

На правах рукописи



КОРОЛЕВ Нестер Михайлович

**ПЕТРОЛОГИЯ И МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ
ЭКЛОГИТОВ ИЗ ЛИТОСФЕРНОЙ МАНТИИ
КРАТОНА КАССАИ (С.-В. АНГОЛА)**

25.00.04 – Петрология, вулканология

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Санкт-Петербург
2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук

профессор **Никитина Лариса Петровна**

ФГБУН Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, главный научный сотрудник

Официальные оппоненты:

доктор геолого-минералогических наук

Бобров Андрей Викторович

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»,
Профессор кафедры петрологии

кандидат геолого-минералогических наук

Корешкова Марина Юрьевна

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет»,
Доцент кафедры петрографии

Ведущая организация:

ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

Защита диссертации состоится 2 декабря 2015 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.047.01 при Институте геологии и геохронологии докембрия РАН по адресу: 199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГГД РАН и на сайте www.ipgg.ru.

Отзывы направлять ученому секретарю диссертационного совета по адресу: 199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 2., ИГГД РАН.

Факс: (812) 328-48-01. Электронная почта: dis.sovet@ipgg.ru.

Автореферат разослан октября 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат геолого-минералогических наук



/Н.А. Алфимова/

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Кимберлитовая трубка Катока является одной из самых богатых алмазоносных трубок в Мире (входит в пятерку) и в то же время в этой трубке наблюдается сопоставимое количество ксенолитов перидотитов и эклогитов различных типов, что довольно редко встречается в других кимберлитовых телах. Актуальность настоящего исследования заключается в том, что до сих пор не были изучены мантийные ксенолиты из трубки Катока и других трубок в данном регионе, а также не проведено исследований, характеризующих литосферную мантию кратона Кассаи. Выяснение генезиса мантийных эклогитов на примере представительной коллекции образцов из трубки Катока может способствовать решению проблемы глобального эклогитообразования в мантии. Кроме того, детальное изучение химического и минералогического состава эклогитов, процессов их преобразования в условиях алмазной фации необходимо для выявления новых поисковых и геологоразведочных критериев для обнаружения алмазоносных кимберлитовых трубок.

Цель и задачи исследования. Основной целью работы является типизация, реконструкция РТ-условий формирования, определение возраста, положения в разрезе литосферной мантии и установление протолита мантийных эклогитов из кимберлитовой трубки Катока (кратона Кассаи).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) Определение петрографических, минералогических и геохимических характеристик эклогитов;
- 2) Определение температур и давлений равновесия минеральных ассоциаций мантийных эклогитов, реконструкция их положения в разрезе литосферной мантии кратона Кассаи;
- 3) Определение возраста цирконов из мантийных эклогитов U-Pb методом. Изучение Sm-Nd изотопных характеристик мантийных эклогитов;
- 4) Анализ магматических и субдукционных гипотез образования эклогитов в литосферной мантии, выявление наиболее достоверных критериев генезиса эклогитов;
- 5) Создание модели генезиса мантийных эклогитов из кимберлитовой трубки Катока (кратона Кассаи).

Фактический материал и методы исследования. Объектом исследования являются верхнемантийные ксенолиты из кимберлитовой трубки Катока (22 образца: 21 эклогит и 1 перидотит). Образцы были отобраны, геологами, работающими в ГРО «Катока» Республика Ангола, и переданы для исследования в ИГГД РАН с согласия администрации.

При решении поставленных задач использован комплексный подход. Петрографическое изучение образцов проводилось на стандартном поляризационном микроскопе. Содержание петрогенных элементов в породах определено методом XRF на многоканальном спектрометре ARL-9800 (ВСЕГЕИ), редких и редкоземельных элементов – методом ICP-MS на приборе ELAN-6100 DRC (ВСЕГЕИ). Состав минеральных фаз в каждом образце (всего около 1000

определений) установлен методом EPMA, на сканирующем электронном микроскопе JEOL-JSM-6510 LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200 (JEOL) в ИГГД РАН. Валентное состояние железа и его распределение в структуре гранатов и клинопироксенов определено методом Мёссбауэровской спектроскопии в ИГГД РАН при комнатной температуре на установке "СМ-1201". Содержание редкоземельных и редких элементов (20-29 элементов в минерале, всего 64 определения) в породообразующих гранатах и клинопироксенах определено методом SIMS на ионном микрозонде Cameca IMS-4f (ЯФ ФТИАН). Локальные геохронологические исследования цирконов проведены U-Pb методом на ионном микрозонде SHRIMP-II (ЦИИ ВСЕГЕИ) по стандартной методике (4 зерна циркона из двух образцов). Sm-Nd геохронологические определения по валовой навеске и монофракциям минералов (гранат и клинопироксен) проведены методом изотопного разбавления (TIMS) на мультиколлекторном масс-спектрометре TRITON в ИГГД РАН. Для селективного растворения возможных включений в монофракциях граната использовался метод сернокислотного выщелачивания. Оценки P-T-условий формирования эклогитов получены методами классической термобарометрии.

Автор выполнил петрографическое описание шлифов, пробоподготовку на каждом этапе работы, непосредственно осуществлял определение валентного состояния железа во всех образцах методом Мёссбауэровской спектроскопии на установке "СМ-1201" и часть аналитических исследований по определению химического состава минеральных фаз методом EPMA, в качестве оператора на сканирующем электронном микроскопе JEOL-JSM-6510 LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200 (JEOL) под руководством канд. геол.-мин. наук О.Л. Галанкиной. На каждом этапе работ автором проведена обработка и интерпретация полученных аналитических данных, включая определение P-T-параметров и геохимическое моделирование.

Научная новизна. 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.

Теоретическая и практическая значимость работы. 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. Достигнутые в ходе комплексного исследования петрографических, минералогических и химических особенностей эклогитов кратона Кассаи, определения их P-T-параметров равновесия и возраста результаты необходимы для решения проблемы глобального эклогитообразования в верхней мантии.

Полученные данные будут полезны при изучении аналогичных объектов алмазоносной провинции С.-В. Анголы. Выявленные особенности эклогитов, образованных на уровне алмазной фации и вынесенных кимберлитами высоко алмазоносной трубки Катока, будут способствовать разработке новых поисковых и геологоразведочных критериев при обнаружении алмазоносных кимберлитовых тел на поисковых площадях С.-В. Анголы, а возможно и в других регионах. Одним из таких критериев может стать высокониобиевый рутил, обнаруженный в высокомагнезиальных эклогитах.

Положения, выносимые на защиту.

1. Мантийные эклогиты из трубки Катока (кратон Кассаи) в соответствии с петрографо-минералогическими характеристиками и новым классификационным критерием $(Mg^{Cpx} + Mg^{Grt}) / (Al^{Cpx} + Al^{Grt})$ относятся к трем типам: высокоглиноземистые, низкомагнезиальные и высокомагнезиальные эклогиты.

2. Выделенные группы эклогитов отражают неоднородность вещественного состава мантии и сменяются в вертикальном разрезе литосферной мантии кратона Кассаи в последовательности: высокоглиноземистые эклогиты 100-140 км (35-42 кбар, 900-1020°C), низкомагнезиальные эклогиты 120-170 км (37-50 кбар, 940-1180°C) и высокомагнезиальные эклогиты 170-210 км (54-60 кбар, 1240-1360°C).

3. Значение возраста около 1250 млн. лет отражает время формирования низкомагнезиальных и высокоглиноземистых эклогитов. Внедрение кимберлитового расплава около 120 млн. лет назад привело к перестройке U-Pb изотопной системы в цирконе из эклогитовых ксенолитов. В промежутке между 1250 и 120 млн. лет эклогиты подверглись изменениям, вследствие смены термобарического режима в мантии.

4. Образование высокоглиноземистых и низкомагнезиальных эклогитов связано с субдукцией вещества океанической коры. Протолитом для высокоглиноземистых эклогитов послужили габбро, для низкомагнезиальных эклогитов – базальты океанической коры (бониниты). Высокомагнезиальные эклогиты испытали высокobarические и высокотемпературные изменения в глубинных зонах мантии, характеристики их первичного протолита утрачены.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы (235 наименований) и содержит 197 страниц, 52 рисунка, 28 таблиц. Приложение занимает 25 страниц.

Во введении обсуждается актуальность работы, ее цели и задачи, приведены методы исследования и сформулированы защищаемые положения. Глава 1 освещает предшествующие исследования по строению и термальному состоянию литосферной мантии кратона Кассаи, а также данные изучения кимберлитовой трубки Катока. В главе 2 описана аналитическая методика, использовавшаяся в работе. Глава 3 посвящена особенностям минерального и вещественного состава эклогитов, их типизации. В главе 4 обсуждаются геохимические особенности эклогитов, состав породообразующих минералов по главным, редким и редкоземельным элементам. В главе 5 рассматривается термобарометрия эклогитов, обсуждается методика определения P-T-параметров и реконструкция P-T-условий формирования эклогитов. Глава 6 посвящена U-Pb геохронометрии цирконов, выделенных из эклогитов, а также Sm-Nd геохронометрии. В главе 7 обсуждаются

петрогенетические модели формирования мантийных эклогитов и критерии определения их протолита. В завершающей 8-й главе предлагается модель образования мантийных эклогитов из трубки Катока. Выводы диссертации резюмированы в заключении.

