

На правах рукописи

ШАРЫГИН Игорь Сергеевич

**АКЦЕССОРНЫЕ МИНЕРАЛЫ
КСЕНОЛИТОВ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПЕРИДОТИТОВ
ИЗ КИМБЕРЛИТОВ ТРУБКИ УДАЧНАЯ-ВОСТОЧНАЯ (ЯКУТИЯ):
ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ПЕТРОГЕНЕТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ**

25.00.05 – минералогия, кристаллография
25.00.09 – геохимия, геохимические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-
минералогических наук

Новосибирск

2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН).

Научные руководители:

Похиленко Николай Петрович, академик РАН, доктор геолого-минералогических наук, директор ИГМ СО РАН

Головин Александр Викторович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории минералов высоких давлений и алмазных месторождений (№451) ИГМ СО РАН

Официальные оппоненты:

Гаранин Виктор Константинович, доктор геолого-минералогических наук, директор Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (г. Москва)

Зайцев Анатолий Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии Института наук о Земле при Санкт-Петербургском государственном университете

Ведущая организация:

ФГБУН Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (г. Москва)

Защита состоится 26 ноября 2014 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д003.067.02, созданного на базе ИГМ СО РАН, в конференц-зале. Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3; факс: (383) 333-21-30; e-mail: gaskova@igm.nsc.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИГМ СО РАН. Адрес сайта: <http://www.igm.nsc.ru>, раздел «Образование».

Автореферат разослан 10 октября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор геолого-минералогических наук

О.Л. Гаскова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Акцессорные минералы¹ мантийных ксенолитов из щелочных базальтоидов и кимберлитов являются уникальным источником петрогенетической информации о процессах преобразования вещества пород *in situ* в мантии и во время их транспортировки к поверхности [Haggerty, Sautter, 1990; Добрецов и др., 1992; Frezzotti et al., 1994; Wulff-Pedersen et al., 1996; Klügel, 1998; Andersen, Neumann, 2001; Bali et al., 2002; Литасов и др., 2003; Misra et al., 2004; Moine et al., 2004; Beard et al., 2007; Головин, Шарыгин, 2007; Araújo et al., 2009; Alifirova et al., 2012; Соловьева и др., 2012; Ziberna et al., 2013]. Акцессорные минералы в ксенолитах находятся в виде одиночных зерен или скоплений в интерстициях между породообразующими минералами, слагают микрожилы, присутствуют в виде кристаллических включений в породообразующих минералах и образуют каймы вокруг них. Кристаллические фазы в составе флюидных и расплавных включений в породообразующих минералах также относятся к акцессорным минералам.

Ксенолиты деформированных перидотитов являются одними из наиболее глубоких образцов вещества субкратонной литосферной мантии Земли (СКЛМ), выносимых кимберлитовой магмой [Boyd, 1973; Соболев, Похиленко, 1975; Pearson et al., 2003; O'Reilly, Griffin, 2010; Agashev et al., 2013]. Подавляющее большинство опубликованных работ по мантийным ксенолитам из кимберлитов в целом и деформированным перидотитам в частности посвящено определению валовых петрохимических, геохимических, изотопных характеристик нодулей и изучению породообразующих минералов, в то время как акцессорные минералы остаются слабо исследованными.

Целью работы являлась реконструкция процессов преобразования вещества пород основания литосферной мантии Сибирского кратона по результатам изучения акцессорных минералов в ксенолитах деформированных перидотитов из кимберлитов трубки Удачная-Восточная.

Задачи исследования: 1) провести минералого-петрографическое изучение ксенолитов; 2) определить химический состав породообразующих минералов ксенолитов; 3) оценить *P-T* параметры последнего равновесия ассоциаций породообразующих минералов ксенолитов для того, чтобы установить положение перидотитов в разрезе СКЛМ; 4) изучить акцессорные минералы, заключенные в виде включений в породообразующих минералах ксенолитов; 5) исследовать акцессорные минералы в межзерновом пространстве ксенолитов; 6) установить влияние присутствия акцессорных минералов на валовые петрохимический и редкоэлементный составы ксенолитов; 7) провести интерпретацию полученных результатов с привлечением литературных данных, установить *P-T* параметры кристаллизации акцессорных минералов ксенолитов и выявить особенности их генезиса.

Предмет исследования – процессы преобразования вещества СКЛМ.

¹Акцессорные минералы (от позднелатинского *accessorius* – добавочный) – минералы, содержащиеся в горных породах в незначительных количествах (менее 1%) [Горная энциклопедия, 1984].

Объект исследования – ксенолиты деформированных перидотитов из кимберлитов трубки Удачная-Восточная (Якутия).

Фактический материал и личный вклад автора. В работе использована представительная коллекция уникальных неизменных ксенолитов деформированных перидотитов (25 образцов). Автором лично было изготовлено и изучено более 200 шлифов и более 500 препаратов для исследований; выполнено более 400 микророндовых определений состава породообразующих минералов и более 1000 – акцессорных минералов; получено более 2000 энергодисперсионных спектров акцессорных минералов, более 500 изображений в отраженных электронах, и более сотни карт распределения элементов методом сканирующей электронной микроскопии; получено и расшифровано более 500 спектров комбинационного рассеяния света акцессорных минералов; проведено более пятидесяти термометрических и более пятидесяти криометрических опытов с расплавными и флюидными включениями. Данные по петрохимическому (РФА анализ) и валовому редкоэлементному (метод ICP-MS) составам 8 ксенолитов из коллекции, а также данные по редким элементам (метод LA ICP-MS) в породообразующих минералах ксенолитов, получены к.г.-м.н. А.М. Агашевым.

Научная новизна.

1) Установлено, что в ксенолитах деформированных перидотитов помимо минералов первичного парагенезиса (породообразующие силикаты и акцессорные Fe-Ni-Cu-сульфиды) присутствует значительное количество наложенных акцессорных минералов, представленных 34 минеральными видами, из которых 11 впервые диагностированы в мантийных породах.

2) Впервые детально изучены вторичные расплавные включения в породообразующем оливине деформированных перидотитов. Оценены минимальные *P-T* параметры формирования включений (1.5 ГПа, 600 °C), которые свидетельствуют об их мантийном происхождении (> 50 км). Показана генетическая связь этих включений с расплавами, формировавшими кимберлиты трубки Удачная-Восточная.

3) Присутствие беркеита $\text{Na}_6\text{CO}_3(\text{SO}_4)_2$ и тихита $\text{Na}_6\text{Mg}_2(\text{CO}_3)_4(\text{SO}_4)$ в расплавных включениях в породообразующем оливине ксенолитов свидетельствует о возможности их кристаллизации в магматических системах. Ранее эти минералы были известны лишь в составе осадочных и гидротермальных ассоциаций.

4) Показано, что в ксенолитах деформированных перидотитов образование акцессорного джерфишерита $\text{K}_6(\text{Na,Cu})(\text{Fe,Ni,Cu})_{24}\text{S}_{26}\text{Cl}$ является результатом взаимодействия нодулей с кимберлитовыми расплавами.

5) Главными концентраторами редких элементов в ксенолитах деформированных перидотитов являются акцессорные наложенные минералы, такие как перовскит (PЗЭ, Th, Nb, Ta, U, Pb, Y), апатит (PЗЭ), слюда (K, Rb, Ba), джерфишерит (K, Rb), арагонит и кальцит (Sr). Установлено, что эти минералы генетически связаны с кимберлитовыми расплавами.

Научная значимость работы.

1) Присутствие арагонита – высокобарической полиморфной модификации карбоната кальция, совместно с щелочными карбонатами, сульфатами, сульфидами и хлоридами во вторичных расплавах включений в оливине деформированных перидотитов свидетельствует о мантийном источнике щелочей и хлора в расплавах, формировавших кимберлиты трубки Удачная-Восточная.

2) Джерфишерит в мантийных ксенолитах рассмотрен в качестве минерала-индикатора изначального обогащения хлором кимберлитовых расплавов.

3) Генетически связанные с кимберлитовым магматизмом наложенные акцессорные минералы значительно влияют на валовые содержания редких элементов в ксенолитах перидотитов. Это влияние необходимо учитывать при использовании валовых геохимических характеристик нодулей для реконструкции мантийных процессов.

4) Результаты работы имеют значение для развития представлений о процессах преобразования вещества пород основания СКЛМ.

Соответствие результатов работы научным специальностям. Результаты работы соответствуют пункту 2 (минералогия земной коры и мантии Земли, ее поверхности и дна океанов) паспорта специальности 25.00.05 и пункту 4 (изучение химического состава всех типов природного вещества (земной коры, глубинного вещества Земли, гидросферы, атмосферы, живого вещества, внеземного вещества) и закономерностей распространенности в них химических элементов и изотопов) паспорта специальности 25.00.09.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 7 статей в российских и зарубежных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Отдельные положения работы представлялись как лично автором, так и соавторами на Международной конференции «Кристаллогенезис и Минералогия» (Санкт-Петербург, 2007), Международных конференциях «Щелочной магматизм Земли» (Санкт-Петербург, 2008; Коктебель, Украина, 2010; Минск, Беларусь, 2011), 8-ой, 10-ой и 11-ой Международных конференциях «Raman Spectroscopy Applied to the Earth Science – Sensu Latu» (Гент, Бельгия, 2008; Нанси, Франция, 2012; Сент-Луис, США, 2014), XIII и XIV Международных конференциях по термобарогеохимии (Москва, 2008; Новосибирск, 2010), 9-ой и 10-ой Международных кимберлитовых конференциях (Франкфурт-на-Майне, Германия, 2008; Бангалор, Индия, 2012) и 6-ой Международной конференции «Orogenic Lherzolite» (Марракеш, Марокко, 2014).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав и заключения общим объемом 248 страниц. В ней содержится 103 рисунка, 4 таблицы и 23 приложения. Список литературы включает 264 наименования.

