

УДК 550.41

DOI: 10.24930/2500-302X-2024-24-3-526-546

## Минералы палладия и платины в рудах Au-Pd месторождения Чудное (Приполярный Урал, Россия)

С. А. Онищенко, С. К. Кузнецов

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 167982, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54, e-mail: mine222@ya.ru

Поступила в редакцию 27.07.2023 г., принята к печати 30.08.2023 г.

**Объект исследований.** Минералы палладия и платины, локализованные преимущественно в прожилках хромсодержащей слюды (фуксите) в риолитах. **Цель исследований.** Уточнение особенностей локализации минералов платиновой группы, их видового разнообразия, определение состава минералов, взаимоотношений между минералами благородных металлов, установление последовательности образования. **Методы.** Изучались полированные шлифы из образцов руд и монтированных в эпоксидной смоле концентратов тяжелых минералов с использованием оптического и электронного микроскопов. Состав минералов определялся на сканирующем электронном микроскопе с энергодисперсионным спектрометром. **Результаты.** Основные Pd минералы месторождения – изомертиит/псевдомертиит и мертиит, второстепенные – атенеит и unnamed минерал платиновой группы Pd<sub>6</sub>BiSe, платиновый минерал – сперрилит. Изомертиит/псевдомертиит образует сростания с золотом любого состава и строения, а мертиит встречается только с относительно маломедистым золотом гомогенного строения, в связи с чем для значительных участков рудных зон характерно наличие одного из арсеноантимонидов палладия. В отдельных участках руд установлено замещение изомертиита/псевдомертиита мертиитом. **Выводы.** Формирование фукситовых прожилков и содержащихся в них самородного золота, палладиевых минералов и сперрилита связано с одной стадией минералообразования. Cr, Au, Pd и Pt в рудах составляют единую геохимическую ассоциацию, что свидетельствует об общем источнике этих элементов, в качестве которого наиболее вероятны производные базит-гипербазитового магматизма.

**Ключевые слова:** Cu-Pd-содержащее золото, изомертиит, псевдомертиит (мертиит-I), мертиит (мертиит-II), атенеит, сперрилит, падмаит, unnamed минералы платиновой группы Pd<sub>6</sub>BiSe и Pd<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>2</sub>, самородный палладий, соболевскит, оксиды Pd

## Palladium and platinum minerals in Au-Pd ores of the Chudnoe deposit (Subpolar Urals, Russia)

Sergey A. Onishchenko, Sergey K. Kuznetsov

N.P. Yushkin Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar 167982, Russia, e-mail: mine222@ya.ru

Received 27.07.2023, accepted 30.08.2023

**Research subject.** Minerals of palladium, platinum, and native gold, localized mainly in the veins of chromium-containing mica (fuchsite) in rhyolites. **Aim.** Clarification of the localization features of platinum group minerals, their species diversity, determination of the composition of minerals, relationships between precious metal minerals, establishment of the sequence of formation. **Methods.** Polished sections from ore samples and concentrates of heavy minerals mounted in epoxy resin were studied using optical and electron microscopes. The composition of minerals was determined using a scanning electron microscope with an energy dispersive spectrometer. **Results.** The main Pd minerals of the deposit are isomertieite/pseudomertieite and mertieite, the minor ones are ateneite and the unnamed Pd<sub>6</sub>BiSe mineral, and the platinum mineral is sperrylite. Isomertieite/pseudomertieite forms intergrowths with gold of any composition and structure, while mertieite occurs only with relatively low-copper gold of a homogeneous structure; therefore, significant areas of ore zones are characterized by the presence of one of the palladium arsenoantimonides. In some areas of ores, the replacement of isomertieite/pseudomertieite by mertieite was established. **Conclusions.** The formation of fuchsite veinlets and the native gold, palladium minerals, and sperrylite contained therein is associated with one stage of mineral formation. Cr, Au, Pd, and Pt in ores form a single geochemical association, which indicates a common source of these elements. This source is most likely to be derivatives of basite-hyperbasite magmatism.

**Keywords:** Cu-Pd-containing gold, isomertieite, pseudomertieite (mertieite-I), mertieite (mertieite-II), ateneite, sperrylite, padmaite, unnamed Pd<sub>6</sub>BiSe mineral, unnamed Pd<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>2</sub> mineral, native palladium, sobolevskite, Pd oxides

**Для цитирования:** Онищенко С.А., Кузнецов С.К. (2024) Минералы палладия и платины в рудах Au-Pd месторождения Чудное (Приполярный Урал, Россия). *Литосфера*, 24(3), 526-546. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-526-546>

**For citation:** Onishchenko S.A., Kuznetsov S.K. (2024) Palladium and platinum minerals in Au-Pd ores of the Chudnoe deposit (Subpolar Urals, Russia). *Lithosphere (Russia)*, 24(3), 526-546. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-526-546>

© С.А. Онищенко, С.К. Кузнецов, 2024

## ВВЕДЕНИЕ

Золотопалладиевая минерализация распространена преимущественно в породах базит-гипербазитового состава и связанных с ними Cu-Ni сульфидных и Pd-Pt малосульфидных месторождениях (Спиридонов и др., 2004; Аникина, Алексеев, 2010; Пыстин и др., 2011; Рудашевский и др., 2015; Спиридонов и др., 2015; Nielsen et al., 2015; Sluzhenikin, Mokhov, 2015; Мурзин и др., 2021; Murzin et al., 2022). Кроме того, минералы платиновых металлов в ассоциации с самородным золотом известны на ряде золоторудных гидротермальных месторождений, в частности Бурако ду Оро и Серра Пелада (Бразилия), Блейда Фар Вест (Анти-Атлас, Марокко), на уран-ванадиевом месторождении Средняя Падма в Южной Карелии (Россия), урановом месторождении Коронейшен Хилл (Австралия) и других месторождениях, локализованных в породах разного состава и возраста (Билибина и др., 1991; Olivo et al., 1995, 2001; Cabral et al., 2002; Şener et al., 2002; El Ghorfi et al., 2006; Orth et al., 2014; Menez, Botelho, 2017; Калинин и др., 2022).

Золотопалладиевое гидротермальное месторождение Чудное, находящееся на западном склоне Приполярного Урала, заметно отличается от других месторождений (Тарбаев и др., 1996). Необычной является ассоциация Cu-Pd-содержащего золота, минералов палладия и редкоземельных минералов с Cr-содержащим мусковитом (фукситом). Золотофукситовые прожилки развиты в риолитах, сульфиды в них практически отсутствуют, но распространены арсеноантимониды и висмутоселениды палладия.

Самородное золото и минералы платиновой группы месторождения Чудное изучались ранее рядом авторов. В ассоциации с золотом установлены арсеноантимониды палладия, атенеит и сперрилит, в кварцевом прожилке обнаружен самородный палладий (Тарбаев и др., 1996; Галанкина и др., 1998; Шумилов, Остащенко, 2000; Борисов, 2005; Кузнецов и др., 2014; Онищенко, Кузнецов, 2019; Palyanova et al., 2021). Изученность месторождения существенно повысилась при геологоразведочных работах, проведенных ЗАО Голд Минералс в 2012–2013 гг., в результате которых оконтурены с поверхности и прослежены на глубину три рудные зоны (Калустов, Ефанова, 2013; Онищенко и др., 2014). Нами на материале представительных проб, полученных при этих работах, детально охарактеризован химический и фазовый состав самородного золота, выявлена его пространственная изменчивость в пределах месторождения (Онищенко, Кузнецов, 2023), получены новые сведения о минералах палладия и платины.

