

УДК 552.11

ДЖЕРФИШЕРИТ ИЗ МОНТИЧЕЛЛИТОВЫХ ПОРОД КРЕСТОВСКОЙ ИНТРУЗИИ, ПОЛЯРНАЯ СИБИРЬ

© 2019 г. Л.И. Панина*, А.Т. Исакова**

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
просп. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия
*E-mail: panina@igm.nsc.ru, ** E-mail: atnikolaeva@igm.nsc.ru*

Получена в редакцию 18.06.2018 г.
Поступила после доработки 10.10.2018 г.
Принята к публикации 12.11.2018 г.

Джерфишерит в монтichelлитовых породах Крестовской интрузии был обнаружен в первичных расплавных включениях, моно- и полисульфидных глобулах, а также в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях. Расплавные включения представлены тремя типами. I тип обнаружен в ядрах вкрапленников перовскита и зернах монтichelлита и соответствует одной из ранних стадий кристаллизации материнской ларнит-нормативной щелочно-ультраосновной магмы, обогащенной водой и другими летучими компонентами. Среди дочерних фаз включений отмечаются: клинопироксен, серпентин, флогопит, апатит, нефелин, гидрогранат, магнетит, джерфишерит, пектолит, кальцит. В некоторых включениях I типа при 1230–1250°C фиксировалось разделение расплава на две несмешиваемые фазы: щелочную силикатную и высокофлюидизированную водосодержащую малокремнистую, обогащенную щелочами, серой, CO₂. С пространственным обособлением несмешиваемых фаз расплава связано появление II и III типов включений в перовските, монтichelлите, титанистом гранате и меллите. Об этом свидетельствует аналогичность модалного состава II и III типов расплавных включений нормативному составу несмешиваемых фаз включений I типа. В составе включений II типа присутствуют преимущественно водосодержащие силикатные дочерние фазы (гидрогранат, серпентин, флогопит, пектолит), а также джерфишерит, кальцит, магнетит. III тип включений был представлен клинопироксеном, нефелином, апатитом, магнетитом, джерфишеритом, кальцитом, пектолитом. Джерфишерит-гидрогранатовые обособления приурочены к вкрапленникам титаномагнетита и перовскита и отходящим от них трещинам в монтichelлите. Минеральный состав джерфишерит-гидрогранатовых обособлений совместно с их окружением аналогичен составу включений II типа: в нем отмечаются аналогичные водосодержащие силикаты, джерфишерит, кальцит, магнетит. Подобная идентичность дает основание связывать образование джерфишерит-гидрогранатовых обособлений, как и включений II типа, с пространственным отделением и кристаллизацией несмешиваемого с исходной магмой высокофлюидизированного малокремнистого расплава, обогащенного водой, щелочами, серой, CO₂. Кристаллизация высокофлюидизированного расплава, согласно экспериментам по гомогенизации включений, происходила при 990–1090°C и сопровождалась проявлением силикатно-сульфидной несмешиваемости и возникновением глобулярных, эмульсиевидных и мirmekитовых структур в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях, а также образованием моно- и полисульфидных глобул с джерфишеритом в гидрогранат-кальцит-серпентиновом субстрате. С ликвацией расплава также связано появление в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях ферробрусит-карбонат-гидрогранатовых глобул, еще раз подтверждающих магматическое происхождение обособлений. Иногда в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях отмечалось укрупнение джерфишеритовых выделений с образованием каемок, полосок, жилок, что, вероятно, объясняется большой подвижностью и малой вязкостью сульфидного расплава. Присутствующие в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях редкие зерна хизлевудита, годлевскита, пентландита часто имели ту же форму выделений, что и джерфишерит, что может косвенно говорить об их одновременной и совместной кристаллизации из одного и того же расплава. Химический состав джерфишерита из моно- и полисульфидных глобул, джерфишерит-гидрогранатовых обособлений и включений I типа характеризуется, как и в большинстве кимберлитов Якутии, высоким содержанием Ni (12.1–16.7 мас.%) и низким Cu (0.1–0.9 мас.%). Состав же джерфишерита из включений II и III типов отличается пониженной концентрацией Ni (3.3–1.6 мас.%) и повышенной Fe (40.9–53.2 мас.%) и существенным в III типе включений количеством Cu: от 7.6 до 10.6 мас.%.

Ключевые слова: джерфишерит, джерфишерит-гидрогранатовые обособления, монтichelлитовые породы, расплавные включения I–III типов, Крестовский щелочно-ультраосновной массив

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-59032187-205>

ВВЕДЕНИЕ

Джерфишерит — $K_6Na(Fe, Ni, Cu)_{24}S_{26}Cl$ — является распространенным минералом глубинных магматических пород, особенно в той или иной мере обогащенных щелочами. Он характерен для кимберлитов и содержащихся в них мантийных ксенолитов (Буланова и др., 1990; Clarke et al., 1994; Шарыгин и др., 2003; Sharygin et al., 2007), для лампроитов (Hogarth, 1997) и лампрофиров (Hanois, Mineau, 1991), для карбонатитовых обособлений в фергусит-порфирах Восточного Памира (Соловова и др., 1996), порфиритовых Na-карбонатитовых лав 1995 г. извержения вулкана Олдоиньо Ленгаи (Mitchell, 1997), для пород комплексных щелочно-ультраосновных карбонатитовых plutонов: перидотитов Инаглинского массива (Еремеев и др., 1982), мельтейгитов и ийолитов Салмагорского массива (Barkov et al., 1997), щелочных сиенитов Хибинского plutона (Соколова и др., 1971), карбонатитов Гулинского plutона (Kogarko et al., 1995). В породах джерфишерит обычно встречается в ассоциации с другими сульфидами: халькопиритом — $CuFeS_2$, пирротинном — FeS , пентландитом — $(Ni, Fe)_9S_8$, кубанитом — $CuFe_2S_3$, пиритом, хизлевудитом — Ni_3S_2 , годлевскитом — $(Ni, Fe)_7S_6$ и др. Нередко он оконтуривает их, но чаще присутствует в виде мелких зерен основной массы породы. Джерфишерит был также обнаружен в качестве дочерней фазы в составе вторичных расплавных включений в оливине неизменного кимберлита из трубки Удачная-Восточная (Головин и др., 2003, 2007) и в минералах мантийных ксенолитов из кимберлитов (Шарыгин и др., 2012). Это дало основание исследователям связывать образование джерфишерита с поздними стадиями магматической кристаллизации и/или с воздействием на ранние первичные сульфиды щелочных расплавов/растворов, обогащенных хлором. В то же время находки джерфишерита, хизлевудита и годлевскита в сульфидных включениях в алмазах кимберлитов (Sobolev et al., 1997; Зедгенизов и др., 1998) допускают возможность образования этих сульфидов при мантийных P - T параметрах. Однако особенности генетической связи сульфидов с ал-

мазами пока не установлены, не определены P - T условия их кристаллизации в алмазах, т.е. вопрос об устойчивости джерфишерита, хизлевудита и годлевскита в мантийных условиях пока остается открытым. По мнению исследователей (Dawson et al., 1995), джерфишерит в вулканических и интрузивных карбонатитах и генетически с ними связанных щелочных породах является поздним минералом.

Однако на Кугдинском щелочно-ультраосновном карбонатитовом массиве (Маймечинская провинция) джерфишерит был обнаружен в первичных расплавных включениях в мелилите мелилитолитов (Henderson et al., 1999). Он ассоциирует с пирротинном, пентландитом, форстеритом, диопсидом, монтichelлитом, флогопитом, волластонитом, нефелином, содалитом, комбеитом, кальцитом, Na-K-Ca-карбонатом, гидросиликатами кальция. В процессе термометрического исследования включений (Henderson et al., 1999) было установлено, что джерфишеритсодержащая ассоциация образовалась в температурном диапазоне от $> 1000^\circ C$ до $< 500^\circ C$ при фракционной кристаллизации первичных мелилитовых расплавов, обогащенных щелочами, CO_2 , H_2O , H_2S .

В настоящей работе приводятся результаты изучения джерфишерита в монтichelлитовых породах Крестовского щелочно-ультраосновного массива. Здесь он отмечается в составе полисульфидных и моносulfидных глобул, а также в виде обособлений в графических срастаниях с гидрогранатом. Он также присутствует в первичных расплавных включениях в перовските, монтichelлите и титанистом гранате оливин-монтichelлитовых пород. Перовскит является сквозным минералом оливинитов, оливин-монтichelлитовых и мелилитовых пород массива. Вследствие этого эволюционное преобразование исходного расплава можно было проследить по составам расплавных включений, законсервированных в разных его зонах. Это во многом помогло понять механизм образования джерфишерита на ранних стадиях кристаллизации исходного расплава и выяснить роль флюидов в его генезисе и петрогенезисе в целом.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МАССИВА И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОНТИЧЕЛЛИТОВЫХ ПОРОД

Крестовский массив располагается в Маймеча-Котуйской щелочно-ультраосновной карбонатитовой провинции в 54 км к юго-западу от южного карбонатитового тела Гулинского плутона по азимуту 240°. Массив представляет собой вулканоплутоническую структуру центрального типа, сложенную эффузивны-

ми, жильными и плутоническими породами ультраосновного-основного состава (рис. 1). В центре структуры располагается овальное интрузивное тело ультрамафитов – оливинитов, верлитов, пироксенитов и их рудных разновидностей, а также дайки и жилы нефелиновых и мелилитовых лампрофиров и карбонатитов. На северо-западе массива ультрабазиты образуют разной мощности чередующиеся горизонты, нередко деформированные мелкой