Апробация. Результаты исследования отражены в 12 научных публикациях, пять из которых – статьи в рецензируемых научных журналах. Конференции, на которых были доложены промежуточные итоги работы: XXII и XXV молодежная научная конференция, посвященная памяти К.О. Кратца (Апатиты, 2011 и Санкт-Петербург, 2014); Международная конференция «Модели образования алмаза и его коренных источников. Перспективы алмазоносности Украинского щита и сопредельных территорий» (Киев, 2012); XIII и XIV международная конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» (Москва, 2012 и 2013); IV международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (Санкт-Петербург, 2015).

Благодарности. Автор глубоко признателен и благодарит научного руководителя Л.П. Никитину за постоянное внимание к работе и всестороннюю помощь. Отдельную благодарность автор приносит сотрудникам ГРО «Катока» (Ангола), способствовавшим отбору проб, подготовке и передачи коллекции мантийных ксенолитов, в особенности В.Н. Зинченко.

Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам ИГГД РАН за помощь, обсуждение результатов и методологии работы, проявленное внимание и интерес к исследованию: М.С. Бабушкиной, О.Л. Галанкиной, А.Г. Гончарову, С.Г. Скублову, А.В. Березину, А.Е. Мельнику, А.В. Матреничеву, Д.В. Доливо-Добровольскому, П.Я. Азимову, а также администрации ИГГД РАН, в лице директора А.Б. Вревского и заведующего лабораторией петрологии В.А. Глебовицкого, за всестороннюю поддержку работы на всех этапах её выполнения.

Автор благодарит сотрудников ИГГД РАН Л.К. Левского и Е.С. Богомолова, ЦИИ ВСЕГЕИ А.К. Салтыкову, Н.Г. Бережную и Н.В. Родионова, ЯФ ФТИАН С.Г. Симакина и Е.В. Потапова, за проведение аналитических исследований, и обсуждение их результатов.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1^о защищаемое положение. Мантийные эклогиты из трубки Катока (кратон Кассаи) в соответствии с петрографо-минералогическими характеристиками и новым классификационным критерием $(Mg^{Cpx} + Mg^{Grt}) / (Al^{Cpx} + Al^{Grt})$ относятся к трем типам: высокоглиноземистые, низкомагнезиальные и высокомагнезиальные эклогиты.

Геологическая позиция. Кимберлитовая трубка Катока расположена в северо-восточной части Анголы. В геологическом отношении этот регион представляет собой пересечение системы глубинных разломов, называемой «коридором Лукапа» (протяженностью с юго-запада на северо-восток более 1200 км, шириной 50 – 90 км) со структурами древнего архейского кратона Кассаи. Тектоно-магматическая активизация, приведшая к образованию разломов и инициировавшая внедрение многочисленных кимберлитовых тел, в том числе и трубки Катока, произошла вследствие раскрытия Атлантического океана около 120 млн. лет назад (Jelsma et al., 2009; Первов и др., 2011; Robles-Cruz et al., 2012). Трубка Катока является довольно крупным, округлым в плане кимберлитовым телом. Площадь выхода составляет порядка 63.6 га, размеры на поверхности 915×990 м. Породы, вмещающие трубку Катока, представлены архейскими кристаллическими сланцами и гнейсами.

Минералогия и петрография эклогитов. На основании петрографического изучения шлифов и данных химического состава породообразующих, второстепенных и аксессуарных минералов выделено три типа эклогитов: высокоглиноземистые (hi-Al₂O₃), низкомагнезиальные (lo-MgO) и высокомагнезиальные (hi-MgO).

Hi-Al₂O₃ эклогиты (6 обр.) 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). Все эклогиты имеют гранобластовую крупно-, реже среднезернистую структуру и массивную текстуру. В hi-Al₂O₃ эклогитах клинопироксены и гранаты изменены сильнее, чем в других группах. Практически вокруг каждого зерна клинопироксена обнаружены «губчатые» структуры (по Taylor, Neal, 1989). Часто по трещинам развивается вторичная минерализация: плагиоклаз, калиевый полевой шпат, амфибол паргаситового ряда, минералы группы слюд и др.

Главной особенностью, позволяющей отнести эклогиты к hi-Al₂O₃ типу, является наличие кианита и нередко аксессуарного корунда. В других типах эклогитов они не обнаружены. Все эклогиты из трубки Катока содержат аксессуарный рутил, но только в hi-Al₂O₃ эклогитах в нем обнаружены вросстки корунда. В омфацитах наблюдается повышенное содержание Al₂O₃ (14-20 мас.%). По петрохимическим характеристикам hi-Al₂O₃ эклогиты можно разделить на две подгруппы: высокомагнезиальную (hi-Al₂O₃-1; Mg# 74-76, 2 образца) и низкомагнезиальную (hi-Al₂O₃-2; Mg# 64-66, 4 образца). В подгруппе hi-Al₂O₃-1 чуть более магнезиальный клинопироксен (на 1-5 ед.) и намного более магнезиальный гранат (~ на 15-19 ед.). Отличительной особенностью hi-Al₂O₃-1 эклогитов является также наличие примеси хрома в гранате (870-1170 ppm) и клинопироксене (1000-1450 ppm). В гранате и клинопироксене из подгруппы hi-Al₂O₃-2 содержание хрома 110-220 и 100-220 ppm соответственно.

Lo-MgO эклогиты (10 обр.) – биминеральная порода, сложенная гранатом пироп-альмандинового ряда (Prp35-53, Alm28-45, Grs16-28) и омфацитом (Jd32-57, (Wo+En+Fs)41-63Aeg2-5). Акцессорный минерал – рутил. Все эклогиты имеют гранобластовую крупно-, реже, среднезернистую структуру и массивную текстуру. Во всех образцах обнаружены каймы, образованные из мелкозернистого измененного материала вокруг монолитной центральной части клинопироксенов, так называемые «губчатые» структуры (Taylor, Neal, 1989). Для всех образцов характерны вторичные изменения, широко проявленные по трещинам, вторичные минералы представлены: флогопитом, амфиболом преимущественно паргаситового ряда, кислым плагиоклазом (№ до 10), калиевым полевым шпатом, апатитом и т.д.

Главной особенностью низкомагнезиальных эклогитов (Mg# 58-72) является 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 %).

Hi-MgO эклогиты (5 обр.) – биминеральная порода, сложенная пироповым гранатом (Prp68-70, Alm21-23, Grs5-8) и клинопироксеном (Jd19-25, (Wo+En+Fs)72-77Aeg3-4). Акцессорный минерал – рутил. Структура порфиروгранобластовая и порфиробластовая, структура основной ткани гранобластовая реже пойкилобластовая. Текстуры либо неявно сланцеватые, либо массивные. Вторичные изменения занимают меньший объем породы, по сравнению с другими типами эклогитов. В основном, они наблюдаются в виде тонких реакционных кайм, шириной не более 0.1 мм, но чаще границы между зернами резкие. Наиболее распространенный вторичный минерал – флогопит, также присутствуют: амфиболы (паргасит, магнезио-катафорит, калиевый магнезио-катафорит и эденит), серпентин, апатит, бариевые полевые шпаты.

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 Nb₂O₅ (7-11 мас.%) в рутилах и специфический набор структурно-текстурных признаков, не встречающихся в других эклогитах.

Типизация эклогитов и новый критерий. Разделение эклогитов на три типа, принятое в работе – необходимость, поскольку существующие классификации мантийных эклогитов полностью не отражают набор всех специфических минералогических и петрографических черт, присущих эклогитам из трубки Катока. Применение других схем классификации (Coleman et al, 1965; MacGregor, Carter, 1970; Dawson, Stephens, 1975; McCandless, Gurney, 1989; Grütter et al, 2004) для разделения эклогитовых ксенолитов из трубки Катока не целесообразно. Критерий магнезиальности породы (Mg#^{WR}) также полностью не отражает различие трех типов эклогитов. Для разделения эклогитов на hi-Al₂O₃, lo-MgO и hi-MgO типы предлагается новый критерий, основанный на соотношении содержаний Mg и Al в породообразующих клинопироксенах и гранатах: $(Mg^{Cpx} + Mg^{Grt}) / (Al^{Cpx} + Al^{Grt})$, где содержания Mg и Al пересчитываются на атомные проценты, и Na₂O в омфаците (рис. 1). Mg и Al – это элементы, содержание которых наиболее значительно меняется в породообразующих минералах различных типов эклогитов, при этом

обратно пропорционально, что обеспечивает контрастные значения отношения $(Mg^{Cpx} + Mg^{Grt}) / (Al^{Cpx} + Al^{Grt})$ для выделенных типов: 0.7-1.0 в hi-Al₂O₃ (Mg#^{WR}, две группы 64-66 и 74-76), 0.9-1.5 в lo-MgO (Mg#^{WR} 58-72), более 2.1 в hi-MgO (Mg#^{WR} 80-81). Содержание алюминия в гранате в различных типах эклогитов меняется слабо, однако учет этой характеристики позволяет наилучшим образом графически представить взаимоотношения между группами эклогитов. Для наиболее наглядного представления предложенного критерия используется также содержание Na₂O (в мас.%) в клинопироксенах. Изучение мантийных эклогитов из трубки Катока (кратон Кассаи) и других регионов мира показало, что содержание Na₂O в клинопироксенах из hi-Al₂O₃ эклогитов, как правило, выше, чем в клинопироксенах из других типов эклогитов. Наименьшее содержание Na₂O характерно для клинопироксенов из hi-MgO эклогитов (рис. 1).

