



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 550.4+553.2(234.851)

DOI:10.19110/geov.2024.1.1

Стадийность формирования кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилков на Au-Pd-месторождении Чудное (Приполярный Урал)

С. А. Онищенко, Н. В. Сокерина, С. К. Кузнецов, С. И. Исаенко, Е. М. Тропников

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
mine222@ya.ru

Золотопалладиевое оруденение месторождения Чудное представлено минерализованными прожилковыми зонами в трещиноватых и брекчированных риолитах рифей-вендского возраста. Самородное золото и минералы палладия сосредоточены в основном в прожилках Cr-содержащего мусковита (фуксита), в которых в небольшом количестве присутствует алланит, отмечаются кварц, альбит, кальцит, калиевый полевошпат, титанит, апатит, цинкохромит и другие минералы. В рудных зонах встречаются также прожилки алланит-альбит-кварцевого состава, в некоторых случаях содержащие обильные выделения фуксита. Установлено, что кварц-альбит-алланит-фукситовые и другие фукситсодержащие прожилки являются результатом наложения кварц-альбитового жильного выполнения на ранее образовавшиеся золотоносные фукситовые прожилки. Кварц-альбитовый материал выполняет центральные части комбинированных прожилков и цементирует обломки (ксенолиты) фуксита, при этом в некоторых случаях часть золота переотлагалась и фиксировалась в кварц-альбитовой части прожилков. Изучение структур распада твердых растворов в самородном золоте показало, что температура формирования золота в фукситовых прожилках превышала 220 °С. Температура отложения основной части прожилков кварц-альбитового состава была заметно ниже. Температура гомогенизации флюидных включений в жильных минералах (кварц, альбит, алланит, кальцит) заключена главным образом в интервале 96–168 °С, растворы были обогащены хлоридами магния и кальция. В этих условиях формировались и переотлагались алланит, апатит, монацит, ксенотим, молибдошеелит, происходила перекристаллизация фуксита.

Ключевые слова: *фукситсодержащие прожилки, фукситовые прожилки, стадия минералообразования, риолит.*

Stages of formation of quartz-albite-allanite-fuchsite veins at the Chudnoe Au-Pd deposit (Subpolar Urals)

S. A. Onishchenko, N. V. Sokerina, S. K. Kuznetsov, S. I. Isaenko, E. M. Tropnikov

Institute of Geology FRC Komi SC UB HFS, Syktyvkar

The gold-palladium mineralization of the Chudnoe deposit is represented by mineralized veined zones in fractured and brecciated rhyolites of the Riphean-Vendian age. Native gold and palladium minerals are concentrated mainly in veins of Cr-containing muscovite (fuchsite), in which allanite is present in small amounts; quartz, albite, calcite, potassium feldspar, titanite, apatite, zincochromite and other minerals are also found. Veins of allanite-albite-quartz composition are found in ore zones, in some cases containing abundant fuchsite secretions. It has been established that quartz-albite-allanite-fuchsite and other fuchsite-containing veins are the result of the superposition of quartz-albite vein execution on previously formed gold-bearing fuchsite veins. Quartz-albite vein material fills central parts of the combined veins and cements fragments (xenoliths) of fuchsite, while in some cases part of the gold was redeposited and fixed in the quartz-albite part of the veins. Based on the study of the decomposition structures of solid solutions in native gold, it was previously established that the temperature of gold formation in fuchsite veinlets exceeded 220 °C. The deposition temperature of the main part of the quartz-albite veins was noticeably lower. The homogenization temperature of fluid inclusions in vein minerals (quartz, albite, allanite, calcite) was mainly in the range of 96–168 °C, solutions were enriched with magnesium and calcium chlorides. Under these conditions, allanite, apatite, monazite, xenotime, and molibdosheelite were formed and redeposited, and fuchsite recrystallized.

Keywords: *fuchsite-containing veins, fuchsite veins, stage of mineral formation, rhyolite.*

Введение

Золотопалладиевое месторождение Чудное, находящееся на западном склоне Приполярного Урала, представлено минерализованными прожилковыми зонами в трещиноватых и брекчированных риолитах рифей-вендского возраста. Месторождение заметно отличается от других золотопалладиевых или золоторуд-

ных месторождений, что было установлено в начальной стадии его изучения (Тарбаев и др., 1996). При дальнейших исследованиях получены дополнительные сведения о закономерностях развития золотопалладиевой минерализации; особенностях морфологии, состава и строения золота; характере сростаний золота с минералами палладия, жильными и породообра-

Для цитирования: Онищенко С. А., Сокерина Н. В., Кузнецов С. К., Исаенко С. И., Тропников Е. М. Стадийность формирования кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилков на Au-Pd-месторождении Чудное (Приполярный Урал) // Вестник геонаук. 2024. 1 (349). С. 4–15. DOI: 10.19110/geov.2024.1.1

For citation: Onishchenko S. A., Sokerina N. V., Kuznetsov S. K., Isaenko S. I., Tropnikov E. M. Stages of formation of quartz-albite-allanite-fuchsite veins at the Chudnoe Au-Pd deposit (Subpolar Urals). Vestnik of Geosciences, 2024, 1 (349), pp. 4–15, doi: 10.19110/geov.2024.1.1



зующими минералами; выявлены существенные различия в составе золота отдельных рудных зон (Кузнецов и др., 1999; Шумилов, Осташенко, 2000; Моралев и др., 2005; Palyanova et al., 2021; Онищенко, Кузнецов, 2023).

Специфические черты месторождения заключаются в необычной ассоциации Cu-Pd-содержащего золота и минералов палладия с Cr-содержащим мусковитом (фукситом) при практически полном отсутствии сульфидов. Присутствие в породах кислого состава прожилков, сложенных Cr-содержащими минералами, обуславливает дискуссионность генетических вопросов, касающихся, в частности, источников Cr, Au и Pd.

Самородное золото и минералы палладия приурочены главным образом к прожилкам фуксита, в которых в подчиненном количестве присутствует алланит (в том числе Cr-содержащий), отмечаются кварц, альбит, кальцит, калиевый полевошпат, титанит, апатит, цинкохромит и другие минералы.

Кроме фукситовых прожилков в рудных зонах встречаются прожилки альбит-кварцевого, гематит-алланит-кварцевого состава, в некоторых случаях содержащие обильные выделения фуксита. В задачи наших исследований входило изучение строения и минерального состава таких прожилков, взаимоотношений кварц-альбитовых агрегатов с фукситом, установление последовательности и условий минералообразования.

Геологическое строение месторождения

Золотопалладиевое месторождение Чудное находится в пределах Центрально-Уральского поднятия и приурочено к осевой зоне Малдинской антиклинали, осложненной разрывными нарушениями. Ядро антиклинали сложено рифей-вендскими вулканогенными породами эффузивной и субвулканической фаций кислого и основного состава, а крылья — нижнепалеозойскими терригенными отложениями алькесвожской, обезиской и саледской свит нижнего-среднего ордовика. Все породы претерпели метаморфизм зеленосланцевой фации, проявившийся в послеордовикское время.

Площадь месторождения Чудное сложена риолитами и породами основного состава рифей-вендского возраста, среди которых преобладают базальты, реже долериты (рис. 1). В виде самостоятельных тел отмечены андезиты, присутствующие как в базитах, так и риолитах. Разрывные нарушения имеют преобладающее северо-восточное простирание и крутое северо-западное падение, совпадающее со сланцеватостью пород. Вдоль разрывных нарушений риолиты преобразованы в кварц-серицитовые и серицитовые метасоматиты. В зонах контакта риолитов с базитами развиты породы альбит-кварцевого, альбит-кварц-серицового и хлорит-серицового состава. В риолитах распространена мелкая вкрапленность гематита.

Промышленное золотое оруденение приурочено к минерализованным прожилковым зонам в трещиноватых и брекчированных риолитах. Риолиты характеризуются относительно стабильными содержаниями SiO_2 (73–79 мас. %) и Al_2O_3 (10–13 мас. %) при значительных вариациях в содержании щелочей, при этом K_2O чаще всего преобладает над Na_2O . Второстепенным компонентом риолитов является железо, содержание Fe_2O_3 в среднем составляет 1.8 мас. %, FeO — около 1 мас. %.

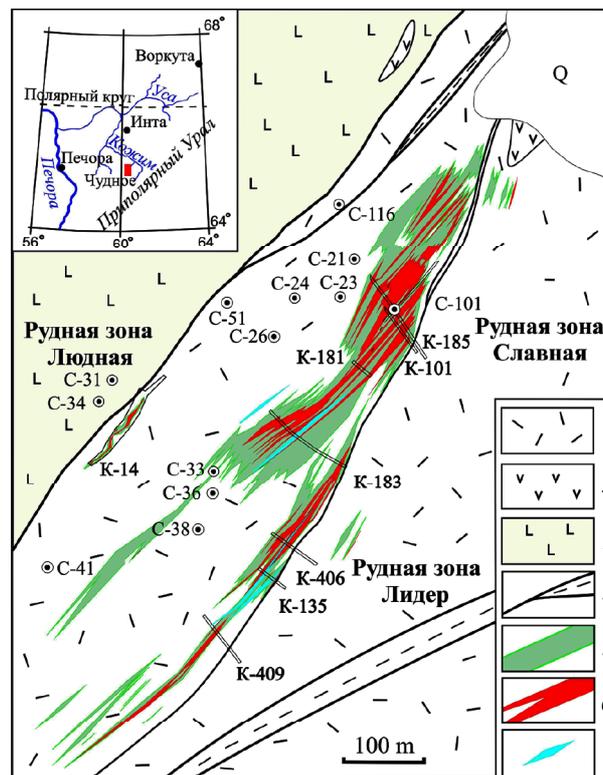


Рис. 1. Геологическая карта месторождения Чудное: 1 — риолиты; 2 — андезиты; 3 — базиты (базальты и долериты); 4 — разрывные нарушения (кварц-серицитовые и серицитовые метасоматиты); 5 — зоны фукситовой минерализации; 6 — рудные тела ($\text{Au} > 1 \text{ г/т}$); 7 — кварцевые жилы (вне масштаба)