Целью настоящей работы является систематизация результатов изучения минералов платиновой группы месторождения Чудное, уточнение особен-

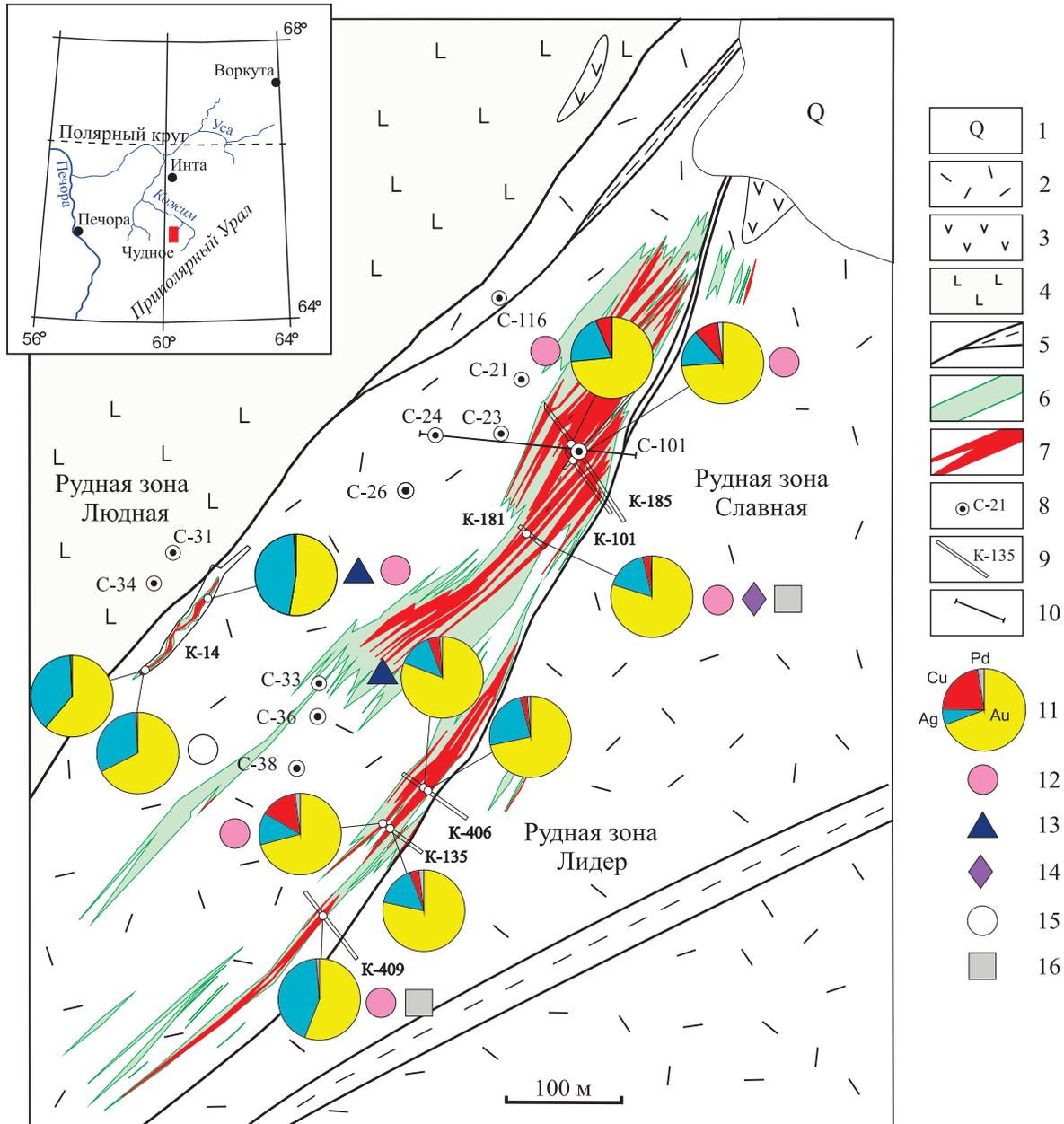
ностей их локализации, видового разнообразия, определение состава, взаимоотношений, установление последовательности и условий образования.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

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, обеизской 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, совпадающие 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-серицитового и хлорит-серицитового состава. В риолитах повсеместно распространена мелкая вкрапленность гематита, магнетит присутствует только в непосредственной близости от контакта риолитов с базитами. Отмечаются кварцевые жилы с горным хрусталем, мусковитом, крупночешуйчатым гематитом, альбитом, прожилки альбит-алланит-кварцевого состава.

Золоторудные зоны в целом контролируются тектоническими нарушениями, но непосредственно в кварц-серицитовых метасоматитах, слагающих зоны разломов, золоторудная минерализация обычно отсутствует. Промышленное золотое оруденение, относящееся к типу минерализованных прожилковых зон (линейных штокверков), приурочено к трещиноватым и брекчированным риолитам. Риолиты характеризуются относительно стабильными содержаниями SiO<sub>2</sub> (73–79 мас. %) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10–13 мас. %) при значительных вариациях в содержании щелочей, при этом K<sub>2</sub>O чаще всего преобладает над Na<sub>2</sub>O. Второстепенным компонентом риолитов является железо, содержание Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в среднем составляет 1.8 мас. %, FeO – ≈1 мас. %. Золотоносные риолиты по валовому составу значительно отличаются от безрудных, что свидетельствует о малой роли объемных метасоматических



**Рис. 1.** Геологическая карта месторождения Чудное.

1 – четвертичные отложения; 2 – риолиты; 3 – андезиты; 4 – базиты (базальты и долериты); 5 – разрывные нарушения (кварц-серцитовые и серцитовые метасоматиты); 6 – зоны фукситовой минерализации; 7 – рудные тела ( $Au > 1$  г/т); 8 – скважины; 9 – канавы; 10 – линия геологического разреза; 11 – состав самородного золота (ат. %); 12 – изомертиит/псевдомертиит; 13 – мертиит; 14 – unnamed  $Pd_6BiSe$ ; 15 – палладий самородный; 16 – сперрилит.

**Fig. 1.** Geological map of the Chudnoe deposit.

1 – Quaternary deposits; 2 – rhyolites; 3 – andesites; 4 – mafic rocks (basalts and dolerites); 5 – faults (quartz-sericite and sericite metasomatites); 6 – zones of fuchsite mineralization; 7 – orebodies ( $Au > 1$  ppm); 8 – boreholes; 9 – trenches; 10 – profile of geologic section; 11 – composition of native gold (at. %); 12 – isomertite/pseudomertite; 13 – mertite; 14 – unnamed  $Pd_6BiSe$  mineral; 15 – native palladium; 16 – sperrylite.

процессов при образовании руд (Онищенко и др., 2014).

Рудные зоны имеют северо-восточное простирание и крутое (50–70) северо-западное падение. Зо-

лоторудные 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.

Самородное золото приурочено главным образом к прожилкам Cr-содержащего мусковита (фуксита) в риолитах. Толщина фукситовых прожилков колеблется от долей мм до 1.0–1.5 см, риолиты вдоль зальбандов часто осветлены в зоне шириной 3–5 мм. Количество прожилков в рудных интервалах составляет 3–10 на 1 пог. м. Фуксит представлен тонкочешуйчатыми агрегатами изумрудно-зеленого цвета, содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  обычно составляет 1–7 мас. %. Самородное золото образует в фуксите выделения чешуйчатой, уплощенной и неправильной формы, размер их варьируется от 0.001–0.002 до 2 мм, крайне редко до 8 мм.

В сростании с золотом находятся арсеноантимониды, висмутоселениды и теллуrowисмутиды палладия, изредка встречается сперрилит  $\text{PtAs}_2$  и клаусталит  $\text{PbSe}$ , сульфиды представлены единичными включениями минерала  $\text{Cu}_{1.86}\text{S}_{0.66}\text{Se}_{0.48}$ , по составу промежуточному между халькозином-дигенитом и берцелианитом. Вместе с фукситом в прожилках присутствуют алланит (в том числе Cr-содержащий), кварц, альбит, отмечаются кальцит, калиевый полевой шпат, титанит, апатит, цинкохромит и другие минералы.

Кроме фукситовых прожилков, золото находится также в пятнах осветления – зонах локального (5–10 см) метасоматического изменения риолитов, в которых отсутствует пигментирующий породу гематит (Кузнецов, Онищенко, 2018). Золото находится в сростании с породообразующими минералами риолитов, титанитом, алланитом, кайсикхитом-(Y), изредка с арсеноантимонидами палладия, минералами урана, пиритом и халькопиритом.

В северной части рудной зоны Славной среди риолитов присутствуют тела вулканитов андезитового состава редкопорфировой структуры, преобразованные в хлорит-биотит-альбитовые и серицит-биотит-альбитовые породы. Для андезитов, в отличие от риолитов, характерна рассеянная вкрапленность сульфидов, содержание которых обычно не превышает 0.5%. В сульфидсодержащих андезитах выявлена бедная Au-Pd минерализация, расположенная ниже по падению рудных тел (Онищенко, Кузнецов, 2019). С самородным золотом и арсеноантимонидами палладия ассоциируют пирит, Co-содержащий пирит, кобальтин, Pd-содержащий кобальтин, Se-содержащий галенит, сфалерит, халькопирит, магнетит и алланит.

