

На правах рукописи

Калашникова

КАЛАШНИКОВА Татьяна Владимировна

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЕТРОГЕНЕЗИС
МАНТИЙНЫХ КСЕНОЛИТОВ
ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ ОБНАЖЕННАЯ
(ЯКУТСКАЯ КИМБЕРЛИТОВАЯ ПРОВИНЦИЯ)**

**СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 25.00.09 – ГЕОХИМИЯ,
ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

**АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ НАУК**

ИРКУТСК - 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

Костровицкий Сергей Иванович - доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии основного и ультраосновного магматизма ИГХ СО РАН.

Официальные оппоненты:

Киселев Александр Ильич - доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии и магматизма древних платформ Института Земной коры СО РАН (г. Иркутск).

Специус Здислав Витольдович - доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией минералогии и петрографии алмазных месторождений Комплексного отдела минералогических исследований, Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие (НИГП ЦНИГРИ) АК АЛРОСА (ПАО) (г. Мирный).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской Академии наук (г. Новосибирск).

Защита состоится « 20 » декабря 2017 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д003.059.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.

Факс: (3952) 42-70-50.

E-mail: korol@igc.irk.ru

Сайт: <http://www.igc.irk.ru>

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте (<http://www.igc.irk.ru>) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « » _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



Г.П. Королева

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Формирование литосферной мантии древних кратонов и ее дальнейшая эволюция под влиянием метасоматических процессов давно привлекает исследователей как одна из фундаментальных проблем, связанная с изучением развития Земли. Прямым источником информации о составе литосферной мантии являются ксенолиты мантийных пород, выносимые на поверхность породами глубинного происхождения, в частности, кимберлитами. Изучением состава мантийных ксенолитов занимались многочисленные исследователи, начиная с 1960-х гг. [Соболев, 1974; Доусон, 1983, Похиленко, 1999; Griffin, 2002; Aulbach, 2012 и другие]. Согласно доминирующей гипотезе, при высокой степени плавления первоначальной примитивной мантии образовывались коматиитовые и базальтовые расплавы, а также комплементарные к ним деплетированные гарцбургитовые реститы [Griffin et al., 1999; Simon, 2007; Walter, 1999]. В дальнейшем происходило изменение состава минералов реститов под воздействием флюидов или расплавов силикатного [Griffin and O'Reilly, 2007; Kelemen et al., 1998; Agashev et al., 2013], или карбонатитового состава [Griffin and O'Reilly, 2007; Zedgenizov et al., 2007; Agashev et al., 2013]. Считается, что под воздействием расплавов происходит процесс магматического замещения, приводящий к рефертилизации [Griffin et al., 1999; Burgess, Harte, 2004; Agashev et al.; 2013; Doucet et al., 2013; Doucet, 2015; Howarth et al., 2014 и другие].

Среди мантийных ксенолитов из трубки Обнаженная распространены Sp, Sp-Grt, Grt перидотиты, Grt, Sp-Grt пироксениты, эклогиты, также присутствуют флогопит-ильменитовые и флогопит-амфиболовые породы, в которых проявился модалный метасоматоз. Ранее ксенолиты из трубки Обнаженная изучались рядом авторов [Уханов и др., 1988; Соловьева, и др., 1994; Taylor et al., 2003; Тейлор, Специус и др., 2005; Howarth et al., 2014; Pernet-Fisher et al., 2015; Ionov et al., 2015 и другие]. Однако ряд вопросов о генезисе мантийных пород остается дискуссионным. Флогопит-содержащие ксенолиты до настоящего времени оставались относительно слабо изученными как по вещественному составу, так и по времени их проявления [Харькив и др., 1979; Гаранин и др., 1985; Лапин и др., 1980]. Детальные петрографические, минералогические и геохимические исследования ксенолитов из кимберлитовых трубок позволяют дополнить информацию о составе и строении литосферной мантии под северной частью Сибирского кратона и сделать ряд выводов о ее происхождении.

Объекты исследования.

Объектом исследования являются ксенолиты мантийных пород из кимберлитовой трубки Обнаженная, а также других трубок Куойкского поля (Пятница, Слюдянка), которые представлены различными петрологическими разновидностями. Коллекция ксенолитов включает породы перидотитового, вебстерит-пироксенитового и эклогитового типов парагенезисов, а также флогопит-ильменит содержащие породы.

Цели и задачи

Целью работы являлось выяснение условий происхождения различных генетических разновидностей мантийных ксенолитов из трубки Обнаженная, а также выявление особенностей состава литосферной мантии и процессов, влиявших на ее становление в районе Куойкского поля. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Детальное петрографическое изучение образцов мантийных ксенолитов;
2. Исследование геохимических особенностей пород и распределения главных и редких элементов в минералах;
3. Определение P-T условий формирования ксенолитов;
4. Изучение природы метасоматических изменений в минералах;
5. Датирование геологических процессов в литосферной мантии под северо-восточной частью Сибирского кратона ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ метод; Re-Os изотопный метод).

Фактический материал и методы исследования

В работе была использована коллекция ксенолитов мантийного происхождения из кимберлитовой трубки Обнаженная, а также трубок Слюдянка и Пятница (Куойкское поле), собранная С.И. Костровицким в ходе полевых работ 1974, 2006, 2007, 2012 гг. Также автором лично проводился отбор мантийных ксенолитов во время полевых сезонов 2014-2015 гг. Кроме того, в коллекцию были включены 20 образцов, предоставленные Л.В. Соловьевой, 10 образцов флогопит-содержащих ксенолитов, предоставленных С.С. Мацюком и 11 образцов эклогитов, предоставленных А.В. Ухановым. Изученная коллекция включает более 100 образцов мантийных ксенолитов, охватывая различные петрогенетические разновидности.

На основе отобранного материала автором было изучено и систематизировано более 100 шлифов. Петрографические исследования прозрачно-полированных шлифов проводились в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН с помощью поляризационного микроскопа Olympus BX51 (Япония).

Определения валового состава пород (70 определений) были проведены в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН. Содержания петрогенных компонентов определены методом рентгенофлуоресцентного силикатного анализа на многоканальном X-Ray спектрометре СРМ-25 (ЗАО Научприбор, Орел, Россия). Для определения концентраций редких элементов применялись рентгенофлуоресцентный спектрометр VRA-30 (элементы Ni, Co, Cr, V, Zn, Cu), а также сканирующий рентгенофлуоресцентный спектрометр S4 Pioneer (Ba, Sr, Zr, Nb). Содержание Na, K, Li, Rb, Cs определялось методом пламенной фотометрии. Содержания Sc, REE, Hf, Ta, Y, Th, U в породе были получены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на масс-спектрометре Element-2 (30 определений).

Изучение химического состава минералов проводилось на рентгеновском электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8200 в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (Иркутск). При участии автора было выполнено более 1000 микрозондовых химических анализов минералов на петрогенные оксиды. Концентрации редких элементов в минералах (130 определений) были получены методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) на микроанализаторе Cameca IMS 4f Ion probe в Ярославском филиале Физико-технического института РАН (г. Ярославль).

Также проводились определения изотопного состава кислорода $\delta^{18}\text{O}$ отдельных минералов (оливин, гранат, клинопироксен – 40 определений). Исследования были выполнены в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) методом лазерного фторирования на масс-спектрометре Finnigan MAT 252.

Датирование флогопитов $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом (7 определений) проводилось с использованием мультиколлекторного масс-спектрометра Argus VI в Институте земной коры СО РАН.

Для 12 образцов было проведено аналитическое определение содержания элементов платиновой группы - Os, Ir, Rh, Pt, Pd) и Re в валовых пробах, а также Re-Os изотопные исследования. Анализы были проведены методом изотопного разбавления в Институте геологии и геофизики Китайской Академии наук, Пекин. Определение концентрации платиноидов (кроме Os) производилось MC-ICP-MS методом на приборе Thermal-Electron Neptune. Изотопы осмия определялись методом масс-спектрометрии отрицательных ионов (N-TIMS) на приборе GT Isoprobe-T.

Научная новизна

На основе изучения химического состава минералов впервые был детально исследован процесс метасоматических преобразований в ксенолитах из трубки Обнаженная, получены первые данные по содержанию редких элементов во флогопитах, амфиболах и ильменитах из данной трубки. Было отмечено, что во флогопит-амфиболовых парагенезисах состав граната значительно не изменяется и мало отличается от граната в образцах без метасоматических изменений. Амфибол и флогопит развиваются преимущественно по пироксену, являясь

свидетельством модального Phl-Amph метасоматоза. Метасоматизирующие агенты были обогащены элементами группы HFSE, REE, а также кальцием и щелочами.

В работе приводятся новые данные по содержанию элементов платиновой группы и Re-Os изотопные характеристики ксенолитов. Особенности фракционирования PGE (Os, Ir, Rh, Pt, Pd) и Re в валовых пробах ксенолитов из трубки Обнаженная указывают на наличие не менее двух этапов в процессе формирования литосферной мантии.

Впервые были детально проанализированы флогопит-ильменит содержащие ксенолиты из данной трубки, получены их геохимические характеристики и возрастные датировки, что позволило предположить их генезис. Для флогопитов из безгранатовых Phl-Ptm гипербазитов был получен возраст ~850-870 млн. лет. Датировки флогопита ~600-460 млн. лет соответствуют гранат-содержащим Phl-Ptm гипербазитам и, возможно, отвечают этапу воздействия расплавов с высоким содержанием калия, титана и щелочей. Также часть образцов обладают признаками деформации (деформированные пластинки флогопита, розетковидный амфибол – рихтерит) и сходством по распределению редких элементов с кимберлитовыми породами. Датировка флогопита одного из таких образцов (167 млн. лет) соответствует возрасту прорыва кимберлитового тела.

Практическая значимость

В результате проведенных исследований были получены данные по составу, строению и термальному режиму литосферной мантии под северо-восточной частью Сибирского кратона. Сделанные выводы внесут определенный вклад в изучение состава литосферной мантии под Сибирским кратоном и будут востребованы исследователями, специализирующимися на проблемах мантийной петрологии, а также геологическими организациями, занимающимися поисками алмазов.

Защищаемые положения:

1. В строении литосферной мантии на северо-востоке Сибирского кратона в районе кимберлитовой трубки Обнаженная преобладают Sp, Sp-Grt, Grt гарцбургиты, лерцолиты, оливиновые вебстериты и Sp-Grt, Grt вебстериты (т.н. магнезиальная группа). Породы представляют собой реститы от частичного плавления примитивной мантии, в дальнейшем преобразованные метасоматизирующими расплавами. На основании Re-Os изотопных датировок предполагается время формирования протолита Mg-группы 2.2 – 2.4 млрд. лет назад.

2. В породах магнезиальной группы наблюдаются метасоматические преобразования (1.7-1.8 млрд. лет), которые выразились в интенсивном развитии флогопита и амфибола по пироксену, привносе Nb, Ta, REE. На основании распределения PGE и Re-Os изотопных отношений, а также распределения редких элементов в минералах предполагается воздействие астеносферных расплавов и привнос Pt, Pd и Re.

3. В строении литосферной мантии в районе трубки Обнаженная выделяется группа Phl-Ptm гипербазитов и порфиroidных слюдитов, обогащенных K, Fe, Ti. Возраст формирования Phl-Ptm гипербазитов, оцененный $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом по флогопитам, составляет 850-500 млн. лет, а деформированных слюдитов – 167 млн. лет, что соответствует возрасту трубки.

Апробация работы и публикации

По теме диссертации опубликовано 25 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК, две – в журналах Web of Science.

Результаты работы также представлены и опубликованы в материалах различных всероссийских и международных конференций: Всероссийской конференции молодых учёных «Современные проблемы геохимии - 2015» (ИГХ СО РАН), 10 Международной кимберлитовой конференции (10th International Kimberlite Conference) (Индия, г. Бангалор), Всероссийской конференции молодых учёных «Геология Забайкалья» (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ), III Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург), III Международной конференции «Кристаллогенезис и минералогия» (ИГМ СО РАН, г.

