

УДК 549.3 (470.21)

Структуры кристаллизации сульфидных расплавов как признак метаморфизма руд Оленинского месторождения золота

Калинин* А. А., Савченко Е. Э.

*Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Информация о статье

Поступила в редакцию
27.12.2019;

получена
после доработки
04.03.2020

Ключевые слова:

зеленокаменный пояс
Колмозеро-Воронья,
Оленинское
месторождение,
метаморфизм,
сульфидный расплав,
галенит,
серебро,
фрейбергит

Для цитирования

Реферат

В рудах месторождения золота Оленинское (северо-западная часть зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья, Кольский п-ов, Россия) в краевой части зерен галенита, пирротина, фрейбергита отмечены тонкие полиминеральные сростания, в состав которых кроме перечисленных сульфидов входят пираргирит, диафорит, физелиит, учучкакуаит, ульманит и некоторые другие минералы. Эти сростания рассматриваются нами как результат кристаллизации сульфидного расплава, получившегося при нагреве до температуры свыше 500 °С входящих в состав руды минералов халькофильных элементов, имеющих низкую температуру плавления (Zn, Ag, Cd, Tl, Pb, As, Sb, Bi, Se, Te и некоторые другие). О таком происхождении изученных сростаний свидетельствуют: 1) сложный полиминеральный (до 6 минеральных видов) состав сростаний; 2) отсутствие признаков замещения ранних минералов поздними; 3) обязательное участие в составе сростаний минералов свинца, серебра, сурьмы, т. е. элементов с низкой температурой плавления их соединений; 4) каплевидные либо неправильной формы округлые выделения сульфидов и сульфосолей в матрице основного сульфида-хозяина; 5) выделение таких сростаний в виде обособлений на границе сульфидов и жильных минералов либо в виде микропрожилков в кварце. Частичное плавление рудных минералов с образованием сульфидного расплава и последующая его кристаллизация проходили на палеопротерозойском этапе при метаморфизме сформировавшихся ранее рудоносных пород в условиях средней части амфиболитовой фации при температуре выше 500 °С. Признаки наложенного метаморфизма руды выявлены также и на расположенном в той же части пояса Колмозеро-Воронья медно-молибденовом порфириновом месторождении Пеллапахк.

Калинин А. А. и др. Структуры кристаллизации сульфидных расплавов как признак метаморфизма руд Оленинского месторождения золота. Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 1. С. 29–37. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-29-37

Structures of sulfide melt crystallization as an indication of metamorphism of the ores in the Oleninskoe gold deposit

Arkady A. Kalinin*, Yevgeny E. Savchenko

*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Article info

Received 27.12.2019;
received in revised
04.03.2020

Key words:

Kolmozero-Voronya
greenstone belt,
Oleninskoe deposit,
metamorphism,
sulfide melt,
galena,
silver,
freibergite

For citation

Abstract

Multiphase fine aggregates of galena, pyrrhotite, freibergite, pyrargyrite, diaphorite, fizelyite, uchuchacuaite, ullmanite, and some other minerals are found in the ores of the Oleninskoe gold deposit in the Kolmozero-Voronya greenstone belt (Kola Peninsula, Russia). The aggregates are considered to be the product of crystallization of sulfide melt formed of the minerals of low-melting-point chalcophile elements (Zn, Ag, Cd, Tl, Pb, As, Sb, Bi, Se, Te, etc.) during heating to the temperature above 500 °C. This origin of the aggregates is affirmed by: 1) multiphase composition (up to 6 minerals) of the aggregates; 2) absence of signs of replacing early minerals by the late ones; 3) essential presence in the aggregates of the minerals of chalcophile elements Ag, Pb, Sb, i. e. elements with a low melting point of their compounds; 4) roundish droplet form of inclusions of minor minerals in the main sulfide, and 5) aggregates' position at the boundary sulfide – quartz or in fractures in vein minerals. Partial melting and crystallization of sulfide melts took place during Paleoproterozoic metamorphic event, when the Neoproterozoic sulfide-bearing rocks were mid-amphibolite metamorphosed under the temperature > 500 °C. Signs of the Paleoproterozoic metamorphism are found in the ores of the neighboring Cu-Mo porphyry Pellapahk deposit as well.

Kalinin, A. A. et al. 2020. Structures of sulfide melt crystallization as an indication of metamorphism of the ores in the Oleninskoe gold deposit. *Vestnik of MSTU*, 23(1), pp. 29–37. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-29-37

Введение

Сульфидный анатексис, т. е. частичное плавление сульфидной минерализации при метаморфизме рудоносных пород – это сравнительно редкое явление, которое ранее было описано для руд некоторых полиметаллических и золоторудных месторождений, метаморфизованных в условиях амфиболитовой и гранулитовой фаций, в частности, Брокен Хилл в Австралии (*Frost et al., 2002*), Блэйквассли в Норвегии (*Vokes, 1971*), Хемло в Канаде (*Tomkins et al., 2004; 2006*). Проявление сульфидного анатексиса связано с тем, что температура плавления в сульфидных системах ниже, чем в силикатных. Наиболее низкие значения температуры плавления характерны для сульфидов, в состав которых входят халькофильные металлы: цинк, галлий, серебро, кадмий, индий, ртуть, таллий, свинец, мышьяк, сурьма, висмут, селен и теллур.

