

## ДЖЕРФИШЕРИТ В КСЕНОЛИТАХ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПЕРИДОТИТОВ ТРУБКИ УДАЧНАЯ-ВОСТОЧНАЯ (Якутия): ПРОБЛЕМЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ И СВЯЗЬ С КИМБЕРЛИТОВЫМ МАГМАТИЗМОМ

**И.С. Шарьгин, А.В. Головин, Н.П. Похиленко**

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

Джерфишерит — хлорсодержащий калиевый сульфид ( $K_6Na(Fe,Ni,Cu)_{24}S_{26}Cl$ ) является весьма распространенным акцессорным минералом в мантийных ксенолитах из кимберлитов. Тем не менее происхождение этого сульфида в нодулях до сих пор остается дискуссионным и в основном связывается с замещением первичных Fe-Ni-Cu-сульфидов при взаимодействии ксенолитов с обогащенным K и Cl гипотетическим расплавом/флюидом. Работа посвящена детальному изучению состава и морфологии джерфишерита из представительной коллекции (22 образца) наиболее глубоких мантийных ксенолитов — гранатовых деформированных перидотитов, отобранных из кимберлитов тр. Удачная-Восточная (Якутия). На основании исследования морфологических особенностей, пространственного распределения и характера взаимоотношений с породообразующими и другими акцессорными минералами нодулей выделено 4 типа джерфишерита в мантийных породах. Джерфишерит 1-го типа установлен по периферии полисульфидных включений в породообразующих минералах ксенолитов, где он является более поздним минералом относительно первичной сульфидной ассоциации: пирротин + пентландит ± ± халькопирит. Джерфишерит 2-го типа формирует каймы вокруг крупных полисульфидных обособлений (пирротин + пентландит) в интерстициях ксенолитов. Джерфишерит 3-го типа образует отдельные зерна и находится в интерстициях ксенолитов совместно с силикатами, оксидами, фосфатами, карбонатами и другими сульфидами. Джерфишерит 4-го типа присутствует в качестве дочерней фазы во вторичных расплавных включениях, располагающихся в залеченных трещинах в породообразующих минералах ксенолитов. Кроме джерфишерита во включениях были диагностированы силикаты, оксиды, фосфаты, различные карбонаты, щелочные сульфаты, хлориды и сульфиды. Результаты исследования указывают на генетическую связь джерфишерита из ксенолитов с кимберлитами. Образование джерфишерита как в ксенолитах деформированных перидотитов из тр. Удачная-Восточная, так и в различных ксенолитах из других кимберлитовых трубок связано с взаимодействием нодулей и кимберлитовых расплавов. Кристаллизация джерфишерита в виде отдельных зерен в интерстициях ксенолитов и в расплавных включениях происходила непосредственно из взаимодействовавшего с ксенолитами кимберлитового расплава; джерфишерит, окаймляющий первичные Fe-Ni±Cu-сульфиды, образовался за счет их замещения в результате реакции с кимберлитовым расплавом.

*Джерфишерит, кимберлиты, карбонатиты, расплавы, мантийные ксенолиты, верхняя мантия.*

## DJERFISHERITE IN XENOLITHS OF SHEARED PERIDOTITE IN THE UDACHNAYA-EAST PIPE (Yakutia): ORIGIN AND RELATION TO KIMBERLITE MAGMATISM

**I.S. Sharygin, A.V. Golovin, and N.P. Pokhilenko**

Djerfisherite, a Cl-bearing potassium sulfide ( $K_6Na(Fe,Ni,Cu)_{24}S_{26}Cl$ ), is a widespread accessory mineral in kimberlite-hosted mantle xenoliths. Nevertheless, the origin of this sulfide in nodules remains disputable. It is usually attributed to the replacement of primary Fe-Ni-Cu sulfides when xenoliths interact with a K- and Cl-enriched hypothetical melt/fluid. The paper is devoted to a detailed study of the composition and morphology of djerfisherite from a representative collection (22 samples) of the deepest mantle xenoliths — sheared garnet peridotite, taken from the Udachnaya-East kimberlite pipe (Yakutia). Four types of djerfisherite were distinguished in the mantle rocks on the basis of morphology, spatial distribution, and relationships with the rock-forming and accessory minerals in the nodules. Type 1 was found in the rims of polysulfide inclusions in the rock-forming minerals of the xenoliths; there, it was younger than the primary sulfide assemblage pyrrhotite + pentlandite ± ± chalcopyrite. Type 2 formed rims around large polysulfide segregations (pyrrhotite + pentlandite) in the xenolith interstices. Type 3 formed individual grains in the xenolith interstices together with other sulfides, silicates, oxides, phosphates, and carbonates. Type 4 was present as a daughter phase in the secondary melt inclusions which occurred in healed cracks in the rock-forming minerals of the xenoliths. Along with djerfisherite, the inclusions contained silicates, oxides, phosphates, carbonates, alkaline sulfates, chlorides, and sulfides. The results indicate that djerfisherite from the xenoliths is consanguine with kimberlite. Djerfisherite both in the sheared-peridotite xenoliths from the Udachnaya-East pipe and in different xenoliths from other kim-

berlite pipes worldwide formed owing to the interaction between the nodules and kimberlitic melts. Djerfisherite forming individual grains in the xenolith interstices and melt inclusions crystallized directly from the infiltrating kimberlitic melt. Djerfisherite bounding the primary Fe-Ni±Cu sulfides formed by their replacement as a result of a reaction with the kimberlitic melt.

*Djerfisherite, kimberlite, carbonatite, melts, mantle xenoliths, upper mantle*

## ВВЕДЕНИЕ

Джерфишерит — хлорсодержащий калиевый сульфид ( $K_6Na(Fe,Ni,Cu)_{24}S_{26}Cl$ ) является обычным минералом щелочно-ультраосновных и карбонатитовых пород сложных магматических комплексов [Kogarko et al., 1991; Clarke et al., 1994; Dawson et al., 1995; Соловова и др., 1996; Korobeinikov et al., 1998; Панина и др., 2001; Sharygin et al., 2007, 2008].

Многочисленные исследования мантийных ксенолитов также показали присутствие джерфишерита среди аксессуарных минералов. В мантийных породах джерфишерит формирует каймы вокруг Fe-Ni-Cu-сульфидов из интерстиционных ассоциаций и вокруг сульфидных глобул в породообразующих минералах [Добровольская и др., 1975; Специус и др., 1987; Дистлер и др., 1987; Соловьева и др., 1988; Буланова и др., 1990; Misra et al., 2004; Sharygin et al., 2007]. Кроме того, джерфишерит неоднократно диагностировался в ксенокристаллах/мегакристаллах, где этот минерал был установлен вокруг первичных сульфидных глобул и среди дочерних фаз в расплавных включениях [Добровольская и др., 1975; Буланова и др., 1980, 1990; Гаранин и др., 1984, 1988; Специус и др., 1987; Дистлер и др., 1987; Зедгенизов и др., 1998; Головин и др., 2003, 2007; Logvinova et al., 2008; Kamenetsky et al., 2009a].

В самих кимберлитах находки джерфишерита до недавнего времени были единичны [Добровольская и др., 1975; Дистлер и др., 1987]. Вместе с тем современные исследования показали, что этот калиевый сульфид является довольно обычным позднемагматическим минералом основной массы кимберлитов кратонов Слейв (Канада) и Сибирского (Россия) [Clarke et al., 1994; Chakhmouradian, Mitchell, 2001; Шарыгин и др., 2003, 2011; Sharygin et al., 2007, 2008].

В мантийных ксенолитах и ксенокристаллах/мегакристаллах образование джерфишерита в основном связывается с замещением и обрастанием первичных Fe-Ni-Cu-сульфидов в результате воздействия обогащенного K и Cl гипотетического расплава/флюида [Добровольская и др., 1975; Буланова и др., 1980, 1990; Гаранин и др., 1988; Соловьева и др., 1988; Sharygin et al., 2007]. Однако состав и источник этого расплава/флюида, а также время и *PT* параметры его взаимодействия с мантийными породами не определены. О возможности существования в мантийных условиях таких расплавов/флюидов свидетельствуют находки микровключений в алмазах со значительными содержаниями щелочей и хлора [Israeli et al., 2001, 2004; Klein-BenDavid et al., 2004, 2007, 2009; Зедгенизов и др., 2007a,б; Polyakov et al., 2007; Logvinova et al., 2008; Соболев и др., 2009].

С другой стороны, в единичных работах происхождение джерфишерита в мантийных ксенолитах связывается с выносами их кимберлитовыми расплавами. Присутствие джерфишерита в двух ксенолитах алмазоносных эклогитов из тр. Удачная объясняется метасоматозом, который произошел на глубинах верхней мантии после попадания ксенолитов в кимберлитовый расплав [Misra et al., 2004]. Изучение ксенолита шпинелевого лерцолита из неизмененных кимберлитов тр. Удачная-Восточная показало, что образование джерфишерита в нем связано с инфильтрацией кимберлитового расплава и его реакцией с первичными Fe-Ni-Cu-сульфидами, вероятно, в приповерхностных условиях [Sharygin et al., 2007].

Таким образом, относительно генезиса джерфишерита в мантийных ксенолитах, на наш взгляд, существуют два явных факта: джерфишерит по сравнению с породообразующими минералами и Fe-Ni-Cu-сульфидами является более поздней аксессуарной фазой; образование этого сульфида связано с расплавами/флюидами, обогащенными щелочами и хлором.

Происхождение поздних фаз (например, интерстиционных минералов, стекол, вторичных расплавных и флюидных включений) в мантийных ксенолитах из различных регионов мира до сих пор вызывает серьезные дебаты [Schiano, Clocchiatti, 1994; Boyd et al., 1997; Shaw et al., 1998; Andersen, Neumann, 2001; Головин, Шарыгин, 2007]. Главными дискуссионными вопросами являются: источники и состав расплавов/флюидов, взаимодействовавших с мантийными породами, время и *PT* параметры образования как самих расплавов/флюидов, так и продуктов их взаимодействий с мантийными ксенолитами. В целом в большинстве работ предполагается, что мигрирующие мантийные расплавы/флюиды, приводящие к образованию поздних фаз в мантийных ксенолитах, генетически не связаны с магмами, выносящими ксенолиты к поверхности. Как видно из представленного выше обзора, присутствие джерфишерита и его неоднозначное происхождение в мантийных ксенолитах из кимберлитов затрагивают все те же проблемы.

Отсутствие работ, основанных на значительных статистических данных по морфологическим особенностям и вариациям состава джерфишерита в мантийных ксенолитах, анализе взаимоотношений с

сосуществующими минералами, а также его дискуссионный генезис обуславливает интерес к дальнейшему изучению этого минерала. Исследований, основанных на сопоставлении существенного массива данных по химическому составу джерфишерита как в мантийных ксенолитах, так и непосредственно вмещающих их кимберлитов, не проводилось.

В настоящей работе приводятся результаты детального изучения джерфишерита из представительной (22 образца) коллекции ксенолитов деформированных перидотитов, сравнительного анализа состава джерфишерита в ксенолитах и во вмещающих их кимберлитах. Первоначальный выбор именно этих пород был обусловлен несколькими факторами: деформированные перидотиты являются наиболее глубинными мантийными ксенолитами, при этом они имеют существенные вариации глубин залегания (170—220 км для ксенолитов из тр. Удачная), т.е. довольно широко распространены в верхней мантии; предполагается несколько этапов преобразования химического и фазового составов деформированных перидотитов, вызванных плавлением и неоднократными проявлениями мантийного метасоматоза [Соболев, Похиленко, 1975; Boyd et al., 1997; Burgess, Harte, 1999; Егоров и др., 2004; Соловьева и др., 2008; Nimis et al., 2009; Агашев и др., 2010].

Статья посвящена исследованию морфологических особенностей, пространственному распределению и происхождению джерфишерита в мантийных породах.

### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

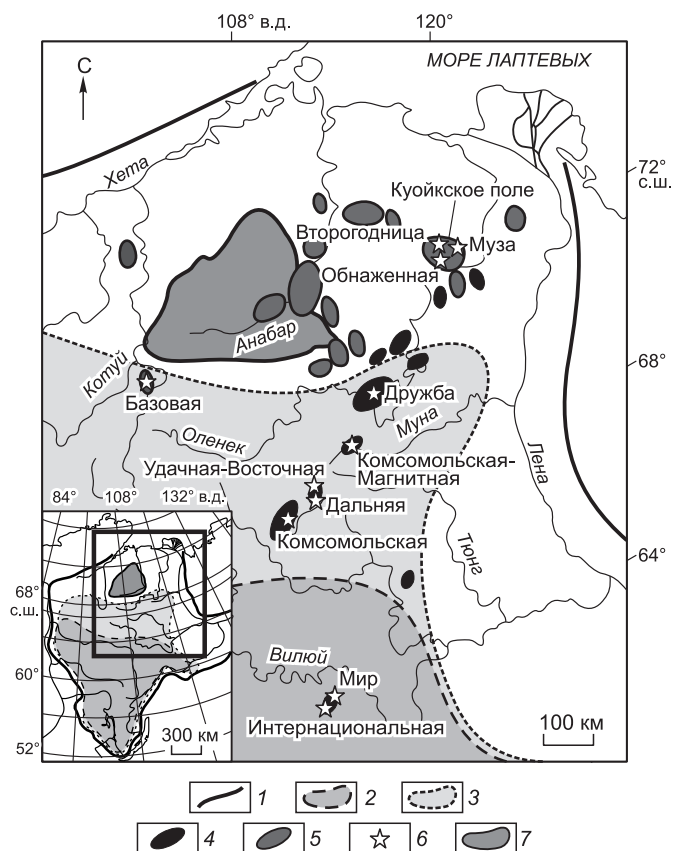
Материалом для настоящей работы являлась коллекция ксенолитов деформированных перидотитов, отобранных из блока неизменных кимберлитов восточного тела тр. Удачная.

Трубка Удачная располагается в центральной части Сибирской платформы (рис. 1) и относится к среднепалеозойскому (D—C) циклу кимберлитового магматизма [Дэвис и др., 1980; Кинни и др., 1997, Агашев и др., 2004]. Она имеет сложное строение и состоит из двух сопряженных трубок — Удачная-Западная и Удачная-Восточная. В пределах обоих кимберлитовых тел установлена многофазность внедрения кимберлитовых расплавов и выделено несколько разновидностей кимберлитовых пород [Маршинцев, 1986; Зинчук и др., 1993].