Во введении определены цели и задачи работы, дана общая характеристика работы, а также сформулированы защищаемые положения. В первой главе приводится краткий обзор основных публикаций, посвященных изучению акцессорных минералов в ксенолитах мантийных пород из кимберлитов. Во

второй главе дана характеристика неизменных кимберлитов и ксенолитов деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная. В третьей главе описаны методы исследования, использованные в работе. В главах с четвертой по шестую изложены результаты исследования акцессорных минералов ксенолитов деформированных перидотитов. В седьмой главе обсуждаются полученные результаты, приводится анализ *P-T* параметров кристаллизации акцессорных минералов и изложены выводы относительно их происхождения и петрогенетического значения.

Благодарности. Работа выполнена в лаборатории минералов высоких давлений и алмазных месторождений ИГМ СО РАН под руководством зав.лаб. академика РАН д.г.-м.н. Н.П. Похиленко и к.г.-м.н. А.В. Головина, которым автор выражает свою глубокую признательность. Автор благодарен академику РАН д.г.-м.н. Н.В. Соболеву, д.г.-м.н. А.В. Корсакову, д.г.-м.н. Д.А. Зедгенизову, д.г.-м.н. К.Д. Литасову, к.г.-м.н. Л.Н. Похиленко, к.г.-м.н. А.Ф. Шацкому, к.г.-м.н. В.В. Шарыгину, к.г.-м.н. А.М. Агашеву, к.г.-м.н. А.М. Логвиновой, к.г.-м.н. А.А. Гибшер, к.г.-м.н. В.Г. Мальковцу, к.г.-м.н. П.Н. Гаврюшкину, к.г.-м.н. С.С. Лобанову и Т.А. Алифировой за обсуждение результатов исследования и ценные советы, д.г.-м.н. Ю.Н. Пальянову, д.г.-м.н. Лепезину Г.Г. и д.г.-м.н. А.А. Томиленко за критический анализ рукописи и конструктивные замечания, к.г.-м.н. Е.Н. Нигматулиной, к.г.-м.н. Н.С. Карманову, к.г.-м.н. А.Т. Титову, к.х.н. Л.Н. Поспеловой, Л.В. Усовой и И.А. Мадюкову за содействие в проведении аналитических работ. Особую благодарность автор выражает к.г.-м.н. А.М. Дымшиц за поддержку и помощь в оформлении работы. Работа финансово поддержана грантами РФФИ (07-05-00072-а, 10-05-00575-а, 11-05-91060-НЦНИ-а, 12-05-01043-а, 12-05-31116-мол-а, 13-05-00439-а), Президента РФ (МК-2138.2007.5), ИГМ СО РАН (ВМТК № 13, 2009-2011 гг.) и Министерства образования и науки РФ (№ 14.В25.31.0032).

Принятые обозначения минералов. Породообразующие: O_l_p и O_l_n – порфинокласты и необласты оливина; Orx_p и Orx_n – порфинокласты и необласты ортопироксена; Srx_1 – клинопироксен; Grt – гранат. Акцессорные: O_l_2 – наложенный оливин; Orx_2 – наложенный ортопироксен; Srx_2 – наложенный клинопироксен; Sp – алюмошпинель; Nat – натрит; обозначения других минералов представлены в Табл. 1.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Кимберлитовая трубка Удачная находится в Далдыно-Алакитском районе Якутской алмазоносной провинции (Сибирская платформа) и относится к среднепалеозойскому (D-C) циклу кимберлитового магматизма [Дэвис и др., 1980; Кинни и др., 1997; Харьков и др., 1998; Агашев и др., 2004]. Трубка Удачная состоит из двух сопряженных тел – западного (353 ± 5 млн. лет.) и восточного (367 ± 5 млн. лет.). При разработке карьера в 2001 году в центральной части восточного тела на глубинах 420-620 м были вскрыты уни-

кальные неизменные гипабиссальные кимберлиты, которые в отличие от большинства кимберлитов мира не затронуты приповерхностными постмагматическими изменениями [Головин, 2004; Maas et al., 2005; Kamenetsky et al., 2004, 2009, 2012]. Уникальными характеристиками этих кимберлитов являются низкие содержания H_2O (< 0.5 мас.%) и высокие – щелочей (до 8 мас.% $Na_2O + K_2O$) и Cl (до 6 мас.%). Все остальные химические характеристики пород являются идентичными кимберлитам мира. Минералогия основной массы неизменных кимберлитов представлена в Табл. 1. Ксенолиты мантийных пород из этого блока также не изменены [Шарыгин и др., 2012; Doucet et al., 2012; Agashev et al., 2013].

Основанием для выбора деформированных перидотитов в качестве объекта исследования является то, что этот тип пород встречается в кимберлитовых трубках практически всех древних кратонов и залегает в основании СКЛМ [Boyd, 1973; Соболев, Похиленко, 1975; Pearson et al., 2003; O'Reilly, Griffin, 2010; Agashev et al., 2013]. Среди изученных образцов из трубки Удачная-Восточная присутствуют 21 лерцолит, 3 гарцбургита и один дунит. Первичный парагенезис ксенолитов представлен породообразующими силикатами (оливином (Fe_{86-91}), ортопироксеном, клинопироксеном и гранатом) и аксессуарными Fe-Ni-Cu-сульфидами (пирротинном, пентландитом и халькопиритом). Общий рисунок структуры деформированных перидотитов (часто называемых еще порфирокластическими) определяется крупными порфирокластами граната, пироксенов и оливина в матрице, состоящей из мелких полигональных зерен – необластов, главным образом оливина, реже пироксенов

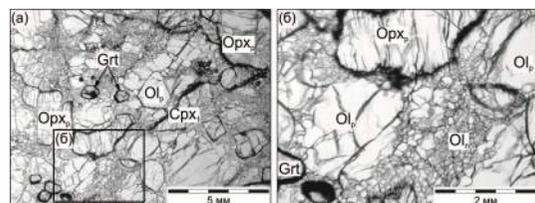


Рис. 1. Перидотит с порфирокластической структурой, образец UV-6/05. (б) Увеличенный участок шлифа, демонстрирующий взаимоотношения двух типов породообразующего оливина: крупные ксаноморфные зерна – порфирокласты и мелкие полигональные зерна – необласты.

Первое защищаемое положение. Идентичность минералогии раскристаллизованных вторичных расплавных включений в оливине ксенолитов деформированных перидотитов и минералогии основной массы уникальных по сохранности кимберлитов трубки Удачная-Восточная свидетельствует о генетической связи между расплавом, взаимодействовавшим с перидотитами, и магмой, формировавшей трубку. Присутствие арагонита – высокобарической полиморфной модификации карбоната кальция, совместно с щелочными карбонатами, сульфатами, сульфидами и хлоридами во включениях

свидетельствует об обогащении кимберлитовых расплавов щелочами и хлором на мантийных глубинах (> 50 км).

В породообразующих оливинах ксенолитов как в порфирокластах (Рис. 2 а, б), так и в необластах (Рис. 2 в) присутствуют расплавные включения размером от первых до 100 мкм. Включения, согласно критериям Г.Г. Леммлейна [1959], Н.П. Ермакова [1972] и Э. Рёддера [1987], являются вторичными. Они располагаются вдоль залеченных трещин, которые либо выклиниваются, либо полностью секут зерна минерала-хозяина (Рис. 2). Состав зерен породообразующего оливина отличается от состава оливина вдоль залеченных трещин. Форма включений различная: от неправильной до полуголанной.

Расплавные включения состоят из деформированного пузырька усадки (Рис. 3 а), тонкораскристаллизованного агрегата (ТКА) и кристаллических фаз, представленных 30 минеральными видами, среди которых присутствуют различные по составу карбонаты, сульфаты, хлориды, сульфиды, фосфаты, оксиды и силикаты (Табл. 1). Индивидуальные включения в пределах одной трещины характеризуются различным количеством фаз (до 20 в одном включении), а также различными их соотношениями. Отсутствие в КР-спектрах пузырька усадки каких-либо пиков, кроме линий минерала-хозяина, свидетельствует о том, что он не содержит какой-либо флюидной фазы в детектируемых количествах. ТКА по данным КР- и энергодисперсионной спектроскопии состоит из карбонатов, сульфатов и хлоридов.