Новосибирск), Международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (ТПУ, г. Томск), совещания «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)» (ИЗК СО РАН, г. Иркутск), VII и VIII Сибирской научно-практической конференции молодых ученых по наукам о Земле (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

Структура и объём работы

Работа состоит из введения, семи глав и заключения. Объём работы – 258 страниц, включающих 94 рисунка и 26 таблиц (16 таблиц в приложениях). Список литературы состоит из 185 наименований.

Во введении приведены цели и задачи работы, объекты и методы исследования, сформулированы защищаемые положения. В первой главе приведен обзор гипотез по происхождению литосферной мантии на Земле и приведен краткий обзор публикаций, посвященных изучению мантийных ксенолитов из кимберлитов как фрагментов вещества верхней мантии. Особое внимание уделено трубке Обнаженная (Куойкское поле Якутской кимберлитовой провинции). Во второй главе рассматриваются геолого-тектоническое строение Сибирского кратона, литосферной мантии под ним на основе геофизических построений, а также геологическое строение Куойкского поля и возраст прорыва трубок. В третьей главе приведено петрографическое описание пород по генетическим разновидностям, в четвертой главе охарактеризован их химический состав по петрогенным оксидам и редким элементам. В пятой главе рассматриваются геохимические особенности составов отдельных минералов. В шестой главе приведены результаты изотопных исследований данных ксенолитов. В седьмой главе обсуждаются особенности генезиса различных разновидностей ксенолитов и эволюции литосферной мантии под кимберлитовой трубкой Обнаженная.

Благодарности

Работа была выполнена в лаборатории Геохимии основного и ультраосновного магматизма №18.1 Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН и поддержана грантом РФФИ № 16-35-00496 мол а. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю д.г.-м.н. С.И. Костровицкому за всестороннюю поддержку и помощь в проведении исследований.

Искреннюю благодарность автор выражает д.г.-м.н. Л.В. Соловьёвой за постоянные обсуждения, помощь и замечания по существу работы, которые определили научное направление данных исследований. Автор признательна коллегам ИГХ СО РАН д.г.-м.н. А.Я. Медведеву, д.г.-м.н. М.А. Горновой, к.г.-м.н. А.С. Мехоношину, к.г.-м.н. Д.А. Яковлеву, а также д.г.-м.н. А.Б. Перепелову и д.г.-м.н. В.А. Макрыгиной за оказание всесторонней поддержки и ценные консультации в период выполнения работы.

Автор также выражает благодарность коллективу аналитиков ИГХ СО РАН и других организаций, упомянутых выше. Особая благодарность к.х.н. Л.Ф. Суворовой, д.г.-м.н. А.В. Иванову за качественные анализы и постоянное сотрудничество на различных этапах работы, научному сотруднику Института минералогии им. М. Семенову (Киев) д.г.-м.н. С.С. Мацюку за предоставленную уникальную коллекцию слюдист-содержащих ксенолитов, д.г.-м.н. А.В. Уханову за уникальную коллекцию эцлогитов. Автор также признательна Г.В. Орловой за консультации при выполнении петрографических описаний и М.Н. Масловской за помощь при обработке Re-Os изотопных данных.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ КСЕНОЛИТОВ ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ ОБНАЖЕННАЯ

Куойкское кимберлитовое поле, из трубок которого был взят материал для исследований, относится к Якутской кимберлитовой провинции и расположено на северо-востоке Сибирского кратона. Схема расположения трубок приводится на Рис. 1.

Возраст трубок данного поля определялся различными методами: изотопными [Мальков, 1979; Пирсон и др., 1997; Кинни и др., 1997], палеомагнитными [Blanco et al., 2013], палеонтологическими [Милашев, 1959; Мальков, 1976, 1979; Костровицкий, Адмакин, 1991]. $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ методом по цирконам [Дэвис и др., 1980] были получены датировки 150.9-145.6 млн. лет. Этот же метод по перовскитам [Sun et al., 2014] для 14 кимберлитовых тел дал результаты 156-170 млн. лет. Таким образом, трубки Куойкского поля относятся к верхнеюрскому - нижнемеловому кимберлитовому циклу - одному из самых поздних на Сибирской платформе.

Трубка Обнаженная представляет собой открытый выход кимберлитовых пород высотой около 30 м на берегу реки Куойка, левом притоке реки Оленек. Она сложена в основном кимберлитовой брекчией, содержащей включения кимберлитов массивной текстуры предыдущих фаз внедрения, а также обломочный материал вмещающих осадочных пород.

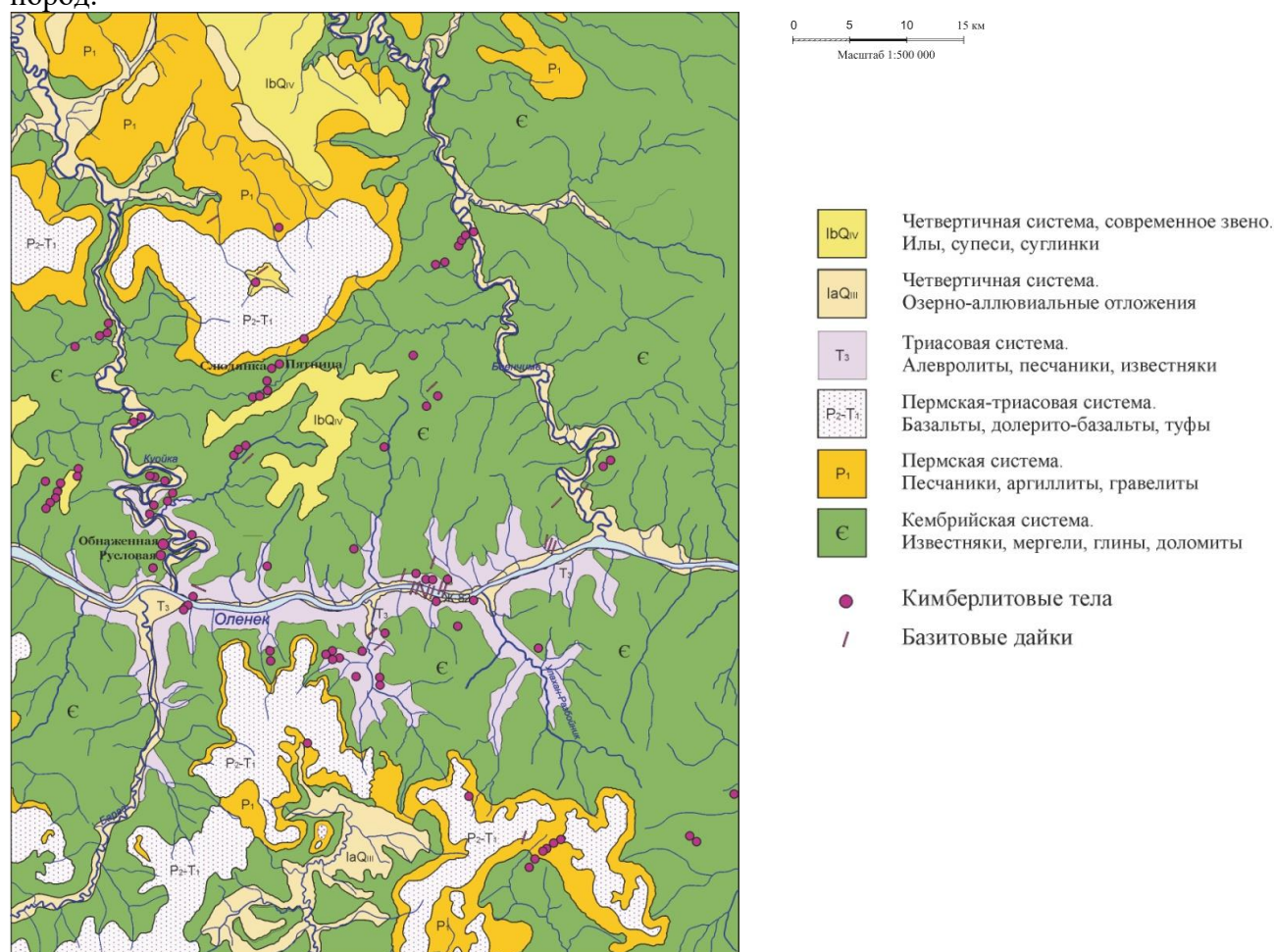


Рис. 1. Геологическая схема Куойкского поля (данные геологов Амакинской экспедиции - геологическая карта масштаба 1:500 000, лист R-51-A с упрощениями). На карте отмечены названия кимберлитовых трубок, из которых отбирался ксенолитный материал.

Мантийные ксенолиты из трубки Обнаженная представлены несколькими основными петрографическими разновидностями.

А - Шпинелевые (Sp), шпинель-гранатовые (Sp-Grt), гранатовые (Grt) гарцбургиты, лерцолиты, Sp, Sp-Grt, Grt оливиновые вебстериты и Sp, Sp-Grt, Grt вебстериты (т.н. магнезиальная группа, составляющая около ~ 75-80 % общего количества ксенолитов);

Б - Эклогиты и гранатовые клинопироксениты (~ 10-15% ксенолитов);

В - Группа флогопит-ильменитовых (Phl-Ilm) пород с железистым составом минералов (~ 10 % ксенолитов).

А – группа: Sp, Sp-Grt, Grt гарцбургиты, лерцолиты, Sp, Sp-Grt, Grt оливиновые вебстериты и Sp, Sp-Grt, Grt вебстеритов (магнезиальная группа).

В данной группе пород содержится от 40 до 70% оливина и 20-30% ортопироксена. Содержание оливина, ортопироксена и клинопироксена в образцах магнезиальной группы приведено на Рис. 2. Большая часть пород относится к лерцолитам и оливиновым вебстеритам, при этом наблюдается ряд пород с постепенным увеличением модального содержания клинопироксена. Оливин образует крупные зерна (до 2-5 мм), разбитые трещинами на блоки, иногда измененные серпентином, а также небольшие округлые идиоморфные выделения (до 0.7 мм) в ортопироксене, как правило, окруженные кальцитовой оторочкой и серпентином. Ортопироксен образует зерна различного размера – от ксеноморфных округлых и вытянутых выделений до крупных зерен 2-3 мм. В нем часто наблюдаются ламелли структур распада клинопироксена шириной 0.05-0.1 мм. В лерцолитах и оливиновых вебстеритах наблюдаются зерна клинопироксена (от 5 до 20%), который образует выделения размером 0.5-1 мм. Кроме того, в вебстеритах пироксены образуют мегакристаллы (2 – 8 см) со структурами распада, окруженные перекристаллизованной мелко-среднезернистой матрицей из тех же минералов.

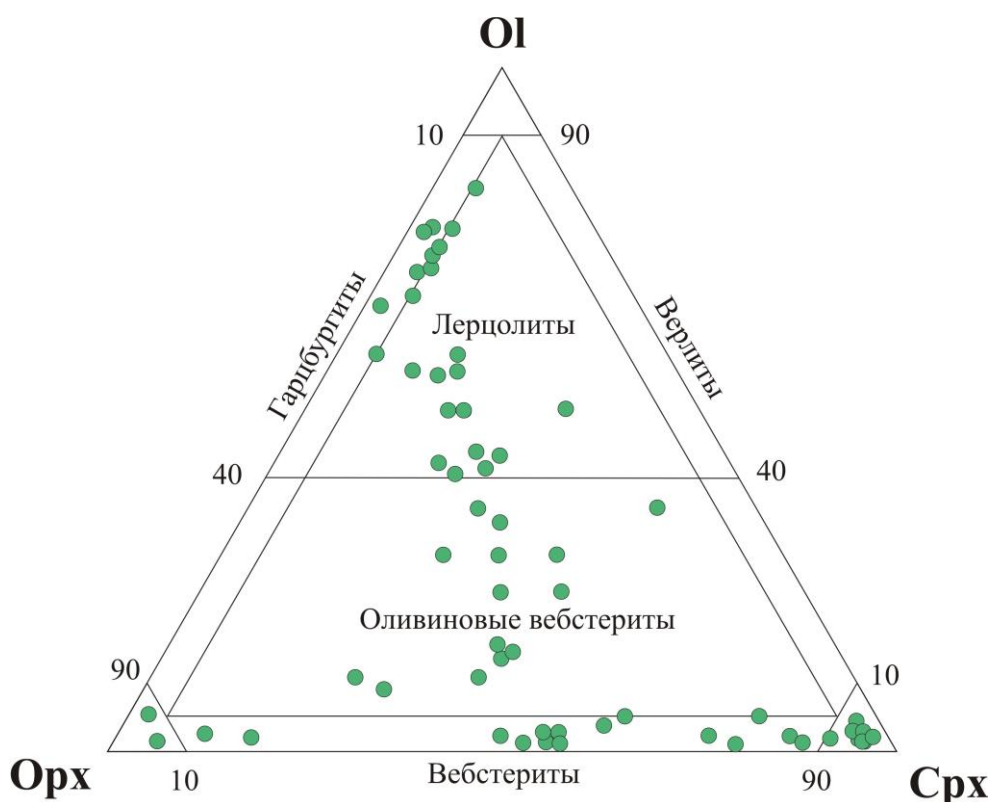


Рис.2. Модальный минеральный состав мантийных ксенолитов из трубки Обнаженная.

