

**Отзыв официального оппонента**  
на диссертацию Кузнецова Григория Владимировича «ДИНАМИКА  
МЕТАСОМАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОРОД ЛИТОСФЕРНОЙ  
МАНТИИ ПОД ВУЛКАНАМИ АВАЧИНСКО-КОРЯКСКОЙ ГРУППЫ  
(КАМЧАТКА), представленной на соискание ученой степени кандидата геолого-  
минералогических наук по специальности 25.00.04 –Петрология, вулканология»

Диссертационная работа Кузнецова Г.В. посвящена важной теме, актуальной как в научном, так и в практическом плане. Результаты проведенных исследований аспиранта создают в целом новый подход и приоритеты в понимании динамики процессов метасоматоза пород шпинелевой фации литосферной мантии под воздействием выплавок мантийных и коровых расплавов. Рецензируемая работа представляет самостоятельное исследование морфологии магматических очагов под Авачинским вулканом и ксенолитов из лавовых потоков постмиоценовых вулканов Камчатской особой фронтальной геодинамической области, сформированной перед глубоководным Курило–Камчатским желобом на активных северо-западных окраинах Тихого океана. Автор систематизировал накопленный учеными опыт по проблеме, и для ее развития использовал комплекс современной аналитической аппаратуры и оригинальных методов моделирования.

Объект, предмет, цели и задачи исследования сформулированы четко и логично. Комплексный и системный подход обеспечивает убедительное подтверждение надежности и достоверности результатов; он позволил достичь, по сути, нового уровня теоретического анализа петрологических проблем; позволяет сделать некоторые новые модели о динамике их развития в условиях фронтальной геодинамической области.

Автором выполнен большой объем работы по сбору и анализу специальной геолого-геофизической, геодинамической информации и сейсмических профилей по Камчатке. В итоге различными методами, включая геолого-геофизические томографические, интерпретированы сейсмические разрезы и дешифрированы космоснимки, в том числе полученные при использовании системы GIS-EMDDB.

Автором изучено порядка 150 образцов мантийных ксенолитов, среди которых выбраны экземпляры для аналитических исследований: полированные шлифы (более 20), пластинки толщиной до 1 мм для изучения включений в минералах (более 20), выведенные включения на поверхность (более 30), отбор монофракций минералов для хроматографического, РФА и ICP-MS анализов (около 150). Составы минералов, стекол, включений определялись лично при помощи электронного микроскопа и микрозонда (около 2000 анализов).

Работа состоит из Введения, шести глав и Заключения общим объёмом 118 страниц, включает 103 рисунка и 13 таблиц. Диссертация содержит 14 Приложений объёмом 44 страниц. Список литературы содержит 135 наименований.

Первая глава посвящена методикам экспериментального, аналитического и инструментального изучения объектов. Здесь автор справедливо останавливается на сохранении и развитии методов научной школы. Принципы численного моделирования мантийного метасоматоза в работе заимствованы из методологии количественного описания эндогенных процессов в земной коре, созданной сотрудниками ряда институтов СО РАН по инициативе и под руководством В.Н. Шарапова. Она реализована в виде динамических моделей мантийно-коровых внутриплитных магматических и рудно-магматических систем. Автором работы эти модели были модифицированы для описания флюидных систем под вулканами переходной зоны океан - континент и процессов метасоматоза в литосферной мантии. С целью уточнения моделей флюидного преобразования ультрабазитовых пород при конвективном тепло-массопереносе внешним потоком восстановленных газов, а также особенностей в локальных сейсмогенных флюидных системах, автор выполнил две серии весьма любопытных физических экспериментов. Одна серия - эксперименты по частичному плавлению ксенолитов потоком восстановленных газов, создаваемых при горении струи пропана в интервале температур 800-1200°С на установке ИТФ СО РАН. Вторая серия - моделирование процессов плавления, сублимирования и переноса петрогенных компонентов из ксенолитов электронным пучком в вакуумной камере на установке электронной сварки ИЯФ СО РАН.

