., Hamlin P.R.* Peridotites from the island of Zabargad (st. John), Red sea: petrology and geochemistry // *J. of geophys. res.* 1986. Vol. 91. N B1. P. 599–631.
 146. *Borisova A.Yu., Belyatsky B.V., Portnyagin M.V., Sushchevskaya N.M.* Petrogenesis of olivine-phyric basalts from the Aphanasey Nikitin rise: evidence for contamination by cratonic lower continental crust // *Journal of Petrology*. 2001. Vol. 42. P. 277–319.
 147. *Borisova A.Yu., Nikogosian I.K., Scoates J.S., Weis D., Damasceno D., Shimizu N., Touret L.R.* Melt, fluid and crystal inclusions in olivine phenocrysts from Kerguelen plume-derived picritic basalts: evidence for interaction with the Kerguelen plateau lithosphere // *Chem. Geol.* 2002. N 183. P.195–220.
 148. *Brett R.C., Russell J.K., Moss S.* Origine of olivine in kimberlite: phenocryst or impostor? // *Lithos*. 2009. N 112S. P. 201–212.
 149. *Brey G.P., Bylatov V.K., Girnits A.V., Lahaye Y.* Experimental melting of carbonated peridotite at 6–10 GPA // *Journal of Petrology*. 2008. Vol. 49. N 4. P. 797–821.
 150. *Brirkett T.C., McCandless T.E., Hood C.T.* Petrology of the Renard igneous bodies: host rocks for diamond in the northern Otish mountains region, Quebec // *Lithos*. 2004. Vol. 76. P. 475–490.
 151. *Bryan W.B.* Regional variatio and petrogenesis of basalt glass from the FAMOUS area, mid-Atlantic ridge // *Journal of Petrology*. 1979. Vol. 20. P. 293–325.
 152. *Cameron E.N.* The lower zone of the eastern Bushveld complex in the Olifants river trough // *Journ. of Petrol.* 1978. Vol. 19, N 3. P. 437–462.
 153. *Canil D., Bellis A.J.* Phase equilibria in a volatile-free kimberlite at 0.1 Mpa and the search for primary kimberlite magma // *Lithos*. 2008. Vol. 105. P. 111–117.
 154. *Cannat M., Bideau D., Bougault H.* Serpentinized peridotites and gabbros in the mid-Atlantic ridge axial valley at 15°37' N and 16°52'N // *Earth and Planetary Science Letters*. 1992. Vol. 109. P. 87–106.
 155. *Canon-Tapia E.* How deep can be a dyke? // *J. of Volcanology and Geothermal Rec.* 2008. Vol. 17. P. 215–228.
 156. *Cattell A., Arndt N.* Low- and highalumina komatiites from a late archaean sequence, Newton Township, Ontario // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1987. Vol. 97. P. 218–227.
 157. *Chalapathi N. V., Rajesh R.J., Srivastava K.* Petrology and geochemistry of diamondiferous Mesoproterozoic kimberlites from Wajrakarur kimberlite field, eastern Dharwar craton, southern India: genesis and constraints or mantle source regions // *Contrib Mineral Petrol.* 2009. Vol.157. P. 245–265.
 158. *Chalokwu C.I., Grant N.K.* Petrology of the Partridge river intrusion, Duluth complex, Minnesota: 1. relationships between mineral compositions, density and trapped liquid abundance // *Journal of Petrology*. 1990. Vol. 31, N 2. P. 265–293.

159. *Chen C.-H., Presnall D.C., Stern R.J.* Petrogenesis of ultramafic xenoliths from the 1800 Kaupulehu flow, Hualalai volcano, Hawaii // *Journal of Petrology*. 1992. Vol. 33, N 1. P. 163–202.
160. *Clague D.A.* Petrology of ultramafic xenoliths from Loihi seamount, Hawaii // *Journal of Petrology*. 1988. Vol. 29, N 6. P. 1161–1186.
161. *Cvetkovic V., Lazarov M., Downes H., Prelevic D.* Modification of the subcontinental mantle beneath east Serbia: evidence from orthopyroxene-rich xenoliths // *Lithos*. 2007 . Vol. 9. P. 90–110.
162. *Danyushevsky L.V., Perfit M.R., Eggins S.M., Fallon T.J.* Crustal origin for coupled “ultra-depleted” and “plagioclase” signatures in MORB olivine-hosted meltinclusion: evidence from the Siqueiros transform fault, East Pacific rise // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2003. Vol. 144. P. 619–637.
163. *Davis A.S., Clague D.A., Paduan J.B.* Diverse origins of xenoliths from seamount at the continental margin, offshore central California // *Journal of Petrology*. 2007. Vol. 48. P. 829–852.
164. *Davis A.S., Clague D.A.* Geochemistry, mineralogy, and petrogenesis of basalt from the Gorda ridge // *Journal of geophysical research*. 1987. Vol. 92, N B10. P. 10467–10483.
165. *De Fino M., La Volpe L., Piccarreta G.* Mafic minerals from Punta delle Pietre nere subvolcanites (Gargano, southern Italy): their petrological significance // *Tschermaks min.petr. mitt.* 1983. Vol. 32. P. 69–78.
166. *Deines P., Stachel T., Harris J.W.* Systematic regional variation in diamond carbon isotopic composition and inclusion chemistry beneath the Orapa kimberlite cluster, in Botswana // *Lithos*. 2009. N 112S. P. 776–784.
167. *Delpech G., Gregoire M., O'Reilly S.Y., Cottin J.Y., Moine B., Michon G., Giret A.* Feldspar from carbonate-rich silicate metasomatism in the shallow oceanic mantle under Kerguelen islands (South Indian ocean) // *Lithos*. 2004. Vol. 75. P. 209–237.
168. *Devis S.R., Ferry J.M.* Fluid infiltration during contact metamorphism of interbedded marble and calc-silicate hornfels, Twin Lake area, central Sierra Nevada, California // *J. Metamorphic Geol.* 1993. Vol. 11. P.71–88.
169. *Dick H.J.B.* Abyssal peridotites, very slow spreadingridges and ocean ridge magmatism // *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. Special Publication. 1989. Vol. 42. P. 71–106.
170. *Dick H.J.B., Lissenberg C.J., Warren J.M.* Mantle melting, melt transport, and delivery beneath a slow-spreading ridge: the paleo-MAR from 23° 15' N to 23° 45' N // *Journal of Petrology*. 2010. Vol. 51. P. 425–467.
171. *Dietrich V.J., Gansser A., Sommerauer J., Cameron W.E.* Paleogene komatiites from Gorgona island, East Pacific – a primary magma for ocean floor basalts? // *Geochemical Journal*. 1981. Vol. 15. P. 141–161.
172. *Don Hermes O., Rao J.M., Dickenson M.P., Pierce T.A.* A transitional alkalic dolerite dike suite of mesozoic age in southeastern New England // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1984. Vol. 86. P. 386–397.
173. *Drouin M., Godard M., Ildefonse B., Bruguer O., Garrido C.J.* Geochemical and petrographic evidence for magmatic impregnation in the oceanic lithosphere at Atlantis Massif, mid-Atlantic ridge (IODP Hole U1309D, 30° N) // *Chem. Geol.* 2009. Vol. 264. P. 71–88.
174. *Dunham A.C., Wadsworth W.J.* Cryptic variation in the Rhum layered intrusion // *Min. mag.* 1978. Vol. 42. P. 347–356.