Шпинель чаще отмечается в перидотитах и присутствует в виде различных генераций: крупных графических сростаний с пироксеном (Рис. 3.А), включений в гранате (Рис. 3.Б), в виде мелких симплектитовых сростков и мелкозернистых червеобразных выделений в межзерновом пространстве и в структурах распада пироксенов. Однако включений шпинели в оливине не наблюдалось. Гранат отмечается в виде крупных выделений, иногда в виде структур распада в мегакристаллах пироксена (Рис. 3.В), в сростании с сульфидами (Рис. 3.Г), его количество возрастает с увеличением модального содержания клинопироксена. Формирование структур распада указывает на охлаждение первоначальных мегакристаллов пироксена, а мелкозернистая матрица – на последующую метаморфическую перекристаллизацию. В некоторых породах данной серии отмечаются флогопит и амфибол, развивающиеся по пироксену, что свидетельствует о проявлении мантийного метасоматоза (Рис.14-15).

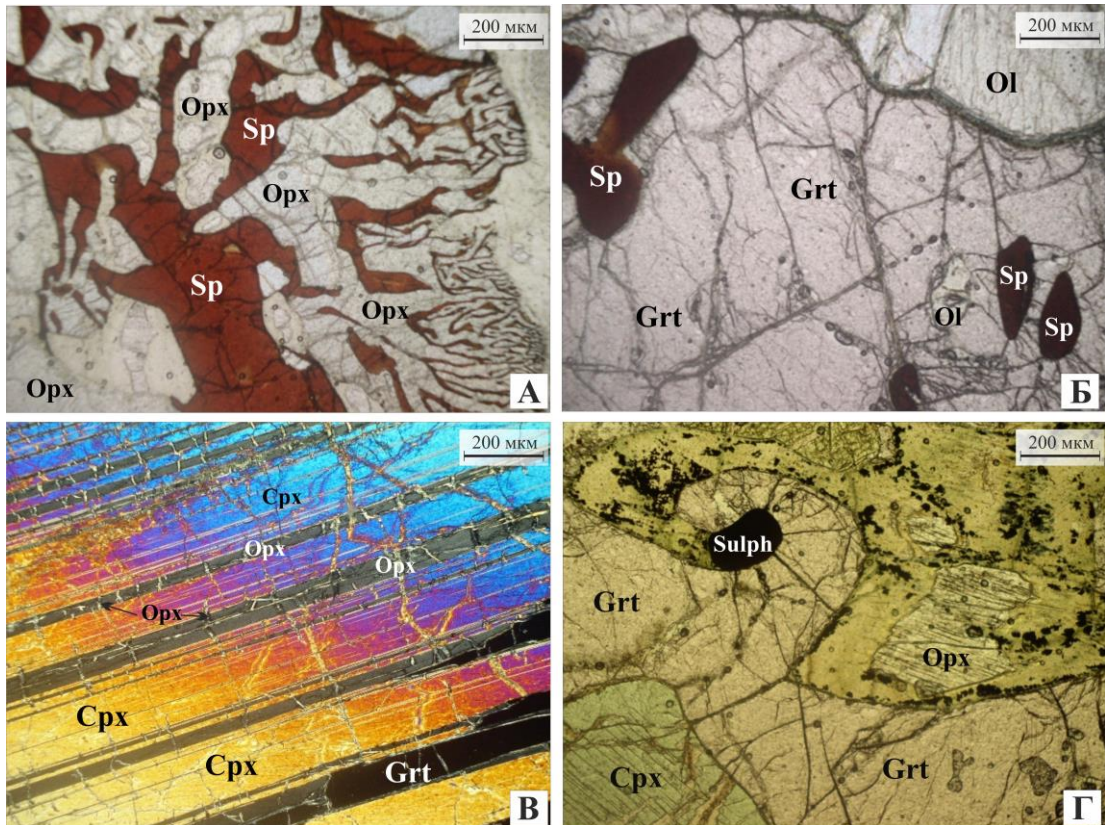


Рис. 3. Взаимоотношения шпинели, граната и других породообразующих минералов в магнезиальной группе пород ксенолитов.

А – Симплектитовые срастания шпинели и ортопироксена (обр. 06-218 – Sp лерцолит);

Б – Реликты замещения шпинели в гранате (обр. 7-341 - Sp-Grt лерцолит);

В – Гранат и ортопироксен в структурах распада мегакристалла клинопироксена (обр. 74-159 - Sp-Grt вебстерит);

Г – Гранат в срастании с сульфидом (обр. 7-294 - Grt оливиновый вебстерит).

Б – группа: Эклогиты и гранатовые клинопироксениты

Породы характеризуются двуминеральным составом и средне-крупнозернистой порфиробластической структурой. Гранаты слагают округлые порфиробласты размером до 7-10 мм. Клинопироксен темно-зеленого цвета образует ксеноморфные выделения (Рис. 4 А-Б). Для данной группы пород характерно присутствие реликтовых мегакристаллов (1-6 см) клинопироксена с пластинчатыми структурами распада граната в средне-мелкозернистой матрице из граната и клинопироксена (Рис. 4 В-Г).

Гранаты из эклогитов и клинопироксенитов отличаются от гранатов из магнезиальной группы более высоким содержанием CaO и FeO ($\text{Prp}_{40-62}\text{Alm}_{30-22}\text{Grs}_{30-10}$). Клинопироксениты отличаются пониженной магнезиальностью (91-84), а также пониженным содержанием кальция (16-18 мас.%). Высокое содержание жадеитовой компоненты в клинопироксене ($\text{NaAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ - 25-32%) позволило отнести данную группу пород к эклогитам.

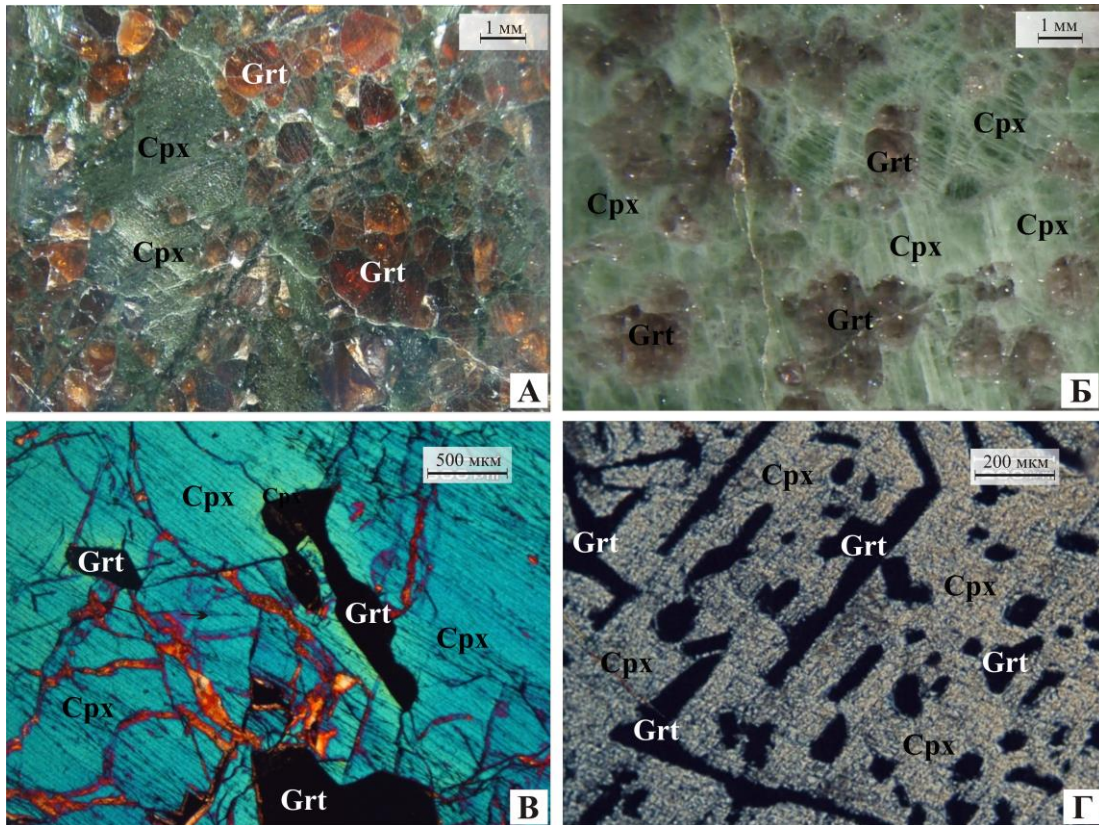


Рис. 4. Петрографические особенности эклогитов и клинопироксенов.

А – Железистый гранатовый клинопироксенит (обр. 7-354, фотография полировки);

Б – Эклогит (обр. 7-394, фотография полировки);

В - линзовидные и перекристаллизованные линзовидные формы структур распада Grt в клинопироксене вблизи мелкозернистой перекристаллизованной матрицы (обр. 74-136);

Г - Структуры распада граната в гранатовых клинопироксенитах (обр. 7-379).

В – группа: Группа флогопит-ильменитовых (Phl-Ilm) пород с железистым составом минералов.

Породы представлены в основном флогопит-ильменитовыми гипербазитами (вебстеритами, ортопироксенитами, клинопироксенитами), также в эту группу включены глиммериты (слюдиты) с высоким содержанием флогопита и деформированные Phl-Amph-Ilm породы. Гипербазиты характеризуются панидиоморфно-зернистыми и гипидиоморфнозернистыми структурами с крупными пластинками флогопита (в виде порфириковых выделений) (Рис. 5Б), которые иногда зональны (Рис. 5А). Ильменит развит в виде мелких выделений (Рис. 5В), а также структур распада во флогопите (Рис. 5Г). Кроме пластинок, флогопит присутствует в виде неправильных ксеноморфных зерен с четкими краями между другими минералами; возможно, такие выделения кристаллизовались из расплава (Рис. 6). Также флогопит в некоторых образцах замещает пироксены и другие минералы, вероятно, под влиянием обогащенных калием и летучими остаточных флюидов (Рис. 7). Отдельная группа пород представлена амфибол-флогопитовыми парагенезисами с высоким содержанием флогопита. Флогопит образует крупные (до 2 мм) изогнутые пластинки с признаками интенсивной деформации, амфибол представлен веерообразными выделениями (Рис. 8) и является по составу К-рихтеритом.