Формирование золотоплатиноидной минерализации связано с гидротермальной деятельностью в зонах крупных разрывных нарушений предположительно в послеоордовикское время. Изотопно-геохронологическое датирование по фукситу  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  и  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  методами показало несколько возрастных значений – 249, 254, 265 и  $\approx 300$  млн лет, отвечающих позднему и среднему палеозою (Кузнецов, Андреичев, 1998; Моралев и др., 2005). Вместе с этим отмечается, что фукситовые прожилки могут быть более древними – докембрийскими, претерпевшими впоследствии неоднократные гидротермальные воздействия.

## САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО

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. % (4.3 ат. %), отмечается Hg (Онищенко, Кузнецов, 2023).

Самородное золото формировалось в виде гомогенного Au-Ag-Cu-твердого раствора при температуре выше 220°C. При понижении температуры в зависимости от исходного состава твердый раствор остается гомогенным либо, при содержании Cu > 1.1–2.5 мас. %, распадается на две или три фазы. Основное влияние на характер распада Au-Ag-Cu твердого раствора и состав образовавшихся фаз оказывает присутствие меди. Характерны пластинчато-решетчатые и таблитчатые структуры распада твердых растворов, формирование которых завершилось при температуре  $\approx 100^\circ\text{C}$ . Матрица в структурах распада имеет Ag-Au состав, пластинки или таблички соответствуют фазам  $\text{Au}_3\text{Cu}$  и AuCu. Процесс распада твердого раствора сопровождался собирательной перекристаллизацией золота с образованием зернистых структур (Онищенко, Кузнецов, 2022).

Для рудной зоны Славной наиболее характерно умеренно медистое золото с двухфазной структурой распада, в зоне Людной распространено низкопробное серебристое золото гомогенного строения с крайне низкими содержаниями меди. Самородное золото зоны Лидер характеризуется наибольшим разнообразием, только в ней встречается золото с содержанием меди >6 мас. %. Изменчивость состава самородного золота проявляется как между рудными зонами, так и в дискретном характере изменения состава золота в рудных зонах, что согласуется с их прожилковым строением. На заключительных этапах минералообразования самородное золото частично замещалось вторичным высокопробным золотом.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучались полированные шлифы из образцов руд и монтированных в эпоксидной смоле концентратов тяжелых минералов. Концентраты получены из рудных проб, измельченных до 1 мм, что позволяло изучать самородное золото в сростании с сопутствующими минералами; масса проб 5–10 кг. Всего изучено 36 полированных шлифов из концентратов и 16 из образцов руд. Исследования проведены в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН с использованием оптического микроскопа Nikon Eclipse LV 100 ND. Состав минералов определялся на сканирующем электронном микроскопе “TescanVega” 3 LMN с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 “Oxford Instruments” (операторы Е.М. Тропников и А.С. Шуйский). Напряжение 20 кВ, характеристические линии: Au *Ma*, Ag *La*, Cu *Ka*, Pd *La*, Bi *Ma*, Se *La*, Sb *La*, Te *La*, O *Ka*, эталоны – чистые металлы для Au, Ag, Cu, Pd, Bi, Sb, Se; InAs для As, HgTe для Te и Hg, SiO<sub>2</sub> для кислорода. Время набора спектров составляло 60–80 с (600 тыс. импульсов). Погрешность определения, мас. %: Pd – 0.4, Sb – 0.3, Bi – 0.4, As – 0.2, Hg – 0.3, Se – 0.2, Te – 0.25, O – 0.3. Состав минералов устанавливался в точках с диаметром зонда ≈ 1 мкм, состав самородного золота со структурой распада Au-Ag-Cu твердого раствора определялся путем анализа по площади участков размером от 20 × 20 до 50 × 50 мкм<sup>2</sup>.

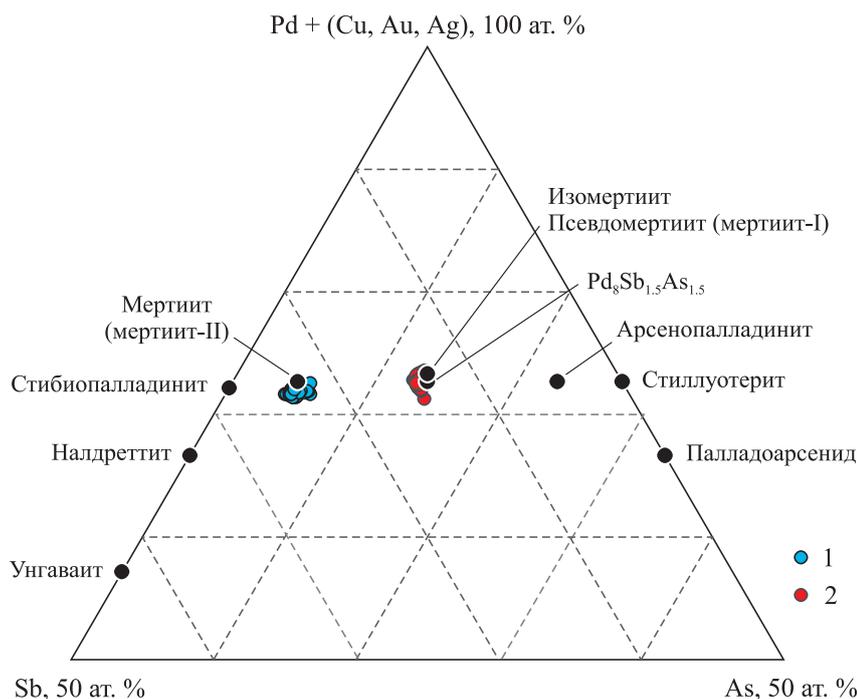
Дополнительное изучение Pd минералов проведено на сканирующем электронном микроскопе ThermoFischer Scientific Axia ChemiSEM с энерго-

дисперсионной приставкой TrueSight EDS 25 mm<sup>2</sup> (оператор В.А. Радаев). Анализы проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 0.85 мкА; диаметр зонда около 1 мкм. Изучались вариации содержания Cu, Au и Ag в арсеноантимонидах палладия и сравнивались результаты анализов, полученных на двух приборах. Установлено, что в палладиевых минералах присутствует относительно равномерно распределенная примесь Cu и Au, сходимость результатов анализов по этим элементам вполне удовлетворительная. Результаты определения Ag доверия не вызывают, что, скорее всего, вызвано частичным наложением линий Pd и Ag в энергодисперсионном спектре.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Минералы платиновой группы являются характерными компонентами руд месторождения Чудное, распространены во всех рудных зонах, но всегда в подчиненном по отношению к самородному золоту количестве. Обычно они находятся в фукситовых прожилках в тесной ассоциации с золотом, образуя с ним совместные сростания.

Наиболее распространены арсеноантимониды палладия, представленные двумя минеральными видами. Один из них, с примерно равными атомными количествами сурьмы и мышьяка, по составу соответствует изомертииту Pd<sub>11</sub>Sb<sub>2</sub>As<sub>2</sub> или псевдомертииту Pd<sub>11</sub>(Sb,As)<sub>4</sub>, второй, в котором сурьма значительно преобладает над мышьяком, идентифицируется как мертиит Pd<sub>8</sub>Sb<sub>2.5</sub>As<sub>0.5</sub> (рис. 2). Псевдомертиит до 2022 г. назывался мертиитом-I, а мер-



**Рис. 2.** Состав арсеноантимонидов палладия месторождения Чудное.

1 – мертиит (мертиит-II) (n = 116),  
2 – изомертиит/псевдомертиит (мертиит-I) (n = 59). В скобках приведены названия минералов, применявшиеся до 2022 г.

**Fig. 2.** Composition of palladium arsenoantimonides of the Chudnoe deposit.

1 – mertieite (mertieite-II) (n = 116),  
2 – isomertieite/pseudomertieite (mertieite-I) (n = 59). The names of minerals used before 2022 are given in parentheses.

