

Отзыв

официального оппонента

на диссертационную работу КОРОЛЕВА Нестера Михайловича «Петрология и модель образования эклогитов из литосферной мантии кратона Кассаи (С.-В. Ангола)», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.04 «петрология, вулканология»

Диссертационная работа Н.М. Королева посвящена типизации, реконструкции РТ-условий формирования, определению возраста, положения в разрезе литосферной мантии и установлению протолита мантийных эклогитов из кимберлитовой трубки Катока (кратона Кассаи). Автором проведены определение петрографических, минералогических и геохимических характеристик эклогитов; оценки температур и давлений равновесных минеральных ассоциаций мантийных эклогитов, реконструкция их положения в разрезе литосферной мантии кратона Кассаи; установление возраста цирконов из мантийных эклогитов U-Pb методом и изучение Sm-Nd изотопных характеристик мантийных эклогитов; анализ магматических и субдукционных гипотез образования эклогитов в литосферной мантии, выявление наиболее достоверных критериев генезиса эклогитов. По результатам проведенных исследований автором разработана модель генезиса мантийных эклогитов из кимберлитовой трубки Катока (кратона Кассаи).

В основе работы лежит каменный материал, собранный геологами ГРО «Катока» Республики Ангола и переданный для исследования в ИГГД РАН. В целом, коллекция включает 22 ксенолита верхнемантийных пород из кимберлитовой трубки Катока, из которых 21 образец был отнесен к эклогитам, а один – к перидотитам. Для решения поставленных задач работы автором применен широкий комплекс методов исследования, включающий в себя рентгенофлюоресцентный анализ, определение содержаний редких и редкоземельных элементов методом ICP-MS, сканирующую электронную микроскопию, электронно-зондовый анализ, Мессбауэровскую спектроскопию, а также U-Pb и Sm-Nd геохронологические определения. Оценки Р-Т-условий образования эклогитов были получены методами классической термобарометрии. Все исследования были проведены диссертантом лично или при его непосредственном участии. На каждом этапе работ Н.М. Королевым осуществлялась обработка и интерпретация полученных аналитических данных, включая определение РТ-параметров и геохимическое моделирование.

Актуальность работы определяется тем, что мантийные ксенолиты из трубки Катока и других трубок в данном регионе до сих пор не были изучены, а также не проведено исследований, характеризующих литосферную мантию кратона Кассаи. При этом кимберлитовая трубка Катока является одной из самых богатых алмазоносных трубок в мире (входит в пятерку), и, в то же время, в ней наблюдается сопоставимое количество ксенолитов перидотитов и эклогитов различных типов, что не характерно для большинства других кимберлитовых тел. Установление условий формирования мантийных эклогитов на основе изучения представительной коллекции пород из трубки Катока может способствовать решению проблемы глобального эклогитообразования в мантии, а детальное изучение химического и минералогического состава эклогитов, процессов их преобразования в мантии Земли необходимо для выявления новых поисковых и геологоразведочных критериев для обнаружения алмазоносных кимберлитовых трубок.

Научная новизна и практическая значимость работы не вызывают сомнений. Впервые получены данные о химическом составе и петрографических особенностях верхнемантийных эклогитовых ксенолитов кимберлитовой трубки Катока. Предложен новый критерий типизации мантийных эклогитов. Установлены термобарические условия равновесия минеральных ассоциаций ксенолитов. На основании полученных данных и выявленных особенностей охарактеризовано состояние верхней мантии до глубины порядка 180-210 км, подстилающей юго-

западную (Ангольскую) часть кратона Кассаи. Впервые охарактеризованы процессы образования эклогитов в литосферной мантии кратона Кассаи. Впервые определен возраст цирконов из мантийных ксенолитов, вынесенных из литосферной мантии кратона Кассаи. Установленные при исследовании ксенолитов характеристики литосферной мантии кратона Кассаи вносят вклад в понимание механизма глобальных верхнемантийных процессов, таких как формирование вещественной и химической гетерогенности мантии. Полученные данные будут полезны при изучении аналогичных объектов алмазоносной провинции С.-В. Анголы и, в перспективе, новых алмазоносных объектов по всему миру.

В целом, диссертация Н.М. Королева состоит из введения, восьми глав, заключения и списка цитированной литературы из 235 наименований. Объем диссертации составляет 197 страниц, в том числе 52 рисунка, 28 таблиц. Приложение занимает 25 страниц.

Во **Введении** автор диссертации показывает актуальность работы, определяет ее цели и задачи, характеризует фактический материал и методы исследования, рассматривает научную и практическую значимость полученных результатов, приводит данные об апробации работы на различных международных и отечественных конференциях и в публикациях и указывает долю личного вклада в исследования. Далее во Введении формулируются четыре защищаемых положения, которые обоснованно доказываются в последующих 8-ми главах.