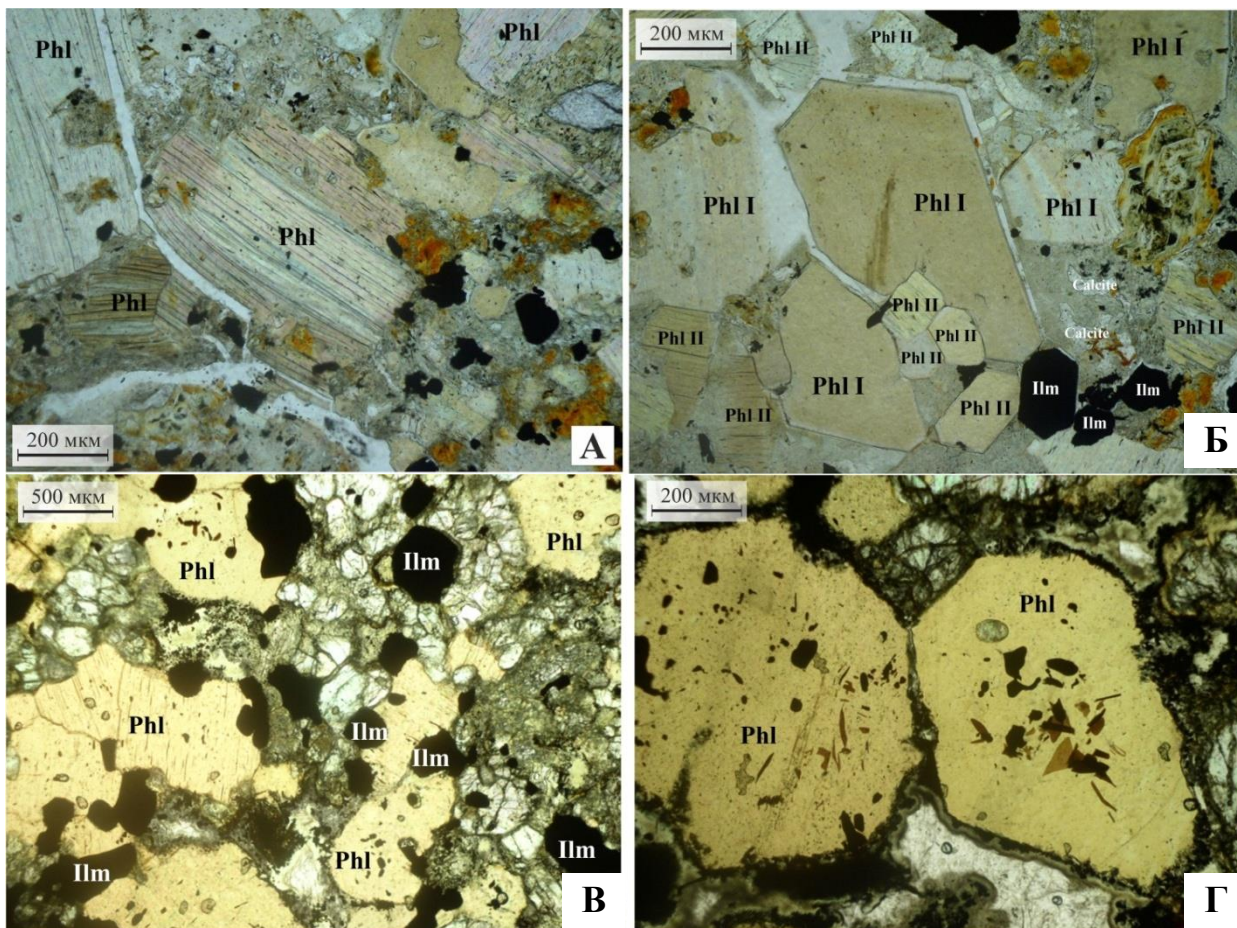


Рис. 5. Порфировые выделения флогопита и ильменита в группе флогопит-ильменит-содержащих пород.

А - Зональные порфиroidные пластинки флогопита (Phl I) - видна более интенсивно рыжая окраска внешних зон (обр. 7-388 - Phl-Ilm Grt верлит);

Б – Пластинки Phl I, пластинки флогопита II (Phl II) и идеально оgranенный кристалл ильменита (обр. 7-388);

В – Порфиroidные выделения флогопита (обр. O-22-87 - Phl – Ilm вебстерит);

Г – Пластинки флогопита (обр. O-22-87). По спайности в слюде располагаются тонкие просвечивающие таблички распада ильменита.

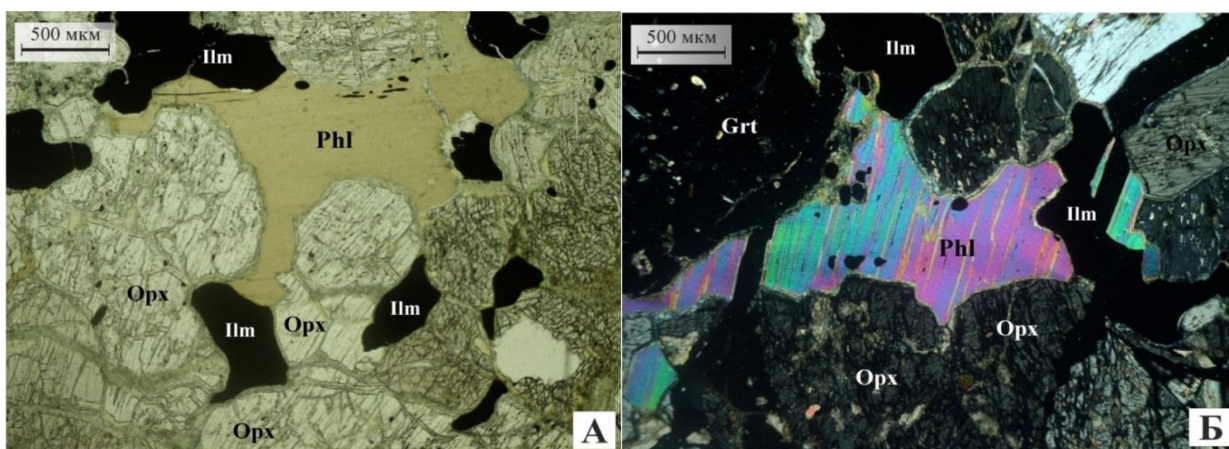


Рис.6 Ксеноморфные выделения флогопита, возможно, кристаллизовавшиеся из порций остаточного расплава (Обр. 74-823 - Phl- Ilm вебстерит).

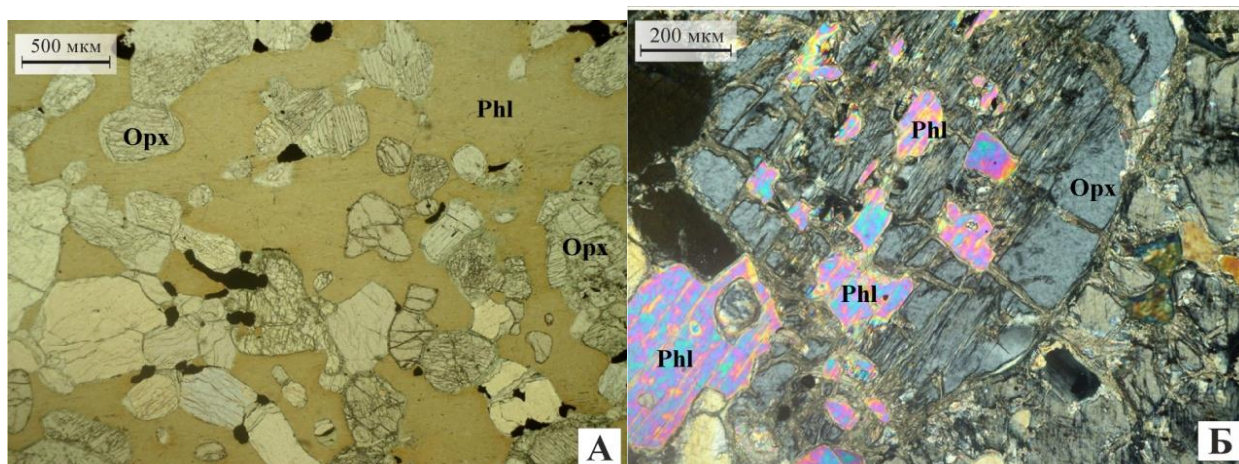


Рис. 7 Метасоматическое замещение зерен пироксена флогопитом.
(Обр. 06-263 - Phl- Ilm вебстерит)

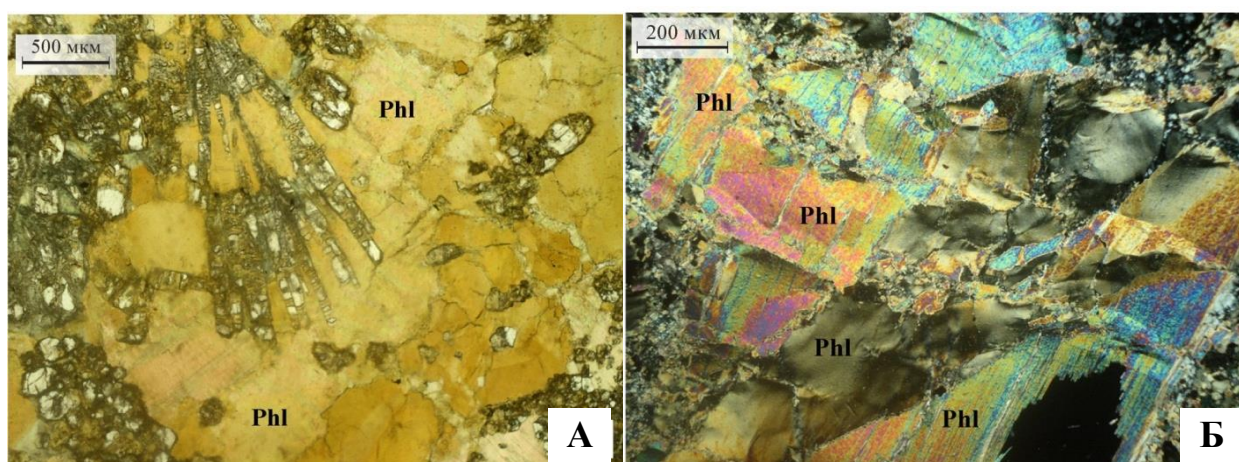


Рис. 8. Деформированная и перекристаллизованная флогопит - амфиболовая порода (обр. 74-176).

А – выделения амфибола и деформированные кристаллы флогопита;
Б – интенсивная деформация и перекристаллизация слюды.

Породы магнезиальной группы по сравнению с другими породами характеризуются наибольшими содержаниями MgO (25-40 мас.%) и SiO₂ (35-50 мас.%) и одновременно наименьшими содержаниями Al₂O₃ и CaO (1-10 мас.%). Характерно, что по индексу магнезиальности (mg #) подавляющее большинство пород магнезиальной серии показывает довольно узкий интервал ~ 88 – 92. Развитие метасоматического флогопита и амфибола в ксенолитах магнезиальной группы проявляется в привносе в породы Na, K, Ca, частично Ti и SiO₂. Эклогиты и клинопироксениты отличаются наименее магнезиальным составом (13-20 мас.%) и значительно обогащены кальцием (8-13 мас.%) и натрием (до 1.4 мас.%), а также железом (8-15 мас.%). Phl-Ilm породы, в соответствии с минеральным составом, обогащены железом (7-20 мас.%), калием (до 4.4 мас.%) и титаном (до 17 мас.%). Причем Phl-Ilm гипербазиты с гранатом содержат по сравнению с группой слюдитов (70% Phl) существенно меньше титана и калия, что полностью соответствует петрографическим наблюдениям.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение. В строении литосферной мантии на северо-востоке Сибирского кратона в районе кимберлитовой трубки Обнаженная преобладают Sp, Sp-Grt, Grt гарцбургиты, лерцолиты, оливиновые вебстериты и Sp-Grt, Grt вебстериты (т.н. магнезиальная группа). Породы представляют собой реститы

от частичного плавления примитивной мантии. На основании Re-Os изотопных датировок предполагается время формирования протолита Mg-группы 2.2 – 2.4 млрд. лет назад.