При метаморфизме пород частичное плавление сульфидов названных металлов начинается уже в то время, когда порода в целом еще находится в твердом кристаллическом состоянии. Так, например, появление расплава в системе арсенопирит-пирит происходит при ~490 °С, т. е. в условиях, близких к границе зеленосланцевой и амфиболитовой фации (*Frost et al., 2002*). Температура плавления пираргирита составляет 485 °С (*Воган и др., 1981*). В системе Ag-Pb-S первая область расплава появляется на стороне Ag-Pb при 304 °С (*Craig et al., 1968*). При 500 °С области расплава имеются в тройных системах Pb-Sb-S, Ag-Sb-S и в псевдотройной системе PbS-CuS-Sb₂S₃. В системах с участием висмута расплавы появляются уже при температуре менее 300 °С (*Frost et al., 2002*).

На температуру плавления сульфидных минералов некоторое влияние оказывает давление, причем в одних случаях с повышением давления температура плавления возрастает (например, для пары пирит-арсенопирит на 17 °С/кбар), а в других – снижается (системы с участием висмута и сурьмы). Но еще большее влияние на понижение температуры плавления оказывает наличие в сульфидах даже незначительных примесей (1–2 %) других халькофильных металлов с низкой температурой плавления (*Frost et al., 2002*).

В случае метаморфизма пород в условиях амфиболитовой – гранулитовой фации достигается температура порядка 500–800 °С. Если метаморфизуемая порода содержит сульфидную минерализацию перечисленных выше элементов, то происходит частичное плавление сульфидов, а при снижении температуры – кристаллизация сульфидных расплавов с формированием полиминеральных тонких сростаний сульфидов, сульфосолей, а также, возможно, теллуридов и селенидов халькофильных металлов. Нами структуры кристаллизации сульфидного расплава установлены в рудах месторождения золота Оленинское в зеленокаменном поясе Колмозеро-Воронья. Это позволяет уточнить условия генезиса и историю формирования этого месторождения.

Материалы и методы исследования

Минерализация золота, серебра и других металлов изучена в пробах из коллекции авторов, собранной в ходе полевых исследований в поясе Колмозеро-Воронья в 2017 и в 1981–1983 гг. В коллекцию входят пробы золотоносных кварцевых метасоматитов, развивающихся по амфиболитам и гранит-порфирам.

Методика исследования включала:

- описание аншлифов коренных пород с минерализацией благородных металлов на оптическом микроскопе и на электронном микроскопе LEO-1450;
- оценку состава минералов с помощью энергодисперсионного спектрометра Bruker XFlash-5010, установленного на сканирующем микроскопе Leo-1450, методом нестандартного анализа с использованием программного обеспечения QUANTAX 200; фотографирование образцов в обратно-рассеянных электронах.

Результаты и обсуждение

История регионального метаморфизма пород пояса Колмозеро-Воронья включает два этапа – неоархейский 2,77–2,68 млрд лет и палеопротерозойский 1,9–1,8 млрд лет (*Пряткина и др., 1963; Беляев и др., 1977; 2002; Морозова и др., 1979*).

Параметры температуры и давления метаморфизма неоархейского этапа (температура около 600 °С и давление 3–4 кбар) отвечали низкотемпературной субфации амфиболитовой фации пониженного давления андалузит-силлиманитовой фациальной серии (*Высокоградиентные..., 1982*). С регрессивной стадией неоархейского этапа метаморфизма связано интенсивное развитие процессов кислотного выщелачивания и сопряженного с ним железо-магнезиально-кальциевого метасоматоза. Минеральные ассоциации метасоматитов свидетельствуют, что РТ-условия их формирования (в среднем $T = 550$ °С и $P = 3,3$ кбар) близки к пику метаморфизма (*Высокоградиентные..., 1982*). К метасоматически измененным неоархейским породам приурочена золото-серебряная минерализация месторождения Оленинское и медно-молибденовая минерализация рудопроявления Пеллапахк (*Белолитецкий и др., 1987*).

На завершающей стадии неоархейского этапа метаморфизма произошло внедрение плагиомикроклиновых и турмалиновых гранитов. С гранитами связаны жилы турмалиновых и редкометалльных пегматитов (*Высокоградиентные..., 1982; Белолитецкий и др., 1987*), причем эти жилы секут оруденелые метасоматически измененные породы на участках месторождений Оленинское и Пеллапахк. Возраст редкометалльных

пегматитов 2454±8 млн лет был установлен U-Pb датированием микролита из пегматитов горы Васин-Мыльк (Кудряшов и др., 2015).

Палеопротерозойский этап метаморфизма относится к амфиболитовой фации кианит-силлиманитового фациального типа: по сравнению с ранним этапом метаморфизма температура была несколько ниже, в среднем 530 °С, а давление выше – 5,5 кбар (Высокоградиентные..., 1982). В породах, претерпевших палеопротерозойский метаморфизм, выявлено развитие параморфоз кианита по андалузиту, замещение кордиерита мелкозернистым агрегатом ставролита и хлорита, частичная или полная перекристаллизация слюды, изменение состава внешних кайм порфиروбласт граната (Высокоградиентные..., 1982; Петров и др., 1984).

Поскольку, как отмечено выше, рудоносные метасоматические породы на Оленинском месторождении секутся пегматитовыми жилами, то можно полагать, что формирование рудной минерализации произошло до возрастной отметки 2,46 млрд лет. В этом случае оруденелые породы должны были претерпеть в палеопротерозое метаморфизм амфиболитовой фации и, соответственно, нести следы наложенного метаморфизма. Такие следы обнаружены в рудах Оленинского месторождения не только в виде преобразования силикатных минералов, но и в виде структур кристаллизации сульфидного расплава.