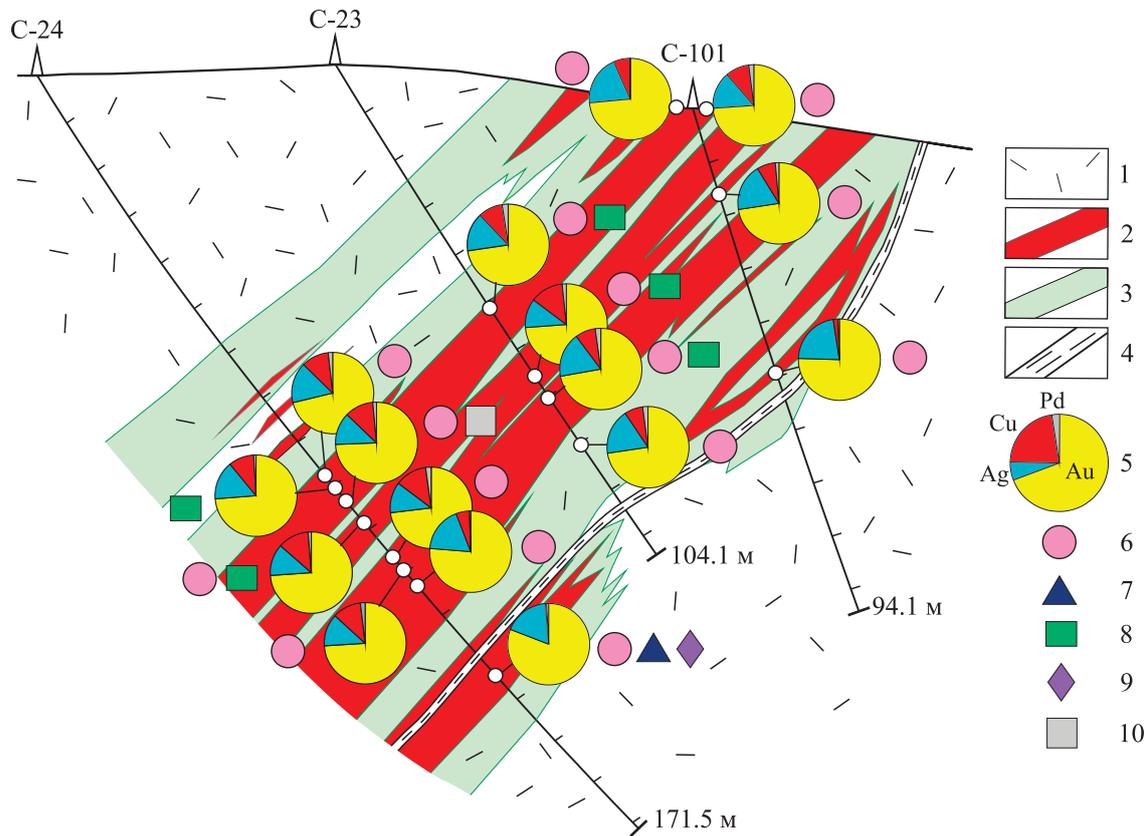
тиит – мертиитом-II, оба минерала переименованы решением Комиссии по новым минералам, номенклатуре и классификации ММА (Miyawaki et al., 2022). Обычно в рудах распространен только один из арсеноантимонидов палладия, но в отдельных участках руд отмечаются сростания этих двух минералов.

Реже встречается атенеит – минерал с идеализированной формулой  $Pd_2(As_{0.75}Hg_{0.25})$ . Выявлены также висмутоселениды палладия, среди которых преобладает неназванный минерал  $Pd_6BiSe$ . Изредка отмечаются теллурувисмутиды палладия, замещаемые оксидами палладия, единичное включение в золоте идентифицировано как соболевскит. Арсенид платины – сперрилит – встречается в виде мелких (5–15 мкм) кристалликов в сростании с самородным золотом.

**Изомертиит/псевдомертиит** распространен в рудных зонах Славная и Лидер, а в рудной зоне

Людная отмечается очень редко (рис. 1, 3). Минерал в виде зерен неправильной или изометричной формы размером от 5 до 120 мкм образует сростания с золотом любого состава, но чаще с умеренно медистым, нередко образует вокруг золота невыдержанные каймы (рис. 4б, в). Минерал оптически изотропный. Сопутствующие минералы представлены фукситом, реже альбитом, кварцем и эпидот-алланитом, иногда хромсодержащим.

Сростания изомертиита/псевдомертиита с золотом обычно не имеют признаков, указывающих на их возрастные соотношения, но нарастание изомертиита/псевдомертиита на частицы золота свидетельствует о некотором запаздывании в отложении палладиевого минерала относительно золота. Встречаются противоположные взаимоотношения, когда выделения золота содержат многочисленные мелкие включения изомертиита/псевдомертиита. На рис. 4г крупное зерно изомертиита/псевдо-

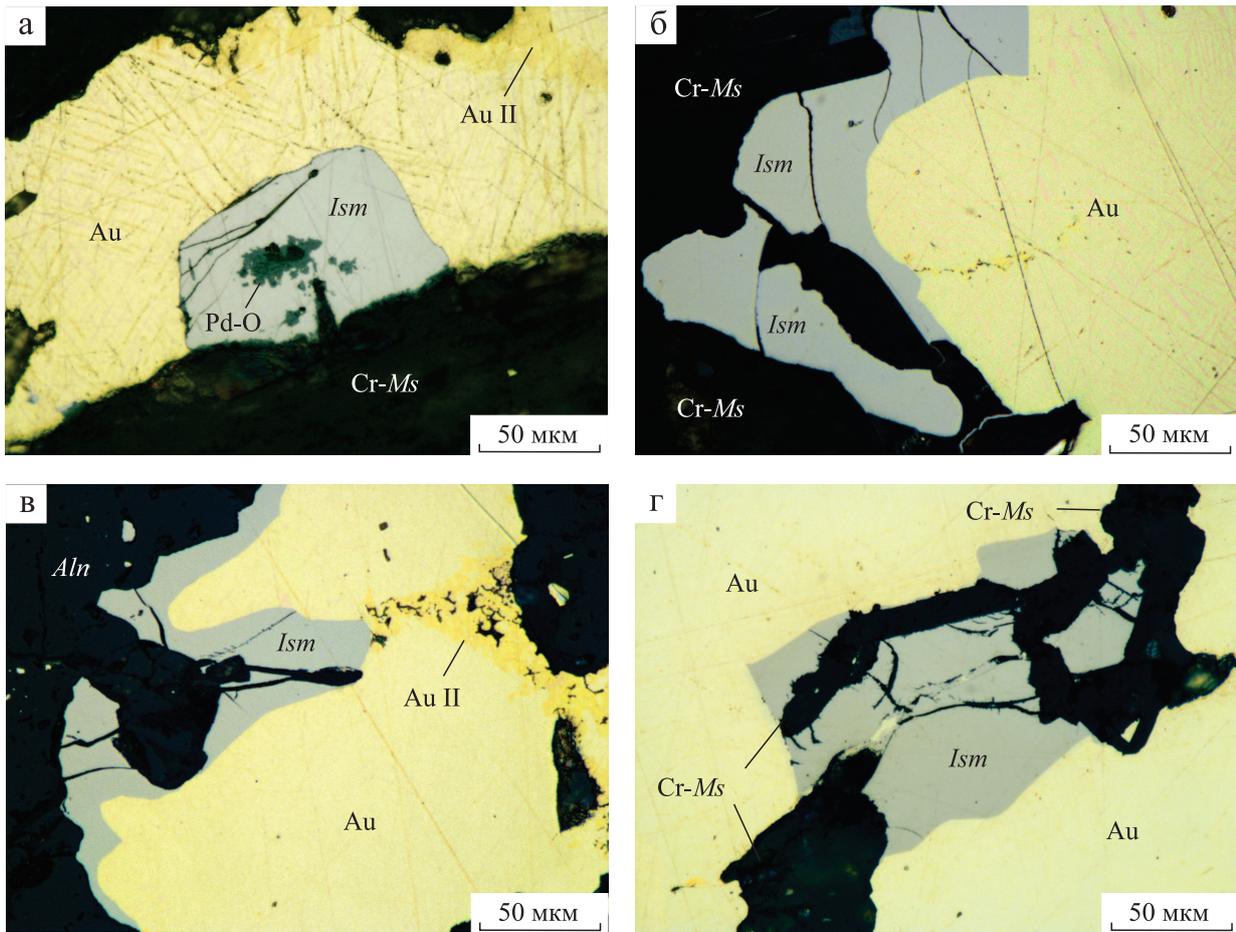


**Рис. 3.** Разрез через рудную зону Славная.

1 – риолиты; 2 – рудные тела ( $Au > 1$  г/т); 3 – зоны фукситовой минерализации; 4 – разрывные нарушения (кварц-серцитовые метасоматиты); 5 – состав самородного золота (ат. %); 6 – изомертиит/псевдомертиит; 7 – мертиит; 8 – атенеит; 9 – неназванный минерал  $Pd_6BiSe$ ; 10 – сперрилит.