Fig. 1. Geological map of the Chudnoe deposit: 1 — rhyolites; 2 — andesites; 3 — mafic rocks (basalts and dolerites); 4 — faults (quartz-sericite and sericite metasomatites); 5 — zones of fuchsite mineralization; 6 — orebodies ($\text{Au} > 1 \text{ ppm}$); 7 — quartz veins (out of scale)

В пределах месторождения выделяются три золоторудные зоны, имеющие северо-восточное простирание и крутое ($50\text{--}70^\circ$) северо-западное падение. Зоны Славная и Лидер протягиваются в центральной части месторождения, сменяя друг друга, на расстояние около 900 м при ширине выходов до 60 м. На глубину эти зоны прослежены до 200 м без признаков выклинивания. Вблизи контакта риолитов с базитами расположена маломощная (до 5 м) зона Людная длиной около 80 м. Золото в рудных зонах распределено неравномерно, образуя линзовидные, чередующиеся между собой и расщепляющиеся рудные тела, которые разделяются некондиционными рудами или безрудными интервалами. Золотоносные риолиты по составу незначительно отличаются от безрудных, что свидетельствует о малой роли объемных метасоматических процессов при образовании руд (Онищенко и др., 2014).

Самородное золото и минералы палладия приурочены главным образом к прожилкам Cr-содержащего мусковита (фуксита) в риолитах. Толщина фукситовых прожилков колеблется от долей миллиметра до 1–1.5 см, риолиты вдоль зальбандов часто осветлены в зоне шириной 3–5 мм. Количество прожилков в рудных интервалах составляет 3–10 на погонный метр. Фуксит представлен тонкочешуйчатыми агрегатами изумрудно-зеленого цвета, содержание Cr_2O_3 обычно составляет 1–7 мас. %. Самородное золото образует

в фуксите выделения чешуйчатой, уплощенной и неправильной формы, размер их варьирует от 1–2 мкм до 2 мм, крайне редко до 8 мм.

Кроме фукситовых прожилков золото присутствует также в пятнах осветления — зонах локального (5–10 см) метасоматического изменения риолитов, в которых отсутствует пигментирующий породу гематит (Кузнецов, Онищенко, 2018). Бедная Au-Pd-минерализация, расположенная ниже по падению рудных тел, выявлена в сульфидсодержащих андезитах (Онищенко, Кузнецов, 2019).

Самородное золото месторождения Чудное характеризуется значительными вариациями состава и строения. Содержание Au заключено в интервале от 65.8 до 92.7 мас. % (51.5–85.7 ат. %), Ag — от 0.4 до 33.8 мас. % (0.6–47.7 ат. %), почти всегда присутствует Cu — до 12.7 мас. % (30.6 ат. %) и Pd — до 2.9 мас. %, отмечается Hg (Онищенко, Кузнецов, 2023). Самородное золото формировалось в виде твердого гомогенного Au-Ag-Cu-раствора при высокой температуре, при понижении которой в зависимости от исходного состава твердый раствор остается гомогенным, или при содержании Cu, превышающем 1.1–2.5 мас. %, распадается на две или три фазы. Матрица в пластинчато-решетчатых и табличатых структурах распада имеет Ag-Au-состав, пластинки или таблички соответствуют фазам Au_3Cu и AuCu. Процесс распада твердого раствора сопровождался собирательной перекристаллизацией золота с образованием зернистых структур (Онищенко, Кузнецов, 2022).

Материал и методы исследования

Образцы для исследований отобраны из керна скважин, полотно траншей и элювиальных развалов в двух рудных зонах месторождения — Славной и Людной. Тектурно-структурные особенности и минеральный состав пород изучались в кернах скважин, шлифованных образцах, прозрачных препаратах, петрографических и полированных шлифах. Детально изучено 10 образцов руд с фукситсодержащими кварц-альбитовыми прожилками. Лабораторные исследования проведены в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН с использованием оптического микроскопа Nikon Eclipse LV 100 ND. Состав минералов определялся на электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 Oxford Instruments (операторы Е. М. Тропников, А. А. Кряжев, А. С. Шуйский и С. С. Шевчук). Напряжение 20 кВ, диаметр электронного зонда 1 мкм. Время набора спектров составляло 60–80 сек (600 тыс. импульсов). Эталоны — чистые металлы для Au, Ag, Fe, Cr, Ti, Mn и Y, KBr — для K, альбит — для Na, GaP — для P, InAs — для As, LaB_6 — для La, CeO_2 — для Ce, волластонит — для Ca, SrF_2 — для Sr и F, Al_2O_3 — для Al, SiO_2 — для Si. Выполнено 250 определений состава минералов.

Изучение флюидных включений в минералах проведено в двусторонне полированных пластинах методами гомогенизации и криометрии с использованием термостата THMSG600 фирмы Linkam. По-

грешность измерений: ± 0.2 °C при отрицательных температурах и ± 0.5 °C при положительных. Всего изучено 10 пластинок толщиной 0.3–0.5 мм. Соленость растворов во включениях измерялась по температуре плавления льда (Bodnar, Vityk, 1994). Солевой состав включений определялся по температуре эвтектики водно-солевой системы (Борисенко, 1977). Газовый состав индивидуальных включений изучался на высоко-разрешающем рамановском спектрометре LabRam HR800 (Horiba Jobin Yvon) при комнатной температуре. Для регистрации спектров применялась решетчатая спектрометра 600 ш/мм, размер конфокального отверстия составлял 300 и 500 мкм, щель — 100 мкм, мощность возбуждающего излучения He-Ne-лазера (длина волны 632.8 нм) — 20 мВт, Ar⁺-лазера — 120 мВт (514.5 нм).

Кварц-альбит-алланит-фукситовые прожилки

На месторождении присутствуют кварцевые и серицит-кварцевые жилы, а также прожилки кварцевого, альбит-кварцевого, алланит-кварцевого, гематит-алланит-кварцевого и гематит-кварцевого состава, которые отмечаются как в рудных зонах, так и за их пределами. Толщина прожилков обычно не превышает 5–10 см, но в зонах тектонических нарушений кварцевые и серицит-кварцевые жилы достигают мощности 2.6 м. Для рудных зон характерны фукситовые прожилки толщиной до 1.5 см, с которыми связаны самородное золото и минералы палладия. Кроме того, в рудных зонах встречаются фукситсодержащие прожилки в основном кварц-альбит-алланит-фукситового состава, иногда с заметным количеством гематита и кальцита. Прожилки характеризуются различными количественными соотношениями между фукситом и остальной жильной массой, в которой обычно преобладает кварц и альбит. Фукситсодержащие прожилки имеют мощность от 2–3 мм до 3–5 см, длина их не превышает 15–20 см, форма прямолинейная, линзовидная или неправильная. Отмечается субпараллельное расположение фукситовых и кварц-альбитовых прожилков, но часто кварц-альбитовые прожилки развиваются по трещинам, образующимся вдоль прожилков фуксита.

Относительно простым строением обладают прожилки, в которых фукситом сложена периферическая часть, тогда как центральная часть выполнена кварцем, альбитом, кальцитом и алланитом (рис. 2, а). Нередко кварц, альбит и кальцит образуют в фукситсодержащих риолитах гнезда и раздувы, при этом фуксит распространен в зальбанде прожилков, и только отдельные фрагменты фукситовых прожилков отмечаются в альбит-кварцевом жильном агрегате (рис. 2, б). В прожилках брекчиевидного строения обломки фукситсодержащих риолитов и обломки фукситовых прожилков цементируются кварцевым, альбит-кварцевым или кальцит-кварцевым жильным материалом (рис. 2, с, д). Самородное золото заключено в фуксите. Ксенолиты фукситсодержащих риолитов отмечаются и в мощных кварцевых жилах. Так, по данным разведочных работ¹,

¹ Промышленная оценка золоторудных проявлений Алькесвожского участка на хребте Малдынырд: Отчет ГРП за 1997–2005 гг. / Л. И. Ефанова, Л. В. Онищенко, А. Ф. Карчевский, С. А. Онищенко и др. Сыктывкар, Комигеолфонд, 2005.

¹ Industrial assessment of gold ore occurrences at the Alkesvozhsky site on the Maldynyrd ridge: exploration crew report for 1997–2005. L. I. Efanova, L. V. Onishchenko, A. F. Karchevsky, S. A. Onishchenko et al. Syktyvkar, Komigeolfond, 2005.



в приконтактной части кварцевой жилы мощностью 2.6 м (канавка 183) зафиксированы ксенолиты фукситсодержащих риолитов размером до 10 см.