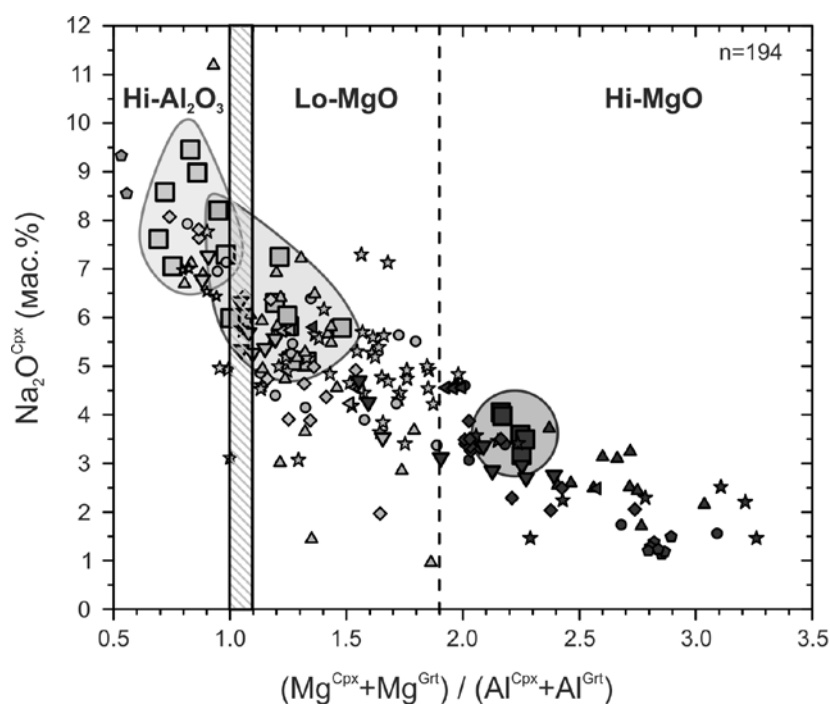


Рис. 3.2. Na₂O^{Cpx} (мас.%) vs. $(Mg^{Cpx} + Mg^{Grt}) / (Al^{Cpx} + Al^{Grt})$ дискриминационная диаграмма для мантийных эклогитов. Серая заштрихованная область – переходная зона между hi-Al₂O₃ и lo-MgO типами эклогитов. Полями оконтурены точки, соответствующие составам эклогитов из трубки Катока. Обозначения: темно-серые значки - hi-MgO эклогиты; серые - lo-MgO эклогиты; светло-серые – hi-Al₂O₃ и высоко-кальциевые эклогиты. Составы порообразующих минералов эклогитов из трубок: Катока – данные настоящей работы; Койду (Hills, Haggerty, 1989); Удачная (Snyder et al., 1997); Комсомольская (Pernet-

Fisher et al., 2014); Робертс Виктор (MacGregor, Manton, 1986); Каалваллей (Viljoen et al., 2005); Виктор (Smit et al., 2014); Дайвик А (Aulbach et al., 2007); Джерико (Heaman et al., 2006).

Предложенная классификация может быть использована для всех мантийных эклогитов, поскольку главными порообразующими минералами (как правило, более 80%) в них являются гранат и омфациит.

2^{ое} защищаемое положение. Выделенные группы эклогитов отражают неоднородность вещественного состава мантии и сменяются в вертикальном разрезе литосферной мантии кратона Кассаи в последовательности: высокоглиноземистые эклогиты 100-140 км (35-42 кбар, 900-1020°C), низкомагнезиальные эклогиты 120-170 км (37-50 кбар, 940-1180°C) и высокомагнезиальные эклогиты 170-210 км (54-60 кбар, 1240-1360°C).

Оценка температуры и давления. Корректное определение термобарических параметров мантийных эклогитов – довольно трудная задача. Для оценки РТ-условий равновесия мантийных эклогитов на сегодняшний день нет общепризнанного инструмента или согласованной системы, разнообразие методов крайне ограничено. В настоящей работе применен следующий подход. Оценки давления и температуры проведены по средним составам центральных неизмененных зон гранатов и клинопироксенов, полученным по нескольким точкам в различных зернах (как правило, 5-10 анализов). Такая методика выбрана, поскольку центральные части зерен гранатов и клинопироксенов гомогенны. Иногда усреднение составов приводит к большей погрешности, выходящей за пределы погрешности применяемых термобарометрических инструментов. Для используемых в настоящей работе термометров она не превышает 80°C.

РТ-параметры определены с помощью нескольких версий гранат-клинопироксенового геотермометра (Ellis, Green, 1979; Powell, 1985; Ai, 1994; Krogh, 2000; Nakamura, 2006; Nakamura, 2009) в комбинации с гранат-клинопироксеновым барометром в двух версиях (Simakov, 2008; Beyer et al., 2015), литиевым гранат-омфацитовым барометром, (Hanrahan et al., 2009a; Hanrahan et al., 2009b), а также с теоретическими геотермами тепловых потоков (Pollack, Chapman, 1977; Hasterok, Chapman, 2011; Furlong, Chapman, 2013).

В результате сопоставления различных комбинаций в качестве наиболее достоверной оценки РТ-параметров образования эклогитов были выбраны значения, получаемые по пересечению кривых, заданных уравнением термометра (Nakamura, 2006) и уравнением геотермы теплового потока с мощностью 40 мВт/м² (Hasterok, Chapman, 2011; Furlong, Chapman, 2013). Практически все современные оценки теплового потока для древних архейских кратонов, к которым относится и кратон Кассаи, характеризуются величинами порядка 38-42 мВт/м² (Boyd et al, 1997; Stachel et al, 2004; Gibson et al, 2008; Ashchepkov, 2012, и многие другие). Кроме того, РТ-параметры неизмененного гранатового лерцолита из трубки Катока, определенные независимыми инструментами (термометр: Grt-Opx (Nimis, Grutter, 2010); барометры: Grt-Opx (Nickel, Green, 1985) и Grt-Opx термобарометр (Никитина, и др., 2010)) хорошо согласуются с геотермой теплового потока с мощностью 40 мВт/м² (рис. 2).

Реконструкция вертикального разреза литосферной мантии. На основе полученных значений Р и Т был реконструирован разрез литосферной мантии кратона Кассаи на глубинах ~110-210 км (35-60 кбар). Верхняя часть разреза, на уровне 110-135 км (Р=35-41 кбар, Т=900-1020°C, 4 образца) представлена hi-Al₂O₃-2 эклогитами, ниже в интервале глубин 130-170 км (Р=40-50 кбар, Т=950-1200°C, 9 образцов) залегают lo-MgO эклогиты. Наиболее глубинная часть разреза 170-210 км (Р=52-60 кбар, Т=1220-1360°C, 6 образцов) сложена hi-MgO и hi-Al₂O₃-1 эклогитами

(рис. 2). Положение различных групп эклогитов в разрезе литосферной мантии кратона Кассая хорошо согласуется с косвенными признаками глубинности их образования (Хаггерти и др., 1993) (табл. 1). Среднее значение Mg/Si, Mg#, а также содержание хрома в гранате и клинопироксене возрастает от hi-Al₂O₃-2 к hi-MgO эклогитам.

Табл. 1. Значения температуры и давления образования верхнемантийных эклогитов из кимберлитовой трубки Катока. Оценка термобарических параметров произведена с применением геотермометра (Nakamura, 2006) и геотермы теплового потока 40 мВт/м² (Hasterok, Charman, 2011; Furlong, Charman, 2013). Погрешность определения температуры до 80°C, давлений – около 10%.