175. *Dymek R.F., Brothers S.C., Shiffries C.M.* Petrogenesis of ultramafic metamorphic rocks from the 3800 ma Isua supracrustal belt, west Greenland // *Journal of Petrology*. 1988. Vol. 29, N 6. P. 1353–1397.
176. *Echeverria L.M.* Tertiary or Mesozoic komatiites from Gorgona island, Colombia: field relations and geochemistry // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1980. Vol. 73. P. 253–266.
177. *Edgar A.D., Lloyd F.E., Forsyth D.M., Barnett R.L.* Origin of glass in upper mantle xenoliths from the quaternary volcanics of Gees, west Eifel, Germany // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1989. Vol. 103. P. 277–286.
178. *Elkins-Tanton L.T., Draper D.S., Agee C.B., Jewell J., Thorpe A., Hess P.C.* The last lava erupted during the main phase of Siberian flood volcanic province: results experimental petrology // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2007. Vol. 153. P.191–209.
179. *Evans B.W., Wright T.L.* Composition of liquidus chromite from the 1959 (Kilauea Iki) and 1965 (Makaopuhi) eruptions of Kilauea volcano, Hawaii // *Am. Mineralogist*. 1972. Vol. 57. P. 217–230.
180. *Flower M.F. G., Robinson P.T., Schmincke H.-U., Ohnmacht W.* Petrology and geochemistry of igneous rocks, DSDP leg 37 // *Initial reports of the Deep Sea Drilling Project*. Wash. (D. C.): Gov. print. Off. 1977. Vol. 37. P. 653–679.
181. *Fodor R.V., Galar P.* A view into subsurface of Mauna Kea volcano, Hawaii: crystallization processes interpreted through the petrology and petrography of gabbroic and ultramafic xenoliths // *Journal of Petrology*. 1997. Vol. 38, N 5. P. 581–624.
182. *Foley S.F., Yaxley G.M., Rosenthal A., Buhre S., Kiseeva E.S., Rapp R.P., Jacob D.E.* The composition of near-solidus melt of peridotite in the presence of CO₂ and H₂O between 40 and 60 kb // *Lithos*. 2009. Vol. 112S. P. 274–283.
183. *Franz L., Brey G.P., Okrusch M.* Steady state geotherm, thermal disturbances, and tectonic development of the lower lithosphere underneath the Gibeon kimberlite province, Namibia // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1996. Vol. 126. P. 181–198.
184. *Fujii T., Fujioka K.* Petrology of dolerites, hole 395A // *Initial reports of the Deep Sea Drilling Project*. Wash. (D. C.): Gov. print. Off. 1979. Vol. 65. P.519–528.
185. *Fumagalli P., Poli S.* Experimentally determined phase relations in hydrous peridotites to 6.5 GPA and their consequences on the dynamics of subduction zones // *Journal of Petrology*. 2005. Vol. 46, N 3. P. 555–578.
186. *Furuta T., Tkuyama H.* Crimian spinels in Costa Rica basalts, deep sea drilling project site 505 – a preliminary interpretation of electron microprobe analyses // *Initial reports of the Deep Sea Drilling Project*. Wash. (D. C.): Gov. print. Off. 1983. Vol. 69. P. 805–810.
187. *Gaeta M., di Rocco T., Frieda C.* Carbonate assimilation in open magmatic system: the role of melt-bearing skarns and cumulate-forming processes // *Journal of Petrology*. 2009. Vol. 50, N 2. P. 361–385.
188. *Garcia M.O., Frey F.A., Grooms D.G.* Petrology of volcanic rocks from Kaula island, Hawaii // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1986. Vol. 94. P. 461–471.
189. *Gerlach T.M.* Oxygen buffering of Kilauea volcanic gases and the oxygen fugacity of Kilauea basalt. // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1993. Vol. 57. P.795–814.
190. *Ghosh S., Ohtani E., Litasov K.D., Terasaki H.* Solidus of carbonated peridotite from 10 to 20 GPA and origin of magnesio碳酸 melt in the Earth's mantle // *Chem. Geol.* 2009. Vol. 262. P. 17–28.

191. *Gibb F.G., Henderson C.M.B.* Chemistry of the Shiant Isles Main sill, new Scotland, and wider implications for the petrogenesis of mafic sills // *Journal of Petrology*. 2006. Vol. 47, N 1. P. 191–230.
192. *Gibson S.A., Malarkey J., Day J.A.* Melt depletion and enrichment beneath the western Kaapvaal craton: evidence from Finch peridotite xenoliths // *Journal of Petrology*. 2008. Vol. 49, N 10. P. 1817–1852.
193. *Girnis A.V., Bulatov V.K., Brey G.P.* Formation of primary kimberlite melt-constraints from experiment at 6–12 GPA and variable CO₂/H₂O // *Lithos*. 2011. Vol. 127. P. 401–413.
194. *Glotov A.I., Polykov G.V., Hoa T.T., Balykin P.A., Akimtsev V.A., Krivenko A.P., Phuong N.T., Thanh H.H., Hung T.Q.* The Ban Phuc Ni-Cu-PGE deposit related to the Phanerozoic komatiite-basalt association in the Song Da rift, northwestern Vietnam // *The Canadian mineralogist*. 2001. Vol. 39. P. 573–589.
195. *Godard G., Martin S.* Petrogenesis of kelyphites in garnet peridotites: a case study from the Ulten zone, Italian Alps // *J. of Geodynamics*. 2000. Vol. 30. P.117–145.
196. *Gole M.J., Barnes S.J., Hill R.E.T.* The role of fluids in the metamorphism of komatiites, Agnew nickel deposit, Western Australia // *Contrib Mineral Petrol*. 1987. Vol. 96. P.151–162.
197. *Goto A., Yokoyama K.* Lherzolite inclusions in olivine nephelinite tuff from Salt Lake crater, Hawaii // *Lithos*. 1988. Vol. 21. P. 67–80.
198. *Griffin W.L., Gurney J.J., Ryan C.G.* Variations in trapping temperatures and trace elements in peridotite-suite inclusions from African diamonds: evidence for two inclusion suites, and implications for lithosphere stratigraphy // *Contrib. Mineral. Petrol*. 1992. Vol. 110. P. 1–15.
199. *Griffin W.L., Natapov L.M., O'Reilly S.Y., van Acherbergh E., Cherenkova A.F., Cherenkov.G.* The Kharamai kimberlite field, Siberia: modification of the lithospheric mantle by the Siberian trap event // *Lithos*. 2005. T. 81. P. 167–181.
200. *Hamlyn P.R., Bonatti E.* Petrology of mantle-derived ultramafics from the Owen fracture zone, northwest Indian ocean: implications for the nature of the oceanic upper mantle // *Earth and Planetary Science Letters*. 1980. Vol. 48. P.65–79.
201. *Hammelberg G. R., Loney R. A.* Characteristics and petrogenesis of Alaskan-type ultramafic-mafic intrusions, southeastern Alaska // U.S. geological survey professional paper 1564. W.1995.
202. *Hanski E., Walker R.J., Huhma H., Polykov G.V., Balykin P.A., Hoa T.T., Phuong N.T.* Origin of the Permian-triassic komatiites, northwestern Vietnam // *Contrib. Mineral. Petrol*. 2004. Vol. 147. P. 453–469.
203. *Harris R.A.* Geochemistry and tectonomagmatic affinity of the Misheguk massif, Brooks range ophiolite, Alaska // *Lithos*. 1995. Vol. 35. P.1–25.
204. *Harris C., Chaumba J.B.* Crustal contamination and fluid-rock interaction during the formation of the platreef, northern limb of the Bushveld Complex, south Africa // *Journ. of Petrol*. 2001. Vol. 42, N 7. P. 1321–1347.
205. *Heimonen J.S., Luttinen A.V.* Mineral chemical evidence for extremely magnesian subalkaline melt from the Antarctic extension of the Karoo large igneous province // *Miner. Petrol*. 2010. Vol. 99. P. 201–217.
206. *Heinrich W., Besch T.* Thermal history of the upper mantle beneath a young back-arc extensional zone: ultramafic xenoliths from San Luis Potosi, central Mexico // *Contrib. Mineral. Petrol*. 1992. Vol. 111. P. 126–142.