Для кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилков характерно зональное строение, позволяющее определить последовательность минералообразования. На стенках трещин, сложенных риолитом или фукситовым прожилком, нарастает полоса белого пластинчатого альбита, которая сменяется серым среднекрупнозернистым кварцем (рис. 3). Радиально-лучистые агрегаты темно-коричневого алланита обычно приурочены

к границе между альбитовой и кварцевой зонами, но нередко развиваются в зернистом кварце. В прожилках брекчиевидного строения на обломки фукситсодержащих риолитов и фукситовых прожилков также нарастают крустификационные каймы альбита, алланита и кварца, иногда присутствуют зерна калиевого полевого шпата. Фукситовые обломки в одних случаях имеют четко очерченные контуры, но нередко они образуют облачные размытые скопления в альбит-кварцевом агрегате. В образце (рис. 3, а) фуксит малохромистый (0.4–0.9 мас. % Cr₂O₃), в образцах

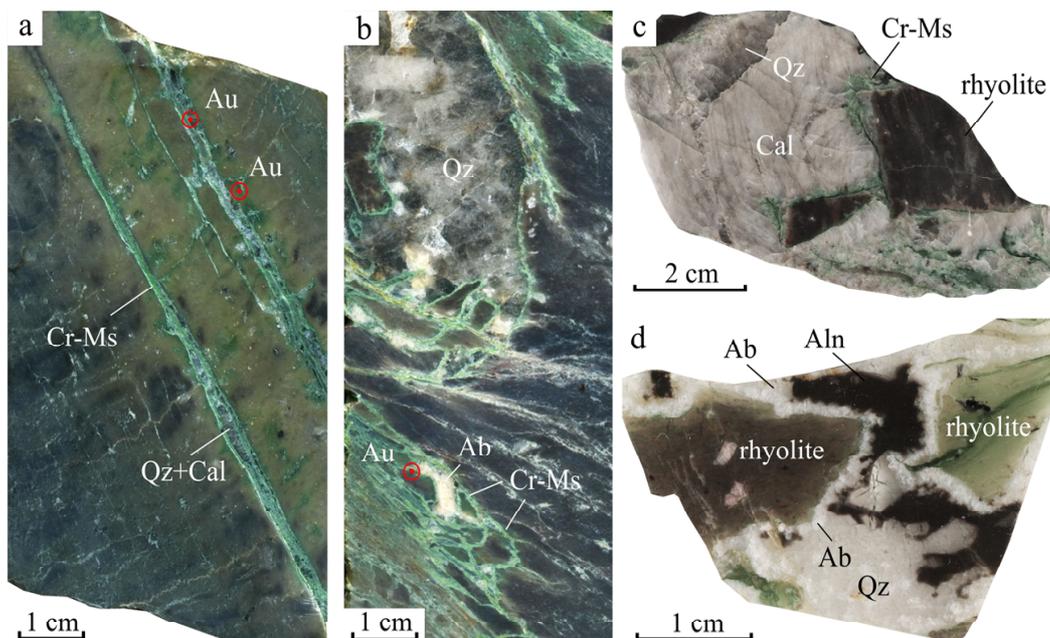


Рис. 2. Фукситсодержащие прожилки в риолитах месторождения Чудное: а – прямолинейные фукситовые прожилки, выполненные в осевой части кварцем и кальцитом; б – сеть золотоносных фукситовых прожилков осложнена альбитовыми и альбит-кварцевыми гнездами; с – кварц-кальцитовая жила с обломками риолита и фуксита; д – альбит-кварц-алланитовый прожилок в фукситсодержащем риолите (проходящий свет). Cr-Ms – фуксит, Au – самородное золото, Qz – кварц, Aln – алланит, Ab – альбит, Cal – кальцит. Обр. 51235 (а), 23031 (б), 722402 (с), 21102 (д)

Fig. 2. Fuchsite-containing veins in the rhyolites of the Chudnoe deposit: а – rectilinear fuchsite veins made in the axial part by quartz and calcite; б – a network of gold-bearing fuchsite veins complicated by albite and albite-quartz nests; с – quartz-calcite vein with fragments of rhyolite and fuchsite; д – albite-quartz-allanite veins in fuchsite-containing rhyolite (transmitted light). Cr-Ms – fuchsite, Au – native gold, Qz – quartz, Aln – allanite, Ab – albite, Cal – calcite. Samples 51235 (а), 23031 (б), 722402 (с), 21102 (д)

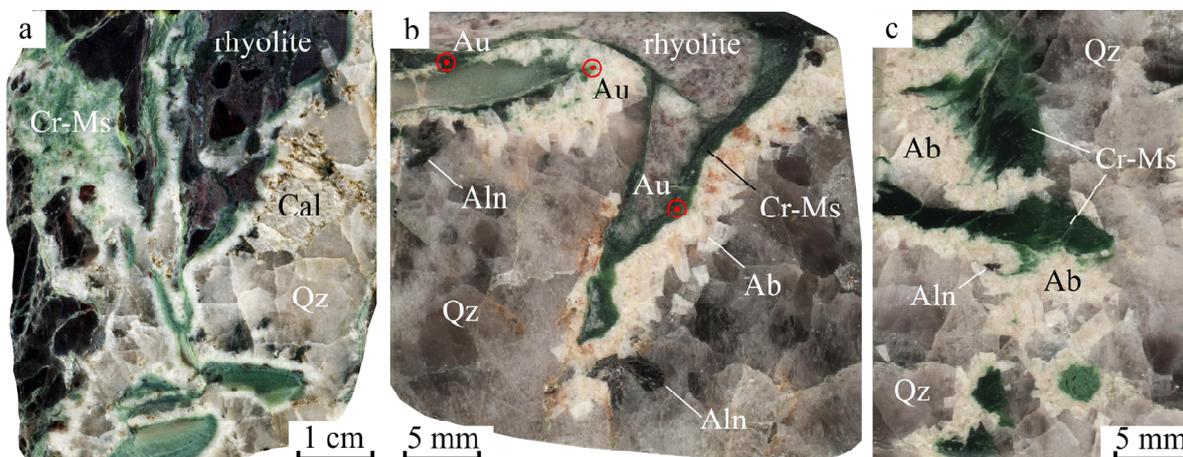


Рис. 3. Строение кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилков: Cr-Ms – фуксит, Au – самородное золото, Qz – кварц, Aln – алланит, Ab – альбит, Cal – кальцит. Обр. 33135 (а), 722416 (б), 722414 (с)

Fig. 3. Structure of quartz-albite-allanite-fuchsite veins: Cr-Ms – fuchsite, Au – native gold, Qz – quartz, Aln – allanite, Ab – albite, Cal – calcite. Samples 33135 (а), 722416 (б), 722414 (с)

(рис. 3, b, c) содержание Cr_2O_3 в фуксите заключено в интервале 0.5–3.9 мас. %. Самородное золото в кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилках приурочено к фукситу, в обр. 722416 (рис. 3, b) присутствуют частицы золота размером 10–30 мкм, содержащие 2.4–3.7 мас. % Cu и 9.5–9.8 мас. % Ag, в них отмечаются структуры распада твердого раствора.

Жильный кварц присутствует в прожилках разнообразного состава, что обусловлено его неоднократным отложением, но роль кварца в минеральном выполнении прожилков значительно варьирует. Жильный кварц в подчиненном количестве участвует в строении фукситовых прожилков, при этом отмечено, что относительно крупные частицы золота приурочены к алланит-кварцевым линзам и обособлениям в фукситовом агрегате, содержащем 1–2 мас. % Cr_2O_3 (рис. 4, a). Самородное золото содержит 4.0 мас. % Cu, имеет двухфазную структуру распада твердого раствора: в Au-Ag-матрице заключены пластинки Au_3Cu . Характерно, что выделения золота в сростании с кварцем и алланитом имеют изометричную и неправильную форму, в то время как для золота, заключенного в фуксите, типичны уплощенные формы.

Взаимоотношения золотофукситовых и кварц-альбитовых прожилков видны на рис. 4, где представлены два сечения одного образца из рудной зоны

Людной. В первом сечении (рис. 4, b) золотофукситовый и кварц-альбитовый прожилки в общем параллельны между собой, во втором сечении (рис. 4, c) кварц-альбитовый прожилок содержит обломки золотофукситового прожилка и вмещающего риолита. Мелкие обломки фуксита подвергаются перекристаллизации с образованием идиоморфных пластинок фуксита в кварце (рис. 4, d). Золото, заключенное в фуксите, низкопробное, состав варьирует в небольших пределах: Au – 66.8–72.6, Ag – 26.9–30.7 мас. %, Cu и Pd не обнаружены. В сростании с золотом присутствует мертиит состава $\text{Pd}_{7.84}\text{Sb}_{2.63}\text{As}_{0.53}$. Содержание Cr_2O_3 в фуксите заключено в интервале 1–5 мас. %, в перекристаллизованных агрегатах фуксита (рис. 4, d) содержание Cr_2O_3 составляет 2 мас. %. В кварц-альбитовом прожилке находятся веерообразные агрегаты пластинчатого гематита и сноповидные сростки алланита, самородное золото не обнаружено, но выявлены единичные выделения минерала Pd-Ag-S-состава. В пластинчатом гематите содержится 0.5 мас. % Cr_2O_3 ; в мелких зернах гематита, распространенных в риолите, хром не обнаружен. В риолите в зальбандах прожилка и на удалении от него присутствуют струйчатые агрегаты мусковита, хром в них также не обнаружен.

