

МОДЕЛЬ ТЕКТОНОМАГМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КЛЮЧЕВСКОЙ ГРУППЕ ВУЛКАНОВ ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

И.А. Гарагаш¹, Л.И. Гонтовая², В.А. Ермаков¹

¹ Институт физики Земли РАН, г. Москва, ² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

Ключевская группа вулканов на Камчатке (КГВ) – один из активнейших и хорошо изученных вулканических районов мира. Вулканизм в этом районе известен с раннего плейстоцена, хотя косвенные данные указывают и на более ранние события. Высоты вулканов составляют от 3 до 5 км, в т.ч. действующие вулканы: Ключевской – 4850 м, Безымянный, Пл.Толбачик – около 3000 м. В районе выполнены гравиметрическая, магнитная съемки, ряд специализированных геофизических работ, включая сейсмотомографию по данным региональных и вулканотектонических землетрясений, зарегистрированных КФ ГС РАН [Гонтовая и др., 2008; Ермаков и др., 1971; Левыкин и др., 1974; Nizkous et al., 2007]. Сейсмическая модель описывается совокупностью параметров распределений скоростей V_p и V_s и их отношениями, которые позволяют получить распределение прочностных свойств среды в рамках упругопластической модели с условием текучести Кулона-Мора. Эта модель нагружена силами собственного веса [Гарагаш и др., 2003; Garagash, Dubovskaya, 2008]. Получен ряд новых данных: 1) о распределении приращений основных параметров напряженного и деформированного состояний, вызываемых изменениями механических свойств; 2) о трехмерном распределении объемной деформации, что позволяет выделить зоны уплотнения и разуплотнения в земной коре; 3) о вариациях максимальных касательных напряжений (рис. 1). Распределение напряжений в свою очередь связано с трещиноватостью, движением магм и флюидов и оказывает влияние на эволюцию расплавов, метаморфизм и другие процессы.

Региональная скоростная модель земной коры и верхов мантии под Камчаткой показывает значительное разнообразие полученных оценок скорости. Абсолютные значения V_p демонстрируют явную стратификацию коры, но аномальные участки $\Delta V_p(\%)$ скорее локальны, изолированы и имеют блоковую структуру. Поле V_p/V_s отображает деление коры на два слоя: верхний субгоризонтальный, прерывистый (в интервалах глубин 0 - 5-7км) и нижний, более глубокий, в целом однородный, но в некоторых случаях с локальными включениями и связанными с ними круто наклонными границами; в верхних частях разреза отношение V_p/V_s хорошо проявляет площади развития вулканогенных пород. Глубины 5-7км приняты за подошву осадочной оболочки; в районах центрального поднятия КГВ эта толща инициирована комплексами офиолитов. В поле S-волн на глубинах ниже осадочного слоя хорошо выражена ортогональная делимость консолидированного фундамента; блоки фундамента выделяются и по гравиметрическим данным, при этом как меридиональные, так и широтные разломы в средней коре содержат участки разуплотнения, вероятно связанные с локализацией магмы. Граница M соответствует скорости $V_p=7,5\text{км/с}$.

На поперечном профиле, пересекающем основные мегаструктуры полуострова (от Срединного хребта до океанской плиты на широте КГВ), мощность коры по данным сейсмотомографии оценивается в 40 – 55 км. Разнородные морфоструктуры континентального склона непрерывно продолжают континентальную кору Камчатки и имеют мощность коры, вдвое большую, чем кора океана. Это – серьезный аргумент в пользу первично континентальной коры этой части территории. Минимальная, хотя и неоднородная, мощность коры в центральной депрессии (по границе $V_p=7,5\text{км/с}$) наблюдается по простиранию СВ глубинного разлома непосредственно под КГВ. На поперечном профиле в аномалиях V_p и $V_s(\%)$ под КГВ мощность коры на участке ее наибольшей активности составляет 45-50 км, а под ним фиксируется изометричный участок с $V_p=8,0-8,2\text{ км/с}$ на глубинах 53 – 70-80км. По обе стороны от названного участка, под структурами впадин, Козыревской и Хапиченской [Ермаков, 1977; Левыкин и др., 1974], литосфера наоборот низкоскоростная, с предельными глубинами 70-90км.