В главе 2-Геолого-геофизическая характеристика и структурный анализ района вулканов Авачинско-Корякской группы (Восточная Камчатка) автором использована современная модель астеносфера, формируемой под воздействием мантийных плюмов в зонах субдукции. Проблема мантийных плюмов, их проявления в орогенезе, геодинамике и геотектонике земной коры являются объектом интенсивных исследований. В численном моделировании плюмы представляют собой восходящие конвективные потоки, создающиеся на границе ядро-мантия вследствие очень высокого сверхдиабатического перепада температуры. Вопрос о термохимической природе мантийных плюмов и роли тех или иных компонентов в их формировании продолжает обсуждаться. До настоящего времени в качестве основного способа взаимодействия плюма с мантийной конвекцией указывается сдвиг плюма горизонтальным мантийным потоком, то есть, чисто механическое воздействие мантийного потока на плюм. Для выяснения условий формирования и важнейших параметров термохимических плюмов (кондуктивного тепло- и массобмена плюма с окружающей мантией) необходимы конкретные сведения о составе

взаимодействующих пород и их геодинамических особенностях (структуры рифтов, грабенов Восточной Камчатки, динамика глубинных разломов, шарьяжи, надвиги и т.п.). Подобная информация, получаемая методами геотомографии и др., имеется, например, в публикациях сотрудников Института физики Земли (Ермаков В.А. и др.), Института вулканологии (Федотов С.А. и др.). Анализ и моделирование данных о механизмах землетрясений за 40 лет (1972-2012 гг.) позволили автору работы выяснить, что под Авачинским вулканом существуют две специфических области тектонофизических условий .Нижняя область, где преобладают силы сжатия и верхняя, где реализуются условия растяжения, происходит интенсивное разрушение пород консолидированной коры, что способствует декомпрессии промежуточного магматического очага, которая может начинаться с магматического замещения и заканчиваться инфильтрацией флюидов в ослабленные зоны. На этой основе, с учетом работ (Абкадыров и др., 2014; Болдырев, 2002; Мороз, Гонтовая, 2007) построена односкоростная гидродинамическая модель теплово-массообмена, которая использована в качестве неизотермической модели инфильтрационного метасоматоза в ПК Селектор, аналогично работе (Шарапов и др., 2015).

Точность моделирования, на наш взгляд, можно улучшить, т. к. на тектонофизическом разрезе под Авачинским вулканом зона растяжения не одна, а их четыре. Еще ближе приблизиться к разгадке тайн магматических очагов под Авачинским вулканом и Камчатской особой фронтальной геодинамической области в целом, можно и нужно, используя новые, уточненные экспериментальные температуры солидуса пород мантии. Результаты экспериментов, проведенных учеными Калифорнийского технологического института с оливином в 2018 г .показали, что температура мантии Земли под океанами Земли на 60°C выше, чем считалось раньше, и теперь она достигает отметки 1410°C.

Третья глава диссертации –«Ультрабазитовые ксенолиты: контакт с вмещающей породой, структура, степень метасоматической измененности и состав минералов». Ксенолиты ультрабазитового состава из лав Авачинского вулкана все интенсивнее изучаются. Создано целый ряд гипотез их формирования, так или иначе связанных с процессами, происходящими в зоне субдукции. Однако вопрос о происхождении ультабазитов шпинелевой фации нельзя считать до конца исследованным. Автором собран и в значительной степени проанализирован весь доступный материал, связанный с сейсмофокальной зоной под Авачинским вулканом, и с учетом ее сейсмики и разнополярных напряжений, сопоставления карт магнитных и гравитационных аномалий построена геометрическая схема рассматриваемой флюидной мантийно-коровой системы на глубину 100 км. Эта глубина –максимальная на сегодня. У предшественников (Ермаков В.А., Колосков А.В. и др.) глубина сейсмофокальной зоны составляет 30-40 или 70 км.

Эти значения согласуются с минеральными особенностями перidotитов верхней мантии под океанами. До глубины 25 км полосчатые лерцолиты состоят из переменного количества основных минералов: оливин + ортопироксен + клинопироксен и + плагиоклаз (второстепенный); в интервале от 25 до 80 км в них появляется шпинель, а ниже типоморфным минералом оказывается гранат.

