

## **ДВА ТИПА МАГМ КУРИЛЬСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ: ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПРОЦЕСС ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ**

**О. А. Хлебородова**

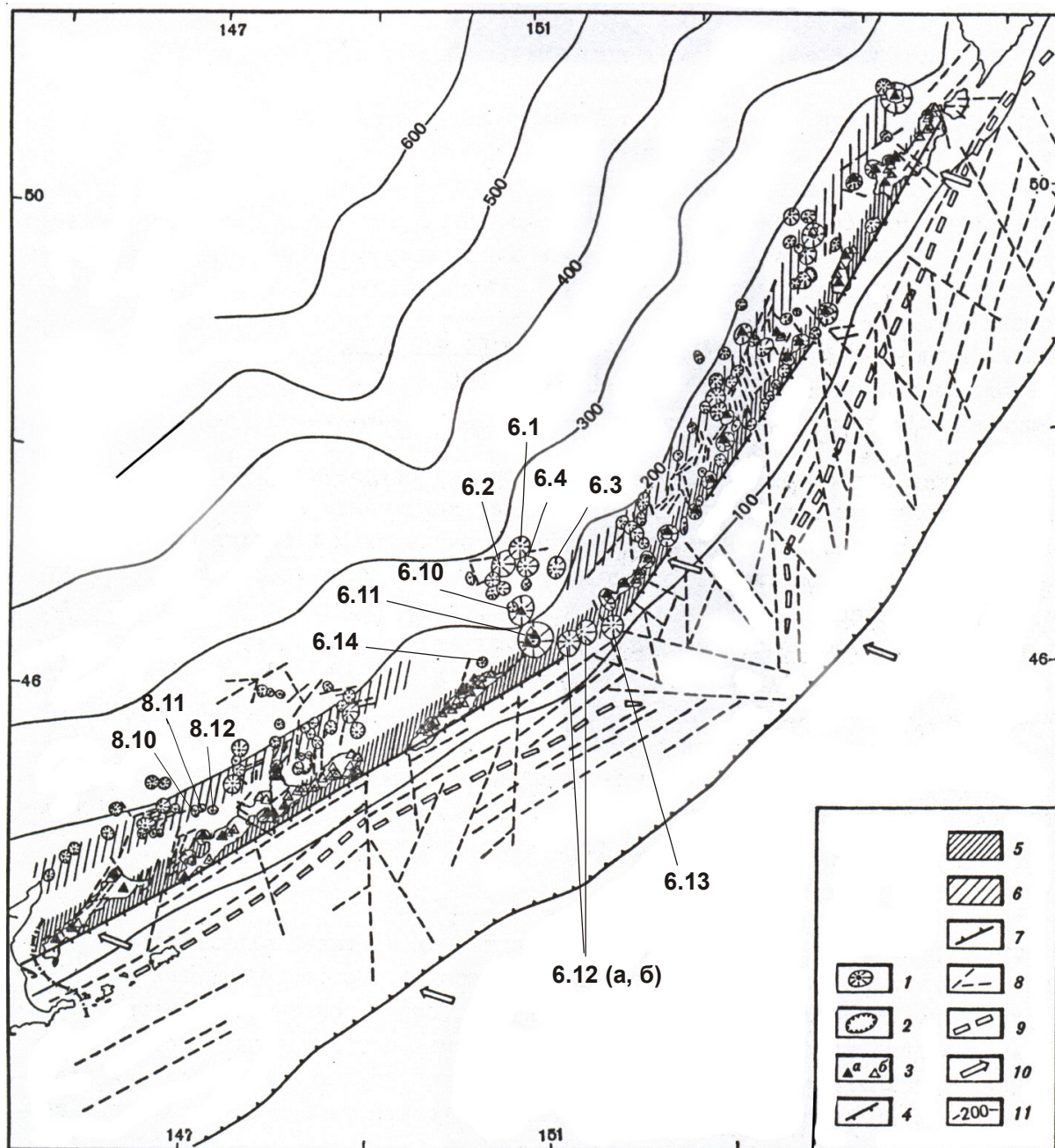
*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Пийпа 9, 683006.  
e-mail: khleborodova@kscnet.ru*

Курильская островная дуга является типичной островной дугой, характерной для активной зоны перехода от океана к континенту. Ей сопутствуют такие структурные элементы как глубоководный желоб на фронте дуги с сопряженной сейсмофокальной зоной и задуговой бассейн: Охотское море с глубоководной Курильской котловиной в тылу дуги (рис. 1). Курильская островная дуга сформирована на коре континентального типа [10]. Мощность коры по данным глубинного сейсмического зондирования, а также сейсмических исследований методами обменных волн землетрясений составляет 28-33 км на Южном фланге Большой Курильской гряды, 32-36 км на Северном фланге дуги и 25-30 км в центральной части, максимальное значение 42-44 км достигает под островом Итуруп. [6].

Курильская островная дуга имеет высокую тектоническую и вулканическую активность, и характеризуется высоким тепловым потоком, который часто достигает значений 140-150 мВт/м<sup>2</sup>. Для Охотского моря также отмечен повышенный тепловой поток, до 180 мВт/м<sup>2</sup> в Курильской котловине, тогда как для глубоководного желоба определены низкие его значения 25-30 мВт/м<sup>2</sup> [4].

Анализ механических напряжений [9], а также комплексный анализ геолого-геофизической информации, указывает на то, что Курило – Камчатский глубоководный желоб и Курильская котловина в настоящее время испытывают опускания при поперечном растяжении и вертикальном сжатии. Тогда как Курильская островная система в целом испытывает подъем, происходящий в условиях поперечного сжатия и вертикального растяжения [11].