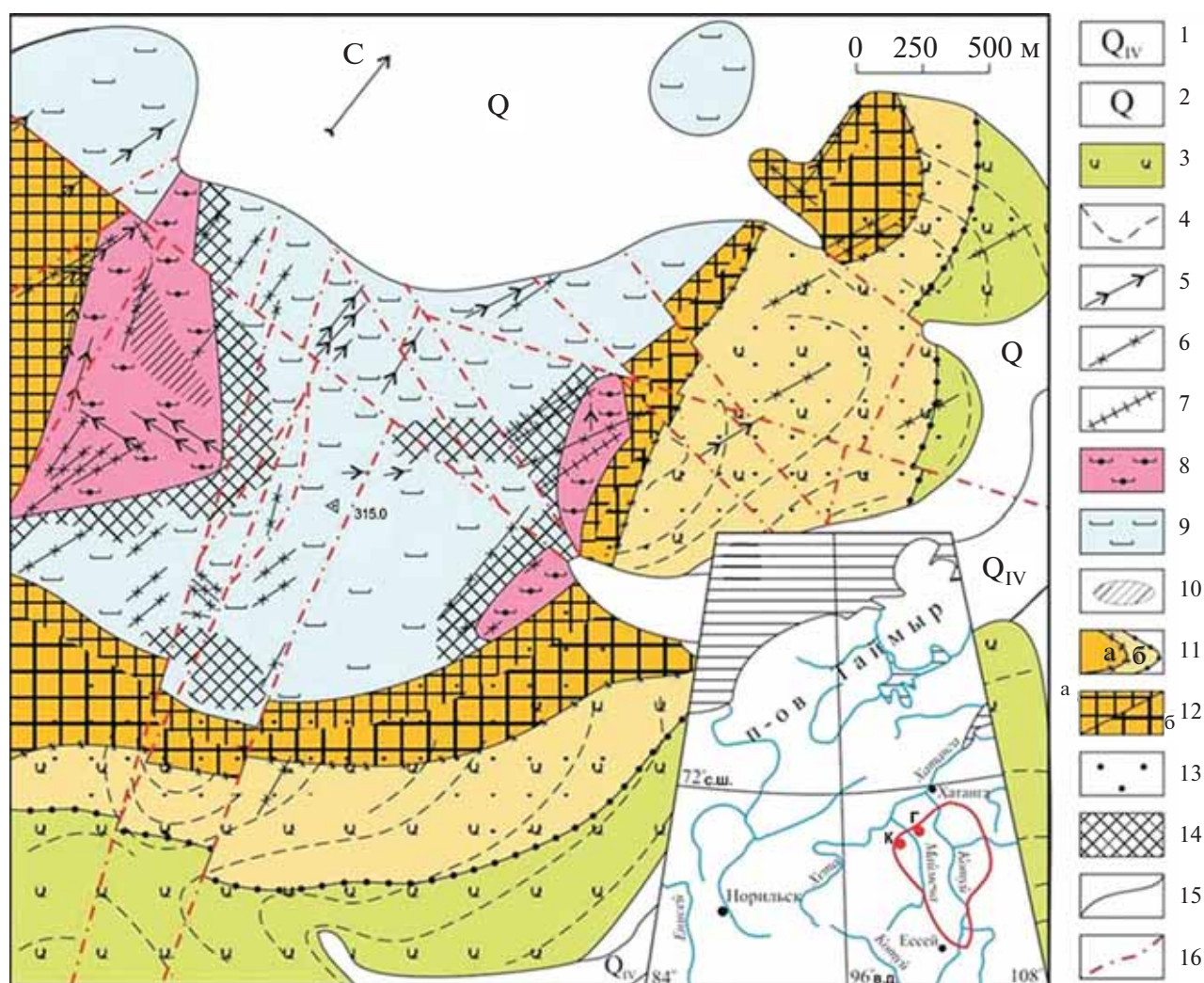


Рис. 1. Схема геологического строения Крестовской вулканоплутонической структуры (составлена А.М. Сазоновым): 1 – современные аллювиальные отложения; 2 – нерасчлененные четвертичные отложения; 3 – эффузивная толща меланефелинитов; 4 – кластолавы меланефелинитов; 5, 6 – дайки: 5 – щелочных микросиенитов; 6 – трахибазальтов, трахидолеритов, плагиоклазовых порфиритов и пикритов; 7 – вложенные дайки (микросиениты, трахибазальты, щелочные пикриты); 8 – мелилитолиты, в том числе скарнированные; 9 – оливиниты, верлиты и пироксениты; 10 – монтичеллитолиты; 11 – фации фенитов и фенитизированных пород: а – перовскит-эгирин-авгитовая (внутренняя и промежуточная зоны), внешняя граница фации – изограда перовскита; б – сфен-биотит-эгирин-авгитовая (внешняя зона фенитизированных пород), внешняя граница – изограда сфена; 12 – перовскитовые фениты: а – равномерно мелкозернистые (внутренняя зона), б – бластопорфировые (промежуточная зона); 13 – биотитсодержащие фенитизированные породы; 14 – инъекционные мелилитолит-ультрамафиты, скарнированные и рекристаллизованные породы контактовой зоны мелилитолитовых тел; 15 – геологические границы; 16 – предполагаемые разрывные нарушения. На врезке – географическое положение Маймеча-Котуйской провинции: Г – вулканоплутон Гули; К – интрузия Крестовская.

кинематической складчатостью. Контакты между горизонтами четкие, но не рвущие. Расслоенность осложняется наличием рудных разностей. По изотопно-геохимическим данным (Сазонов и др., 2001) возраст ультрабазитов соответствует 250 млн лет. На западе и востоке массива на границе с вмещающими породами расположено три тела мелилитолитов и небольшое тело монтichelлитолитов (оливин-монтichelлитовых и оливин-мелилит-монтichelлитовых пород). Породы имеют пятнистую и прожилковую текстуру, свидетельствующую о неоднократном расслоении кристаллизующейся магмы и дроблении кристаллизующихся пород. Расположенные полосами рудные и нерудные породы иногда образуют пластические складки, что говорит об активных тектонических подвижках в процессе внедрения и кристаллизации расплава. На юге и востоке к ультрабазитам прилегает вмещающая эффузивная толща меланефелинитов. Вдоль их контакта располагается серия даек щелочных пикритов, трахидолеритов, щелочных сиенитов.

Характерно, что основными акцессорными минералами всех ультрабазитовых пород массива являются титаномagnetит и перовскит.

Считают (Сазонов и др., 2001), что пространственная близость Крестовского массива к трансконтинентальному магматическому каналу обусловила длительную, неоднократно повторяющуюся активизацию его структуры, которая способствовала поступлению петрохимически неоднородных расплавов. В результате Крестовский вулканоплутон был сформирован в течении четырех стадий. На первой стадии проявилась активная вулканическая деятельность с формированием меланефелинитовой толщи. На второй стадии произошло становление ультрамафитового ядра, представленного оливинитами, верлитами, пироксенидами. На третьей стадии отмечалось внедрение мелилитового расплава в локальные полости сдвига-раздвига с образованием мелилитовых и ассоциирующих с ними монтichelлитовых пород. На четвертой стадии формировался дайковый комплекс вдоль контакта интрузивного тела.

Изучаемые нами *оливин-монтichelлитовые породы* являются массивными, неравномернозернистыми; текстура их переходная от гипидиоморфнозернистой к гипидиобластовой, участками пойкилитовая. В составе породы содержится 35–75 об.% монтichelлита,

5–40 об.% оливина, 15–10 об.% перовскита, 5–10 об.% титаномagnetита. Оливин интенсивно корродирован, имеет неправильную форму, местами образует отдельные блоки с одинаковой оптической ориентировкой. Иногда он пойкилитово включен в монтichelлит. Перовскит и титаномagnetит представлены мелкими зернами изометричной округлой и полигональной формы, образуют скопления между зернами монтichelлита. Реже они встречаются в более крупных зернах, вплоть до 1 мм. В монтichelлитовых породах в акцессорных количествах присутствуют: титанистый гранат, флогопит, волластонит, пектолит, комбеит, ранкинит, сульфиды (джерфшерит, пирротин, пентландит, халькопирит).

Химический состав основных породообразующих минералов в рассматриваемых породах по данным (Сазонов и др., 2001) следующий: *оливин* представлен форстеритом (Fe_{88-90}) и содержит (в мас.%): 1–2.5 CaO, 0.2 NiO, до 0.2–0.3 MnO.

Состав *монтichelлита* выдержанный: обычно замещение Mg железом в нем составляет 22–32% и лишь иногда его магнезиальность возрастает до 82–84%. Все монтichelлиты содержат примесь MnO (0.3–0.4 мас.%).

Перовскит включает целый набор примесных компонентов (в мас.%): 0.1–2 FeO, 0.01–0.9 SrO, 0.2–0.6 Na₂O, до 4–5 La₂O₃, CeO, Sm₂O₃, Nb₂O₅. Темноокрашенные ядра вкрапленников перовскита всегда включают больше примесей, чем светлоокрашенные их каймы.

В *титаномagnetите* содержится от 1.5 до 4.7 мас.% TiO₂.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Детальные петрографические и минералогические исследования шлифов и полированных с двух сторон пластинок (толщиной 100–300 мкм) оливин-монтichelлитовых пород проводились на микроскопе Olympus BX51 в отраженном и проходящем свете. Для идентификации породообразующих, акцессорных минералов и содержимого расплавных включений (дочерних фаз), а также для исследования их химического состава использовались методы сканирующей электронной микроскопии (энергодисперсионный локальный анализ и построение карт распределения элементов) на микроскопе Tescan Mira 3 LMU с использованием программы INCA

Energy 450+ (Oxford Instrumental Analytical Ltd) и методы микрозондового анализа на микроанализаторе Cameca Camebax Micro. Условия съемки на сканирующем микроскопе: ускоряющее напряжение 20 кВ, сила тока зонда 1 нА. В качестве стандартов для большинства элементов были использованы простые оксиды, металлы и минералы: SiO_2 (Si, O), Al_2O_3 (Al), диопсид (Mg, Ca), альбит (Na), ортоклаз (K), $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ (P), BaF_2 (BaF), Cr_2O_3 (Cr), пирит (S), Ti^0 , Fe^0 , Mn^0 , Zn^0 и др. Для количественной оптимизации применялся Co^0 . Микрозондовый анализ проводился при ускоряющем напряжении 20 кВ, силе тока 30–40 нА, диаметр электронного пучка составлял 2.5–3 мкм. Для калибровки микроанализатора перед началом работы проводилась съемка стандартов – природных минералов со строго установленными содержаниями отдельных элементов (диопсид, альбит и ортоклаз). Пределы обнаружений элементов (в мас.%): 0.009 SiO_2 , 0.036 TiO_2 , 0.012 Al_2O_3 , 0.019 FeO, 0.013 MgO, 0.022 MnO, 0.01 CaO, 0.02 Na_2O , 0.01 K_2O , 0.105 BaO, 0.019 SrO, 0.008 P_2O_5 , 0.011 Cl, 0.011 SO_3 . Все работы проводились в Институте геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева (Новосибирск).

Для определения количества воды в гидрогранате была применена вторично-ионная масс-спектрометрия (SIMS), выполненная на ионном микрозонде Cameca IMS-4f в аналитическом центре Ярославского филиала Физико-

технологического института (ЯФ ФТИ-АН РАН). Для этого использовалась методика А.В. Соболева (1996).

Для нагревания включений использовалась совмещенная с микроскопом термокамера с силитовым нагревателем, позволяющим нагревать включения до 1400–1450°C с точностью до $\pm 15^\circ\text{C}$. Наблюдения под микроскопом позволяли проследить все фазовые переходы внутри включений, установить начало и конец плавления дочерних фаз, определить температуру гомогенизации содержимого включений.