Группа	Т (°С)	Р (кбар)	Косвенные признаки (Хаггерти и др., 1993)			
			Mg/Si (средн.)	Mg# (средн.)	^{grt} Cr (ppm) (средн.)	^{crx} Cr (ppm) (средн.)
Hi-MgO и Hi-Al ₂ O ₃ -1	1240-1360	52-60	0.5	80.3	750	2055
Lo-MgO	940-1180	37-50	0.3	64.5	282	338
Hi-Al ₂ O ₃ -2	900-1020	35-41	0.22	64.4	173	165

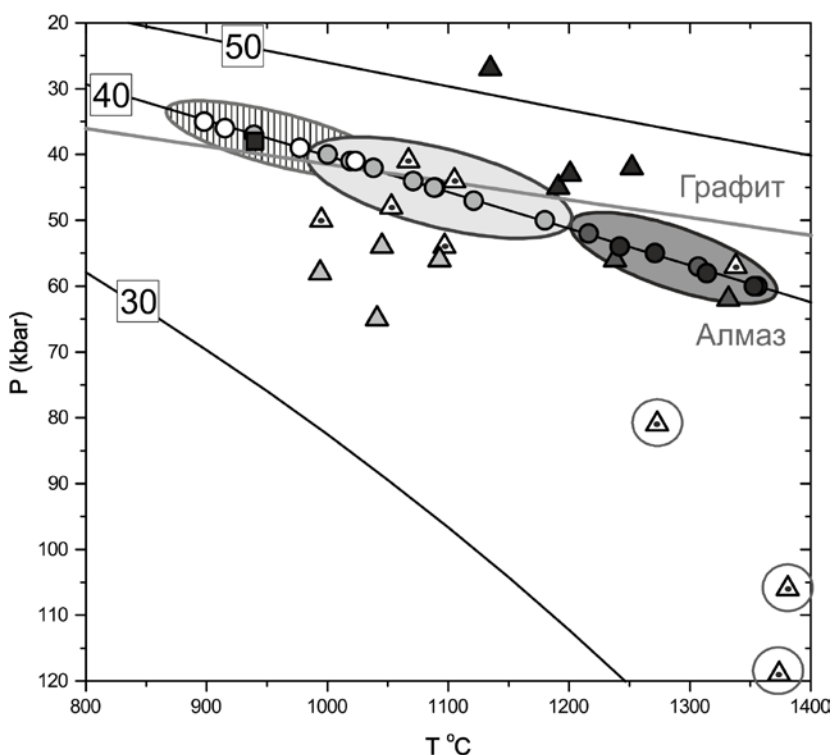


Рис. 2. P-T диаграмма для верхнемантийных эклогитов из кимберлитов трубки Катока. Оценка P-T-параметров произведена с помощью Grt-Crx геотермометра (Nakamura, 2006) и барометра (Beyer et al., 2008) и геотермы теплового потока 40 мВт/м² (Hasterok, Charman, 2011; Furlong, Charman, 2013). Цифры в рамке – мощность теплового потока для соответствующих геотерм. Линия равновесия графит алмаз проведена по данным (Bundy et al, 1996). В квадратных скобках указано количество образцов в соответствующей группе ЭКЛОГИТОВ.

В качестве барометра геотерма 40 мВт/м²

- Hi-Al₂O₃-2 экл. [4]
- Hi-Al₂O₃-1 экл. [2]
- Lo-MgO экл. [10]
- Hi-MgO экл. [5]

Барометр (Beyer et al., 2015)

- △ Hi-Al₂O₃-2 экл. [4]
- ▲ Hi-Al₂O₃-1 экл. [2]
- △ Lo-MgO экл. [10]
- ▲ Hi-MgO экл. [5]

- Grt-prd [1]

3^е защищаемое положение. Значение возраста около 1250 млн. лет отражает время формирования низкомагнезиальных и высокоглиноземистых эклогитов. Внедрение кимберлитового расплава около 120 млн. лет назад привело к перестройке U-Pb изотопной системы в цирконе из эклогитовых ксенолитов. В промежутке между 1250 и 120 млн. лет эклогиты подверглись изменениям, вследствие смены термобарического режима в мантии.

Цирконы, выделенные из мантийных эклогитов – это уникальные находки. На сегодняшний день известно всего два региона, мантийные эклогиты из которых содержат зерна циркона, – кратон Слэйв и Архангельская алмазоносная провинция. Исследование цирконов из кимберлитов кратона Слэйв показало, что образование их корового протолита и его субдукция с мантию происходили около 2.0-2.1 млрд. лет назад (Schmidberger et al., 2005; Heaman et al., 2006). Возрастные значения, установленные по цирконам из эклогитов Архангельской алмазоносной провинции, находятся в интервале ~ 1100-1950 млн. лет. (Скублов и др., 2012а; Щукина, 2013; Щукина и др. 2015).

Всего из двух эклогитовых ксенолитов (lo-MgO и hi-MgO) трубки Катока удалось выделить цирконы, по два зерна в каждом из ксенолитов. Геохимические и геохронологические данные позволяют сделать вывод о том, что изученные цирконы не являются случайным образом попавшими в протолочки ксенолитов контаминантами, связанными с кимберлитами или коровыми ксенолитами из этой же трубки. Содержание REE в выделенных цирконах повышено по сравнению с цирконами из коровых эклогитов, в них также наблюдается ярко выраженная отрицательная Eu-аномалия не характерная для цирконов из коровых пород (Rubatto, Hermann, 2007; Скублов и др., 2012). Содержание U и Yb в цирконах из мантийных эклогитов сильно отличается от концентрации этих элементов в цирконах из кимберлитов. Кроме того, возраст кимберлитов трубки Катока 117.9 ± 0.7 Ma (Robles-Cruz et al., 2012) гораздо моложе большинства возрастных оценок, полученных на основании изучения центральных и краевых частей зерен (рис. 3).

Циркон из lo-MgO эклогита характеризуется зональностью с одновременным повышением содержаний U, Hf, Nb, Y и REE от центра к краю зерна. Эти данные в совокупности с наличием положительной Ce- и отрицательной Eu-аномалий указывают на влияние мантийных метасоматических процессов. Во внутренних зонах зерен наблюдается осцилляционная зональность (рис. 3, зерна 2 и 3), во внешних зонах она отсутствует. Внешние и внутренние зоны различаются по содержанию U, где оно составляет 2788-3686 и 356-801 ppm соответственно. Th/U отношение также значительно различается: для внешних зон оно равно 0.51-0.58, для внутренних – 0.05-0.06. Все точки двух зерен образуют дискордию. Верхнее пересечение дискордии и конкордии 1242 ± 97 Ma, нижнее – 194 ± 74 Ma (рис. 3).

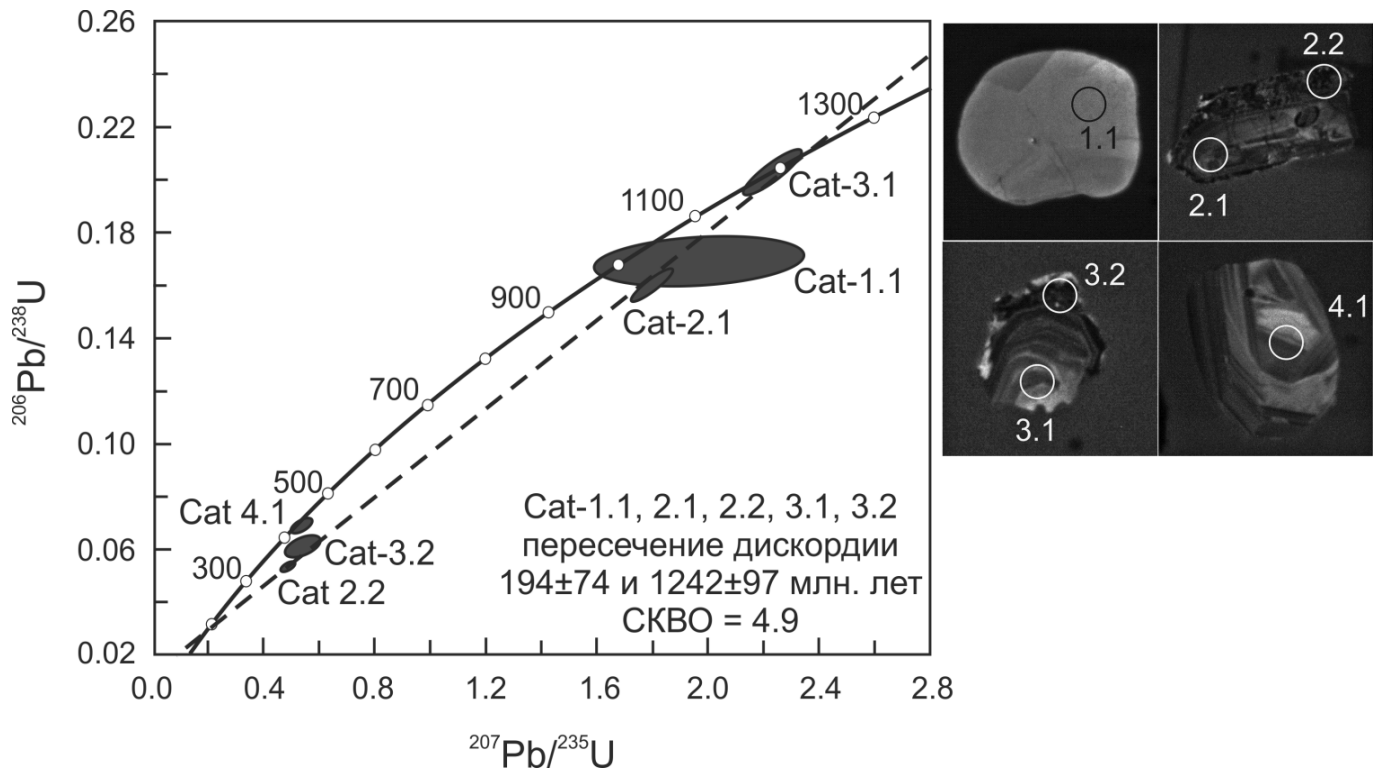


Рис. 3. Диаграмма с конкордией для цирконов из ксенолитов трубки Катока: из lo-MgO экологита Cat-11 (зерна Cat-2.1, 2.2, 3.1, 3.2), hi-MgO экологита Cat-2 (зерно Cat-4.1) и перидотита Cat-19 (зерно 1.1). Эллипсы и значения конкордантного возраста соответствуют 2σ , включая погрешность константы распада.