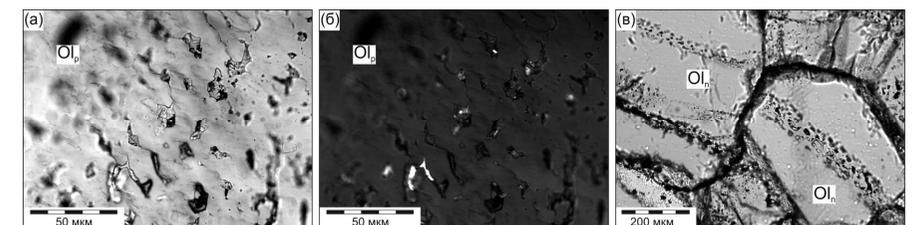


Рис. 2. Вторичные расплавные включения в порфирокласте (а, б) и необластах (в) оливина. Проходящий свет: (а, в) – николи параллельны, (б) – николи скрещены. Яркие светящиеся фазы в скрещенных николях – карбонаты.

Температура начала плавления вещества включений варьирует в узком интервале от 490 до 560 °С. При нагреве деформированный пузырек усадки приобретает сферическую форму (Рис. 3 а). Дальнейшее нагревание включений приводит либо к их гомогенизации при 620-1100 °С (Рис. 3 а), либо к их декрепитации при 650-850 °С.

Различие форм, количества кристаллических фаз и температур гомогенизации для индивидуальных включений в пределах одной трещины является результатом ее залечивания и расшнуровывания расплава [Рёддер, 1987].

Минералогия изученных включений близка минералогии первичных расплавных щелочно-карбонатных включений в оливине карбонатитов Ковдорского массива (Табл. 1). Наблюдения при скрещенных николях показывают,

что значительная часть прозрачных кристаллических фаз расплавных включений в оливине ксенолитов представлена карбонатами (Рис. 2 а, б). Вещество включений после гомогенизации не закаливается в стекло, а образует ТКА. Такое поведение характерно для карбонатных и карбонатно-силикатных расплавов [Литасов и др., 2010; Safonov et al., 2011; Jones et al., 2013; Шарыгин и др., 2013]. Совокупность приведенных выше фактов свидетельствует о карбонатно-силикатном составе расплава, проникавшего вдоль трещин в оливин ксенолитов деформированных перидотитов. Присутствие щелочных карбонатов, сульфатов, сульфидов и хлоридов во включениях указывает на то, что этот расплав был обогащен щелочами и хлором.

Минеральный состав изученных расплавных включений идентичен минералогии основной массы уникальных по сохранности кимберлитов трубки Удачная-Восточная, а также минеральному составу расплавных включений в фенокристаллах оливина кимберлитов (Табл. 1), что свидетельствует о генетической связи между расплавом, взаимодействовавшим с перидотитами, и магмой, формировавшей трубку.

Считается, что структуры деформированных перидотитов возникли в результате рекристаллизации исходно зернистых перидотитов в основании СКЛМ. Присутствие вторичных расплавных включений как в необластах, так и в порфирокластах оливина свидетельствует о том, что инфильтрация расплава по трещинам в оливине происходила после деформации перидотитов. Считается, что минералы рекристаллизовались незадолго до захвата нодулей кимберлитовой магмой, так как эксперименты по отжигу свидетельствуют, что структуры деформированных перидотитов могут сохраняться только в течение нескольких лет при температурах мантии [Goetze, 1975; Mercier, 1979; Drury, Van Roermund, 1989; Pearson et al., 2003]. Таким образом, проникновение расплава по трещинам в оливин перидотитов по времени сопряжено с проявлением кимберлитового магматизма.

Модели формирования расплавных включений в оливине деформированных перидотитов подробно рассмотрены в главе 7 (раздел 1) диссертации. Образование трещин в оливине и взаимодействие перидотитов с расплавами могло происходить как *in-situ* на глубинах залегания пород, так и при транспортировке нодулей к поверхности. Таким образом, расплав, проникавший в оливин по трещинам являлся либо протокимберлитовым, то есть просачивавшимся через перидотиты на этапе деформаций, либо кимберлитовым, то есть выносившим ксенолиты.

Температура начала плавления вещества включений (490-560 °С), то есть эвтектика системы, является наименьшей возможной температурой их формирования. Гомогенизация индивидуальных включений начинается при 620 °С, что свидетельствует об их формировании выше этой температуры. Ламели пентландита в пирротине из включений являются результатом распада высокотемпературного моносльфидного твердого раствора (Mss) (Рис. 3 б). Сопоставление составов пентландита, пирротина и рассчитанного перво-

начального Mss с фазовыми диаграммами показывает, что распад Mss во включениях произошел между 500 и 600 °С (Рис. 3 в). Очевидно, что температура формирования индивидуальных включений была выше 600 °С. Таким образом, $T = 600$ °С может быть обоснованно принята в качестве минимальной температуры формирования вторичных расплавных включений в оливине деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная.

Минимальное давление формирования индивидуальных включений может быть оценено проецированием минимальной температуры на линию фазового перехода кальцит-арагонит. Арагонит используется в качестве индикатора высоких давлений как для метаморфических комплексов [Chopin et al., 2008; Korsakov et al., 2009, 2011], так и для магматических пород [Humphreys et al., 2010; Hurai et al., 2013]. Эксперименты по плавлению неизменного кимберлита трубки Удачная-Восточная показали, что арагонит кристаллизуется из щелочного карбонатно-силикатного расплава при давлениях более 4 ГПа (Рис. 4). Проецирование температуры 600 °С на линию фазового перехода кальцит-арагонит, установленную различными методами, дает давление 1.5 ГПа (Рис. 4). Присутствие же кальцита в некоторых включениях свидетельствует о том, что раскристаллизация расплава внутри этих включений, продолжалась при давлениях ниже линии фазового перехода кальцит-арагонит.

Результаты изучения расплавных включений имеют важное значение для петрогенезиса неизмененных кимберлитов трубки Удачная-Восточная. Источник щелочей (Na и K) и хлора в этих кимберлитах является дискуссионным. Одни работы доказывают, что эти компоненты имеют мантийное происхождение [Maas et al., 2005; Kamenetsky et al., 2009,

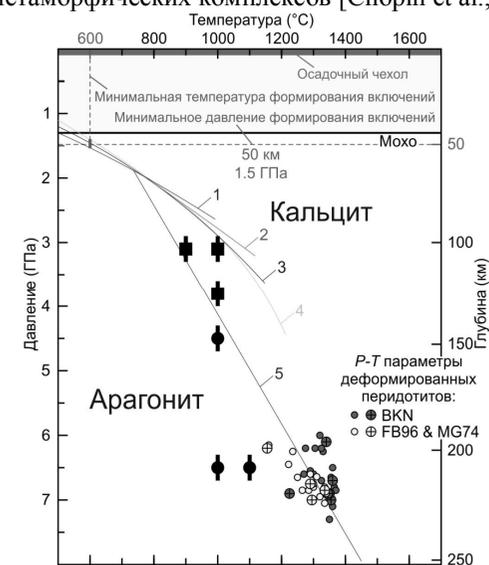


Рис. 4. P-T диаграмма, иллюстрирующая возможные минимальные давления формирования расплавных включений, в которых был диагностирован арагонит. Проекция $T = 600$ °С (минимальная температура формирования включений) на фазовую границу кальцит-арагонит дает минимальное давление 1.5 ГПа. Линия фазового перехода кальцит-арагонит по разным авторам: 1 – [Redfern et al., 1989]; 2 – [Irving, Wyllie, 1975]; 3 – [Matas et al., 2000]; 4 – [Mirwald, 1976]; 5 – [Suito et al., 2001]. Условия синтеза кальцита и арагонита в экспериментах по плавлению неизменного кимберлита трубки Удачная-Восточная показаны соответственно черными квадратами и кругами [Шарыгин и др., 2013]. Красные и желтые круги – оцененные различными методами P-T параметры залегания изученных деформированных перидотитов в разрезе СКЛМ. Круги с крестиком – образцы, в которых был диагностирован арагонит.

2012]. Другие предполагают, что обогащение щелочами и хлором является либо результатом ассимиляции кимберлитовым расплавом соленосных отложений, либо следствием взаимодействия кимберлитов с рассолами, распространенными в осадочном чехле Сибирской платформы [Kostrovitsky et al., 2013; Korylova et al., 2013]. Индивидуальные, вторичные расплавные включения в оливине ксенолитов деформированных перидотитов формировались на глубинах существенно больших границы осадочный чехол-фундамент, что свидетельствует об обогащении кимберлитовых расплавов щелочами и хлором уже на мантийных глубинах (> 50 км) (Рис. 4).

Данный вывод также подтверждается тем, что волокнистые алмазы трубки Удачная, генетически связанные с кимберлитовым магматизмом, содержат карбонатитовые расплавные/флюидные включения с высокими концентрациями щелочей и хлора [Zedgenizov et al., 2007, 2012; Weiss et al., 2011].

Второе защищаемое положение: *В межзерновом пространстве породообразующих минералов ксенолитов установлено значительное количество акцессорных минералов (≥ 17 минеральных видов), образование которых является результатом инфильтрации расплава, генетически связанного с кимберлитовым магматизмом. Наложенные акцессорные минералы являются продуктами как реакций этого расплава с первичными минералами ксенолитов, так и непосредственной раскristаллизации расплава, преобразованного в результате реакций.*

В межзерновом пространстве породообразующих минералов ксенолитов деформированных перидотитов можно выделить несколько типов наложенных акцессорных минералов: 1) минералы интерстиционных обособлений и микрожил; 2) минералы реакционных кайм на породообразующих силикатах; 3) джерфишерит, окаймляющий крупные выделения первичных акцессорных Fe-Ni-Cu-сульфидов.