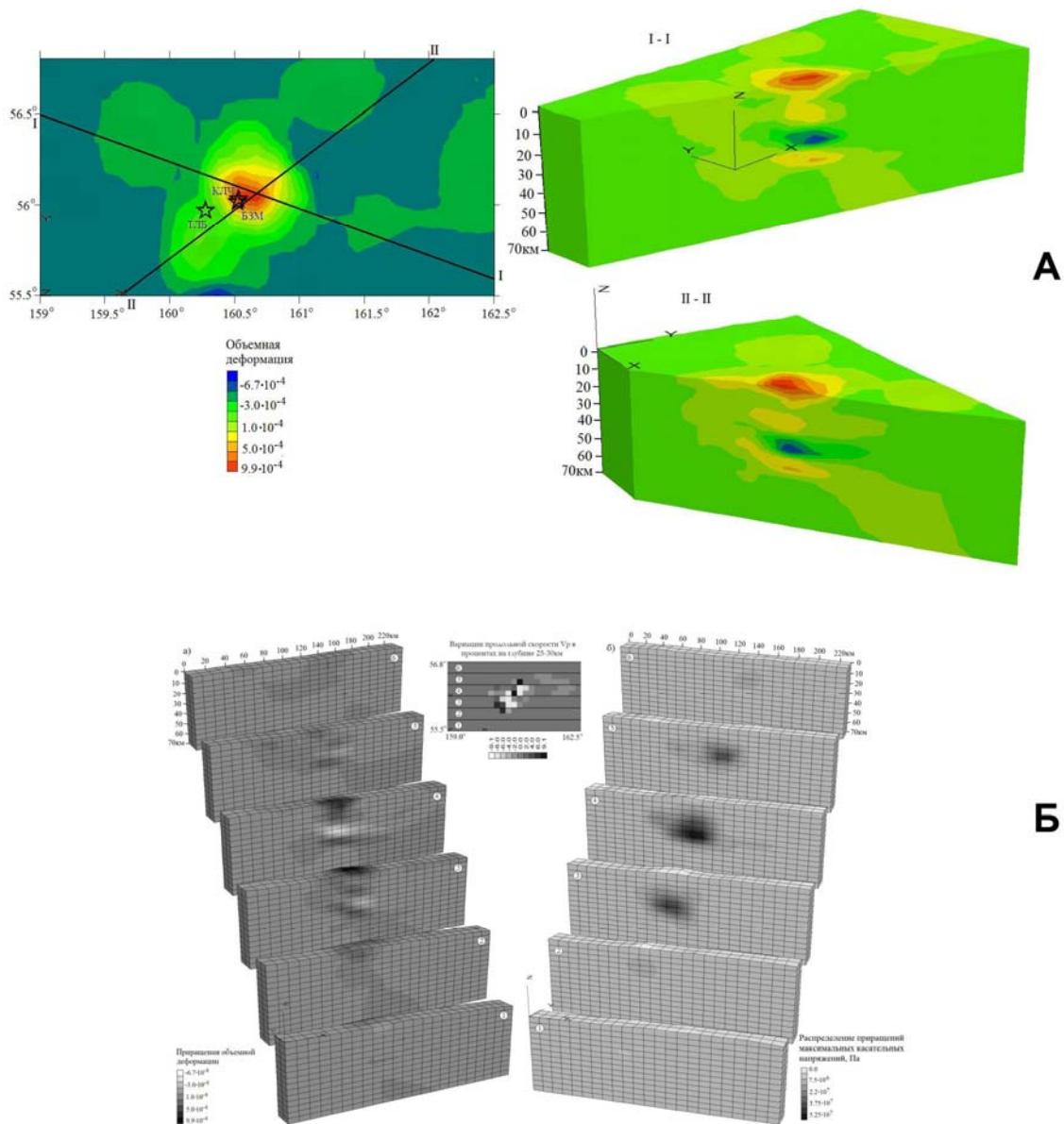


Рис. 1. Распределение объемных деформаций и касательных напряжений в районах Ключевской группы вулканов. А – две блок-диаграммы вдоль диагональных профилей, проходящих через наиболее активный район КГВ. Б – серия широтных профилей с расчетными значениями объемной деформации и касательных напряжений. Вверху, в середине – распределение аномалий V_p на плоском срезе для глубин 25-30км.

Первоначально предполагалось, что под КГВ присутствует высоко поднятая астеносфера, что было связано со слишком большим радиусом обобщения - для всей структуры Центрально-Камчатской депрессии (ЦКД). Корни низкоскоростной (литосферной) мантии, которые прослеживаются до глубин 110-130км, характерны как раз для невулканической ЮЗ части ЦКД, где депрессия пересекает Срединный метаморфический массив. Новое решение этой ситуации может заключаться в том, что мощная литосфера указывает на эпиконтинентальную природу Камчатки, а высокоскоростные участки непосредственно под КГВ являются следствием интенсивного магмообразования и переработки континентальной литосферы этой области в течение последних 1-2 млн. лет. Этот вывод имеет серьезные последствия для петрогенезиса, поскольку сводит проблему магмообразования не к миграции готовых глубинных расплавов, а к некоторым сейсмо-и магмогенерирующим физико-химическим и механическим процессам, так или иначе связанным с деятельностью сейсмофокальных зон (СФЗ).