**Fig. 3.** Section across the Slavna ore zone

1 – rhyolites; 2 – orebodies ( $Au > 1$  ppm); 3 – zones of fuchsite mineralization; 4 – faults (quartz-sericite metasomatites); 5 – composition of native gold (at. %); 6 – isomerticite/pseudomerticite; 7 – merticite; 8 – atheneite; 9 – unnamed  $Pd_6BiSe$  mineral; 10 – sperryllite.



**Рис. 4.** Изомертиит/псевдомертиит в рудах месторождения Чудное.

а – изомертиит/псевдомертиит в сростании с золотом с хорошо развитой структурой распада Au-Ag-Cu твердого раствора; в виде пятен по первичному золоту развивается высокопробное золото II, которым в значительной степени замещены также пластинки фазы  $Au_3Cu$ ; изомертиит/псевдомертиит замещается оксидами палладия (темные пятна); б – кайма изомертиита/псевдомертиита вокруг золота со структурой распада твердого раствора; в – кайма изомертиита/псевдомертиита вокруг золота с очень тонкой структурой распада твердого раствора; г – изомертиит/псевдомертиит в низкопробном золоте однородного строения пересекается прожилками фуксита. *Ism* – изомертиит/псевдомертиит, Au – золото, Au II – вторичное высокопробное золото, *Cr-Ms* – фуксит, *Aln* – алланит, Pd-O – оксиды палладия. Полированные шлифы: а – 23-63-68, б – 24-106, в – 5384, г – К-409. Отраженный свет.

**Fig. 4.** Isomertieite/pseudomertieite in the ores of the Chudnoe deposit.

а – isomertieite/pseudomertieite in intergrowth with gold with a well-developed Au-Ag-Cu solid solution decomposition texture; in the form of spots on primary gold, high-grade gold II develops, with which the plates of the  $Au_3Cu$  phase are also largely replaced; isomertieite/pseudomertieite is replaced by palladium oxides (dark spots); б – isomertieite/pseudomertieite border around gold with exsolution texture; в – isomertieite/pseudomertieite border around gold with a very fine exsolution texture; г – isomertieite/pseudomertieite in low-grade gold of homogeneous texture is intersected by fuchsite veins. *Ism* – isomertieite/pseudomertieite, Au – gold, Au II – secondary high-grade gold, *Cr-Ms* – fuchsite, *Aln* – allanite, Pd-O – palladium oxides. Polished sections: а – 23-63-68, б – 24-106, в – 5384, г – К-409. Reflected light.

мертиита, заключенное в золоте, пересекается прожилками фуксита, в которых присутствуют мелкие включения золота, по составу аналогичные основной его массе.

Состав изомертиита/псевдомертиита по основным элементам довольно выдержан, для него характерны близкие атомные количества сурьмы и мышьяка. Уверенно идентифицировать минерал не представляется возможным в связи с близостью его

состава к двум минеральным видам: изомертииту и псевдомертииту.

Изомертиит имеет формулу  $Pd_{11}Sb_2As_2$ , сингония минерала кубическая, к структурному типу изомертиита относятся также торнрозит  $Pd_{11}As_2Te_2$  и миессит  $Pd_{11}Se_2Te_2$  (Karimova et al., 2016). Формула псевдомертиита (до 2022 г. назывался мертиитом-I), по (Cabri, 2002), –  $Pd_{11}(Sb, As)_4$ , сингония минерала гексагональная. В сводке ММА

(<http://www.ruff.info/ima>) формула минерала представлена в виде  $Pd_{5+x}(Sb, As)_{2-x}$  ( $x = 0.1-0.2$ ). О.В. Каримова с соавторами высказали предположение, что мертиит-I может иметь формулу  $Pd_8As_{1.5}Sb_{1.5}$  (Karimova et al., 2018), если его рассматривать как член дискретного ряда минералов с общей формулой  $Pd_8(As, Sb)_3$ , к которым относятся мертиит-II  $Pd_8Sb_{2.5}As_{0.5}$  (Karimova et al., 2018), арсенопалладинит  $Pd_8As_{2.5}Sb_{0.5}$  (Karimova et al., 2020) и стиллуотерит  $Pd_8As_3$  (Karimova et al., 2022).

Состав изомертиита/псевдомертиита (табл. 1) заметно отклоняется от формулы  $Pd_{11}Sb_2As_2$  и ближе к формуле  $Pd_8As_{1.5}Sb_{1.5}$ . Расчет на 15 атомов (среднее из 116 определений) приводит к формуле  $Me_{10.91}Sb_{2.14}As_{1.95}$ , расчет на 11 атомов по тем же определениям соответствует формуле  $Me_{8.00}Sb_{1.57}As_{1.43}$ , где  $Me = Pd + Cu + Au + Ag$ . Не исключено, что некоторый дефицит палладия относительно формулы  $Pd_{11}Sb_2As_2$  обусловлен небольшой систематической ошибкой в наших анализах.

Таблица 1. Состав изомертиита/псевдомертиита месторождения Чудное, мас. %

Table 1. Composition of isomertieite/pseudomertieite of the Chudnoe deposit, wt %

Скважина, канава	Номер пробы	n	Pd	Cu	Au	Ag	Sb	As	Сумма	Формула на 15 атомов
Рудная зона Славная										
К-101	5384	12	69.27	3.36	0.18	1.13	16.80	9.49	100.23	$Me_{10.95}Sb_{2.11}As_{1.94}$
К-185	158	1	72.60	1.84	1.03	–	16.59	9.77	101.83	$Me_{10.93}Sb_{2.08}As_{1.99}$
С-101	16.6	2	68.35	4.85	–	–	17.05	9.95	100.20	$Me_{10.87}Sb_{2.12}As_{2.01}$
	47	1	69.40	3.57	–	–	16.83	9.40	99.20	$Me_{10.93}Sb_{2.13}As_{1.94}$
К-181	11236	2	70.36	1.03	1.77	1.07	16.55	9.62	100.40	$Me_{10.87}Sb_{2.12}As_{2.01}$
С-21	61-63	9	68.26	4.89	0.19	–	17.77	9.27	100.38	$Me_{10.91}Sb_{2.22}As_{1.87}$
	77-80	2	71.54	1.41	–	–	17.07	9.79	99.81	$Me_{10.79}Sb_{2.18}As_{2.03}$
С-23	101-103	8	70.91	2.53	–	–	16.98	9.59	100.01	$Me_{10.88}Sb_{2.15}As_{1.97}$
	51-52	6	69.36	4.26	–	–	16.87	9.85	100.34	$Me_{10.90}Sb_{2.10}As_{2.00}$
	63-68	15	70.54	3.25	0.28	–	16.96	9.53	100.56	$Me_{10.93}Sb_{2.13}As_{1.94}$
	70-71	5	70.91	2.98	–	–	16.89	9.62	100.40	$Me_{10.91}Sb_{2.12}As_{1.97}$
	78-83	2	70.63	2.82	–	–	17.12	9.79	100.36	$Me_{10.85}Sb_{2.15}As_{2.00}$
С-24	86-89	1	68.11	4.85	–	–	17.05	9.62	99.63	$Me_{10.91}Sb_{2.13}As_{1.96}$
	93-94	3	73.30	0.62	–	–	16.79	9.41	100.12	$Me_{10.89}Sb_{2.15}As_{1.96}$
	97-99	2	68.83	4.56	–	–	16.98	9.82	100.19	$Me_{10.90}Sb_{2.11}As_{1.99}$
	105-106	7	69.83	3.83	–	–	17.24	9.58	100.48	$Me_{10.90}Sb_{2.15}As_{1.95}$
	106-111	6	70.18	3.66	–	–	17.03	9.64	100.51	$Me_{10.91}Sb_{2.13}As_{1.96}$
С-26	112-113	6	70.18	–	4.31	0.76	16.28	9.23	100.76	$Me_{10.92}Sb_{2.12}As_{1.96}$
	134-137	5	70.06	1.60	2.32	0.64	16.81	9.16	100.59	$Me_{10.94}Sb_{2.15}As_{1.91}$
	91-97	1	68.84	3.88	–	–	16.93	9.55	99.20	$Me_{10.90}Sb_{2.14}As_{1.96}$
7102	710201	2	71.21	2.59	0.21	–	16.60	9.65	100.26	$Me_{10.93}Sb_{2.09}As_{1.98}$
С-116	194-203	4	69.84	0.59	2.44	1.87	16.76	9.34	100.84	$Me_{10.88}Sb_{2.16}As_{1.96}$
Рудная зона Лидер										
С-31	222-227	2	69.71	3.21	0.82	–	16.93	9.77	100.44	$Me_{10.87}Sb_{2.13}As_{2.00}$
	246-249	1	72.08	1.59	–	–	16.74	9.39	99.80	$Me_{10.92}Sb_{2.13}As_{1.95}$
К-409	К-409	8	69.59	3.66	–	0.41	17.16	9.52	100.34	$Me_{10.91}Sb_{2.15}As_{1.94}$
К-135	135001	1	71.66	2.44	–	–	16.19	9.29	99.58	$Me_{11.02}Sb_{2.06}As_{1.92}$
Рудная зона Людная										
К-14	1417	1	72.52	1.82	–	–	17.36	9.23	100.93	$Me_{10.91}Sb_{2.19}As_{1.90}$
	1501	1	69.79	1.86	0.55	2.30	16.78	9.15	100.43	$Me_{10.98}Sb_{2.13}As_{1.89}$
Среднее		116	70.04	2.99	0.55	0.33	16.96	9.52	100.39	$Me_{10.91}Sb_{2.14}As_{1.95}$