В центральной части тр. Удачная-Восточная располагаются гипабиссальные неизменные кимберлиты, слагающие субвертикальное штоковидное тело, которые были вскрыты в карьере на глубине 420 м только в 2001 г. В отличие от большинства кимберлитов мира, эти кимберлиты практически не затронуты син- и постмагматическими изменениями. По сравнению с подавляющим большинством кимберлитов Сибирской платформы, описание минералогии которых в основном ограничивается присутствием серпентина и кальцита, неизменные кимберлиты тр. Удачная-Восточная содержат порядка 20 минеральных фаз магматической кристаллизации. Среди минералов основной массы этих пород выявлены силикаты — оливин, флогопит, гумит; фосфаты представлены апатитом; оксиды — перовскитом, хромитом, Ti-магнетитом, магнетитом, рутилом и пикроильменитом; сульфиды — пирротинном, пентландитом, расвумитом и

**Рис. 1. Схема расположения кимберлитовых полей Сибирской платформы и контуры распространения соленосных кембрийских отложений и современных рассолов.**

1 — границы Сибирской платформы; 2 — область распространения кембрийских соленосных отложений, по [Алексеев и др., 2007; Мельников, 2009] с упрощениями; 3 — область сплошного распространения рассолов, по [Алексеев и др., 2007] с упрощениями; 4, 5 — поля кимберлитов: 4 — палеозойского возраста, 5 — мезозойского возраста; 6 — кимберлитовые трубки, в основной массе кимберлитов и/или мантийных ксенолитах, из которых определен джерфишерит (см. табл. 5); 7 — Анабарский щит. Положение и возраст кимберлитовых полей, по [Pohhilenko et al., 1999; Griffin et al., 1999].



джерфишеритом; карбонаты — кальцитом, доломитом, шортитом и земкоритом; хлориды — галитом и сильвином; сульфаты — афтиталитом [Sharygin et al., 2007, 2008; Kamenetsky et al., 2008; Golovin et al., 2008]. Присутствие щелочных карбонатов, сульфатов и хлоридов в матриксе пород обуславливает главную химическую особенность неизменных кимберлитов — высокие концентрации щелочей (до 8 мас. %  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) и Cl (до 6 мас. %). Другой отличительной чертой этих кимберлитов являются низкие содержания  $\text{H}_2\text{O}$  (< 0.5 мас. %). Все остальные химические характеристики пород (например, высокие концентрации  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CO}_2$  и низкие —  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) идентичны кимберлитам группы 1 мира [Kamenetsky et al., 2004, 2007a,b].

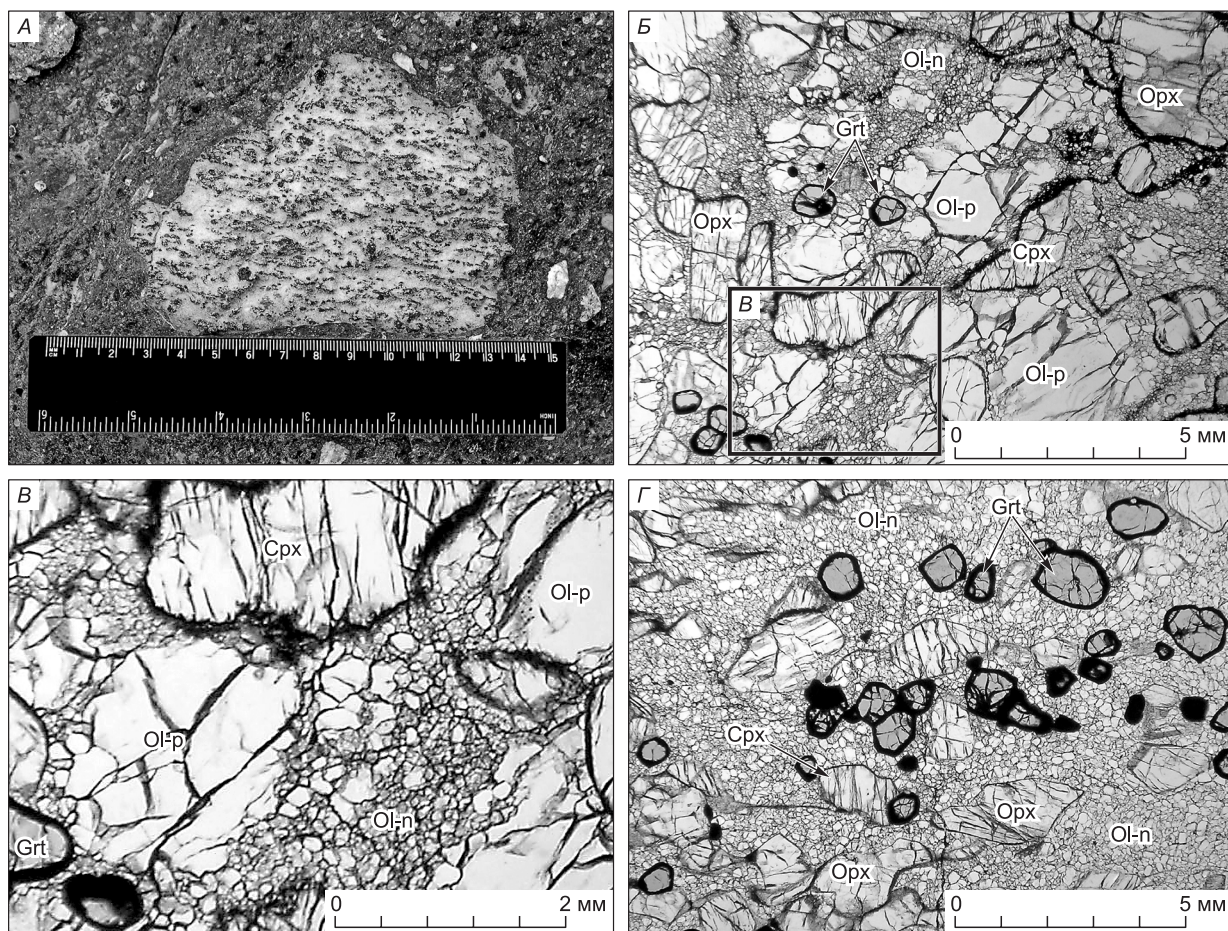
Ксенолиты мантийных пород из этого блока практически не затронуты вторичными изменениями, что выражается в отсутствии замещения оливина и ортопироксена серпентином. Петрохимические анализы ксенолитов деформированных перидотитов из неизменных кимберлитов также подтверждают отсутствие постмагматической гидратации нодулей — п.п.п. (потери при прокаливании) в изученных породах близки к нулю [Агашев и др., 2010].

Деформированные гранатовые перидотиты являются довольно распространенными ксенолитами в неизменных кимберлитах тр. Удачная-Восточная и составляют не менее 30 % от общего числа мантийных нодулей. Впервые деформированные перидотиты из тр. Удачная были охарактеризованы в работе [Соболев, 1959]. В целом ксенолиты деформированных перидотитов описаны в кимберлитах из различных регионов мира. Предполагается, что эти породы представляют собой наиболее глубинное мантийное вещество, выносимое на поверхность кимберлитовыми расплавами [Соболев, Похиленко, 1975; Boyd et al., 1997; Nimis et al., 2009; Агашев и др., 2010]. Считается, что структуры деформированных перидотитов возникли в результате рекристаллизации исходно зернистых перидотитов под воздействием деформаций, вызванных подъемом мантийного диапира, незадолго до захвата ксенолитов кимберлитовой магмой [Green, Gueguen, 1974; Bouillier, Nicolas, 1975; Goetze, 1975; Похиленко, 1990; Pearson et al., 2003]. Существует и другая точка зрения, отрицающая связь между деформациями пород и кимберлитовым магматизмом [Kennedy et al., 2002].

В структуре деформированных перидотитов выделяют порфирокласты и необласты породообразующих минералов. Порфирокласты — крупные (более 0.5 мм) ксеноморфные зерна оливина и пироксенов, а также округлые зерна граната. Необласты представлены мелкими (менее 0.5 мм) полигональными зернами оливина, реже пироксенов. Общепринятая классификация структур этих пород [Harte, 1977; Pearson et al., 2003] основывается на объемных отношениях порфирокластов и необластов оливина. Согласно классификации, деформированные гранатовые лерцолиты из исследованной коллекции имеют порфирокластическую (рис. 2, Б, В; 8 образцов, порфирокласты оливина составляют более 10 % от всего оливина) и мозаично-порфирокластическую (см. рис. 2, Г; 14 образцов, порфирокласты оливина составляют менее 10 % от всего оливина) структуры. Породообразующие минералы этих ксенолитов представлены оливином ( $\text{Mg}\# = 100 \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}) = 86.6\text{—}91.7$ ;  $\text{NiO} = 0.3\text{—}0.4$ ,  $\text{CaO}$  до 0.1,  $\text{MnO}$  до 0.2 мас. %), ортопироксеном ( $\text{Mg}\# = 88.5\text{—}93.0$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.5\text{—}0.7$ ,  $\text{CaO} = 0.5\text{—}1.2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  до 0.34 мас. %), клинопироксеном ( $\text{Mg}\# = 87.3\text{—}92.6$ ,  $\text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Mg}) = 33.1\text{—}40.8$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.7\text{—}1.9$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 0.7\text{—}1.6$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  до 0.07 мас. %) и гранатом ( $\text{Mg}\# = 77.7\text{—}84.2$ ,  $\text{Cr}\# = 100\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al}) = 7.9\text{—}35.3$ ;  $\text{CaO} = 4.2\text{—}6.9$  мас. %). Составы порфирокластов и необластов оливина и пироксенов в одном и том же ксенолите из изученной коллекции идентичны. Более точные данные, касающиеся составов оливина из ксенолитов деформированных перидотитов, определенных методом высокой точности с предельной чувствительностью обнаружения до 20 г/т, можно найти в работе [Sobolev et al., 2009]. Здесь отметим содержания некоторых примесей (мас. %):  $\text{TiO}_2$  до 0.051,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  до 0.080,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  до 0.032,  $\text{MnO} = 0.104\text{—}0.157$ ,  $\text{CaO} = 0.032\text{—}0.104$ ,  $\text{NiO} = 0.172\text{—}0.413$ ,  $\text{CoO} = 0.0161\text{—}0.0223$  [Sobolev et al., 2009].

Температуры и давления последнего равновесия деформированных лерцолитов, по [Brey, Köhler, 1990], составляют 1225—1370 °С и 60—73 кбар. *PT* параметры, рассчитанные с использованием геобарометра [MacGregor, 1974] и геотермометра [Finnerty, Boyd, 1987], варьируют в следующих пределах:  $P = 61.5\text{—}70.5$  кбар и  $T = 1225\text{—}1370$  °С.

В породообразующих силикатах ксенолитов установлены полисульфидные глобулы (размером до 300 мкм в порфирокластах и до 15 мкм в необластах), состоящие из пентландита + пирротина + халькопирита или пентландита + пирротина + джерфишерита ± халькопирита. Структурные взаимоотношения силикатов и полисульфидных глобул первой ассоциации, а именно хаотичное расположение глобул и отсутствие связи с разнонаправленными трещинами, полностью пересекающими зерна минерала-хозяина, а также с ориентировкой спайности, позволяют предположить, что глобулы образовывались во время кристаллизации силикатов. От крупных полисульфидных глобул в порфирокластах иногда расходятся радиальные трещины, в которых присутствуют мелкие округлые выделения сульфидов, что свидетельствует о существовании сульфидного расплава в виде отдельной фазы во время образования как порфирокластов, так и необластов. В дальнейшем этот сульфидный расплав раскристаллизовывался с образованием Fe-Ni-Cu-сульфидов.



**Рис. 2. Фотографии ксенолитов деформированных лерцолитов из неизменных кимберлитов тр. Удачная-Восточная.**

*А* — ксенолит деформированного лерцолита в неизменном кимберлите; *Б* — лерцолит с порфирокластической структурой, обр. UV-6/05; *Б'* — увеличенный участок шлифа, демонстрирующий взаимоотношения двух типов породообразующего оливина: крупные ксеноморфные выделения — порфирокласты и мелкие полигональные зерна — необласты; *Г* — лерцолит с мозаично-порфирокластической структурой, обр. UV-34/03. *Б–Г* — фото в проходящем свете. Grt — гранат, Opх — ортопироксен, Cpx — клинопироксен, Ol-p — порфирокласты оливина, Ol-n — необласты оливина.

В интерстициях ксенолитов между породообразующими минералами выявлены крупные (до 300 мкм) обособления Fe-Ni-сульфидов, представленные пирротином и пентландитом. Кроме того, в интерстиционных ассоциациях выявлены оливин ( $Mg\# = 93.9–94.4$ ; NiO до 0.1, CaO = 0.1–0.3, MnO = 0.3–0.4 мас. %), клинопироксен ( $Mg\# = 88.3–92.1$ ;  $Al_2O_3 = 0.2–0.9$ ,  $Cr_2O_3$  до 0.4 мас. %), монтичеллит, содалит, флогопит, тетраферрифлогопит, минералы группы шпинели (хромит и магнетит), перовскит, апатит, кальциевый карбонат, пирротин и джерфшерит.

В породообразующих минералах ксенолитов присутствуют вторичные расплавные включения. В целом последние имеют карбонатно-силикатный состав с высоким содержанием щелочей и хлора. Расплавные включения состоят из флюидного обособления + тонкораскристаллизованного агрегата (карбонаты, сульфаты, хлориды) + прозрачных дочерних кристаллических фаз ± рудных фаз. Среди прозрачных кристаллических фаз во включениях определены силикаты (тетраферрифлогопит, оливин), апатит, хлориды (галит, сильвин), различные карбонаты (в том числе содержащие щелочи и хлор) и сульфаты. Рудные фазы представлены оксидами (перовскит, магнетит) и сульфидами (джерфшерит, пирротин, пентландит и, возможно, расвумит —  $KFe_2S_3$ ) [Golovin et al., 2008].