207. *Hellebrand E., Snow J.E., Hoppe P., Hofmann A.W.* Garnet-field melting and late-stage re-fertilization in “residual” abyssal peridotites from the central Indian ridge // *Journal of Petrology*. 2002. Vol. 43. P. 2305–2338.
208. *Himmelberg G.R., Loney R.A.* Characteristics and petrogenesis of Alaskan-type ultramafic intrusion, southeastern Alaska // *U.S. geological survey prof. paper*. 1564. 1995. 47 p.
209. *Hirose K.* Phase transitions in pyrolitic mantle around 670 km depth: implication for upwelling of plumes from lower mantle // *J. of geophys. res.* 2002. Vol. 107, N B4. P. 3–1–3–12
210. *Hoatson D.M., Sun S.-S., Duggan M.B., Davies M.B., Daly S.J., Purvis A.C.* Late archaean Lake Harris komatiite, central Gawler craton, south Australia: geological setting and geochemistry // *Economic geology*. 2005. Vol. 100. P. 349–374.
211. *Hodges F.N., Papike J.J.* Petrology basalts, gabbros, and peridotites from DSDP leg 37 // *Initial reports of the Deep Sea Drilling Project*. Wash. (D. C.): Gov. print. Off. 1977. Vol. 37. P. 711–719.
212. *Holness M.B., Hallworth M.A., Woods A., Sides R.E.* Infiltration metasomatism of cumulates by intrusive magma replenishment: the Wavy horizon, isle of Rum, Scotland // *Journal of Petrology*. 2007. Vol. 48. P. 563–587.
213. *Hoover J.D.* Petrology of the marginal border series of the Skaergaard intrusion // *Journal of Petrology*. 1989. Vol. 30, N 2. P. 399–439.
214. *Hornig I., Worner G.* Zirconolite-bearing ultra-potassic veins in a mantle-xenolith from mt. Melbourne volcanic field, Victoria land, Antarktida // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1991. Vol. 106. P. 355–366.
215. *Ikeda T., Nishiyama T., Yamada S., Yanagi T.* Microstructures of olivine–plagioclase corona in meta-ultramafic rocks from Sefuri mountains, nw Kyushu, Japan // *Lithos*. 2007. Vol. 97. P. 289–306.
216. *Ionov D.A., O’Reilly S.Y., Genshaft Y.S., Kopylova M.G.* Carbonate-bearing mantle peridotite xenoliths from Spitsbergen: phase relationships, mineral compositions and trace-element residence // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1996. Vol. 125. P. 375–392.
217. *Ionov D.A., Prihodko V.S., Bodimier J.-L., Sobolev A.V., Weis D.* Lithospheric mantle beneath the south-eastern Siberian craton: petrology of peridotite xenoliths in basalts from the Tokinsky Stanovik // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2005. Vol. 149. P. 647–665.
218. *Ishimaru S., Arai S., Ishida Y., Shirasaka M. and Okrugin V.* Melting and multi-stage metasomatism in the mantle wedge beneath a frontal arc inferred from highly depleted peridotite Xenoliths from Avacha volcano, southern Kamchatka // *J. of Petrology*. Vol. 48. N 2. P. 395–433.
219. *Ito E., Anderson Jr. A.T.* Submarine metamorphism of gabbros from the mid-Cayman rise: petrographic and mineralogic constraints on hydrothermal processes at slow-spreading ridges // *Contrib Mineral Petrol* 1983. Vol. 82. P. 371–388.
220. *Ito M.* Kimberlites and their ultramafic xenoliths from western Kenya // *Tschermaks Min. Petr. Mitt.* 1986. Vol. 35. P. 193–216.
221. *Janney P.E., Shyre S.B., Carlson R.W., Pearson D.G., Bell D.R., Le Roex A.P., Ishikawa A., Nixon P.H., Boyd F.R.* Age, composition and thermal characteristic of south African off-craton mantle lithosphere: evidence for a multi-stage history // *Journal of Petrology*. 2010. Vol. 51. P. 1849–1890.

222. *Jaques A.L., O'Neill H.St.C., Smith C.B., Moon J., Chappell B.W.* Diamondiferous peridotite xenoliths from the Argyle (AK1) lamproite pipe, Western Australia // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1990. Vol. 104. P. 255–276.
223. *Kamenetsky V.S., Gurenko A.A.* Cryptic crustal contamination of MORB primitive melts recorded in olivine-hosted glass and mineral inclusions // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2007. Vol. 153. P.465–481.
224. *Kamenetsky V.S., Gurenko A.A., Kerr A.* Composition and temperature of komatiite melts from Gorgona island, Colombia, constrained from olivine-hosted melt inclusions // *Geology (Geological Society of America)*. 2010. Vol. 38, N 11. P. 1003–1006.
225. *Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Golovin A.V., Demouchy S., Faure K., Sharygin V.V., Kuzmin D.V.* Olivine in the Udachnaya-East kimberlite (Yakutia, Russia): types, compositions and origins // *Journal of Petrology*. 2008. Vol. 49. Vol. 4. P. 823–839.
226. *Kepezhinskas P.K., Defant M.J., Drummond M.S.* Na metasomatism in the island-arc mantle by slab melt-peridotite interaction: evidence from mantle xenoliths in the north Ramchatka arc // *Journal of Petrology*. 1995. Vol. 36. Vol. 6. P. 1505–1527.
227. *Kerr A.C., Marriner G.F., Arndt N.T., Tarney J., Nivia A., Saunders A.D., Duncan R.A.* The petrogenesis of Gorgona komatiites, picrites and basalts: new field, petrographic and geochemical constraints. *Lithos*. 1996. Vol. 37. P. 245–260.
228. *Keshav S., Sen G., Presnall D.C.* Garnet-bearing xenoliths from Salt Lake crater, Oahu, Hawaii: high-pressure fractional crystallization in the oceanic mantle // *Journal of Petrology*. 2007. Vol. 48, N 9. P. 1681–1724.
229. *Keshav S., Gudfinnsson G.H., Presnall D.C.* Melting phase relations of simplified carbonated peridotite at 12–26 GPA in the systems CaO–Al₂O₃–SiO₂–CO₂: highly calcic magmas in the transition zone of the Earth // *Journal of Petrology*. 2011. Vol. 52, N 11. P. 2265–2291.
230. *Komor S., Elthon D.* Formation of anorthositegabbro rhythmic phase layering: an example at North Arm mountain, Bay of islands ophiolite // *Journal of Petrology*. 1990. Vol. 31. P. 1–50.
231. *Komor S., Elthon D., Casey J.F.* Mineralogic variation in a layered ultramafic cumulate sequence at the North Arm mountain massif, Bay of island ophiolite, Newfoundland // *J. of geophys. res.* 1985. Vol. 90, N B9. P. 7705–7736.
232. *Komor S., Elthon D., Casey J.F.* Petrology of a leucogabbroic interval within basal layered gabbros at North Arm mountain, Bay of islands ophiolite // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1987. Vol. 95. P. 278–300.
233. *Koornneef J.M., Davies G.R., Dopp S.P., Vukmanovic Z., Nikogosian I.K., Mason P.R.D.* Nature and timing of multiple metasomatic events in the sub-cratonic lithosphere beneath Labait, Tanzania // *Lithos*. 2009. Vol. 112S. P. 896–912.
234. *Kopylova M.G., Caro G.* Mantle xenoliths from the southeastern Slave craton: evidence for chemical zonation in a thick, cold lithosphere // *Journal of Petrology*. 2004. Vol. 45, N 5. P. 1045–1067.
235. *Larsen L.M., Pedersen A.K.* Processes in high-Mg, high-T magmas: evidence from olivine, chromite and glass in paleogene picrites from west Greenland // *Journal of Petrology*. 2000. Vol. 41, N 7. P. 1071–1098.
236. *Larsen L.M., Pedersen A. K., Sundvoll B., Frei R.* Alkali picrites formed by melting of metasomatized lithospheric mantle: Manitdlat member, Vaigat formation, paleocene of west Greenland // *Journal of Petrology*. 2003. Vol. 44, N 1. P. 3–38.

237. *Lee C.-T., Rudnick R.L., McDonough W.F., Horn I.* Petrologic and geochemical investigation of carbonates in peridotite xenoliths from northeastern Tanzania // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2000. Vol. 139. P. 470–484.
238. *Lehmann J.* Diffusion between olivine and spinel: application to geothermometry // *Earth and Planetary Science Letters.* 1983. Vol. 64. P.123–138.
239. *MacKenzie J.M., Canil D.* Composition and thermal evolution of cratonic mantle beneath the central archean Slave province, NWT, Canada // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1999. Vol. 134. P. 313–324.
240. *Marchesi C., Garrido C., Godard M., Belley F., Ferre E.* Migration and accumulation of ultra-depleted melt in the massif du Sud ophiolite (New Caledonia) // *Chem. Geol.* 2009. Vol. 266. P.171–186.
241. *Mattioli M., Serri G., Salvioli-Mariani E., Renzulli A., Holm P.M., Santi P., Venturelli G.* Sub-volcanic infiltration and syn-eruptive quenching of liquids in cumulate wall-rocks: the example of gabbroic nodules of Stromboli (Aolian islands, Italy) // *Mineral and Petrol.* 2003. Vol. 78. P. 201–230.
242. *Mattioli M., Upton B.G. J., Renzulli A.* Sub-volcanic crystallization at Sete Cidades volcano, Sao Miguel, Azores, inferred from mafic and ultramafic plutonic nodules // *Mineral and Petrol.* 1997. Vol. 60. P. 1–26.
243. *Mazzucchelli M., Rivalenti G., Brunelli D., Zanetti A., Boari E.* Formation of highly refractory dunite by focused percolation of pyroxenite-derived melt in the Balmuccia peridotite massif (Italy) // *Journal of Petrology.* 2009. Vol. 50, N 7. P. 1205–1233.
244. *McBirney A.R., Taylor H.P., Armstrong R.L.* Paricutin re-examined: a classic example of crustal assimilation in calc-alkaline magma // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1987. Vol. 95. P. 4–20.
245. *McCarter R.L., Fodor R.V., Trusdell F.* Perspectives on basaltic magma crystallization and differentiation: lava-lake blocks erupted at Mauna Loa volcano summit, Hawaii // *Lithos.* 2006. Vol. 90. P. 187–213.
246. *Me' dard E., Grove T.* The effect of H₂O on the olivine liquidus of basaltic melts: experiments and thermodynamic models // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2008. Vol. 155. P. 417–432.
247. *Melcher F., Grum W., Simon C., Thalhammer T.V., Stumpel E.F.* Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in chromite // *Journal of Petrology.* 1997. Vol. 38, N 10. P. 1419–1458.
248. *Meyer P.S., Dick J.B., Thompson G.* Cumulate gabbros from the southwest Indian ridge, 54°S–7°16'E: implications for magmatic processes at a slow spreading ridge // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1989. Vol. 103. P. 44–63.
249. *Mitchell R.H.* Experimental studies at 5–12 GPA of the Ondermatjie hypabyssal kimberlite // *Lithos.* 2004. Vol. 76. P. 551–564.
250. *Mitchell R.H.* Garnet lhezolites from the Yanaus-1 and Louwrensia kimberlites of Namibia // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1984. Vol. 86. P. 178–188.
251. *Morishita T., Hara K., Nakamyra K., Sawaguchi T., Tamura A., Arai S., Okino K., Takai K., Kumagai H.* Igneous, alteration and exhumation processes recorder in abyssal peridotites and related fault rocks from an oceanic core complex along the central Indian ridge // *Journal of Petrology.* 2009. Vol. 50. P. 1299–1325.
252. *Naslund H.R.* Petrology of upper border series of the Skaergaard intrusion // *Journal of Petrology.* 1984. Vol. 25, N 1. P. 185–212.