Вулканические породы Курильской островной дуги представлены широким спектром кремнекислотности от базальтов до дацитов и риолитов. Выделяются низко-калиевые «толеитовые» и высоко-умереннокалиевые известково-щелочные серии. Так же, как и для большинства вулканических пород других островных дуг, в их составах сохраняются устойчивые минимумы по Zr, Nb и Ta, низкие содержания Ti и повышенные содержания легких редкоземельных элементов [2]. В работе [12] отмечается увеличение содержания калия с глубиной до сейсмофокальной зоны. Кроме этого, на основании данных анализа пород 96 подводных вулканов установлена поперечная геохимическая зональность, которая выражается в повышении от фронтальных к тыловым зонам концентраций в лавах большинства некогерентных редких элементов (K, Rb, Li, Be, Ba, Sr, U, Th, La, Ce, Nb, Ta, Zr, W, Mo), величин K/Na, Rb/Sr, La/Yb, Sr/Ca, Th/U отношений и содержаний летучих компонентов - H<sub>2</sub>O, F, Cl, S. В этом же направлении уменьшаются содержания в лавах Fe, V, величины Fe/(Fe+Mg) и Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup> отношений, а также величины отношений <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr и <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd [1, 2, 10]. Авторами этих работ на основании плотности распределения вулканических центров выделены две зоны магмообразования – фронтальная и тыловая с промежуточной зоной ослабления вулканической активности между ними. Геохимическую зональность дуги они связывают с двумя зонами магмогенерации в верхнемантийном клине, которые обусловлены двумя уровнями отделения летучих от поддвигаемой океанической плиты. Основываясь на петрологических данных, указывающих на более окислительные условия кристаллизации вкрапленников в вулканитах тыловой зоны по сравнению с фронтальной, авторы сделали предположение о большем количестве летучих, отделяемых под тыловой зоной дуги. По их мнению, большие содержания воды в магмах тыловой зоны обуславливают известково-щелочной тренд фракционирования, тогда как



**Рис. 1.** Схема структурного положения вулканов Курильской островной дуги [10]. 1- подводные вулканы; 2 – подводные кальдеры; 3 – активные (а) и потухшие (б) наземные вулканы; 4 – вулканический фронт; 5, 6 – фронтальная (5) и тыловая (6) вулканические зоны; 7 – ось глубоководного желоба; 8 – разломы; 9 – ось фронтальной (невулканической) дуги; 10 – направление движения Тихоокеанской плиты; 11 – изоглубины до сейсмофокальной плоскости.

меньшие в магмах фронтальной зоны – толеитовый. Авторы [10] считают, что мантия в астеносферном клине под фронтальной и тыловой зоной должна иметь значительную геохимическую неоднородность.

Тем не менее, эти же авторы [10] указывают на нарушение обнаруженной зональности в районе поперечного профиля пролива Буссоль. Кроме того, присутствие умеренно-калиевых пород в районах фронтальной части Курильской дуги совместно с низкокалиевыми сериями в пределах одного вулканического центра также не является редкостью – вулкан Немо (о. Онекотан), вулканы Вернадского и Татаринова (о. Парамушир) [12]. Эти факты могут говорить о генетической связи низко- и высоко-калиевых серий пород, возможное существование которой для Курильской островной дуги ранее не исследовалось.

В поисках генетической связи следует рассмотреть породы, отнесенные по геохимическим признакам к разным сериям, но найденным на относительно ограниченной территории. Также необходим комплексный анализ одних и тех же образцов на макро-состав, микрокомпоненты и изотопию.

В данной работе были выбраны два района исследования. Первый: профиль пролива Буссоль, с «нарушенной» геохимической зональностью – вулканы 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 – тыловая зона дуги, вулканы 6.12 (а, б), 6.13, 6.14 – фронтальная зона и вулканы 6.10, 6.11 – промежуточная зона<sup>1</sup>. Второй: вулканы 8.10, 8.11 и 8.12, расположенные в 4 км друг от друга и в 30 км к северу от п-ва Атсонупури (о. Итуруп). Расстояние до вулканического фронта дуги от них составляет примерно 50 км (рис. 1).

### Методы анализа и данные

Аналитические работы образцов профиля пролива Буссоль проводились в Институте морской геологии IFM-GEOMAR (Германия). Содержания в породах макроэлементов и некоторых микроэлементов определялись рентгено-флюоресцентным анализом (РФА). Все остальные малые элементы определялись методом ICPMS. Изотопы Sr, Nd измерялись на масс-спектрометре. Данные К. Хернле и Р. Вернера (Hernle K. and Werner R.), российско-германский проект КОМЕХ-II, 2001-2004, пока не опубликованы.

Данные анализа макро-состава (РФА) для подводных вулканов 8.10, 8.11, 8.12 и данные краткого петрографического анализа взяты из Базы данных по подводным вулканам Курильской островной дуги Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН [10].

### Обсуждение результатов

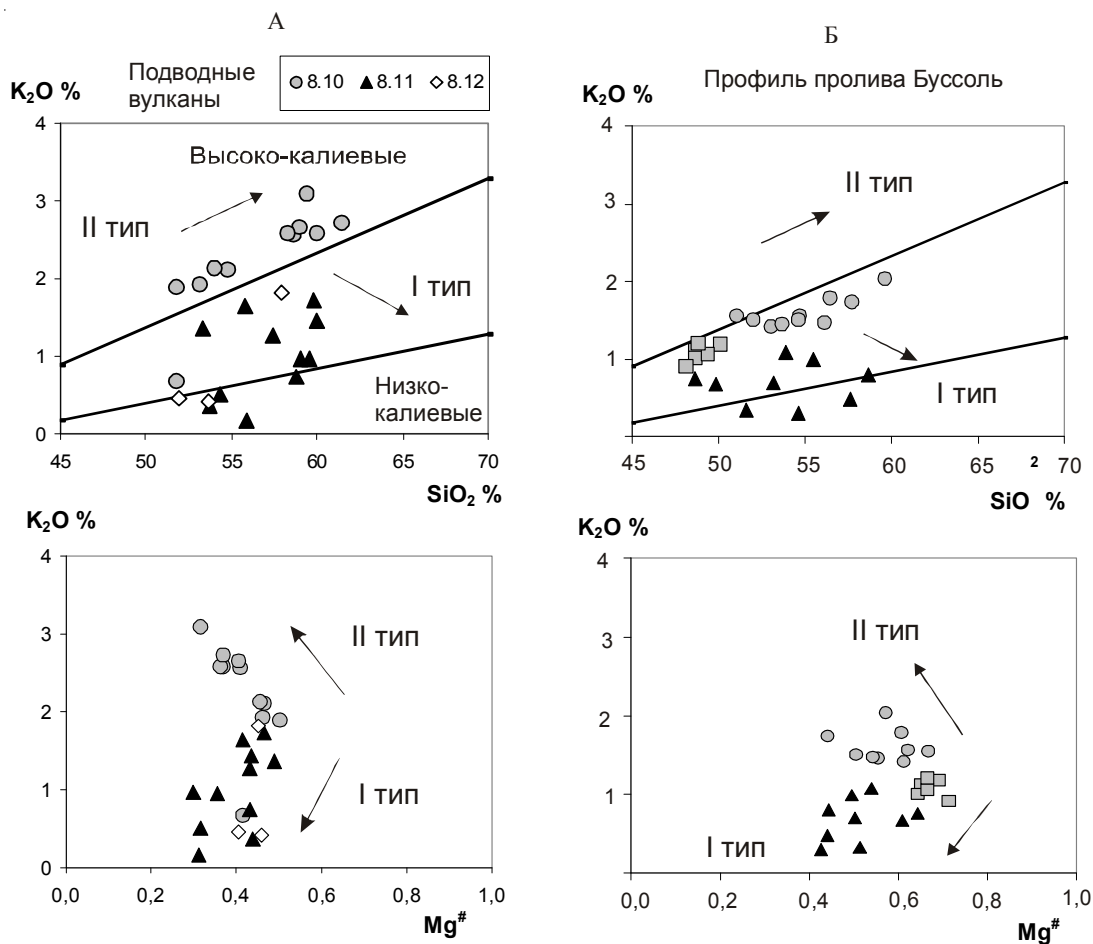
В пределах двух исследуемых районов выявлены как низко-калиевые, так и высоко-умереннокалиевые (далее высоко-калиевые) серии пород. Можно отметить присутствие магнезиальных базальтов ( $Mg^{\#} > 0.62$ )<sup>2</sup> с высокими содержаниями калия (0.9 – 1.4 %) <sup>3</sup> среди образцов профиля пролива Буссоль (рис. 2 А, Б). Геохимические данные по микро-составу вулканических пород профиля пролива Буссоль показывают отсутствие поперечной зональности в распределении редких элементов, характерной для всей дуги в целом. В тыловой зоне дуги есть образцы как с высокими содержаниями калия и всех несовместимых редких элементов (НРЭ), так и с очень низкими их содержаниями (рис. 3). Образцы фронтальной зоны имеют такие же высокие концентрации НРЭ, как и образцы тыловой зоны. Причем, концентрации НРЭ в базальтах практически такие же, как в андезитах. Несмотря на то, что отсутствует зависимость содержаний НРЭ в породах от содержаний кремнекислоты, наблюдается отчетливая положительная корреляция концентраций всех НРЭ с содержаниями калия, которые, как было показано выше, широко варьируют в породах (рис. 2, 3). Такой диапазон концентраций нельзя объяснить только лишь различной степенью плавления исходного вещества или только фракционной кристаллизацией по известково-щелочному или толеитовому типу.