Магнезиальная группа пород, выделяемая среди мантийных ксенолитов трубки Обнаженная, характеризуется широкими вариациями химических составов. При этом на петрохимических бинарных диаграммах наблюдается непрерывный ряд переходов составов от гарцбургитов к пироксенитам и вебстеритам. Гарцбургиты отличаются максимальными содержаниями MgO (37-43 мас.%) (Рис. 9). В настоящее время наиболее распространенной является гипотеза, что шпинелевые и гранатовые зернистые перидотитовые ксенолиты являются реститами, сформировавшимися при полибарическом плавлении вещества примитивной мантии [Соловьева и др., 2007; Agashev et al; 2013 и другие]. При этом породы реститового происхождения должны отличаться деплетированным составом (обедненным несовместимыми элементами). Для близких по петрографическим характеристикам перидотитов из трубки Удачная предполагается [Doucet et al., 2012], что шпинелевые гарцбургиты с низким содержанием ортопироксена являются реститами при степени плавления 40% при полибарическом парциальном давлении 7 и 14 ГПа и 1-3 Гпа.

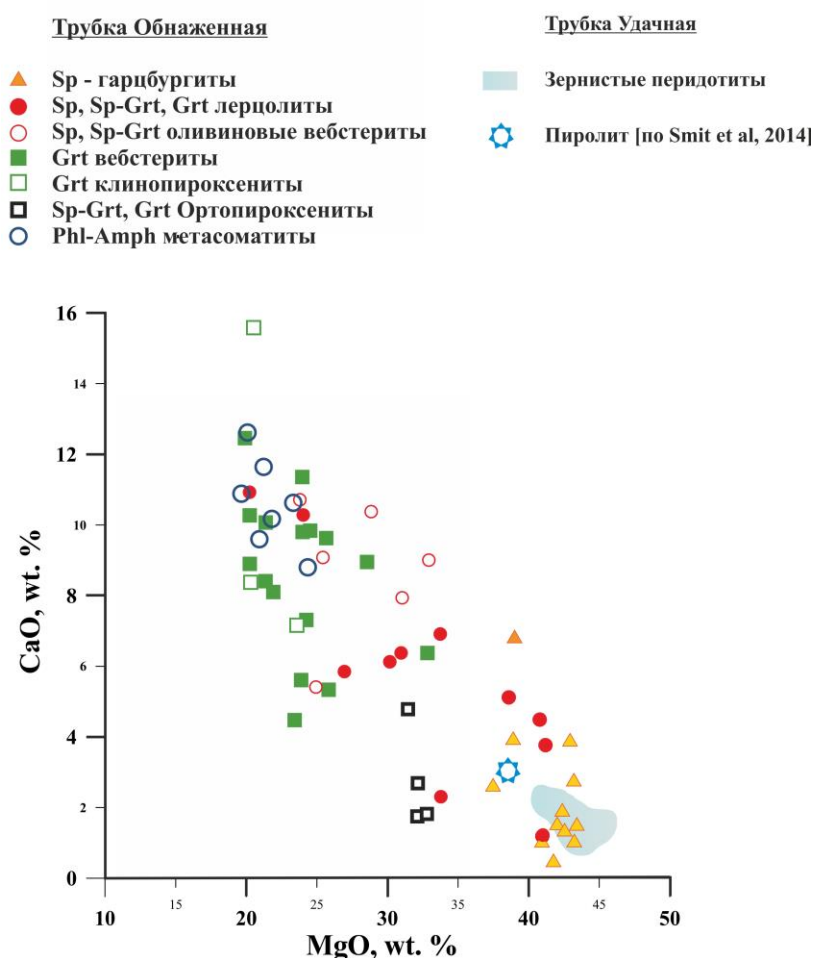


Рис. 9. Содержание MgO-CaO в породах магнезиальной группы из трубки Обнаженная и зернистых перидотитов из трубки Удачная [Ionov et al., 2010].

Протолит зернистых гранатовых перидотитов [Doucet et al., 2013] сформировался при несколько меньшей степени плавления – 30-38%. В дальнейшем данные породы испытали мантийный метасоматоз с образованием деформированных гранатовых разновидностей, причем процессы могли быть неоднократными [Соловьева и др., 2008; Agashev et al; 2013; Howarth et al., 2014; Pernet-Fisher et al., 2015, Ionov et al., 2015]. Таким образом, для объяснения формирования обогащенных разновидностей и образования клинопироксена привлекался процесс рефertilization. Наиболее деплетированные гарцбургиты, а также

часть лерцолитов магнезиальной группы из трубки Обнаженная по валовому химическому составу совпадают с реститами, полученными экспериментальным плавлением [Walter, 2003; Herzberg, 2004; Herzberg et al., 2010], что позволило предположить их реститовое происхождение.

В пользу данной гипотезы свидетельствуют и узкие вариации состава оливина ($Mg\#$ - 91-92; NiO – 0.35-0.45 мас.%) и ортопироксена ($Mg\#$ - 92-93) для перидотитов из трубки Обнаженная. По химическому составу оливины совпадают с «мантийным трендом» оливинов из литосферной мантии [Bussweiler et al., 2015]. Изотопный состав кислорода $\delta^{18}O$ оливинов из образцов магнезиальной группы соответствует интервалу мантийных значений (5.1-5.4‰).

Для образцов магнезиальной группы было определено содержание редких элементов, а также элементов платиновой группы и рения. По содержанию PGE + Re все образцы были разделены на три группы (Рис. 10). К первой группе относятся образцы со снижением нормированных концентраций элементов от Os и Ir к Pt, Pd и Re. Часть ксенолитов показывает содержания Os и Ir более высокие, чем для примитивной мантии (ПМ) (Рис. 10А). Причем к этой группе относятся наиболее деплетированные образцы с низким содержанием клинопироксена (до 10-15%), т.е. гарцбургиты и лерцолиты. Для данной группы пород предполагается первичное происхождение, так как осмий является несовместимым элементом и накапливается в реститах [Ionov et al, 2015].

Re-Os датировки валовых проб предположительно обозначают возраст протолита. Возраст T_{RD} для гарцбургитов варьирует от 1.8 до 2.09 млрд лет. Величина модельного возраста T_{MA} изменяется в пределах 2.19 - 2.43 млрд лет. Модельный возраст можно принять в качестве возраста протолита магнезиальной группы.

Второе защищаемое положение. В породах магнезиальной группы наблюдаются метасоматические преобразования (1.7-1.8 млрд. лет), которые выразились в интенсивном развитии флогопита и амфибола по пироксену, привносе Nb, Ta, REE. На основании распределения PGE и Re-Os изотопных отношений, а также распределения редких элементов в минералах предполагается воздействие астеносферных расплавов и привнос Pt, Pd и Re.

В породах магнезиальной группы наблюдаются метасоматические преобразования: «скрытые» («cryptic») - порода обогащается несовместимыми элементами без образования новых минеральных фаз) и модальные (в породах образуются новые минеральные фазы) [Dawson, 1984; Harte, 1983; O'Reily, Griffin, 2013 и другие].

Воздействие метасоматизирующих расплавов можно предположить на основании распределения редких элементов в минералах. Распределение редкоземельных элементов в гранатах из магнезиальной группы ксенолитов трубки Обнаженная характеризуется постепенным увеличением от La к Yb (Рис. 11). Данное «нормальное» распределение соответствует коэффициентам минерал - базальтовый расплав [Burgess, Harte, 2004]. При сравнении лерцолитов трубок Удачная и Обнаженная можно отметить, что распределение редких элементов в гранатах из деформированных лерцолитов трубки Удачная (серое поле) в целом подобно распределению в выделенной серии из трубки Обнаженная, за исключением максимума по Ti. В то же время минералы из обедненных перидотитов трубки Удачная, для которых принята реститовая гипотеза, характеризуются широкими вариациями спектров распределения редких элементов и в целом низкими содержаниями. Таким образом, гранаты из магнезиальной группы ксенолитов предположительно кристаллизовались из расплава, что свидетельствует в пользу гипотезы мантийного метасоматоза.

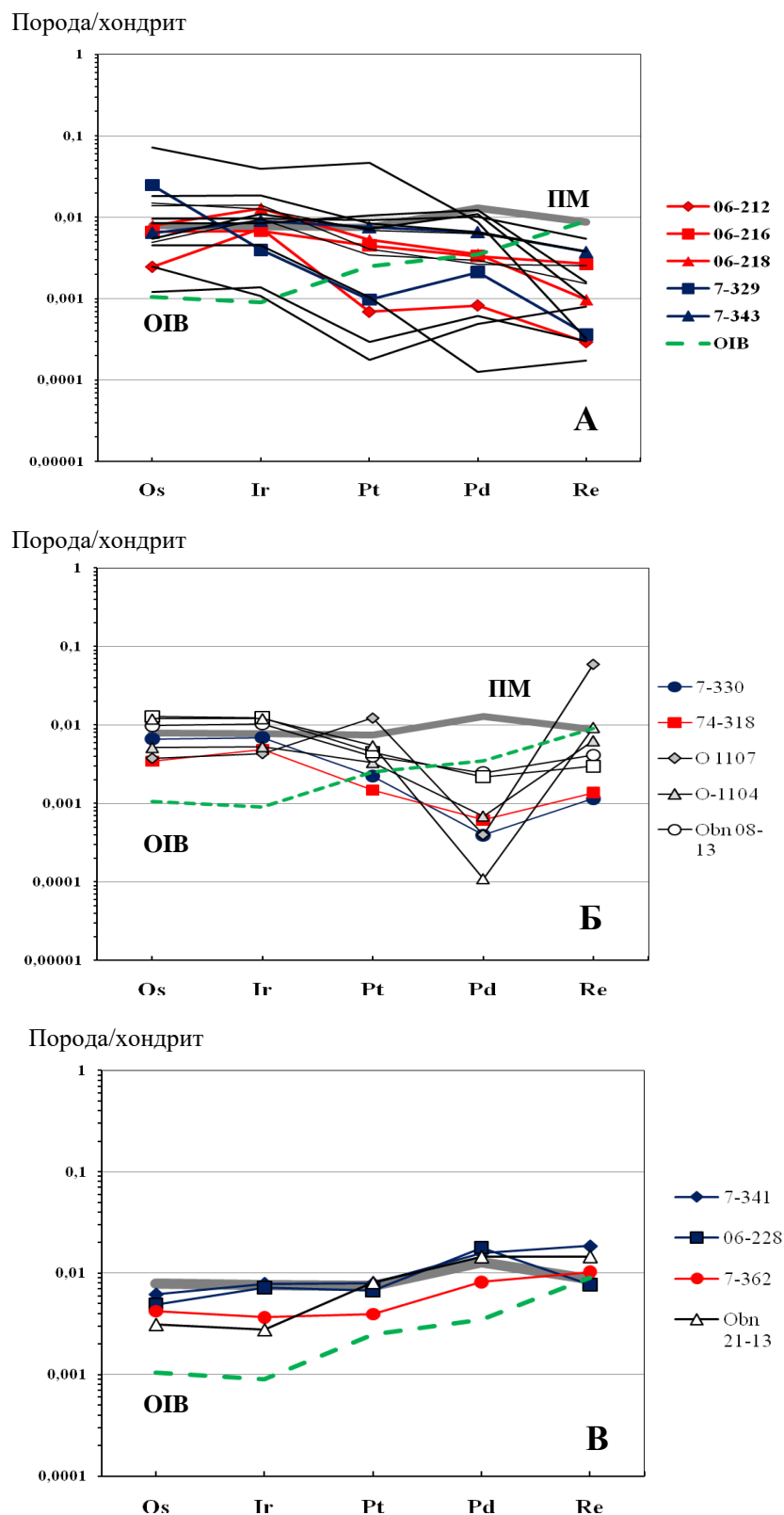


Рис. 10. Содержание элементов PGE+Re в валовых пробах пород ксенолитов из трубки **Обнаженная**. Используются литературные данные [Ionov et al, 2015; Perner-Fisher et al, 2015] – тонкие серые линии. Линия PM – примитивная мантия по Becker et al. [2006], нормированная по хондриту C1 [McDonough, Sun, 1995].

