

Отзыв
официального оппонента
на диссертационную работу МИХАЙЛЕНКО Дениса Сергеевича «Минералогия графит- и алмазсодержащих ксенолитов из кимберлитовой трубки Удачная», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 «минералогия, кристаллография»

Диссертационная работа Д.С. Михайленко посвящена изучению представительной коллекции графит- и алмазсодержащих ксенолитов, морфологии, дефектно-примесного и изотопного состава алмаза и графита. Определены минералого-петрографические особенности мантийных ксенолитов и проведена оценка Р-Т параметров образования пород. На основе полученных в работе данных автором обосновывается сингенетичное образование алмаза, графита и главных порообразующих минералов.

В основе работы лежит изучение коллекции мантийных ксенолитов из 30 образцов, собранной в ходе полевых работ 2003-2012 гг. Головиным А.В. и Корсаковым А.В., а с 2012 по 2015 гг. непосредственно с участием автора диссертации. Помимо этого, в работе использованы образцы из коллекции Малыгиной Е.В. Автором изготовлено и просмотрено около 150 плоскополированных пластинок и шлифов. Полировка микроалмазов непосредственно в шлифах применена при изготовлении 9 шлифов. В процессе изучения извлечено из ксенолитов более 50 микрокристаллов алмаза и 100 зерен графита. Для изучения минеральных включений приполированы два кристалла алмаза. Для решения поставленных задач работы автором применен широкий комплекс методов исследования, включающий в себя спектроскопию комбинационного рассеяния (получены и расшифрованы более 70 спектров порообразующих минералов и минералов включений), рентгеноспектральный анализ (более 1500 определений состава минералов), ИК-спектроскопию, а также изотопные исследования графита и алмаза. Оценки Р-Т-условий образования эклогитов были получены методами классической термобарометрии. Все исследования были проведены диссертантом лично или при его непосредственном участии.

Актуальность работы связана с попыткой автора внести вклад в решение проблемы углеродного цикла – одной из важнейших проблем современной геохимии. Изучение условий образования графит- и алмазсодержащих ксенолитов дает возможность получить информацию об условиях их происхождения и эволюции полиморфных модификаций углерода в пределах верхней мантии. Кроме того, изучение ксенолитов мантийных пород различных уровней глубинности, содержащих фазы свободного углерода играет важную роль в понимании характера и продуктов взаимодействия основных типов мантийных субстратов с агентами мантийного метасоматоза.

Научная новизна и практическая значимость работы не вызывают сомнений. В диссертации впервые проведено комплексное систематическое

исследование минералогии графит- и алмазсодержащих ксенолитов в сочетании с детальным изучением морфологии, дефектно-примесного и изотопного состава алмаза и графита. На основе минералого-петрографических особенностей графит- и алмазсодержащих ксенолитов автором работы показана возможность сингенетического образования алмаза, графита и первичных порообразующих минералов. Впервые для алмаз-графитсодержащих ксенолитов эклогитов получены независимые оценки температуры (1000-1250°C) и давления (4.7-7.2 ГПа) по Grt-Cpx-Ky-Coe геотермобарометру (Ravna, Raquin, 2003). Впервые в графит- и алмазсодержащих эклогитах обнаружены включения кристаллов графита в алмазе, что, с точки зрения автора работы, может служить первым свидетельством кристаллизации метастабильного графита в поле стабильности алмаза в породах верхней мантии. Исходя из установленной степени агрегации азота в алмазах и предполагаемого древнего возраста кристаллов алмаза с графитом, Д.С. Михайленко было показано, что графит может сохраняться в условиях верхней мантии в области устойчивости алмаза длительное время (~1 млрд. лет).

Результаты диссертационной работы Д.С. Михайленко могут быть использованы для петрологических построений и создания моделей процессов графито- и алмазообразования в породах верхней мантии. Приведенные в работе результаты имеют важное значение для развития представлений о круговороте углерода в литосфере Земли.

В целом, диссертация Д.С. Михайленко состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитированной литературы из 312 наименований. Объем диссертации составляет 159 страниц, в том числе 55 рисунков и 22 таблицы.

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 три защищаемых положения, которые доказываются в последующих шести главах.

В **Главе 1** приводится обзор литературных данных, касающихся состояния проблемы изучения условий образования графит- и алмазсодержащих ксенолитов из кимберлитов. Автором обсуждаются представления о формировании графит-алмазсодержащих эклогитов мантийных ксенолитов, выносимых кимберлитами вблизи линии равновесия «графит-алмаз», а также гипотезу о возможности метастабильного роста графита в поле стабильности алмаза, впервые выдвинутую в работе (Pearson et al., 1994). В этом разделе рассмотрены также результаты экспериментальных работ, согласно которым умеренно окисленные обстановки во всех неметаллических системах являются наиболее благоприятными для кристаллизации алмаза (Akaishi, Yamaoka, 2000; Palyanov et al., 2002; Литвин, 2009). В итоге Д.С. Михайленко делает вывод о дискуссионном характере вопроса о причинах кристаллизации различных полиморфных модификаций углерода как в экспериментальных системах, так и в природных образцах.

Глава 2 посвящена характеристике использованных в работе методов исследования мантийных ксенолитов, алмаза и графита.

В **Главе 3** описывается геологическое положение кимберлитовой трубки Удачная и приводится минералого-петрографическая характеристика мантийных ксенолитов. В графит- и алмазсодержащих ксенолитах автором выделено две группы пород – основная (эклогитовая) и ультраосновная. Основная группа представлена ксенолитами эклогитов и на основании соотношения MgO и Na₂O в клинопироксене, разделена на высоконатровую – (группа С) (15 образцов) и магнезиально-железистую – группа В (11 образцов). Ультраосновная представлена ксенолитами ортопироксенитов (2 образца), вебстеритом и оливинитом. В целом, минеральный состав, структурно-текстурные особенности пород и химические составы пороодообразующих минералов описаны достаточно подробно. Особо следует отметить детальность характеристики акцессорных минералов, в частности, рутила, и сульфидов, для которых установлено наличие кайм и структур распада, а также наличие неоднородностей состава в пределах зерен.