Обычно самородное золото в кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилках находится в фуксите,

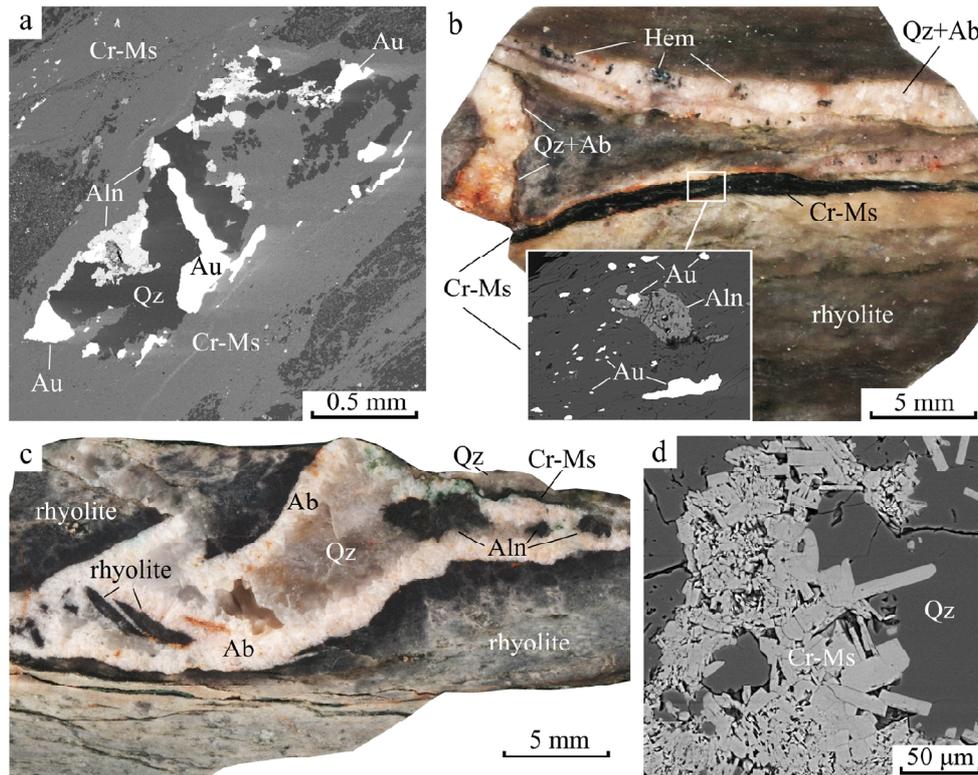


Рис. 4. Кварц в золотофукситовом прожилке и взаимоотношения золотофукситовых и кварц-альбитовых прожилков: а – в фукситовом прожилке крупные частицы золота находятся в к алланит-кварцевой линзе; б – субпараллельное расположение золотофукситового и кварц-альбитового прожилков; с – кварц-альбитовый прожилок содержит обломки золотофукситового прожилка и вмещающего риолита; д – идиоморфные пластинчатые зерна фуксита в кварце

Cr-Ms – фуксит, Au – самородное золото, Qz – кварц, Aln – алланит, Hem – гематит. Полированные шлифы: 722413 (a), K-14-1 (b), K-14-2 (c, d). Изображения в отраженных электронах: a, b (врезка) и d

Fig. 4. Quartz in gold-fuchsite vein and the relationship of gold-fuchsite and quartz-albite veins: a – in the fuchsite vein, large gold particles are confined to the allanite-quartz lens; b – a sub-parallel arrangement of gold-fuchsite and quartz-albite veins; c – quartz-albite veins contains fragments of gold-fuchsite vein and host rhyolite; d – idiomorphic plate grains of fuchsite in quartz: Cr-Ms – fuchsite, Au – native gold, Qz – quartz, Aln – allanite, Hem – hematite. Polished sections: 722413 (a), K-14-1 (b), K-14-2 (c, d). BSE images: a, b (inset) and d

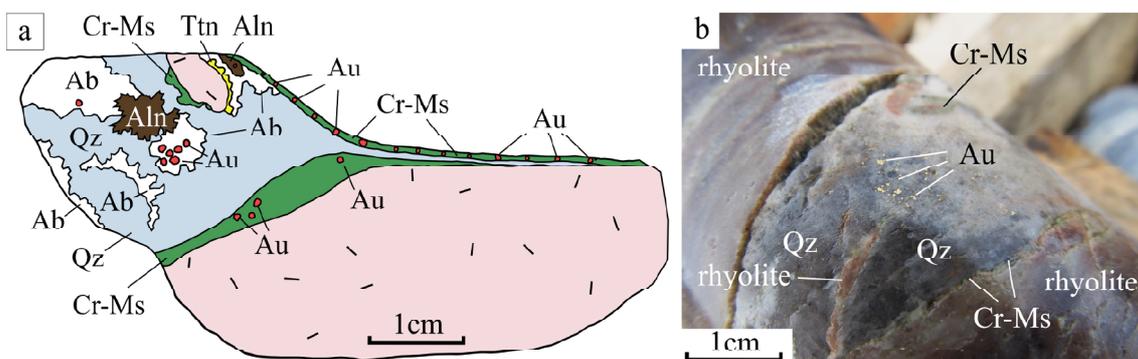


Рис. 5. Самородное золото в линзах фуксит-альбит-алланит-кварцевого (а) и фуксит-кварцевого (b) состава в риолитах. Cr-Ms — фуксит, Au — самородное золото, Qz — кварц, Aln — алланит, Ab — альбит, Ttn — титанит. Зарисовка образца из K-101 (а) и фотография ядра скв. 41, глубина 194.3 м (b)

Fig. 5. Native gold in lenses of fuchsite-albite-allanite-quartz (a) and fuchsite-quartz (b) composition in rhyolites. Cr-Ms — fuchsite, Au — native gold, Qz — quartz, Aln — allanite, Ab — albite, Ttn — titanite. A sketch of a sample from K-101 (a) and a photo of the core of well 41, depth 194.3 m (b).

а в кварце и альбите отсутствует, но при документации канав и керн скважин в единичных случаях фиксировалось видимое самородное золото в жильных минералах (рис. 5).

В линзе фуксит-альбит-алланит-кварцевого состава (рис. 5, а) доминирующим жильным минералом является полупрозрачный крупнозернистый кварц. В кварце находятся агрегатные скопления альбита и алланита. Белый альбит образует пластинчатые зерна размером 2—3 мм, часто отмечаются простые двойники. Для темно-коричневого алланита характерны радиально-лучистые сростки. Зона контакта между вмещающим риолитом и кварцево-жильной массой выполнена тонкочешуйчатым фукситом. Среди жильной массы находится обломок риолита размером около 1 см, окаймлённый агрегатами фуксита, альбита и грязно-желтого титанита. Частицы золота размером 0.1—0.4 мм заключены в фуксите, альбите, алланите и кварце.

В керне скв. 41 (рис. 5, b) многочисленные частицы золота размером до 0.5 мм заключены в линзе серого и светло-серого кварца, в зальбандах которой находятся

фрагменты фукситового прожилка. В кварцево-жильной массе присутствуют единичные обломки риолита.

Минералы кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилков

В составе прожилков преобладают кварц и альбит, почти всегда отмечается алланит, реже кальцит, гематит и калиевый полевой шпат. Фуксит обычно присутствует в зальбандах прожилков, но нередко отмечается в виде ксеногенных обломков в жильной массе. Второстепенные и редкие минералы прожилков представлены апатитом, титанитом, кайсикхитом-(Y), монацитом, ксенотимом, молибдошеелитом, лантанитом и неидентифицированным минералом Pd-Ag-S-состава.

Алланит в альбит-кварцевой массе обычно образует шестоватые и радиально-лучистые агрегаты (рис. 6, а), реже создает скопления призматических кристаллов (рис. 6, с). Алланит имеет неоднородное, иногда зональное строение (рис. 6, b), хорошо заметное в отраженных электронах. Состав алланита

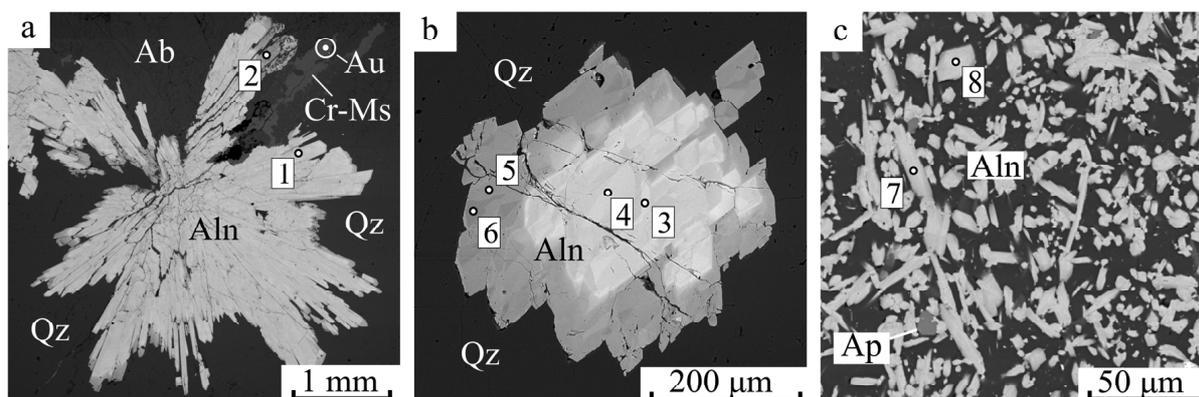


Рис. 6. Алланит в кварц-альбит-фукситовых прожилках: а — алланит радиально-лучистого строения в кварце и альбите. В фуксите — частица золота; б — алланит зонального строения в кварце; с — призматические кристаллы алланита в альбит-кварцевой массе. Цифрами обозначены точки анализа (табл. 1). Au — золото, Qz — кварц, Ab — альбит, Aln — алланит, Cr-Ms — фуксит, Ap — апатит. Изображены в отраженных электронах. Полированные шлифы 722416 (а, b), 21102 (с)

Fig. 6. Allanite in quartz-albite-fuchsite veins: а — allanite of radially radiant structure in quartz and albite. In fuchsite — a gold particle; б — allanite of zonal structure in quartz; с — prismatic crystals of allanite in albite-quartz mass. The numbers indicate the analysis points (Table 1). Au — gold, Qz — quartz, Ab — albite, Aln — allanite, Cr-Ms — fuchsite, Ap — apatite. BSE images. Polished sections 722416 (a, b), 21102 (c)



в зональных кристаллах изменяется в значительных пределах. Содержание редкоземельных элементов (REE) от центра к периферии закономерно уменьшается, а содержание железа и CaO последовательно возрастает, причем если в ядерной части преобладает двухвалентное железо, то в краевой зоне — железо в трехвалентной форме (табл. 1). Таким образом, от ядерной части к периферии кристаллов содержание алланитовой составляющей уменьшается, а эпидотовой — увеличивается. Наличие хрома для алланитов в альбит-кварцевых прожилках не характерно, но в единичном случае отмечено 0.5 мас. % Cr₂O₃ в периферической части алланита зонального строения.