А – Образцы с Re-Os деплетированием (содержание Crx 5-15%);

Б – Образцы с Pd-минимумом (содержание Crx до 5%; наблюдаются зерна сульфидов – пентландитов)

В – Образцы с пологим спектром распределения платиноидов (содержание Crx 15-25%)

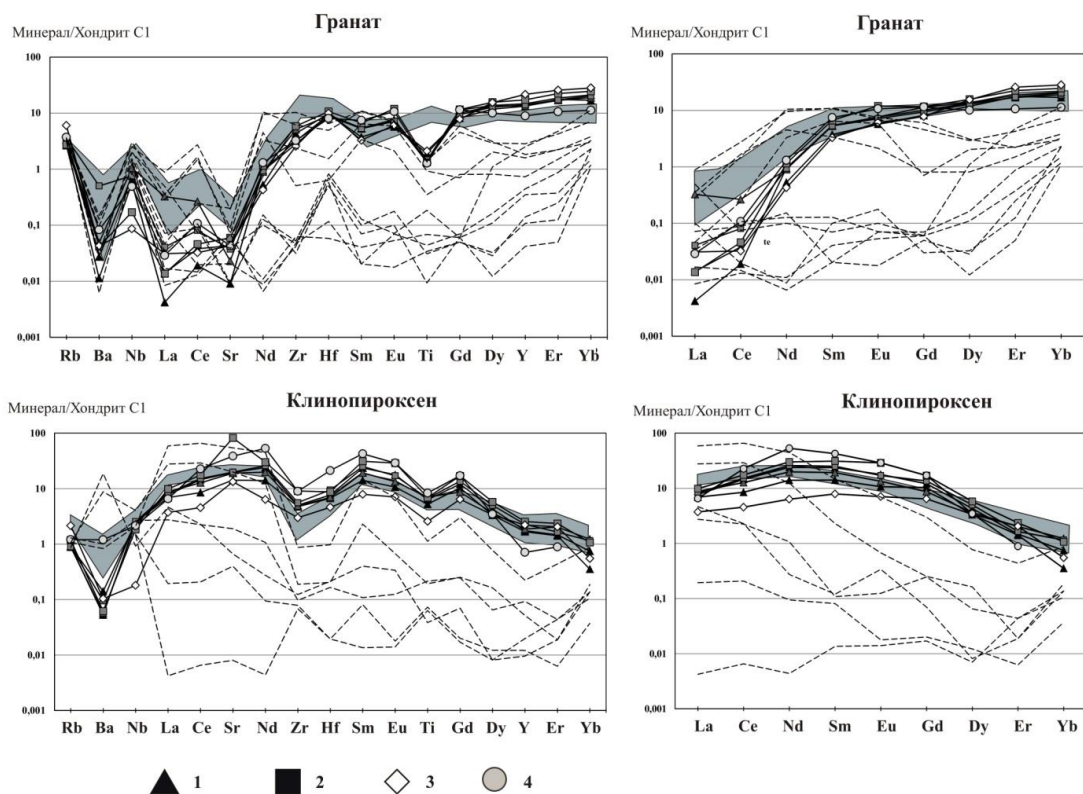


Рис. 11. Содержание редких и редкоземельных элементов в гранате и клинопироксене из ксенолитов в трубках Обнаженная и Удачная, нормированное к хондриту C1 [McDonough&Sun, 1995].

1 - Sp – Grt, Grt лерцолиты (обр. 74-891, 7-341); 2 – Sp – Grt, Grt оливиновые вебстериты (обр. 7-294, 7-259, 7-421); 3 – Grt – вебстерит (обр. 74-968); 4 – Grt ортопироксенит (обр. 06-288).

Серое поле – содержание редких элементов в гранате и клинопироксене из деформированных перидотитов трубки Удачная с нормальным распределением РЗЭ в гранате [Соловьева, 2008; Agashev et al., 2013]. Пунктирные линии – состав граната и клинопироксена из зернистых лерцолитов трубки Удачная [Соловьева, 2007].

Для гранат-содержащих образцов из трубки Обнаженная был проведен расчет P-T параметров последнего равновесия минералов, результаты которого представлены на рис. 12. Для расчетов использовались 2-Px термометр Taylor [1998] и Орх-Grt барометр Nickel, Green [1985], которые принимались для ксенолитов из трубки Обнаженная в работе [Howarth et al., 2014]. Породы магнезиальной серии из трубки Обнаженная демонстрируют относительно низкие P-T параметры: $T = 535 - 764^{\circ}\text{C}$; $P = 12.8 - 27.4$ кбар. Литературные оценки P-T параметров кристаллизации для гранатовых лерцолитов из трубки Обнаженная [Howarth et al., 2014], в целом близки к нашим данным: $T = 620-731^{\circ}\text{C}$; $P = 13.5 - 25.2$ кбар. Все образцы из трубки Обнаженная находятся в области устойчивости графита. Для сравнения приведены рассчитанные значения для лерцолитов из трубки Удачная, которые располагаются гораздо ниже на геотерме (Рис. 12). При этом геотерма для трубки Обнаженная характеризуется более высоким тепловым потоком ($43-45 \text{ МВт/м}^2$), чем геотерма для трубки Удачная, что может подтверждать гипотезу о более позднем воздействии расплавов на перидотиты трубки Обнаженная.

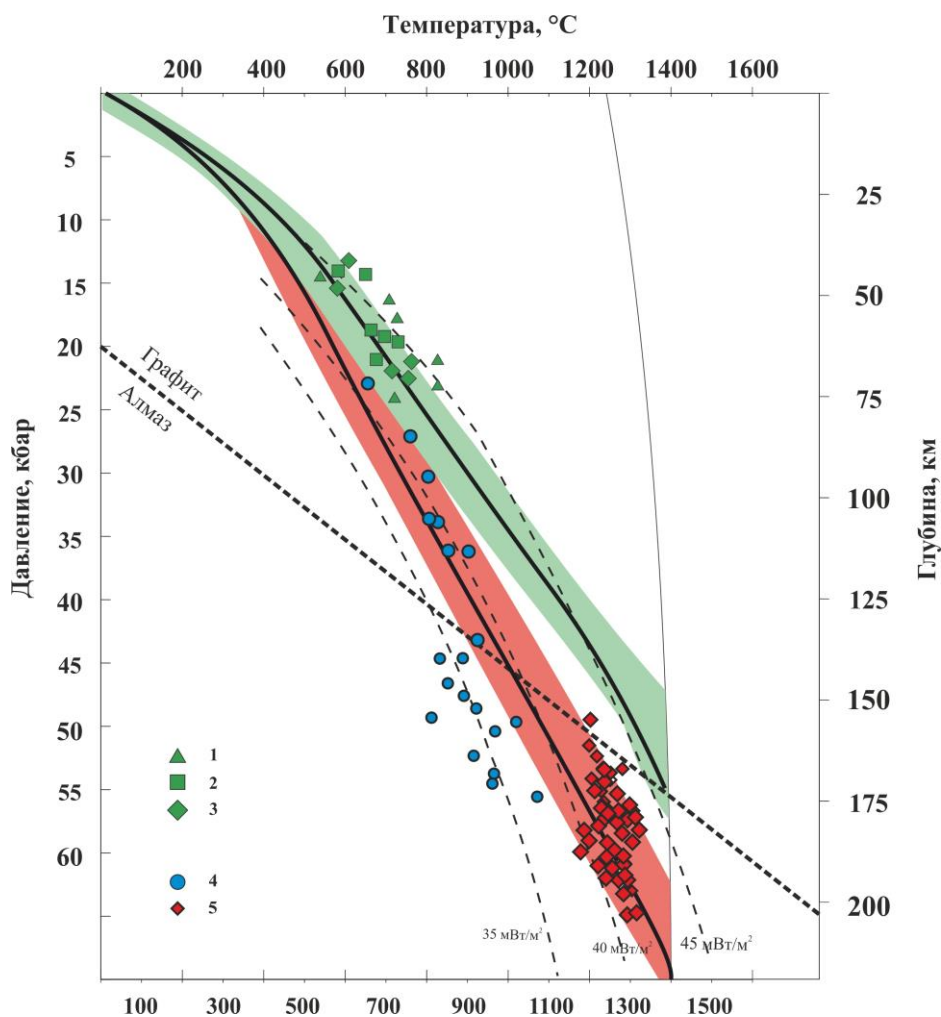


Рис. 12. Оценки P-T условий последнего равновесия минералов для ксенолитов из трубок Удачная и Обнаженная.

Трубка Обнаженная – зеленые значки: 1 – лерцолиты; 2 – оливиновые вебстериты; 3 – вебстериты. Трубка Удачная: синие значки – 4 – зернистые лерцолиты – рассчитано по данным [Соловьева, 2007; Ionov et al., 2010]; красные значки – 5 – деформированные лерцолиты – рассчитано по данным [Соловьева и др., 2008; Ionov et al, 2010; Agashev et al., 2013; Howarth et al., 2014].

Зеленая линия – геотерма для трубки Обнаженная; красная линия - геотерма для трубки Удачная. Линии геотерм и поля по [Howarth et al., 2014].

Воздействие метасоматических расплавов возможно предположить и на основании распределения элементов платиновой группы (Рис. 10). Для второй группы пород отмечается минимум по Pd, что возможно связать с межзерновой отсадкой сульфидов (Рис. 10Б) [Ильина и др., 2016].

Третья группа имеет характер распределения PGE и Re, близкий к линии PM (Рис. 10В). К данной группе относятся образцы с относительно высоким содержанием клинопироксена. Такой тип распределения можно связать с воздействием метасоматирующих расплавов, так как для данных образцов наблюдается привнос радиогенного рения (высокий γ_{Os} +2.5 - +35 и явно завышенные модельные возраста T_{MA} – 3.6-4.7 млрд лет).

Таким образом, раннюю эволюцию мантийной литосферы на северо-западе кратона можно рассматривать как двухэтапный процесс. 1 Ранний процесс соответствует формированию гарцбургитов магнезиальной группы. Возраст формирования приблизительно равен 2.2 - 2.4 млрд лет. 2. Второй этап представляет собой воздействие метасоматических флюидов. Возраст этого процесса приблизительно равен 1.9-2.0 млрд лет и соответствует

возрасту присоединения Биректинского террейна к Сибирскому кратону [Розен, 2003]. Д.А. Ионов с соавторами [Ionov et al., 2015] также выделял два основных этапа эволюции литосферной мантии под трубкой Обнаженная: архейский ~2.8 и палеопротерозойский ~2.0 млрд лет. Однако нами не были получены данные T_{RD} древнее 2.1 млрд лет.

Кроме скрытого (cryptic) метасоматоза, в породах из трубки Обнаженная наблюдается модальный метасоматоз. Нами впервые был детально рассмотрен данный тип метасоматоза, его геохимическая природа и возраст. Магнезиальная серия характеризуется наличием флогопита и амфибола. Флогопит и амфибол замещают минералы в пластинчатых структурах распада в эксклюзионных мегакристаллах пироксена (Рис. 13А), образуют секущие прожилки (Рис. 13Б). Эти признаки свидетельствуют о явном наложенном метасоматическом происхождении флогопита и амфибола.

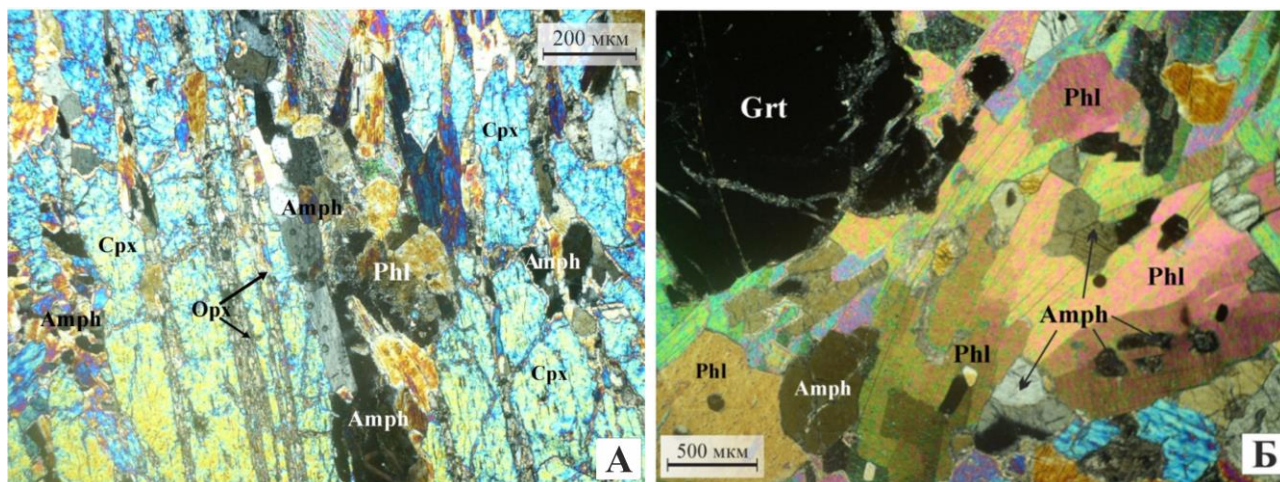


Рис. 13. Развитие метасоматических минералов в Grt, Sp-Grt, Sp мегакристаллических пироксенитах из трубки Обнаженная.