ДЖЕРФИШЕРИТ И ДРУГИЕ СУЛЬФИДНЫЕ МИНЕРАЛЫ В ПОРОДАХ КРЕСТОВСКОЙ ИНТРУЗИИ

Джерфишерит и другие сульфидные минералы отмечаются преимущественно в оливин-монтичеллитовых и мелилит-монтичеллитовых породах. Они присутствуют обычно в монтичеллите, часто в непосредственной близости от перовскита и титаномagnetита. Среди сульфидных минералов преобладает джерфишерит, остальные сульфиды (пентландит, хизлевудит, годлевскит, пирротин) встречаются в резко подчиненных количествах. Джерфишерит наблюдается в виде моно-, а также входит в состав полисульфидных глобул, но, чаще всего, он встречается в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях, примыкающих к перовскиту

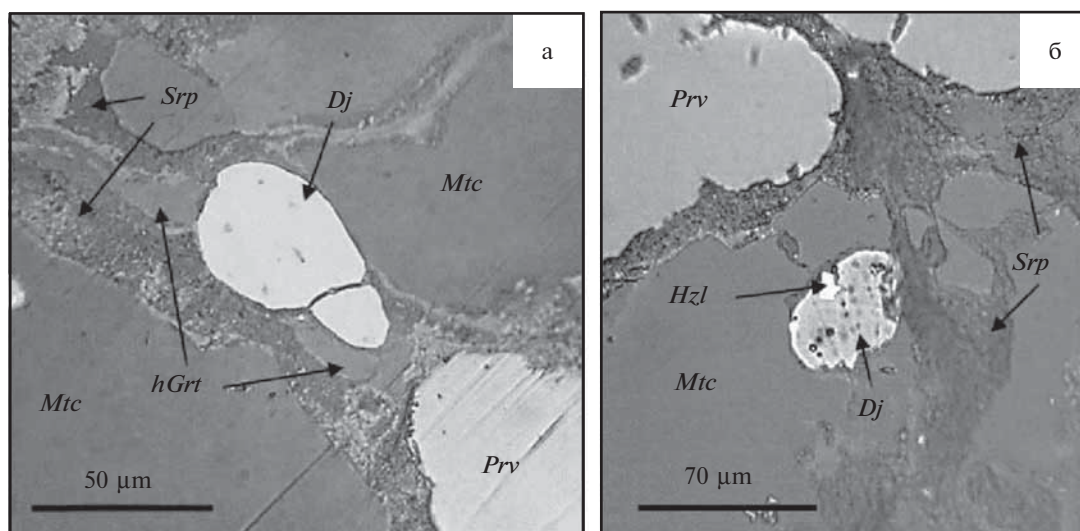


Рис. 2. Моно- и полисульфидные выделения джерфишерита в монтичеллите: (а) – джерфишеритовая глобула, (б) – хизлевудит-джерфишеритовая глобула. Фото в отраженном свете. *Dj* – джерфишерит, *Hzi* – хизлевудит, *Mtc* – монтичеллит, *hGrt* – гидрогранат, *Prv* – перовскит, *Srp* – серпентин.

и титаномagnetиту, и заполняет отходящие от них трещины в монтчеллите.

Мономинеральные и полисульфидные глобулы с джерфишеритом (рис. 2а, 2б) имеют каплевидную, округлую или сферическую форму. Отмечаются они в монтчеллите, обычно оконтурены гидрогранатом и располагаются в трещинах, исходящих от вкрапленников перовскита. По трещинам

развивается серпентин. В полисульфидных глобулах совместно с джерфишеритом присутствует хизлевудит.

Джерфишерит-гидрогранатовые обособления в монтчеллите имеют различные размеры, форму и разное количество сульфидов при постоянном существенном преобладании среди них джерфишерита. При небольшом содержании джерфишерит обособляется

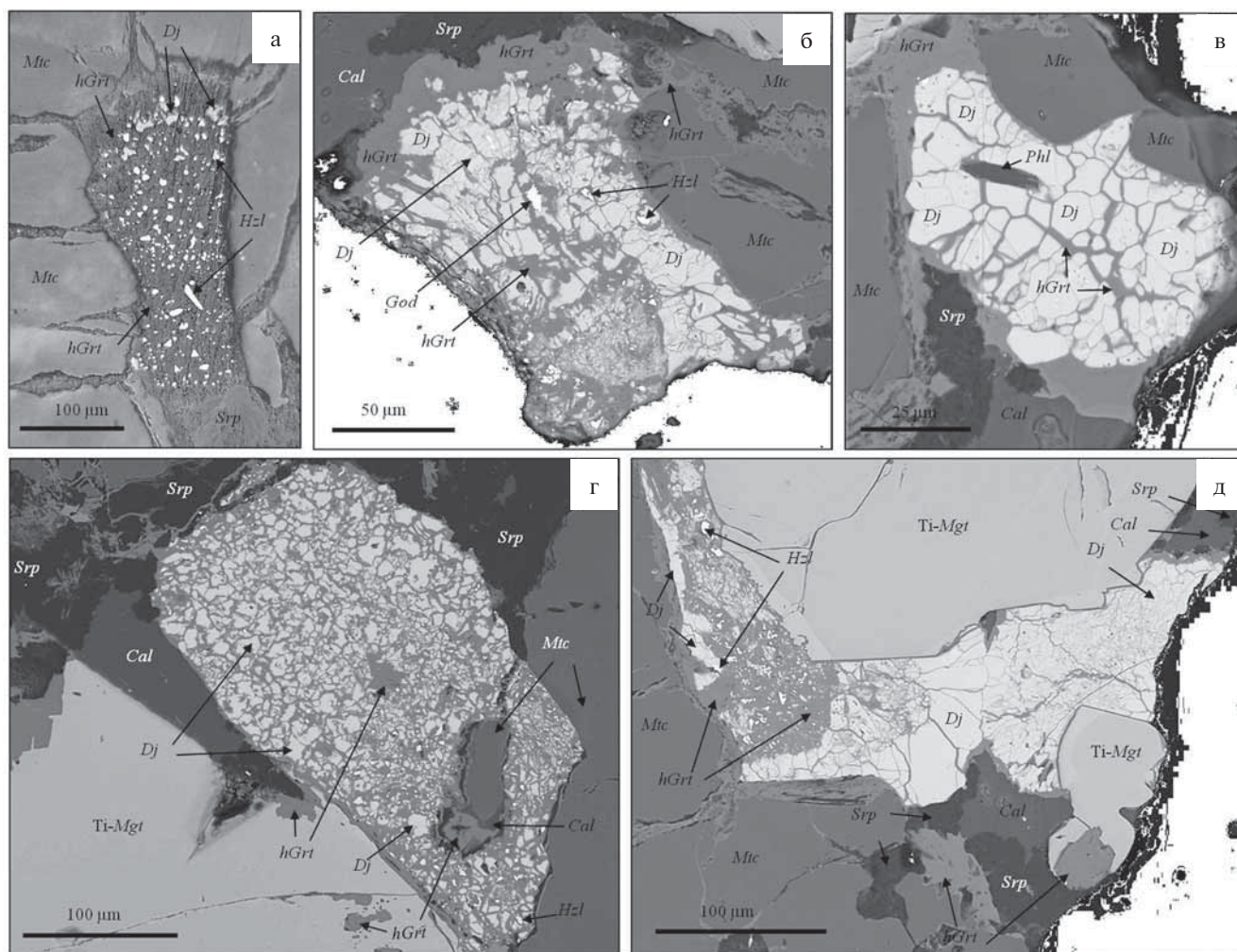


Рис. 3. Джерфишерит-гидрогранатовые обособления в монтчеллите, окруженные зернами серпентина и кальцита. (а) — обособление в трещине, выполненной гидрогранатом и серпентином. Джерфишерит отмечается в виде мелких округлых и каплевидных выделений в гидрогранате. Здесь же присутствуют редкие, частично ограниченные мелкие зерна хизлевудита. (б) — псевдоэвтектические и мирмекитовые выделения джерфишерита в гидрогранатовом, частично ограниченном обособлении. Хизлевудит и годлевскит присутствуют в виде редких неправильных мелких зерен. Участки с плотными крупными выделениями джерфишерита сочетаются с участками редких мелких выделений или даже полного отсутствия сульфидов в гидрогранате. (в) — гидрогранатовое обособление с плотно упакованными разного размера и формы зернами джерфишерита, среди которых отмечается лейста флогопита. (г) — призматическое обособление гидрограната, заполненное мелкими, мирмекитовыми выделениями джерфишерита и редкими зернами хизлевудита. Внутри обособления отмечается изолированный участок из монтчеллита, гидрограната и кальцита. (д) — джерфишерит-гидрогранатовая кайма вокруг вкрапленника титаномagnetита. Распределение джерфишерита в гидрогранате неравномерное: участки с пертитоподобными выделениями джерфишерита и крупными, плотно примыкающими друг к другу зернами джерфишерита сменяются участком гидрограната с редкими мелкими бесформенными и каплевидными выделениями джерфишерита и хизлевудита. Фото: (а) — в отраженном свете, (б)–(д) — в обратно рассеянных электронах. *Phl* — флогопит, *Cal* — кальцит, *God* — годлевскит, *Ti-Mgt* — титаномagnetит. Остальные условные обозначения см. на рис. 2.

в гидрогранате в виде отдельных небольших шариков. При увеличении его количества он фиксируется в виде эмульсиевидных выделений, затем укрупняется, приобретает неправильные очертания, образует сливные участки. Часто мелкие округлые и каплевидные выделения джерфишерита приурочены к центральной части джерфишерит-гидрогранатового обособления, а к периферии они укрупняются, приобретают витиеватые очертания. На контакте с монтichelлитом в гидрогранате нередко образуются сплошные джерфишеритовые зонки. При этом следует подчеркнуть, что выделения джерфишерита в гидрогранате во всех случаях имеют резкие ограничения, без признаков замещения последнего. Ниже рассматриваются некоторые примеры джерфишерит-гидрогранатовых обособлений в монтichelлите.

1. В крупной (460×100 мкм) трещине зерна монтichelлита, выполненной гидрогранатом, присутствуют мельчайшие округлые выделения джерфишерита, среди которых наблюдаются редкие мелкие призматические и частично ограненные зерна хизлевудита (рис. 3а). Джерфишерит-гидрогранатовый участок трещины переходит в серпентинизированный. Серпентином выполнены также мельчайшие трещинки, отходящие от джерфишерит-гидрогранатового обособления.

2. В монтichelлите обнаружено вытянутое (400×200 мкм) неправильной формы джерфишерит-гидрогранатовое обособление,

в котором джерфишерит присутствует в виде извилистых, червеобразных выделений разного размера и формы, образуя сложные сращения с гидрогранатом типа мирмекитовых или псевдоэвтектических структур (рис. 3б). В небольшом количестве среди сульфидов отмечаются очень мелкие неправильной овальной формы зерна годлевскита и хизлевудита. Джерфишерит-гидрогранатовое обособление оконтуривается сплошной каймой гидрограната разной ширины, за которой располагаются зерна серпентина и кальцита.

3. Зерна джерфишерита ограненной, полуограненной и неправильной овальной формы заполняют почти полностью гидрогранатовое обособление прихотливой формы размером 100×180 мкм, расположенное в монтichelлите рядом с вкрапленником титаномагнетита, вдоль отходящей от него трещины (рис. 3в). Среди зерен джерфишерита присутствует лейста флогопита. По контуру джерфишерит-гидрогранатового обособления развивается свободный от джерфишерита гидрогранат, который сменяется по направлению к вмещающему монтichelлиту зернами серпентина и кальцита.