Скоростная модель земной коры под КГВ построена методом сейсмотомографии при изучении вулcano-тектонических землетрясений; кроме того, проанализированы результаты гравиметрии, геоэлектрики и других геофизических исследований. Области разуплотнения (положительного приращения объемной деформации¹) коры КГВ встречаются на всех уровнях глубин, но наиболее развиты вблизи поверхности и в низах коры. Максимальное разуплотнение ($9,9 \cdot 10^{-4}$) наблюдается в верхнем слое коры ($\leq 2,5$ км), расположенном эксцентрично по отношению к Ключевскому вулкану на площади, отражающей ареал его побочных извержений; эта область имеет вид обширного «воронки» с поперечником более 10 км (см. рисунок, А). Это не очаг магмы в традиционном понимании, а область насыщения коры под вулканом многочисленными инъекциями типа лакколитов, факолитов, силлов и других тел. Ранее силловые залежи здесь были выделены по данным КМПВ [Гонтовая и др., 2008]. Канал Ключевского вулкана тяготеет к краевой части указанного ареала магмы. На глубине 35 км в подошве коры выделена небольшая уплотненная область разуплотнения ($5,0 \cdot 10^{-4}$), которая в деталях, при большом увеличении, имеет сложную структуру перемежающихся антиподальных объемов с вариациями значений ΔV_p от +6-9% до -9%. Общее разуплотнение в низах коры таково, что ведет к образованию здесь характерных конических структур, типичных для условий, когда давление внутри объекта (глубокого скопления магмы?) превышает литостатическое давление. Этот процесс разряжается возникновением хрупких деформаций и роевых землетрясений на границах аномального объекта.