В ксенолитах выявлены интерстиционные обособления наложенных минералов, представленных пирротинитом, пентландитом, джерфишеритом, пировскитом, хромитом, магнетитом, апатитом, тетраферрифлогопитом, флогопитом, монтичеллитом, форстеритом (Fe_{93-94}), содалитом, диопсидом, гумитом, клиногумитом, кальцитом и арагонитом (Рис. 5 а-д, Табл. 1). О наложенном характере этих минералов свидетельствует то, что они также слагают и микрожилы мощностью до 200 мкм, секущие ксенолиты (Рис. 5 е). Взаимоотношение минералов интерстиционных обособлений и микрожил свидетельствует о том, что они, вероятно, образовались в результате единого процесса.

За исключением арагонита, остальные наложенные акцессорные минералы интерстиционных обособлений и микрожил в ксенолитах деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная были установлены среди минералов основной массы вмещающих кимберлитов и расплавных включений в фенокристаллах оливины из вмещающих кимберлитов (Табл. 1). Все минералы интерстиционных обособлений и микрожил также присутствуют в рас-

плавных включениях в оливине ксенолитов. Кроме того, составы некоторых минералов идентичны составу соответствующих минералов основной массы кимберлитов и расплавных включений в оливине ксенолитов (Рис. 6). Эти факты свидетельствуют о том, что наложенные акцессорные минералы интерстиционных обособлений и микрожил в ксенолитах деформированных перидотитов являются результатом инфильтрации расплава, связанного с кимберлитовым магматизмом.

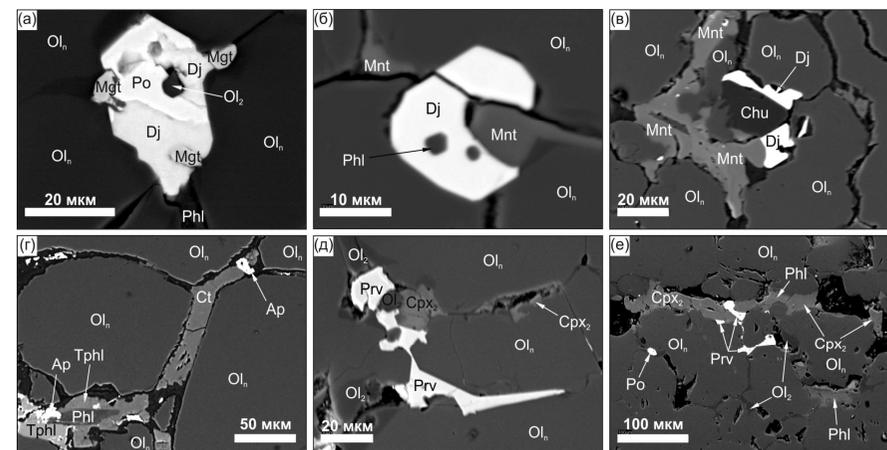


Рис. 5. Наложенные акцессорные минералы в интерстиционных обособлениях (а-д) и микрожилах (е) ксенолитов деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная. Изображения в отраженных электронах.

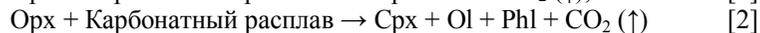
Однако, в минералогии интерстиционных обособлений и микрожил есть и отличия от минерального состава расплавных включений в оливине ксенолитов, выраженные в отсутствии щелочных карбонатов, сульфатов и хлоридов (Табл. 1). Логичным объяснением этому является то, что расплавные включения в оливине наиболее близко отражают состав первоначального прото-кимберлитового/кимберлитового расплава, проникавшего в перидотиты, в то время как минералы интерстиционных обособлений и микрожил кристаллизовались из расплава, преобразованного в результате реакций с минералами первичного паранезиса ксенолитов.

Вокруг ортопироксена были диагностированы реакционные каймы, состоящие из клинопироксена, форстерита (Fe_{91-94}), флогопита, содалита и хромита (Рис. 7 а, б). Клинопироксен в каймах характеризуется губчатой структурой, обусловленной многочисленными порами (Рис. 7 а). Трещины в ортопироксене частично залечены клинопироксеном, в котором также присутствуют пустоты (Рис. 7 б). Эти поры и пустоты, вероятно, представляют собой следы вскрытых флюидных включений.

В ортопироксене были установлены вторичные флюидные включения размером до 20 мкм (Рис. 7 в), состоящие из нескольких дочерних кристаллов

и флюидного обособления. Индивидуальные включения в пределах группы имеют практически идентичные объемные соотношения фаз. Исследования методом КР-спектроскопии показали, что одни дочерние кристаллы, вероятно, хлориды, не дают никаких пиков на КР-спектрах, а другие характеризуются наличием пика 1080 см^{-1} (Рис. 7 д), являющимся самым интенсивным пиком, отвечающим колебаниям CO_3^{2-} группы в натрите Na_2CO_3 [Buzgar, Arorei, 2009]. Результаты криометрических экспериментов (Рис. 7 г) и КР-спектроскопии (Рис. 7 е) флюидного обособления свидетельствуют о его углекислотном составе. Таким образом, включения в ортопироксене представляют собой изначально однородный углекислотный флюид, обогащенный Na и Cl.

Результаты изучения расплавных включений в оливине свидетельствуют о том, что протокимберлитовый/кимберлитовый расплав, проникавший в ксенолиты, имел карбонатно-силикатный состав. Его взаимодействие с породообразующими силикатами деформированных перидотитов можно рассмотреть в рамках модельной экспериментальной системы карбонатизированного перидотита [Wallace, Green, 1988; Falloon, Green, 1989; Thibault et al., 1992; Sweeney, 1994]. В этой системе при давлениях 2-3 ГПа установлены следующие реакции расплава с ортопироксеном:



Минералы кайм на ортопироксене, а также вторичные углекислотные флюидные включения в ортопироксене, вероятно, являются продуктами таких реакций во время подъема ксенолитов кимберлитовой магмой при $P \leq 3$ ГПа. Экспериментально показано, что натрий и хлор могут концентрироваться во флюидной фазе при дегазации расплава [Baker, Alletti, 2012; Beerermann et al., 2006; Veksler, Keppler, 2000]. Присутствие хлоридов и натрита в углекислотных флюидных включениях в ортопироксене ксенолитов подтверждают экспериментальные данные. Таким образом, обеднение хлором и натрием расплавов, из которых, кристаллизовались наложенные минералы интерстиционных обособлений и микрожил, могло происходить в результате перераспределения этих компонентов во флюидную фазу, образующуюся согласно реакциям [1, 2]. Декарбонатизация расплава в межзерновом пространстве ксенолитов с выделением флюидной фазы возможна и просто за счет понижения давления.

Реакционные каймы на породообразующем оливине представлены монтichelлитом и гумитом/клиногумитом или просто изменением состава оливина по краю (Рис. 8 а). Составы монтichelлита и гумита/клиногумита из кайм идентичны таковым из интерстиционных обособлений и микрожил, что свидетельствует об образовании кайм в результате реакций с протокимберлитовым/кимберлитовым расплавом.

Взаимодействие протокимберлитового/кимберлитового расплава с породообразующим клинопироксеном привело к образованию кайм, состоящих из флогопита и клинопироксена другого состава (Рис. 8 б).

Гранат ксенолитов деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная окружен келифитовыми каймами (Рис. 8 в), состоящими из клинопироксена, ортопироксена, флогопита, Na-Al-силиката (содалита или паргасита) и зональных шпинелидов (хромит→алюмошпинель→магнетит). Эти каймы подобны тем, что описаны в предыдущих публикациях, посвященных перидотитам как из трубки Удачная, так и из других кимберлитов мира [Dawson, 1984; Харьков, Вишневский, 1989; Drury, Van Roermund, 1989; Franz et al., 1996; Бобров, 1997; Егоров и др., 2004]. Из имеющихся данных сложно сделать однозначный вывод о генезисе келифитовых кайм. Подробно эта проблема обсуждается в главе 7 (раздел 2) диссертации. В целом, существуют две основные модели образования келифитовых кайм: 1) воздействие мантийных расплавов, не связанных с кимберлитовым магматизмом (мантийный метасоматоз); 2) воздействие кимберлитового расплава или флюида, отделившегося от расплава. Согласно экспериментальным данным, алюмошпинель и паргасит устойчивы в любых перидотитовых системах при давлениях менее 3 и 4 ГПа, соответственно [Wallace, Green, 1988; Sweeney, 1994; Franz et al., 1996], что указывает на возможность их образования в келифитовых каймах только во время транспортировки нодулей кимберлитовой магмой. Таким образом, образование, по крайней мере, части минералов келифитовых кайм связано с инфильтрацией кимберлитового расплава в ксенолиты.

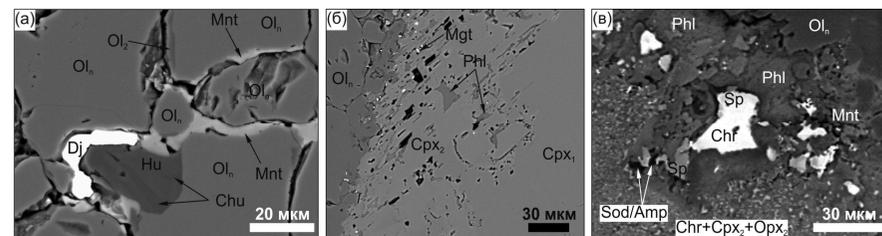


Рис. 8. Реакционные каймы на породообразующих оливине (а), клинопироксене (б) и гранате (в).