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование взаимоотношений и предварительная идентификация акцессорных и породообразующих минералов мантийных ксенолитов осуществлялось с использованием оптического микроскопа Olympus BX51, совмещенного с фотокамерой Olympus COLOR VIEW III, и электронных сканирующих

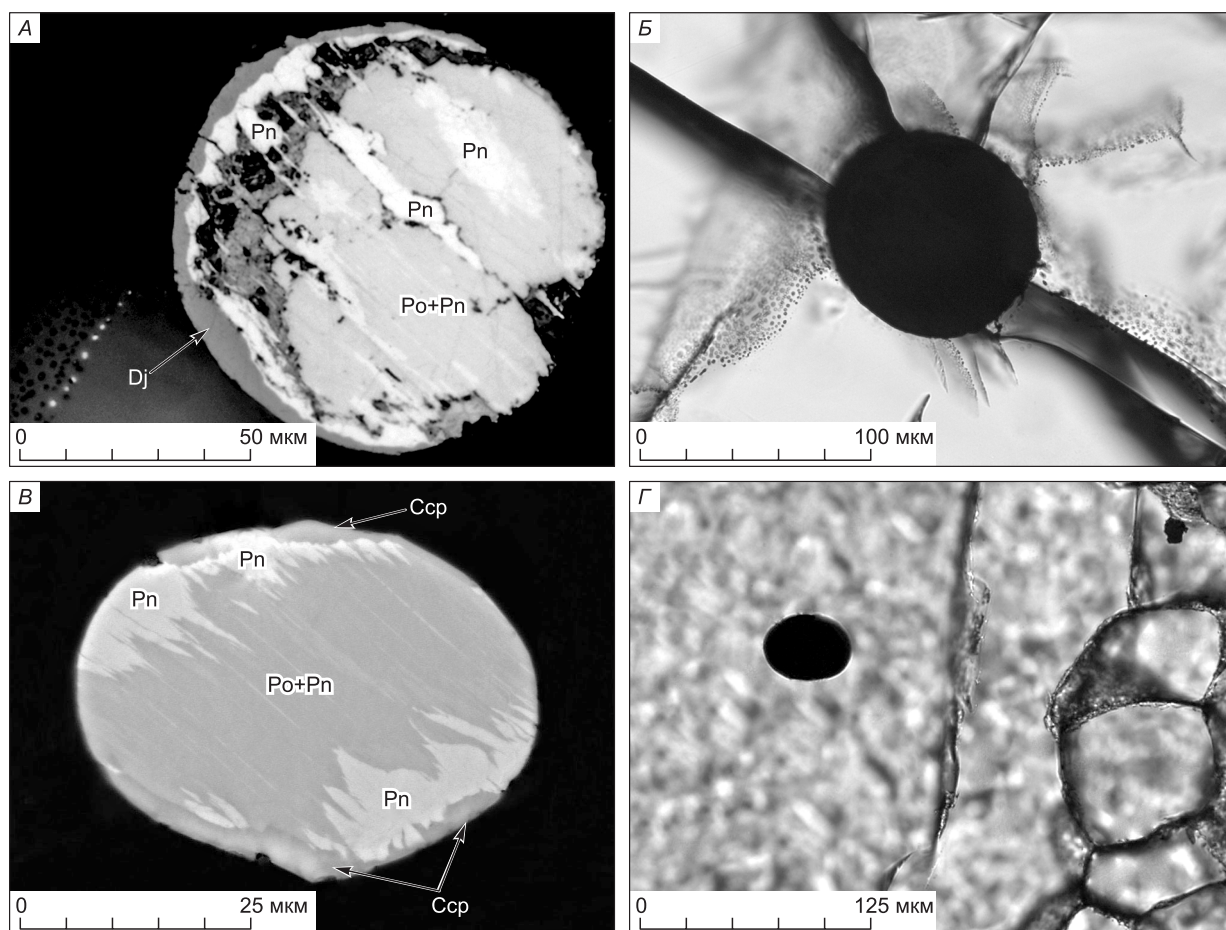
микроскопов JEOL 6380LA и LEO 1430VP, снабженных системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments), в Институте геологии и минералогии СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Химический состав джерфшераита определялся посредством рентгеноспектрального анализа на микрозондах Camebax-Micro и JEOL JXA-8100 в ИГМ СО РАН. Параметры съемки составляли:  $I = 10$  и  $15$  нА соответственно,  $V = 20$  кВ,  $t = 10$  с — для каждого элемента, размер пучка зонда —  $2$  мкм. Использовались следующие стандарты: Fe, S — FeS (пирротин), Cu — CuFeS<sub>2</sub> (халькопирит) Co, Ni — FeNiCo сплав, K — ортоклаз, Na — альбит, Cl — хлорапатит.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Джерфшераит в ксенолитах: пространственное распределение и морфология

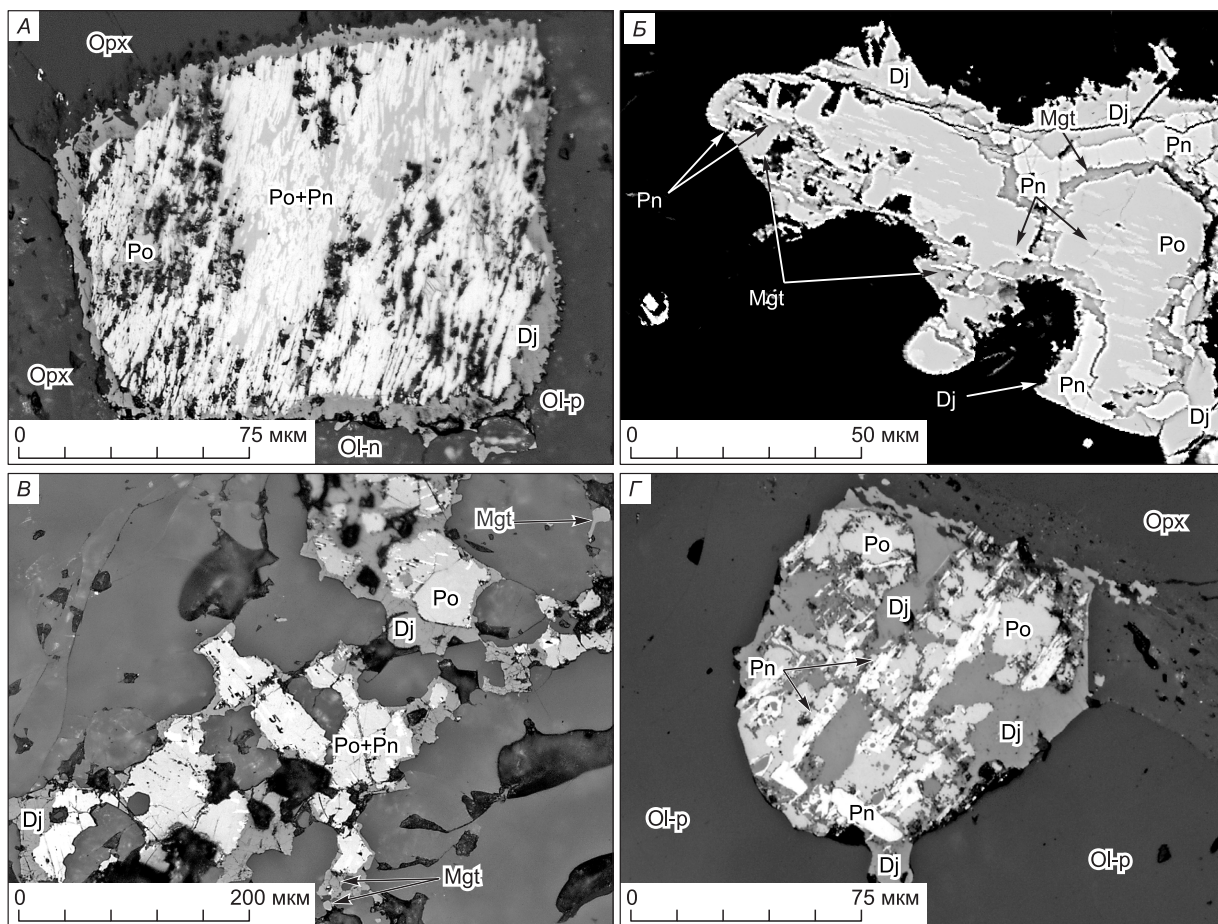
Джерфшераит является преобладающим сульфидным минералом в ксенолитах деформированных лерцолитов и характеризуется широкими вариациями химического состава, а также разнообразной морфологией. В породообразующих минералах джерфшераит установлен в полисульфидных глобулах и в виде дочерней фазы во вторичных включениях расплава. В интерстициях джерфшераит встречается в составе крупных полисульфидных обособлений, в сростаниях с пирротинном и в виде самостоятельных выделений. Для систематизации полученных результатов по морфологическим особенностям, пространственному распределению и характеру взаимоотношения с породообразующими и другими акцессорными минералами нодулей мы выделили 4 типа джерфшераита в изученных мантийных породах.

Джерфшераит 1-го типа располагается по периферии полисульфидных глобул в порфирикластах породообразующих минералов, окаймляя Fe-Ni-Cu-сульфиды (рис. 3, А). Иногда джерфшераит находит-



**Рис. 3.** Полисульфидные глобулы в породообразующих минералах ксенолитов деформированных лерцолитов.

А, Б — пересеченная трещинами сульфидная глобула с каймой джерфшераита в ортопироксене, обр. UV-268/02; В, Г — изолированная сульфидная глобула в порфирикласте оливина, обр. UV-6/05. А — фото в отраженном свете, Б, Г — в проходящем свете, В — обратнорассеянные электроны (BSE image). Po — пирротин, Pn — пентландит, Csp — халькопирит, Dj — джерфшераит.



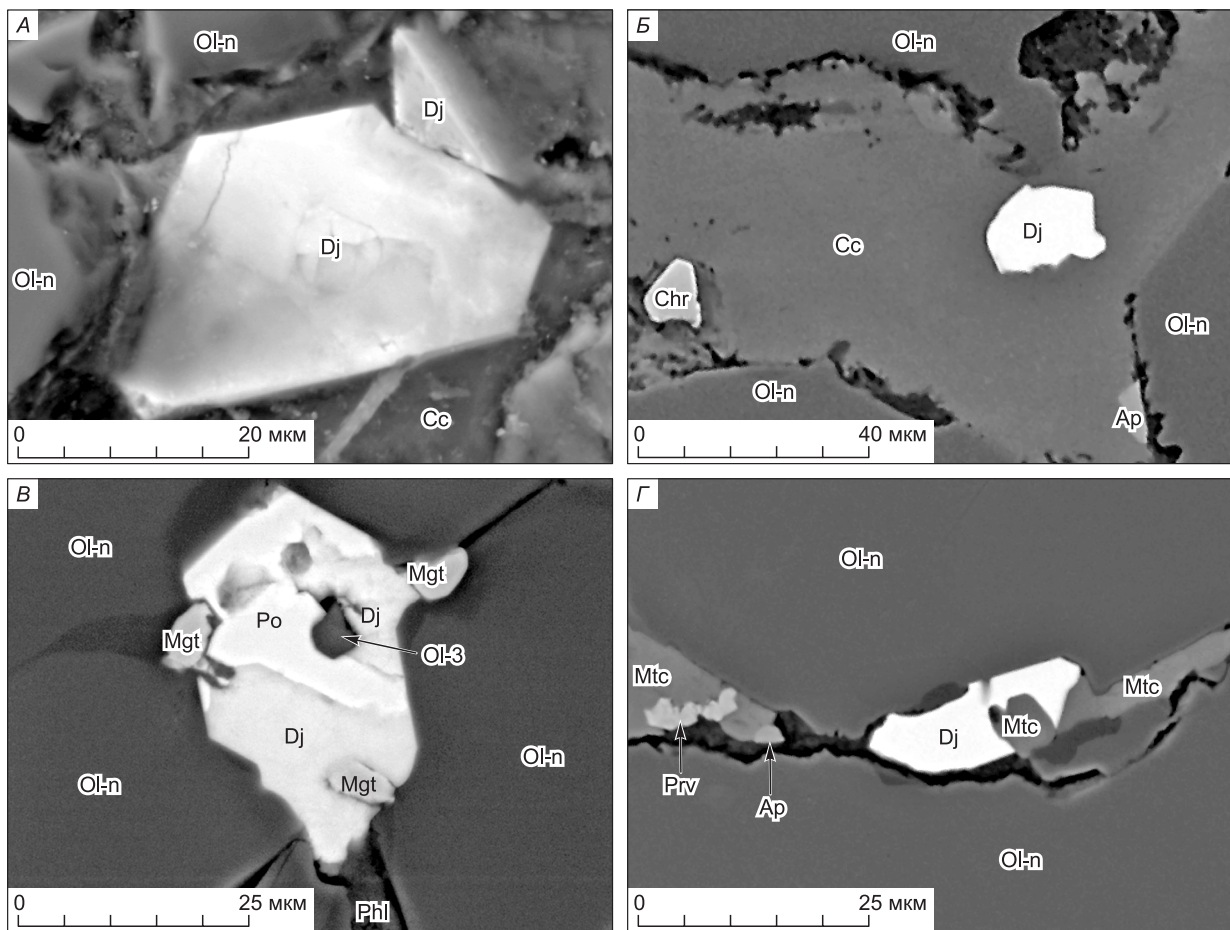
**Рис. 4.** Полисульфидные обособления в интерстициях ксенолитов деформированных лерцолитов.

*A—B* — каймы джерфишерита вокруг более ранних Fe-Ni-сульфидов в интерстициях, джерфишерит обрастает и/или замещает более ранние Fe-Ni-сульфиды: *A* — обр. UV-3/05, *B* — обр. UV-32/04, *B* — обр. UV-87/03; *Г* — замещение пентландита джерфишеритом, обр. UV-17/04. *A—Г* — фото в отраженном свете. Mgt — магнетит. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2, 3.

ся во внутренней части глобул, образуя выделения неправильной формы. Следует отметить, что полисульфидные глобулы, в которых установлен джерфишерит, пересекаются трещинами, проходящими через весь минерал-хозяин (см. рис. 3, *B*). Изолированные полисульфидные глобулы состоят только из халькопирита, пентландита и пирротина (см. рис. 3, *B*, *Г*). Таким образом, существует несомненная связь между пересекающимися полисульфидными глобулами трещинами и присутствием джерфишерита в составе глобул. Взаимоотношения сульфидов в глобулах указывают на то, что джерфишерит, вероятно, является более поздним минералом, образовавшимся за счет замещения Fe-Ni-Cu-сульфидов, преимущественно пентландита из-за подобия структур. В целом неравномерное распространение джерфишерита в глобулах может быть объяснено ориентировкой трещин и избирательным замещением Fe-Ni-Cu-сульфидов. В некоторых случаях совместно с джерфишеритом в каймах присутствуют карбонат кальция, тетраферрифлогопит и магнетит.