В разделе «метасоматически изменённые и подверженные частичному плавлению ультрабазиты» на с. 49 приведена характеристика «сахаровидных оливинитов», представляющих, по мнению автора, крайнюю степень метасоматического преобразования гарцбургита. Для доказательства, что это оливин из внутренней мономинеральной зоны метасоматической колонки, а не из контактовых роговиков, сложенных оливином, желательно иметь химический и минальный состав минерала, расчеты баланса вещества и соотношений инертных и подвижных химических компонентов. Петрогенетические гипотезы желательно подтверждать известными экспериментальными диаграммами равновесия минералов, геобаротермохимическими данными типоморфных минералов и диаграммами геотермических градиентов океанической зоны. Есть компьютерные программы для расчета температуры кристаллизации и состава оливина, для геотермометра по оливин - клинопироксеновым парагенезисам, для двупироксеновых геотермометров. Известным индикатором давления, например, является количество  $Al_2O_3$  в решетке ортопироксена. Учитывая кинетические особенности формирования пород вулканических фаций, можно для определения степени неравновесности процессов кристаллизации изучить с помощью РФА полиморфизм аортита ксенолитов, который может быть при разных Р-Т условиях стабильной фазой и в триклиновой и гексагональной модификации, а метастабильным в гексагональной и ромбической модификациях.

По результатам петрографического, минералогического и геохимического исследования ксенолитов ультраосновных пород в продуктах взрывных извержений вулкана Авача проведена их детальная вещественная типизация и выделено две группы пород: исходные и метасоматически изменённые гарцбургиты. Среди исходных ксенолитов наибольшее распространение имеют дуниты, гарцбургиты, лерцолиты и гораздо реже верлиты, клинопироксениты, вебстериты, как правило, с амфиболом, образующие все переходы к кортландитам и горнблендитам. Примеров выполнения трещин в образцах андезибазальтовым расплавом не обнаружено. Мелкие ксенолиты представляют собой обломки крупных пироксеновых жил или вмещающих «матричных» ультрабазитов с мелкими прожилками орто- и клинопироксена. Автор полагает, что практически все

изученные ультрабазитовые ксенолиты являются обломками глубинного субстрата района исследования.

Метасоматически изменённые гарцбургиты содержат новообразованные оливины и орто- клинопироксены. Эти породы отличаются избытком кремния, кальция и алюминия, а также перераспределением магния и появлением второй генерации энстатита.

Глава 4 содержит морфологическую характеристику и составы расплавных включений, и интерстиционных стёкол в основных минералах ультрабазитовых ксенолитов Авачинского вулкана. Практически все ксенолиты гипербазитовых пород вулкана несут следы различной степени метасоматического изменения под воздействием разнообразных по основности и существенно восстановленных флюидов промежуточных магматических очагов. Автор выделил три стадии метасоматоза:

- 1) первая - их интенсивные фазовые превращения под воздействием высококонцентрированных карбонатно-водно-хлоридных флюидов в глубинных условиях с привносом ряда основных петrogenных компонентов - Si, Al, Fe, Ca, Na, K, S, Cl;
- 2) второй – локальное плавление метасоматизированного субстрата при температурах выше 1040°C-1050°C с образованием расплавов близких к андезитовым и сублимирование (растворение) породообразующих минералов.
- 3) третья - воздействие потоков более окисленных флюидов, привносивших H<sub>2</sub>O, Cl, S, Mn, Ti, Fe, что зафиксировано в амфиболах контактовых оторочек и пироксенитов.

Вопросы по этой главе. 1. Нет четких критериев выделения первой и третьей стадий процесса. 2. В чем проявляется восстановленный характер флюидов первой и более кислый третьей стадии? 3. В первой и третьей стадиях нет динамики перехода вполне подвижных элементов в инертные, что свойственно для метасоматических колонок. 4. Появление в зернах оливинов внешних зон, обогащенных железом, а также амфиболовых оторочек гарцбургитов на основе полученных автором данных по декрипетации и гомогенизации включений объясняется эффектом частичного плавления и перекристаллизации. Но возможно, что это есть результат фракционной кристаллизации пиролита верхней мантии в сейсмоактивных динамических условиях во время циклов с ростом давления до 65 кбар.

Глава 5 - Модель инфильтрационного метасоматоза Авачинских ультрабазитов потоками восстановленных газов. Автором разработана обобщенная схема геоструктурной многорезервуарной физико-химической модели, для которой с учетом уже имеющихся в школе В.Н. Шарапова результатов и собственных аналитических данных по составу флюидов и Т-Р условий в резервуарах рассчитаны временные ряды для основных и второстепенных минералов- продуктов метасоматического воздействия ювенильных флюидов при разных Т-Р-С параметрах. На основании этих данных автор получил

обобщенную модель соотношения метасоматических минералов, удовлетворяющую современному уровню знания ксенолитов Авачи. Эта модель соответствует самому глубинному резервуару с давлением в 30 кбар, время процесса 50 тысяч лет. В качестве переменных параметров в составе флюидов главная роль отводится соотношению Si/Ca и содержаний Fe<sup>3+</sup> и Al.