В пространстве между породообразующими минералами ксенолитов выявлены крупные (до 300 мкм) полисульфидные выделения, внутренняя часть которых сложена пирротинном, пентландитом и, иногда, халькопиритом. Fe-Ni-Cu-сульфиды всегда окружены каймой джерфшерита (Рис. 9 д).

Следует отметить, что в породообразующих силикатах присутствуют сульфидные глобулы двух типов: изолированные (Рис. 9 а, б) и неизолированные, через которые проходят трещины, секущие минерал-хозяин (Рис. 9 в, г). Первые состоят из пирротина, пентландита и халькопирита (Рис. 9 б), тогда как для вторых, помимо Fe-Ni-Cu-сульфидов, характерно присутствие джерфшерита, располагающегося по периферии глобул (Рис. 9 г). Эти факты свидетельствуют о том, что Fe-Ni-Cu-сульфиды являются первичными

минералами, а джерфишерит образовался за счет их замещения в результате реакции с протокимберлитовым/кимберлитовым расплавом, который проник по трещинам. По аналогии, Fe-Ni-Cu-сульфиды в крупных полисульфидных выделениях в межзерновом пространстве ксенолитов (Рис. 9 д) также являются первичными минералами, в то время как джерфишерит – наложенным минералом.

Джерфишерит является довольно частым аксессуарным минералом ксенолитов из различных кимберлитов мира, а также самих кимберлитов. В настоящий момент находки джерфишерита, помимо трубки Удачная, известны в 15 трубках различного возраста на разных кратонах в России, Гренландии, Канаде, Финляндии, и Южной Африке (Табл. 2). По аналогии с изученными перидотитами, образование джерфишерита в других ксенолитах, вероятно, также связано с инфильтрацией протокимберлитового/кимберлитового расплава. Таким образом, присутствие джерфишерита как в кимберлитах, так и в мантийных нодулях указывает на то, что хлор и щелочи являлись важными компонентами значительной части кимберлитовых расплавов, а не только трубки Удачная-Восточная.

Третье защищаемое положение: *Генетически связанные с кимберлитовым магматизмом наложенные аксессуарные минералы, такие как перовскит, апатит, слюда, джерфишерит, арагонит и кальцит, являются главными концентраторами редких элементов в ксенолитах деформированных перидотитов. Присутствие этих минералов оказывает существенное влияние на валовые содержания редких элементов в ксенолитах, увеличивая концентрации РЗЭ, Pb и Sr – в разы, а Rb, Ba, K, Th, U, Nb и Ta – на один-два порядка.*

Валовый редкоэлементный состав ксенолитов перидотитов из кимберлитов используется для реконструкции эволюции вещества СКЛМ [Boyd et al., 1997; Корулова, Russell, 2000; Ionov et al., 2010; Tang et al., 2013]. Считается, что частичное плавление и мантийный метасоматоз являются основными геологическими процессами, изменяющими состав СКЛМ. Экстракция расплавов при частичном плавлении приводит к истощению перидотитов несовместимыми элементами, в то время как просачивание метасоматизирующих расплавов/флюидов – к обогащению.

Валовые концентрации редких элементов могут быть либо непосредственно измерены при анализе порошка, изготовленного из ксенолита, либо рассчитаны, исходя из составов породообразующих минералов ксенолитов и их модалных количеств. Впервые результаты двух подходов были сопоставлены для ксенолитов как зернистых, так и деформированных перидотитов из кимберлитов Никос (Сомерсет Айленд, Канада) [Schmidberger, Francis, 2001]. Оказалось, что рассчитанный валовый состав ксенолитов характеризуется дефицитом редкоземельных элементов (РЗЭ) относительно измеренного (Рис. 10 а). С.С. Шмидбергер и Д. Фрэнсис предположили, что такая разность может объясняться присутствием интерстиционных минералов, которые кри-

сталлизовались из проникавшего в ксенолиты кимберлитового расплава. Добавление от 0.4 до 2 мас. % вмещающего кимберлита к рассчитанным валовым концентрациям РЗЭ позволило получить спектр распределения РЗЭ идентичный спектру для измеренных валовых концентраций РЗЭ (Рис. 10 а), что подтвердило предположение С.С. Шмидбергера и Д. Фрэнсиса [Schmidberger, Francis, 2001]. Однако, интерстиционные минералы в перидотитах из кимберлитов Никос не были обнаружены.

Для исследованных ксенолитов трубки Удачная-Восточная наблюдается подобная картина – рассчитанные концентрации большинства редких элементов всегда в разы (РЗЭ) и на порядки (КИЛЭ – крупноионные литофильные элементы, ВЗЭ – высокозарядные элементы) меньше чем измеренные (Рис. 10 б). Это свидетельствует о том, что значительный вклад в баланс редких элементов вносят наложенные аксессуарные минералы. В ксенолитах деформированных перидотитов в настоящей работе были диагностированы наложенные аксессуарные минералы, образование которых является результатом инфильтрации расплава, генетически связанного с кимберлитовым магматизмом. Наложенные минералы находятся не только в межзерновом пространстве ксенолитов, но также присутствуют и во вторичных раскристаллизованных расплавных и флюидных включениях в породообразующих минералах.

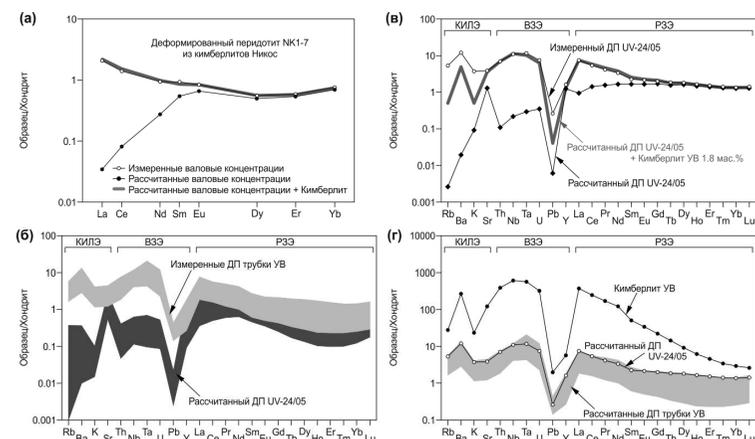


Рис. 10. Спектры распределения редких элементов (РЭ), нормированные к хондриту [McDonough, Sun, 1995]. (а) Иллюстрация эффекта контаминации кимберлитовым расплавом ксенолитов на примере деформированного перидотита (образец NK1-7) из кимберлитов Никос [Schmidberger, Francis, 2001]. Спектр распределения измеренных валовых содержаний РЗЭ в ксенолите в сравнении с рассчитанными, а также в сравнении с РЗЭ-спектром рассчитанных концентраций + кимберлит. (б) Сравнение спектров распределения для измеренных и рассчитанных валовых содержаний РЭ в ксенолитах деформированных перидотитов (ДПИ) из трубки Удачная-Восточная (УВ). (в) Иллюстрация эффекта контаминации кимберлитовым расплавом ксенолитов ДП трубки УВ на примере образца UV-24/05. (г) Сравнение спектров для измеренных валовых концентраций РЭ в ксенолитах ДП и РЭ-спектра для вмещающих кимберлитов (средние концентрации) [Kamenetsky et al., 2012].

Моделирование контаминации ксенолитов деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная кимберлитовым расплавом показало, что смешение 0.6-1.8 мас.% вмещающего кимберлита с рассчитанными составами ксенолитов дает спектры распределения редких элементов, идентичные спектрам для измеренных валовых концентраций редких элементов в ксенолитах. На рисунке в качестве примера приведены расчеты для образца UV-24/05 (Рис. 10 в). Такая сходимость результатов расчетов с использованием состава неизменных кимберлитов трубки Удачная-Восточная свидетельствует о том, что расплав, проникший в ксенолиты, являлся родственным вмещающим кимберлитам.

Следует отметить, что по форме спектры распределения для валовых концентраций редких элементов в ксенолитах деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная и вмещающих кимберлитов идентичны (Рис. 10 д). Это означает, что редкоэлементный состав ксенолитов контролируется наложенными минералами, образование которых является результатом инфильтрации расплава, генетически связанного с кимберлитами. Главным концентратом РЗЭ и ВЗЭ среди наложенных минералов, диагностированных в ксенолитах деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная, является перовскит (в мас. %: 0.7-1.1 La_2O_3 , 0.9-2.6 Ce_2O_3 , 0.1-0.3 Pr_2O_3 , 0.3-0.7 Nd_2O_3 , 0.9-2.6 Nb_2O_5 , до 0.1 Ta_2O_5). Стронций концентрируется в арагоните (до 5.1 мас. %) и в кальците (до 0.7 мас. %), К, Rb и Ва – в слюде (до 11.0 мас. % К, до 2.5 мас. % Ва), К – в джерфишерите (до 9.5 мас. % К). Кроме того, свой вклад в баланс редких элементов могут вносить щелочные карбонаты, сульфаты и хлориды из расплавных включений.