А - мелкозернистый агрегат Amph с редкими пластинками Phl, развивающийся преимущественно по пластинкам распада ортопироксена. (обр. 7-345).

Б - Зерно граната на границе с флогопит-амфиболовым прожилком в гранатовом оливиновом вебстерите (обр. 74-817).

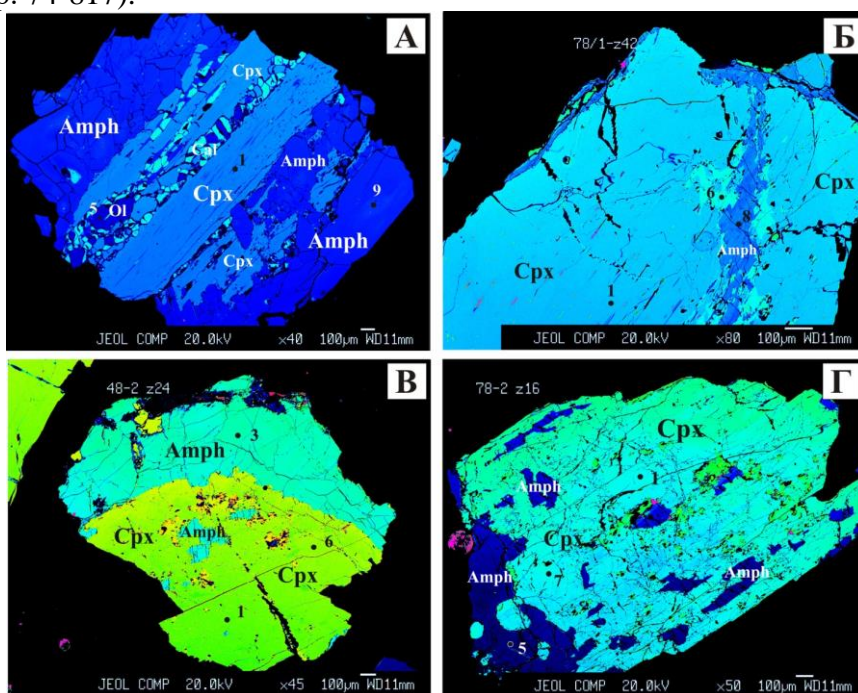


Рис. 14. Метасоматическое замещение пироксена амфиболом.

Фотов в обратно-рассеянных электронах. (А - обр. 7-345; Б - обр. 74-817; В - обр. 74-286 а; Г - обр. 7-345).

Нами было сделано большое количество микрозондовых анализов составов минералов из трех представительных метасоматизированных образцов (Рис. 14). В зернах по химическому составу отбирались наиболее неизменные участки с наиболее низко-натриевым и высоко-кремниевым клинопироксеном и наименее хромистым и высоко-алюминиевым амфиболом. Затем в выбранных точках определялось содержание редких элементов методом SIMS. Содержания редких элементов по отдельным минералам приведены на Рис. 15. Составы гранатов из образцов с признаками модального метасоматоза не отличаются от неизменных образцов. Клинопироксен отличается достаточно большими вариациями составов. Измеренные составы наименее измененного клинопироксена также не отличаются от клинопироксена из образцов без флогопит-амфиболовой минерализации. В амфиболах наблюдаются повышенные содержания Ва, Nb+Та, а также общее повышение концентраций элементов HFSE и REE. Природа метасоматирующих агентов имела силикатный характер (Рис. 16). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датировки по флогопиту метасоматизированного образца 74-817 равны около 1.7 млрд. лет, что в целом соответствует возрасту аккреции Сибирского кратона и совпадает с датировками метасоматического события по Re-Os.

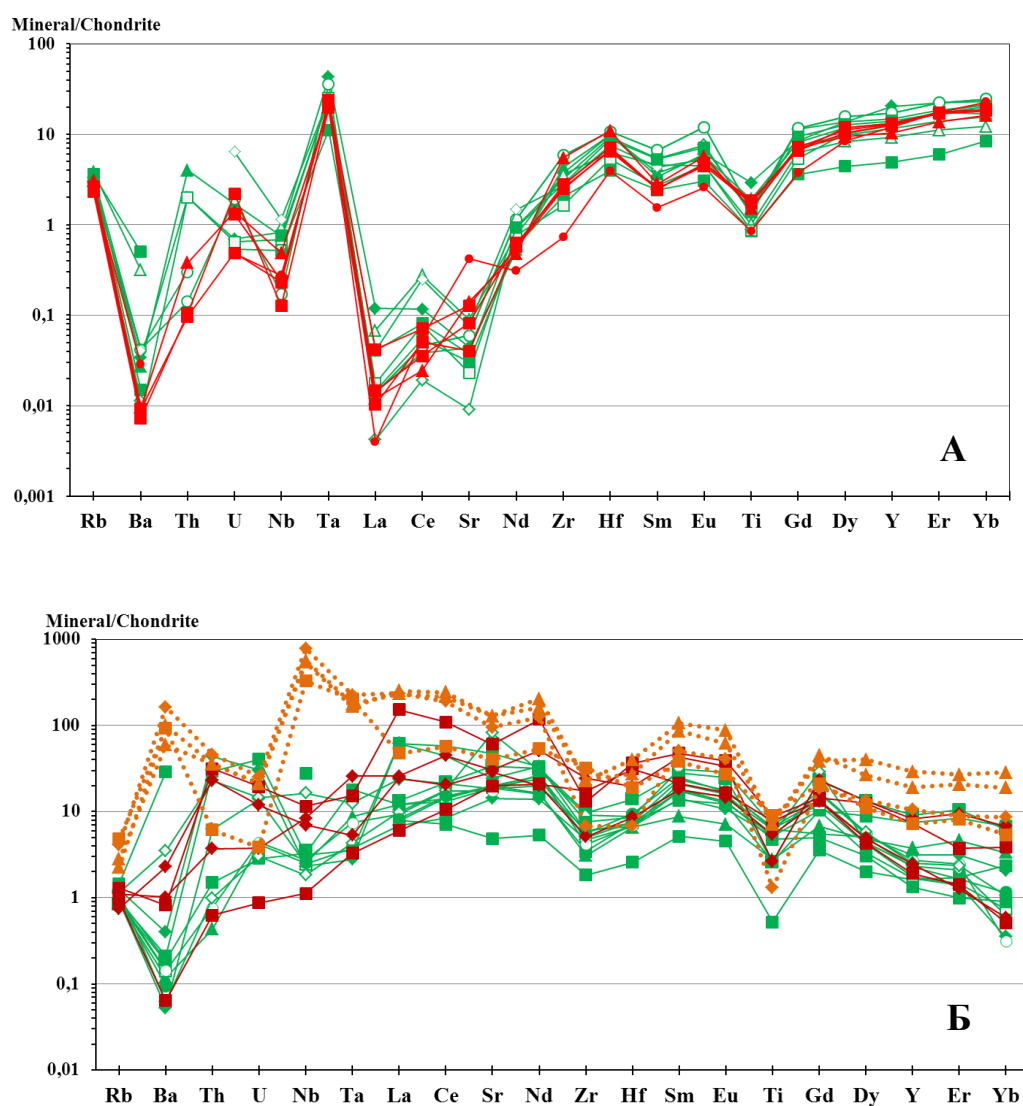


Рис. 15. Распределение содержания редких элементов в минералах Mg-серии пород.
 А – Гранат; Б – Клинопироксен и амфибол.
 Зеленые линии – неизменные образцы, красные линии – измененные образцы.
 Желтые линии – составы амфибола.

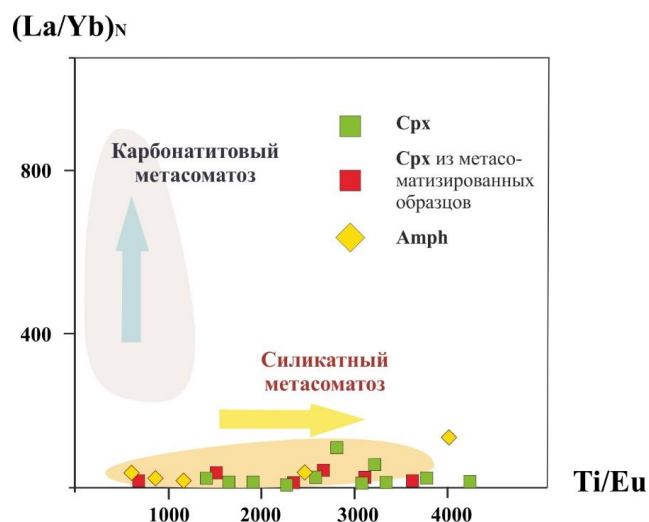


Рис. 16. Диаграмма Ti/Eu – La/Yb в клинопироксенах и амфиболах [Coltorty et al, 1999].

Третье защищаемое положение. Среди ксенолитов трубки Обнаженная выделяется группа Phl-Pm гипербазитов и порфиroidных слюдитов, обогащенных K, Fe, Ti. Возраст формирования Phl-Pm гипербазитов, оцененный $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом по флогопитам, составляет 850-500 млн. лет, а деформированных слюдитов – 167 млн. лет, что соответствует возрасту трубки.

Флогопит-ильменитовые парагенезисы из трубок Обнаженная и Слюдянка отличаются от других пород более железистым составом минералов. Группа является неоднородной по составу, часть пород характеризуется признаками кристаллизации из расплава, а другая часть имеет метасоматическое происхождение.

Полученные данные по содержанию несовместимых элементов в породах позволяют разделить их на две группы (Рис. 17А). К первой были отнесены образцы с максимумом по титану – ильменит-флогопитовые гипербазиты. Они характеризуются максимумами элементов группы HFSE. При сравнении с литературными данными можно отметить, что формой спектров с максимумами элементов группы HFSE характеризуются дайки бассейна р. Хорбусуонка, которые датируются 540 млн. лет [Киселев и др., 2015]. Однако в спектре распределения данных даек не выражен максимум Nb+Ta и отсутствует минимум Zr+Hf, также низкое значение $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3-4$, поэтому сходства даек и ксенолитов не наблюдается. Базальты Сибирских траппов тоже характеризуются незначительным максимумом по титану, однако отличаются от наших пород по значениям и формам спектра (минимумом по Nb, низкими значениями $(\text{La}/\text{Yb})_N = 2-4$). При этом кимберлитовый расплав обладает совершенно иными геохимическими характеристиками, что не позволяет предположить генетическое родство расплавов, родоначальных кимберлитам, и флогопит-ильменитовых ксенолитов. Следует также отметить, что валовый геохимический состав пород зависит от содержания минералов – концентраторов редких элементов (в данном случае содержание ильменита составляет до 15%, что может объясняет максимум по титану).