Примечание. Номер пробы из ядра скважин (С) отражает интервал опробования в метрах; n – количество проанализированных зерен; прочерк – содержание элемента ниже предела обнаружения. Сква. С-116 – Au-Pd минерализация в андезитах (Онищенко, Кузнецов, 2019).  $Me = Pd + Cu + Au + Ag$ .

Note. The core sample number marks the sampling interval (m); n – number of the analyzed grains; dash means the element content is below the detection limit. Well C-116 – Au-Pd mineralization in andesites (Onishchenko, Kuznetsov, 2019).  $Me = Pd + Cu + Au + Ag$ .

В изомертиите/псевдомертиите практически всегда присутствует примесь меди, содержание которой в отдельных зернах достигает 5.4 мас. %. Изомертиит/псевдомертиит с относительно высокими содержаниями меди встречается в сростании как с маломедистым золотом гомогенного строения, так и медистым золотом гетерогенного строения с многочисленными пластинками фазы  $Au_3Cu$ , образовавшимися в результате распада  $Au-Ag-Cu$  твердого раствора. Наиболее высокие содержания меди (4.0–5.4 мас. %, в среднем 4.89 мас. %  $Cu$ ) отмечены в изомертиите/псевдомертиите в скв. 21 (инт. 61–63 м), где палладиевый минерал находится в сростании с золотом гомогенного строения, содержащим не более 0.3 мас. %  $Cu$ . В скв. 24 (инт. 63–68 м), изомертиит/псевдомертиит, содержащий 0.8–4.4 (в среднем 3.25) мас. %  $Cu$ , находится в сростании с золотом, содержащим 4.7–5.4 мас. %  $Cu$  с двухфазной структурой распада твердого раствора. Довольно часто в изомертиите/псевдомертиите отмечается заметная примесь  $Au$ , наиболее высокие ее содержания отмечены в скв. 24 (инт. 112–113), при этом наличие меди в минерале не зафиксировано.

Изомертиит/псевдомертиит иногда замещается оксидами палладия неоднородного строения, в которых обычно присутствует примеси  $Cu$ ,  $As$ ,  $Sb$ , заимствованные из первичного минерала, а также, что необычно,  $Y$  и  $Se$ . В частности, состав оксидов палладия, развивающихся в центральной части зерна изомертиита/псевдомертиита на рис. 4а, содержит, мас. %:  $Pd$  – 50.6,  $Cu$  – 7.9,  $As$  – 3.7,  $Y$  – 2.8,  $Se$  – 4.6,  $Si$  – 1.1,  $Mn$  – 0.9,  $O$  – 14.0.

Следует отметить, что, помимо замещения изомертиита/псевдомертиита оксидами палладия, наблюдается замещение первичного самородного золота вторичным высокопробным золотом (см. рис. 4а), но в других случаях такое соответствие не отмечается (см. рис. 4в).

**Мертиит** – тригональный минерал состава  $Pd_8Sb_{2.5}As_{0.5}$  (Karimova et al., 2018) – до 2022 г. назывался мертиитом-II. Встречается во всех рудных зонах, а в рудной зоне Людная является преобладающим  $Pd$ -минералом. Мертиит в виде зерен размером от 5 до 100 мкм образует сростания с золотом, сопутствующие минералы представлены фукситом, реже альбитом, кварцем и эпидот-алланитом, нередко хромсодержащим. В отличие от изомертиита/псевдомертиита, который наблюдается в сростании с золотом любого состава, мертиит встречается только в ассоциации с маломедистым золотом гомогенного строения. Чаще всего взаимоотношения мертиита с золотом носят неопределенный характер, встречаются включения мертиита в золоте, иногда с отчетливым идиоморфизмом мертиита по отношению к золоту, отмечаются также нарастания мертиита на золото (рис. 5а–г).

Состав мертиита по основным элементам испытывает небольшие колебания (табл. 2), харак-

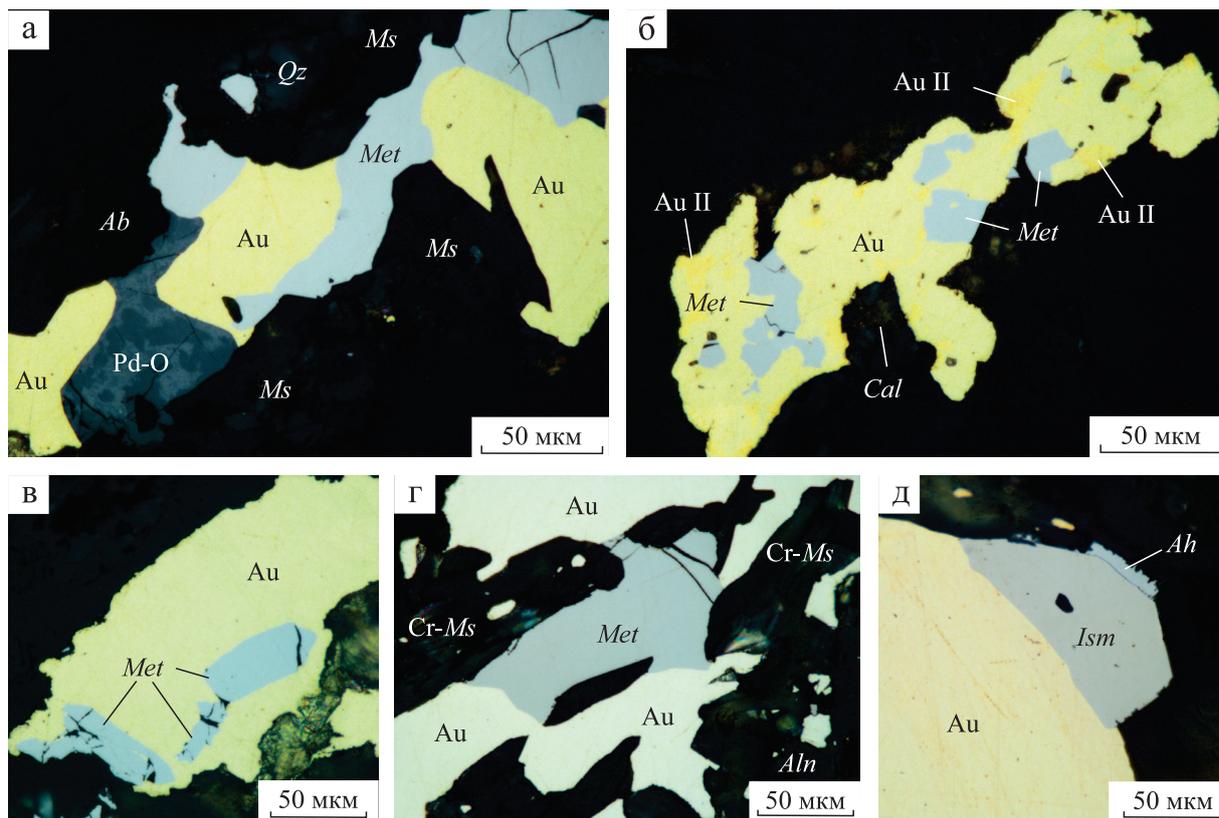
терной примесью является медь, содержания которой, однако, заметно ниже, чем в изомертиите/псевдоизомертиите, содержания золота во всех зернах ниже предела обнаружения. Состав мертиита  $Me_{7.90}Sb_{2.58}As_{0.52}$  (среднее из 59 определений,  $Me = Pd + Cu + Au + Ag$ ) в целом неплохо соответствует теоретической формуле  $Pd_8Sb_{2.5}As_{0.5}$  (Karimova et al., 2018), однако имеется определенный дефицит металлов, что возможно, связано, как и в случае с изомертиитом/псевдоизомертиитом, с наличием небольшой систематической ошибки.