Замечания к главе. 1. Уравнение Дарси применимо к фильтрации несжимаемой жидкости для расчета ламинарного потока, т.е. движения жидкости без перемещений и пульсаций, без изменения скорости и давления; а для газового флюида оно не работает. 2. Что дала ссылка на теорию подобия в главе? 3. Небрежно представлены минеральные ассоциации метасоматических стадий (86 с.). Что такое Ol-1, Ol-2 и т.д. Если Ol-1- первичный, т. е. не метасоматический минерал, то как он здесь оказался. Между стадиями обозначено- метасоматоз- а его факторы (подвижные, инертные компоненты и т.п.) и параметры (хотя бы из модели) -где? 4. Проблема происхождения ультрабазитов: они продукты магматической верлитизации или метасоматической «пироксенизации» - без изучения распределения РЭ, нормированных к составу хондрита, остается дискуссионной. 5. Отсутствуют в списке литературы: Шарапов и др., 2015; Модельный., 2009; Гухман, 1974; Kimura et al., 2007.

Глава 6 - Физическое моделирование составов частичных выплавок из пород ультрабазитовых ксенолитов потоком восстановленных газов и методом «электронной сварки». Автор, используя математические уравнения и граничные условия процесса сублимации (Черепанова и др., 2015; Шарапов и др., 2007) выполнил численное моделирование процессов при высоких скоростях. Эти результаты послужили основой для двух физических экспериментов. 1) нагревание ксенолитов потоком восстановленных газов - вынос расплава из образцов при внешнем воздействии; 2) плавление пучком электронов, когда расплав выносится из образца без внешнего воздействия.

Анализ экспериментальных данных по воздействию потоком восстановленных газов на минералы и их включения позволил впервые получить многостадийную модель частичных выплавок из ультрабазитов при нагреве их потоком газов в интервале T = 800 - 1200°C.

Результаты сублимирования трещиноватых пород пучком электронов с помощью аппарата «электронной сварки» дали автору основания также впервые смоделировать циклический многофазный процесс извлечения интерстициональных стёкол и перемещение расплава на поверхность образца. На минеральном уровне очень интересные результаты получены в кристаллах шпинели, что представляет интерес для дальнейших изучений. Явления и процессы, подобные установленным, могут быть вполне реальными в минералах

из ультрабазитов верхней мантии, при сублимировании под воздействием летучих, выделяющихся из флюидных включений внутри ксенолитов.

Замечания к главе. 1. При горении пропана в проточном реакторе количество  $H_2$  меньше расчетного. Возможно это связано с расходом протонов на протонирование различных минералов, что отразится на кинетике их преобразования. 2. На аппарате электронной сварки результаты получены при 1800-2000°C. Для изучаемых объектов и условий они нуждаются в корректировке с учетом реальных термодинамических условий в разрезе верхней мантии от субстрата до слоя Гуттенберга.

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертация Кузнецова Григория Владимировича, на наш взгляд, представляет собой квалификационное, самостоятельное, завершенное исследование, в котором решена актуальная задача, имеющая важное научно-познавательное и практическое значение. Автором проделана комплексная работа по экспериментальному и теоретическому развитию в рамках теории неизотермического инфильтрационного метасоматоза нового метода изучения минералогии ультрабазитовых ксенолитов. Впервые создана модель сравнительной динамики формирования мономинеральных метасоматических зон в ультрабазитах литосферной мантии под активными вулканами сейсмофокальной зоны Камчатки при температуре флюидов 1200 °C, давлении 30 кбар и времени 50 тыс. лет.

Диссертация «Динамика метасоматического преобразования пород литосферной мантии под вулканами Авачинско-Корякской группы (Камчатка)» отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. (в редакции Постановления № 335 Правительства РФ от 21.04.2016 года, № 748 от 02.08.2016 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Кузнецов Григорий Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.04 – Петрология, вулканология.

Мананков А.В.

доктор геолого-минералогических наук,  
профессор НИ ТГУ, ТГАСУ

Контактная информация

634012, г. Томск, ул. Елизаровых, 54-1  
Телефон +7(3822) 54-01-10

Электронная почта: mav.39@mail.ru



22.10.18.7