Для алланита в фукситовых прожилках также характерно неоднородное, иногда зональное строение;

причем для внешних зон, в отличие от алланита в альбит-кварцевых прожилках, более характерны повышенные содержания редкоземельных элементов. В целом распределение хрома в алланите фукситовых прожилков неравномерно и неоднотипно. Так, в обр. 722413 (рис. 4, а) в алланите преобладает Cr-содержащая разновидность (2.0–2.7 мас. % Cr₂O₃) с высоким содержанием REE, в которой присутствуют более темные пятна или ядра с пониженным содержанием REE, хром в них не обнаружен. Более четко зональное строение проявлено в обр. К-14-1 (врезка на рис. 4, b), где алланит в центральной части содержит около 4 мас. % REE₂O₃, хром не обнаружен, а во внешней части при содержании 14.6 мас. % REE₂O₃ фиксируется 2.6 мас. % Cr₂O₃. Иная ситуация наблюдается в ксено-

Таблица 1. Состав алланита в кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилках (мас. %)

Table 1. Composition of allanite in quartz-albite-allanite-fuchsite veins (wt. %)

Оксид Oxide	722416						21102		722402	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	33.48	36.69	32.49	32.77	35.54	36.38	32.62	32.66	34.48	33.33
Al ₂ O ₃	18.79	21.77	18.18	18.03	21.41	20.84	18.59	18.50	18.12	16.16
Cr ₂ O ₃	–	–	–	–	–	0.50	–	–	1.83	0.98
Fe ₂ O ₃	0.52	9.73	2.14	2.35	7.55	9.78	1.91	0.36	10.06	7.89
FeO	9.35	3.67	7.96	7.85	4.08	3.40	9.84	10.21	5.28	8.37
MnO	1.15	–	1.51	1.49	1.10	0.37	1.27	0.71	1.12	1.10
CaO	12.90	20.11	13.07	13.42	18.18	19.89	11.76	12.05	16.40	13.40
La ₂ O ₃	4.86	1.87	4.35	3.90	2.74	1.21	3.93	3.13	2.39	4.48
Ce ₂ O ₃	12.29	3.49	11.19	10.95	5.12	3.41	11.13	11.67	5.06	7.47
Pr ₂ O ₃	1.17	–	–	–	–	–	1.03	1.15	0.64	1.29
Nd ₂ O ₃	4.33	0.93	3.51	2.97	1.58	1.18	4.02	4.76	3.53	4.94
Sm ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	0.87	0.98	0.83	0.96
Gd ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	0.55	0.49	–	–
Σ	98.84	98.26	94.40	93.73	97.30	96.96	97.52	96.67	99.74	100.37

Коэффициенты в формулах в расчете на 8 катионов / Coefficients in formulas based on 8 cations

Si	3.08	3.03	3.08	3.10	3.03	3.05	3.04	3.08	2.99	3.02
Al	2.04	2.13	2.03	2.01	2.15	2.06	2.05	2.05	1.85	1.73
Cr	–	–	–	–	–	0.03	–	–	0.13	0.07
Fe ³⁺	0.04	0.61	0.15	0.17	0.49	0.62	0.13	0.03	0.66	0.54
Fe ²⁺	0.72	0.25	0.63	0.62	0.29	0.24	0.77	0.80	0.38	0.63
Mn	0.09	–	0.12	0.12	0.08	0.03	0.10	0.06	0.08	0.08
Ca	1.27	1.78	1.33	1.36	1.66	1.79	1.18	1.22	1.52	1.30
La	0.17	0.06	0.15	0.14	0.09	0.04	0.14	0.11	0.08	0.15
Ce	0.41	0.11	0.39	0.38	0.16	0.10	0.38	0.40	0.16	0.25
Pr	0.04	–	–	–	–	–	0.03	0.04	0.02	0.04
Nd	0.14	0.03	0.12	0.10	0.05	0.04	0.13	0.16	0.11	0.16
Sm	–	–	–	–	–	–	0.03	0.03	0.02	0.03
Gd	–	–	–	–	–	–	0.02	0.02	–	–
Σ REE	0.76	0.20	0.66	0.62	0.30	0.18	0.73	0.76	0.39	0.63

Примечания: прочерк — содержание элемента ниже порога обнаружения. Содержание Fe²⁺ и Fe³⁺ рассчитано по стехиометрии. Номера анализов 1–8 соответствуют точкам анализа на рис. 6. Ан. 9 и 10 — центральная и периферическая части кристалла алланита в фуксите.

Notes: dash means the element content is below the detection limit. The content of Fe²⁺ and Fe³⁺ is calculated by stoichiometry. The analysis numbers 1–8 correspond to the analysis points in Fig. 6. Analysis 9 and 10 — central and peripheral parts of the allanite crystal in fuchsite.



литах фуксита, заключенных в кварц-кальцитовом прожилке (рис. 2, с). В фуксите присутствует цепочка мелких (15–20 мкм) идиоморфных кристаллов алланита зонального строения с внешней зоной, обогащенной, как и в предыдущих случаях, редкоземельными элементами, но хром (до 1.8 мас. % Cr₂O₃) концентрируется преимущественно в центральной части кристаллов (табл. 1, ан. 9–10).

Апатит в кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилках обычно встречается в фукситовой их части, в том числе во фрагментах фуксита в кварц-альбитовой массе, отмечен также в альбит-кварцевом прожилке совместно с призматическими кристаллами алланита (рис. 6, с). Многочисленные зерна апатита наблюдаются в фуксите, окружающем обломок риолита в альбитовой жильной массе (рис. 7, а). В некоторых случаях, как отмечено в скв. 21 на глубине 96.0 м, обломки риолитов в брекчии окаймляются широкими (до 4 мм) полосами апатитового состава. В качестве второстепенных минералов в апатитовых полосах присутствуют алланит и альбит. Апатит по составу является фторапатитом, содержание фтора составляет 3.2–5.9 мас. %, часто отмечается примесь мышьяка (до 1.2 мас. % As₂O₅),

замещающего фосфор в структуре минерала. Типичный состав апатита (обр. 51235, мас. %): CaO — 54.57, P₂O₅ — 41.18, As₂O₅ — 0.35, F — 4.13, сумма — 100.23, поправка O = F — 1.74, сумма — 98.49.

Монацит встречается в кварц-альбитовых прожилках среди пятен фуксита в виде двух разновидностей, резко различающихся по составу. **Монацит-(Ce)** образует агрегатные выделения размером до 0.3 мм, развивающиеся между зернами альбита и цементирующие идиоморфные пластинки фуксита (рис. 7, б). Состав монацита-(Ce) (мас. %): Ce₂O₃ — 36.5, La₂O₃ — 13.5, Nd₂O₃ — 10.9, Pr₂O₃ — 2.7, Sm₂O₃ — 1.2, P₂O₅ — 27.8, SO₃ — 2.3, As₂O₅ — 1.8. **Монацит-(Nd)** образует в альбит-фукситовом агрегате выделения размером до 50 мкм, в составе минерала заметную роль играют иттрий и тяжелые лантаноиды (мас. %): Nd₂O₃ — 18.3, La₂O₃ — 17.2, Ce₂O₃ — 9.6, Y₂O₃ — 6.9, Pr₂O₃ — 4.4, Sm₂O₃ — 4.6, Gd₂O₃ — 2.7, Dy₂O₃ — 1.8, CaO — 1.0, FeO — 1.1, P₂O₅ — 32.9, SO₃ — 1.1, SiO₂ — 1.1.

Ксенотим образует в кварц-кальцит-фукситовом прожилке удлинённые скопления, как мономинеральные, так и в сростании с алланитом, в последнем присутствуют многочисленные очень мелкие включе-