Обычно предполагается, что кимберлитовые расплавы не контаминируют ксенолиты перидотитов, особенно их центральные части [Kopylova and Russell, 2000; Ionov et al., 2010]. Однако, в настоящей работе было показано, что даже в центральных частях крупных ксенолитов (до 20 см) присутствуют интерстиционные скопления наложенных минералов, связанных с протокимберлитовым/кимберлитовым расплавом.

Таким образом, при использовании валовых геохимических характеристик ксенолитов перидотитов для реконструкции процессов преобразования вещества СКЛМ необходимо учитывать высокую вероятность контаминации нодулей кимберлитовым расплавом. Для достоверной реконструкции докимберлитовой истории преобразования вещества СКЛМ могут быть использованы геохимические характеристики породообразующих минералов ксенолитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований автора можно сформулировать следующим образом:

- В ксенолитах деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная помимо минералов первичного парагенезиса (породообразующие

силикаты и акцессорные Fe-Ni-Cu-сульфиды) диагностировано значительное количество наложенных акцессорных минералов, представленных 34 минеральными видами, из которых 11 (расвумит, галит, сильвин, афтиталит, беркеит, тихит, ньерерит, шортит, нортупит, эйтелит и арагонит) впервые установлены в мантийных породах.

- В породообразующем оливине ксенолитов присутствуют раскристаллизованные вторичные расплавные включения, располагающиеся вдоль залеченных трещин. Эти включения состоят из пузырька усадки, тонкораскристаллизованного агрегата и кристаллических фаз, среди которых установлены различные по составу карбонаты, сульфаты, хлориды, сульфиды, фосфаты, оксиды и силикаты. Минимальные *P-T* параметры формирования включений оценены в 600 °С и 1.5 ГПа. Минеральный состав включений идентичен минералогии матрикса уникальных по сохранности кимберлитов трубки Удачная-Восточная, что свидетельствует о генетической связи между расплавом, взаимодействовавшим с перидотитами, и магмой, формировавшей трубку.

- В межзерновом пространстве породообразующих минералов ксенолитов можно выделить несколько типов наложенных акцессорных минералов: 1) минералы интерстиционных обособлений и микрожил, представленные пирротинном, пентландитом, джерфишеритом, перовскитом, хромитом, магнетитом, апатитом, тетраферрифлогопитом, флогопитом, монтичеллитом, форстеритом (Fo_{93-94}), содалитом, диопсидом, гумитом, клиногумитом, кальцитом и арагонитом; 2) минералы реакционных кайм на породообразующих силикатах; 3) джерфишерит, окаймляющий крупные выделения первичных акцессорных Fe-Ni-Cu-сульфидов. Образование наложенных акцессорных минералов в межзерновом пространстве ксенолитов является результатом инфильтрации расплава, генетически связанного со среднепалеозойским кимберлитовым магматизмом. Наложённые акцессорные минералы являются продуктами как реакций этого расплава с первичными минералами ксенолитов, так и непосредственной раскристаллизации расплава, преобразованного в результате реакций.

- В ортопироксене присутствуют вторичные флюидные включения, состоящие из углекислоты и дочерних кристаллических фаз, представленных натритом и, возможно, хлоридами. Присутствие этих включений свидетельствует о дегазации расплава, проникшего в ксенолиты, в результате его реакции с породообразующим ортопироксеном при давлениях 2-3 ГПа.

- Генетически связанные со среднепалеозойским кимберлитовым магматизмом наложенные акцессорные минералы, такие как перовскит, апатит, слюда, джерфишерит, арагонит и кальцит, являются главными концентратом редких элементов в ксенолитах. Присутствие этих минералов оказывает существенное влияние на валовые содержания редких элементов в ксенолитах.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

- 1) Korsakov A.V., Golovin A.V., De Gussem K., **Sharvgin I.S.**, Vandenabeele P. First finding of burkeite in melt inclusions in olivine from sheared lherzolite xenoliths // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2009. – V. 73. – № 3. – P. 424-427.
- 2) **Шарыгин И.С.**, Головин А.В., Похиленко Н.П. Джерфишерит в кимберлитах Куойкского поля как индикатор обогащения хлором кимберлитовых расплавов // Доклады Академии Наук. – 2011. – Т. 436. – № 6. – С. 820-826.
- 3) Похиленко Л.Н., Головин А.В., **Шарыгин И.С.**, Похиленко Н.П. Аксессуарные минералы мантийных ксенолитов: первые находки К-Fe сульфидов, не содержащих Cl // Доклады Академии Наук. – 2011. – Т. 440. – № 4. – С. 521-526.
- 4) **Шарыгин И.С.**, Головин А.В., Похиленко Н.П. Джерфишерит в ксенолитах деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная, Якутия: проблемы происхождения и связь с кимберлитовым магматизмом // Геология и геофизика. – 2012. – Т. – 53. – № 3. – С. 321-340.
- 5) Agashev A.M., Ionov D.A., Pokhilenko N.P., Golovin A.V., Cherepanova Y., **Sharvgin I.S.** Metasomatism in lithospheric mantle roots: Constraints from whole-rock and mineral chemical composition of deformed peridotite xenoliths from kimberlite pipe Udachnaya. Lithos. –2013 – V. 160-161. – P. 201-215.
- 6) **Sharvgin I.S.**, Korsakov A.V., Golovin A.V., Pokhilenko N.P. Eitelite from Udachnaya-East kimberlite pipe (Russia) – A new locality and host rock type // European Journal of Mineralogy. – 2013. – V. 25. – № 5. – P. 825-834.
- 7) Shatskiy A., Gavryushkin P.N., **Sharvgin I.S.**, Litasov K.D., Kupriyanov I.N., Higo Y., Borzdov Y.M., Funakoshi K., Palyanov Y.N., Ohtani E. Melting and subsolidus phase relations in the system $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-MgCO}_3\pm\text{H}_2\text{O}$ at 6 GPa and the stability of $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ in the upper mantle // American Mineralogist. – 2013. – V. 98. – P. 2172-2182.

Избранные тезисы докладов:

- 1) **Sharvgin I.S.**, Golovin A.V., Pokhilenko N.P. Melt pockets in sheared garnet lherzolite xenoliths from the Udachnaya-East kimberlite pipe (Yakutia, Russia) // 9th International Kimberlite Conference, 2008, Frankfurt, Germany, Extended Abstract No. 9IKC-A-00213.
- 2) Golovin A.V., **Sharvgin I.S.**, Korsakov A.V., Pokhilenko N.P. Can be parental kimberlite melts alkali-carbonate liquids: Results investigations composition melt inclusions in mantle xenoliths from kimberlites // 10th International Kimberlite Conference, 2012, Bangalore, India, CD-volume, Abstract No. 10IKC-91.

Технический редактор О.М. Варакина

Подписано к печати 22 сентября 2014 г.

Формат 60×84/16. Печать офсетная. Печ. л. 2,0. Тираж 110. Зак. № 228

Издательство СО РАН, Морской пр., 2, 630090 Новосибирск

Таблица 1. Перечень минералов, диагностированных во вторичных расплавных включениях (ВРВ) в породообразующем оливине и в составе интерстиционных обособлений и микрожил (ИОиМ) ксенолитов деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная, в сравнении с минералогией расплавных включений (РВ) в фенокристаллах оливина из неизменных кимберлитов [Головин и др., 2003, 2004; 2007; Kamenetsky et al., 2004, 2009; Mernagh et al., 2011] и минеральным составом основной массы неизменных кимберлитов трубки Удачная-Восточная [Kamenetsky et al., 2004, 2007, 2012; Головин, 2004; 2007; Sharygin et al., 2007, 2008], а также с минералогией первичных расплавных включений (ПРВ) в оливине карбонатитов Ковдорского массива [Veksler et al., 1998; Veksler, Lentz, 2006].