253. Natland J.H., Adamson A.C., Laverne C., Melson W.G., O' Hearn T.A. Compositionally nearly steady-state magma chamber at the Costa-Rica rift: evidence from basalt glass and mineral data, deep sea drilling project sites 501, 504, and 505 // Initial reports of the Deep Sea Drilling Project. Wash. (D. C.): Gov. print. Off. 1983. Vol. 69. P. 811–858.
254. *Nayman P.C., Cas R.A.F., Johnson M.* Characteristics and alteration origins of matrix minerals in volcanoclastic kimberlite of the Muskox pipe (Nunavut, Canada) // *Lithos.* 2009. Vol. 112S. P. 473–487.
255. *Neilsen T.F.D., Turkov V.A., Solovova I.P., Kogarko L.N., Ryabchikov I.D.* A hawaiiin beginning for the Island plume: modelling of reconnaissance data for olivine-hosted melt inclusions in Paleogene picrite lavas from east Greenland // *Lithos.* 2006. Vol. 92. P. 83–104.
256. *Neumann E.-R., Sorensen V.B., Simonsen S.L., Johnsen K.* Gabbroic xenoliths from La Palma, Tenerife and Lanzarote, Canary islands: evidence for reactions between mafic alkaline Canary island melts and old oceanic crust // *J. of Volcan. and Geoterm. Res.* 2000. Vol. 103. P. 313–342.
257. *Neumann E.-R., Vannucci R., Tiepolo M.* N-MORB crust beneath Fuerteventura in the easternmost part of the Canary Islands: evidence from gabbroic xenoliths // *Contrib Mineral Petrol.* 2005. Vol. 150. P.156–173.
258. *Nono A., Deruelle B., DemaiFFE D., Kambou R.* Tchabal Nganha volcano in Adamawa (Cameroon): petrology of a continental alkaline lava series // *J. of Volcanology and Geothermal Rec.* 1994. Vol. 60. P.147–178.
259. *Nozaka T., Eryer P.* Alteration of the oceanic lower crust at a slow-spreading axis: insight from vein-related zoned halos in olivine gabbro from Atlantis massif, Mid-Atlantic ridge // *Journal of Petrology.* 2011. Vol. 52. P. 643–664.
260. *Obata M.* Material transfer and local equilibria in a zoned kelyphite from a garnet pyroxenite Ronda, Spain // *Journal of Petrology.* 1994. Vol. 35, N 1. P. 271–287.
261. *Ohara Y., Stern R.J., Ishii T., Yurimoto H., Yamazaki T.* Peridotites from the Mariana trough: first look at the mantle beneath an active back-arc basin // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2002. Vol. 143. P. 1–18.
262. *Padron-Navarta J.A., SanchezVizkaino V.L., Garrido K.J., Gomez-Pugnaire M.T.* Metamorphic records of high-pressure deglydrotation of antigorite serpentinite to chlorite harzbyrgite in a subduction setting (Cerro del Almirez, Nevado-Fulabride complex, southern Spain // *Journal of Petrology.* 2011. Vol. 52, N 10. P. 2047–2078.
263. *Page P., Bedard J.H., Schroetter J.-M., Tremblay A.* Mantle petrology and mineralogy of the Thetford mines ophiolite complex // *Lithos.* 2008. Vol. 100. P.255–292.
264. *Pallister J.S., Hopson C.A.* Samail ophiolite plutonic suite: field relations, phase variation, cryptic variation and layreing, and a model of spreading ridge magma chamber // *J. of geophys. res.* 1981. Vol. 86, N B4. P. 2593–2644.
265. *Parman S.W., Dann J.C., Grove T.L., de Wit M.J.* Emplacement conditions of komatiite magmas from the 3.49 Ga Komati formation, Barbeton greenstone belt, south Africa // *Earth and Planetary Science Letters.* 1997. Vol. 150. P. 303–323.
266. *Patterson M., Francis D., McCandless T.* Kimberlites: magmas or mixtures? // *Lithos.* 2009. Vol. 112S. P. 191–200.
267. *Pearse J.A., Barker P.F., Edwards S.J., Parkinson I.J., Leat P.T.* Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic // *Contrib Mineral Petrol.* 2000. Vol. 139. P. 36–53.

268. *Piccardo G.B., Guarnieri L.* Gabbro-norite cumulates from strongly depleted MORB melts in the Alpine – Apennine ophiolites // *Lithos.* 2011. Vol. 124. P. 200–214.
269. *Portnyagin M.V., Danyushevsky L.V., Kamenetsky V. S.* Coexistence of two distinct mantle sources during formation of ophiolites: a case study of primitive pillow-lavas from the lowest part of the volcanic section of the Troodos ophiolite, Cyprus // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1997. Vol. 128. P. 287–301.
270. *Puga E., Nieto J.M., Federico A.D., Bodinier J.L., Morten L.* Petrology and metamorphic evolution of ultramafic rocks and dolerite dykes of the Betic ophiolitic association (Mulhaken complex, SE Spain): evidence of eo-Alpine subduction following an ocean-floor metasomatic process // *Lithos.* 1999. Vol. 49. P. 23–56.
271. *Rampone E., Giovanni G., Piccardo B., Hofmann A.W.* Multi-stage melt-rock interaction in the mt. Maggiore (Corsica, France) ophiolitic peridotites: microstructural and geochemical evidence // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2008. Vol. 156. P. 453–475.
272. *Reid D.L., Basson I.J.* Iron-rich ultramafic pegmatite replacement bodies within the upper critical zone, Rustenburg layered suite, Northam platinum mine, south Africa // *Mineral. Mag.* 2002. Vol. 66, N 6. P. 895–914.
273. *Revillon S., Arndt N.T., Chauvel C., Hallot E.* Geochemical study of ultramafic volcanic and plutonic rocks from Gorgona island, Colombia: the plumbing system of an oceanic plateau // *Journal of Petrology.* 2000. Vol. 41. P. 1127–1153.
274. *Riches A.J.V., Rogers N.W.* Mineralogical and geochemical constraints on the multi-stage modification of the Lherz peridotite // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 2011. Vol. 75. P. 6160–6182.
275. *Roeder P.L., Thornber C., Poustovetov A., Grant A.* Morphology and composition of spinel in Pu' u' O' o lava (1996–1998), Kilauea volcano, Hawaii // *J. of Volcanology and Geothermal Rec.* 2003. Vol. 123. P. 245–265.
276. *Rosatelli G., Wall F., Stoppa F.* Calcio-carbonatite melts and metasomatism in the mantle beneath mt. Vulture (southern Italy) // *Lithos.* 2007. Vol. 99. P. 229–248.
277. *Rudashevsky N.S., Avdontsev S.N., Dneprovskaya M.B.* Evolution of PGE mineralization in hortonolitic dunites of the Mooihoek and Onverwacht pipes, Bushveld Complex // *Mineral and Petrol.* 1992. Vol. 47. P. 37–54.
278. *Safonov O.G., Kamenetsky V.S., Perchuk L.L.* Links between carbonatite and kimberlite melts in chloride-carbonate-silicate systems: experiment and application to natural assemblages // *Journal of Petrology.* 2011. Vol. 52, N 7–8. P. 1307–1331.
279. *Schmidberger S.S., Francis D.* Nature of the mantle roots beneath the north American craton: mantle xenolith evidence from Somerset island kimberlites // *Lithos.* 1999. Vol. 48. P. 195–216.
280. *Scoon R.N.* Metasomatism of cumulus magnesian olivine by iron-rich postcumulus liquids in the upper critical zone of the Bushveld Complex // *Min. Mag.* 1987. Vol. 51. P. 389–396.
281. *Scoon R.N.* Petrogenesis of discordant magnesian dunite pipes from the central sector of the eastern Bushveld Complex with emphasis on the Winnaarshoek pipe and disruption of the Merensky reef // *Econom. Geology.* 2004. Vol. 99. P. 517–541.
282. *Scoon R.N., De Klerk W.J.* The relationship of olivine cumulates and mineralization to cyclic units in part of the upper critical zone of the western Bushveld complex // *Canadian Mineralogist.* 1987. Vol. 25. P. 51–77.