Структуры срастания нескольких сульфидных фаз (от 2 до 6, чаще 3), которые можно интерпретировать как результат кристаллизации сульфидного расплава, отмечаются в золото-серебряных рудах, связанных с арсенопирит-кварцевыми метасоматитами. В составе изученных срастаний участвуют минералы серебра, меди, железа, свинца и сурьмы, наиболее часто встречаются следующие минеральные ассоциации:

галенит + фрейбергит ± пирротин (система $PbS-CuS-Ag_2S-FeS-Sb_2S_3$) (рис. 1, 2);

пирротин + пираргирит ($FeS-Ag_2S-Sb_2S_3$) (рис. 2);

галенит + физелиит или учукчакуайт ($PbS-Ag_2S-Sb_2S_3$) (рис. 3);

галенит + ульманит + фрейбергит ($PbS-NiS-CuS-Sb_2S_3$) (рис. 4);

диафорит + пираргирит + галенит ($PbS-Ag_2S-Sb_2S_3$), эти срастания описаны в (Калинин и др., 1986; Белолитецкий и др., 1987).

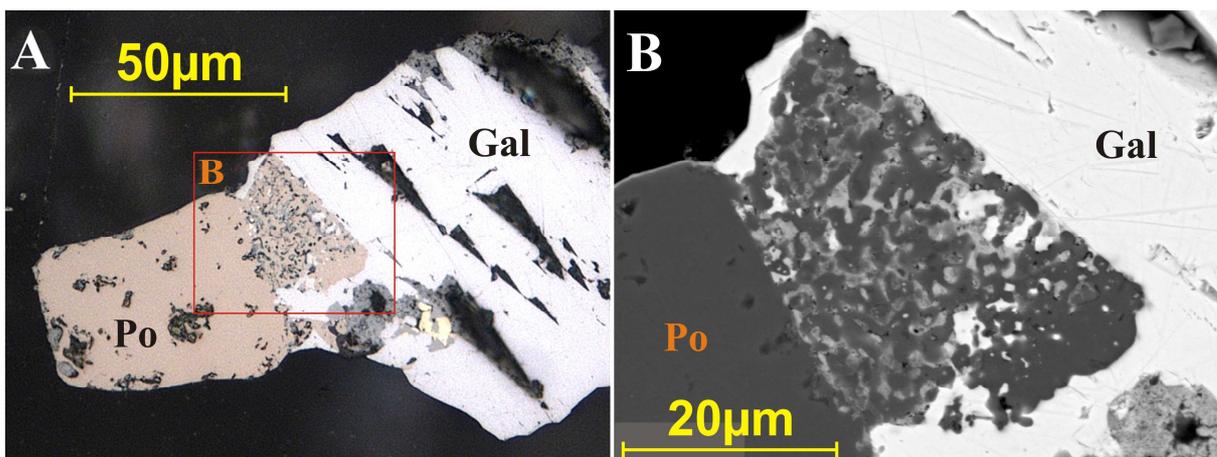


Рис. 1. Срастание пирротина (кремовый, обозначен Po), галенита (белый, Gal), фрейбергита (серый) и халькопирита (желтый): А – фото аншлифа, без анализатора, В – фотография участка срастания в обратно-рассеянных электронах (BSE)

Fig. 1. Aggregate of pyrrhotite (cream-colored, Po), galena (white, Gal), freibergite (gray), and chalcopyrite (yellow): A – polished section under plane polarized light; B – back-scattered electron (BSE) image of the aggregate

Наряду с перечисленными минералами в составе срастаний были отмечены брейтгауптит (вместо ульманита), семсейит (вместо галенита), а также редко и в незначительных количествах халькопирит. В одном случае установлено срастание с участием теллурида серебра штютцита с пираргиритом и гринокитом (рис. 5).

Размер полиминеральных сростков – продукта кристаллизации сульфидного расплава – обычно не превышает 0,2 мм, а размер выделений отдельных минералов в них меньше 5 мкм. Полиминеральные сростки, как правило, примыкают к относительно крупным зернам основных сульфидов, таких как галенит, пирротин, реже фрейбергит.

Признаки, по которым указанные срастания относятся к структурам, сформировавшимся в результате кристаллизации сульфидного расплава, следующие:

– полиминеральный сложный состав выделений сульфидов и сульфосолей без признаков замещения ранних минералов поздними;

- участие в составе сростаний минералов элементов с низкой температурой плавления соединений – свинца, серебра, сурьмы, теллура;
- округлые каплевидные либо неправильной формы выделения сульфидов и сульфосолей в матрице основного сульфида-хозяина;
- выделение таких сростаний в виде микропрожилков по границе зерен кварца, либо кварца и сульфидов.

Указанные признаки полностью соответствуют характеристикам структур, сформировавшимся в результате кристаллизации сульфидного расплава, приведенным в статье Б. Р. Фроста с соавторами (Frost et al., 2002).

Следует отметить появление в составе структур кристаллизации сульфидных расплавов антимонидов никеля (ульманит и брейтгауптит), хотя вне таких сростаний соединения никеля не встречены. Вероятнее всего, никель поступил в расплав из ранних сульфидов железа (пирротин и арсенопирит), где он отмечен как изоморфная примесь до 2 мас.% (Белолитецкий и др., 1987). Известно, что примесные элементы "охотно" переходят из минерала-хозяина в образующийся расплав путем диффузии (Frost et al., 2002).