Минерал	Символ	Химическая формула	ВРВ в породообразующем оливине ксенолитов	ИОиМ ксенолитов	РВ в фенокристаллах оливина из неизменных кимберлитов	ОМ неизменных кимберлитов	ПРВ в оливине карбонатитов Ковдорского массива
Пирротин	Po	$Fe_{1-x}S$	•	•	•	•	
Пентландит	Pn	$(Fe,Ni)_9S_8$	•	•	•	•	
Джерфишерит	Dj	$K_6(Na,Cu)(Fe,Ni,Cu)_{24}S_{26}Cl$	•	•	•	•	•
Расвумит	Rs	KFe_3S_4	•			•	
Галит	Hlt	$NaCl$	•		•	•	
Сильвин	Slv	KCl	•		•	•	
Афтиталит	Aph	$K_3Na(SO_4)_2$	•		•	•	
Беркеит	Burk	$Na_6CO_3(SO_4)_2$	•		•		
Тихит	Tych	$Na_6Mg_2(CO_3)_4(SO_4)$	•				
Ньеререйт	Nye	$Na_2Ca(CO_3)_2$	•		•	•	•
Шортит	Sht	$Na_2Ca_2(CO_3)_3$	•		•	•	•
Нортупит	Nrt	$Na_3Mg(CO_3)_2Cl$	•		•	•	•
Эйтелит	Eit	$Na_2Mg(CO_3)_2$	•				•
Доломит	Dol	$CaMg(CO_3)_2$	•		•		•
Арагонит	Arg	$CaCO_3$	•	•			
Кальцит	Cal	$CaCO_3$	•	•			•
Апатит	Ap	$Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$	•	•	•	•	•
Рутил	Ru	TiO_2	•			•	
Перовскит	Prv	$CaTiO_3$	•	•	•	•	
Ильменит	Ilm	$FeTiO_3$	•		•	•	
Хромит	Chr	$(Fe,Mg)(Cr,Al)_2O_4$	•	•	•	•	
Титаномагнетит	Ti-Mgt	$Fe^{2+}(Fe^{3+},Ti)_2O_4$	•		•	•	
Магнетит	Mgt	$FeFe_2O_4$	•	•	•	•	
Тетраферрифлогопит	Tphl	$KMg_3FeSi_3O_{10}(F,Cl,OH)$	•	•	•		•
Флогопит	Phl	$KMg_3AlSi_3O_{10}(F,Cl,OH)$	•	•	•	•	
Гумит	Hu	$(Mg,Fe)_7(SiO_4)_3(F,OH)_2$?	•			•
Клиногумит	Chu	$(Mg,Fe)_9[SiO_4]_4(F,OH)_2$?	•	•		
Хризотил	Chr	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	•				
Форстерит	OI	$(Mg,Fe)_2SiO_4$	FO ₉₃₋₉₇	FO ₉₃₋₉₄	FO ₉₁₋₉₆	•	•
Диопсид	Di	$CaMgSi_2O_6$	•	•	•	•	•
Монтichelлит	Mnt	$CaMgSiO_4$	•	•	•	•	•
Содалит	Sdl	$Na_8Al_6Si_6O_{24}Cl_2$	•	•	•	•	•

Примечание к Табл. 1. Идентификация минералов производилась с использованием рентгеноспектрального микроанализа, спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР-спектроскопии) и методов электронной микроскопии.

Таблица 2. Распространенность джерфишерита в кимберлитах мира.

Проявление	Кратон	Поле	Возраст	Объект	Литературный источник
Трубка Мир	Сибирский (Россия)	Мирнинское	Pz	Включения в алмазе Мантийные ксенолиты Ксенокристы/мегакристы	[Буланова и др., 1980; 1990] [Добровольская и др., 1975; Буланова и др., 1990] [Гаранин и др., 1988]
Трубка Интернациональная	Сибирский	Мирнинское	Pz	Включения в алмазе Основная масса кимберлитов	[Logvinova et al., 2008] [Sharygin et al., 2008]
Трубка Удачная-Восточная	Сибирский	Далдынское	Pz	Включения в алмазе Мантийные ксенолиты Ксенокристы/мегакристы Основная масса кимберлитов Расплавные включения в оливине кимберлита Карбонатно-хлоридные нодули	[Буланова и др., 1980; 1990; Зедгенизов и др., 1998] См. в примечании под № 1. См. в примечании под № 2. [Шарыгин и др., 2003; Sharygin et al., 2007] См. в примечании под № 3. [Sharygin et al., 2008]
Трубка Трубка Дальняя	Сибирский	Далдынское	Pz	Ксенокристы/мегакристы	[Гаранин и др., 1984]
Комсомольская	Сибирский	Алакит-Мархинское	Pz	Ксенокристы/мегакристы	[Дистлер и др., 1987]
Трубка Комсомольская-Магнитная	Сибирский	Верхнемунское	Pz	Основная масса кимберлитов	[Шарыгин и др., 2012]
Трубка Дружба	Сибирский	Чомурдахское	Pz	Мантийные ксенолиты	[Добровольская и др., 1975]
Трубка Обнаженная	Сибирский	Куойкское	Mz	Мантийные ксенолиты Основная масса кимберлитов	[Добровольская и др., 1975; Дистлер и др., 1987; Буланова и др., 1990] [Шарыгин и др., 2011]
Трубка Муза	Сибирский	Куойкское	Mz	Мантийные ксенолиты Основная масса кимберлитов	[Добровольская и др., 1975] [Добровольская и др., 1975]
Трубка Второгодница	Сибирский	Куойкское	Mz	Мантийные ксенолиты Ксенокристы/мегакристы Основная масса кимберлитов	[Добровольская и др., 1975] [Дистлер и др., 1987] [Дистлер и др., 1987; Шарыгин и др., 2011]
Трубка Базовая	Сибирский	Харамайское	Mz	Ксенокристы/мегакристы	[Гаранин и др., 1988]
Трубка Франк Смит	Каапвальский (ЮАР)		Mz	Мантийные ксенолиты	[Clarke et al., 1977; Clarke, 1979]
Трубка Бултфонтейн	Каапвальский		Mz	Расплавные включения в ильмените кимберлита	[Giuliani et al., 2012]
Трубка Элвин Бей	Слейв (Канада)	Сомерсет Айленд	Mz	Основная масса кимберлитов	[Clarke et al., 1994]
Трубки поля Лак де Гра	Слейв	Лак де Гра	Mz-Kz	Основная масса кимберлитов	[Chakhmouradian, Mitchell, 2001]
Трубка 14	Карельский (Финляндия)	Восточно-Финляндская кимберлитовая провинция	Pz	Ксенокристы/мегакристы	[O'Brien, Tyni, 2005]
Дайка Мейджаугаа	Северо-Атлантический (Гренландия)		Pr	Расплавные включения в оливине	[Kamenetsky et al., 2009b; Mernagh et al., 2011]

Примечание к Табл. 2. Возраст: Pr – протерозой; Pz – палеозой; Mz – мезозой; Kz – кайнозой. Ксенокрист/мегакрист – в данном случае обозначает крупные мономинеральные образования из кимберлитов. Возраст трубки Франк Смит из работы [Field et al., 2008]. Литературные источники: № 1 – [Добровольская и др., 1975; Дистлер и др., 1987; Специус и др., 1987; Соловьева и др., 1988; Буланова и др., 1990; Шарыгин и др., 2003; Misra et al., 2004; Sharygin et al., 2007; Шарыгин и др., 2012]; № 2 – [Добровольская и др., 1975; Дистлер и др., 1987; Специус и др., 1987; Гаранин и др., 1988; Буланова и др., 1990; Kamenetsky et al., 2009a]; № 3 – [Головин и др., 2003; 2007; Головин, 2004; Шарыгин и др., 2003; Sharygin et al., 2007].

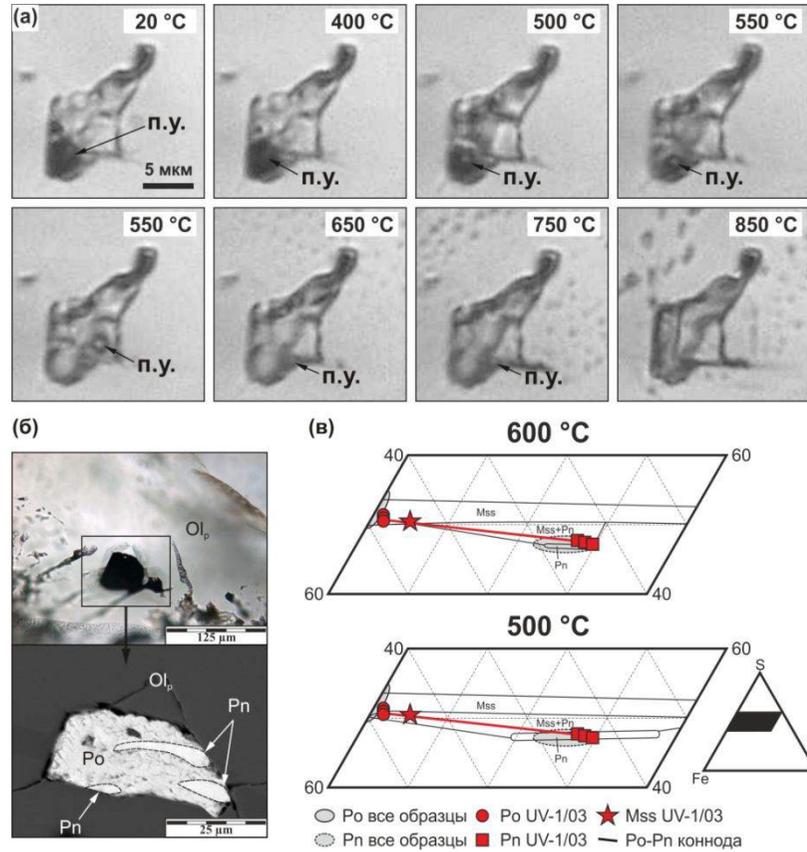


Рис. 3. (а) Термометрический эксперимент, в котором произошла гомогенизация расплавленного включения при ~ 840 °С. Первые изменения, которые принимались за температуру начала плавления, зафиксированы при ~ 490 °С. На рисунке хорошо виден пузырек усадки (п.у.), который мигрирует в процессе нагрева. (б) Расплавленное включение в оливине с ламеллами Pn в Po в проходящем и отраженном свете. (в) Составы Po, Pn и рассчитанного первоначального Mss из расплавленного включения в оливине из образца Uv-1/03, нанесенные на тройную диаграмму Fe-Ni-S (ат.%). Изотермические сечения при 600 и 500 °С соответственно из работ [Косяков и др., 2003] и [Shewman, Clark, 1970]. При 600 °С состав рассчитанного Mss лежит в поле стабильности Mss. При 500 °С состав рассчитанного Mss уже не лежит в поле стабильности, однако находится на Po-Pn конноде. Это значит, что первоначальный Mss распался на Po и Pn во время остывания между 500 и 600 °С.