283. *Scoon R.N., Mitchell A.A.* Discordant iron-rich ultramafic pegmatites in the Bushveld Complex and their relationship to iron-rich intercumulus and residual liquids // *Journ. of Petrol.* 1994. Vol. 35, N 4. P. 881–917.
284. *Scowen P.A., Roeder P.L., Helz R.T.* Reequilibration of chromite within Kilauea Iki lava lake, Hawaii // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1991. Vol. 107. P. 8–20.
285. *Sen G.* Petrogenesis of spinel lherzolite and pyroxenite suite xenoliths from the Koolau shield, Oahu, Hawaii: implications for petrology of the post-eruptive lithosphere beneath Oahu // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1988. Vol. 100. P. 61–91.
286. *Sen G., Presnall D.C.* Petrogenesis of dunite xenoliths from Koolau volcano, Oahu, Hawaii: implications for Hawaiian volcanism // *Journal of Petrology.* 1986. Vol. 27, N 1. P. 197–217.
287. *Seyler M., Lorand J.P., Dick H.J., Drouin M.* Pervasive melt percolation reactions in ultra-depleted refractory harzburgites at the mid-Atlantic ridge, 15°20' N: ODP hole 1274A // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2007. Vol.153. P. 303–319.
288. *Shamberger P.J., Hammer J.E.*, Leucocratic and gabbroic xenoliths from Hualalai volcano, Hawaii // *Journal of Petrology.* 2006. Vol. 47, N 9. P. 1785–1808.
289. *Shibata T., Thompson G.* Peridotites from the mid-Atlantic ridge at 43° N and their petrogenetic relation to abyssal tholeiites // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1986. Vol. 93. P. 144–159.
290. *Shilling J., Marks M.A.W., Wenzel T., Vennemann T., Horva L., Tarassoff P., Jacob D.E., Markl G.* The magmatic and hydrothermal evolution of the intrusive Moint Saint – Hilaire complex: insights into the late-stage evolution of peralkaline rocks // *Journal of Petrology.* 2011. Vol. 52, N 11. P. 2147–2185.
291. *Shimizu K., Shimizu N., Komiya T., Suzuki K., Maruyama S., Tatsumi Y.* CO₂-rich komatiitic melt inclusions in Cr-spinels within beach sand from Gorgona island, Colombia // *Earth and Planetary Science Letters.* 2009. Vol. 288. P. 33–43.
292. *Sigurdsson I.A., Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Eggins S.M., Zlobin S.K.* Primitive island arc and oceanic lavas from the Hunter ridge – Hunter fracture zone. Evidence from glass, olivine and spinel compositions // *Miner. Petrol.* 1993. Vol. 47. P. 149–169.
293. *Simkin T., Smith I.V.* Minor–element distribution in olivine // *J. Geology.* 1970. Vol. 78. N 3. P. 304–325.
294. *Sinton J.M.* Petrology of (alpine-type) peridotites from site 395, DSDP leg 45 // *Initial reports of the Deep Sea Drilling Project.* Wash. (D. C.): Gov. print. Off. 1979. Vol. 65. P.595–601.
295. *Smith D.* Antigorite peridotite, metaserpentinite, and other inclusion within diatremes on the Colorado plateau, sw USA: implications for the mantle wedge during low-angle subduction // *Journal of Petrology.* 2010. Vol. 51, N 6. P. 1355–1379.
296. *Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Pokhilenko N.P., Malygina E.V., Kuzmin D.V., Sobolev A.V.* Petrogenetic significance of minor elements in olivines from diamonds and peridotite xenoliths from kimberlites of Yakutia // *Lithos.* 2009. Vol. 112S. P. 701–713.
297. *Soustelle V., Tommasi F., Bodinier J.L., Garrido C.J., Vauchez A.* Deformation and reactive melt transport in the mantle lithosphere above a large-scale partial melting domain: the Ronda peridotite massif, southern Spain // *Journal of Petrology.* 2009. Vol. 50. Vol. 7. P. 1235–1266.
298. *Spandler C., O'Neill H. St.C.* Diffusion and partition coefficients of minor and trace elements in San Carlos olivine at 1300 °C with some geochemical implications // *Contrib Mineral Petrol.* 2010. Vol. 159. P. 791–818.

299. *Stiefenhofer J., Viljonen K.S., Marsh J.S.* Petrology and geochemistry of peridotite xenoliths from the Letlhakane kimberlites, Botswana // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1997. Vol. 127. P. 147–158.
300. *Tartarotti P., Susini S., Nimis P., Ottolini L.* Melt migration in the upper mantle along the Romanche fracture zone (equatorial Atlantic) // *Lithos.* 2002. Vol. 63. P. 125–149.
301. *Tenner T.J., Hirschmann M.M., Withers A.C., Ardia P.* H₂O storage capacity of olivine and low-Ca pyroxene from 10 to 13 GPA: consequences for dehydration melting above the transition zone // *Contrib Mineral Petrol.* 2011. In press.
302. *Thy P., Stecher O., Korstgard J.A.* Mineral chemistry and crystallization sequences in kimberlite and lamproite dikes from the Sisimiut area, central west Greenland // *Lithos.* 1987. Vol. 20. P. 391–417.
303. *Till C.B., Grove T.L., Withers A.C.* The beginnings of hydrous mantle wedge melting // *Contrib Mineral Petrol.* 2011. In press.
304. *Timon S.M., Moro M.S., Cembranos M.L., Fernandez A., Crespo J.L.* Contact metamorphism in the Los Santos w skarn (nw Spain) // *Mineralogy and Petrology.* 2007. Vol. 90. P. 109–140.
305. *Tollan P.M., Bindeman I., Blundy J.D.* Cumulate xenoliths from St. Vinsent, Lesser Antilles island arc: a windows into upper crustal differentiation of a mantle-derived basalts // *Contrib Mineral Petrol.* 2011. In press.
306. *Upton B.G.J., Skovgaard A.C., McClurg J., Kirstein L., Chedle M., Emeleus C.H., Wadsworth W.J., Fallick A.E.* Picritic magmas and the Rum ultramafic complex, Scotland // *Geol. Mag.* 2002. Vol. 139. P. 437–452.
307. *Van Heerden L.A., le Roex A.P.* Petrogenesis of picrite and associated basalts from southern mid-Atlantic ridge // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1988. Vol. 100. P. 47–60.
308. *Varela M.E., Clocchiatti R., Kurat G., Schiano P.* Silic glasses in hydrous and anhydrous mantle xenoliths from western Victoria, Australia: at least two different sources // *Chem. Geol.* 1999. Vol. 153. P. 151–169.
309. *Walter K.C., Kay R.W.* Ultramafic and mafic inclusions from Adak island: crustallization history, and implications for the nature of primary magmas and crustal evolution in the Aleutian arc // *Journal of Petrology.* 1984. Vol. 25, N 1. P. 88–125.
310. *Wang C.Y., Zhou M.-F., Zhao D.* Mineral chemistry of chromite from the permian Jinbaochan Pt-Pd-sulphide-bearing ultramafic intrusion in sw China with petrogenetic implication // *Lithos.* 2005. Vol. 83. P. 47–66.
311. *Wenzel T., Baumgartner L.P., Brugmann G.E., Konnikov E.G., Kislov E.V.* Partial melting and assimilation of dolomitic xenoliths by mafic magma: the Ioko-Dovyren intrusion (north Baikal region, Russia) // *Journal of Petrology.* 2002. Vol. 43, N 11. P. 2049–2074.
312. *White C.M., Geist D.J., Frost C.D., Verword W.J.* Petrology of the Vandfaldsdalen macro-dike, Skaergaard region, east Greenland // *Journal of Petrology.* 1989. Vol. 30, N 2. P. 271–298.
313. *Wiebe R.A.* Low crustal cumulate nodules in proterozoic dikes of the Nain complex: evidence for the origin of proterozoic anortosites // *Journal of Petrology.* 1986. Vol. 27, N 6. P. 1253–1275.
314. *Wiebe R.A., Snyder D.* Slow, dense replenishments of a basic magma chamber: the layered series of the Newark island layered intrusion, Nain, Labrador // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1993. Vol. 113. P. 59–72.