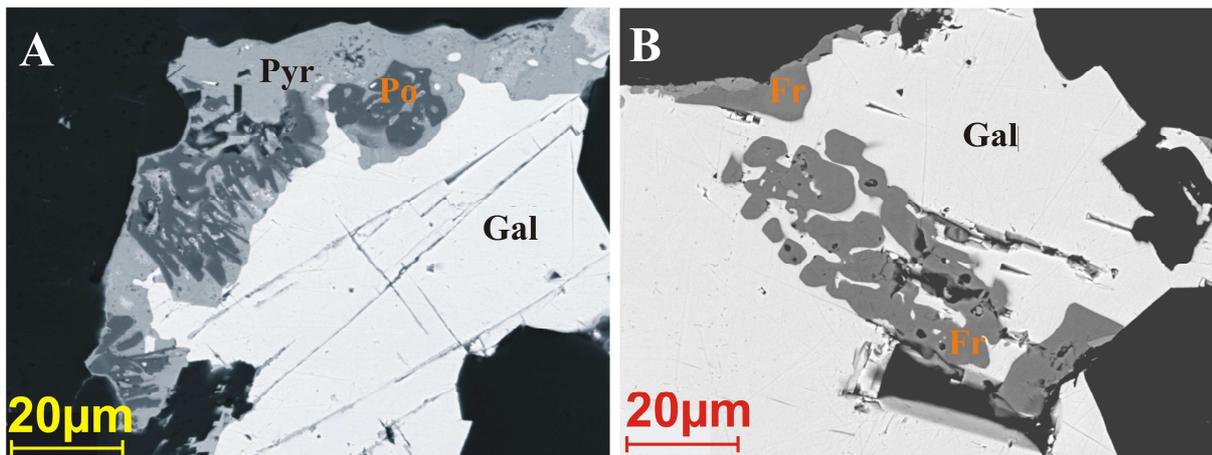


Рис. 2. А – сростание пираргирита (Pyr) с пирротинном (Po) и галенитом (Gal); В – сростание фрейбергита (Fr) с галенитом (Gal). Фотографии участков сростания в обратно-рассеянных электронах (BSE)

Fig. 2. A – aggregate of pyrrargyrite (Pyr) and pyrrhotite (Po) with galena (Gal); B – aggregate of galena (Gal) and freibergite (Fr) (gray). Back-scattered electron (BSE) images of the aggregates

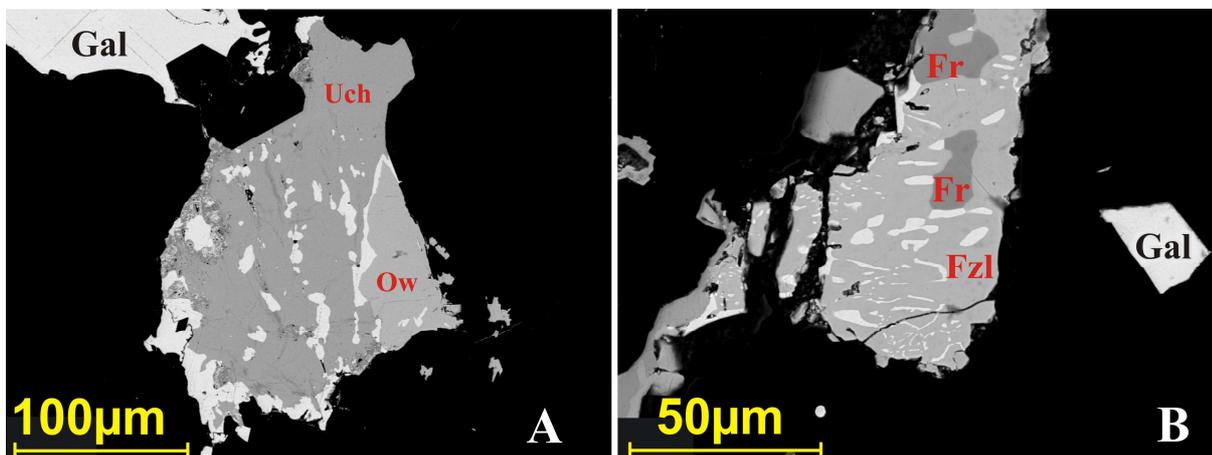


Рис. 3. А – сростание учукчакуайта (Uch), овихиита (Ow) и галенита (вкрапленники); В – сростание физелиита (Fzl) с галенитом (светло-серый, вкрапленники, Gal) и фрейбергитом (Fr)

Fig. 3. А – aggregate of uchucchacuaite (Uch), owyheeite (Ow), and galena (impregnation); B – aggregate of fizelyite (Gal), freibergite (Fr), and galena (light gray impregnation).