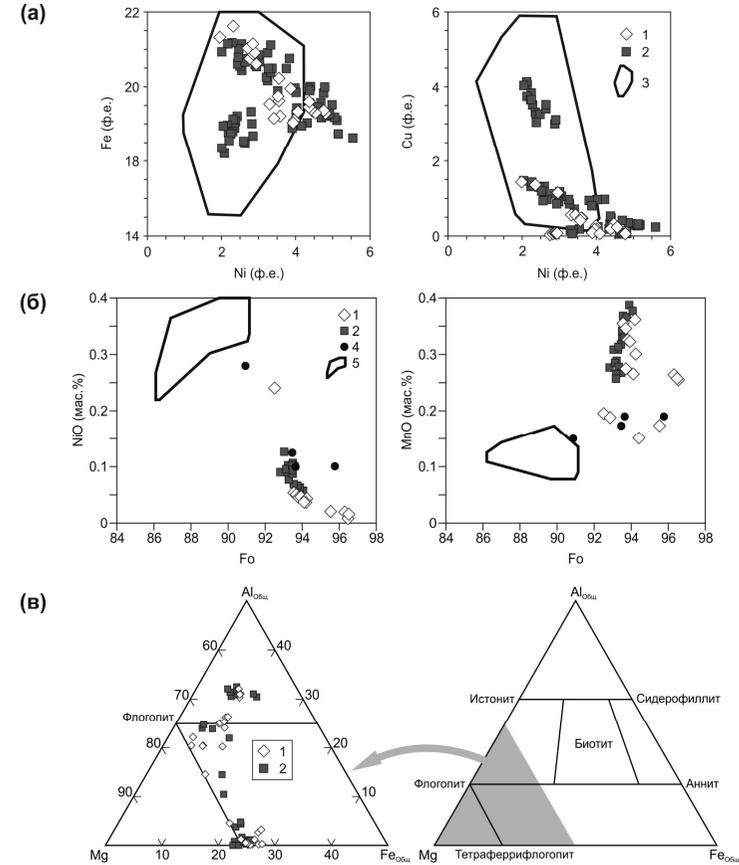


Рис. 6. Вариации состава джерфишерита (в формульных единицах), оливина (в мас.%) и слюды (в мол.%). 1 – вторичные расплавленные включения в оливине ксенолитов деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная; 2 – интерстиционные обособления и микрожилы ксенолитов деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная; 3 – основная масса кимберлитов трубки Удачная-Восточная [Sharygin et al., 2007]; 4 – расплавленные включений в оливине из кимберлитов трубки Удачная-Восточная [Головин, 2004; Головин и др., 2007]; 5 – состав породообразующего оливина ксенолитов деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная.

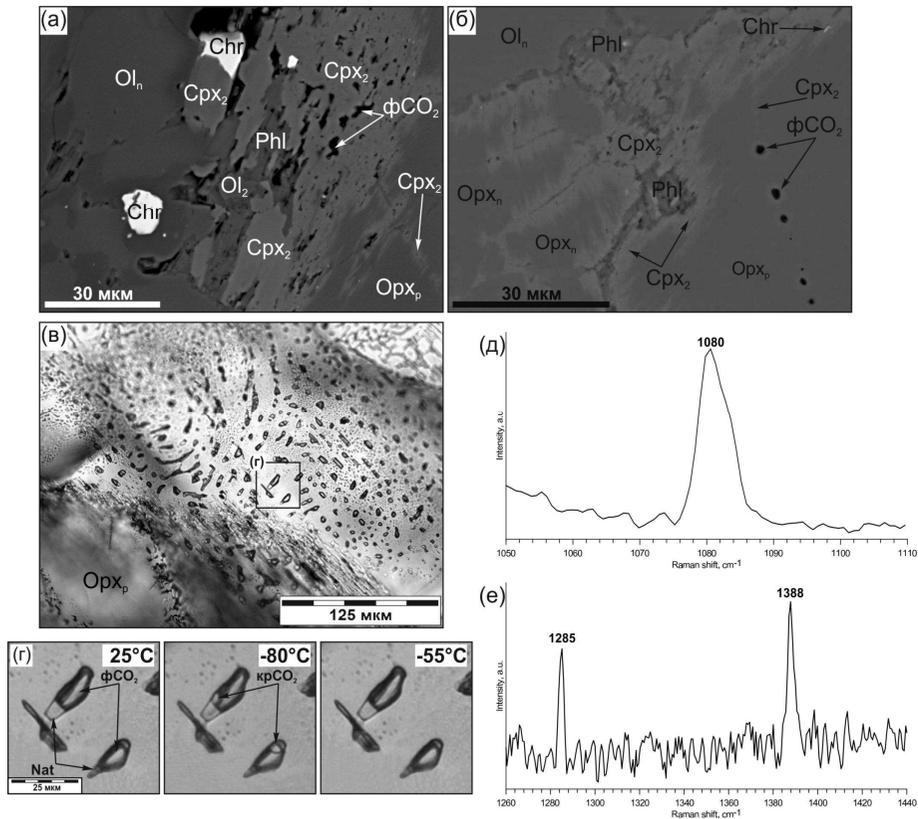


Рис. 7. (а, б) Реакционные каймы на породообразующем ортопироксене ксенолитов деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная. Изображения в отраженных электронах. (в) Вторичные флюидные включения в ортопироксене ксенолитов. (г) Поведение флюидных включений в ортопироксене при криометрическом эксперименте. При комнатной температуре флюидное обособление является гомогенным (фCO_2). При $T = -80^\circ\text{C}$ в нем присутствует кристаллическая CO_2 (крCO_2). Исчезновение кристалла происходит при $T = -56.8^\circ\text{C}$, близкой к температуре тройной точки газ-жидкость-твердое тело на диаграмме CO_2 ($T = -56,6^\circ\text{C}$). (д) КР-спектр натрита из флюидных включений. (е) КР-спектр вещества внутри флюидного обособления включений; пики 1285 и 1388 см^{-1} отвечают колебаниям молекулярной CO_2 [Burke, 2001].

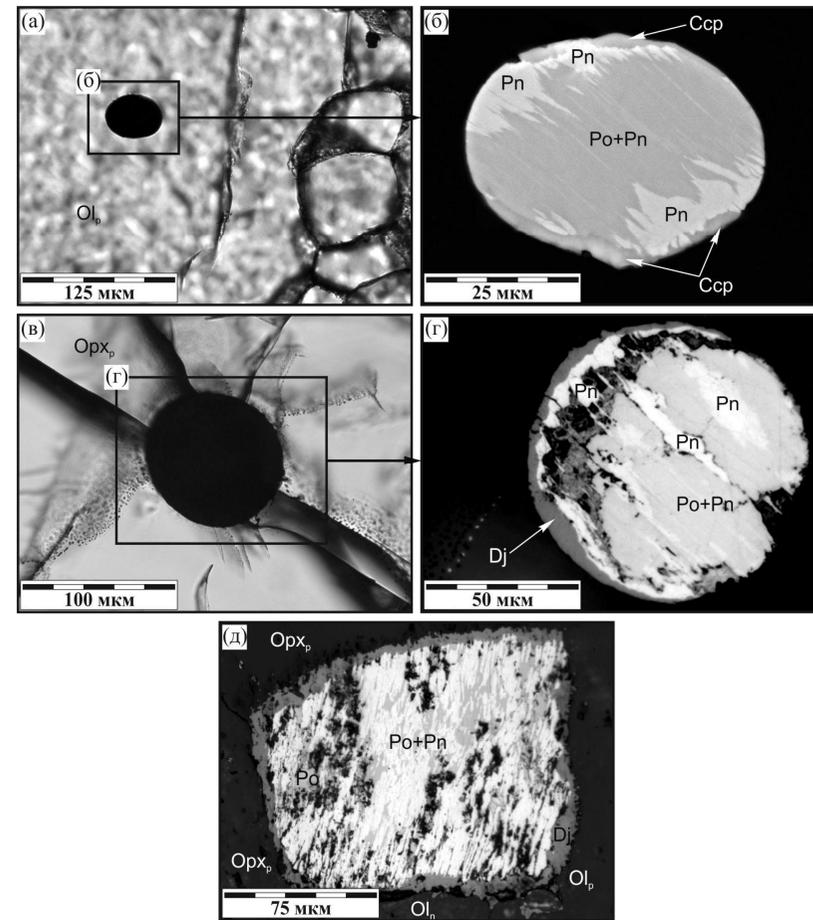


Рис. 9. (а-г) Полисульфидные глобулы в породообразующих минералах ксенолитов деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная. (а, б) Изолированная сульфидная глобула в порфирокласте оливина. (в, г) Пересеченная трещинами сульфидная глобула с каймой джерфишерита в ортопироксене. (д) Каймы джерфишерита вокруг крупных выделений первичных Fe-Ni-Cu-сульфидов в межзерновом пространстве ксенолитов. (а, в) – проходящий свет; (б) – отраженные электроны; (г, д) – отраженный свет.