На основании приведенных выше графических зависимостей, автор данной работы предлагает в качестве направления дифференциации пород Курильской островной дуги использовать не общепринятый тренд, от более низких содержаний кремнекислоты и щелочей к более высоким их совместным концентрациям с делением пород на серии по щелочности, а использовать в качестве направления дифференциации – рост концентраций кремнекислоты в породах совместно с уменьшением их магнезиальности. В этом случае можно выделить два основных тренда дифференциации: I – с ростом количества  $SiO_2$  в породах и уменьшением их магнезиальности  $Mg^{\#}$  (или с ростом отношения  $SiO_2/MgO$ ), содержания  $K_2O$ , всех НРЭ, а также отношения  $K_2O/Na_2O$ ,  $La/Yb$  в них уменьшаются и II – с увеличением  $SiO_2$  и уменьшением  $Mg^{\#}$  (с ростом  $SiO_2/MgO$ ) – концентрации  $K_2O$ , НРЭ и отношения  $K_2O/Na_2O$ ,  $La/Yb$  возрастают (рис. 2 (А, Б), 3, 4, 5

<sup>1</sup> Номер вулкана по каталогу базы данных Института вулканологии и сейсмологии по подводным вулканам Курильской островной дуги [10].

<sup>2</sup> Коэффициент магнезиальности  $Mg^{\#} = Mg / (Mg + Fe)$  – отношение молярных концентраций элементов.

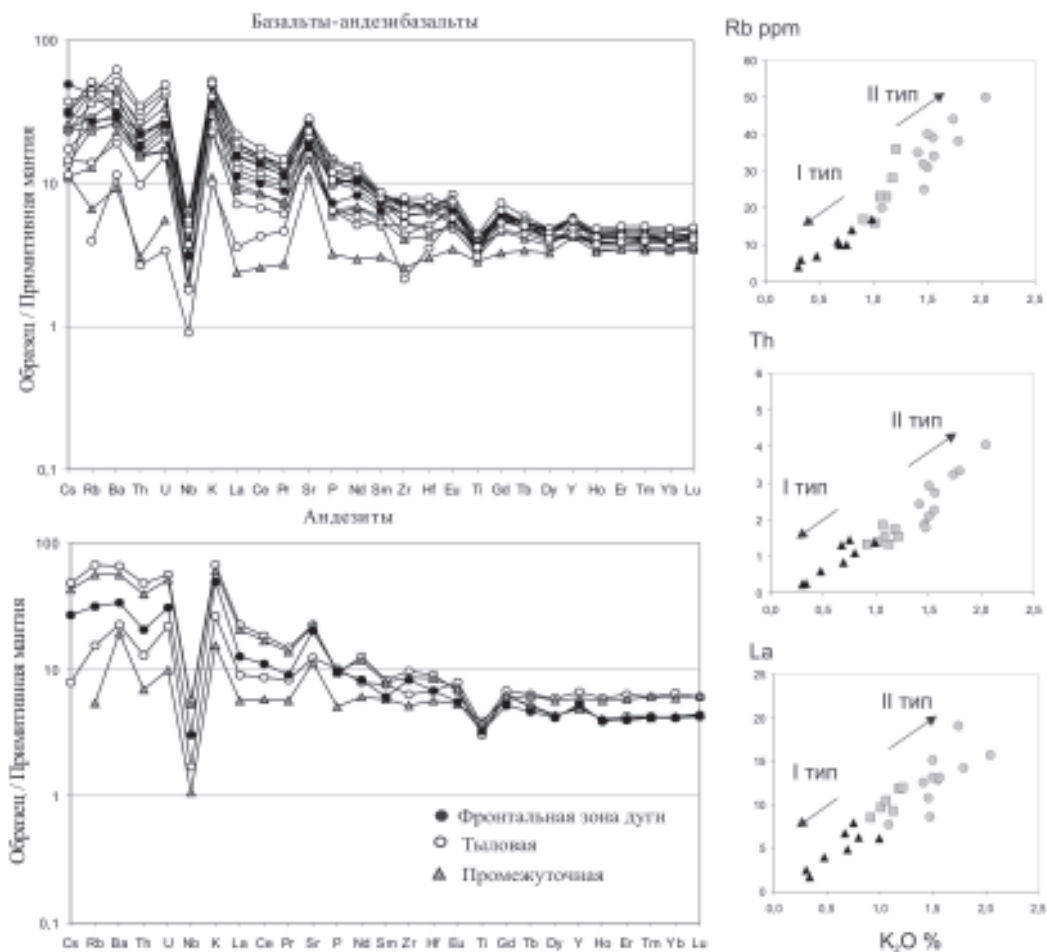
<sup>3</sup> Все следующие концентрации макроэлементов даны в весовых процентах, микроэлементов в ppm.