Хорошо согласующиеся значения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраста с наименьшей дискордантностью 1191 ± 17 Ma ($D=0$ %; точка 3.1, рис. 3) для lo-MgO экологита и верхнего пересечения дискордии и конкордии 1242 ± 97 Ma отражают один этап. Вероятнее всего, это время формирования lo-MgO и hi-Al₂O₃ экологитов. Более молодые оценки возраста маркируют наложенные мантийные процессы, которые привели к перестройке U-Pb системы и повышению содержания U, Hf, Nb, Y и REE в каймах цирконов (точки 2.2 и 3.2). Близость самого «молодого» возрастного значения (194 ± 74 Ma), установленного по цирконам из экологитов, к возрасту, отвечающему кимберлитам трубки Катока 117.9 ± 0.7 Ma (Robles-Cruz et al., 2012), указывает на перестройку U-Pb изотопной системы в цирконах, связанную с кимберлитовым магматизмом. Воздействие кимберлитового расплава подтверждается результатами изучения Sm-Nd изотопных характеристик экологитов. Возрастные оценки 127.3 ± 8.5 млн. лет (СКВО=1.5) и 150.0 ± 6.5 млн. лет (СКВО=0.85) для экологитов Cat-13 и Cat-3 в пределах погрешности хорошо согласуются с самым «молодым» возрастным значением для циркона из экологита Cat-11 (194 ± 74 Ma).

Между ~ 1250 и ~ 120 Ma экологиты подверглись полистадийным изменениям. Во всех образцах обнаружены ильменит-рутиловые структуры распада твердых растворов. Это иногда довольно крупные зерна 1-2 мм, в которых в рутиловой матрице находятся многочисленные ламели ильменита с примесью MgO до 10 мас. % и MnO около 1.5 мас.%. В высокомагнезиальных экологитах в некоторых зернах

рутила выявлены измененные прикраевые участки, в которых образуются высокониобиевые фазы с содержанием Nb_2O_5 до 25 мас.% и Ta_2O_5 – до 4 мас.%, а сама рутиловая матрица содержит около 7-11 мас.% Nb_2O_5 . Природа этих участков до конца не ясна. Локализация в прикраевых частях зерен, неопределенная форма выделения и редкость подобных образований (два зерна из более чем двух десятков изученных) наводят на мысль о том, что они не являются продуктами распада твердых растворов. Возможно, подобные изменения – следствие частичного плавления, тем более что сами зерна несут следы пластической деформации.

В породообразующих гранатах наблюдаются участки метасоматической проработки с образованием вторичного более магнезиального граната. Выделено не менее 2-3 стадий изменения. Максимальная разница в содержании MgO , $\text{FeO}_{(\text{tot})}$ и CaO между центральными гомогенными частями зерна и измененными каймами в lo-MgO и hi- Al_2O_3 эклогитах достигает 8, 7.5 и 5.5 мас.% соответственно.

В некоторых зернах клинопироксенов обнаружены каймы частичного плавления. Кроме того, в омфацитах широко распространены губчатые структуры с новообразованными клинопироксеновыми фазами и калиевым полевым шпатом (Taylor, Neal, 1989).

По трещинам и на границе зерен развивается сульфидная минерализация. Все зерна сильно изменены и принадлежности к минеральным видам установить не удалось, однако по набору характерных элементов можно говорить, что сульфиды относятся к Cu-Fe-Ni разновидностям. Подобный характер наложенной сульфидной минерализации широко известен во многих мантийных эклогитах (Гаранин, Рогожина, 2003; Aulbach et al., 2009; Gréau et al., 2013; и др.).

Таким образом, в эклогитах наблюдаются следы нескольких наложенных процессов, связанных с различным типом метасоматоза. Однако провести датирование всех этих процессов в настоящее время невозможно.

4^е защищаемое положение. Образование высокоглиноземистых и низкомагнезиальных эклогитов связано с субдукцией вещества океанической коры. Протолитом для высокоглиноземистых эклогитов послужили габбро, для низкомагнезиальных эклогитов – базальты океанической коры (бониниты). Высокомагнезиальные эклогиты испытали высокобарические и высокотемпературные изменения в глубинных зонах мантии, характеристики их первичного протолита утрачены.

В настоящей работе в кратком виде критически рассмотрены наиболее аргументированные гипотезы эклогитообразования в литосферной мантии, выделены и подробно обсуждаются различные группы генетических критериев: минералогические, петрографические, геохимические и др. На основе подробного анализа предложена модель образования эклогитов в литосферной мантии кратона Кассаи, согласно которой hi- Al_2O_3 и lo-MgO эклогиты образовались в результате субдукции океанической коры, а hi-MgO эклогиты, вероятнее всего, являются продуктом перекристаллизации неустановленного корового протолита или мантийных эклогитов других типов.

Hi- Al_2O_3 эклогиты. Совокупность минералогических и геохимических признаков указывает на коровый протолит hi- Al_2O_3 эклогитов, которым, вероятнее всего, было габбро океанической коры:

– Наличие кианита в $hi-Al_2O_3$ эклогитах связано с составом корового протолита, имеющего значительное содержание плагиоклаза (Jacob et al., 2009; Smit et al., 2014), что согласуется только с габбро океанической коры. Предположение о том, что кианит это продукт распада высокоглиноземистого клинопироксена (Caporuscio, Smyth, 1990; Jerde et al., 1993) не подтверждается взаимоотношениями кианита и породообразующих минералов ни в одном из образцов. Образование кианита также не может быть связано с гранатом, так как для выделения кианита как самостоятельной фазы требуется инконгруэнтное плавление граната при давлениях превышающих 6.5 ГПа и температурах свыше 1500°C (Бутвина и др., 2001). Термобарометрические оценки для $hi-Al_2O_3$ -1 эклогитов не превышают 1310°C и 60 кбар, а для $hi-Al_2O_3$ -2 эклогитов составляют 900-1020°C и 35-41 кбар.

– Спектры распределения REE в реконструированных валовых составах $hi-Al_2O_3$ эклогитов близки к спектрам распределения в океанических габброноритах, ol-габбро и троктолитах (рис. 4).

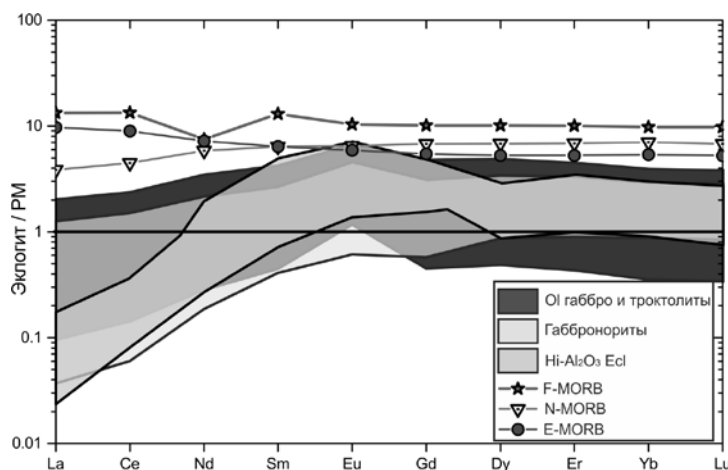


Рис. 4. Спектры распределения REE в реконструированных валовых составах $hi-Al_2O_3$ мантийных эклогитов и возможных коровых протолитах, нормализованных относительно примитивной мантии (McDonough, Sun, 1995). Для построения поля реконструированных валовых составов $hi-Al_2O_3$ эклогитов

использованы пропорции grt/cpx от 30/70 до 70/30. Составы Ol габбро, троктолитов и габброноритов взяты из работы (Benoit et al., 1996), состав F-MORB – (Рябчиков, 2006), составы N-MORB и E-MORB – (Sun, McDonough, 1989).

– Данные по содержанию Y и Zr в породообразующих клинопироксенах и гранатах поддерживают гипотезу о комплементарных отношениях между $hi-Al_2O_3$ и lo-MgO эклогитами. Y и Zr ведут себя как несовместимые элементы, следовательно их должно быть меньше в кумулатных фазах, таких как габбро океанической коры, и больше в эффузивных породах, таких как базальты. В гранатах и клинопироксенах $hi-Al_2O_3$ эклогитов установлены наименьшие содержания Y и низкие содержания Zr, что свидетельствует об их кумулатной природе. Кроме того, в реконструированных валовых составах $hi-Al_2O_3$ эклогитов Zr/Sm отношение составляет 10-19, что намного ниже по сравнению с lo-MgO эклогитами (14-61), и сопоставимо с Zr/Sm отношением в океанических габбро.