Вторую группу составили образцы с минимумом по титану (Рис.17Б), которые характеризуются подобием кимберлитам по геохимическим характеристикам (минимум Ti, Zr+Hf). Данные породы по петрографическим особенностям являются образцами с признаками деформационных структур и характеризуются высоким содержанием флогопита (Глава 3.4). Сходство геохимического состава деформированных слюдитов и кимберлитов может свидетельствовать об их генетическом родстве

Полученные датировки безгранатовых пород с ксеноморфными выделениями флогопита составляют 870-850 млн. лет (Рис. 18) (образцы О-22-87 и О-42-87), что соответствует времени распада суперконтинента Родиния [Gladkochub, 2010]. Возраст гранат-содержащих парагенезисов составляет 604-502 млн. лет, что соответствует возрасту даек Молодинского роя [Киселев, 2015]. Из данной группы выделяются деформированные

амфибол-флогопитовые породы, флогопит образует крупные (до 2 мм) изогнутые пластинки с признаками интенсивной деформации, амфибол представлен веерообразными выделениями. Флогопит из близкого по петрографическому типу ксенолита трубки Слюдянка (образец Сл-3) был датирован 167 млн. лет, что соответствует возрасту трубок Куйокского поля. Вероятно, эта группа пород кристаллизовалась в зонах глубинных разломов и связана с влиянием кимберлитовых расплавов.

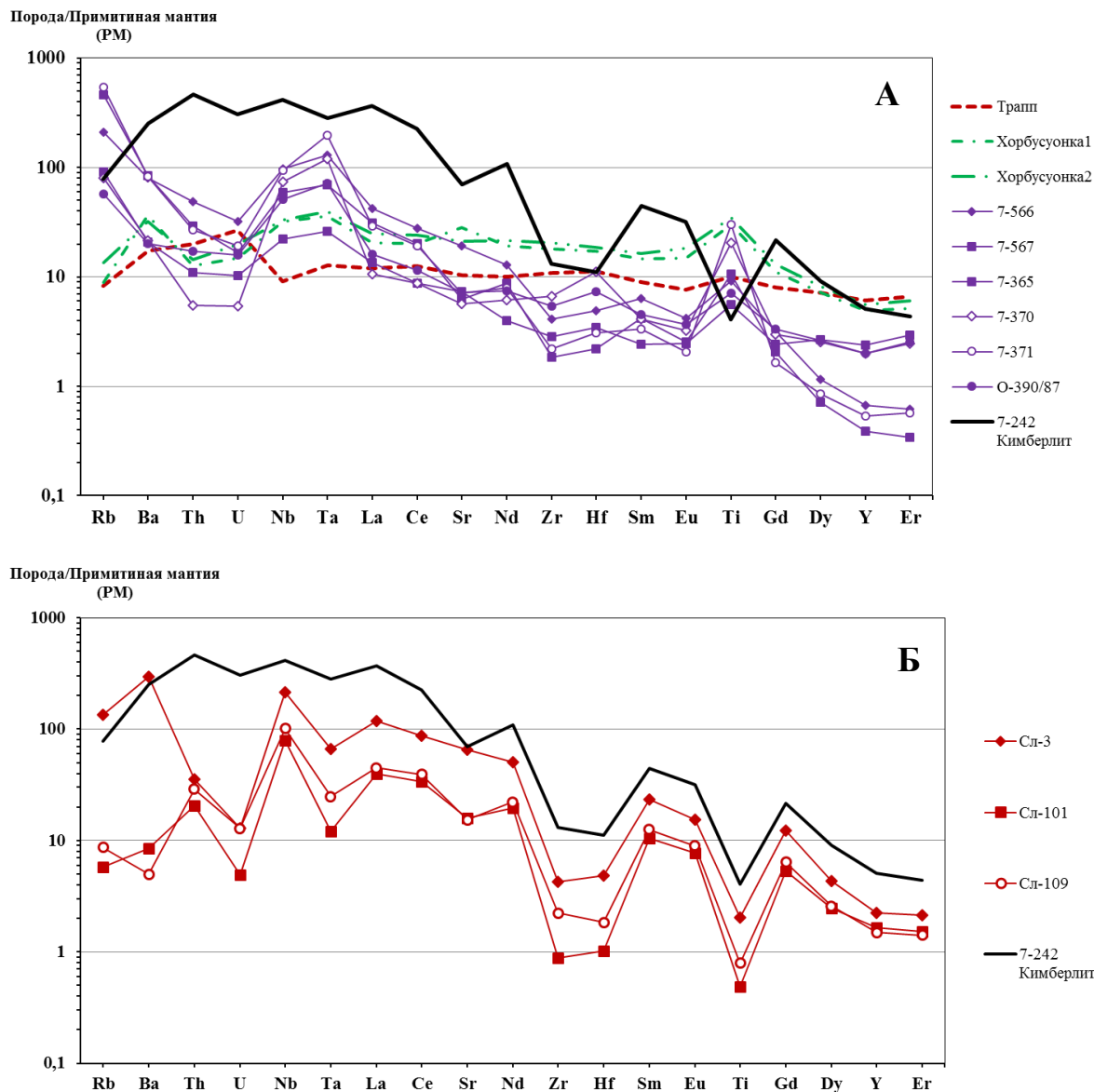


Рис. 17. Спайдер-диаграмма распределения содержаний несовместимых элементов во Phl-Ptm породах.

А - Phl-Ptm гипербазиты (Ti-максимум); Б - Phl-Ptm деформированные породы.

Трапп – состав покровного базальта Западной Сибири ~250 млн лет [Медведев и др, 2003].

Хорбусуонка – состав долеритовых даек в бассейне р. Хорбусуонка, притока р. Оленек [Киселев и др., 2015 – составы 0910 и 1011]. Кимберлит – наши данные – из трубки Обнаженная (обр. 7-242).

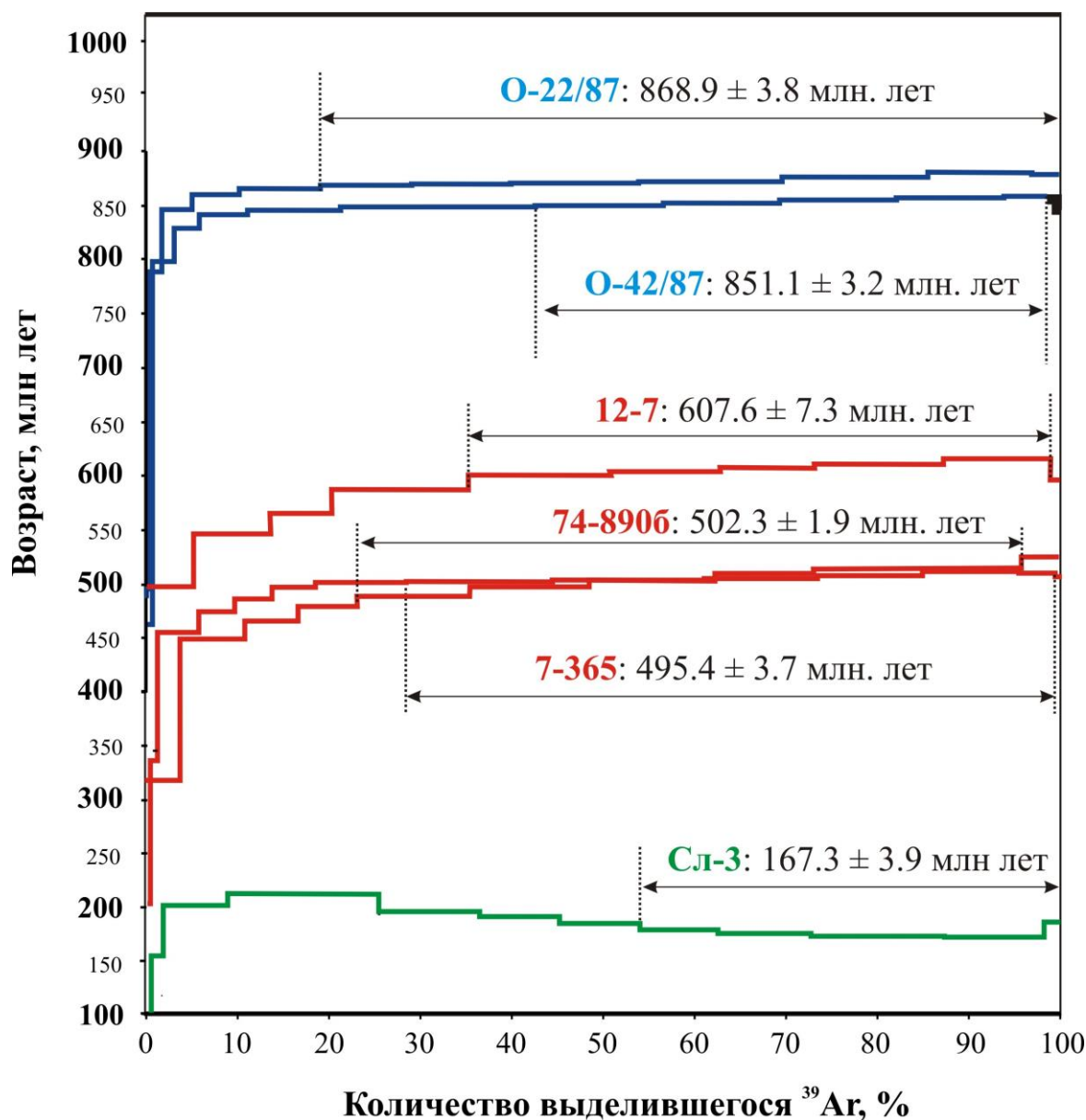


Рис. 18. Возраст некоторых флогопитов, полученный методом $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования в ксенолитах Phl-Плм серии (обр. O-22/87, O-42/87 – безгранатовые Phl-Плм гипербазиты; 12-7, 74-8906 и 7-365 – интенсивно гранатизированные Phl-Плм лерцолиты; обр. Сл-3 – деформированная Phl-Amph порода).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ксенолиты из трубки Обнаженная отражают состав литосферной мантии под Куойкским полем и этапы ее эволюции. Первоначальным породам предположительно соответствуют гарцбургиты и лерцолиты, которые затем испытали воздействие метасоматирующих силикатных расплавов. Возможно, воздействие таких расплавов было неоднократным, но последний этап наиболее четко прослеживается с помощью модального Phl-Amph метасоматоза. Такие расплавы приносили элементы группы HFSE, REE, а также Pt, Pd и Re. Время развития магнезиальной группы пород, скорее всего, может быть отнесено ко времени формирования протолита литосферной мантии Биректинского террейна (~ 2.4 млрд. лет), а возраст метасоматических преобразований по $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и Re-Os датировкам равняется 1.8-1.7 млрд лет. Повышенный изотопный состав кислорода в минералах из эклогитов указывает на влияние субдукционной компоненты при формировании литосферной мантии. В дальнейшем в неопротерозое на литосферную мантию под

Куойкским полем воздействовали гораздо более высококальциевые, железистые и титанистые расплавы, которые проявились в виде Phl-Pm ксенолитов. Ряд вопросов относительно эволюции литосферной мантии под Куойкским кимберлитовым полем остается дискуссионным. В частности, из-за высокой вторичной степени измененности пород не была до конца выяснена природа метасоматизирующих агентов. Требуют дальнейших исследований и вопросы о времени формирования эклогитовых разновидностей ксенолитов и об участии вещества плюмов и древней субдуцированной коры.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах:

1. Соловьева Л. В., **Калашникова Т. В.**, Костровицкий С. И., Суворова Л. Ф. Зональность гранатов в деформированных перидотитах из кимберлитовой трубки Удачная// ДАН. 2014. Т. 457, № 5. С. 579–585.

2. Solov'eva L. V., **Kalashnikova T. V.**, Kostrovitsky S. I., Ivanov A. V., Matsuk S. S., Suvorova L. F. Metasomatic and magmatic processes in the mantle lithosphere of the Birekte terrain of the Siberian craton and their effect on the lithosphere evolution// Geodynamics & Tectonophysics. 2015. V. 6, № 3. P. 311-344.

3. **Калашникова Т.В.**, Соловьева Л.В., Костровицкий С.И. Сравнительная характеристика состава минералов из ксенолитов кимберлитовых трубок «Обнаженная» и «Удачная»// Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2015. Т. 53, №4. – С. 7-20.

4. Соловьева Л. В., **Калашникова Т. В.**, Костровицкий С. И., Иванов А.В. Мацюк С.С., Суворова Л. Ф. Флогопитовые и флогопит-амфиболовые парагенезисы в литосферной мантии Биректинского террейна Сибирского кратона// ДАН. 2017. Т. 474, № 6. С.1-6.