**Рис. 2.** Характер изменений концентраций калия в вулканических породах Курильской островной дуги в зависимости от содержаний кремнекислоты и магнезиального фактора: А – подводных вулканов 8.10, 8.11, 8.12, Б – вулканов профиля пролива Буссоль. Стрелкой показаны основные направления предполагаемой дифференциации. Породы I типа дифференциации обозначены черными треугольниками, II типа – серыми кружками и квадратами, квадратами обозначены наиболее магнезиальные разновидности.

Б). В дальнейшем породы (магмы), соответствующие I тренду дифференциации, называются породами (магмами) I типа, а соответствующие II тренду – породами (магмами) II типа. Эти тренды отражают две различные тенденции изменения концентраций калия и НРЭ в Курильских вулканиках при похожем изменении содержаний магния и кремнекислоты. Деление на толеитовые и известково-щелочные серии не показывает этой закономерности. Четкое разграничение полученных трендов, по-видимому, является следствием двух реально существующих различных процессов, приводящих к появлению пород (магм) одного и другого типа. Видно, что оба тренда дифференциации I и II взаимосвязаны между собой через наиболее магнезиальные породы, что говорит в пользу однородного источника для обоих типов пород (магм). Общая зависимость суммарного содержания хрома и никеля в породах от коэффициента магнезиальности также подтверждает это (рис. 5 А).

Несмотря на очевидно сложный механизм дифференциации, высокие содержания калия и всех НРЭ в магнезиальных породах II типа позволяют предположить, что на начальном этапе эволюции основные различия исходных магм все-таки обусловлены различной степенью плавления. Индикатором этого могут быть отношения несовместимого и достаточно мало подвижного во флюиде лантана к совместимому итербию –  $La/Yb$ , а также сильно несовместимого и практически не мобильного во флюиде ниобия к совместимому микроэлементу тербию –  $Nb/Tb$ . Выделенная на рисунке 4 овалом область наиболее магнезиальных II типа и близких к ним разновидностей I типа пород, по-видимому, соответствует



**Рис. 3.** Характер распределения нормированных относительно примитивной мантии (Sun & McDonough, 1989) концентраций микроэлементов в вулканитах Курильской островной дуги профиля пролива Буссоль. Зависимость содержаний рубидия, тория и лантана от концентраций калия. Обозначения те же, что и на рис. 2.

начальным магмам, образованным путем частичного плавления однородного источника. Возрастание степени плавления показано жирной стрелкой. Ход дальнейшей дифференциации каждого типа пород, по мнению автора, совпадает с увеличением содержаний в них кремнекислоты (рис. 4).

На основании представленных зависимостей можно предположить, что исходный расплав формируется из однородного мантийного материала путем его частичного плавления в разной степени – первичная дифференциация магм, и что в ходе дальнейшей дифференциации по I типу, вероятно, происходит его «разбавление» за счет ассимиляции деплетированного микроэлементами вещества, а в ходе дифференциации по II типу – концентрирование. Задача исследования – установить причину того и другого типа эволюции.

Первичная дифференциация может происходить в процессе образования исходных магм путем плавления однородного мантийного вещества на различной глубине под действием флюида или декомпрессии. Поднимающийся в результате конвекции мантийный материал (или мантийный диапир) также может частично плавиться и давать серию магм, соответствующих этой стадии дифференциации.

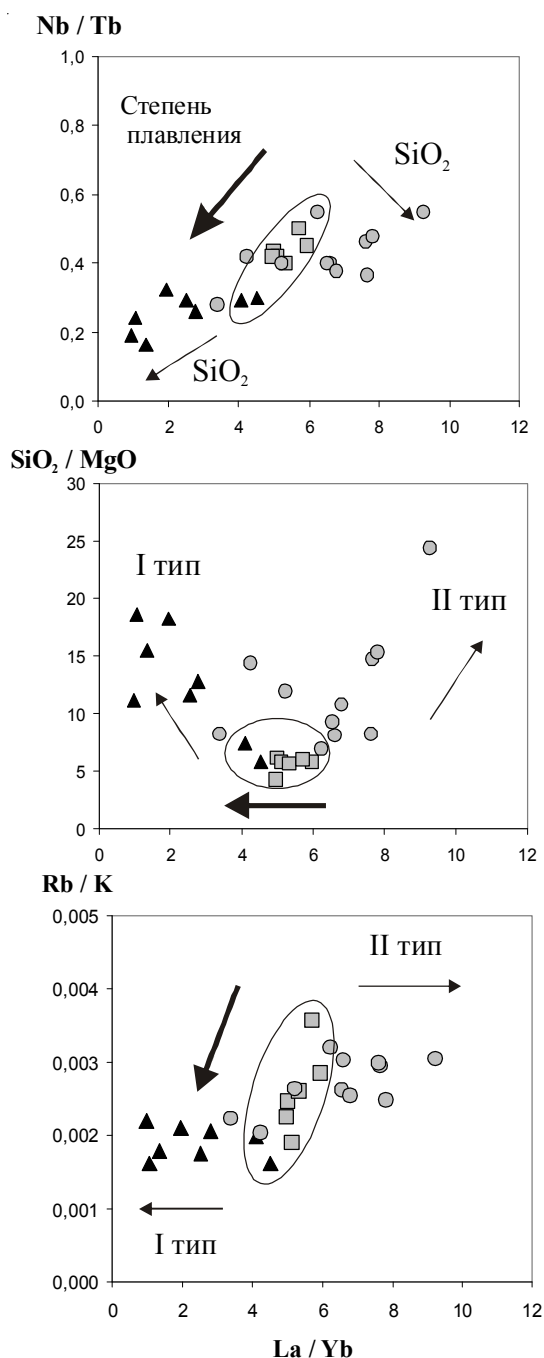
Причиной дальнейшей дифференциации, по мнению автора, является физический фактор разделения, основанный на различной способности жидких и аморфных тел сопротивляться перемещению. Это – вязкость, одна из важных характеристик силикатных