4. На стыке крупного вкрапленника титаномагнетита и монтichelлита располагается призматическое джерфишерит-гидрогранатовое обособление размером 320×160 мкм (рис. 3г). Джерфишерит в нем представлен мелкими, преимущественно мирмекитовыми зернами с округлыми неровными краями, до-

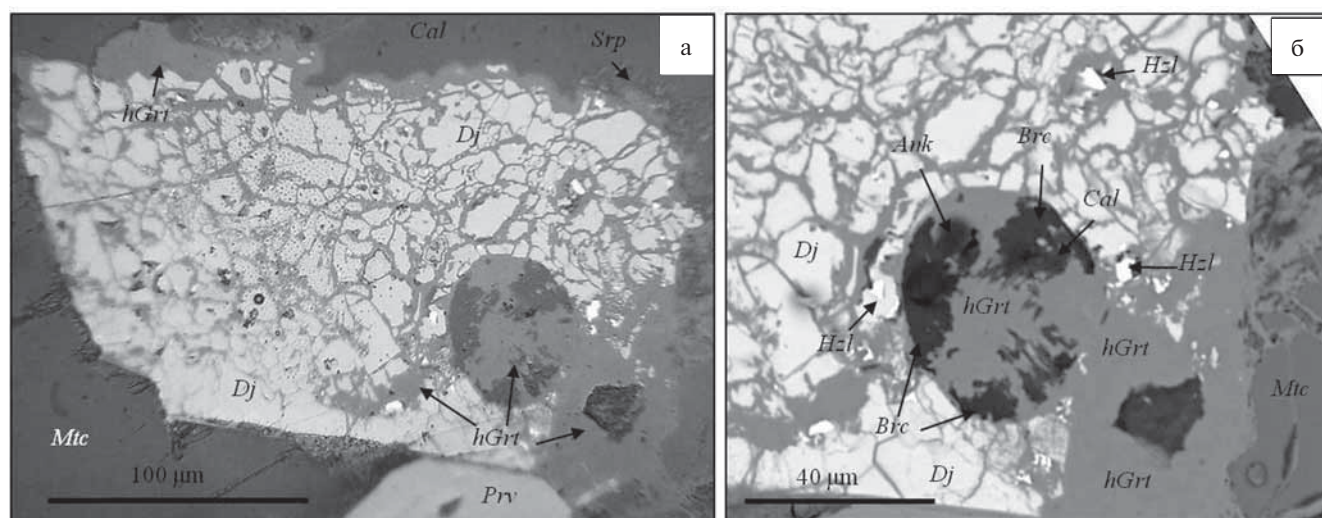


Рис. 4. Джерфишерит-гидрогранатовое обособление в монтichelлите с ферробрусит-карбонат-гидрогранатовой глобулой: (а) — общий вид, (б) — ферробрусит-карбонат-гидрогранатовая глобула.

Фото: (а) — в отраженном свете, (б) — в обратно рассеянных электронах. *Brc* — ферробрусит, *Ank* — анкерит. Остальные условные обозначения см. на рис. 2.

вольно плотно и равномерно распределенными по всему гидрогранату. Среди джерфишерита отмечаются очень редкие мелкие овальные зерна хизлевудита. Внутри обособления отмечается продолговатое (80×20 мкм) выделение монтичеллита, ассоциирующее с гидрогранатом и зерном кальцита. Вокруг джерфишерит-гидрогранатового обособления развивается кальцит и серпентин. Во вкрапленнике титаномагнетита, непосредственно контактирующего с джерфишерит-гидрогранатовым обособлением, отмечаются мелкие неправильной формы выделения гидрограната.

5. Вокруг крупного частично ограненного вкрапленника титаномагнетита в монтичеллите развивается прихотливая кайма (200×60 мкм) гидрогранат-джерфишеритового обособления с редкими мелкими зернами хизлевудита (рис. 3д). Размер, форма и распределение джерфишерита в кайме неравномерное. Поперек каймы, в ее центральной части располагаются крупные (до 20×40 мкм), плотно примыкающие друг к другу неправильные зерна джерфишерита, слагающие сливной участок. К последнему с двух сторон прилегают более мелкие пертитоподобные, тесно соприкасающиеся зерна джерфишерита. В левой части обособления отмечается участок, сложенный

преимущественно гидрогранатом с малочисленными, преимущественно круглыми или овальной формы, очень мелкими зернами джерфишерита и изредка — зернами хизлевудита. В некоторых местах на границе с монтичеллитом зерна джерфишерита в гидрогранате группируются в прихотливые каемки.

6. В монтичеллите обнаружено частично ограненное джерфишерит-гидрогранатовое обособление размером 210×120 мкм, содержащее ферробрусит-карбонат-гидрогранатовую глобулу (рис. 4а, 4б). К обособлению примыкает небольшое зерно перовскита, от которого отходят трещины, выполненные гидрогранатом, серпентином, кальцитом. Зерна джерфишерита в обособлении располагаются довольно плотно друг к другу и слагают до 85–90% от объема. Среди них отмечаются единичные очень мелкие неправильной формы зерна хизлевудита. Форма зерен джерфишерита округленно неправильная, извилистая. Наиболее крупные (до 30×15 мкм) из них приурочены к ограненной стороне обособления, контактирующей с монтичеллитом. Примечательно, что вокруг ферробрусит-карбонат-гидрогранатовой глобулы зерна джерфишерита располагаются по ее контуру, повторяя ее очертания. Размер глобулы составляет 40×50 мкм. В ее составе

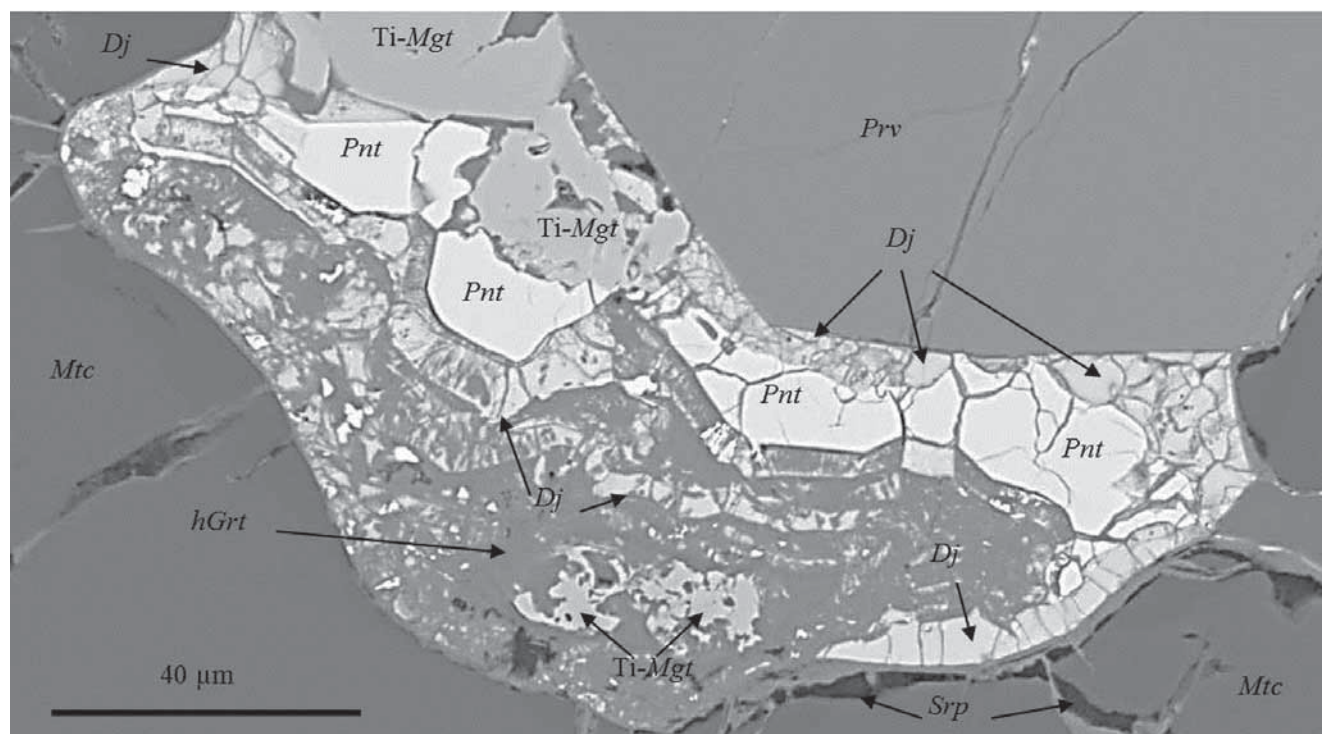


Рис. 5. Пентландит-джерфишерит-гидрогранатовая кайма вокруг вкрапленника перовскита в монтичеллите. Фото в обратно рассеянных электронах. *Pnt* — пентландит.

преобладает гидрогранат (70–75 об.%) и примерно в равных количествах присутствуют ферробрусит — $\text{FeMg}(\text{OH})_2$ и карбонаты Mg и Fe .

7. В монтчеллите обнаружено также джерфишерит-гидрогранатовое обособление с крупными зернами пентландита, которое серповидно оконтуривает с двух сторон ограниченный вкрапленник перовскита (рис. 5). В обособлении непосредственно к перовскиту примыкают в виде тонкой каймы мелкие извилистые выделения джерфишерита неправильной формы, а также два небольших зерна магнетита. За каймой располагаются крупные, частично ограненной формы зерна пентландита, сгруппированные в виде прерывистой жилки мощностью до 30–40 мкм. Последняя в некоторых местах оконтуривается зернами джерфишерита довольно крупных размеров. Крупные зерна джерфишерита отмечаются также на контакте гидрогранатового обособления с монтчеллитом, образуя сливную камеру, мощностью до 15–20 мкм. В остальных частях серповидного обособления в гидрогранате располагаются редкие мелкие овальной и неправильной формы выделения джерфишерита и пентландита, а также местами более крупные зерна джерфишерита, обособившиеся в прерывистые полосы и извилистые зоны.

ВКЛЮЧЕНИЯ С ДЖЕРФИШЕРИТОМ В МИНЕРАЛАХ ПОРОД ИНТРУЗИИ

Первичные расплавные включения с джерфишеритом наиболее часто встречаются в минералах монтчеллитовых и мелилитовых пород (Панина и др., 2001, 2018). В наибольшем количестве они присутствуют в перовските и монтчеллите, в меньшем — мелилите и титанистом гранате. Включения распределены неравномерно, иногда образуют скопления из разновеликих индивидов. В перовските и мелилите форма включений нередко округлая, часто неправильная, призматическая. Размер в основном — 20×30 , реже до 20×50 мкм. В монтчеллите и титанистом гранате форма включений частично ограненная, иногда призматическая или неправильная, размер в основном 30×40 мкм. Содержимое включений во всех минералах полностью раскристаллизовано. Джерфишерит и другие сульфиды во включениях часто имеют округлую форму, реже неправильную, а также близкую к квадратной. Остальные дочерние фазы включений обычно ксеноморфные, иногда с некоторыми элементами огранки.