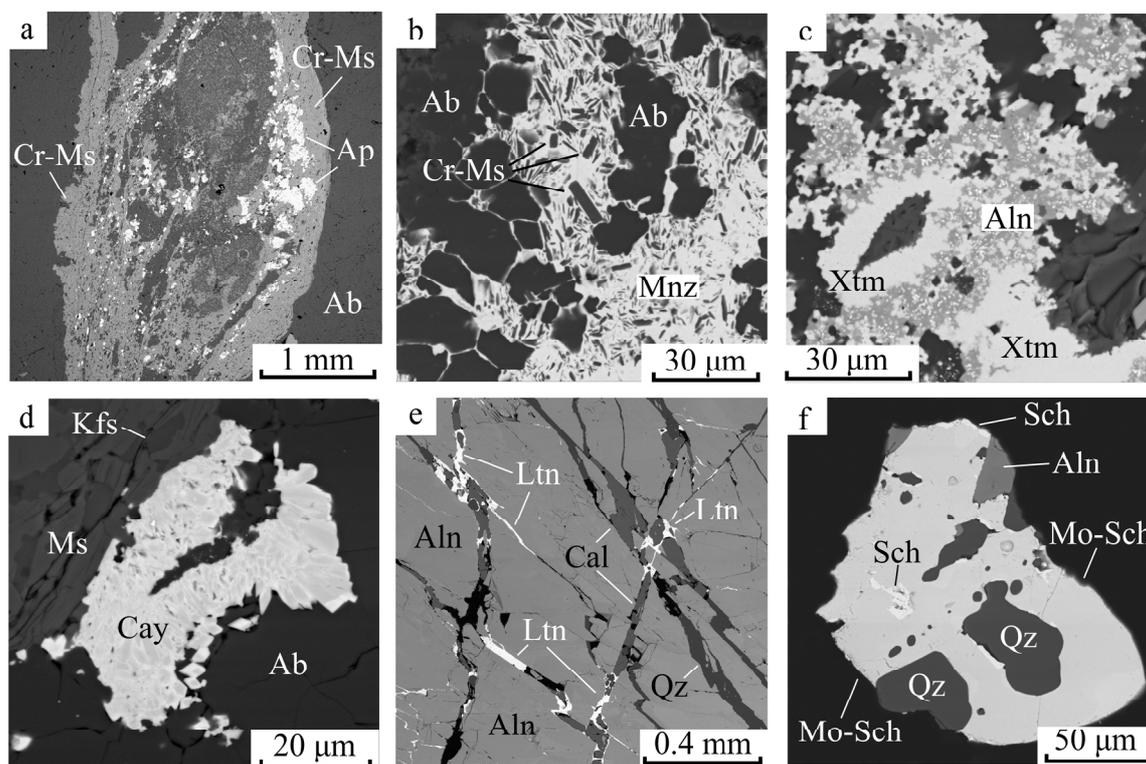


Рис. 7. Минералы кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилков: а — обломок риолита в альбитовой жильной массе окружен фукситом с многочисленными зернами апатита; б — скопление монацита-Ce среди альбита содержит пластинки фуксита; в — ксенотим-алланитовое скопление в кварц-кальцит-фукситовом прожилке; д — кайсикхит-(Y) неоднородного строения в альбите; е — сеть кварц-кальцит-лантанитовых прожилков в алланите; ф — молибдошеелит с каймой и пятнами более яркого шеелита в сростании с алланитом и кварцем. Изображения в отраженных электронах. Полированные шлифы 33135 (а), 722414 (б), 51235 (с), 21102 (д), 33135 (е), полированный монтированный шлиф 31-65-70 (ф). Oz — кварц, Ab — альбит, Aln — алланит, Ap — апатит, Ms — мусковит, Cr-Ms — фуксит, Kfs — калиевый полевой шпат, Cay — кайсикхит-(Y), Mnz — монацит-(Ce), Xtm — ксенотим-(Y), Ltn — лантанит-(Nd, Ce), Sch — шеелит, Mo-Sch — молибдошеелит

Fig. 7. Minerals of quartz-albite-allanite-fuchsite veins: а — fragment of rhyolite in an albite vein mass is surrounded by fuchsite with numerous grains of apatite; б — an accumulation of monazite-Ce among albite contains plates of fuchsite; в — xenotime-allanite cluster in quartz-calcite-fuchsite vein; д — caysichite-(Y) of heterogeneous structure in albite; е — network of quartz-calcite-lanthanite veins in allanite; ф — molybdenum sheelite with a border and spots of brighter scheelite in fusion with allanite and quartz. BSE images. Polished sections 33135 (a), 722414 (b), 51235 (c), 21102 (d), 33135 (e), polished mounted sections 31-65-70 (f). Oz — quartz, Ab — albite, Aln — allanite, Ap — apatite, Ms — muscovite, Cr-Ms — fuchsite, Kfs — potassium feldspar, Cay — caysichite-(Y), Mnz — monazite-(Ce), Xtm — xenotime-(Y), Ltn — lanthanite-(Nd, Ce), Sch — scheelite, Mo-Sch — molybdo-scheelite

ния монацита (рис. 7, с). Состав ксенотима (мас. %): Y_2O_3 — 47.3, Dy_2O_3 — 5.2, Er_2O_3 — 3.6, Yb_2O_3 — 3.3, Gd_2O_3 — 2.3, Ho_2O_3 — 1.1, P_2O_5 — 32.3, As_2O_5 — 3.7, сумма — 98.8, формула $(Y_{0.85}Dy_{0.06}Er_{0.04}Yb_{0.03}Gd_{0.03}Ho_{0.01})_{1.02}(P_{0.92}As_{0.06})_{0.98}O_{4.00}$.

В алланите (обр. 722414, рис. 3, с) отмечены скопления мелких (до 20 мкм) зерен As-содержащего ксенотима, в котором черновитовый минал ($YAsO_4$) составляет 25 мол. %: $(Y_{0.86}Dy_{0.05}Er_{0.03}Yb_{0.03}Gd_{0.02} \times Ho_{0.01})_{1.00}(P_{0.74}As_{0.25})_{0.99}O_{4.00}$. В кварц-фукситовом агрегате, в кварце и альбите отмечены мелкие зерна еще одного фосфата иттрия, отличающегося наличием кремния, кальция и урана. Типичный анализ минерала (обр. К-14, мас. %): Y_2O_3 — 31.9, Dy_2O_3 — 3.9, Er_2O_3 — 2.5, Yb_2O_3 — 2.0, Gd_2O_3 — 2.2, Ho_2O_3 — 1.0, Nd_2O_3 — 1.5, Sm_2O_3 — 1.0, Ce_2O_3 — 0.5, P_2O_5 — 24.6, SiO_2 — 5.7, CaO — 3.2, UO_2 — 9.4, F — 1.2, сумма — 90.6, поправка $O = F - 0.5$, сумма — 90.1.

Кайсикхит-(Y), иттриевый карбосиликат, в виде мелких зерен обнаружен в альбит-кварцевом прожилке совместно с призматическими кристаллами алланита, но чаще встречается на контакте прожилков с риолитовой матрицей (рис. 7, d). Кайсикхит-(Y) имеет неоднородное строение, на темные в отраженных электронах центральные части нарастают более светлые зоны, отличающиеся более высоким содержанием Y_2O_3 . Состав темной разности (мас. %): SiO_2 — 29.2, CaO — 8.8, MnO — 0.6, FeO — 2.1, Y_2O_3 — 24.9, Ce_2O_3 — 1.6, Nd_2O_3 — 2.2, Sm_2O_3 — 2.1, Gd_2O_3 — 3.7, Tb_2O_3 — 0.7, Dy_2O_3 — 3.5, Er_2O_3 — 1.4, Yb_2O_3 — 1.1, сумма — 81.9. Состав светлой разности (мас. %): SiO_2 — 27.4, CaO — 3.8, FeO — 2.4, Y_2O_3 — 35.2, Sm_2O_3 — 1.0, Gd_2O_3 — 3.8, Dy_2O_3 — 4.9, Ho_2O_3 — 0.9, Er_2O_3 — 2.9, Yb_2O_3 — 1.6, сумма — 83.9.

Лантанит, редкоземельный карбонат, наблюдается в кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилках в виде тонких прожилков в алланите и кальците. Состав минерала очень сильно варьирует даже в пределах одного образца. В образце 33135 лантанит образует тонкие прожилки в алланите, в одном случае состав минерала соответствует **лантаниту-(Nd)** (мас. %): Nd_2O_3 — 23.2, La_2O_3 — 17.4, Ce_2O_3 — не обн., Pr_2O_3 — 3.8, Sm_2O_3 — 5.7, Gd_2O_3 — 4.2, Y_2O_3 — 1.6, CaO — 5.2, в другом — **лантаниту-(Nd, Ce)** (рис. 7, е, мас. %): Nd_2O_3 — 15.2, La_2O_3 — 9.3, Ce_2O_3 — 14.1, Pr_2O_3 — 2.4, Sm_2O_3 — 5.1, Gd_2O_3 — 5.6, Dy_2O_3 — 1.8, Y_2O_3 — 3.0, CaO — 5.5, SrO — 1.1. В образце 21102 лантанит образует прожилковидные выделения в кальците, состав минерала отвечает **лантаниту-(La)** (мас. %): La_2O_3 — 27.8, Nd_2O_3 — 13.0, Ce_2O_3 — не обн., Pr_2O_3 — 1.9, Sm_2O_3 — 3.4, Gd_2O_3 — 3.3, Y_2O_3 — 2.8, CaO — 1.2.

Молибдошеелит в альбит-кварцевых прожилках образует зерна размером до 0.15 мм, которые находятся в сростании с кварцем, альбитом, титанитом, алланитом и гематитом. В полированных срезах руд минерал наблюдается редко, чаще отмечается при изучении концентратов тяжелых минералов в монтированных полированных шлифах (рис. 7, f). Содержание повеллитового минала в молибдошеелите со-

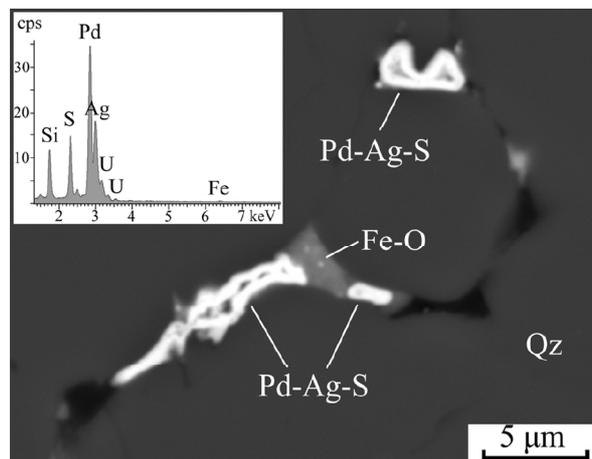


Рис. 8. Минерал Pd-Ag-S в жильном кварце и его энергодисперсионный спектр (врезка). Изображение в отраженных электронах. Полированный шлиф К-14-2. Qz — кварц, Fe-O — оксид-гидроксид железа

Fig. 8. Mineral Pd-Ag-S in vein quartz and its energy dispersion spectrum (inset). BSE image. Polished section K-14-2. Qz — quartz, Fe-O — iron oxide-hydroxide

ставляет 22—45 %. Формула минерала — $Ca_{1.00-1.02} \times (W_{0.55-0.76}Mo_{0.22-0.45})O_4$. В молибдошеелите отмечаются каймы и отдельные выделения практически чистого шеелита, почти не содержащего молибдена, состав шеелита — $Ca_{1.03}(W_{0.94}Mo_{0.03})O_4$. В шеелитах возможна примесь стронция, замещающего кальций, но в связи с наложением линий Sr и W в энергодисперсионном спектре его содержание не может быть определено.