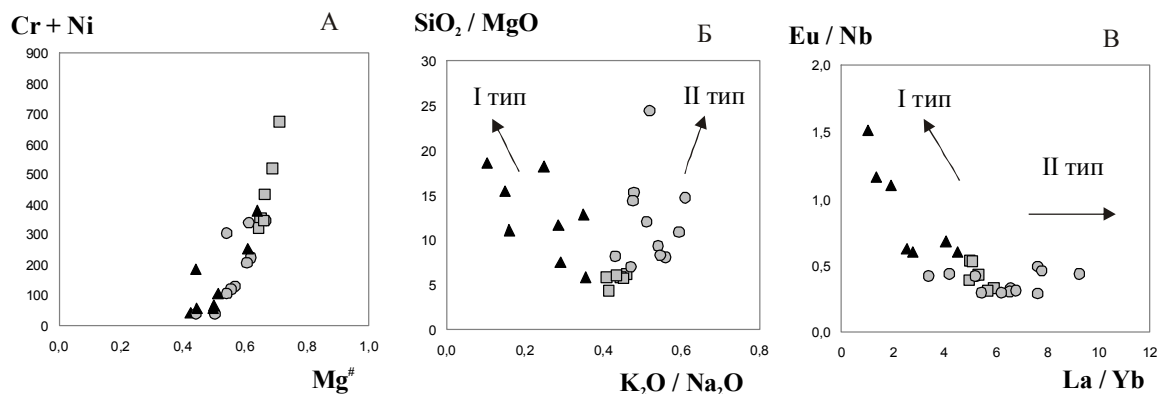
расплавов, определяющая их транспортные свойства и способность миграции к поверхности. Вязкость расплава зависит от химического состава, содержания воды, которая значительно ее снижает, а также температуры и давления, которые также депрессивно действуют на вязкость [14, 15, 20, 23, 25, 37]. Причем, равной вязкостью могут обладать расплавы, имеющие или высокую температуру и низкое содержание воды, или меньшую температуру, но большее водосодержание. Например, по экспериментальным данным Ричета (P. Richet et al.) [23] сухой расплав искусственного андезита с температурой 1250 К имеет такую же вязкость как и расплав того же андезита при 1000 К, но содержащий 2 % воды.

Автор предполагает, что высоких уровней достигают магмы, обладающие примерно одинаковыми транспортными свойствами. В этом случае можно ожидать дифференциацию исходных магм в направлении уменьшения их температуры, но увеличения начальных содержаний воды. Так как флюид предпочитает мигрировать в направлении снижения давления, то зоны геодинамического растяжения в мантии и земной коре должны быть проводниками менее нагретых, но содержащих больше воды расплавов. Любой другой процесс, приводящий к снижению вязкости мигрирующих к поверхности остывающих магм – фракционная кристаллизация с обогащением щелочными компонентами и летучими, ассимиляция известняков, реакция высокоглиноземистых вязких расплавов с мафическими вмещающими породами, также будет увеличивать вероятность наблюдения на поверхности результирующих магм и соответствующих им пород.

Полученные для Курильских вулкаников тренды дифференциации можно объяснить следующим образом. При образовании мантийного диапира – частично расплавленного под действием флюида или в результате декомпрессии мантийного вещества, поднимающегося к поверхности, его верхняя часть, по-видимому, имеет более низкую плотность и обогащена летучими компонентами. В процессе подъема диапира происходит его дальнейшее плавление и образование первичных магм. Степень плавления обогащенных летучими частей диапира будет выше, чем степень плавления менее насыщенных летучими, но, вероятно, имеющих более высокую температуру глубинных его частей (рис. 6). Исходные магмы, соответствующие *I типу* дифференциации, образуются при больших степенях плавления, возможно, имеют меньшую температуру и более высокие начальные содержания воды. Вероятно, в дальнейшем магмы этого типа достигают земной поверхности или уровня магматических очагов только в результате снижения их вязкости благодаря неоднократной «подпитки» флюидом, отделяющимся

**Рис. 4.** Изменение отношений некоторых макро- и микроэлементов в вулканиках Курильской островной дуги в зависимости от типа дифференциации. Направления основной и последующей дифференциации показаны стрелками. Обозначения те же, что и на рис. 2.

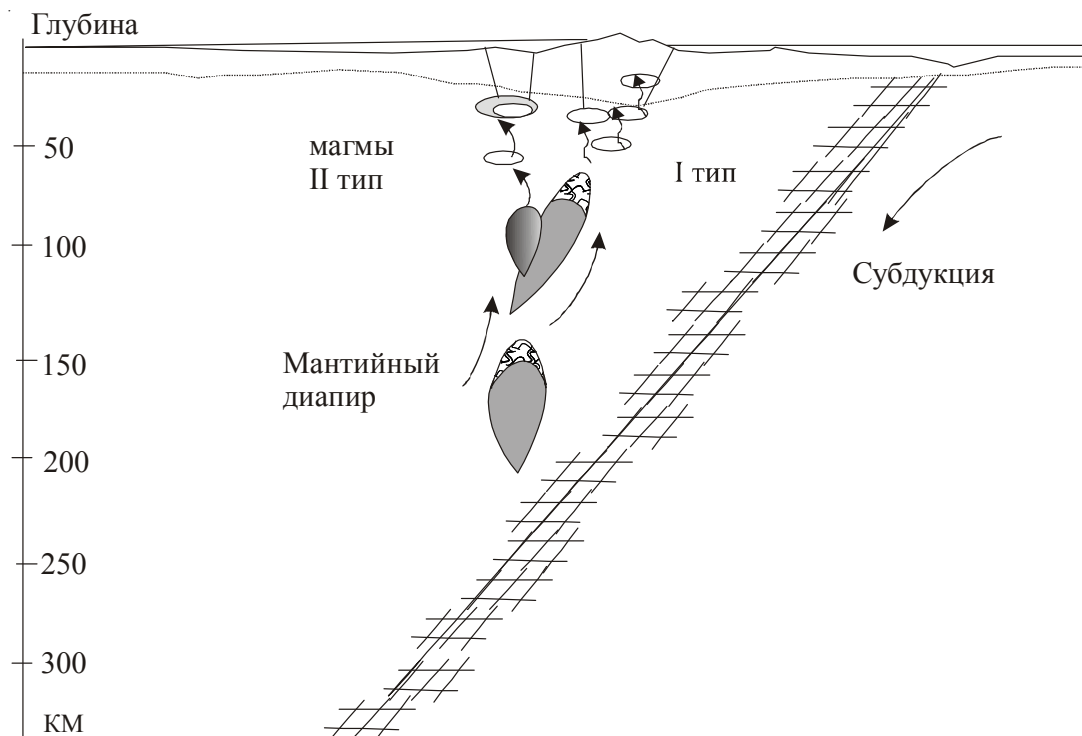




**Рис. 5.** Содержание суммарного количества хрома и никеля в зависимости от коэффициента магнезиальности (А). Характер изменения отношений  $K_2O/Na_2O$  и  $SiO_2/MgO$  (Б), а также отношений  $La/Yb$  и  $Eu/Nb$  (В) в вулканических породах Курильской островной дуги I и II типа дифференциации. Обозначения те же, что и на рис. 2.