В **Главе 1** приводится обзор литературных данных, касающийся выполненных ранее исследований строения литосферной мантии кратона Кассаи. Обсуждаются геологическое положение и возраст кимберлитов трубки Катока. Рассмотрены крайне немногочисленные результаты геофизических исследований и дана характеристика строения и термального состояния литосферной мантии кратона Кассаи.

Глава 2 посвящена характеристике использованных в работе методов исследования. Детально описаны методы сканирующей электронной микроскопии и электронно-зондового анализа, Мессбауэровской спектроскопии, включая процедуру разложения спектров, рентгенофлуоресцентный анализ, а также метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Охарактеризована методика анализа содержаний редких элементов в гранатах и клинопироксенах с помощью вторично-ионной масс-спектрометрии. Для всех методов исследования приведены пределы обнаружения и ошибки анализа. Рассмотрены методики Sm-Nd и U-Pb геохронометрии.

В **Главе 3** приводится минералого-петрографическая характеристика мантийных ксенолитов. На основании петрографического изучения шлифов и данных химического состава породообразующих, второстепенных и акцессорных минералов выделено три типа эклогитов: высокоглиноземистые ($hi-Al_2O_3$), низкомагнезиальные ($lo-MgO$) и высокомагнезиальные ($hi-MgO$).

Диссертантом отмечается, что $hi-Al_2O_3$ эклогиты сложены гранатом с повышенным содержанием Ca (Prp30-46, Alm20-33, Grs25-41) и высоконатровым высокоглиноземистым клинопироксеном (Jd51-67, (Wo+En+Fs)32-47, Aeg1-2), а в качестве второстепенных минералов в них фиксируется присутствие кианита или корунда. С использованием петрохимических характеристик проведено дальнейшее подразделение $hi-Al_2O_3$ эклогитов на высокомагнезиальную ($hi-Al_2O_3-1$; Mg# 74-76) и низкомагнезиальную ($hi-Al_2O_3-2$; Mg# 64-66) подгруппы. Низкомагнезиальные эклогиты (Mg# 58-72) имеют биминеральный состав с низкомагнезиальным гранатом (Mg# 43-60) пироп-альмандинового ряда и омфацитом с умеренным содержанием жадеитового минала (32-57 %), в среднем ниже, чем в высокоглиноземистой группе (51-67 %) и выше, чем в высокомагнезиальной группе (19-25 %). Главными особенностями, позволяющими отнести эклогиты к $hi-MgO$ типу, являются: повышенная магнезиальность гранатов (Mg# 75-77, содержание пиропового минала превышает 68%), повышенная магнезиальность клинопироксенов (88-90) и породы в целом (82-85), повышенное содержание Nb_2O_5 (7-11 мас.%) в рутилах и специфический набор структурно-текстурных признаков, не встречающихся в других эклогитах.

Особо следует отметить детальность характеристики акцессорных минералов, в частности, рутила, для которого установлено наличие кайм и структур распада ильменита и наличие неоднородностей состава в пределах зерен.

В **главе 4** обсуждаются содержания главных и редких элементов в валовом составе и главных пороодообразующих минералах эклогитов. Показано, что, в целом, геохимические данные подтверждают проведенное подразделение изученных эклогитов на три минералогическо-петрографических группы. Полученные результаты использованы впоследствии для реконструкции условий формирования мантийных ксенолитов трубки Катока.

Глава 5, посвященная термобарометрии эклогитов трубки Катока, начинается с детального обзора методик определения температур и давлений по составу пороодообразующих минералов мантийных эклогитов. Следует отметить критический анализ, проведенный автором при выборе методики оценки РТ-параметров путем сопоставления различных оценок температур и давлений. В результате диссертант совершенно оправданно остановился на использовании геотермометра (Nakamura, 2006) и уравнении геотермы теплового потока с мощностью 40 мВт/м² (Hasterok, Chapman, 2011; Furlong, Chapman, 2013), что позволило установить закономерное повышение температур и давлений в ряду эклогитовых пород – hi-Al₂O₃ → lo-MgO → hi-MgO. Судя по этим результатам, эклогиты группы hi-MgO целиком попадают в область алмазоносных пород.

В **главе 6** характеризуется возраст эклогитов. Важное значение проведенных исследований определяется уникальностью находок циркона в мантийных эклогитах. Можно согласиться с мнением автора, что полученные наиболее древние значения возраста (1197±17 и 1242±97 млн лет) соответствуют этапу формирования протолитов lo-MgO и hi-Al₂O₃ эклогитов, а более молодая оценка (194±74 млн лет) маркирует наложенные мантийные процессы и в первом приближении связана с внедрением кимберлитов трубки Катока (117,9±0,7 млн лет).