Минерал Pd-Ag-S отмечен в альбит-кварцевом прожилке в виде межзерновых натечных образований в кварцевом агрегате (рис. 8). Наиболее качественный анализ (мас. %): Pd — 66.9, Ag — 8.8, S — 9.0, Fe — 0.6, U — 1.6, Si — 6.7, Al — 0.5, сумма — 94.1. Следует отметить схожий характер локализации минерала Pd-Ag-S и ранее обнаруженного самородного палладия². Оба минерала выполняют интерстиции между зернами кварца, их образование отражает, вероятно, наиболее поздний эпизод благороднометалльной минерализации на месторождении.

Флюидные включения в жильных минералах

Флюидные включения присутствуют в кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилках в алланите, кварце, альбите и кальците во всех изученных образцах (рис. 2—4). Для определения условий минералообразования нами изучены первичные двухфазовые флюидные включения в алланите, кварце, альбите и кальците. К первичным отнесены те включения, которые встречаются поодиночке, небольшими группами или имеют площадное распространение. Размер флюидных включений обычно не превышает 10—15 мкм, форма неправильная, угловатая, иногда с элементами огранки (рис. 9).

² Борисов А. В. Геолого-генетические особенности Au-Pd-REE-рудопоявлений хребта Малдынырд (Приполярный Урал): Автореф. дисс. ... к. г.-м. н. М.: МГУ, 2005. 27 с.

² Borisov A. V. Geological and genetic features of the Au-Pd-REE ore occurrences of the Maldynyrd ridge (Subpolar Urals). Ph. D. Thesis, 2005, Moscow: MSU, 27 p. (in Russian)

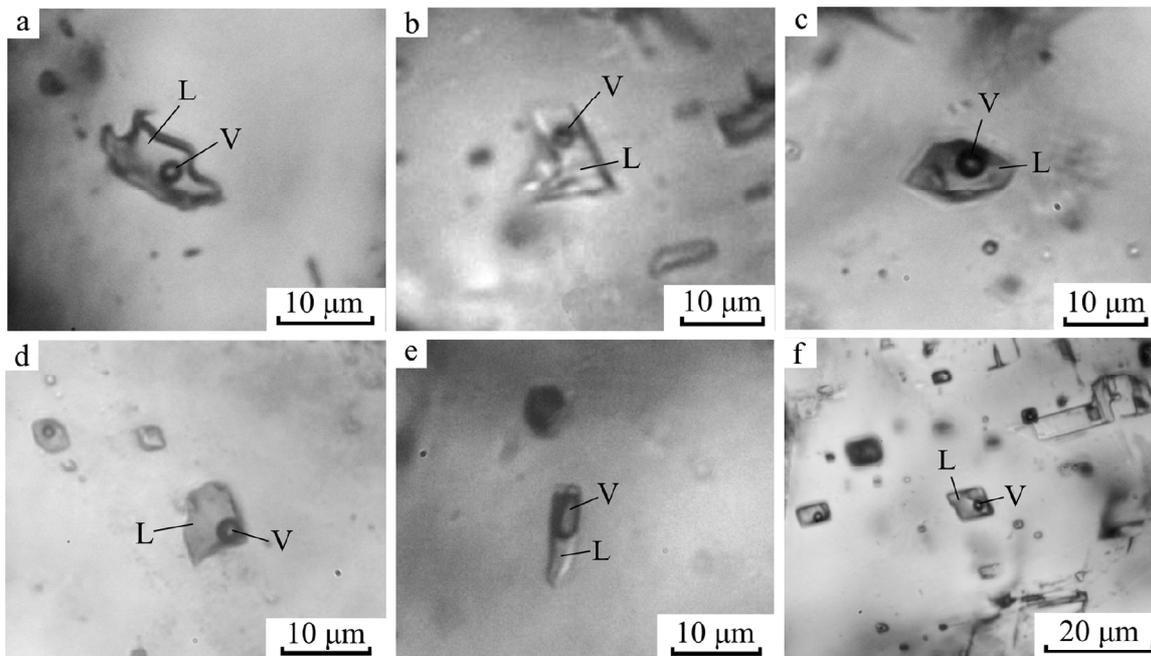


Рис. 9. Типичные двухфазовые флюидные включения в алланите (а); альбите (b); кварце (с–е) и кальците (f). V – газовая фаза, L – жидкая фаза. Образцы 722416 (а, с), 33135(b), 13736 (d, e), 722402 (f)

Fig. 9. Typical two-phase fluid inclusions in allanite (a); albite (b); quartz (c–e) and calcite (f). V – liquid phase, L – liquid phase. Samples 722416 (a, c), 33135(b), 13736 (d, e), 722402 (f)

Двухфазовые включения в алланите имеют газовую фазу до 5, редко до 10 об. % (рис. 9, а). Температура гомогенизации изменяется в пределах 123–168 °С, гомогенизация этих и всех нижеописанных включений происходит в жидкую фазу. Температура эвтектики водно-солевого раствора (–42...–57), вероятно, свидетельствует о присутствии в жидкой фазе хлоридов кальция с примесями. Концентрация солей варьирует от 12.2 до 22.5 мас. %-экв. NaCl (рис. 10).

Двухфазовые включения в альбите содержат газовую фазу до 5, редко до 10 об. % (рис. 9, b).

Гомогенизация происходит при температурах 110–147 °С. По температуре эвтектики водно-солевого раствора (–37...–55 °С) определили присутствие хлоридов кальция с примесями. Концентрация солей варьирует от 16.1 до 19.0 мас. %-экв. NaCl.

Двухфазовые включения в кварце обычно имеют газовую фазу до 5 об. %. Температура гомогенизации изменяется в пределах 96–168 °С (рис. 9, с, d), температура эвтектики водно-солевого раствора заключена в интервале –31...–55 °С, что указывает на присутствие в жидкой фазе хлоридов магния и кальция с примесями. Концентрация солей изменяется от 8.5 до 17.6 мас. %-экв. NaCl. Кроме того, в образцах К-14 и 13736 встречаются единичные включения с более высокими температурами гомогенизации до 520 °С (рис. 9, е; 10) и соленостью жидкой фазы до 19.7 мас. %-экв. NaCl.

Двухфазовые включения в кальците содержат газовую фазу до 5, реже до 10 об. % (рис. 9, f). Гомогенизация происходит при температурах 122–140 °С, эвтектика водно-солевого раствора наблюдается при –32...–50 °С, что указывает на присутствие хлоридов магния и кальция с примесями. Концентрация солей изменяется от 13.6 до 17.5 мас. %-экв. NaCl.

Методом рамановской спектроскопии проведено исследование газовой фазы флюидных включений в алланите, кварце, кальците и альбите (12 анализов). Часто в полученных спектрах отмечается повышенный фон, но пики индивидуальных газов (например, CO₂, N₂ или CH₄) на спектрах не проявлены даже при слабом фоне.

Обсуждение результатов

Строение фукситсодержащих прожилков (кварц-альбит-алланит-фукситовых или гематит-кварц-альбит-алланит-фукситовых) показывает, что их образование

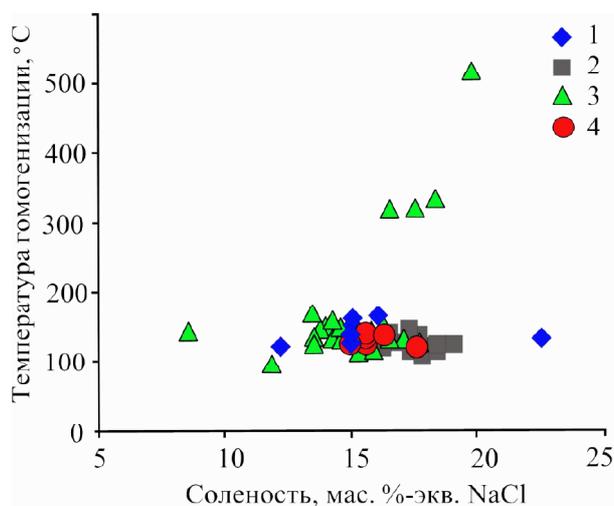


Рис. 10. Соотношение температуры гомогенизации и солености жидкой фазы во флюидных включениях: 1 – в алланите; 2 – альбите; 3 – кварце; 4 – кальците

Fig. 10. The ratio of the homogenization temperature and the salinity of the liquid phase in fluid inclusions: 1 – in allanite; 2 – albite; 3 – quartz; 4 – calcite



обусловлено сочетанием как минимум двух стадий минералообразования. На первой стадии были сформированы золотофукситовые прожилки, содержащие некоторое количество алланита, на второй стадии — альбит-кварц-алланитовые, содержащие также гематит, кальцит и другие минералы. Образование таких комбинированных прожилков обусловлено тектоническими подвижками, при которых происходит образование трещин вдоль фукситовых прожилков с последующим заполнением полостей кварцем, альбитом, алланитом и другими минералами (рис. 2—5). Кварцевые и кварц-альбитовые прожилки выполняют вновь образованные трещины, а также накладываются на золотофукситовые прожилки, при этом фрагменты последних частично заключены в кварц-альбитовом жильном материале в виде ксенолитов (рис. 2—5).

Обломки фукситовых прожилков не являются пассивным субстратом для отложения кварца и альбита, напротив, фукситовый материал активно преобразуется, подвергается перекристаллизации с образованием идиоморфных пластинок (рис. 4, d и 7, b). При этом основная часть хрома наследуется перекристаллизованным фукситом, а некоторая часть изредка фиксируется во внешних зонах кристаллов алланита и жильном гематите. Формирование кварц-альбитовых прожилков сопровождалось миграцией редкоземельных и ряда других элементов, о чем свидетельствует изменение состава алланита, а также отложение апатита, монацита, ксенотима, кайсикхита-(Y), молибдошеелита.

Золото, как указывалось, в основном связано с первой (золотофукситовой) стадией рудообразования и в составе кварц-альбит-алланит-фукситовых или гематит-кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилков заключено в их фукситовой части. Вместе с тем достоверно задокументированы включения золота в альбит-кварцевых и кварцевых внутренних частях прожилков (рис. 5). Эти наблюдения свидетельствуют, что золото подвергалось локальному переотложению или, что менее вероятно, некоторая часть альбит-кварцевых и кварцевых прожилков формировалась на фоне продолжающегося привноса золота гидротермальными флюидами.