от ниженаходящихся магм и «дегазирующего» диапира. Исходные магмы, соответствующие *II* типу дифференциации, образуются при меньшей степени плавления, возможно, имеют большую по сравнению с магмами I типа температуру и меньшие содержания воды. По всей вероятности, магмы этого типа достигают очаговой зоны в результате неоднократного поглощения порций магм такого же типа, которые к этому времени уже подверглись начальной фракционной кристаллизации и обогащены легкоплавкими компонентами и летучими. В результате подобного смешения вязкость магм также будет снижаться.

Тектонический сдвиг первичного мантийного диапира (вследствие субдукции), может приводить к увеличению различий двух типов магм и появлению двух вулканических зон – фронтальной и тыловой, так как в этом случае достигать высоких уровней смогут



**Рис. 6.** Принципиальная схема формирования магм, развивающихся согласно I и II типу дифференциации. Большими стрелками показаны направления субдукции и движения мантийного диапира, маленькими – направления перемещения магм и флюида, пунктирной линией – примерная граница земной коры, сплошной тонкой – разломы, решеткой – сейсмофокальная плоскость.

только крайние члены первичной дифференциации – или самые высокотемпературные магмы, или магмы с высоким содержанием воды.

Исходя из предложенной модели, можно объяснить *геохимические особенности* каждого типа магм. Так как исходные магмы II типа образуются при меньшей степени плавления мантийного вещества, то они имеют более высокие по сравнению с магмами I типа начальные концентрации щелочей, особенно калия, а также несовместимых микроэлементов. Кроме того, благодаря предложенному выше прогрессивному смешению, происходит дальнейшее обогащение магм этого типа несовместимыми микроэлементами и летучими. Подобный механизм обогащения предложил М.Д. О'Хара [22].

Высокие содержания воды в магмах I типа сдерживают кристаллизацию, так как ликвидусные температуры большинства минералов, особенно плагиоклаза, с добавлением воды снижаются. Небольшая степень фракционирования не способствует накоплению несовместимых микроэлементов в магмах этого типа. Следует сказать, что большинство афировых пород из базы данных ИВиС по подводным вулканам Курильской островной дуги попадают в поле низко-калиевых толеитов (рис. 7). Недостаток щелочей требует участия ионов кальция в алуминатных  $Q^4$  и силикатных  $Q^3$  комплексах<sup>4</sup>, что уменьшает их количество в цепочечных  $Q^2$  группировках. Это приводит к увеличению железосодержащих  $Q^2$  комплексов и способствует накоплению железа в расплаве. Повышенные содержания железа – это характерная особенность низко-калиевых вулканитов Курил.

Так как флюид мигрирует преимущественно в зоны пониженного давления, то *геодинамические условия растяжения* будут способствовать образованию магм I типа. Одним из аргументов авторов работы [10] в пользу небольших содержаний воды в низко-калиевых магмах Курил – это отсутствие амфибола среди вкрапленников. Но уменьшение давления до величин меньше ~5 – 8 кбар [7] может привести к разложению ранее образованного амфибола. Реликтовый амфибол обнаружен в некоторых низко-калиевых образцах вулкана 8.11. Кроме того, отрицательный геодинамический градиент сдвигает равновесие (1) влево, в сторону увеличения мольного объема, что способствует образованию плагиоклазовых комплексов в расплаве и сдерживает кристаллизацию пироксена и амфибола.



В этом случае также будет увеличиваться доля анортита в составе вкрапленников плагиоклаза, что вообще характерно для низко-калиевых вулканитов Курильской островной дуги [10]. Этот же процесс способствует кристаллизации оливина, вывод которого из расплава будет снижать его магнезиальность и уменьшать содержания хрома и никеля, которые концентрируются в этом минерале (рис. 5 А). Сдвиг равновесия (1) влево также способствует растворению кремнезема. Ассимиляция магмами гидротермально измененных пород, обедненных микроэлементами и, вероятно, морской воды (NaCl) может давать наблюдаемый в I типе дифференциации эффект разбавления, то есть снижение

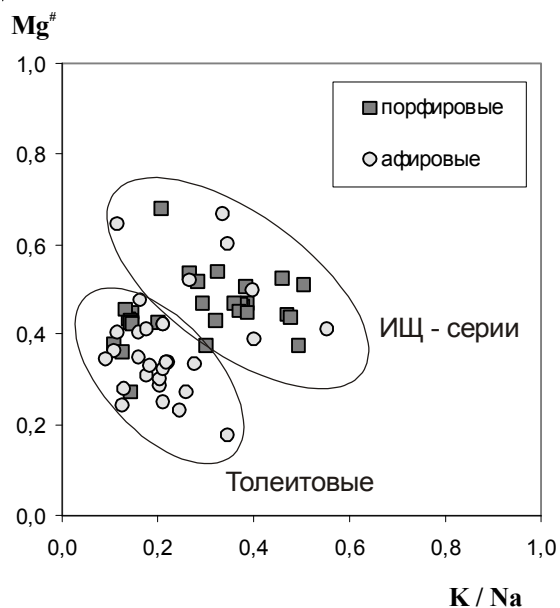
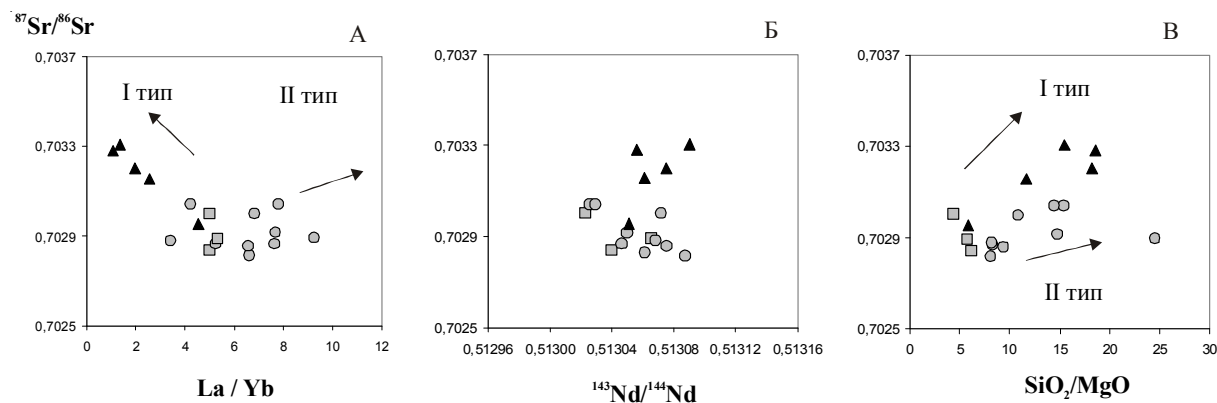


Рис. 7. Зависимость коэффициента магнезиальности  $Mg^{\#}$  от отношения  $K/Na$  для всех афировых (содержание вкрапленников < 3 %) и части порфировых пород (вкрап. > 20 %) из базы данных ИВиС по подводным вулканам Курильской островной дуги. Овалом обозначены поля известково-щелочных и «толеитовых» пород.