В перовските — наиболее раннем и сквозном минерале рассматриваемых пород, по данным термобарогеохимии кристаллизующемся при 1230–1250°C (Панина и др., 2001), отмечается наибольшее количество первичных расплавных включений. В монтчеллите включений меньше, но по разнообразию они являются идентичными. В обоих минералах обнаружено три типа первичных силикатных расплавных включений. Включений I типа очень мало. Они чаще отмечаются в ядрах зональных вкрапленников перовскита, реже в монтчеллите. Характерной их особенностью является присутствие среди дочерних фаз, наряду с силикатными, также карбонатных, рудных и водосодержащих минералов. В I типе включений в перовските среди дочерних фаз с помощью сканирующей микроскопии диагностированы клинопироксен, флогопит, нефелин, апатит, пектолит, серпентин, гидрогранат, кальцит, магнетит, джерфишерит, хизлевудит (рис. 6). Значительно чаще в ядрах вкрапленников перовскита и в монтчеллите оливин-монтчеллитовых пород присутствуют II и III типы первичных расплавных включений. Во II типе включений силикатные дочерние фазы представлены только водосодержащими минералами: серпентином, гидрогранатом, реже флогопитом и пектолитом. Здесь также отмечаются в небольшом количестве апатит, кальцит, джерфишерит, Ti-магнетит (рис. 7а). В III типе включений присутствуют: клинопироксен, нефелин, пектолит, магнетит, кальцит, джерфишерит, пирротин (рис. 7б). На рис. 7в

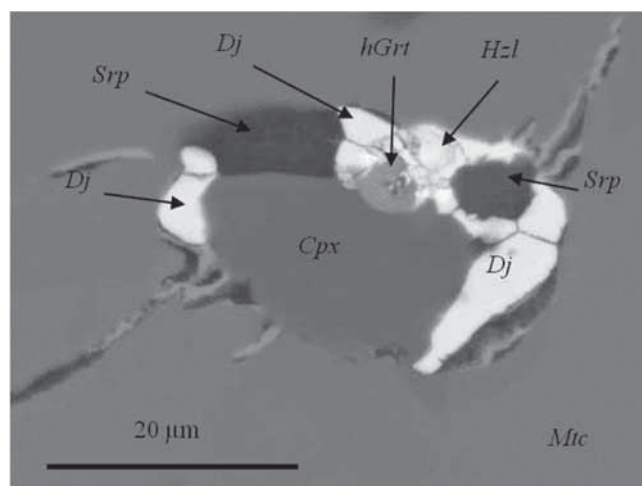


Рис. 6. Первичное раскристаллизованное расплавное включение I типа в монтчеллите. Фото в обратно рассеянных электронах. Условные обозначения см. на рис. 2.

оба типа (II и III) включений располагаются в непосредственной близости друг от друга.

Как показали эксперименты по гомогенизации включений в перовските, появление расплавов, законсервированных в II и III типах включений, связано с проявлением жидкостной несмесимости в расплавах, характерных для включений I типа, с последующим пространственным обособлением несмесимых фаз

друг от друга. Об этом свидетельствует близость нормативного состава несмесимых фаз с модальным составом включений II и III типов. Установлено, что при нагревании содержимое включений I типа постепенно просветляется и около 700–780°C в нем просматривается плавление солевых фаз. Выше 1000°C происходит плавление практически всех силикатных фаз. При 1130–1150°C во многих включениях

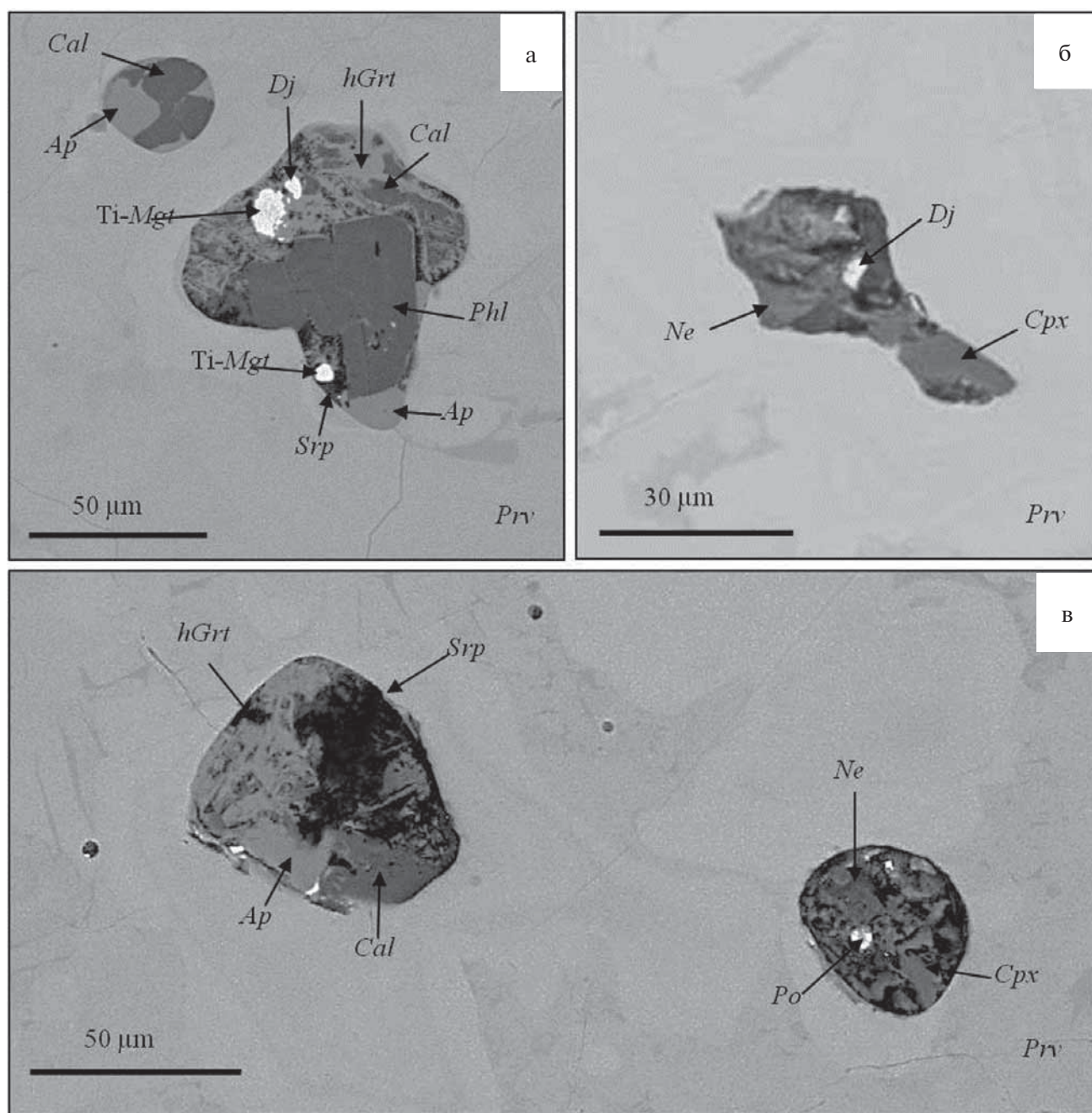


Рис. 7. Первичные раскристаллизованные расплавные включения II и III типов в ядерных зонах перовскита: (а) – включение II типа, (б) – включение III типа, (в) – совместное нахождение II и III типов включений в непосредственной близости друг от друга. Фото в обратно рассеянных электронах. Дочерние фазы: *Ne* – нефелин, *Po* – пирротин. Остальные условные обозначение см. на рис. 2.

отмечаются обособления в силикатном расплаве сферических глобул низкокремнистого расплава, обогащенного CO_2 , Cl , SO_3 . При дальнейшем нагревании глобулы постепенно уменьшаются и при $1230\text{--}1250^\circ$ большинство из них исчезает, а расплав становится однородным. После охлаждения и закалки в некоторых включениях фиксируется расслоенность расплава на две составляющие. Соотношение несмешиваемых фаз преимущественно 1 : 10, но иногда отмечаются отклонения до 1 : 5. Можно допустить, что захватываемый включениями расплав был не полностью однородным и несмешиваемость расплава началась при более высоких температурах. Как показал микрозондовый анализ, в химическом составе обособившегося в глобуле низкокремнистого, флюидонасыщенного расплава присутствуют (в мас.%): 20.8 SiO_2 , 4.27 TiO_2 , 4.63 Al_2O_3 , 6.50 FeO , 5.39 MgO , 17.25 CaO , 4.50 Na_2O , 5.01 K_2O , 0.35 BaO , 0.25 SrO , 1.87 P_2O_5 , 1.58 SO_3 , 0.25 Cl . При пересчете на нормативный состав в нем фиксируются (в мас.%): 24.0 гидрограната, 1.5 флогопита, 11.6 серпентина, 14.5 натролита, 3.5 пектолита, 7.2 перовскита, 4.3 апатита, 3.6 кальцита, 7.3 щелочных карбонатов, 0.8 SrBa карбонатов, 0.9 магнетита, 3.5 арканита и 0.4 галита. Химический состав несмешиваемого с глобулой расплава содержит (в мас.%): 33.92 SiO_2 , 5.60 TiO_2 , 6.15 Al_2O_3 , 10.51 FeO , 7.00 MgO , 16.54 CaO , 3.43 Na_2O , 4.56 K_2O , 0.57 BaO , 0.48 SrO , 2.55 P_2O_5 , 0.51 SO_3 , 0.14 Cl . При пересчете на нормативный состав в нем отмечается (в мас.%): 43.9 клинопироксена, 17.9 нефелина, ~6 апатита, 4.8 пектолита, 1.1 арканита, 15.1 — магнетита, ~4 щелочных карбонатитов, 1.4 SrBa карбонатов. По-видимому, в нормативном составе обеих несмешиваемых фаз присутствует также джерфишерит (до 0.5 мас.%), поскольку в их химических составах наблюдается 0.5—1.58 SO_3 и 0.14—0.25 мас.% Cl , а Ni из-за его малого количества не мог быть зафиксирован микрозондовым анализом. Таким образом, оказалось, что нормативный состав несмешиваемых фаз в I типе включений практически идентичен модальному составу включений II и III типов.

Во включениях II типа, содержащихся в монтчеллите, плавление солевых фаз начинается около 450°C , при 750°C большинство дочерних фаз расплавляется. При $990\text{--}1090^\circ\text{C}$ осуществляется гомогенизация содержимого включений. В химическом составе гомогенизированных включений отмечается (в мас.%): 24.2 SiO_2 ,

2.3 Al_2O_3 , 4.8 FeO , 11.1 MgO , 19.7 CaO , 7.4 Na_2O , 3.9 K_2O , 0.1 P_2O_5 , 2.3 SO_3 , 5.9 Cl . Включения III типа, как менее насыщенные флюидной составляющей, гомогенизируются при более высоких температурах — $1210\text{--}1230^\circ\text{C}$. Их химический состав достаточно близок составу силикатного расплава, несмешиваемого с флюидонасыщенной низкокремнистой глобулой.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МИНЕРАЛОВ ИЗ СУЛЬФИДНЫХ ОБОСОБЛЕНИЙ

Химический состав *джерфишерита* из моно- и полисульфидных глобул, а также джерфишерит-гидрогранатовых обособлений в монтчеллитовых породах относительно однороден (табл. 1, ан. 1—13). Он содержит (в мас.%): 38.4—40.2 Fe , 13.8—16.7 Ni , 1.4—0.1 Co , 0.1—0.9 Cu , 9.1—9.6 K , 32.5—33.3 S и 1.3—1.4 Cl . Иногда в минерале незначительно увеличивается содержание Ni (до 18.4—19.9 мас.%) и, соответственно, уменьшается концентрация Fe (до 35.1—37.4 мас.%), а также Co и Cu . Более широко варьирует состав дочернего джерфишерита из первичных раскристаллизованных включений. Причем, состав джерфишерита из включений I типа (табл. 1, ан. 14—16) остается довольно близким таковому из рассматриваемых сульфидных обособлений. Он содержит также высокое количество Ni и низкую концентрацию Cu , а кроме K (8.1 мас.%) в нем нередко присутствует до 0.7 мас.% Na . Вместе с тем дочерние джерфишериты из включений II и III типов характеризуются пониженным содержанием Ni (3.3—1.6 мас.%), высоким количеством Fe (40.9—53.2 мас.%), полным отсутствием Co и наличием в III типе включений существенной (7.6—10.6 мас.%) концентрации Cu (табл. 1, ан. 17—19). В целом состав джерфишерита из джерфишерит-гидрогранатовых обособлений, глобул и дочерних фаз из I типа включений отвечает формуле $(\text{K}_{6-5.7}\text{Na}_{0-0.5}(\text{Fe}_{17.9-17.1}\text{Ni}_{6.6-7}\text{Co}_{0.3-0.4}\text{Cu}_{0-0.2})_{25-24.5}\text{S}_{26}\text{Cl}_1)$, а из II и III типов включений: $(\text{K}_{6.4-5.4}\text{Na}_{0.1-0.6}(\text{Fe}_{22.1-17.3}\text{Ni}_{1.1-1.4}\text{Cu}_{0-4.2})_{23.1-22.9}\text{S}_{26}\text{Cl}_1)$.