Джерфишерит 2-го типа выявлен в виде кайм вокруг (рис. 4, *A—B*) и выделений неправильной формы внутри (см. рис. 4, *Г*) крупных (до 300 мкм) полисульфидных обособлений в интерстициях ксенолитов. Толщина кайм джерфишерита варьирует от нескольких до 25 мкм. Fe-Ni-сульфиды в интерстициях представлены ассоциацией пентландита и пирротина, эти же минералы были установлены и в полисульфидных глобулах в породообразующих силикатах. В каймах джерфишерита присутствуют кристаллические включения магнетита (см. рис. 4, *B*), кальциевого карбоната, тетраферрифлогопита. Взаимоотношения между сульфидными минералами в таких полисульфидных обособлениях указывают на замещение и/или обрастание более ранних Fe-Ni-сульфидов джерфишеритом (см. рис. 4), в первую очередь пентландита (например, см. рис. 4, *Г*), что характерно, как отмечалось выше, и для полисульфидных глобул.

Джерфишерит 3-го типа образует отдельные (размером до 50 мкм) оgranенные (рис. 5, *A*) и полуоgranенные (см. рис. 5, *B*, *B*) зерна, реже выделения неправильной формы (см. рис. 5, *Г*) в интерстициях



**Рис. 5. Отдельные и в сростании с другими минералами выделения джердзшерита в интерстициях ксенолитов деформированных лерцолитов.**

*A* — кристалл джердзшерита, обр. UVK-10/05; *Б* — полуограненное зерно джердзшерита в ассоциации с карбонатом кальция, апатитом и хромитом, обр. UV-17/04; *В* — джердзшерит в ассоциации с пирротинном, магнетитом, оливином и флогопитом, обр. UV-34/03; *Г* — зерно джердзшерита неправильной формы в ассоциации с монтичеллитом, перовскитом и апатитом, обр. UV-4/05. *A—Г* — обратнорассеянные электроны. Mtc — монтичеллит, Phl — флогопит, Ap — апатит, Prv — перовскит, Chr — хромит, Cc — карбонат кальция, Ol-3 — оливин интерстиционных ассоциаций. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2—4.

ксенолитов. Иногда джердзшерит находится в сростании с пирротинном (см. рис. 5, *В*) и в нем присутствуют кристаллические включения оливина, монтичеллита, флогопита, тетраферрифлогопита и магнетита. Джердзшерит этого типа пространственно не связан с крупными обособлениями Fe-Ni-сульфидов в интерстициях.

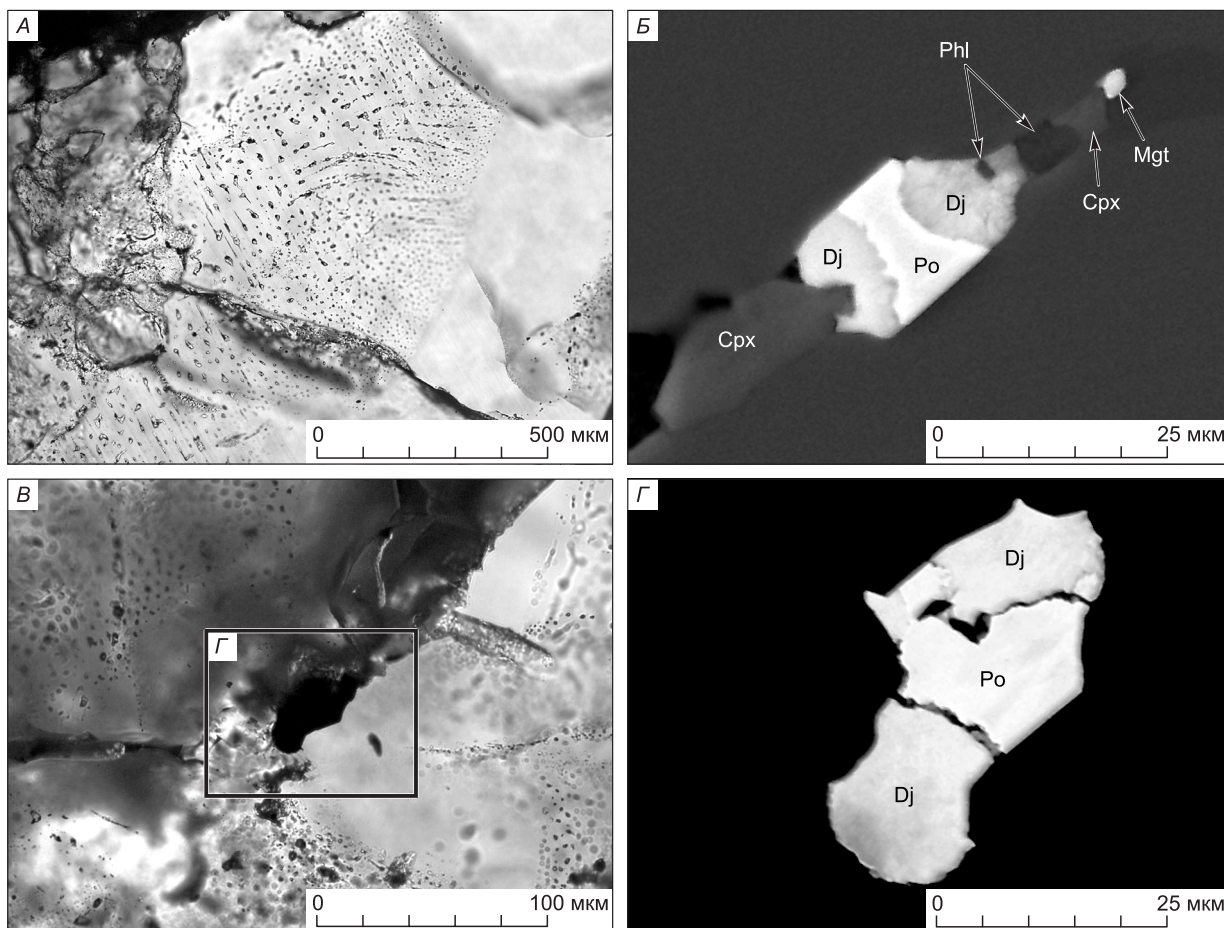
Джердзшерит 4-го типа присутствует в качестве дочерней фазы во вторичных расплавных включениях в породообразующих минералах ксенолитов (рис. 6). Расплавные включения располагаются вдоль залеченных трещин, полностью пересекающих минерал-хозяин (см. рис. 6, *А*). Наиболее крупные, пригодные для изучения, включения находятся в оливине (как в порфирокластах, так и в необластах) (см. рис. 6, *А, В*). В расплавных включениях джердзшерит образует отдельные огранные и полуогранные зерна или выделения неправильной формы, нередко в сростании с пирротинном (см. рис. 6, *Б, Г*).

#### **Химический состав джердзшерита**

Джердзшерит 1-го типа характеризуется широкими вариациями состава, мас. % (табл. 1): Fe = 34.8—45.3, Ni = 7.7—19.5, Co до 0.6, Cu = 0.1—6.3, K = 8.9—9.5, Na до 0.2, S = 31.2—33.9, Cl = 1.2—1.5. В пределах одной глобулы состав джердзшерита часто сильно варьирует по содержанию Fe, Ni и Cu (см. табл. 1), что может быть связано с неравномерным замещением первичных Fe-Ni-Cu-сульфидов.

Джердзшерит 2-го типа по составу близок к 1-му типу, мас. % (табл. 2, рис. 7): Fe 37.5—44.9; Ni 8.0—16.9; Co до 0.4; Cu 0.4—7.0; K 8.9—9.5; Na до 0.2; S 31.8—34.4; Cl 1.2—1.5. В пределах одной кай-





**Рис. 6. Джерфишерит из расплавных включений в оливинах ксенолитов деформированных лерцолитов.**

*A* — общий вид вторичных расплавных включений в порфиорокласте и необластах оливина, обр. UV-8/05; *Б–Г* — джерфишерит в сростании с пирротинитом (срез отдельных расплавных включений), обр. UV-87/03. *A, B* — фото в проходящем свете, *Б, Г* — обратнорассеянные электроны. Усл. обозн. см. на рис. 2–5.

мы для джерфишерита второго типа также наблюдаются существенные изменения состава (см. табл. 2).

Для джерфишерита 3-го типа по содержанию *Cu* выделяются две группы составов, мас. % (табл. 3, см. рис. 6): с высокими концентрациями *Cu* ( $Cu = 7.4–10.2$ ,  $Fe = 39.7–42.6$ ,  $Ni = 4.5–6.5$ , *Co* до 0.2) и низкими *Cu* ( $Cu = 0.1–3.7$ ,  $Fe = 41.6–47.4$ ,  $Ni = 4.6–12.2$ , *Co* = 0.1–0.9). В пределах одного зерна (центр-край) изменения концентраций *Fe*, *Ni* и *Cu* редки и незначительны (см. табл. 3).

Джерфишерит 4-го типа близок по составу к 3-му типу, обедненному *Cu*, и имеет следующие вариации, мас. % (табл. 4):  $Fe = 43.1–47.9$ ,  $Ni = 4.5–11.1$ , *Co* до 0.3,  $Cu = 0.1–3.6$ ,  $K = 9.0–9.5$ , *Na* до 0.3,  $S = 32.4–34.9$ ,  $Cl = 1.3–1.6$ .

В целом для всех типов джерфишерита наблюдаются широкие вариации концентраций *Fe*, *Ni* и *Cu* (см. рис. 7). Тем не менее можно отметить некоторые закономерности изменений составов различных типов джерфишерита. Области составов джерфишерита 1-го и 2-го типов практически идентичны. То же самое типично для полей составов джерфишерита 3-го типа с низкими содержаниями *Cu* и джерфишерита 4-го типа. Область составов джерфишерита 1-го и 2-го типов существенно перекрываются с полями составов джерфишерита 3-го и 4-го. При этом часть составов джерфишерита 1-го и 2-го типов характеризуется более высоким содержанием никеля относительно джерфишерита 3-го и 4-го типов (см. рис. 7).

Таблица 1. **Представительные анализы джерфишерита из полисульфидных глобул в породообразующих минералах ксенолитов деформированных лерцолитов (мас. %)**

| Элемент                           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| K                                 | 9.07   | 9.18   | 9.14   | 9.30   | 9.21   | 9.24   | 9.45   | 9.50   | 9.41   | 9.08   | 9.16   | 9.32   |
| Na                                | 0.17   | 0.00   | 0.14   | 0.10   | 0.12   | 0.00   | 0.01   | 0.11   | 0.20   | 0.01   | 0.22   | 0.14   |
| Fe                                | 37.65  | 34.77  | 40.33  | 41.34  | 38.38  | 41.80  | 44.37  | 43.45  | 40.89  | 38.10  | 41.70  | 41.57  |
| Ni                                | 16.96  | 19.55  | 14.15  | 11.25  | 16.29  | 10.97  | 10.45  | 11.17  | 14.80  | 15.16  | 7.73   | 8.12   |
| Co                                | 0.49   | 0.60   | 0.15   | 0.08   | 0.11   | 0.05   | 0.04   | 0.12   | 0.18   | 0.59   | 0.23   | 0.32   |
| Cu                                | 1.95   | 1.52   | 2.16   | 2.67   | 1.24   | 2.97   | 0.24   | 0.21   | 0.36   | 3.32   | 6.26   | 5.82   |
| S                                 | 31.66  | 32.46  | 32.15  | 33.84  | 32.51  | 32.87  | 33.84  | 33.69  | 32.21  | 32.18  | 32.37  | 32.79  |
| Cl                                | 1.36   | 1.25   | 1.36   | 1.25   | 1.39   | 1.25   | 1.37   | 1.47   | 1.41   | 1.33   | 1.37   | 1.43   |
| Сумма                             | 99.31  | 99.33  | 99.58  | 99.83  | 99.25  | 99.15  | 99.77  | 99.72  | 99.46  | 99.77  | 99.04  | 99.51  |
| <b>Формула рассчитана на 26 S</b> |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| K                                 | 6.108  | 6.029  | 6.061  | 5.859  | 6.040  | 5.993  | 5.954  | 6.012  | 6.228  | 6.016  | 6.033  | 6.060  |
| Na                                | 0.195  | 0.000  | 0.158  | 0.107  | 0.134  | 0.000  | 0.011  | 0.118  | 0.225  | 0.011  | 0.246  | 0.155  |
| Fe                                | 17.750 | 15.988 | 18.723 | 18.234 | 17.621 | 18.981 | 19.570 | 19.250 | 18.948 | 17.672 | 19.228 | 18.922 |
| Ni                                | 7.607  | 8.553  | 6.250  | 4.721  | 7.115  | 4.739  | 4.385  | 4.708  | 6.525  | 6.690  | 3.391  | 3.517  |
| Co                                | 0.219  | 0.261  | 0.066  | 0.033  | 0.048  | 0.022  | 0.017  | 0.050  | 0.079  | 0.259  | 0.100  | 0.138  |
| Cu                                | 0.808  | 0.614  | 0.881  | 1.035  | 0.500  | 1.185  | 0.093  | 0.082  | 0.147  | 1.353  | 2.537  | 2.328  |
| S                                 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 |
| Cl                                | 1.010  | 0.905  | 0.995  | 0.868  | 1.005  | 0.894  | 0.952  | 1.026  | 1.029  | 0.972  | 0.995  | 1.025  |

Примечание. 1, 2 — обр. UV-6/05; 3—5 — одна кайма в разных точках, обр. UV-8/05; 6 — обр. UV-8/05; 7, 8 — одна кайма в разных точках, обр. UV-17/04; 9 — обр. UV-17/04; 10 — обр. UV-27/04; 11, 12 — обр. UV-268/02.