<sup>4</sup> Индекс указывает на количество мостикового кислорода в комплексах.

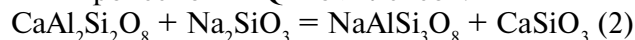


концентраций микроэлементов и уменьшение отношения  $K_2O/Na_2O$  с ростом концентраций  $SiO_2$  (рис. 5 Б). Высокие отношения  $Eu/Nb$  в кислых породах этого типа (рис. 5 В) можно объяснить разбавлением исходного расплава кремнекислотой с преимущественным образованием плагиоклазовых группировок. В пользу ассимиляции материала коры говорят и изотопные данные. Отношения изотопов стронция  $^{87}Sr/^{86}Sr$  в породах I типа выше, чем в породах II типа, тогда как отношения изотопов ниодима  $^{143}Nd/^{144}Nd$  в них примерно одинаковые (рис. 8 А, Б). Кроме того, наблюдается некоторая положительная корреляция отношений  $SiO_2/MgO$  и  $^{87}Sr/^{86}Sr$  (рис. 8 В).



**Рис. 8.** Зависимость отношений изотопов стронция  $^{87}Sr/^{86}Sr$  в породах Курильской островной дуги от отношений: А –  $La/Yb$ , Б –  $^{143}Nd/^{144}Nd$ , В –  $SiO_2/MgO$ . Обозначения те же, что и на рис. 2.

**Геодинамические условия сжатия**, наоборот, способствуют II типу дифференциации, так как равновесия (1) и (2) при этом сдвигаются вправо – в сторону образования кальциевых пироксеновых  $Q^2$  комплексов.



Это содействует кристаллизации клинопироксена, а также уменьшает количество анортитовой составляющей в составе плагиоклаза и способствует накоплению щелочей в виде алюминатных и силикатных комплексов. Увеличение концентраций щелочей и воды (в результате кристаллизации) с одновременным уменьшением плагиоклазовой составляющей в расплаве дает эффект снижения вязкости.

Сдвиг равновесия (1) вправо под действием положительного геодинамического градиента может приводить к кристаллизации шпинели, которая обнаружена на Курилах только в высоко-калиевых образцах тыловой зоны. Также это приведет к увеличению магнезиальности расплава из-за задержки кристаллизации оливина и соответственно – повышению концентраций хрома и никеля в нем (рис. 5 Б).

Согласно экспериментальным данным, давление  $\sim 3 - 5$  кбар может обеспечивать кристаллизацию амфибола при небольших концентрациях воды 1 – 3 % [7]. Кристаллизация амфибола в высоко-калиевых вулканиках Курил происходит после кристаллизации плагиоклаза и пироксена, что говорит скорее о небольших начальных содержаниях воды ( $< 3.5$  %) [7]. Наличие ассоциации вкрапленников: (10-20 Ol, CPx > Pl(Sp,Q)) в высококалиевых магнезиальных базальтах вулкана 6.10 и появление амфибола только в кислых породах этого вулкана: ( $< 10 Pl > Nb > Bi >> Mt$ ) также соответствует кристаллизации в условиях повышенного давления при небольших концентрациях воды.

Так как условия сжатия могут сопровождаться повышением изолированности очага, например, при окружении более вязкими остывающими породами, то кристаллизация магмы может происходить в условиях пониженной для флюида проницаемости. Преимущественная диффузия водорода из очага в этом случае будет приводить к возникновению окислительной обстановки в расплаве даже при умеренном содержании воды [24].

Таким образом, если учесть все вышеперечисленные факты, то вопрос о большем количестве флюида в процессе формирования высоко-калиевых или низко-калиевых островодужных магм остается открытым и требует дальнейшего исследования.

На основании полученных данных можно предположить, что *дифференциация Курильских магм* происходит в *два этапа*: первый этап обусловлен различной *степенью плавления однородного* мантийного вещества, второй – зависит от *геодинамических условий* формирования и эволюции магм. В условиях растяжения формируются низко-калиевые расплавы, эволюция которых соответствует I типу дифференциации, в условиях сжатия – высоко-калиевые, соответствующие II типу дифференциации.

Предлагаемая автором модель образования исходных магм в результате плавления мантийного диапира является рабочей гипотезой и может измениться. Но установленные тренды дифференциации Курильских пород следует учитывать при построении других моделей.

Нахождение одновременно низко-калиевых и умеренно-калиевых пород в пределах одного вулканического центра, вероятно, является результатом смешения магм разного типа. Наличие процессов смешения разнотемпературных магм в островных дугах поддерживается многими петрологическими данными [5, 16, 21]. Волюнец О. Н. [5] установил петрологические признаки смешения магм в некоторых андезитах и дацитах тыловой зоны Курил. Иногда наличие процессов смешения подтверждается присутствием полосчатых (с различным химическим составом) лав и пемз, найденных на вулканах Головина и Менделеева, в пределах кальдеры Немо [5] и на вулкане Броутона [10]. Комплексное изучение процессов смешения, с использованием современных геохимических, химико-петрологических и геологических данных для определенного объекта, представляет интересную научную задачу.

#### **Выводы**

На основании комплексного анализа макро-состава, микрокомпонентов и изотопии вулканических пород Курильской островной дуги, детализированных для профиля пролива Буссоль, выявлены две различные тенденции изменения микро-состава пород в зависимости от изменения макро-состава.

Обоснована гипотеза о происхождении двух типов магм Курильской островной дуги из однородного мантийного источника. Предложен двухэтапный механизм магматической дифференциации: первый этап обусловлен различной степенью плавления однородного мантийного вещества, второй – зависит от геодинамических условий формирования и эволюции магм. В условиях растяжения формируются низко-калиевые расплавы, эволюция которых соответствует I типу дифференциации, в условиях сжатия – высококалиевые, соответствующие II типу дифференциации.

Определена приоритетная роль вязкости в процессе магматической дифференциации.