315. *Wilkison J.F.G., Hensel H.D.* The petrology of some picrites from Mauna Loa and Kilauea volcanoes, Hawaii // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1988. Vol. 98. P. 326–345.
316. *Wilshire H.G., McGuire A.V.* Magmatic infiltration and melting in the lower crust and upper mantle beneath the Cima volcanic field, California // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1996. Vol. 123. P. 358–374.
317. *Zierenberg R.A., Schiffman P., Jonasson I.R., Tosdal R., Picthorn W., Mclain J.* Alteration of basalt hyaloclastite at the off-axis Sea Cliff hydrothermal field, Gorda Ridge // *Chem. Geol.* 1995. Vol. 126. P. 77–99.
318. *Zinngrebe E., Foley S.F.* Metasomatism in mantle xenoliths from Gees, west Eifel, Germany: evidence for the genesis of calc-alkaline glasses and metasomatic Ca-enrichment // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1995. Vol. 122. P. 79–96.

Заключение

Петрологические исследования требуют все более надежных и точных моделей, описывающих условия образования и эволюции магм. Создание таких моделей базируется на двух составляющих. С одной стороны, это различного рода уравнения, позволяющие выбирать равновесные минеральные парагенезисы и рассчитывать по ним численные значения равновесных температуры и давления, а также состав равновесного расплава. С другой стороны – использование этих уравнений для определения условий образования типовых природных парагенезисов для данного отряда или подотряда магматических пород данной серии или ассоциации магматических пород и т. д., удовлетворяющих условию равновесия. Для магматических пород базит-гипербазитового ряда такими парагенезисами являются основной-ультраосновной расплав, находящийся в равновесии с разнообразными вариантами сочетаний минералов, в большинстве своем ограниченными группами и подгруппами шпинели, оливина, ортопироксена, клинопироксена и плагиоклаза.

Для различных вариантов сочетаний указанных парагенезисов нами были созданы уравнения, позволяющие выявлять равновесные ассоциации, рассчитывать температуры, давления и содержания ряда порообразующих элементов в расплаве.

Для создания уравнений была использована база экспериментальных данных «ИНФО-РЕКС», пополненная данными по 2007 год включительно. Из этой базы данных были сделаны выборки расплав–минерал, расплав–минеральный парагенезис, представленные различными вариантами сочетаний указанных выше минералов. В выборках собраны эксперименты, выполненные в «сухих» условиях. Раздельно обрабатывались выборки для случая атмосферного и повышенного давлений (до значений 175 кб). Из выборок были выбракованы составы стекол и минералов с суммами менее 98 и более 102 вес. % оксидов порообразующих элементов. Для получения статистически значимых результатов обрабатывались выборки, содержащие 100 и более экспериментов. По этим выборкам проводился расчет уравнений вида $y = kx + b$, основанный на использовании метода наименьших квадратов, где x представлен полиномом, членами которого являются концентрации элементов в минерале(ах), в расплаве, а также значения температуры, давления, фугитивности. Каждое из полученных уравнений представлено в аналитическом и графическом видах с рядом статистических характеристик. Это коэффициент корреляции, квадратичная ошибка, число точек, критерий Пирсона для квадратичной ошибки и т. д. В итоге было получено порядка 600 уравнений, которые по своему предназначению можно разбить на следующие группы: уравнения для выявления равновесности парагенезисов; уравнения для расчета температур, давлений, фугитивности; уравнения для расчета концентраций элементов в расплаве. Во многих случаях для расчета одной и той же искомой величины создано несколько уравнений (до 6 штук), которые также могут быть использованы, как критерии равновесности–неравновесности состава расплава, правильности расчета температуры, давления.

При использовании полученных уравнений желательно руководствоваться несколькими правилами. Во-первых, использовать максимально возможное число уравнений, позволяющих рассчитывать искомую величину, что позволяет получать ее численное значение, максимально приближенную к равновесному. Во-вторых, первоначально делаются расчеты, позволяющие выяснить равновесность–неравновесность исследуемого парагенезиса. Для этих целей могут быть использованы как собственно уравнения для этого предназначенные, так и любые другие. Например, для расчета равновесия парагенезиса шпинель–оливин в условиях давления могут быть использованы 5 уравнений. Желательно использовать все эти уравнения, так как диффузионная подвижность элементов в кристаллах шпинели различается. Также для выяснения равновесности собственно состава кристалла шпинели целесообразно использовать и предназначенное для этого уравнение (в качестве примера см. главу IV). В случае расчета температуры по парагенезису расплав–минерал с использованием нескольких уравнений с различными наборами элементов, участвующих в качестве коэффициентов в уравнениях, отскоки рассчитанных значений температуры более 1–2 сигм по одному из ис-

пользуемых уравнений могут указывать на неравновесное содержание того или иного элемента в расплаве. Реальных вариантов для каждого из природных парагенезисов может быть очень много, и полное исследование даже одного предполагаемого варианта требует больших объемов вычислений. Примерами вариантов подходов для вычислений могут быть расчеты температур, давлений, составов расплава для природных парагенезисов, представленные в главе IV. Полнообъемное использование всех возможностей созданной системы уравнений, возможно, будет только после создания программы, позволяющей формировать разнообразные системы из созданных уравнений и решать их с привлечением итерационных методов. Например, пересчет состава расплава до его равновесия с кристаллом-хозяином может потребовать решения системы десяти и более уравнений с использованием итераций.

Кроме создания уравнений, обработка экспериментальных данных позволила выявить ряд ранее неизвестных особенностей поведения порообразующих элементов и минералов от условий их образования.

Среди порообразующих элементов, входящих в магматические породы основного-ультраосновного составов, по силе связанности с температурой и давлением можно выделить термочувствительный элемент и барочувствительный элемент. Под силой связанности понимается величина коэффициента корреляции для данного элемента с данной величиной на фоне других элементов в составах минеральных фаз и расплавов, выявленные при расчетах уравнений. **Термочувствительным** элементом является **магний**, а **барочувствительным** элементом является **алюминий**.

В расплавах, равновесных со шпинелью, оливином, ортопироксеном и клинопироксеном, выявилась достаточно высокая ($R \sim 0.7$) обратная зависимость между содержаниями магния и суммой щелочей, что позволяет предположить **гибридизм** (смешение, метасоматоз и т. д.) в происхождении природных высокомагнезиальных щелочных расплавов.

При исследованиях поведения величин K_D для **кремния, алюминия, магния и кальция** в системах основной-ультраосновной расплав–шпинель, оливин, ортопироксен, клинопироксен, плагиоклаз выявились несколько ранее неизвестных особенностей. Величины K_D для этих элементов в системах расплав–минералы в большинстве случаев (см. главу III) обратно пропорциональны их содержаниям в расплаве. Кроме того, величина K_D для кремния, как правило, прямо пропорциональна содержаниям алюминия, магния и кальция в расплаве, и, наоборот, K_D этих элементов прямо пропорциональны содержанию кремния в расплаве. Численные значения величин этих выявленных корреляционных связей лежат в интервале значений 0.6–0.9. Эти зависимости позволяют полагать антагонизм в поведении кремния в расплаве и группы элементов, представленных алюминием, магнием и кальцием, и, вероятно, могут быть полезными для понимания структуры магматических силикатных расплавов.