Таблица 2. **Представительные анализы джерфишерита из полисульфидных обособлений в интерстициях ксенолитов деформированных лерцолитов (мас. %)**

| Элемент                           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| K                                 | 9.26   | 9.02   | 8.91   | 9.46   | 9.44   | 9.28   | 9.22   | 9.20   | 9.45   | 9.15   | 9.31   | 9.43   |
| Na                                | 0.00   | 0.07   | 0.04   | 0.13   | 0.08   | 0.06   | 0.04   | 0.09   | 0.00   | 0.16   | 0.01   | 0.09   |
| Fe                                | 38.86  | 40.08  | 42.15  | 44.90  | 44.67  | 44.88  | 40.83  | 41.10  | 41.71  | 40.33  | 37.50  | 41.86  |
| Ni                                | 16.91  | 15.50  | 13.12  | 9.42   | 9.98   | 9.25   | 9.75   | 8.76   | 7.95   | 11.41  | 13.84  | 11.12  |
| Co                                | 0.21   | 0.16   | 0.09   | 0.19   | 0.39   | 0.14   | 0.04   | 0.02   | 0.10   | 0.12   | 0.24   | 0.40   |
| Cu                                | 0.93   | 0.85   | 0.70   | 0.49   | 0.42   | 0.38   | 6.07   | 6.99   | 6.82   | 4.29   | 4.10   | 2.59   |
| S                                 | 33.04  | 32.70  | 33.06  | 34.38  | 33.32  | 33.27  | 32.73  | 33.32  | 32.40  | 32.37  | 32.77  | 32.40  |
| Cl                                | 1.41   | 1.34   | 1.25   | 1.40   | 1.35   | 1.33   | 1.21   | 1.35   | 1.48   | 1.50   | 1.34   | 1.42   |
| Сумма                             | 100.63 | 99.71  | 99.32  | 100.37 | 99.65  | 98.59  | 99.87  | 100.83 | 99.90  | 99.31  | 99.10  | 99.32  |
| <b>Формула рассчитана на 26 S</b> |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| K                                 | 5.975  | 5.877  | 5.748  | 5.866  | 6.041  | 5.946  | 6.006  | 5.885  | 6.217  | 6.025  | 6.057  | 6.205  |
| Na                                | 0.000  | 0.077  | 0.044  | 0.132  | 0.086  | 0.060  | 0.040  | 0.096  | 0.000  | 0.178  | 0.013  | 0.102  |
| Fe                                | 17.554 | 18.292 | 19.032 | 19.492 | 20.006 | 20.134 | 18.617 | 18.410 | 19.215 | 18.600 | 17.080 | 19.282 |
| Ni                                | 7.269  | 6.731  | 5.637  | 3.891  | 4.253  | 3.947  | 4.229  | 3.734  | 3.485  | 5.005  | 5.995  | 4.875  |
| Co                                | 0.092  | 0.069  | 0.039  | 0.078  | 0.166  | 0.061  | 0.015  | 0.008  | 0.044  | 0.050  | 0.102  | 0.174  |
| Cu                                | 0.369  | 0.339  | 0.279  | 0.186  | 0.166  | 0.151  | 2.430  | 2.753  | 2.759  | 1.737  | 1.639  | 1.048  |
| S                                 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 |
| Cl                                | 1.001  | 0.966  | 0.886  | 0.957  | 0.953  | 0.938  | 0.867  | 0.951  | 1.073  | 1.086  | 0.963  | 1.029  |

Примечание. 1—3 — одна кайма в разных точках, обр. UV-17/04 (см. рис. 4, Г); 4—6 — одна кайма в разных точках, обр. UV-17/04; 7, 8 — одна кайма в разных точках, обр. UV-32/04; 9, 10 — обр. UV-32/04; 11 — обр. UV-67/03; 12 — обр. UV-268/02.

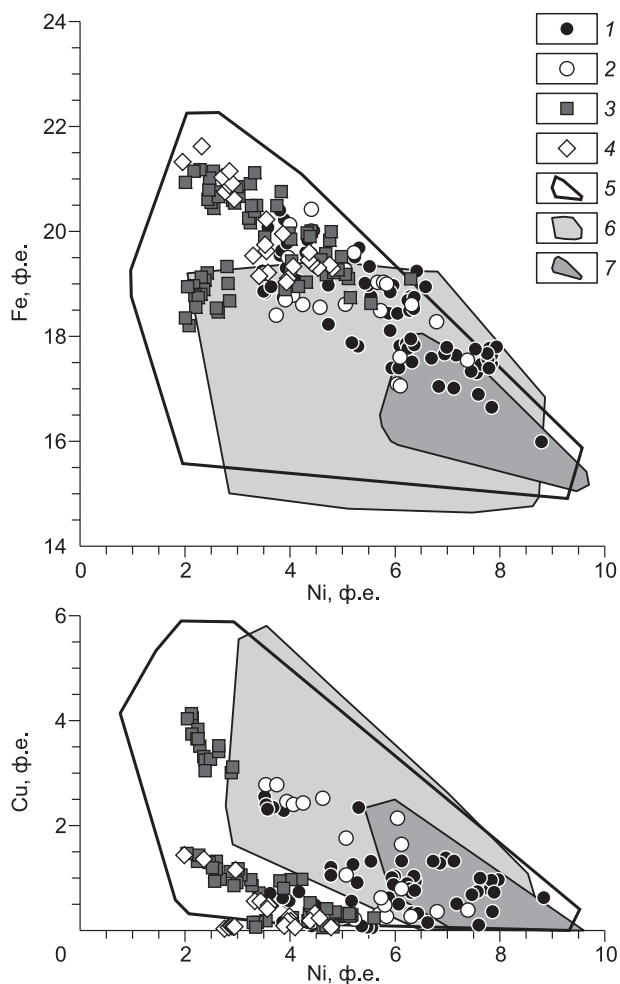
## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные в настоящей работе результаты совместно с полученными ранее данными показывают, что джерфшерит — довольно обычный акцессорный минерал мантийных ксенолитов из кимберлитов (табл. 5). В ксенолитах деформированных лерцолитов из тр. Удачная-Восточная джерфшерит является наиболее распространенным сульфидом, присутствующим среди различных акцессорных ассоциаций минералов как внутри породообразующих силикатов нодулей (в составе полисульфидных глобул и в виде дочерней фазы во вторичных расплавных включениях), так и в интерстициях мантийных пород (см. рис. 3—6). Взаимоотношение джерфшерита и породообразующих минералов деформированных лерцолитов указывает на более позднее происхождение этого сульфида, что подтверждается его отсутствием в изолированных полисульфидных глобулах как в порфирокластах, так и в необластах мантийных пород. Вместе с тем джерфшерит установлен в полисульфидных глобулах, которые пересекаются трещинами, проходящими через весь минерал-хозяин и во вторичных расплавных включениях. Представленные наблюдения свидетельствуют, что один из этапов преобразования фазового состава деформированных лерцолитов происходил в результате метасоматоза после их рекристаллизации. При этом возникает ряд вопросов о природе и составе метасоматических агентов.

**Происхождение джерфшерита в мантийных ксенолитах.** Широкое распространение джерфшерита в мантийных нодулях из кимберлитов различных областей мира (Африки и Восточной Сибири, см. табл. 5) свидетельствует, что метасоматические расплавы/флюиды, взаимодействовавшие с мантийными ксенолитами, вероятно, имели близкие составы и характеризовались довольно высокими концентрациями калия и хлора. Анализ литературных данных показывает, что джерфшерит встречается только в мантийных минералах и ксенолитах из кимберлитов. Упоминания о находках джерфшерита в мантийных ксенолитах из других магматических пород, например, базальтоидов, отсутствуют. Эти факты, по нашему мнению, не являются случайностью и свидетельствуют в пользу связи генезиса джерфшерита в мантийных ксенолитах с кимберлитовым магматизмом.

Минералогия интерстиционных ассоциаций и дочерних кристаллических фаз из расплавных включений в деформированных лерцолитах в настоящий момент до конца не изучены. Тем не менее минеральный состав раскристаллизованных расплавных включений в породообразующих силикатах ксенолитов весьма близок составу кристаллических фаз из расплавных включений во вкрапленниках и микрофенокристах оливина из кимберлитов тр. Удачная-Восточная [Головин и др., 2003, 2007; Kamenetsky et al., 2004]. Кроме того, все минералы интерстиционных ассоциаций ксенолитов, за исключением диопсида и тетраферрифлогопита, были установлены среди минералов основной массы вмещающих их кимберлитов [Головин, 2004; Kamenetsky, 2005; Golovin et al., 2008; Sharygin et al., 2008].

На вариационных диаграммах (см. рис. 7) практически все составы джерфшерита из ксенолитов деформированных лерцолитов попадают в поле составов джерфшерита из вмещающих их



**Рис. 7. Вариации состава джерфшерита (ф. ед.) из ксенолитов деформированных перидотитов.**

1 — из полисульфидных глобул в породообразующих минералах (1-й тип); 2 — из полисульфидных обособлений в интерстициях (2-й тип); 3 — отдельные выделения в интерстициях (3-й тип); 4 — из расплавных включений (4-й тип); 5 — из основной массы кимберлитов и расплавных включений в оливине кимберлитов тр. Удачная-Восточная [Головин и др., 2007; Sharygin et al., 2007]; 6 — в различных ксенолитах из кимберлитов Сибирской платформы [Добровольская и др., 1975; Гаранин и др., 1984, 1988; Соловьева и др., 1988; Дистлер и др., 1987; Буланова и др., 1990; Misra et al., 2004; Sharygin et al., 2007]; 7 — из сульфидных включений в алмазах Сибирской платформы [Буланова и др., 1990; Зедгенизов и др., 1998].

Таблица 3.

**Представительные анализы отдельных выделений джерфишерита  
в интерстициях ксенолитов деформированных лерцолитов (мас. %)**

| Элемент                           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| К                                 | 8.98   | 9.01   | 9.07   | 9.19   | 9.20   | 9.23   | 9.29   | 9.42   | 9.43   | 9.38   | 9.37   | 9.18   |
| Na                                | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.18   | 0.02   | 0.05   | 0.10   | 0.08   | 0.34   |
| Fe                                | 47.35  | 47.05  | 44.14  | 42.65  | 41.61  | 43.90  | 43.39  | 45.46  | 41.47  | 40.67  | 40.70  | 40.09  |
| Ni                                | 5.19   | 4.56   | 10.88  | 11.21  | 12.16  | 9.49   | 9.40   | 8.45   | 6.44   | 5.97   | 5.92   | 4.80   |
| Co                                | 0.28   | 0.23   | 0.13   | 0.74   | 0.92   | 0.09   | 0.10   | 0.05   | 0.12   | 0.11   | 0.14   | 0.13   |
| Cu                                | 3.37   | 3.73   | 0.08   | 0.73   | 0.58   | 0.26   | 2.44   | 0.44   | 7.44   | 8.56   | 8.69   | 10.15  |
| S                                 | 33.36  | 33.53  | 33.89  | 33.25  | 33.35  | 34.68  | 33.63  | 34.11  | 32.60  | 32.89  | 32.81  | 32.88  |
| Cl                                | 1.39   | 1.47   | 1.31   | 1.44   | 1.44   | 1.53   | 1.39   | 1.36   | 1.43   | 1.35   | 1.36   | 1.37   |
| Сумма                             | 99.92  | 99.58  | 99.50  | 99.21  | 99.26  | 99.18  | 99.82  | 99.31  | 98.98  | 99.03  | 99.07  | 98.94  |
| <b>Формула рассчитана на 26 S</b> |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| К                                 | 5.739  | 5.729  | 5.706  | 5.893  | 5.881  | 5.674  | 5.889  | 5.888  | 6.167  | 6.080  | 6.089  | 5.952  |
| Na                                | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 0.194  | 0.021  | 0.056  | 0.110  | 0.088  | 0.375  |
| Fe                                | 21.185 | 20.944 | 19.440 | 19.145 | 18.623 | 18.894 | 19.257 | 19.892 | 18.987 | 18.456 | 18.515 | 18.199 |
| Ni                                | 2.209  | 1.931  | 4.559  | 4.788  | 5.178  | 3.886  | 3.969  | 3.518  | 2.805  | 2.578  | 2.562  | 2.073  |
| Co                                | 0.119  | 0.097  | 0.054  | 0.315  | 0.390  | 0.037  | 0.042  | 0.021  | 0.052  | 0.047  | 0.060  | 0.056  |
| Cu                                | 1.325  | 1.459  | 0.031  | 0.288  | 0.228  | 0.098  | 0.952  | 0.169  | 2.994  | 3.414  | 3.474  | 4.049  |
| S                                 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 |
| Cl                                | 0.980  | 1.031  | 0.909  | 1.018  | 1.015  | 1.037  | 0.972  | 0.937  | 1.031  | 0.965  | 0.975  | 0.980  |

Примечание. 1, 2 — обр. UV-4/05; 3 — обр. UV-34/03; 4, 5 — центр и край одного зерна, обр. UV-34/03; 6 — обр. UV-59/03; 7 — обр. UV-89/03; 8 — обр. UV-17/04; 9 — обр. UV-18/04; 10, 11 — центр и край одного зерна, обр. UV-18/04; 12 — обр. UV-50/04.

Таблица 4.

**Представительные анализы джерфишерита из расплавных включений  
в оливинах ксенолитов деформированных лерцолитов (мас. %)**

| Элемент                           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| К                                 | 8.99   | 9.01   | 9.50   | 9.35   | 9.32   | 9.46   | 9.21   | 9.39   | 9.29   | 9.36   | 9.28   | 9.31   |
| Na                                | 0.00   | 0.34   | 0.00   | 0.10   | 0.00   | 0.04   | 0.02   | 0.00   | 0.00   | 0.02   | 0.00   | 0.02   |
| Fe                                | 45.82  | 47.08  | 47.90  | 44.60  | 44.48  | 44.45  | 43.34  | 47.47  | 47.42  | 44.09  | 44.21  | 42.28  |
| Ni                                | 6.67   | 4.49   | 6.19   | 8.27   | 8.42   | 7.84   | 11.10  | 6.81   | 6.54   | 9.43   | 10.26  | 11.74  |
| Co                                | 0.24   | 0.11   | 0.35   | 0.24   | 0.33   | 0.11   | 0.17   | 0.18   | 0.20   | 0.22   | 0.14   | 0.09   |
| Cu                                | 2.86   | 3.58   | 0.09   | 1.20   | 1.23   | 1.47   | 0.18   | 0.19   | 0.19   | 0.54   | 0.47   | 1.05   |
| S                                 | 33.21  | 32.95  | 33.99  | 33.90  | 34.55  | 33.98  | 33.49  | 33.88  | 34.08  | 34.48  | 33.70  | 33.40  |
| Cl                                | 1.38   | 1.47   | 1.39   | 1.50   | 1.44   | 1.54   | 1.38   | 1.58   | 1.49   | 1.40   | 1.37   | 1.48   |
| Сумма                             | 99.17  | 99.02  | 99.42  | 99.16  | 99.77  | 98.87  | 98.88  | 99.50  | 99.21  | 99.53  | 99.43  | 99.37  |
| <b>Формула рассчитана на 26 S</b> |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| К                                 | 5.771  | 5.830  | 5.959  | 5.880  | 5.751  | 5.935  | 5.863  | 5.909  | 5.812  | 5.787  | 5.871  | 5.943  |
| Na                                | 0.000  | 0.374  | 0.000  | 0.107  | 0.000  | 0.043  | 0.022  | 0.000  | 0.000  | 0.021  | 0.000  | 0.026  |
| Fe                                | 20.593 | 21.326 | 21.034 | 19.637 | 19.216 | 19.525 | 19.316 | 20.913 | 20.768 | 19.086 | 19.581 | 18.894 |
| Ni                                | 2.852  | 1.935  | 2.586  | 3.464  | 3.461  | 3.276  | 4.707  | 2.854  | 2.725  | 3.884  | 4.323  | 4.991  |
| Co                                | 0.102  | 0.047  | 0.146  | 0.100  | 0.135  | 0.046  | 0.072  | 0.075  | 0.083  | 0.090  | 0.059  | 0.036  |
| Cu                                | 1.130  | 1.425  | 0.035  | 0.464  | 0.467  | 0.567  | 0.071  | 0.074  | 0.073  | 0.205  | 0.183  | 0.412  |
| S                                 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 | 26.000 |
| Cl                                | 0.977  | 1.049  | 0.961  | 1.040  | 0.980  | 1.066  | 0.969  | 1.096  | 1.028  | 0.955  | 0.956  | 1.042  |

Примечание. 1, 2 — обр. UV-4/05; 3—6 — обр. UV-8/05; 7—11 — обр. UV-87/03; 12 — обр. UV-89/03.