Работа выполнена при поддержке Российско-Германского проекта КОМЕХ – II. «Магмообразование. Роль флюидов в формировании островодужных магм», 2001-2004 гг. Руководители: Г.П. Авдейко, Кай Хернле (К. Hoernle).

#### **Список литературы**

1. Авдейко Г. П., Антонов А. Ю., Волюнец О. Н. и др. Геохимическая зональность четвертичных лав Курильской островной дуги // ДАН СССР, 1985, т. 282, № 4. С. 958-961.
2. Авдейко Г. П., Антонов А. Ю., Волюнец О. Н. и др. Вулканизм Курильской островной дуги: структурно-петрологические аспекты и проблемы магмообразования // Вулканология и сейсмология, 1989, № 5. С. 3-15.
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. Веселов О. В., Волкова Н. А. и др. Исследования теплового потока в северо-западной части Тихого океана. – В сб.: «Геотермия. Отчеты по геотермическим исследованиям в СССР». Вып. 1–2 М.: ГИН АН СССР, 1974. С. 87-90.
5. Волюнец О. Н. Гетеротакситовые лавы и пемзы // Проблемы глубинного магматизма. Новосибирск: Наука, 1979. С.181-196.

6. *Злобин Т. К.* Строение земной коры и верхней мантии Курильской островной дуги (по сейсмическим данным). Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987, 150 с.
7. *Кадик А. А., Максимов А. П., Иванов Б. В.* Физико-химические условия кристаллизации и генезис андезитов (На примере Ключевской группы вулканов). М.: Наука, 1986, 158 с.
8. *Константиновская Е. А.* // Планета Земля. Энциклопедический справочник: Том «тектоника и геодинамика». Редакторы Л. И. Красный, О. В. Петров, Б. А. Блюман. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. С. 283-288.
9. *Маслов Л. А., Рейнлиб Э. Л.* Методика и результаты расчета деформации поверхности Земли по гравитационным данным // Геология и геофизика, № 11, 1982. С. 92-98.
10. Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Г. П. Авдейко, А. Ю. Антонов, О. Н. Волынец и др. — М.: Наука, 1992, 528 с.
11. *Сергеев К. Ф.* Тектоника Курильской островной системы. М.: Наука, 1976. С. 31-35.
12. *Федорченко В. И., Абдурахманов А. И., Родионова Р. И.* Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис. М.: Наука, 1989, 239 с.
13. *Becker H., Jochum K. P., Carlson R. W.* Trace element fractionation during dehydration of eclogites from high-pressure terranes and the implications for element fluxes in subduction zones // *Chemical Geology* 163, 2000. P. 65-99.
14. *Davis M. J.* The effect of water on the viscosity of silicate melts: A configurational entropy approach // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, Vol. 63, No. 2. P. 167-173.
15. *Dingwell D. B., Romano C., Hess K. U.* The effect of water on the viscosity of a haplogranitic melt under P-T-X conditions relevant to silicic volcanism // *Contrib. Mineral Petrol.*, 1996, 124: p 19-28.
16. *Dorendorf F., Churikova T., Koloskov A., Woerner G.* Late Pleistocene to Holocene activity at Bakening volcano and surrounding onogenetic centers (Kamchatka): volcanic geology and geochemical evolution // *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 104, 2000. P. 131-151.
17. *Kelemen P. B., Muntener O., Timothy L. G.* The role of H<sub>2</sub>O during crystallization of primitive arc magmas under uppermost mantle conditions and genesis of igneous pyroxenites: an experimental study // *Contrib. Mineral Petrol.*, 2001, 141: p 643-658.
18. *Kelemen P. B.* Reaction between ultramafic rock and fractionating basaltic magma I, II. Phase relations, the origin of calc-alkaline magma series, and the formation of discordant dunite // *Journal of Petrology*, 1990. Vol. 31, Part 1. P. 51-98.
19. *Mysen B. O., Acton M.* Water in H<sub>2</sub>O-saturated magma-fluid systems: Solubility behavior in K<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O to 2.0 GPa and 1300°C // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, V. 63, N 22. P. 3799-3815.
20. *Mysen B. O.* Transport and configurational properties of silicate melts: Relationship to melt structure at magmatic temperatures // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 107, 1998. P. 23-32.
21. *Nakagawa M., Wada K., Wood G. P.* Mixed magmas, mush chambers, and eruption triggers: evidence from zoned clinopyroxene phenocrysts in andesitic scoria from the 1995 eruptions of Ruapehu volcano, New Zealand // *Journal of petrology*, 2002, v. 43, N 12. P. 2279-2303.
22. *O'Hara M. J. and Herzberg C.* Interpretation of trace element and isotope features of basalts: relevance of field relations, petrology, major element data, phase equilibria, and magma chamber modeling in basalt petrogenesis // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 66, No. 12, 2002. P. 2167-2191.
23. *Richet P., Lejeune A., Holtz F., Roux J.* Water and the viscosity of andesite melts // *Chemical Geology*, 128, 1996. P. 185-197.
24. *Sato M.* Oxygen fugacity of basaltic magmas and the role of gas-forming elements // *Geophys. Res. Lett.*, 1978, vol. 5, № 6. P. 447-449.
25. *Suzuki A., Ohtani E., Funakoshi K., Terasaki H., Kubo T.* Viscosity of albite melt at high pressure and high temperature // *Phys. Chem. Minerals*, 2002, 29: p. 159-165.

26. Walker J. A., Roggensack K., Patino L. C., Cameron B. I. The water and trace element contents of melt inclusions across an active subduction zone // *Contrib Mineral Petrol*, 2003, 146: p. 62–77.
27. Whittington A., Richet P., Holtz F. Water and the viscosity of depolymerized aluminosilicate melts // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, V. 64, N 21. P. 3725-3736.

## **TWO TYPES OF THE KURILE ISLAND ARC MAGMAS AND THEIR POSSIBLE MECHANISM OF FORMATION: INFLUENCE OF VISCOSITY AND GEODYNAMIC CONDITIONS UPON MAGMAS DIFFERENTIATION PROCESSES**

**O. A. Khleborodova**

*Institute of Volcanology and Seismology FED RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006,  
e-mail: khleborodova@kscnet.ru*

The new geochemical data about Kurile arc volcanites specified for the Bussol strait profile are submitted. On the basis of these data the hypothesis about a probable origin tholeiitic and calc-alkaline magmas of the Kuril island arc from a uniform mantle source is proved. The essential role of viscosity and transport properties of the initial melts during magmatic differentiation is assumed. Influence of geodynamic conditions on geochemical specificity of the island arc magmas formation is considered. The two-stage mechanism of the Kuril magmas differentiation is offered.