Back-scattered electron (BSE) images of the aggregates

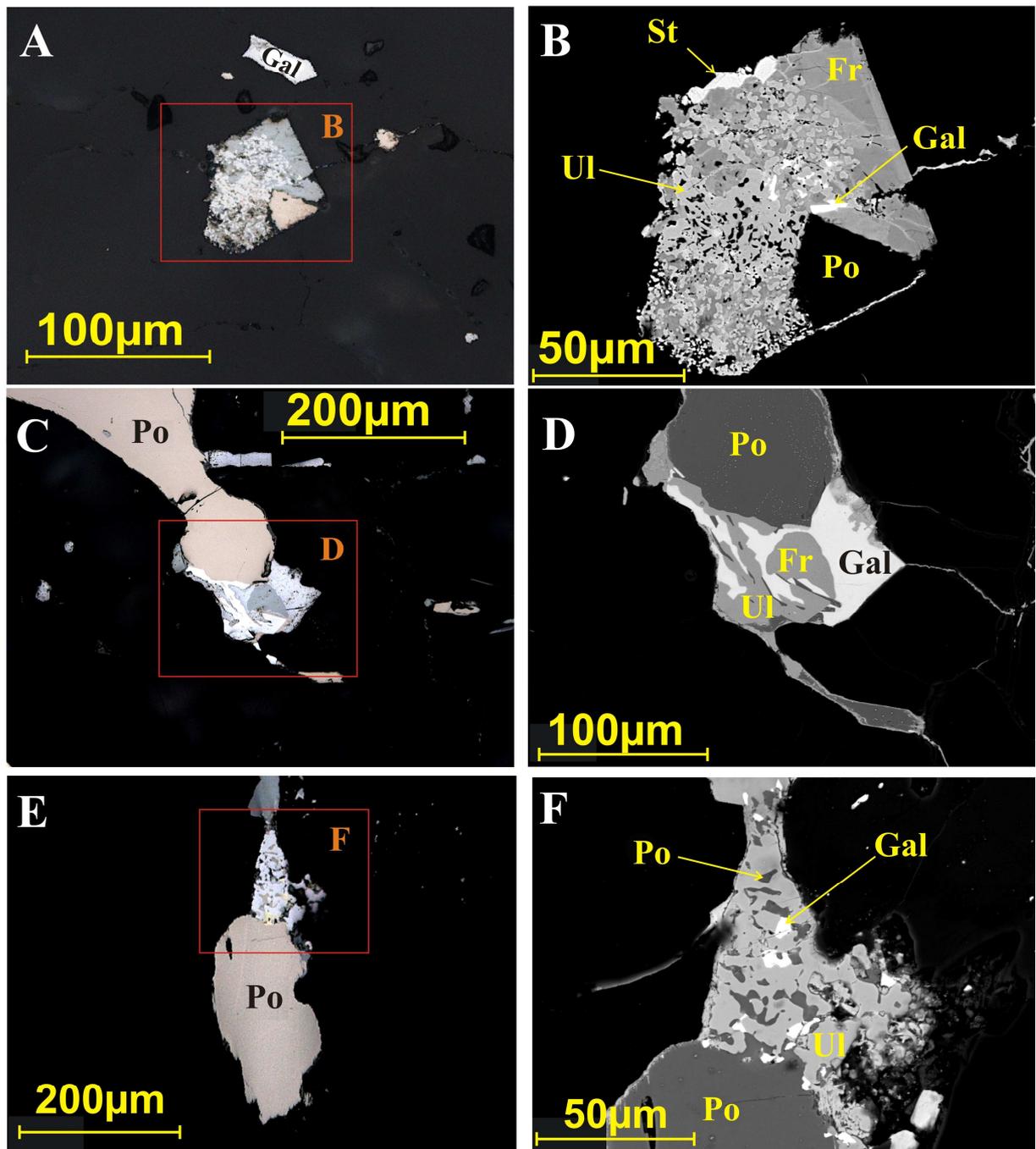


Рис. 4. А–D – срастание ульманита (UI), фрейбергита (Fr) и галенита (Gal) в краевой части зерна пирротина (кремовый, Po), St – стефанит; E–F – срастание ульманита с пирротинном и галенитом. Слева – фото шлифа, без анализатора, справа – участки срастаний, фото в обратно-рассеянных электронах
Fig. 4. A–D – aggregates of ullmannite (UI), freibergite (Fr), and galena (Gal) in the edge parts of pyrrhotite grains (cream-colored, Po), St – stephanite; E–F – aggregate of ullmannite, pyrrhotite, and galena. On the left – polished sections under plane polarized light; on the right – back-scattered electron (BSE) images of the aggregates