– Еще один признак габбро протолита – повышенное Zr/Hf отношение для реконструированных валовых составов. 5 из 6 образцов $hi-Al_2O_3$ эклогитов имеет значения Zr/Hf 26.6-38.3, вероятнее всего, связанные с содержанием Zr и Hf в протолите (рис. 5). Zr/Sm и Zr/Hf отношения в реконструированных валовых составах $hi-Al_2O_3$ эклогитов сходны с соответствующими реперными отношениями в океанических габбро из комплекса Максад, офиолиты Омана (Benoit et al., 1996) и

современных габбро на юго-востоке и юго-западе Индийского хребта, данные бурения, глубины 500-1500 м (Hart et al., 1999; Bach et al., 2001) (рис. 5).

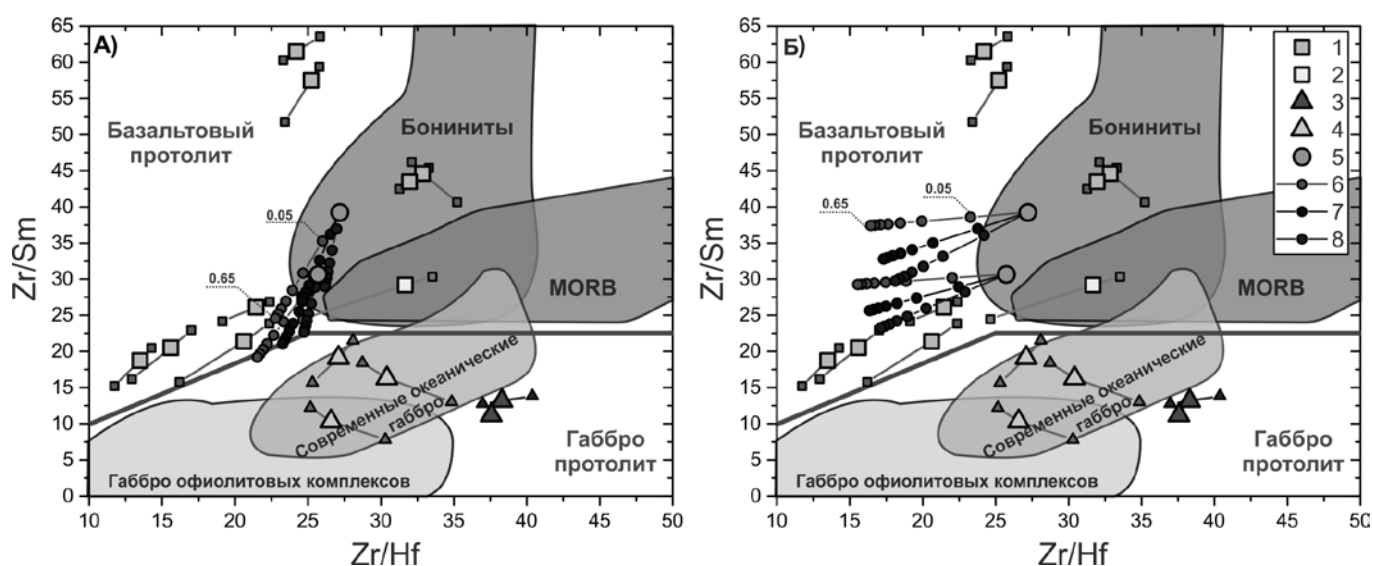


Рис. 5. Диаграмма Zr/Sm vs. Zr/Hf для реконструированных валовых составов lo-MgO и hi-Al₂O₃ эклогитов. Обозначения: 1 - lo-MgO эклогиты; 2 - измененный lo-MgO эклогит Cat-23; 3 - hi-Al₂O₃-1 эклогиты; 4 - hi-Al₂O₃-2 эклогиты; 5 - бониниты (Polat et al., 2002, образцы 242670 и 462945); 6-8 - линии изменения состава рестила частичного плавления бонинитов с соотношением grt/cpx, равным 40/60, 50/50 и 60/40, соответственно. Степень частичного плавления увеличивается от 5 до 65% с шагом +10%. Частичное плавление «бонинита» в условиях: А) 1100°C и 30 кбар, содержание H₂O около 10 мас.%; Б) 1160°C и 40 кбар, содержание H₂O около 15 мас.%. Коэффициенты распределения гранат/расплав, клинопироксен/расплав взяты из работы (Green et al., 2000).

– В гранате и реконструированном валовом составе hi-Al₂O₃ эклогитов выявлены дугообразные спектры II типа (Jacob, 2004; Dongre et al., 2015), которые, по мнению Д. Якоб, являются следствием проградного метаморфизма с образованием граната за счет плагиоклаза. При метаморфическом преобразовании габбро океанической коры в эклогит гранат растет по плагиоклазу, «наследуя» повышенное содержание LREE, в том числе и Eu, что объясняет дугообразную форму спектров распределения REE. Только в габбро океанической коры есть крупные обособленные зерна плагиоклаза в большом количестве. Сохранение LREE (Nd, Sm, Eu) в гранатах обусловлено незавершившимся перераспределением REE между сосуществующим гранатом и клинопироксеном. На незавершившееся перераспределение REE между гранатом и клинопироксеном указывают также: близкие содержания La и Ce в этих минералах (ppm): ^{grt}La 0.01-0.13, ^{grt}Ce 0.12-0.59, ^{cpx}La 0.02-0.14, ^{cpx}Ce 0.14-0.60. Другим подтверждением роста граната по плагиоклазу в hi-Al₂O₃ эклогитах является «наследование» гранатами высоких содержаний Sr, не свойственных этому минералу. При этом гранаты из hi-Al₂O₃ эклогитов имеют низкое La/Sm отношение, что говорит об отсутствии влияния метасоматических процессов, приведших к обогащению стронцием и LREE. Другие

геохимические и минералогические критерии, также свидетельствуют об отсутствии признаков мантийного и кимберлитового метасоматоза.

– Повышенное содержание Al_2O_3 в валовых составах (17.4-18.7 мас.%) и реконструированных валовых составах (18.5-25.5 мас.%, для пропорций Grt:Срх 40:60 до 60:40 с учетом кианита от 0 до 10%) hi- Al_2O_3 эцлогитов оказывается гораздо выше содержания Al_2O_3 в наиболее распространенных типах океанических базальтов, за исключением высокоглиноземистых разновидностей (Panjasawatwong et al., 1995; Dongre et al., 2015), что в совокупности с дугими признаками подразумевает габбро в качестве протолита этих эцлогитов.

Lo-MgO эцлогиты. Lo-MgO эцлогиты обладают своим уникальным набором признаков, что позволяет говорить о характере их протолита. В отличие от hi- Al_2O_3 эцлогитов, чьим протолитом, вероятнее всего, были габбронориты, оливинные габбро или габбро океанической коры, для lo-MgO эцлогитов протолитом могли послужить водонасыщенные базальты:

– В противоположность hi- Al_2O_3 эцлогитам в lo-MgO образцах нет повышенного содержания Sr в гранатах, но наблюдается повышенное содержание Y и примерно такое же или повышенное содержание Zr в клинопироксене и гранате, что опровергает их кумулатную природу и поддерживает вывод о комплементарности между hi- Al_2O_3 и lo-MgO эцлогитами.

– Zr/Sm и Zr/Hf отношения в реконструированных валовых составах также заметно отличаются от подобных отношений в hi- Al_2O_3 эцлогитах и океанических габбро. Некоторые образцы попадают в поле составов бонинитов, а измененный образец Cat-23 лежит в области пересечения составов бонинитов и MORB (рис. 5). Более того, эцлогиты с Zr/Sm отношением выше 40, не могли образоваться по базальтам MORB-типа или по их реститам (рис. 5). Zr/Hf отношение для реконструированных валовых составов большинства lo-MgO эцлогитов (8 из 10) имеет субхондритовые значения 20.6-32.8, вероятнее всего, связанные с бонинитовым составом протолита. К тому же, полученные отношения близки к таковым для эцлогитов из трубок кратона Слейв 21.7–29.8 (Aulbach et al., 2007; Aulbach et al., 2011), для которых, как полагают авторы публикаций, бониниты – наиболее вероятный протолит.

– На мультиэлементных диаграммах хорошо проявлен пик Pb, сходный с пиком Pb в древних бонинитовых сериях Западной Гренландии (Polat et al., 2002; Aulbach et al., 2007).

– На дискриминационных диаграммах для базальтов точки реконструированных валовых составов lo-MgO эцлогитов находятся: в поле «островодужные базальты» на диаграмме Zr/Y – Zr (Pearce, Norry, 1979); в поле «N-MORB и островодужные базальты» на диаграмме Zr/4-Nb*2-Y (Meschede, 1986); «островодужные толеиты» – «бониниты» на диаграмме MnO-TiO₂-P₂O₅ (Mullen, 1983).