В петрологической практике широкое применение нашел коэффициент распределения K_D железо-магний в системе основной-ультраосновной расплав–оливин. Численное значение этой величины в виде среднего, рассчитанного рядом авторов по большому числу экспериментальных данных, используется как критерий равновесности в системе основной-ультраосновной расплав–оливин. Наши исследования экспериментальных данных по этой системе показали, что распределение значений этой величины как в условиях атмосферного давления, так и в условиях повышенного давления (до 175 кб) не подчиняется закону нормального распределения (см. главу III). Поэтому нужны конвенционные решения по выбору численного значения этой величины для ее использования.

Исследования экспериментальных результатов в системах расплав–шпинель и расплав–оливин позволили выявить несколько новых, ранее не описанных зависимостей составов этих минералов от условий их образования. Кристаллы шпинели, образовавшиеся при давлениях менее 15 кб, содержат в своем составе меньше 50 вес. % Al_2O_3 при содержаниях в расплаве Al_2O_3 менее 17–18 вес. %. Однако, при содержаниях в расплаве более 19 вес. % Al_2O_3 подобные глиноземистые шпинели могут образовываться и при атмосферном давлении. В кристаллах оливина, образовавшихся из расплава, содержащего более 3–5 вес. % CaO при

давлении от нескольких кб до ~200 кб (см главы III и IV), включая и эксперименты с участием флюида, содержание СаО должно быть более 0.1 вес. %. Эти закономерности с учетом данных по составам природных шпинелей (см. далее) позволяют сделать и ряд генетических выводов.

I

Исследования особенностей полученных формул, частоты встречаемости того или иного парагенезиса позволили выявить ряд закономерностей, носящих предположительный характер:

1. Существование стехиометрии расплава, равновесного с тем или иным минералом и парагенезисом. Основанием для этого предположения являются формулы, связующие содержания элементов в расплавах и их зависимость от P–T условий.

2. Барочувствительность составов минералов групп шпинели, ортопироксена, клинопироксена и плагиоклаза. Это предположение основано на различиях формул, полученных по одноименным выборкам экспериментов, выполненных при атмосферном и повышенном давлении. Для оливина формулы для условий атмосферного давления и значений давления до 20 кб практически идентичны, а при более высоких давлениях начинают различаться.

3. Барочувствительными являются и объемные доли минеральных подгрупп ортопироксена и плагиоклаза. Это отражается в различиях частоты встречаемости их в экспериментальных парагенезисах, образовавшихся при атмосферном давлении и в условиях повышенного давления.

II

Полученные формулы–инструменты были использованы для выяснения условий формирования парагенезисов (расплавно–минеральных и минеральных) в магматических породах базит-гипербазитового ряда, образовавшихся в различных геодинамических обстановках.

Океанические сегменты земной коры. Были использованы и исследованы аналитические данные по составам фаз базальтов, оливиновых базальтов и пикритов из Индо-Атлантического и Тихоокеанского сегментов. В Индо-Атлантическом сегменте это данные по следующим районам: 43°N САХ; приосевая зона САХ; скв. 332В; разлом в районе 54°N САХ; зона FAMOUS; плато Кергелен и поднятие Афанасия Никитина. В Тихоокеанском сегменте были собраны данные по следующим районам: трансформный разлом Сикейрос; разломная зона Хантер; хребет Горда; Коста-Риканский рифт, скв. 501, 504, 505.

Проявления внутриплитного вулканизма, горячая точка (Гавайские острова). Были исследованы составы фаз из пикритов, дунитов, базанитов, нефелинитов.

Проявления неоген-четвертичного вулканизма в островодужных системах (Курило-Камчатская островная дуга) и на активных континентальных окраинах на примере продуктов извержения вулкана Парикутин (магнезиальные андезиты). В Курило-Камчатской дуге были использованы и исследованы данные по составам фаз из различных типов базальтов и ряда ультраосновных включений из них в продуктах извержений вулканов Шивелуч, Харчинский, Заречный, Ключевской, БТТИ (извержение 1975–76 г.), Карымский, Авачинский, Мутновский, Ксудач, Кудрявый.

Щелочно-ультраосновные комплексы тектономагматической активизации стабилизированных областей. Были собраны данные по составам фаз из меймечитов Маймеча-Котуйской субпровинции и меймечитов арктического фрагмента магматической провинции Карру.

Ультрабазиты докембрийских зеленокаменных поясов. Были использованы и исследованы составы фаз из коматиитов зеленокаменного пояса Abitibi (Канада), зеленокаменного пояса Swayze (Канада), зеленокаменного пояса Barberton (Африка), коматиитовые базальты Ветрового пояса Балтийского щита (Россия) и меловых коматиитов о. Горгона.

Для выявления особенностей содержания кальция в кристаллах оливина различного генезиса были использованы данные по составам фаз из магматических и метаморфических пород различного происхождения и возраста: расслоенные интрузивные массивы (острова Рам,

Бушвельдский массив, Бураковский и др.); расслоенные массивы, сложенные породами преимущественно габбровой группы; интрузивные массивы второго и третьего слоев современной океанической коры; интрузивные массивы офиолитовых комплексов; интрузивные массивы дунит-клинопироксенит-габбровой формации (Аляска, Корякское нагорье, Урал); щелочно-ультраосновные комплексы (Алданский щит); основные интрузивные массивы трапповой формации (Сибирская платформа); ксенолиты щелочных разностей базальтов и кимберлитов. Эти данные были подкреплены экспериментальными результатами с участием летучих и при давлениях до 220 кб.

Результаты расчетов и сопоставлений, полученных по выше перечисленным геологическим объектам, позволили сделать ряд обобщений.

1. В эффузивных породах базит-гипербазитового ряда шпинель–оливиновая ассоциация, представленная включениями кристаллов шпинели в ойкокристаллы оливина, кристаллизуется первой в расплавах, их образовавших. Пироксены и плагиоклаз являются более низкотемпературными фазами.

2. Практически во всех эффузивных и интрузивных породах, указанных выше, кристаллы шпинели, включенные в оливин, представлены низкоглиноземистыми разностями. Это обобщение с учетом зависимости глиноземистости шпинели от давления позволяет полагать, что кристаллизация расплавов начинается на глубинах менее 45 км. Глиноземистые разности шпинели очень редки и встречаются преимущественно в щелочных подотрядах основных и ультраосновных пород, и расплавы, их образующие начинают кристаллизоваться на глубинах более 45 км (для доказательства этого положения требуются дальнейшие исследования).

3. Оливин–шпинелевая ассоциация в эффузивах базит-гипербазитового ряда практически всегда переуравновешена в условиях остывания. Исключения встречены в лавах рифтовых долин СОХ. С учетом экспериментальных данных по нагреву шпинель–оливиновой ассоциации, существование этой равновесной ассоциации в лавах СОХ позволяет полагать, что магма, содержащая этот парагенезис, проходит путь от начала кристаллизации на глубинах менее 25 км до дна рифтовой долины за время менее одного месяца и поднимается со скоростью более 35 м/час. Подъем происходит в адиабатических условиях.

4. Содержание MgO в коматиитах, включая и меловые коматииты о. Горгона, увеличено относительно расплавов, из которых образовались эти породы, за счет вторичных изменений.

5. В содержаниях кальция в кристаллах оливина магматического и метаморфического генезиса выявились следующие особенности: в эффузивах, измененных включительно по фацию зеленых сланцев, независимо от условий образования и возраста в подавляющем большинстве случаев оливин содержит более 0.1 вес. % СаО. Аналогичная картина и для оливина гипабиссальной фации (на примере сибирских траппов). В интрузивных телах оливин, как правило, содержит менее 0.1 вес. % СаО. Различные генерации кристаллов оливина в кимберлитах содержат менее 0.1 вес. % СаО. С учетом обобщений, полученных по экспериментальным данным можно полагать, что потеря магматическим оливином кальция происходит под действием флюида и кристаллы алмаза в кимберлитах образовались не в расплаве.

III

Наиболее существенные результаты могут быть выражены следующими положениями:

1. Создана система уравнений, позволяющих:

а) выявлять природные **равновесные** парагенезисы породообразующих минералов в магматических породах;

б) рассчитывать численные значения температуры и давления для равновесных условий кристаллизации;

в) рассчитывать **концентрации элементов в расплаве**, равновесном с таким парагенезисом.

2. Обобщение экспериментальных данных позволило выявить влияние **давления** на состав кристаллов **шпинели**. Это позволяет полагать, на основании составов кристаллов шпи-

нели в породах базит-гипербазитового ряда, что кристаллизация в породивших их расплавах начиналась на глубинах менее 45 км.

3. По уравнениям для выявления равновесности природных минеральных парагенезисов **равновесный шпинель–оливиновый парагенезис** обнаруживается только в **лавах рифтовых долин СОХ**. Это позволило оценить скорость подъема расплавов.