Следует отметить, что сотрудниками ИГЕМ РАН Г. В. Моралевым, А. В. Борисовым², С. В. Суренковым³ последовательность минералообразования представляется иначе. Ксенолиты фукситового материала в кварц-альбитовых прожилках интерпретировались ими как новые (вторая и третья) генерации фуксита, образовавшиеся в кварц-альбитовых прожилках. При этом золотопалладиевое оруденение связывается с наиболее поздним гидротермальным событием.

Изучение флюидных включений в жильных минералах показало, что температура гомогенизации в них составляет в основном 96—168 °С, что в целом соответствует ранее полученным данным³ (Palyanova et al., 2021). Газовая составляющая флюидов пред-

ставлена водяным паром, другие газы не обнаружены. Таким образом, флюид, из которого сформировалась основная масса жильных минералов, представлен водным раствором соленостью от 8.5 до 22.5 мас. %-экв. NaCl.

Присутствие в кварце единичных первичных включений (рис. 9, e; 10) с более высокой температурой гомогенизации (до 520 °С) и соленостью жидкой фазы до 19.7 мас. %-экв. NaCl может указывать на существование реликтов его более ранней генерации. Это согласуется с ранее полученными данными³ о том, что в раннем жильном кварце температура гомогенизации псевдопервичных и первичных включений варьирует от 230 до 400 °С, концентрация солей — от 2.1 до 17 мас. %-экв. NaCl.

Важную информацию об эволюции температурных условий минералообразования дает изучение структур распада твердых растворов в самородном золоте в фукситовых прожилках. Температура распада первичного твердого раствора Au-Ag-Cu с содержанием Cu около 25 ат. % составляет примерно 220 °С (Онищенко, Кузнецов, 2022). Видимо, оценка нижнего предела температуры формирования самородного золота может быть распространена на золото любого состава, локализующегося в фукситовых прожилках. Таким образом, золотофукситовые прожилки формировались при заметно более высокой температуре, чем основная часть прожилков кварц-альбитового состава.

Заключение

В истории развития гидротермальных процессов на месторождении Чудное нами рассмотрены закономерности формирования фукситсодержащих кварц-альбитовых прожилков, в образовании которых выделяются две стадии. На первой стадии были сформированы золотофукситовые прожилки. Температура отложения золота в фукситовых прожилках превышала 220 °С. На второй стадии развивались кварцевые и кварц-альбитовые прожилки, выполняя вновь образованные трещины, а также накладываются на золотофукситовые прожилки. Кварц-альбитовый жильный материал выполняет центральные части комбинированных прожилков и цементирует обломки (ксенолиты) фуксита. При этом в некоторых случаях часть золота переотлагалась и фиксировалась не только в фукситовой, но и кварц-альбитовой части прожилков. В целом температура гидротермальных процессов с течением времени снижалась. Температура гомогенизации флюидных включений в жильных минералах кварц-альбит-алланитовых или гематит-кварц-альбит-алланитовых прожилков в основном заключена в интервале 96—168 °С. В этих условиях формировались и переотлагались алланит, апатит, монацит, ксенотим, молибдошеелит, происходила перекристаллизация фуксита.

³ Суренков С. В. Условия образования и источники рудного вещества Au-PGE-REE рудопоявлений Аلكесвожской площади (Приполярный Урал): Автореф. дисс. ... к. г.-м. н. М., ИГЕМ РАН, 2003, 23 с.

³ Surenkov S. V. Formation Conditions and Sources of Ore Matter Au-PGE-REE of Ore Occurrences in Alkesvozhskaya Area (Subpolar Urals). Ph. D. Thesis, IGEM RAS, Moscow, 2003, 23 p. (in Russian)



Исследование проведено в рамках государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ГР №12204060009-2), с использованием оборудования ЦКП «Геонаука».

Литература / References

- Борисенко А. С. Изучение солевого состава растворов газозово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16—27.
- Borisenko A. S. Study of the salt composition solutions of gas—liquid inclusions in mineralas by the cryometric method. Geology and Geophysics, No. 8, pp. 16—27. (in Russian)
- Кузнецов С. К., Тарбаев М. Б., Соболева А. А. Минералогическо-геохимические особенности золотофукситовых прожилков в риолитах хребта Малдынырд // Сыктывкарский минералогический сборник № 28. Сыктывкар, 1999. С. 146—154.
- Kuznetsov S. K., Tarbaev M. B., Soboleva A. A., Mineralogy and geochemistry of gold—fuchsite veinlets in rhyolites of the Maldynyrd Ridge. Syktyvkar mineralogical collection, No. 28, Syktyvkar, 1999, pp. 146—154. (in Russian)
- Кузнецов С. К., Онищенко С. А. Золотоносность локальных участков метасоматического изменения риолитов месторождения Чудное (Приполярный Урал) // Вестник Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 12. С. 39—45. DOI: 10.19110/2221-1381-2018-12-39-45
- Kuznetsov S. K., Onishchenko S. A. Gold content of local areas of metasomatic alteration of rhyolites of the Chudnoe deposit (Subpolar Urals). Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2018, No. 12, pp. 39—45. (in Russian)
- Моралев Г. В., Борисов А. В., Суренков С. В., Нагаева С. П., Тарбаев М. Б., Кузнецов С. К., Онищенко С. А., Ефанова Л. И., Соболева А. А. Распределение и формы нахождения редкоземельных элементов на Au-Pd-REE-руднопроявлениях Чудное и Нестеровское (хребет Малдынырд, Приполярный Урал) // Геохимия. 2005. № 11. С. 1175—1195.
- Moralev G. V., Borisov A. V., Surenkov S. V., Nagaeva S. P., Tarbaev M. B., Kuznetsov S. K., Onishchenko S. A., Efanova L. I., Soboleva A. A. Distribution and modes of occurrence of REE at the Chudnoe and Nesterovskoe occurrences of Au-Pd-REE ore mineralization in the Maldynyrd Range, Nether-Polar Urals. Geochem. Int., 2005, No.11, pp. 1078—1097.
- Онищенко С. А., Кузнецов С. К. Палладий-золотосульфидная минерализация в андезитах на месторождении Чудное (Приполярный Урал) // Вестник Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 6. С. 20—27. DOI: 10.19110/2221-1381-2019-6-20-27
- Onishchenko S. A., Kuznetsov S. K. Palladium-gold-sulphide mineralization in andesites at Chudnoe deposit (Subpolar Urals). Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2019, No. 6, pp. 20—27. (in Russian)
- Онищенко С. А., Онищенко Л. В., Ефанова Л. И., Артеева Т. А. Золоторудное месторождение Чудное на Приполярном Урале // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVI съезда Республики Коми. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2014. Т. III. С. 172—175.
- Onishchenko S. A., Onishchenko L. V., Efanova L. I., Arteeva T. A. The Chudnoe gold deposit in the Subpolar Urals. Geology and Mineral Resources of the European Northeast of Russia. Proceedings of the 16th Komi Republic Meeting, V. 3, Syktyvkar, IG Komi SC UB RAS, 2014, pp. 172—175. (in Russian)
- Онищенко С. А., Кузнецов С. К. Распад твердого раствора в системе Au-Ag-Cu в богатой золотом области // Геохимия. 2022. № 7. С. 639—654. DOI: [10.31857/S0016752522060061](https://doi.org/10.31857/S0016752522060061)
- Onishchenko S. A., Kuznetsov S. K. Exsolution in the Au-Ag-Cu system in a gold-rich area. Geochem. Int., 2022. V. 60, No. 7, pp. 657—671. DOI: [10.1134/0016702922060064](https://doi.org/10.1134/0016702922060064)
- Онищенко С. А., Кузнецов С. К. Самородное золото Au-Pd-месторождения Чудное (Приполярный Урал, Россия) // Геология и геофизика. 2023. № 2. С. 233—254. DOI: [10.15372/GiG2022122](https://doi.org/10.15372/GiG2022122)
- Onishchenko S. A., Kuznetsov S. K. Native Gold of the Chudnoe Gold-Palladium Deposit (Subpolar Urals, Russia). Russian Geology and Geophysics, 2023, No. 2, pp. 192—209. DOI: [10.2113/RGG20214452](https://doi.org/10.2113/RGG20214452)
- Тарбаев М. Б., Кузнецов С. К., Моралев Г. В., Соболева А. А., Лапутина И. П. Новый золотопалладиевый тип минерализации в Кожимском районе Приполярного Урала (Россия) // Геология рудн. месторождений. 1996. № 1. С. 15—30.
- Tarbaev M. B., Kuznetsov S. K., Moralev G. V., Soboleva A. A., Laputina I. P. A new gold-palladium type of mineralization in the Kozhim region of the Circumpolar Urals (Russia). (1996). Geol. Ore Deposits, No. 1, pp. 11—25.
- Шумилов И. Х., Остащенко Б. А. Минералогическо-технологические особенности Au-Pd-TR-оруденения на Приполярном Урале. Сыктывкар: Геопринт, 2000. 104 с.
- Shumilov I. Kh., Ostashchenko B. A. Mineral and technological features of Au-Pd-TR mineralization in the Subpolar Urals. Syktyvkar: Geoprint, 2000, 104 p. (in Russian)
- Воднар Р. Ж., Витык М. О. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Pontignano: Siena. 1994. pp. 117—130.
- Palyanova G., Murzin V., Borovikov A., Karmanov N., Kuznetsov S. Native gold in the Chudnoe Au-Pd-REE deposit (Subpolar Urals, Russia): Composition, minerals in intergrowth and genesis. Minerals. 2021. v. 11. 451.

Received / Поступила в редакцию 31.10.2023