– В спектрах распределения REE в гранатах, клинопироксенах и реконструированных валовых составах lo-MgO эцлогитов нет каких-либо аномалий. Содержание и распределение REE в реконструированных валовых составах lo-MgO эцлогитов ближе к бонинитам и N-MORB, чем к другим возможным протолитам, за исключением пониженного содержания LREE, которое говорит о частичном плавлении протолита эцлогитов в мантии (в зоне субдукции). На это также указывает распределение REE в спектрах клинопироксенов, низкое La/Lu

отношение и La_n/Yb_n , а также крайне низкое содержание наиболее подвижных LREE – La и Ce. Таким образом, почти все образцы lo-MgO эклогитов демонстрируют явные признаки частичного плавления. Моделирование частичного плавления природных бонинтовых образцов, показывает, что lo-MgO эклогиты вполне могли образоваться по реститу, оставшемуся после плавления метаморфизованных бонинитов (степень плавления 35-65%). Моделирование с использованием экспериментальных данных для различных PT-условий показывает, что плавление водосодержащих «бонинитов» (10-15 мас.% H₂O), вероятнее всего, происходило при T=1100-1200°C и P=30-40 кбар.

hi-MgO эклогиты. Принципиально иные минералогические и геохимические характеристики имеют hi-MgO эклогиты. Среди всех рассмотренных гипотез образования hi-MgO эклогитов согласно полученным минералогическим и геохимическим данным наиболее вероятной представляется полная перекристаллизация корового протолита или мантийных эклогитов других типов в присутствии мантийного флюида/расплава. Первичные петро- и геохимические особенности hi-MgO эклогитов утрачены вследствие последнего мантийного события и не позволяют однозначно сделать вывод об их протолите.

Структурно-текстурные признаки, наблюдаемые в образцах hi-MgO эклогитов, свидетельствуют о прошедшей перекристаллизации и принципиально отличаются от наблюдаемых в lo-MgO и hi-Al₂O₃ эклогитах. Характер проявления измененных гранатовых фаз в lo-MgO эклогитах также говорит скорее о метасоматическом процессе. Они не имеют выдержанной протяженности по всему периметру зерен, их ширина на различных краях зерен сильно варьирует, а где-то они могут быть вовсе не проявлены. hi-MgO эклогиты и клинопироксены из них в отличие от lo-MgO и hi-Al₂O₃ эклогитов, обогащены LREE, при этом форма спектров распределения REE в омфацитах практически полностью повторяет спектр распределения REE в клинопироксене из перидотитового ксенолита. Кроме того, в клинопироксенах и гранатах из hi-MgO эклогитов повышено La/Sm отношение и содержание Ba, Sr и LREE, относительно остальных типов эклогитов и вмещающего перидотита (рис. 6). В клинопироксене наблюдается повышенное содержание Y и Zr, превышающее содержание этих элементов в других группах эклогитов. Состав протоядер, обнаруженных в наиболее крупных зернах граната одного из hi-MgO эклогитов, по главным элементам занимает промежуточное положение между составами гомогенизированных гранатов в lo-MgO и hi-MgO эклогитах. В протоядрах установлены повышенные Rb/Sr отношения (52.64 и 80.41). Они ближе всего к таковым в lo-MgO эклогитах, 14.48-51.52. В протоядрах наблюдается несколько пониженное содержание всех REE (La_n 0.04-0.06, Lu_n 7.06-7.08) по сравнению с полностью перекристаллизованным мелкозернистым гранатом (La_n 0.40, Lu_n 13.36). Содержание Cr в протоядрах (328 и 361 ppm) обычно превышает содержание Cr в гранатах из lo-MgO эклогитов (187-435 ppm), но не достигает значений наблюдаемых в гранатах матрикса hi-MgO эклогитов (429-1398 ppm). Сопоставление состава гранатов в измененных фазах из lo-MgO эклогитов и в протоядрах hi-MgO эклогитов показало, что последние стадии изменения в гранатах из lo-MgO эклогитов с самым магнезиальным гранатом наиболее близки по содержанию главных и редких элементов к протоядрам в гранатах из hi-MgO эклогитов (рис. 6). Гранат из lo-MgO эклогитов во вторичных каймах обогащается LREE и Ba примерно до концентраций этих элементов, определенных в протоядрах.

Присутствие флюида, вероятно, «ускорило» диффузные реакции между эклогитом и окружающим перидотитом в мантии, что привело к обогащению конечных hi-MgO эклогитов хромом (рис. 6).

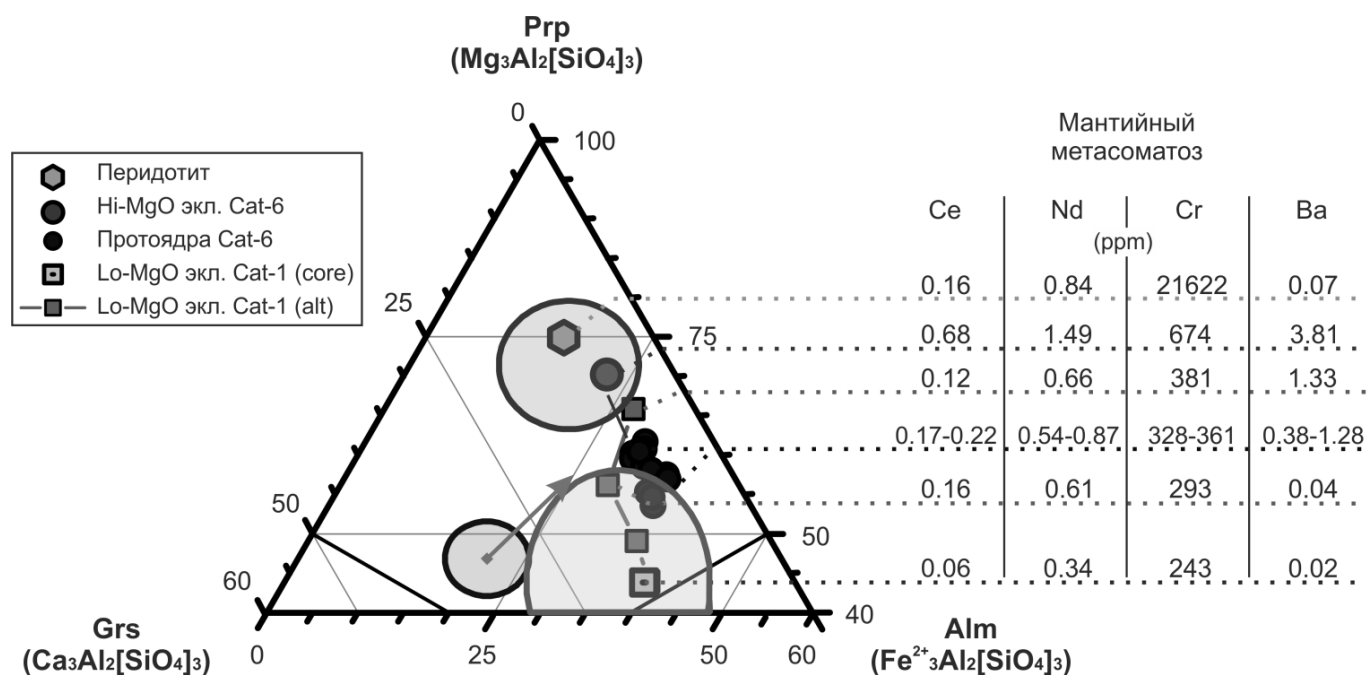


Рис. 6. Сравнение состава граната в протоядрах hi-MgO эклогитов и в измененных вторичных каймах lo-MgO эклогитов. Верхняя серая область – состав граната из hi-MgO эклогитов и перидотита; нижняя светло-серая – гранат из lo-MgO эклогитов. Стрелкой показано направление изменения состава гранатов из hi-Al₂O₃-1 эклогитов.

Беспрецедентно высокое содержание Nb₂O₅ (7-11 мас.% в матрице и до 25 мас.% в отдельных зонах) и Ta₂O₅ (до 1 мас.% в матрице и до 4 мас.% в отдельных зонах) в рутилах из hi-MgO эклогитов, до этого не обнаруженное ни в одном и из мантийных ксенолитов в других объектах по всему миру, скорее всего, является следствием значительного воздействия мантийного флюида/расплава.

Данные по содержанию Li в клинопироксенах хорошо согласуются с выдвинутыми гипотезами и дополняют их (Woodland, et al., 2002). Омфацинты из hi-Al₂O₃ и lo-MgO эклогитов попадают в высоколитиевую группу, содержание Li в них составляет 7.12-22.91 ppm. Такое высокое содержание Li свидетельствует в пользу корового источника эклогитов. Клинопироксены из hi-MgO эклогитов оказались в низколитиевой группе, содержание Li в них 1.02-2.37 ppm, что подкрепляет точку зрения об их перекристаллизации в присутствии мантийного флюида/расплава.