Мертиит иногда замещается оксидами палладия неоднородного строения, содержащих небольшую примесь  $Cu$ , реже  $As$  и  $Sb$ .

Особый интерес представляют взаимоотношения между двумя арсеноантимонидами палладия – изомертиитом/псевдомертиитом и мертиитом. Сростания этих минералов распространены в двух интервалах руд зоны Славная, крайне редко отмечаются в рудной зоне Людная. В отраженном свете мертиит отличается от изомертиита/псевдомертиита ясно выраженным голубым оттенком, в отраженных электронах выглядит более светлым, но в целом арсеноантимониды палладия по оптическим и электронно-оптическим свойствам различаются не очень значительно, поэтому их сростания представлены в виде интегральных изображений в характеристическом излучении элементов (рис. 6).

В скв. 21 (инт. 61–63 м) распространены совместные сростания мертиита с изомертиитом/псевдомертиитом и золотом гомогенного строения. В этих сростаниях мертиит отчетливо развивается по изомертииту/псевдомертииту. В мертиите присутствуют реликты изомертиита/псевдомертиита (см. рис. 6а, в, г), наблюдается также обрастание золота мертиитом (см. рис. 6г). Мертиит содержит червеобразные включения золота и изредка мелкие выделения халькозина-дигенита состава  $Cu_{1.79}Fe_{0.16}S_{1.05}$ . Образование медного минерала обусловлено значительной разницей в содержании меди в исходном изомертиите/псевдомертиите (4.0–5.4 мас. %  $Cu$ ) и замещающем его мертиите (1.4–2.7 мас. %  $Cu$ ). В этой же пробе мертиит встречается в виде самостоятельных зерен в сростании с золотом.

В скв. 24 (инт. 134–137 м) палладиевые минералы (мертиит, изомертиит/псевдомертиит и названный минерал  $Pd_6BiSe$ ) обычно образуют самостоятельные сростания с золотом. Встречаются также совместные выделения двух арсеноантимонидов палладия, центральная часть которых сложена изомертиитом/псевдомертиитом, а периферическая часть – мертиитом, образующим субграфические сростания с золотом (см. рис. 6б). Следует отметить, что содержание меди в изомертиите/псевдомертиите в этой пробе соизмеримо с содержанием меди в замещающем его мертиите и образование медных минералов не отмечено.



**Рис. 5.** Мертиит и атенеит в рудах месторождения Чудное.

а – мертиит в сростании с золотом гомогенного строения и минералом  $Pd_6BiSe$ , который полностью замещен оксидами-гидроксидами Pd; б – мертиит в сростании с золотом гомогенного строения; в виде пятен развивается вторичное высокопробное золото; в – идиоморфные кристаллы мертиита в золоте; г – мертиит в сростании с фукситом и низкопробным золотом гомогенного строения; д – атенеит в сростании с изомертиитом/псевдомертиитом в ассоциации с золотом, имеющим очень тонкую структуру распада твердого раствора. Au – золото, Au II – вторичное высокопробное золото, Met – мертиит, Ism – изомертиит/псевдомертиит, Ah – атенеит, Pd-O – оксиды палладия, Qz – кварц, Ab – альбит, Ms – мусковит, Cr-Ms – фуксит, Aln – алланит, Cal – кальцит. Полированные шлифы: а-в – 21-101-103, г – 1417, д – 23-70-71. Отраженный свет.

**Fig. 5.** Mertieite and atheneite in the ores of the Chudnoe deposit.

а – mertieite in intergrowth with gold of homogeneous structure and the mineral  $Pd_6BiSe$ , which is completely replaced by oxides-hydroxides Pd; б – mertieite in intergrowth with gold of a homogeneous structure; secondary high-grade gold develops in the form of spots; в – idiomorphic mertieite crystals in gold; г – atheneite in intergrowth with isomertieite/pseudomertieite in association with gold, which has a very fine exsolution texture. Au – gold, Au II – secondary high-grade gold, Met – mertieite, Ism – isomertieite/pseudomertieite, Ah – atheneite, Pd-O – palladium oxides, Qz – quartz, Ab – albite, Ms – muscovite, Cr-Ms – fuchsite, Aln – allanite, Cal – calcite. Polished sections: а-в – 21-101-103, г – 1417, д – 23-70-71. Reflected light.

Таким образом, в отдельных участках руд установлено образование мертиита путем замещения изомертиита/псевдомертиита. Золото образует субграфические сростания с новообразованным мертиитом, что указывает на его участие в процессе замещения. Следует упомянуть, что в некоторых пробах, например в пр. 21-101-103, присутствуют как мертиит (см. рис. 5), так и изомертиит/псевдомертиит (см. табл. 1, 2), но совместных сростаний они не образуют.

В рудной зоне Людной при преобладающей роли мертиита среди палладиевых минералов мелкие зерна изомертиита/псевдомертиита изредка от-

мечаются в виде включений в золоте, в единичном случае в сростании с идиоморфным кристалликом мертиита (см. рис. 6д).

**Атенеит** отмечается в сростании с изомертиитом/псевдомертиитом и умеренно медистым золотом, имеющим структуру распада твердого раствора. Размер выделений атенеита 8–15 мкм, форма изометричная или удлиненная. Минерал изотропный, но в одном из зерен атенеит отчетливо анизотропен (см. рис. 5д). Состав атенеита по основным элементам довольно устойчив, но анизотропная разновидность минерала (пр. 23-70-71) отличается наиболее высоким содержанием As и