Таблица 5. **Распространенность джерфишерита в кимберлитовых трубках мира**

| Трубка                               | Кратон                 | Поле, провинция                              | Возраст | Порода   | Литературный источник   |
|--------------------------------------|------------------------|--|---------|--|---|
| Мир                                  | Сибирский (Россия)     | Мирнинское                                   | PZ      | Включения в алмазе<br>Мантийные ксенолиты<br>Ксенокристы/мегакристы  | 1, 2<br>2, 3<br>4   |
| Интернациональная                    | »                      | »  | »       | Включения в алмазе<br>Основная масса кимберлитов   | 5<br>6  |
| Удачная-Восточная                    | »                      | Далдынское                                   | »       | Включения в алмазе<br>Мантийные ксенолиты<br>Ксенокристы/мегакристы<br>Основная масса кимберлитов<br>Расплавные включения в оливине<br>Карбонатно-хлоридные нодулы | 1, 2, 7<br>2, 3, 8—13<br>2—4, 8, 9, 14<br>11, 13<br>13, 15, 16<br>6 |
| Дальняя                              | »                      | »  | »       | Ксенокристы/мегакристы   | 17  |
| Комсомольская                        | »                      | Алаakit-Мархинское                           | »       | »  | 9   |
| Комсомольская-Магнитная              | »                      | Верхнемунское                                | »       | Основная масса кимберлитов   | 18  |
| Дружба                               | »                      | Чомурдахское                                 | »       | Мантийные ксенолиты  | 3   |
| Обнаженная                           | »                      | Куойкское                                    | MZ      | Мантийные ксенолиты<br>Основная масса кимберлитов  | 2, 3, 9<br>19   |
| Муза                                 | »                      | »  | »       | Мантийные ксенолиты<br>Основная масса кимберлитов  | 3<br>3  |
| Второгодница                         | »                      | »  | »       | Мантийные ксенолиты<br>Ксенокристы/мегакристы<br>Основная масса кимберлитов  | 3<br>9<br>9, 19   |
| Базовая                              | »                      | Харамайское                                  | »       | Ксенокристы/мегакристы   | 4   |
| Франк Смит                           | Каапвальский (ЮАР)     | Северо-Капская провинция                     | »       | Мантийные ксенолиты  | 20, 21  |
| Элвин Бей                            | Слейв (Канада)         | Сомерсет Айленд                              | »       | Основная масса кимберлитов   | 22  |
| Кимберлитовые трубки поля Лак де Гра | »                      | Лак де Гра                                   | MZ—KZ   | »  | 23  |
| Трубка 14                            | Карельский (Финляндия) | Восточно-Финляндская кимберлитовая провинция | PZ      | Ксенокристы/мегакристы   | 24  |

Примечание. Обобщено по литературным источникам: 1 — [Буланова и др., 1980], 2 — [Буланова и др., 1990], 3 — [Добровольская и др., 1975], 4 — [Гаранин и др., 1988], 5 — [Logvinova et al., 2008], 6 — [Sharygin et al., 2008], 7 — [Зедгенизов и др., 1998], 8 — [Специус и др., 1987], 9 — [Дистлер и др., 1987], 10 — [Соловьева и др., 1988], 11 — [Шарыгин и др., 2003], 12 — [Misra et al., 2004], 13 — [Sharygin et al., 2007], 14 — [Kamenetsky et al., 2009a], 15 — [Головин и др., 2003], 16 — [Головин и др., 2007], 17 — [Гаранин и др., 1984], 18 — неопубликованные данные авторов, 19 — [Шарыгин и др., 2011], 20 — [Clarke et al., 1977], 21 — [Clarke, 1979], 22 — [Clarke et al., 1994], 23 — [Chakhmouradian, Mitchell, 2001], 24 — [O'Brien, Tyni, 2005]. Ксенокрист/мегакрисст — в данном случае обозначает крупные мономинеральные образования из кимберлитов. Возраст тр. Франк Смит из [Field et al., 2008].

кимберлитов. Отдельные выделения джерфишерита (3-й и 4-й типы) и часть джерфишерита 1-го и 2-го типов (с относительно низкими концентрациями Ni < 6 ф.е. и 12 мас. %), составы которых идентичны, кристаллизовались непосредственно из кимберлитового или гибридного (кимберлитовый расплав + частично разворенные породообразующие силикаты мантийных ксенолитов) расплава. Часть составов джерфишерита (см. рис. 7) из полисульфидных глобул в породообразующих силикатах ксенолитов (см. рис. 3, 1-й тип) и полисульфидных обособлений из интерстиций (см. рис. 4, 2-й тип) существенно отличается повышенными содержаниями Ni (от 6 до 9 ф.е., до 19.5 мас. %). Вероятно, это связано с замещением пентландита из-за подобия структур [Evans, Clark, 1981].

Таким образом, состав аксессуарных ассоциаций из мантийных ксенолитов, в которых установлен джерфишерит, химический состав последнего в мантийных ксенолитах, идентичный составу этого сульфида из вмещающих кимберлитов, присутствие минерала только в мантийных ксенолитах из кимберли-

тов свидетельствуют в пользу связи генезиса джерфишерита в мантийных ксенолитах с кимберлитовыми магмами.

***PT* параметры кристаллизации джерфишерита.** Оценка возможных *PT* параметров образования джерфишерита в ксенолитах деформированных лерцолитов является весьма сложной задачей, так как среди аксессуарных минералов нодулей в настоящий момент не установлено надежных термометров и барометров. Можно сделать лишь некоторые предположения. По экспериментальным данным [Clarke, 1979], в системе K—Fe—Ni—S—Cl джерфишерит при атмосферном давлении кристаллизуется в интервале температур 350—650 °С. Взаимоотношения минералов указывают, что в полисульфидных глобулах и в полисульфидных обособлениях в интерстициях ксенолитов джерфишерит является более поздним минералом относительно Fe—Ni—Cu-сульфидов. Поскольку содержания халькопирита в полисульфидных ассоциациях незначительны (менее 10 об. %), для оценки температур кристаллизации пентландита и пирротина можно использовать систему Fe—Ni—S, которая хорошо изучена при давлениях первые килобары. При низких давлениях пентландит устойчив ниже 650 °С [Kullerud et al., 1969; Raghavan, 2004]. Джерфишерит в полисульфидных глобулах и обособлениях из интерстиций замещает, в первую очередь, пентландит, поэтому в низкобарической области он также должен кристаллизоваться при  $T < 650$  °С, что согласуется с экспериментальными данными по устойчивости самого джерфишерита [Clarke, 1979].

В основной массе неизмененных кимберлитов тр. Удачная-Восточная джерфишерит является позднемагматическим минералом, кристаллизовавшимся в близповерхностных условиях после микрофеннокристов оливина ( $T \approx 850$ —1000 °С) и кальцита ( $T < 750$  °С) [Мальков, 1997; Головин и др., 2007; Sharygin et al., 2007]. Джерфишерит также был диагностирован в качестве дочерней фазы в расплавных включениях во вкрапленниках и микрофеннокристаллах оливина, температуры гомогенизации которых составляют 660—800 °С. Из термометрических экспериментов следует, что джерфишерит во включениях кристаллизовался при  $T < 660$ —800 °С [Головин и др., 2003, 2007; Kamenetsky et al., 2004]. Таким образом, экспериментальные результаты хорошо согласуются с петрографическими наблюдениями и свидетельствуют о том, что джерфишерит в приповерхностных условиях кристаллизуется при  $T < 650$  °С.

Близкие температурные оценки кристаллизации джерфишерита в интерстиционных ассоциациях ( $T = 520$ —630 °С) были получены для ксенолита шпинелевого лерцолита [Sharygin et al., 2007]. На основании полученных данных предполагается, что весь джерфишерит в ксенолитах из кимберлитов может быть продуктом реакции между кимберлитовым расплавом/флюидом и первичными сульфидами в приповерхностных условиях [Sharygin et al., 2007]. Однако однозначно относительно этого ксенолита можно говорить лишь о том, что его взаимодействие с кимберлитовым расплавом происходило на глубине не ниже залегания пород шпинелевой фации.

Эксперименты по устойчивости джерфишерита при высоких *PT* параметрах отсутствуют. Вместе с тем джерфишерит был обнаружен в сульфидных включениях в алмазах [Буланова и др., 1990; Зедгенизов и др., 1998], при этом происхождение, время и *PT* параметры кристаллизации этого сульфида в алмазах не определены. Если джерфишерит действительно устойчив в области кристаллизации алмаза, можно предположить, что при высоких давлениях температуры его кристаллизации могут быть существенно выше 650 °С.

С нашей точки зрения, до тех пор, пока вопрос об устойчивости джерфишерита при мантийных *PT* параметрах остается открытым, нельзя исключать и более высокие *PT* условия образования этого минерала в мантийных ксенолитах.

**Время и длительность взаимодействия ксенолитов и кимберлитовых расплавов.** Нерешенной остается также проблема о времени, когда происходят взаимодействия ксенолитов и кимберлитовых расплавов. *PT* параметры инфильтрации кимберлитовых расплавов в ксенолиты могут не соответствовать *PT* условиям образования продуктов таких взаимодействий — кристаллизации интерстиционных ассоциаций и раскристаллизации расплавных включений. Кроме того, не понятно, одноактно это происходило или в несколько этапов, а также неопределенна длительность таких взаимодействий.

В ксенолитах деформированных лерцолитов выявлено несколько пространственно разобценных аксессуарных минеральных ассоциаций, результаты изучения которых свидетельствуют о связи их происхождения с кимберлитовым магмами. В целом есть как существенные сходства в составе интерстиционных ассоциаций и расплавных включений, так и некоторые различия, что будет рассмотрено в последующих работах. Вероятно, состав расплавных включений в оливине наиболее близко отражает состав первоначального кимберлитового расплава, а интерстиционные ассоциации кристаллизовались из гибридного расплава, образовавшегося в результате реакции между породообразующими силикатами ксенолитов и кимберлитовым расплавом. Кроме того, сам кимберлитовый расплав в процессе подъема мог существенно обогащаться Mg—Si-компонентом за счет растворения ксеногенного оливина и ортопироксена [Kamenetsky et al., 2008, 2009b]. Возможно, что состав интерстиционных ассоциаций отражает как реакцию кимберлитового расплава с ксенолитами, так и его эволюцию.

Присутствие вторичных расплавных включений и в необластах, и в порфирокластах однозначно свидетельствует, что процесс взаимодействия ксенолитов с кимберлитовым расплавом происходил после их деформации. В свою очередь, считается, что рекристаллизация деформированных перидотитов происходила незадолго до их захвата кимберлитовой магмой [Pearson et al., 2003]. В принципе, ограничений для взаимодействия деформированных лерцолитов с протокимберлитовыми жидкостями до их захвата кимберлитовыми расплавами нет. Во многих работах, посвященных образованию поздних фаз в мантийных ксенолитах, предполагается именно такая модель взаимодействия мантийных пород с расплавами/флюидами *in-situ* [Andersen, Neumann, 2001]. Более вероятно, по нашему мнению, что взаимодействие деформированных лерцолитов с кимберлитовым расплавом происходило при их транспортировке к поверхности, чему могло способствовать растрескивание как самих ксенолитов, так и породообразующих минералов в результате декомпрессии. Мы предполагаем, что такие взаимодействия могут начинаться в мантии при подъеме ксенолитов и продолжаться до поверхности. *PT* параметры образования поздних фаз в ксенолитах могут также широко варьировать от высоких мантийных до низких приповерхностных.

**Петрологические следствия.** Кимберлиты тр. Удачная-Восточная являются уникальным примером неизменных пород, химический состав основной массы которых может рассматриваться как наиболее близкий к исходному составу кимберлитового расплава в момент массовой кристаллизации. Изучение этих пород позволило установить, что кимберлитовые расплавы были обогащены щелочами и хлором мантийного происхождения [Головин и др., 2003, 2007; Шарыгин и др., 2003; Kamenetsky et al., 2004, 2007a,b, 2008, 2009a,b; Maas et al., 2005; Каменецкий и др., 2006; Sharygin et al., 2007, 2008]. Результаты изучения пород тр. Удачная-Восточная в какой-то мере противоречат устоявшимся парадигмам петрологии кимберлитов, поэтому наличие таких кимберлитов считается петрологическим парадоксом, тем более что эти породы являются пока единственным в мире примером кимберлитов такого состава. В некоторых работах предполагается, что обогащение неизменных кимберлитов тр. Удачная-Восточная щелочами и хлором — это результат ассимиляции кимберлитовым расплавом соленосных отложений осадочного чехла Сибирской платформы либо следствие взаимодействия кимберлитов с рассолами, наличие которых установлено в осадочных породах, вмещающих тр. Удачная [Polozov et al., 2008a,b; Grishina et al., 2008]. В работах [Kamenetsky et al., 2004, 2009a; Maas et al., 2005] показаны различия в изотопном составе Sr основной массы кимберлитов тр. Удачная-Восточная от соленосных отложений Сибирской платформы и рассолов в районе трубки, что исключает контаминацию кимберлитов коровым материалом. Бурением в районе тр. Удачная соленосные отложения не были обнаружены (см. рис. 1), тем не менее, согласно некоторым палеогеографическим реконструкциям, их присутствие допускается [Polozov et al., 2008a]. Находки джерфишерита в основной массе кимберлитовых трубок Куойкского поля (см. табл. 5) [Добровольская и др., 1975; Дистлер и др., 1987; Шарыгин и др., 2011], находящихся за пределами областей распространения соленосных отложений и рассолов (см. рис. 1), подтверждают мантийное происхождение хлора в кимберлитовых расплавах. Недавно опубликованные результаты изучения расплавных включений в оливинах из кимберлитов Канады и Гренландии также говорят о первоначальном обогащении кимберлитовых расплавов щелочно-хлоридным компонентом [Kamenetsky et al., 2009c].