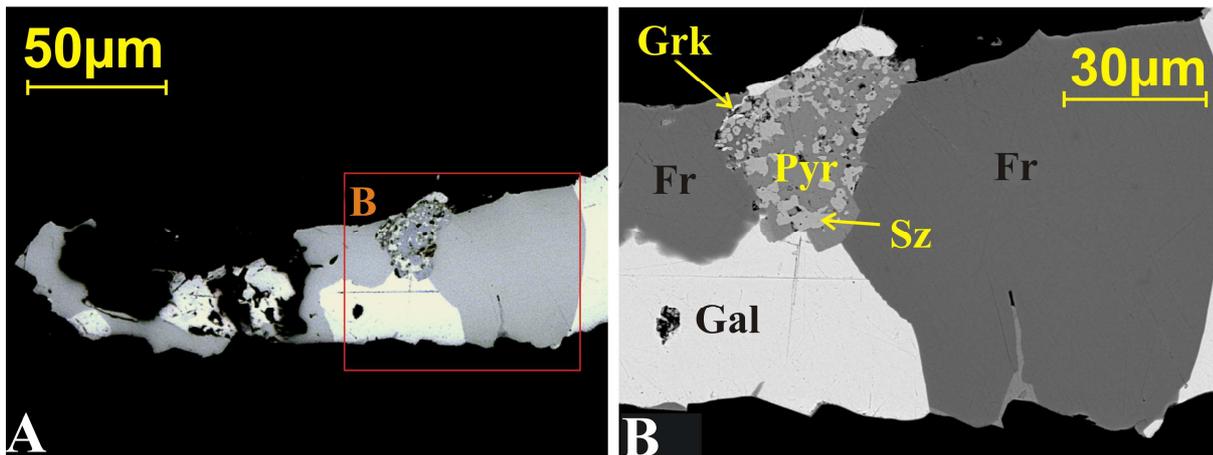


Рис. 5. Участок срастания пираргирита (темно-серый, Pyr), штюцита (серый, вкрапленники, Sz) и гринокита (светло-серый, мелкие червеобразные выделения на границе с фрейбергитом, Grk) в зерне фрейбергита (Fr) и галенита (Gal); А – фото аншлифа, без анализатора, В – фото в обратно-рассеянных электронах

Fig. 5. Aggregate of pyrrargyrite (dark gray, Pyr), stützite (gray impregnation, Sz), and greenokite (minor light gray worm-like grains at the boundary with freibergite, Grk) in the grain of freibergite (Fr) and galena (Gal); A – polished section under plane polarized light; B – back-scattered electron (BSE) image of the aggregate

Полиминеральные сростки сульфидов и самородных металлов также можно, вероятно, рассматривать как результат кристаллизации сульфидного расплава. Например, в виде включений в сфалерите отмечены срастания пирротина, галенита, гудмундита, самородных висмута и серебра (рис. 6, В). Не исключено, что полиминеральные срастания пирротина, халькопирита, фрейбергита, арсенопирита и галенита с поздним пиритом (рис. 6, А) также формировались при кристаллизации сульфидных расплавов.

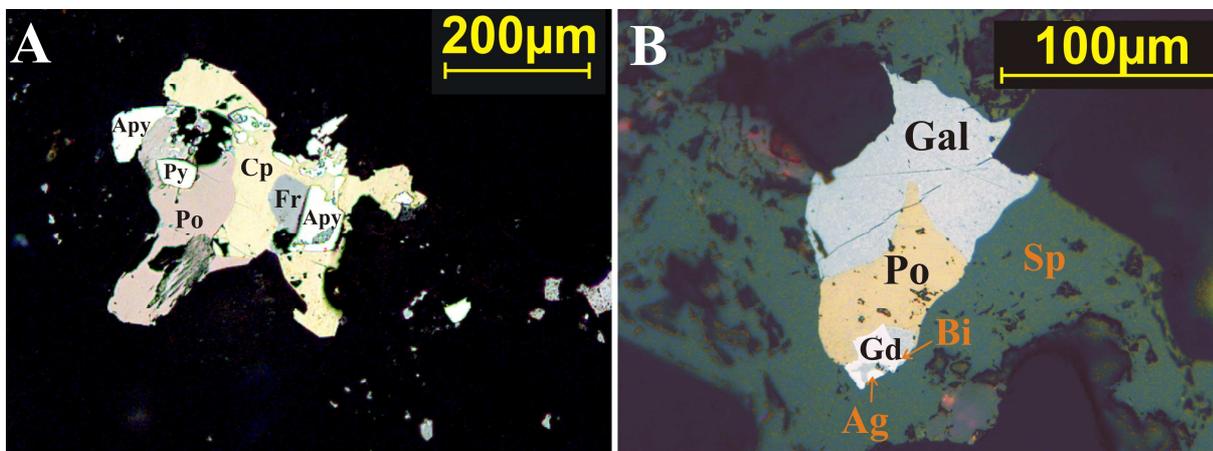


Рис. 6. Полиминеральные срастания сульфидов, фото аншлифов, без анализатора: А – полиминеральный сросток пирротина (Po), халькопирита (Cp), фрейбергита (Fr), арсенопирита (Apy) и галенита (очень мелкие выделения по границе фрейбергита с халькопиритом и арсенопиритом), пирит (Py) – поздний, наложенный; В – полиминеральный сросток галенита (Gal), пирротина (Po), гудмундита (Gd) с самородным висмутом (Bi) и золотистым серебром (Ag) в сфалерите (Sp)

Fig. 6. Multiphase aggregates of sulfides, polished sections under plane polarized light: A – multiphase aggregate of pyrrhotite (Po), chalcopyrite (Cp), freibergite (Fr), arsenopyrite (Apy), galena (fine grains at the boundary of freibergite with chalcopyrite and arsenopyrite), and late pyrite (Py); B – multiphase aggregate of galena (Gal), pyrrhotite (Po), gudmundite (Gd), native bismuth (Bi), and silver (Ag) in sphalerite (Sp)

Как отмечено выше, палеопротерозойский этап метаморфизма проходил в условиях нижней части амфиболитовой фации при температуре в среднем 530 °С и давлении ~5,5 кбар (Высокоградиентные..., 1982). Данная температура выше температурных пределов устойчивости многих минералов, распространенных на Оленинском месторождении, таких как диафорит (350 °С), гудмундит (280 °С), пираргирит (485 °С), аурустибит (460 °С, в присутствии золота – 360 °С) и некоторых других (Воган и др., 1981). Температурные

условия раннепротерозойского метаморфизма были также выше температуры плавления в системах с участием Ag, Sb, Pb, S (Frost *et al.*, 2002). Поэтому при метаморфизме сформировавшихся ранее руд должно было произойти частичное плавление сульфидных минералов, а именно тех, в состав которых входили элементы с низкой температурой плавления. Это привело к образованию малых порций сульфидного расплава, расплавные включения располагались преимущественно на границе сульфидных минералов и кварца, реже во включениях в сульфидах или по микропрожилкам между зернами кварца. В сформировавшийся расплав из основных сульфидов переходили путем диффузии элементы-примеси, что обусловило сложный многокомпонентный состав расплава. При кристаллизации расплавных капель формировались микрострастания минералов Ag, Sb, Pb, Ni, Cu, Fe, S и некоторых других элементов.