Глава 7 посвящена рассмотрению петрогенетических моделей формирования мантийных эклогитов и критериям определения их протолита. Этот раздел диссертации носит обзорный характер, и в нем последовательно рассматриваются гипотеза кристаллизации эклогитов из первично мантийных расплавов и более популярная на сегодняшний день модель образования мантийных эклогитов в результате субдукции океанической коры в мантию Земли. Проведенный анализ и сопоставление моделей с учетом предлагаемых автором критериям установления протолита эклогитовых пород оказываются совершенно необходимыми для последующего обсуждения генетической модели автора.

В обобщающей **главе 8** диссертантом обсуждаются наиболее вероятные сценарии образования эклогитов выделенных групп. Автор обоснована идея о том, что протолитами высокоглиноземистых эклогитов следует считать слабо дифференцированные оливиновые габбро из нижних горизонтов океанической коры (hi-Al₂O₃-1) и породы слоя габбро океанической коры (hi-Al₂O₃-2). lo-MgO эклогиты, по мнению автора, были образованы по океаническим базальтам состава бонинит – N-MORB, претерпевшим частичное плавление. Первичные петро- и геохимические особенности hi-MgO эклогитов утрачены вследствие мантийных событий и не позволяют однозначно сделать вывод об их протолите. Несмотря на это, значительный объем информации о преобразованиях эклогитов, связанных с наложенными мантийными метасоматическими событиями (образование вторичных гранатовых кайм вокруг первичных гранатовых зерен, сульфидная минерализация, формирование высокониобиевых рутилов и др.), может служить основой для дальнейших исследований диссертанта, направленных, в том числе, на выяснение причин повышенной алмазоносности трубки Катока.

К работе имеются следующие вопросы и замечания:

- (1) Проведенная автором типизация эклогитов и применение нового критерия разделения эклогитовых пород является новым подходом к изучению мантийных пород. Однако в тексте работы следовало бы более подробно объяснить, почему в случае трубки Катока существующие классификации мантийных эклогитов не являются информативными (Coleman et al, 1965; MacGregor, Carter, 1970; Dawson, Stephens, 1975; McCandless,

Gurney, 1989; Grütter et al, 2004). На рис. 3.2 наблюдается значительное перекрытие полей $hi-Al_2O_3$ и $lo-MgO$. Кроме того, утверждение автора о возможности использования предложенной классификации для всех мантийных эклогитов требует проверки на уже имеющемся обширном материале по ксенолитам эклогитов в кимберлитовых трубках мира.

- (2) В главе 3, характеризующей минералого-петрографические особенности пород следовало привести фотографии эклогитов, наглядно показывающие структурно-текстурные особенности пород, каймы вокруг клинопироксена и «губчатые» агрегаты.
- (3) В работе не описана процедура расчета формул минералов и выделения минералов. В частности, непонятно, почему все трехвалентное железо в гранатах автор соотносит с андрадитовым минералом и не рассматривает возможность появления скиагитового крайнего члена ($Fe^{2+}_3Fe^{3+}_2Si_3O_{12}$), устойчивого при высоком давлении.

В заключение необходимо отметить, что защищаемые положения довольно хорошо обоснованы результатами проведенных автором исследований, а также глубоким теоретическим анализом литературных данных. Большой список использованной литературы свидетельствует о том, что автор имеет широкий кругозор и глубокие знания о предмете исследования. Н.М. Королев является автором 12 печатных работ, из них пяти статей в российских и зарубежных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Результаты работы были представлены в виде докладов на российских и международных конференциях. Приведенные в отзыве замечания во многом имеют рекомендательный характер и могут быть учтены в последующей работе. Следует подчеркнуть сложность изученных объектов и использование существующих методов их исследования в полном объеме. Автореферат и опубликованные работы отражают содержание диссертации. Полученные диссертантом результаты вносят значительный вклад в петрологию и геохимию мантийных ксенолитов из кимберлитов, а также в решение проблемы глубинного строения и состава мантии Земли.

Представленная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Королев Нестер Михайлович, заслуживает присуждение ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.04 «петрология, вулканология».

Отзыв составил:

Бобров Андрей Викторович – профессор кафедры петрологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, доцент, доктор геолого-минералогических наук; адрес: 119991 Москва, Ленинские горы, д. 1, МГУ; тел. +7(495)939-49-29; e-mail: archi@geol.msu.ru

14.11.2015

Подпись *Бобров А. В.* **Бобров А. В.** **Зав. канцелярией геологического ф-та**
М.Г. Вебер **М.Г. Вебер**