Широкие вариации состава дочерних фаз джерфишерита отмечались также в первичных включениях в мелилите куддитов интрузии Кудды (в мас.%): 34.0—42.8 Fe , 17.2—4.7 Ni , 0.8—7.4 Cu (Henderson et al., 1999). Аналогичные колебания состава были также характерны для джерфишерита из вторичных включений в ксенокристаллах оливина кимберлитовых брекчий из трубки Удачная-Восточная (в мас.%):

Таблица. 1. Химический состав джерфшерита из монтцеллитовых пород и расплавных включений, мас. %.

Эле- менты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
К	9.14	9.24	9.33	9.18	9.28	9.45	9.60	9.42	9.48	9.17	9.17	9.38	9.10	9.40	8.75	8.53	9.14	9.21	8.51
Na	н.п.о.	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	0.68	0.74	0.13	н.п.о	1.11
Fe	39.56	38.36	41.23	37.46	40.14	39.67	40.05	39.40	40.26	39.55	35.13	40.47	38.93	39.17	36.76	38.84	53.17	47.06	40.88
Ni	13.85	15.46	12.15	18.45	13.84	15.96	16.76	16.64	15.96	14.58	19.99	14.70	16.80	15.65	17.68	16.24	2.59	1.64	3.33
Co	1.03	1.47	1.09	0.06	1.36	0.10	0.14	0.10	0.53	0.64	0.45	0.54	0.08	0.63	1.12	0.74	н.п.о	н.п.о	н.п.о
Cu	0.90	1.17	0.87	0.09	0.83	0.18	0.09	0.09	0.46	0.89	0.27	н.п.о	0.52	0.09	н.п.о	н.п.о	н.п.о	7.60	10.61
S	32.75	32.99	32.46	32.66	32.94	33.06	33.26	33.33	33.31	32.78	32.69	32.54	32.71	32.90	33.28	33.85	33.47	32.67	33.40
Cl	1.25	1.35	1.37	1.31	1.36	1.47	1.40	1.42	1.39	1.31	1.34	1.36	1.39	1.22	1.37	1.42	1.42	1.31	1.45
Сумма	98.48	100.04	98.50	99.21	99.75	99.89	101.30	100.40	101.39	98.92	99.04	98.99	99.53	99.06	99.64	100.36	99.92	100.03	99.29

Формула рассчитана на 26 S																			
К	5.96	6.29	6.14	6.00	6.01	6.10	6.16	6.02	6.05	5.99	5.99	6.14	5.94	6.11	5.61	5.37	5.83	6.02	5.41
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.79	0.13	0.00	1.20
Fe	18.01	17.52	18.97	17.12	18.23	17.91	17.98	17.62	18.04	18.02	16.03	18.58	17.77	17.84	16.48	17.11	23.71	21.48	17.34
Ni	6.00	6.70	5.32	8.01	5.98	6.86	7.15	7.07	6.81	6.31	8.67	6.41	7.29	6.79	7.54	6.82	1.10	0.71	1.42
Co	0.44	0.64	0.46	0.02	0.58	0.05	0.05	0.05	0.23	0.28	0.20	0.23	0.02	0.28	0.47	0.32	0.00	0.00	0.00
Cu	0.36	0.46	0.36	0.02	0.33	0.07	0.02	0.02	0.17	0.36	0.10	0.00	0.21	0.02	0.00	0.00	0.00	3.06	4.17
S	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.10	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00
Cl	0.89	0.97	1.00	0.94	0.97	1.03	1.02	1.00	0.97	0.95	0.97	0.97	1.00	0.86	0.98	0.99	1.00	1.02	1.03

Примечание. 1–8 – из джерфшерит-гидрогранатовых обособлений; 9, 10 – из джерфшерит-гидрогранатовых обособлений с крупными выделениями пентландита; 11, 12 – из моносulfидных глобул; 13 – из полисulfидной джерфшеритовой глобулы; 14–16 – из расплавных включений I типа в монтцеллите; 17 – из расплавных включений II типа в титанистом гранате; 18, 19 – из расплавных включений III типа в перовските. н.п.о. – ниже предела обнаружения.

32.6–38.5 Fe, 23.1–4.2 Ni, 0.1–17.6 Cu (Шарыгин и др., 2003). Однако для большинства кимберлитов Якутии состав выделений джерфишера характеризуется высоким количеством (15.1–24.4 мас.%) Ni и низким (0.18–2.1 мас.%) Cu (Головин и др., 2003; Sharygin et al., 2007; Шарыгин и др., 2012). Подобные соотношения Ni и Cu характерны для джерфишера в мегакристаллах кимберлитов Южной Америки (Clarke et al., 1994) и в щелочных лампрофирах Канады (Hanois, Mineau, 1991). Примечательно, что в составе джерфишера в щелочных породах и карбонатах Хибин (Соколова и др., 1971), Ковдора (Балабонин и др., 1980), Салмагорского массива (Barkov et al., 1997), перидотитов Инагли (Еремеев и др., 1982), а также в дочерних фазах из включений в перовските, присутствующих в Сакарбонатах Гулинского плутона (Kogarko et al., 1995), концентрация Ni всегда низкая, а содержание Cu колеблется от пониженных до высоких.

Некоторые исследователи (Clay et al., 2014) полагают, что разные содержания Fe, Ni и Cu в джерфишерах отражают различия в условиях образования мантийных (кимберлиты) или коровых (щелочные породы и карбонаты) расплавов, а также различия в составе

локализованных флюидов. Другие исследователи (Шарыгин и др., 2003) допускают, что разный состав джерфишера зависит от состава и эволюции родоначального расплава на различных стадиях его кристаллизации.

Второстепенные сульфидные минералы, присутствующие в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях, также характеризуются некоторым варьирующим составом. В *пентландите* (табл. 2, ан. 1, 2) содержание Fe колеблется от 23.8 до 27.4 мас.%. Наибольшее его количество отмечается у крупных жилкообразных скоплений пентландита в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях (рис. 5, табл. 2, ан. 1). Увеличение концентрации Fe сопровождается уменьшением таковой Co от 9.07 до 3.95 мас.% при относительно близком количестве Ni.

Хизлевудит — довольно часто встречаемый в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях минерал, характеризуется также заметными вариациями состава (табл. 2, ан. 3, 4). Количество Ni у него изменяется от 63 до 70 мас.%, а Co — от 6.9 до 0.9 мас.%.

Годлевскит имеет довольно выдержанный состав (табл. 2, ан. 5). В нем содержится до 65.2 мас.% Ni и 1.8 мас.% Fe.

Таблица 2. Химический состав сульфидов из джерфишерит-гидрогранатовых обособлений в монтчеллитовых породах Крестовской интрузии, мас. %.

Элементы	Пентландит		Хизлевудит		Годлевскит
	1	2	3	4	5
Fe	27.40	23.80	1.55	3.01	1.78
Ni	33.56	33.12	62.96	70.03	65.15
Co	3.95	9.07	6.88	0.88	н.п.о
Cu	н.п.о	0.05	0.16	0.13	н.п.о
Zn	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о
S	32.65	32.92	26.92	27.08	31.22
Сумма	97.56	98.96	98.47	101.13	98.15
Формульные коэффициенты					
Fe	3.89	3.33	0.10	0.10	0.20
Ni	4.53	4.41	2.60	2.80	6.82
Co	0.53	1.21	0.30	0.00	0.00
Cu	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	8.06	8.04	2.00	2.00	5.98

Примечание. 1, 2 — вариации состава пентландита, 3, 4 — то же хизлевудита, 5 — состав годлевскита.

Таблица 3. Усредненный химический состав силикатных и карбонатных минералов из включений (А), джерфишерит-гидрогранатовых обособлений и их окружения (Б), мас. %.

Оксиды	Гидрогранат				Серпентин		Флогопит		Кальцит		Анке- рит	Доло- мит	Ферро- брусит
	А		Б		А	Б	А	Б	А	Б	Б	Б	Б
	1(4)	2(10)	3(9)	4(11)	5(5)	6(7)	7(6)	8(5)	9(5)	10(3)	11(2)	12(1)	13(4)
SiO ₂	26.32	25.84	24.53	26.06	40.34	41.65	39.43	39.85	0.19	0.02	н.п.о	н.п.о	0.90
TiO ₂	0.32	2.64	0.08	0.37	0.07	0.03	1.01	0.61	0.05	0.02	н.п.о	н.п.о	н.п.о
Al ₂ O ₃	0.40	2.29	1.42	0.65	н.п.о	0.03	9.87	11.04	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	0.09
FeO	25.19*	22.73*	23.93*	26.85*	2.82	1.84	8.03	4.51	0.14	0.25	18.52	15.20	8.38
MnO	0.46	0.43	н.п.о	н.п.о	0.03	0.03	0.25	0.01	н.п.о	н.п.о	0.61	0.28	1.74
MgO	0.89	0.42	0.48	0.27	37.92	39.74	23.45	26.49	н.п.о	0.01	43.92	31.42	58.65
CaO	32.70	35.70	34.05	34.15	0.43	0.52	0.71	0.41	54.17	56.38	0.90	15.45	0.34
K ₂ O	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	9.54	9.32	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о	н.п.о
Сумма	86.28	90.05	84.49	88.70	81.61	83.85	92.29	92.47	54.55	57.75	63.95	62.34	70.10

Примечание. Минералы: 1 — из I типа включений; 2, 5, 7, 9 — из II типа включений; 3 — хадаккристаллы в монтчеллите; 4 — из джерфишерит-гидрогранатового обособления; 6, 8, 10 — из окружения джерфишерит-гидрогранатовых обособлений; 11–13 — из ферробрусит-карбонат-гидрогранатовой глобулы. В скобках указано количество анализов.

*Количество Fe в форме Fe₂O₃ (мас.%): №1 — 28.00, №2 — 25.26, №3 — 26.59, №4 — 29.84.

Как было отмечено выше, джерфишерит в I и II типах расплавных включений и джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях ассоциирует с водосодержащими силикатными минералами и карбонатами.