Представленные в настоящей работе результаты и анализ литературных данных свидетельствуют о связи образования джерфишерита в ксенолитах с кимберлитовыми расплавами. Поскольку появление джерфишерита в магматических породах отражает высокие концентрации хлора в расплаве в момент кристаллизации этого сульфида [Sharygin et al., 2007], его присутствие в мантийных ксенолитах может служить индикатором высоких концентраций Cl в кимберлитовых расплавах, взаимодействовавших с мантийными ксенолитами. При этом вмещающие ксенолиты породы могут быть обеднены хлором и не содержать других хлорсодержащих минералов по причине вторичных изменений. Среди основных концентраторов хлора в неизменных кимберлитах тр. Удачная-Восточная хлориды и хлорсодержащие щелочные карбонаты являются водорастворимыми минералами. Очевидно, что сохранность этих минералов в кимберлитах в приповерхностных условиях маловероятна. Для действующего натрокарбонатного влк. Олдоиньо Ленгаи (Танзания) показано, что в приповерхностных условиях щелочные карбонаты и хлориды, кристаллизовавшиеся из расплава, исчезают в течение нескольких лет, месяцев и даже дней, при этом существенно изменяется и химический состав пород в целом [Zaitsev et al., 2008].

Таким образом, присутствие джерфишерита как в основной массе разновозрастных кимберлитов, так и в ксенолитах из трубок различных регионов мира (см. табл. 5) указывает на то, что в кимберлитах были существенные концентрации хлора, и этот элемент являлся важным компонентом значительной части кимберлитовых расплавов.

Изучение Re-Os отношений в сульфидных включениях — один из методов определения возрастов мантийных минералов, в том числе и алмазов. Для установления возрастов Re-Os датированием существуют два подхода. В первом случае для анализа из минерала извлекается все сульфидное включение

[Pearson et al., 1999], однако его минеральный состав не определяется. Во втором случае применяется анализ в точке, при котором используется случайный срез полифазных сульфидных глобул [Pearson et al., 2002]. В работе [Тэйлор, Ли, 2009] показано, что минеральные фазы в сульфидных включениях распределены неравномерно, поэтому случайный срез сульфидных включений нельзя отождествлять с общим составом захваченного сульфида, что может исказить датировки. При использовании любого из подходов для минералов мантийных ксенолитов из кимберлитов необходимо учитывать, что в полифазных сульфидных включениях может присутствовать джерфшерит (см. рис. 3, А, Б), который является индикатором наложенных процессов, т.е. свидетельствует о возможном нарушении первоначальных изотопных отношений во включениях. Вероятно, для корректного использования Re-Os метода датирования нужно извлекать сульфидные глобулы, не связанные с какими-либо трещинами (см. рис. 3, В, Г). Re—Os система также применяется для классификации мантийных пород [Carlson, 2005], в том числе и ксенолитов. Поскольку ксенолиты подвергались воздействию кимберлитового расплава с образованием целого ряда сульфидов, то интерпретировать полученные валовые Re-Os характеристики пород необходимо с осторожностью.

Присутствие джерфшерита и других поздних акцессорных минералов может значительно влиять на валовые химические характеристики ксенолитов, которые используются для реконструкции процессов преобразования мантийных пород. Например, в деформированных лерцолитах валовые концентрации  $K_2O$ , определенные для центральных частей крупных ксенолитов, составляют 0.2—0.3 мас. % (данные авторов, [Агашев и др., 2010]). Единственным первичным калийсодержащим минералом этих ксенолитов является клинопироксен. Содержания  $K_2O$  в клинопироксене из изученных нами ксенолитов не превышают 0.07 мас. %; максимальные концентрации  $K_2O$  в клинопироксене из ксенолитов деформированных перидотитов, определенные Н.В. Соболевым [1974], достигают 0.087 мас. %. Простые пересчеты показывают, что даже при максимальном для деформированных перидотитов содержании клинопироксена (20 об. %) этот минерал не может компенсировать концентрации калия в породе. В изученных деформированных перидотитах, вероятно, джерфшерит и слюды являются главными концентраторами  $K_2O$ . Таким образом, даже присутствие одного второстепенного минерала, например, джерфшерита, может существенно влиять на некоторые химические характеристики мантийных пород.

## ВЫВОДЫ

1. Джерфшерит является преобладающим акцессорным сульфидным минералом в ксенолитах деформированных лерцолитов из неизменных кимберлитов тр. Удачная-Восточная. Этот минерал характеризуется широкими вариациями химического состава и морфологических особенностей. Джерфшерит был диагностирован как в виде отдельных индивидов (ограниченной, полуограниченной и неправильной формы), так и в составе полисульфидных выделений. Исходя из вариаций химического состава джерфшерита из полисульфидных обособлений и глобул, происходило как замещение более ранних Fe-Ni-Cu-сульфидов, так и их обрастание джерфшеритом. Взаимоотношения минералов в полисульфидных образованиях показывают, что в основном джерфшерит замещает пентландит.

2. Образование джерфшерита как в ксенолитах деформированных лерцолитов из тр. Удачная-Восточная, так и в различных ксенолитах из других кимберлитовых трубок связано с взаимодействием нодулей и кимберлитовых расплавов.

3. Присутствие джерфшерита в мантийных ксенолитах является свидетельством обогащения хлором выносящих их кимберлитовых расплавов, даже если сами кимберлиты в настоящий момент обеднены хлором и не содержат других хлорсодержащих минералов. Находки джерфшерита в основной массе кимберлитов и ксенолитах из разновозрастных трубок различных регионов мира (Россия, Финляндия, Канада, Южная Африка) указывают на то, что в значительной части кимберлитовых расплавов были существенные концентрации хлора, и этот элемент в большинстве кимберлитов имеет мантийное происхождение.

4. Джерфшерит и парагенетически связанные с ним другие поздние акцессорные минералы в мантийных ксенолитах оказывают ощутимое влияние на химические характеристики пород, что необходимо учитывать при изучении мантийных пород и дальнейших различных реконструкциях, посвященных процессам преобразования мантийного вещества. Кроме того, присутствие джерфшерита в полисульфидных выделениях свидетельствует о нарушении первоначальных изотопных отношений в сульфидной системе, что в последующем может привести к некорректным результатам Re-Os датирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 10-05-00575а) и ИГМ СО РАН (грант ВМТК № 13).



## ЛИТЕРАТУРА

**Агашев А.М., Похиленко Н.П., Черепанова Ю.В., Головин А.В.** Геохимическая эволюция пород основания литосферной мантии по результатам изучения ксенолитов деформированных перидотитов из кимберлитовой трубки Удачная // Докл. РАН, 2010, т. 432, № 4, с. 510—513.

**Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Борисов В.Н., Шоуакар-Стас О., Фрейн Ш., Шабо Ф., Кононов А.М.** Изотопный состав (Н, О, Сl, Sr) подземных рассолов Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (3), с. 291—304.

**Буланова Г.П., Шестакова О.Е., Лескова Н.В.** Джерфишерит в сульфидных включениях из алмаза // Докл. АН СССР, 1980, т. 255, № 2, с. 430—433.

**Буланова Г.П., Специус З.В., Лескова Н.В.** Сульфиды в алмазах и ксенолитах из кимберлитовых трубок Якутии. Новосибирск, Наука, 1990, 120 с.

**Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Сошкина Л.Т.** Ильменит из кимберлитов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1984, 240 с.

**Гаранин В.К., Крот А.Н., Кудрявцева Г.П.** Сульфидные включения в минералах из кимберлитов. Ч. 2. М., Изд-во Моск. ун-та, 1988, 176 с.

**Головин А.В.** Особенности эволюции расплавов при кристаллизации кимберлитов (трубка Удачная-Восточная, Якутия) и базанитов (трубка Беле, Хакасия) по данным изучения расплавных включений: Автореф. дис. ... к.г.-м.н. Новосибирск, ИМП СО РАН, 2004, 24 с.

**Головин А.В., Шарыгин В.В.** Петрогенетическая информативность флюидных и расплавных включений в минералах глубинных ксенолитов из базанитов трубки Беле (Северо-Минусинская впадина) // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (10), с. 1043—1060.

**Головин А.В., Шарыгин В.В., Похиленко Н.П., Мальковец В.Г., Колесов Б.А., Соболев Н.В.** Вторичные включения расплава в оливине неизменных кимберлитов трубки Удачная-Восточная // Докл. РАН, 2003, т. 388, № 3, с. 369—372.

**Головин А.В., Шарыгин В.В., Похиленко Н.П.** Расплавные включения во вкрапленниках оливина из неизменных кимберлитов трубки Удачная-Восточная (Якутия): некоторые аспекты эволюции кимберлитовых магм на поздних стадиях кристаллизации // Петрология, 2007, т. 15, № 2, с. 178—195.

**Дистлер В.В., Илупин И.П., Лапутина И.П.** Глубинные сульфиды кимберлитов и некоторые особенности медно-никелевого рудообразования // Изв. АН СССР, 1987, № 4, с. 78—87.

**Добровольская М.Г., Цепин А.И., Илупин И.П., Пономаренко А.И.** Джерфишерит из кимберлитов Якутии // Минералы и парагенезисы минералов эндогенных месторождений. Л., Наука, 1975, с. 3—11.

**Егоров К.Н., Соловьева Л.В., Симакин С.Г.** Мегакристаллический катаклазированный лерцолит из трубки Удачная: минералогия, геохимические особенности, генезис // Докл. РАН, 2004, т. 397, № 1, с. 88—92.

**Зедгенизов Д.А., Логвинова А.М., Шацкий В.С., Соболев Н.В.** Включения в микроалмазах из некоторых кимберлитовых трубок Якутии // Докл. РАН, 1998, т. 359, № 1, с. 74—78.

**Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Шацкий В.С.** Особенности состава среды алмазообразования: по данным изучения микровключений в природных алмазах // Зап. РМО, 2007а, с. 159—172.

**Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Шацкий В.С.** Хлоридно-карбонатный флюид в алмазах из ксенолита эклогита // Докл. РАН, 2007б, т. 415, № 6, с. 800—803.

**Зинчук Н.Н., Специус З.В., Зуенко В.В., Зуев В.М.** Кимберлитовая трубка «Удачная». Новосибирск, Изд-во Новосиб. ун-та, 1993, 147 с.

**Каменецкий В.С., Шарыгин В.В., Каменецкая М.Б., Головин А.В.** Хлоридно-карбонатные нодулы в кимберлитах трубки Удачная: альтернативный взгляд на эволюцию кимберлитовых магм // Геохимия, 2006, № 9, с. 1006—1012.

**Мальков Б.А.** Геология и петрология кимберлитов. СПб., Наука, 1997, 231 с.

**Маршинцев В.К.** Вертикальная неоднородность кимберлитовых тел Якутии. Новосибирск, Наука, 1986, 239 с.

**Мельников Н.В.** Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы (стратиграфия, история развития). Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2009, 148 с.

**Панина Л.И., Сазонов А.М., Усольцева Л.М.** Мелилитовые и монтчеллитсодержащие породы Крестовской интрузии (север Сибирской платформы) и их генезис // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (9), с. 1314—1332.

**Похиленко Н.П.** Мантийные парагенезисы в кимберлитах, их происхождение и поисковое значение: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. Новосибирск, ИГГ СО АН СССР, 1990, 39 с.

**Соболев В.С.** Алмазные месторождения Якутии. М., Госгеолтехиздат, 1959, 527 с.

**Соболев Н.В.** Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск, Наука, 1974, 264 с.

**Соболев Н.В., Похиленко Н.П.** Ксенолиты катаклазированных перидотитов в кимберлитах Далдыно-Алакитского района Якутии // Глубинные ксенолиты и верхняя мантия, Новосибирск, Наука, 1975, с. 48—55.

**Соболев Н.В., Логвинова А.М., Ефимова Э.С.** Сингенетические включения флогопита в алмазах кимберлитов: свидетельство роли летучих в образовании алмазов // Геология и геофизика, 2009, т. 50, (12), с. 1588—1606.

**Соловова И.П., Гирнис А.В., Рябчиков И.Д.** Включения карбонатных и силикатных расплавов в минералах щелочных базальтоидов Восточного Памира // Петрология, 1996, т. 4, № 4, с. 339—363.

**Соловьева Л.В., Баранкевич В.Г., Завьялова Л.Л., Липская В.И.** Метасоматические изменения в магнезиально-железистых эклогитах из трубки «Удачная» // Докл. АН СССР, 1988, т. 303, № 6, с. 1450—1454.

**Соловьева Л.В., Лаврентьев Ю.Г., Егоров К.Н., Костровицкий С.И., Королюк В.Н., Суворова Л.Ф.** Генетическая связь деформированных перидотитов и мегакристов граната из кимберлитов с астеносферными расплавами // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (4), с. 281—301.

**Специус З.В., Буланова Г.П., Лескова Н.В.** Джерфишерит и его генезис в кимберлитовых породах // Докл. АН СССР, 1987, т. 293, № 1, с. 199—202.

**Тэйлор Л.А., Ли Я.** Включения сульфидов в алмазах не являются моносульфидным твердым раствором // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (12), с. 1547—1559.

**Шарыгин В.В., Головин А.В., Похиленко Н.П., Соболев Н.В.** Джерфишерит в неизмененных кимберлитах трубки Удачная-Восточная, Якутия // Докл. РАН, 2003, т. 390, № 2, с. 242—246.

**Шарыгин И.С., Головин А.В., Похиленко Н.П.** Джерфишерит в кимберлитах Куойкского поля как индикатор обогащения хлором кимберлитовых расплавов // Докл. РАН, 2011, т. 436, № 6, с. 820—826.