В **главе 4** автор обсуждает вопросы морфологии кристаллов графита и алмаза и ее зависимость от состава породы, приводит данные изучения кристаллов методами спектроскопии комбинационного рассеяния, дефектно-примесный и изотопный состав. Это один из наиболее важных и интересных разделов работы. Впервые в кристаллах алмаза из графит- алмазсодержащих эклогитов автором диагностированы сингенетические включения графита, для которых приведенные оценки остаточных напряжений в пересчете на мантийные температуры превышают 4 ГПа. Также впервые в исследованных образцах изучены эпигенетичные включения графита вокруг минеральных включений в алмазе, свидетельствующие, по мнению автора, о высокотемпературном отжиге в поле стабильности графита при 1000°C и 1.8 ГПа. Установлена высокая степень агрегации азота в кристаллах алмаза и высокоупорядоченная структура включений графита, что приводит автора к выводу о возможности сохранения графита в верхней мантии в течение продолжительного времени (~1 млрд. лет) без перекристаллизации в алмаз. Достоверность рассмотренных в этом разделе работы аналитических данных не вызывает сомнения. В целом, можно согласиться и с их интерпретацией.

Глава 5 посвящена термобарометрии изученных пород мантийных ксенолитов трубки Удачная. В выборе средств для оценки P-T параметров образования мантийных минеральных ассоциаций Д.С. Михайленко остановился на классических методах и уравнении геотермы теплового потока с мощностью 40 мВт/м² (Hasterok, Chapman, 2011; Furlong, Chapman, 2013). Реконструкция условий образования вторичных минералов была проведена автором по диопсид-плаггиоклаз-калишпатовому симплектиту. В результате были получены P-T параметры для первичных парагенезисов высоконатровых (Grt-Cpx-Ky-Coe) и магнезиально-железистых (Grt-Cpx-Coe) графит- и алмазсодержащих эклогитов из трубки (1000-1250°C, 4.7-7.2 ГПа), а также вторичных минеральных ассоциаций (Pl-Kfs-CpxII) (2.3-1.2 ГПа, 990-660°C).

В главе 6 обсуждаются особенности процессов кристаллизации алмаза и графита в породах верхней мантии под Сибирским кратоном. Автор делает вывод о том, что, по крайней мере, часть кристаллов графита кристаллизовалась до или совместно с гранатом и другими породообразующими минералами в широком интервале температур (1000-1350°C) и давлений (4.5-7.2 ГПа) в пределах алмазной фации глубинности. Вместе с тем, по мнению автора, наличие графита в межзерновом пространстве, на границе зерен граната и симплектита, позволяет предположить кристаллизацию графита совместно с образованием вторичного мелкозернистого агрегата за счет внедрения кимберлитового расплава, а не С-О-Н флюида.

К работе имеются следующие вопросы и замечания:

(1) Автору следовало обосновать выбор конкретных образцов мантийных пород для исследований. Почему в работе наряду с графит- и алмазсодержащими разностями рассматриваются только алмазоносные эклогиты, а также эклогиты, не содержащие фаз углерода? Почему из шести образцов, содержащих одновременно графит и алмаза, для определения изотопного состава углерода обеих фаз был выбран лишь один образец? Это снижает достоверность вывода диссертанта об общности источников углерода для графита и алмаза (раздел 6.2).

(2) Приведенная в главе 3 характеристика минералого-петрографических особенностей изученных пород при всей своей полноте написана несколько сумбурно. Было бы логичнее привести раздельную сводную характеристику первичных и наложенных минеральных ассоциаций, соотнести зональность и неоднородность минералов мантийных пород (в первую очередь, граната) с их эволюцией. Рассмотрение минеральных ассоциаций в таком аспекте (выделение парагенезисов минералов) позволило бы автору более четко подойти к выбору объектов для термобарометрических оценок. Нельзя согласиться с отнесением автором работы ортопироксенитов к ультраосновным породам (раздел 3.3). На приведенных в этой главе фотографиях обращает на себя внимание почти повсеместная приуроченность кристаллов графита к трещинам и прожилкам вторичных минералов, в том числе в случаях их нахождения в виде включений в гранате и клинопироксене. К сожалению, в тексте отсутствуют комментарии этих наблюдений в связи с обсуждаемым далее первичным характером графита.

(3) Обсуждение методик определения температур и давлений по составу породообразующих минералов мантийных эклогитов в работе носит весьма схематичный характер. Автору следовало провести критический анализ выбора методики оценки РТ-параметров путем сопоставления различных оценок по различным методам и оценить точность определения температур и давлений. Почему автор проигнорировал возможность использования современных программных комплексов (PERPLE_X, THERMOCALC и др.)? Из текста диссертации не до конца понятно, каким образом автор выбирал вторичные минеральные ассоциации для термодинамических оценок. Судя по фотографиям и описаниям, в составе фазовых ассоциаций симплектита отсутствуют фазы SiO₂. Каким образом, в таком случае проводились оценки давлений? Все эти недочеты, несколько снижают достоверность полученных в работе термодинамических определений.

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. Д.С. Михайленко является автором 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 автором 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 изучение минералогии, петрологии и геохимии 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, Михайленко Денис Сергеевич, заслуживает присуждение ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 «минералогия, кристаллография».

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

Я, Бобров Андрей Викторович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

13.02.2017