Гидрогранат в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях является матрицей для выделения сульфидных минералов — преимущественно джерфишерита, а иногда в обособлениях совместно с ферробруситом и карбонатами образует глобулы. Обособления обычно располагаются в монтчеллите и приурочены к зернам Ti-магнетита и перовскита и к исходящим от них трещинам. Гидрогранат также отмечается в первичных расплавных включениях I и II типов в перовските и монтчеллите. Изредка гидрогранат отмечается в виде мелких (десятки микрон) хадаккристаллов кубической формы в монтчеллите.

По химическому составу (табл. 3, ан. 1–4) он относится к гидроандрадиту и довольно близок к кайме зонального гидрограната, обнаруженного (Kresten et al., 1982) в трещинах кимберлитового альнеита из Альне, Исландия (Швеция). Состав гидроандрадита во всех рассматриваемых нами объектах довольно близкий. Несущественные различия отмечаются лишь в содержаниях Al₂O₃ и FeO: в хадакри-

сталлах и дочерних фазах из включений II типа Al больше, а Fe меньше, чем в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях, ферробрусит-карбонат-гидрогранатовой глобуле и во включениях I типа. Содержание H₂O, определенное с помощью SIMS, составляет 1.55–1.72 мас.%.

Серпентин в оливин-монтчеллитовых породах обычно развивается рядом или вокруг джерфишерит-гидрогранатовых обособлений, нередко заполняет (иногда совместно с гидрогранатом) трещины в монтчеллите, идущие от вкрапленников Ti-магнетита и перовскита. Он также присутствует в первичных расплавных включениях в оливине кудитов, а также в перовските и монтчеллите оливин-монтчеллитовых пород. Включения в оливине кудитов содержат кроме серпентина также флогопит, пектолит, апатит, сульфиды. В монтчеллитовых породах серпентин входит в состав I и II типов включений. Химический состав серпентина (табл. 3, ан. 5, 6) везде практически одинаков. Он включает 1.8–2.8 мас.% FeO и 0.4–0.5 CaO, а также сотые доли процентов TiO₂ и MnO.

Флогопит присутствует в I и II типах расплавных включений, а также изредка отмечается в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях и их окружении. Дочерний флогопит по сравнению с лейстами из окружения со-

держит (табл. 3, ан. 7, 8) больше FeO (8.0 против 4.5 мас.%) и меньше Al_2O_3 (9.9 против 11.0 мас.%) и MgO (23.4 против 26.5 мас.%).

Кальцит характерен для всех типов расплавных включений, присутствующих в минералах монтichelлитовых пород. Он также отмечается в окружении джерфишерит-гидрогранатовых обособлений. Состав его (табл. 3, ан. 9, 10) стандартный, содержит небольшую (0.1–0.3 мас.%) примесь FeO, иногда до 0.2–0.6 мас.% SrO.

Анкерит и *доломит* обнаружены в ферробрусит-карбонат-гидрогранатовой глобуле, содержащейся в джерфишерит-гидрогранатовом обособлении (рис. 4). В их составе (табл. 3, ан. 11, 12) содержится, соответственно (в мас.%): 18.5 и 15.2 FeO, 43.9 и 31.4 MgO, а также 0.9 и 15.4 CaO.

Fe-брусит — $Mg, Fe(OH)_2$ — отмечен также только в карбонат-гидрогранатовой глобуле из джерфишерит-гидрогранатового обособления. В его составе (табл. 3, ан. 13) содержится до 8.4 мас.% FeO и 58.7 мас.% MgO.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показали исследования, джерфишерит в породах Крестовской интрузии присутствует как самостоятельный акцессорный минерал и как дочерняя фаза в трех типах первичных расплавных включений в перовските, монтichelлите и мелилите. I тип расплавных включений с джерфишеритом отмечается в монтichelлите и на одной из ранних стадий кристаллизации ядерных зон вкрапленников перовскита, который является сквозным минералом ультрабазитов и начинает кристаллизоваться вслед за оливином в оливинитах при температурах 1230–1250°C (Панина и др., 2001, 2018). Характерной особенностью I типа включений с джерфишеритом является их высокая флюидонасыщенность, что отражается в присутствии среди силикатных дочерних фаз большого количества водосодержащих минералов, а также карбонатов. Некоторые водосодержащие дочерние фазы и кальцит присутствуют также и в первичных включениях в оливине оливинитов и куддитов Крестовской интрузии. А именно: флогопит и кальцит совместно с монтichelлитом, перовскитом, апатитом и магнетитом — в оливинитах, а флогопит, серпентин, пектолит совместно с монтichelлитом, перовскитом, апатитом и рудной фазой — в куддитах (Панина и др.,

2018). Это свидетельствует об изначальном присутствии воды в родоначальной для пород интрузии магме.

Согласно термобарогеохимическим исследованиям (Панина и др., 2018), оливиниты — самые ранние породы Крестовской интрузии, формировались из материнской ларнит-нормативной щелочно-ультрамафитовой магмы калиевого типа щелочности, обогащенной Ti и летучими компонентами. В ее химическом составе отмечалось (в мас.%): 34.8–35.7 SiO_2 , 3.2–4.3 TiO_2 , 5–7 Al_2O_3 , 11.4–13.7 FeO, 6.4–7.7 MgO, 21–24 CaO, 1–3 Na_2O , 6.6–7.2 K_2O , 0.1–0.2 Cl, 0.3–0.7 SO_3 , до 2.2 F, 0.7 H_2O и 2–3 CO_2 . Исходя из экспериментальных работ (Рябчиков, 1987; Рябчиков и др., 2009), подобные высококальциевые, богатые калием ультрабазитовые расплавы, обогащенные Ti и летучими компонентами, могут возникать на больших (около 100 км) глубинах в результате мантийного метасоматоза. Главными компонентами мантийных флюидов являются вода, CO_2 , щелочи, второстепенными — F, Cl, S, P (Добрецов, 2008; Кузьмин, Ярмолюк, 2016). Присутствие заметных количеств CO_2 при малых степенях плавления мантии способствует генерации высококальциевых низкремнистых магм типа оливиновых мелилититов (Eggler, 1974; Когарко, Грин, 1998). С увеличением глубины и давления щелочность мантийных флюидов и K/Na отношения в них возрастают, что способствует подвижности и переносу Ti и других высокозарядных катионов и появлению существенных их количеств в первичных мантийных магмах. Щелочной характер мантийных флюидов обеспечивает высокую растворимость в них халькофильных металлов в форме гидросульфидных комплексов (Luhr, 1990).

На Крестовском массиве начавшаяся кристаллизация оливинитов из родоначальной ларнит-нормативной магмы содействовала интенсивному накоплению летучих компонентов и увеличивала ее флюидизацию. На стадии кристаллизации перовскита в монтichelлитовых породах около 1230–1250°C проявилась силикатно-солевая несмесимость с последующим пространственным отделением интенсивно флюидизированного водонасыщенного малокремнистого щелочного расплава от магмы. Об этом свидетельствует присутствие трех типов первичных включений с джерфишеритом в перовските и монтichelлите рассматриваемых пород, а также подтверждается

экспериментами по гомогенизации первичных расплавных включений I типа, обнаруживающих несмесимость. С пространственным отделением несмесимых фаз включений I типа связано образование расплавных включений II и III типов. Аналогичность нормативного состава несмесимых фаз включений I типа с модальным составом II и III типов включений говорит об их идентичности и образовании из одной исходной магмы. Пространственно отделившийся интенсивно флюидизированный расплав, обогащенный Cl, S, щелочами, H_2O и CO_2 , содержащий 20–24 мас.% SiO_2 (расплав II типа включений), имел существенный избыток щелочей по отношению к Al (агпаитовый характер). С его кристаллизацией связано формирование в монтichelлите джерфишерит-гидрогранатовых обособлений с карбонат-серпентиновым окружением. Об этом свидетельствует присутствие в их составе одного и того же специфического набора минералов: гидрограната, флогопита, серпентина, кальцита, джерфишерита, магнетита. Отличия заключаются лишь в том, что джерфишерит и другие сульфиды в обособлениях сегрегируются в гидрогранате, а серпентин и кальцит развиваются рядом с ним, тогда как во включениях все дочерние фазы распределены более равномерно. Кристаллизация пространственно отделившегося флюидизированного водонасыщенного малокремнистого расплава происходила, согласно термобарогеохимическим исследованиям, в диапазоне 990–1090°C. Кристаллизация расплава сопровождалась проявлением силикатно-сульфидной несмесимости – ликвацией с отделением сульфидного расплава, из которого кристаллизовались мельчайшие округлые выделения джерфишерита, создающие глобулярные, эмульсиевидные и мирмекитовые структуры в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях (рис. 3). С ликвацией также связано появление в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях ферробрусит-карбонат-гидрогранатовых глобул (рис. 4), оконтуренных зернами джерфишерита. Присутствие глобул свидетельствует о том, что их образование и кристаллизация джерфишерит-гидрогранатовых обособлений происходили одновременно из магматического расплава (а не в связи с процессами метасоматоза или метаморфизма) в результате проявления ликвации. Следствием ликвации является также присутствие моно- и полисульфидных глобул с джерфишеритом в гидрогранат-серпентин-

кальцитовом субстрате (рис. 2).

Следует отметить, что в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях помимо джерфишерита часто присутствуют и другие сульфиды – хизлевудит, годлевскит, пентландит. Характерно, что они, как и джерфишерит, выделяются в виде глобул, эмульсии, червеобразных образований. Нередко эти сульфиды укрупняются и, так же как и джерфишерит, формируют прерывистые каемки, полосы, жилки (рис. 5), обычно возникающие при перераспределении сульфидного расплава в силу его небольшой вязкости и высокой подвижности. Пространственная приуроченность джерфишерита и других сульфидов к гидрогранату, вероятно, была вызвана их структурной идентичностью.

По всей видимости, большая часть джерфишерита была образована на поздней стадии кристаллизации зерен монтichelлита из отделившихся от эволюционирующей родоначальной ларнит-нормативной щелочно-ультраосновной магмы водосодержащих малокремнистых расплавов, обогащенных S, CO_2 , Cl, K, рудными компонентами, аналогичных включениям II типа. Очень подвижные флюидонасыщенные расплавы заполняли многочисленные трещины в монтichelлите, которые образовались при тектонических подвижках в процессе внедрения мелилитового расплава. Некоторая часть джерфишерита продолжала кристаллизоваться из богатого Ca силикатного расплава, близкого к составу катунгитов (аналог включений III типа). Об этом свидетельствует наличие включений III типа с джерфишеритом, присутствующих в перовските, монтichelлите и мелилите.

ВЫВОДЫ

Образование моно- и полисульфидных с джерфишеритом глобул, а также джерфишерит-гидрогранатовых обособлений в монтichelлитовых породах Крестовской интрузии происходило на магматическом этапе кристаллизации монтichelлита. Оно было связано с проявлением около 1230–1250°C жидкостной несмесимости в ларнит-нормативной щелочно-ультраосновной материнской магме и пространственным отделением от нее водонасыщенного низкокремнистого расплава, обогащенного щелочами (при преобладании K над Na), S, CO_2 , Cl и рудными компонентами. Кристаллизация пространственно от-

делившегося расплава осуществлялась при 990–1090°C и сопровождалась ликвацией с обособлением сульфидного расплава и образованием эмульсиевидных, глобулярных и мирмекитовых структур в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях, их последующего укрупнения и образования каемок, полосок, прерывистых жилок. С ликвацией расплава связано появление в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях ферробрусит-карбонат-гидрогранатовых глобул и присутствие моно- и полисульфидных глобул с джерфишеритом в гидрогранат-серпентин-кальцитовом субстрате. Редкие зерна хизлевудита, годлевскита и пентландита, присутствующие в джерфишерит-гидрогранатовых обособлениях, по-видимому, кристаллизовались одновременно с джерфишеритом из того же специфического водонасыщенного низкремнистого расплава, о чем свидетельствуют их аналогичные формы выделения.