4. Особенности содержания кальция в кристаллах оливина, выявленные по экспериментальным данным, позволяют полагать, что кристаллы **алмаза** в кимберлитах образовались **не в расплаве**.

Оглавление

Предисловие	5
Введение	8
Список литературы	13
Методическая глава	14
Используемые данные, их обработка и методика расчета уравнений	14
Обработка выбранных анализов	16
Методика расчетов уравнений	16
Полученные уравнения	18
Список литературы	21

Часть I

Уравнения, полученные по экспериментальным результатам при атмосферном давлении	23
Глава 1. Уравнения, полученные по системе расплав–минерал	25
1.1. Система расплав–шпинель	25
1.2. Система расплав–оливин	39
1.3. Система расплав–ортопироксен	50
1.4. Система расплав–клинопироксен	62
1.5. Система расплав–плаггиоклаз	80
Глава 2. Уравнения, полученные по системе расплав–минеральный парагенезис (2–3 минерала)	87
2.1. Система расплав–шпинель–оливин	87
2.2. Система расплав–оливин–ортопироксен	96
2.3. Система расплав–оливин–клинопироксен	104
2.4. Система расплав–оливин–плаггиоклаз	115
2.5. Система расплав–клинопироксен–плаггиоклаз	123
2.6. Система расплав–оливин–клинопироксен–плаггиоклаз	133
Глава 3. Уравнения, полученные с учетом температуры по составам расплавов	141
3.1. Расчет содержаний Fe^{2+} и Fe^{3+} форм железа в расплаве	141
3.2. Соотношение элементов в расплаве, равновесном с кристаллической фазой	144
3.3. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном со шпинелью	146
3.4. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с оливином	149
3.5. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с ортопироксеном	153
3.6. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с клинопироксеном	156
3.7. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с плаггиоклазом	159
3.8. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом шпинель–оливин	162
3.9. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–ортопироксен	164
3.10. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–клинопироксен	164
3.11. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–плаггиоклаз	166
3.12. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом клинопироксен–плаггиоклаз	168
3.13. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–клинопироксен–плаггиоклаз	170
Список литературы	171

Часть II

Уравнения, полученные по экспериментальным результатам при повышенном давлении	181
Глава 4. Уравнения, полученные по системе расплав–минерал	183
4.1. Система расплав–шпинель	183
4.2. Система расплав–оливин	194
4.3. Система расплав–ортопироксен	205
4.4. Система расплав–клинопироксен	217
4.5. Система расплав–плаггиоклаз	231
Глава 5. Уравнения, полученные по системе расплав–минеральный парагенезис (2–3 минерала)	237
5.1. Система расплав–шпинель–оливин	237
5.2. Система расплав–шпинель–ортопироксен	247
5.3. Система расплав–шпинель–клинопироксен	254
5.4. Система расплав–оливин–ортопироксен	264
5.5. Система расплав–оливин–клинопироксен	275
5.6. Система расплав–оливин–плаггиоклаз	289
5.7. Система расплав ортопироксен–клинопироксен	296
5.8. Система расплав–клинопироксен–плаггиоклаз	307
5.9. Система расплав–оливин–ортопироксен–авгит	318
Глава 6. Уравнения, полученные с учетом температуры и давления по составам расплавов	331
6.1. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с кристаллической фазой	331
6.2. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном со шпинелью	337
6.3. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с оливином	342
6.4. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с ортопироксеном	352
6.5. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с клинопироксеном	359
6.6. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с плаггиоклазом	365
6.7. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом шпинель–оливин	370
6.8. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом шпинель–ортопироксен	374
6.9. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом шпинель–клинопироксен	376
6.10. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–ортопироксен	380
6.11. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–клинопироксен	383
6.12. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–плаггиоклаз	387
6.13. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом ортопироксен–клинопироксен	391
6.14. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом клинопироксен–плаггиоклаз	396
6.15. Содержания и соотношения элементов в расплаве, равновесном с парагенезисом оливин–ортопироксен–клинопироксен	400
Список литературы	404

Часть III

Обсуждение полученных результатов	417
Введение	419
Глава 7. Уравнения, полученные по двухфазной системе расплав–минерал	420
7.1. Уравнения, полученные для системы расплав–шпинель	420
7.2. Уравнения, полученные для расплава, равновесного со шпинелью	426
7.3. Уравнения, полученные для системы расплав–оливин	428
7.4. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с оливином	438
7.5. Уравнения, полученные для системы расплав–ортопироксен	447
7.6. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с ортопироксеном	453
7.7. Уравнения, полученные для системы расплав–клинопироксен	457
7.8. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с клинопироксеном	466
7.9. Уравнения, полученные для системы расплав–плагиоклаз	469
7.10. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с плагиоклазом	473
7.11. Корреляционные зависимости величин KD породообразующих элементов в двухфазной системе минерал–расплав	475
Глава 8. Уравнения, полученные по трехфазным и четырехфазным системам расплав–минеральный парагенезис	488
8.1. Уравнения, полученные для системы расплав–шпинель–оливин	488
8.2. Уравнения, полученные для расплава, равновесного со шпинелью и оливином	493
8.3. Уравнения, полученные для системы расплав–шпинель–ортопироксен	494
8.4. Уравнения, полученные для расплава, равновесного со шпинелью и ортопироксеном	496
8.5. Уравнения, полученные для системы расплав–шпинель–клинопироксен	496
8.6. Уравнения, полученные для расплава, равновесного со шпинелью и клинопироксеном	498
8.7. Уравнения, полученные для системы расплав–оливин–ортопироксен	499
8.8. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с оливином–ортопироксеном	502
8.9. Уравнения, полученные для системы расплав–оливин–клинопироксен	503
8.10. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с оливином–клинопироксеном	508
8.11. Уравнения, полученные для системы расплав–оливин–плагиоклаз	509
8.12. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с оливином–плагиоклазом	511
8.13. Уравнения, полученные для системы расплав–ортопироксен–клинопироксен	512
8.14. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с ортопироксеном–клинопироксеном	516
8.15. Уравнения, полученные для системы расплав–клинопироксен–плагиоклаз	517
8.16. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с клинопироксеном–плагиоклазом	520
8.17. Уравнения, полученные для системы расплав–оливин–ортопироксен–клинопироксен	521
8.18. Уравнения, полученные для расплава, равновесного с оливином–ортопироксеном–клинопироксеном	524
8.19. Уравнения, полученные для системы расплав–оливин–клинопироксен–плагиоклаз	525
Список литературы	531

Часть IV

Результаты использования полученных уравнений и выявленных закономерностей для природных парагенезисов	537
Введение. Ряд правил, допущений и задач, используемых при расчетах	539
Глава 9. Вулканыты второго слоя современной океанической коры	540
9.1. Индо-Атлантический сегмент	540
9.2. Тихоокеанский сегмент	559
9.3. Проявления внутриплитного магматизма в Тихоокеанском сегменте (базальты, пикриты, дуниты, базаниты, нефелиниты Гавайских островов)	565
Глава 10. Неоген-четвертичные проявления вулканизма зоны перехода континент-океан (активные континентальные окраины и островные дуги)	572
10.1. Транс-Мексиканский вулканический пояс	572
10.2. Курило-Камчатская островная дуга	576
Глава 11. Щелочно-ультраосновные комплексы тектоно-магматической активизации стабилизированных областей и докембрийские ультраосновные эффузивы (коматииты)	589
11.1. Меймечиты Маймеча-Котуйской субпровинции и меймечиты арктического фрагмента магматической провинции Карру	589
11.2. Ультрабазиты докембрийских зеленокаменных поясов	599
Глава 12. Особенности содержания кальция в кристаллах оливина различного генезиса	613
Список литературы	633
Заключение	654

На первой странице обложки представлена часть Ключевской группы вулканов.

На переднем плане – собственно Ключевской вулкан
с рядом шлаковых конусов на его склонах.

Фото *В. А. Подтабачного*

Научное издание

Пономарев Г.П., Пузанков М.Ю.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМЕ
ОСНОВНОЙ-УЛЬТРАОСНОВНОЙ РАСПЛАВ–ШПИНЕЛЬ, ОЛИВИН,
ОРТОПИРОКСЕН, КЛИНОПИРОКСЕН, ПЛАГИОКЛАЗ
ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Печатается по решению Ученого совета ИВиС ДВО РАН

Подписано в печать 16.04.2012. Формат 60×90/8. Печ. л. 83,5. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии издательства «ПРОБЕЛ 2000»
Москва, ул. Рабочая, 91