На глубинах средней коры, между той и другой областями объемной деформации, фиксируется обширный аномальный объем с относительно повышенной скоростью V_p ($\geq 7,0$ км/с) и отрицательными величинами приращения объемной деформации (до $-6,7 \cdot 10^{-4}$, уплотнение). Приращение интенсивности максимальных касательных напряжений в этом объеме составляет до 525 бар (см. рисунок, А и Б), что естественно связать с появлением здесь заметного числа тектонических землетрясений. Природа этого уплотнения остается не ясной: возможно, что оно является реститом, т.е. связано с преобразованием коры при флюидной обработке или отгонке из него магматического материала в предшествующее геологическое время. Подъем магм сопровождается развитием как вертикальных, так и горизонтальных движений. Построены вектора горизонтальных смещений в поверхностном слое коры. Максимальные значения этих смещений связаны с растяжением вдоль полосы глубинного разлома и имеют характер раздвига; движения отражают расклинивающее действие внедряющихся магм. В стороне от этой структуры направление векторов меняется. Две устойчивые области нулевых значений, соответствуют периферии вулканического нагорья, долинам рек Камчатки и Еловки и с другой стороны – Хапиченской впадине [Ермаков, 1977]. Наблюдается стяжение векторов движений к этим структурам. Если принять, что определенные амплитуды движений сформированы за голоцен, средние скорости (при их максимальной оценке) составят около 1.1 и 0.8 мм/год соответственно для вертикальных и горизонтальных движений. Причинами названных деформаций являются как расклинивающие магматические внедрения, так и развитие неоднородностей (в средней коре), что порождает развитие неустойчивости и взаимных перемещений геологической среды. Структурные соотношения глубинного разлома (СВ) и коротких субмеридиональных линейментов в плоскости этого разлома таковы, что мы можем говорить о перераспределении восходящей магмы в реликтовых разломах консолидированного фундамента в виде удлиненных вертикальных штоков. На менее глубоком уровне, в осадочной оболочке, преимущественной формой выделения магм становятся силлы и лакколиты.

Таким образом, найдено приблизительное положение флюидно-магматической системы, питающей КГВ. Наблюдаемые аномалии располагаются в коре, от 40 км и выше; вопрос о более глубоких источниках магмы остается открытым. Объемные соотношения магмы указывают на ее небольшие концентрации в первичном источнике и массовые скопления в поверхностных резервуарах, где механические и динамические условия накопления наиболее благоприятны. Различия деформаций в нижней и верхней частях коры, вероятно, связано с возрастанием вакансий для деформирования среды вблизи поверхности, не задавленной литостатической нагрузкой. Напряженное состояние земной коры КГВ далеко от изостатического равновесия. Формирование физических неоднородностей в коре приводит к возникновению значительных касательных напряжений, связанных с синхронной сейсмичностью, в особенности на контактах

¹ Безразмерная величина.

контрастных сред. Наличие значительных объемов коры с промежуточными или с антиподальными свойствами не позволяет трактовать все аномальные участки разуплотнения как магматические внедрения. Их менее выразительная часть, по-видимому, связана с вещественными преобразованиями среды под воздействием того или иного теплоносителя. Кора и соответствующие гидротермальные системы принимают активное участие в формировании магмы.

Список литературы

Гарагаш И.А., Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Левина В.И. Скоростное строение и поле напряжений в районе Карымского вулканического центра на Камчатке. Докл. РАН, т.389, №2, 2003, с. 258-262.

Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В., Апрельков С.Е. Верхняя мантия Камчатки: глубинная модель и связь с тектоникой // Тихоокеанская геология. Том 27, №2, 2008, с. 80-91.

Ермаков В.А., Фирстов П.П., Широков В.А. Петрогенезис Ключеской группы вулканов. Вулканизм и глубины Земли. Наука, Москва, 1971, с. 152-156.

Ермаков В.А. Формационное расчленение четвертичных вулканических пород. Недр. 1977. 225с

Левыкин А.И., Фарберов А.И., Ермаков В.А., Балеста С.Т. Состав и состояние вещества земной коры района Ключеской группы вулканов. // В кн. Геодинамика вулканизма и гидротермального процесса. Петропавловск-Камчатский, 1974 с. 47-52.

Garagash I.A., Dubovskaya A.V. Numerical modeling of stress-strain state of the earth's crust of the Caspian region. Proceedings of the First International FLAC/DEM Symposium, 2008, p. 34-40.

Nizkous I., Kissling E., Gontovaya L. et al. Correlation of Kamchatka Lithosphere Velocity Anomalies With Subduction Processes // Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Geophysical Monograph Series, 172. 2007. P. 97-106.