Таким образом, сформировавшаяся на неоархейском этапе минерализация была метаморфизована с частичным плавлением и перекристаллизацией минералов сурьмы, серебра, свинца и меди в палеопротерозое. Предположительное время этого процесса 1935 ± 30 млн лет, такой возраст определен K-Ag методом по мусковиту из вмещающих минерализацию пород Оленинского месторождения (Волков *и др.*, 2002).

Следы наложенного метаморфизма руд с частичным плавлением сульфидов имеются также на медно-молибденовом месторождении Пеллапахк, которое расположено в ~2 км к северо-западу от Оленинского. К продуктам кристаллизации сульфидных расплавов здесь можно отнести описанные нами ранее (Белоліпецький *и др.*, 1987) полиминеральные вроски в сфалерите, состоящие из лиллианита, фрейбергита, галенита и самородного висмута.

Заключение

Тонкие полиминеральные сростания, в состав которых входят галенит, пирротин, фрейбергит, пираргирит, диафорит, физелиит, учукчакуайт, ульманит и некоторые другие минералы, установленные в рудах месторождения золота Оленинское, представляют собой результат кристаллизации сульфидного расплава. Сульфидный расплав формировался при метаморфизме породы в условиях амфиболитовой фации за счет плавления входящих в состав руды минералов халькофильных элементов, имеющих низкую температуру плавления (Zn, Ag, Pb, As, Sb, Bi и некоторые другие). Это дает основания полагать, что золото-серебряная минерализация месторождения Оленинское, сформировавшаяся на неоархейском этапе (древнее 2,46 млн лет), была метаморфизована в палеопротерозое (~1,9 млрд лет) с частичным плавлением и перекристаллизацией минералов сурьмы, серебра, свинца и меди. Признаки наложенного метаморфизма руды выявлены также и на медно-молибденовом порфировом месторождении Пеллапахк, расположенном в 2 км от Оленинского.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР 0226-2019-0053.

Библиографический список

- Белоліпецький А. П., Калинин А. А., Петров С. И. Минералогия и геохимия метасоматитов зон глубинных разломов. Апатиты : Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1987. 115 с.
- Беляев О. А., Загородный В. Г., Петров В. П., Волошина З. М. Фации регионального метаморфизма Кольского полуострова / отв. ред. П. М. Горяинов. Л. : Наука, Ленингр. отд-ние, 1977. 87 с.
- Беляев О. А., Петров В. П. Новые аспекты в изучении истории метаморфизма и метаморфической структуры докембрия северо-восточной части Балтийского щита // Геология и полезные ископаемые Кольского полуострова. В 3 т. Т. 2. Полезные ископаемые, минералогия, петрология, геофизика / Рос. акад. наук, Кол. науч. центр, Геол. ин-т, Апатиты, 2002. С. 195–207.
- Воган Д. Дж., Крейг Дж. Р. Химия сульфидных минералов / пер. с англ. М. : Мир, 1981. 575 с.
- Волков А. В., Новиков И. А. Золото-сульфидное месторождение Оленинское (Кольский п-ов, Россия) // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44, № 5. С. 412–424.
- Высокоградиентные режимы метаморфизма в развитии земной коры / отв. ред. Ю. М. Соколов. Л. : Наука, Ленингр. отд-ние, 1982. 232 с.
- Калинин А. А., Полежаева Л. И. Минералы Pb и Ag в метасоматитах Вороньих тундр / Новые данные по минералогии магматических и метаморфических комплексов Кольского полуострова : сб. ст. Апатиты : Кол. фил. АН СССР, 1986. С. 64–72.
- Кудряшов Н. М., Лялина Л. М., Апанасевич Е. А. Возраст редкометалльных пегматитов месторождения Васин-Мыльк (Кольский регион): результаты геохронологического U-Pb исследования микролита // Доклады Академии наук. 2015. Т. 461, № 4. С. 437–441.
- Морозова И. М., Другова Г. М., Спринцзон В. Д. О последовательности этапов метаморфизма в серии полмос-порос на Кольском полуострове (по данным K-Ag метода) // Петрология и корреляция кристаллических комплексов Восточно-Европейской платформы : тез. докл. 3 регион. петрогр. совещ. (Днепропетровск, сент. 1979 г.) / отв. ред. И. С. Усенко. Киев, 1979. С. 172.