Моделирование частичного плавления lo-MgO эклогитов показало, что различие в содержании Li в образцах, вероятно связано со степенью частичного плавления протолита/эклогита в мантии (в зоне субдукции), при этом она, скорее всего, не превышала 65%, что хорошо согласуется с оценками, полученными ранее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплексного минералогического, петрографического и геохимического изучения верхнемантийных эклогитовых ксенолитов, в литосферной мантии кратона Кассаи выделено 3 группы эклогитов: hi-MgO, lo-MgO, hi-Al₂O₃. Эклогиты каждой из групп характеризуются своим набором признаков, что позволяет судить о вещественном и химическом составе литосферной мантии на различных глубинах. Определение PT-параметров равновесных минеральных ассоциаций позволило реконструировать разрез литосферной мантии кратона Кассаи на глубинах ~110-210 км (35-60 кбар). Верхняя часть разреза 110-135 км представлена hi-Al₂O₃-2 эклогитами, ниже в интервале глубин 130-170 км залегают lo-MgO эклогиты, наиболее глубинная часть разреза 170-210 км сложена hi-MgO и hi-Al₂O₃-1 эклогитами.

Минералогические и геохимические особенности эклогитов указывают на протекание процессов мантийного метасоматоза в литосферной мантии кратона Кассаи на всех интервалах выделенных глубин. До глубины порядка 170 км их влияние незначительно и выражается в осаждении Cu-Fe-Ni сульфидных фаз и изменении граната с повышением его магнезиальности. На глубинах более 170 км, возможно, идет перекристаллизация эклогитов/протолита с формированием самых магнезиальных эклогитов. Вероятно, при этом происходит образование или обогащение рутилов ниобием. Среднее содержание Nb₂O₅ в рутиле составляет 7-11 мас.%, на отдельных участках до 25 мас.%.

Изменение эклогитов в мантии носило полистадийный характер. Во всех образцах обнаружены зерна со структурами распада рутил+ильменит. Часть зерен имеет ильменитовые каймы с повышенным содержанием MgO (до 8 мас.%). Вокруг гомогенных центральных частей гранатов из lo-MgO и hi-Al₂O₃ эклогитов обнаружены вторичные пироповые каймы. В каймах увеличивается содержание магния к краевым частям, обычно хорошо различимы 2-3 стадии преобразования, маркирующие этапы метасоматической проработки. Кроме того, находки вышеописанных сульфидных фаз во всех типах эклогитов и высокониобиевого рутила в hi-MgO эклогитах говорят о влиянии разнотипных наложенных мантийных метасоматических событий.

Исследование цирконов из эклогитов подтверждает многостадийный характер процессов, действовавших на эклогиты в мантии. Оно также показало, что hi-Al₂O₃ и lo-MgO эклогиты могли сформироваться примерно 1250 млн. лет назад. За время длительного пребывания цирконов в мантии в результате наложенных процессов вокруг зональных центральных частей произошло образование более молодых кайм. Вынос эклогитов кимберлитовыми расплавами около 120 млн. лет назад привел к перестройке U-Pb изотопной системы в цирконах.

В настоящей работе проведен критический анализ наиболее аргументированных гипотез эклогитообразования в литосферной мантии, выделены и подробно обсуждаются генетические критерии. На основе данного анализа предложена модель генезиса эклогитов в литосферной мантии кратона Кассаи:

1) Протолитом hi-Al₂O₃-1 эклогитов, вероятно, являлись слабо дифференцированные оливиновые габбро из нижних горизонтов океанической коры.

2) Ni-Al₂O₃-2 эклогиты образовались по породам слоя габбро океанической коры.

3) Lo-MgO эклогиты сформированы по океаническим базальтам состава бонинит – N-MORB, претерпевшим частичное плавление. Геохимическое моделирование плавления протолита lo-MgO эклогитов в зоне субдукции говорит о том, что эклогиты образовались по реститу (степень частичного плавления 35-65%).

4) Наиболее вероятно, что генезис эклогитов связан с заключительным этапом преобразования неустановленного корового протолита или перекристаллизацией мантийных эклогитов других типов. Первичные петро- и геохимические особенности hi-MgO эклогитов утрачены вследствие мантийных событий и не позволяют однозначно сделать вывод об их протолите.

В высокомагнезиальных эклогитах обнаружены рутилы с исключительно высоким содержанием Nb₂O₅ (7-11 мас.% в матрице и до 25 мас.% в отдельных зонах) и Ta₂O₅ (до 1 мас.% в матрице и до 4 мас.% в отдельных зонах). Полученные оценки значительно превышают содержание Nb₂O₅ и Ta₂O₅, установленное в рутилах из алмазоносных эклогитов и включениях в алмазах (Haggerty, 1991; Rudnick, et al, 2000; Sobolev, Yefimova, 2000; Соболев, 2011). Продолжение детальных исследований таких уникальных рутилов может способствовать выяснению причин повышенной алмазоносности трубки Катока, а высокое содержание ниобия в них, послужить поисковым критерием на алмазы кимберлитовых трубок Северо-Восточной Анголы, а возможно и других регионов.

Список работ по теме диссертации, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. Никитина Л.П., Марин Ю.Б., Скублов С.Г., **Королев Н.М.**, Салтыкова А.К., Зинченко В.Н., Шиссупа У.М. U-Pb возраст и геохимия циркона из мантийных ксенолитов кимберлитовых трубок Катока и КАТ-115 (Ангола) // ДАН. 2012. Т. 445. № 1. С. 80-85.

2. **Королев Н.М.**, Никитина Л.П., Зинченко В.Н., Жоао Франсишку. Эклогитовые ксенолиты из алмазоносных кимберлитовых трубок Катока и КАТ-115 (Кратон Кассаи, Западная Африка). Минералогия, условия образования // Региональная геология и металлогения. 2013. № 55. С. 41-54.

3. Никитина Л.П., **Королев Н.М.**, Скублов С.Г., Зинченко В.Н., Жоао Франсишку. Геохимия и возраст эклогитовых ксенолитов из алмазоносных кимберлитовых трубок Катока и КАТ-115 (кратон Кассаи, Западная Африка) // Региональная геология и металлогения. 2013. № 56. С. 94-105.

4. **Королев Н.М.**, Марин Ю.Б., Никитина Л.П., Зинченко В.Н., Шиссупа У.М. Высокониебийный рутил из верхнемантийных эклогитовых ксенолитов алмазоносной кимберлитовой трубки Катока, Ангола // ДАН. 2014. Т. 454. № 2. С. 207-210.

5. Nikitina L.P., **Korolev N.M.**, Zinchenko V.N., Joao Tunga Felix. Eclogites from the upper mantle beneath the Kasai Craton (Western Africa): Petrography, whole-rock geochemistry and U-Pb zircon age // Precambrian Research. 2014. V. 249. P. 13-32.

Список основных работ по теме диссертации в других научных изданиях

1. **Королев Н.М.** Верхнемантийные эклогитовые ксенолиты алмазоносной кимберлитовой трубки Катока (Ангола) // Геология и геоэкология: исследования молодых. Материалы XXII конференции молодых учёных, посвящённой памяти члена-корреспондента профессора К.О. Кратца. 8-10 ноября 2011 г. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2011. С. 74-76.

2. Никитина Л.П., **Королев Н.М.**, Зинченко В.Н., Шафрановский Г.И. Мантийные ксенолиты из Алмазоносных кимберлитов Анголы: состав, условия кристаллизации// Модели образования алмаза и его коренных источников. Перспективы алмазоносности Украинского щита и сопредельных территорий. Тезисы докладов международной научной конференции. 11-13 сентября 2012 г. – Киев, Украина. С. 132-134.

3. **Королев Н.М.** Преобразование составов породообразующих и акцессорных минералов эклогитовых ксенолитов кимберлитовой трубки Катока, как отражение сложных верхнемантийных процессов // Тринадцатая международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о земле». Материалы конференции. 1-4 октября 2012 г.– Москва, Борок. С. 132-135.

4. Zinchenko V.N., Nikitina L.P., Francisco J., Chissupa H. M., **Korolev N.M.** e Skublov, S.G. Datação por U-Pb e geoquímica dos zircões dos kimberlitos e xenólitos da chaminé de Catoca (Nordeste de Angola) // XI Congresso de geoquímica dos países de língua portuguesa. Livro de resumos. As novas tendências da geoquímica aplicadas ao desenvolvimento sustentável da indústria. 19 -25 de novembro de 2012 – Luanda. P. 20-21.

5. Никитина Л.П., **Королев Н.М.** Фракционирование Nb, Ta, Zr, и Hf в континентальной литосферной мантии (данные мантийных ксенолитов) // Четырнадцатая международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о земле». Материалы конференции. 7-10 октября 2013 г.– Москва, Борок. С. 202 – 205.

6. **Королев Н.М.** Рутил как индикатор термобарического состояния мантии: данные эклогитовых ксенолитов алмазоносной кимберлитовой трубки Катока, Ангола // Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии. Материалы XXV молодежной научной конференции, посвященной 100-летию К.О. Кратца. г. Санкт-Петербург. 13-15 октября 2014 г. – СПб., С. 108-112.

7. **Королев Н.М.** Петрогенезис мантийных эклогитовых ксенолитов из кимберлитовой трубки Катока (Ангола): геохимия, минералогия, термобарометрия // Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского, 16–20 февраля 2015 г., Санкт-Петербург, ФГУП «ВСЕГЕИ». – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2015. С. 186-189.