Благодарности. Авторы искренне благодарны В.В. Шарыгину (ИГиМ СО РАН), В.С. Каменецкому (University of Tasmania) и О.А. Андреевой (ИГЕМ РАН) за обсуждение полученных результатов, сделанные замечания и предложения.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках Государственного задания (проект № 330-2016-005) и финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00285а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балабонин Н.Л., Волошин А.В., Пахомовская Я.А., Поляков К.И. Состав джерфишерита из щелочных комплексов Кольского полуострова // Минералогический журнал. 1980. № 2. С. 90–99.

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

Головин А.В., Шарыгин В.В., Похилenko Н.П., и др. Вторичные включения расплава в оливине неизменных кимберлитов трубки «Удачная-Восточная» // Докл. АН. 2003. Т. 388. № 3. С. 369–372.

Головин А.В., Шарыгин В.В., Похилenko 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.

Добрецов Н.Л. Геологические следствия термодинамической модели плюмов // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 7. С. 587–604.

Еремеев Н.В., Добровольская М.Г., Муравикова Г.Н. Новое обнаружение джерфишерита в ще-

лочной серии Инаглинского комплекса (Алданский щит) // Докл. АН СССР. 1982. Т. 263. С. 1210–1212.

Зедгенизов Д.А., Логвинова А.М., Шацкий В.С., Соболев Н.В. Включения в микроалмазах из некоторых кимберлитовых трубок Якутии // Докл. АН. 1998. Т. 359. № 1. С. 74–78.

Когарко Л.Н., Грин Д.Х. Фазовые равновесия при плавлении меллитового нефелинита под давлением до 60 кбар // Докл. АН. 1998. Т. 359. № 4. С. 522–524.

Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Тектоника плит и мантийные плюмы – основы эндогенной тектонической активности Земли последние 2 млрд лет // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 1. С. 11–30.

Панина Л.И., Исакова А.Т., Сазонов А.М. Оливиниты Крестовской интрузии – продукты кристаллизации ларнит-нормативной щелочно-ультрамафитовой магмы: данные изучения расплавных включений // Петрология. 2018. Т. 26. № 2. С. 163–177.

Панина Л.И., Сазонов А.М., Усольцева Л.М. Меллитовые и монтчеллитсодержащие породы Крестовской интрузии (Полярная Сибирь) и их генезис // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 9. С. 1314–1332.

Рябчиков И.Д. Процессы мантийного магнеобразования // Эволюция магматизма в истории Земли. М.: Наука, 1987. С. 349–371.

Рябчиков И.Д., Когарко Л.Н., Соловова И.П. Физико-химические условия магнеобразования в основании Сибирского плуона по данным исследования расплавных микровключений в меймечитах и щелочных пикритах Маймеча-Котуйской провинции // Петрология. 2009. Т. 17. № 3. С. 311–323.

Сазонов А.М., Звягина Е.А., Леонтьев С.И., и др. Платиноносные щелочно-ультраосновные интрузии Полярной Сибири. Томск: Изд-во ИНТИ, 2001. 510 с.

Соболев А.В. Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрологической информации // Петрология. 1996. Т. 4. № 3. С. 228–239.

Соколова М.Н., Добровольская М.Г., Органова Н.И., и др. Обнаружение и распределение джерфишерита в пегматитах Хибинского массива // Геология рудн. месторождений. 1971. Т. 13. С. 62–71.

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.

Шарыгин И.С., Головин А.В., Похилenko Н.П., Соболев Н.В. Джерфишерит в неизменных кимберлитах трубки Удачная-Восточная, Якутия // Докл. АН. 2003. Т. 390. № 2. С. 242–246.

Шарыгин И.С., Головин А.В., Похилenko 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.

- Barkov A.Y., Laajoki K.V.O., Gehor S.A., et al.* Chlorine-poor analogues of djerfisherite-thalfeisite from Noril'sk, Siberia and Salmagorsky, Kola Peninsula, Russia // *Canad. Mineral.* 1997. V. 35. P. 1421–1430.
- 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. Mineral.* 1994. V. 32. P. 815–823.
- Clay P.L., O'Driscoll B., Upton B.G.J., Busemann H.* Characteristics Djerfisherite from fluid-rich, metasomatized alkaline intrusive environments and anhydrous enstatite chondrites and achondrites // *Amer. Mineral.* 2014. V.99. P. 1683–1693.
- Dawson J.B., Smith J.V., Steele I.M.* Petrology and mineral chemistry of plutonic igneous xenoliths from the carbonatite volcano, Oldoinyo Lengai, Tanzania // *Petrology.* 1995. V. 36. P. 797–826.
- Eggler D.H.* Effect of CO₂ on the melting of peridotite // *Carnegie Institution of Washington Year Book.* 1974. V. 73. P. 215–224.
- Hanois L., Mineau R.* Geochemistry of the Ile Calvus monticellite alnoite, Quebec, Canada // *Canad. J. Earth Science.* 1991. V. 28. P. 1050–1057.
- Henderson C.M., Kogarko, L.N., Plant D.A.* Extreme closed system fractionation of volatile-rich, ultrabasic peralkaline melt inclusions and the occurrence of djerfisherite in the Kugda alkaline complex, Siberia // *Mineral. Magazine.* 1999. V. 63. № 3. P. 433–438.
- Hogarth D.D.* Mineralogy of leucite-bearing dykes from Napoleon Bay, Baffin Island: multistage Proterozoic lamproites // *Canad. Mineral.* 1997. V. 35. P. 53–78.
- Kogarko L.N., Plant D.A., Henderson C.M., Kjarsgaard B.A.* Na-rich carbonate inclusions in perovskite and calzirtite from the Guli intrusive Carbonatite, polar Siberia // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1995. V. 109. P. 124–129.
- Kresten P., Nairis H.J., Wadsten T.* Hydroandratite from Alnö Island, Sweden // *Geologiska Föreningens I Stockholm Förhandlingar.* 1982. V. 104. P. 240.
- Luhr J. F.* Experimental phase relations of water- and sulfur-saturated arc magmas and the 1982 eruptions of El Chichón volcano // *Petrology.* 1990. V. 31. P. 1071–1114.
- Mitchell R.H.* Carbonate-carbonate immiscibility, neighborite and potassium iron sulphide in Oldoinyo Lengai natrocarbonatite // *Mineral. Magazine.* 1997. № 61. P. 779–789.
- Sharygin V.V., Golovin A.V., Pokhilenko N.P., Kamenetsky V.S.* Djerfisherite in the Udachnaya-East pipe kimberlites (Sakha-Yakutia, Russia): paragenesis, composition and origin // *Eur. Mineral.* 2007. V. 19. № 1. P. 51–63.
- Sobolev N.V., Kaminsky F.V., Griffin W.L., et al.* Mineral inclusions in diamonds from the Sputnik kimberlite pipe, Yakutia // *Lithos.* 1997. V. 39. P. 135–157.

DJERFISHERITE IN MONTICELLITE ROCKS OF THE KRESTOVSKAYA INTRUSION (POLAR SIBERIA)

L.I. Panina*, A.T. Isakova**

*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, 630090, Russia*

**e-mail: panina@igm.nsc.ru,*

***e-mail: atnikolaeva@igm.nsc.ru*

Djerfisherite in the monticellite rocks of the Krestovskaya Intrusion is found in primary melt inclusions, mono- and polysulfide globules, and in the djerfisherite–hydrogarnet segregations. Melt inclusions are represented by three types. Type I is observed in the cores of perovskite phenocrysts and monticellite grains and corresponds to one of the early crystallization stages of the parental larnite-normative alkali ultrabasic magma enriched in water and other volatiles. Daughter phases of the inclusions are clinopyroxene, serpentine, phlogopite, apatite, nepheline, hydrogarnet, magnetite, djerfisherite, pectolite, and calcite. In some type I inclusions, melt at 1230–1250°C was immiscibly split into two fractions: alkali silicate fraction and highly fluidized water-bearing low-silica fraction enriched in alkali, sulfur, and CO₂. The types II and III inclusions in perovskite, monticellite, Ti-garnet, and melilite were formed through the spatial separation of immiscible phases. This follows from the similarity of the modal composition of types II and III melt inclusions to the normative composition of immiscible fractions of type I inclusions. Type II inclusions contain mainly water-bearing silicate daughter phases (hydrogarnet, serpentine, phlogopite, and pectolite), as well as djerfisherite, calcite, and magnetite. Type III inclusions contain clinopyroxene, nepheline, apatite, magnetite, djerfisherite, calcite, and pectolite. The djerfisherite–hydrogarnet segregations are confined to the Ti-magnetite and perovskite phenocrysts and fractures radiating from them in monticellite. The mineral composition of the djerfisherite–hydrogarnet segregations together with their surrounding is similar to the composition of type II inclusions containing similar water-bearing silicates, djerfisherite, calcite, and magnetite.

Such similarity gives grounds to relate the formation of the djerfisherite–hydrogarnet segregations, as type II inclusions, with the spatial separation and crystallization of highly fluidized low-silica melt enriched in water, alkalis, sulfur, and CO₂. According to the homogenization experiment, the crystallization of highly fluidized melt at 990–1090°C was accompanied by silicate–sulfide immiscibility and the formation of globular, emulsion-like, and myrmekite structures in the djerfisherite–hydrogarnet segregations, as well as mono- and polysulfide globules with djerfisherite in the hydrogarnet–calcite–serpentine substrate. The formation of ferrobrucite–carbonate–hydrogarnet globules in the djerfisherite–hydrogarnet segregations was also related to melt liquation, which again confirms the magmatic origin of the latter. Sometimes, djerfisherite in the djerfisherite–hydrogarnet segregations becomes coarser and forms rims, bands, and veinlets, which is likely explained by the high mobility and low viscosity of sulfide melt. Scarce grains of heazlewoodite, godlevskite, and pentlandite hosted in the djerfisherite–hydrogarnet segregations frequently have the same shape as djerfisherite, which indirectly suggests their simultaneous crystallization from the same melt. The chemical composition of the djerfisherite from mono- and polysulfide globules, djerfisherite–hydrogarnet segregations, and type I inclusions, as most Yakutian kimberlites, is characterized by the high (12.1–16.7 wt %) Ni and low (0.1–0.9 wt %) Cu contents. The composition of the djerfisherite from types II and III inclusions differs in the lowered (3.3–1.6 wt %) Ni and elevated (40.9–53.2 wt %) Fe contents; type III inclusions have high Cu content: from 7.6 to 10.6 wt %.

Keywords: djerfisherite, djerfisherite–hydrogarnet segregations, monticellite rocks, types I–III inclusions Ti-magnetite, Krestovskaya alkali-ultrabasic intrusion.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-59032187-205>