**Andersen T., Neumann E.-R.** Fluid inclusions in mantle xenoliths // *Lithos*, 2001, v. 55, p. 301—320.

**Boullier A.M., Nicolas A.** Classification of textures and fabrics of peridotite xenoliths from South African kimberlites // *Phys. Chem. Earth*, 1975, v. 9, p. 467—476.

**Boyd F.R., Pokhilenko N.P., Pearson D.G., Mertzman S.A., Sobolev N.V., Finger L.W.** Composition of the Siberian cratonic mantle: evidence from Udachnaya peridotite xenoliths // *Contr. Miner. Petrol.*, 1997, v. 128, p. 228—246.

**Brey G.P., Köhler T.** Geothermobarometry in four phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of using thermobarometers // *J. Petrol.*, 1990, v. 31, part 6, p. 1353—1378.

**Burgess S.R., Harte B.** Tracing lithosphere evolution through the analysis of heterogeneous G9/G10 garnets in peridotite xenoliths. I: Major element chemistry / Eds. J.J. Gurney, J.L., Gurney, M.D. Pascoe, S.H. Richardson // *Proc. 7th Int. Kimb. Conf., Red Roof Design, Cape Town*, 1999, p. 66—80.

**Carlson R.W.** Application of the Pt-Re-Os isotopic systems to mantle geochemistry and geochronology // *Lithos*, 2005, v. 82, p. 249—272.

**Chakhmouradian A.R., Mitchell R.H.** Three compositional varieties of perovskite from kimberlites of the Lac de Gras field (Northwest Territories, Canada) // *Miner. Mag.*, 2001, v. 65(1), p. 133—148.

**Clarke D.B.** Synthesis of nickeloan djerfisherites and the origin of potassic sulphides at the Frank Smith mine / Eds. F.R. Boyd, H.O.A. Meyer // *The mantle sample: inclusions in kimberlites and other volcanics. Proc. Second Int. Kimberlite Conf., AGU, Washington D.C.* 1979, v. 2, p. 300—308.

**Clarke D.B., Pe G.G., MacKay R.M., Gill K.R., O'Hara M.J., Gard J.A.** A new potassium-iron-nickel sulfide from a nodule in kimberlite // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1977, v. 35, p. 421—428.

**Clarke D.B., Mitchell R.H., Chapman C.A.T., MacKay R.M.** Occurrence and origin of djerfisherite from the Elwin Bay kimberlite, Somerset Island, Northwest Territories // *Canad. Miner.*, 1994, v. 32, № 4, p. 815—823.

**Dawson J.B., Smith J.V., Steele I.M.** Petrology and mineral chemistry of plutonic igneous xenoliths from the carbonatite volcano, Oldoinyo Lengai, Tanzania // *J. Petrol.*, 1995, v. 36, p. 797—826.

**Evans H.T., Clark J.R.** The crystal structure of bartonite, a potassium iron sulfide, and its relationship to pentlandite and djerfisherite // *Amer. Miner.*, 1981, v. 66, p. 376—384.

**Field M., Stiefenhofer J., Robey J., Kurszlauskis S.** Kimberlite-hosted diamond deposits of southern Africa: a review // *Ore Geol. Rev.*, 2008, v. 34, p. 33—75.

**Finnerty A.A., Boyd F.R.** Thermobarometry for garnet peridotites: basis for the determination of thermal and compositional structure of the upper mantle // *Mantle xenoliths* / Ed. P.H. Nixon. Chichester, John Wiley and Sons, 1987, p. 381—402.

**Goetze C.** Sheared lherzolites: from the point of view of rock mechanics // *Geology*, 1975, v. 3, p. 172—173.

- Golovin A.V., Kamenetsky M.B., Kamenetsky V.S., Sharygin V.V., Pokhilenko N.P.** Groundmass of unaltered kimberlites of the Udachnaya-East pipe (Yakutia, Russia): a sample of the kimberlite melt // 9th International Kimberlite Conference, Frankfurt, Germany, 2008, Extended Abstract № 9IKC-A-00062, CD-Volume.
- Green H.W.II, Gueguen Y.** Origin of kimberlite pipes by diapiric upwelling in the mantle // *Nature*, 1974, v. 249 (5458), p. 617—620.
- Griffin W.L., Ryan C.G., Kaminsky F.V., O'Reilly S.Y., Natapov L.M., Win T.T., Kinny P.D., Ilupin I.P.** The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton // *Tectonophysics*, 1999, v. 310, p. 1—35.
- Grishina S.N., Polozov A.G., Mazurov M.P., Titov A.T.** Origin of chloride xenoliths of Udachnaya-East kimberlite pipe, Siberia. Evidence from fluid and saline melt inclusions // 9th International Kimberlite Conference, Frankfurt, Germany, 2008, Extended Abstract № 9IKC-A-00128, CD-volume.
- Harte B.** Rock nomenclature with particular relation to deformation and recrystallisation textures in olivine-bearing xenoliths // *J. Geol.*, 1977, v. 85, p. 279—288.
- Izraeli E.S., Harris J.W., Navon O.** Brine inclusions in diamonds: a new upper mantle fluid // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, v. 187(3—4), p. 323—332.
- Izraeli E.S., Harris J.W., Navon O.** Fluid and mineral inclusions in cloudy diamonds from Koffiefontein, South Africa // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2004, v. 68, p. 2561—2575.
- Kamenetsky M.** New identity of the kimberlite melt: constraints from unaltered diamondiferous Udachnaya-East pipe kimberlite, Siberia, Russia // Ph.D. Thesis, University of Tasmania, Australia, 2005, p. 308.
- Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Kamenetsky V.S., Maas R., Danyushevsky L.V., Thomas R., Pokhilenko N.P., Sobolev N.V.** Kimberlite melts rich in alkali chlorides and carbonates: a potent metasomatic agent in the mantle // *Geology*, 2004, v. 32, № 10, p. 845—848.
- Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Sharygin V.V., Faure K., Golovin A.V.** Chloride and carbonate immiscible liquids at the closure of the kimberlite magma evolution (Udachnaya-East kimberlite, Siberia) // *Chem. Geol.*, 2007a, v. 237, p. 384—400.
- Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Sharygin V.V., Golovin A.V.** Carbonate-chloride enrichment in fresh kimberlites of the Udachnaya-East pipe, Siberia: a clue to physical properties of kimberlite magmas? // *Geophys. Res. Lett.*, 2007b, v. 34, p. 9316—9321.
- Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Golovin A.V., Demouchy S., Faure K., Sharygin V.V., Kuzmin D.V.** Olivine in the Udachnaya-East kimberlite (Yakutia, Russia): types, compositions and origins // *J. Petrol.*, 2008, v. 49, p. 823—839.
- Kamenetsky V.S., Maas R., Kamenetsky M.B., Paton C., Phillips D., Golovin A.V., Gornova M.A.** Chlorine from the mantle: magmatic halides in the Udachnaya-East kimberlite, Siberia // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2009a, v. 285, p. 96—104.
- Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Golovin A.V., Sharygin V.V., Pokhilenko N.P., Sobolev N.V.** Can pyroxenes be liquidus minerals in the kimberlite magma? // *Lithos*, 2009b, v. 112S, p. 213—222.
- Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Weiss Y., Navon O., Nielsen T.F.D., Mernagh T.P.** How unique is the Udachnaya-East kimberlite? Comparison with kimberlites from the Slave Craton (Canada) and SW Greenland // *Lithos*, 2009c, v. 112S, p. 334—346.
- Kennedy L.A., Russell J.K., Kopylova M.G.** Mantle shear zones revisited: the connection between the cratons and mantle dynamics // *Geology*, 2002, v. 30, № 4, p. 419—422.
- Klein-BenDavid O., Izraeli E.S., Hauri E., Navon O.** Mantle fluid evolution — a tale of one diamond // *Lithos*, 2004, v. 77, p. 243—253.
- Klein-BenDavid O., Izraeli E.S., Hauri E., Navon O.** Fluid inclusions in diamonds from the Diavik mine, Canada and the evolution of diamond-forming fluids // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2007, v. 71, p. 723—744.
- Klein-BenDavid O., Logvinova A.M., Schrauder M., Spetius Z.V., Weiss Y., Hauri E.H., Kaminsky F.V., Sobolev N.V., Navon O.** High-Mg carbonatitic microinclusions in some Yakutian diamonds — a new type of diamond-forming fluid // *Lithos*, 2009, v. 112, Suppl. 2, p. 648—659.
- Kogarko L.N., Plant D.A., Henderson C.M.B., Kjarsgaard B.A.** Na-rich carbonate inclusions in perovskite and calzirtite from the Guli intrusive Ca-carbonatite, Polar Siberia // *Contr. Miner. Petrol.*, 1991, v. 109, p. 124—129.
- Korobeinikov A.N., Mitrofanov F.P., Gehör S., Laajoki K., Pavlov V.P., Mamontov V.P.** Geology and copper sulphide mineralization of the Salmagorskii ring igneous complex, Kola Peninsula, NW Russia // *J. Petrol.*, 1998, v. 39, p. 2033—2041.
- Kullerud G., Yund R.A., Moh G.H.** Phase relations in the Cu-Fe-S, Cu-Ni-S and Fe-Ni-S systems // *Magmatic Ore Deposits* / Ed. H.D.B. Wilson. *Econ. Geol. Monogr.*, 1969, v. 4, p. 323—343.

- Logvinova A.M., Wirth R., Fedorova E.N., Sobolev N.V.** Nanometre-sized mineral and fluid inclusions in cloudy Siberian diamonds: new insights on diamond formation // *Eur. J. Miner.*, 2008, v. 20, p. 317—331.
- Maas R., Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Kamenetsky V.S., Sobolev N.V.** Sr, Nd, and Pb isotope evidence for a mantle origin of alkali chlorides and carbonates in the Udachnaya kimberlite, Siberia // *Geology*, 2005, v. 33, p. 549—552.
- MacGregor I.D.** The system MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>: solubility of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in enstatite for spinel and garnet peridotite compositions // *Amer. Miner.*, 1974, v. 59, p. 110—119.
- Misra K.C., Anand M., Taylor L.A., Sobolev N.V.** Multi-stage metasomatism of diamondiferous eclogite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia, Siberia // *Contr. Miner. Petrol.*, 2004, v. 146, p. 696—714.
- Nimis P., Zanetti A., Dencker I., Sobolev N.V.** Major and trace element composition of chromian diopsides from the Zagadochnaya kimberlite (Yakutia, Russia): metasomatic processes, thermobarometry and diamond potential // *Lithos*, 2009, v. 112, p. 397—412.
- O'Brien H., Tyni M.** Eastern Finland Kimberlite Province // Fifth International Dyke Conference, Pre-conference Field Trip a Guidebook, 2005, p. 30—36.
- Palyanov Yu.N., Shatsky V.S., Sobolev N.N., Sokol A.G.** The role of mantle ultrapotassic fluids in diamond formation // *Proceeding of the National Academy of Science of the USA*, 2007, v. 104, p. 9122—9127.
- Pearson D.G., Shirey S.B., Bulanova G.P., Carlson R.W., Milledge H.J.** Re-Os isotope measurements of single sulfide inclusions in a Siberian diamond and its nitrogen aggregation systematics // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1999, v. 63(5), p. 703—711.
- Pearson N.J., Alard O., Griffin W.L., Jackson S.E., O'Reilly S.Y.** In situ measurement of Re-Os isotopes in mantle sulfides by laser ablation multicollector inductively coupled plasma mass spectrometry: analytical methods and preliminary results // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2002, v. 66 (6), p. 1037—1050.
- Pearson D.G., Canil D., Shirey S.B.** Mantle samples included in volcanic rocks: xenoliths and diamonds // *In Treatise on geochemistry. V. 2. Geochemistry of the mantle and core*. 2003, p. 171—275.
- Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Kuligin S.S., Shimizu N.** Peculiarities of distribution of pyroxenite paragenesis garnets in Yakutian kimberlites and some aspects of the evolution of the Siberian Craton lithospheric mantle // *Proc. 7th Int. Kimb. Conf.*, Cape Town, 1999, p. 689—698.
- Polozov A.G., Sukhov S.S., Gornova M.A., Grishina S.N.** Salts from Udachnaya-East kimberlite pipe (Yakutia, Russia): occurrences and mineral composition // 9th International Kimberlite Conference, Frankfurt, Germany, 2008a, Extended Abstract № 9IKC-A-00247, CD-volume.
- Polozov A.G., Svensen H., Planke S.** Chlorine isotopes of salt xenoliths from Udachnaya-East kimberlite pipe (Russia) // 9th International Kimberlite Conference, Frankfurt, Germany, 2008b, Extended Abstract № 9IKC-A-00249, CD-volume.
- Raghavan V.** Fe-Ni-S (Iron-nickel-sulfur) // *J. Phase Equilibria and Diffusion*, 2004, v. 25, № 4, p. 373—381.
- Schiano P., Clocchiatti R.** Worldwide occurrence of silica-rich melts in sub-continental and sub-oceanic mantle minerals // *Nature*, 1994, v. 368, p. 621—624.
- Sharygin V.V., Golovin A.V., Pokhilenko N.P., Kamenetsky V.S.** Djerfisherite in the Udachnaya-East kimberlite (Sakha-Yakutia, Russia): paragenesis, composition and origin // *Eur. J. Miner.*, 2007, v. 19, p. 51—63.
- Sharygin V.V., Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B.** Potassium sulfides in kimberlite-hosted chloride-“nyerereite” and chloride clasts of Udachnaya-East pipe, Yakutia, Russia // *Canad. Miner.*, 2008, v. 46, p. 1079—1095.
- Shaw C.S.J., Thibault Y., Edgar A.D., Lloyd F.E.** Mechanisms of orthopyroxene dissolution in silica-undersaturated melts at 1 atmosphere and implications for the origin of silica-rich glass in mantle xenoliths // *Contr. Miner. Petrol.*, 1998, v. 132, № 4, p. 354—370.
- Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Pokhilenko N.P., Malygina E.V., Kuzmin D.V., Sobolev A.V.** Petrogenetic significance of minor elements in olivines from diamonds and peridotite xenoliths from kimberlites of Yakutia // *Lithos*, 2009, v. 112, Suppl. 2, p. 701—713.
- Zaitsev A.N., Keller J., Spratt J., Perova E.N., Kearsley A.** Nyerereite — pirssonite — calcite — shortite relationships in altered natrocarbonatites, Oldoinyo Lengai, Tanzania // *Canad. Miner.*, 2008, v. 46, p. 843—860.