- Петров В. П., Гарифулин Л. Л., Реженова С. А. К вопросу о развитии процессов метаморфизма в зоне Колмозеро-Воронья (Кольский полуостров) // Геология и история формирования докембрийских структур Кольского полуострова : сб. ст. Апатиты : Кол. фил. АН СССР, 1984. С. 46–55.
- Прияткина Л. А., Дагелайский В. Б. Метаморфизм свит полмос и порос // Граниты Кольского полуострова и Карелии / В. А. Маслеников, К. Д. Борисова, Л. П. Бондаренко. М. ; Л., 1963. С. 72–83.
- Craig J. R., Kullerud G. Phase relations and mineral assemblages in the copper-lead-sulfur system // *The American Mineralogist*. 1968. V. 53. P. 145–161.
- Frost B. R., Mavrogenes J. A., Tomkins A. G. Partial melting of sulfide ore deposits during medium- and high-grade metamorphism // *The Canadian Mineralogist*. 2002. Vol. 40. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.2113/gscanmin.40.1.1>.
- Tomkins A. G., Frost B. R., Pattison D. R. M. Arsenopyrite melting during metamorphism of sulfide ore deposits // *The Canadian Mineralogist*. 2006. Vol. 44. P. 1045–1062.
- Tomkins A. G., Pattison D. R. M., Zaleski E. The Hemlo gold deposit, Ontario: An example of melting and mobilization of a precious metal-sulfosalt assemblage during amphibolite facies metamorphism and deformation // *Economic Geology*. 2004. Vol. 99. P. 1063–1084.
- Vokes F. M. Some aspects of the regional metamorphic mobilization of preexisting sulphide deposits // *Mineralium Deposita*. 1971. Vol. 6, Iss. 2. P. 122–129. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00206623>.

References

- Belolipetskiy, A. P., Kalinin, A. A., Petrov, S. I. 1987. Mineralogy and geochemistry of metasomatites in deep fault zones. Apatity. (In Russ.)
- Belyaev, O. A., Zagorodny, V. G., Petrov, V. P., Voloshina, Z. M. 1977. Facies of regional metamorphism of the Kola Peninsula. Leningrad. (In Russ.)
- Belyaev, O. A., Petrov, V. P. 2002. New aspects in study of metamorphic history and metamorphic structure of the Precambrian in the north-eastern part of the Baltic Shield. In *Geology and Minerals of the Kola Peninsula*. Apatity, pp. 195–207. (In Russ.)
- Vaughan, D. J., Kraig, J. R. 1981. Mineral chemistry of metal sulfides. Moscow. (In Russ.)
- Volkov, A. V., Novikov, I. A. 2002. Gold-sulfide deposit Oleninskoe (Kola Peninsula, Russia). *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 44(5), pp. 412–424. (In Russ.)
- High gradient regimes of metamorphism in development of the Earth crust. 1982. Ed. Yu. M. Sokolov. Leningrad. (In Russ.)
- Kalinin, A. A., Polezhaeva, L. I. 1986. Minerals of Pb and Ag in metasomatites from the Voron'ya tundra area. In coll. articles *New data on the mineralogy of magmatic and metamorphic complexes of the Kola Peninsula*. Apatity, pp. 64–72. (In Russ.)
- Kudryashov, N. M., Lyalina, L. M., Apanasevich, E. A. 2015. Age of rare metal pegmatites of the Vasin Myl'k deposit (Kola region): Results of U-Pb geochronological study of microlite. *Doklady AN*, 461(4), pp. 437–441 (in Russ.)
- Morozova, I. M., Drugova, G. M., Sprintsson, V. D. 1979. On succession of stages of metamorphism in the Polmos-Poros series in the Kola Peninsula (data with K-Ar method). Abstract of reports *Petrology and correlation of crystalline complexes of the East European platform*. Kiev, pp. 172. (In Russ.)
- Petrov, V. P. Garifulin, L. L., Rezhnova, S. A. 1984. On the problem of evolution of metamorphic processes in the Kolmozero-Voron'ya zone (Kola Peninsula). In coll. articles *Geology and history of the formation of Precambrian structures of the Kola Peninsula*. Apatity, pp. 46–55. (In Russ.)
- Priyatkina, L. A., Dagelayskiy, V. B. 1963. Metamorphism of Polmos and Poros formations. In *Granites of the Kola Peninsula and Karelia*. Moscow, Leningrad, pp. 72–83. (In Russ.)
- Craig, J. R., Kullerud, G. 1968. Phase relations and mineral assemblages in the copper-lead-sulfur system. *The American Mineralogist*, 53, pp. 145–161.
- Frost, B. R., Mavrogenes, J. A., Tomkins, A. G. 2002. Partial melting of sulfide ore deposits during medium- and high-grade metamorphism. *The Canadian Mineralogist*, 40, pp. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.2113/gscanmin.40.1.1>.
- Tomkins, A. G., Frost, B. R., Pattison, D. R. M. 2006. Arsenopyrite melting during metamorphism of sulfide ore deposits. *The Canadian Mineralogist*, 44, pp. 1045–1062.
- Tomkins, A. G., Pattison, D. R. M., Zaleski, E. 2004. The Hemlo gold deposit, Ontario: An example of melting and mobilization of a precious metal-sulfosalt assemblage during amphibolite facies metamorphism and deformation. *Economic Geology*, 99, pp. 1063–1084.
- Vokes, F. M. 1971. Some aspects of the regional metamorphic mobilization of preexisting sulphide deposits. *Mineralium Deposita*, 6(2), pp. 122–129. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00206623>.

Сведения об авторах

Калинин Аркадий Авенирович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Arkady A. Kalinin – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209; Geological Institute of KSC RAS, Cand. of Sci. (Geology & Miner.), Senior Researcher;
e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Савченко Евгений Элланович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, науч. сотрудник;
e-mail: evsav@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-1907>

Yevgeny E. Savchenko – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209; Geological Institute of KSC RAS, Researcher; e-mail: evsav@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-1907>