Таблица 2. Состав мертиита месторождения Чудное, мас. %

Table 2. Composition of mertieite of the Chudnoe deposit, wt %

Скважина, канава	Номер пробы	n	Pd	Cu	Au	Ag	Sb	As	Сумма	Формула на 11 атомов
Рудная зона Славная										
C-21	61-63	12	67.61	2.18	–	–	27.48	3.02	100.29	Me <sub>7,88</sub> Sb <sub>2,65</sub> As <sub>0,47</sub>
	101-103	5	70.61	0.17	–	–	26.16	3.51	100.45	Me <sub>7,90</sub> Sb <sub>2,55</sub> As <sub>0,55</sub>
C-24	134-137	7	68.75	1.21	–	0.49	25.86	3.69	100.00	Me <sub>7,91</sub> Sb <sub>2,51</sub> As <sub>0,58</sub>
C-26	91-97	1	70.78	–	–	–	25.29	4.17	100.24	Me <sub>7,88</sub> Sb <sub>2,46</sub> As <sub>0,66</sub>
7102	710201	1	71.16	–	–	–	26.02	3.48	100.66	Me <sub>7,92</sub> Sb <sub>2,53</sub> As <sub>0,55</sub>
C-116	194-203	5	70.92	0.08	–	–	26.26	3.42	100.68	Me <sub>7,91</sub> Sb <sub>2,55</sub> As <sub>0,54</sub>
Рудная зона Лидер										
C-36	113-115	1	68.94	1.67	–	–	26.39	3.62	100.62	Me <sub>7,90</sub> Sb <sub>2,54</sub> As <sub>0,56</sub>
C-38	96-99	2	67.42	2.50	–	–	26.93	3.36	100.21	Me <sub>7,88</sub> Sb <sub>2,59</sub> As <sub>0,53</sub>
K-406	046	2	70.27	0.65	–	–	26.65	3.24	100.81	Me <sub>7,91</sub> Sb <sub>2,58</sub> As <sub>0,51</sub>
Рудная зона Людная										
K-14	1417	10	69.41	0.55	–	0.62	26.44	3.26	100.28	Me <sub>7,91</sub> Sb <sub>2,57</sub> As <sub>0,52</sub>
	1501	5	68.67	0.57	–	1.35	26.39	3.17	100.15	Me <sub>7,92</sub> Sb <sub>2,58</sub> As <sub>0,50</sub>
C-33	130-135	4	67.89	2.23	–	–	26.66	3.49	100.27	Me <sub>7,89</sub> Sb <sub>2,56</sub> As <sub>0,55</sub>
C-34	50-62	4	69.77	0.62	–	–	27.08	3.04	100.51	Me <sub>7,88</sub> Sb <sub>2,64</sub> As <sub>0,48</sub>
Среднее		59	69.06	1.08	–	0.28	26.59	3.32	100.33	Me <sub>7,90</sub> Sb <sub>2,58</sub> As <sub>0,52</sub>

Примечание. Пояснения – см. табл. 1.

Note. Explanations – see Table 1.

минимальным Hg (табл. 3). Формула атенеита, по современным данным,  $Pd_2(As_{0.75}Hg_{0.25})$ , определение кристаллической структуры атенеита показало, что атомы Hg приурочены не к позиции Pd, а занимают в структуре одно из положений As (Vindī, 2010).

Помимо арсеноантимонидов палладия и атенеита, в рудах изредка встречаются мелкие зерна арсенида палладия. В пр. 38-96-99 в золоте гомогенного строения отмечены включения арсенида палладия размером до 2 мкм в сростании со столь же мелкими включениями мертиита. Состав минерала, мас. %: Pd – 41.0, As – 49.4, Te – 1.0, Au – 6.8 (захват матрицы). Наличие неидентифицированного арсенида палладия уже отмечалось ранее (Гарбаев и др., 1996).

Минералы системы Pd–Bi–Se представлены падмаитом PdBiSe, неназванными минералами Pd<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>2</sub> и Pd<sub>6</sub>BiSe (Онищенко и др., 2022). Висмутоселениды палладия встречаются в отдельных участках рудной зоны Славной в сростании с золотом, состав которого ограничен узкими рамками. Это наиболее высокопробное (Au 88.1–91.1 мас. %) золото гомогенного строения с относительно невысокими содержаниями Ag (7.5–11.1), Cu (до 1.6) и Pd (до 1.2 мас. %). Минералы системы Pd–Bi–Se встречаются вместе с изомертиитом/псевдомертиитом или мертиитом.

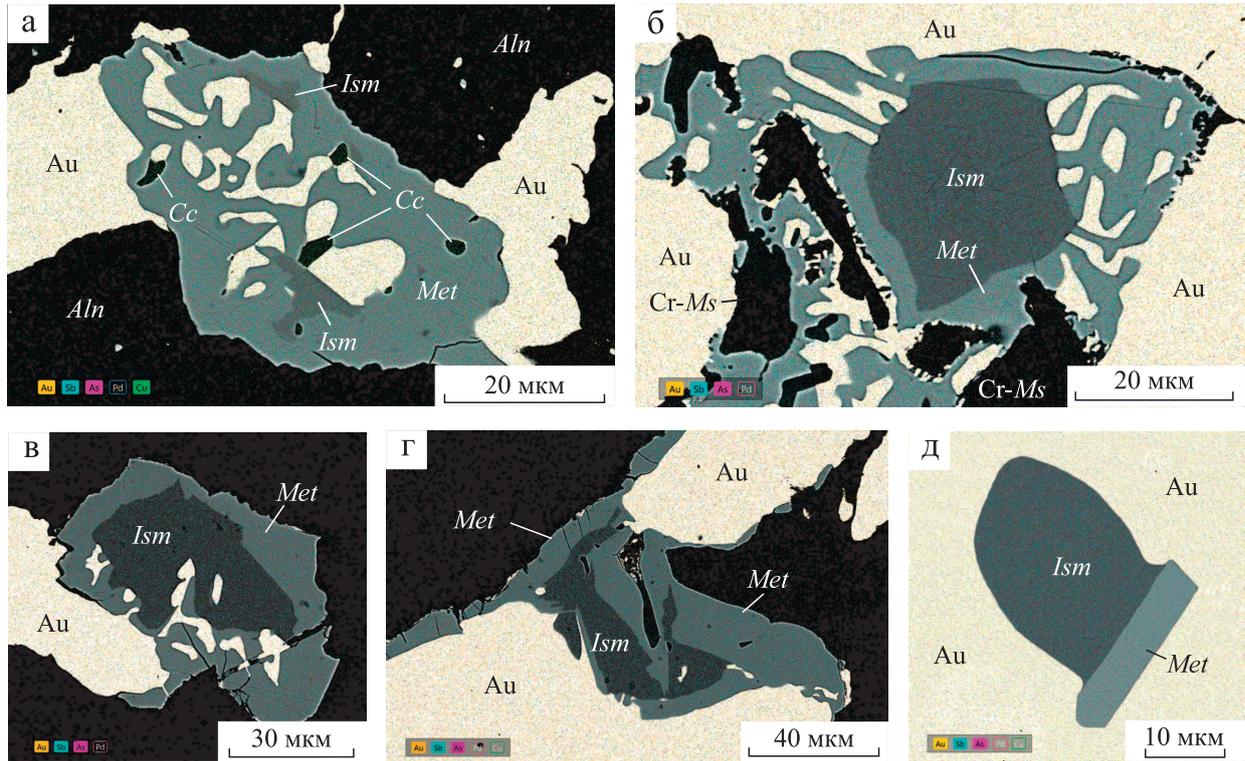
**Падмаит** отмечен в виде включения в самородном золоте, которое находится в сростании с аль-

битом, мертиитом и минералом Pd<sub>6</sub>BiSe. Размер выделения падмаита 15 мкм; состав, мас. %: Pd – 28.43, Bi – 52.81, Se – 19.35, сумма – 100.59, формула Pd<sub>1.05</sub>Bi<sub>0.99</sub>Se<sub>0.96</sub>.

**Неназванный минерал Pd<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>2</sub>** обнаружен в виде включения размером 10 мкм в самородном золоте; состав, мас. %: Pd – 36.66, Bi – 45.41, Se – 15.93, Te – 0.60, U – 1.22, сумма – 99.82, формула Pd<sub>3.12</sub>Bi<sub>1.97</sub>Se<sub>1.83</sub>Te<sub>0.04</sub>U<sub>0.04</sub>.

**Неназванный минерал Pd<sub>6</sub>BiSe** является наиболее распространенным среди висмутоселенидов палладия, образует выделения размером от 3 до 60 мкм. Характеризуется высокой степенью однородности и постоянством состава (мас. %, среднее по 13 анализам): Pd – 69.50, Bi – 22.60, Se – 8.19, сумма – 100.29, формула Pd<sub>6,04</sub>Bi<sub>1,00</sub>Se<sub>0,96</sub> (Онищенко и др., 2022). Минерал Pd<sub>6</sub>BiSe всегда в значительной степени замещается вторичными минералами (рис. 7).

На рис. 7а неназванный минерал Pd<sub>6</sub>BiSe замещается Pd–Bi–Se оксидами, состав которых отличается от исходной фазы значительной потерей Pd и Se при относительно высоком содержании Bi, мас. %: Pd – 51.3, Bi – 19.6, Se – 4.3, Si – 0.5, O – 14.9. С внешней стороны в виде прерывистых полос развивается Pd–Bi оксиды-гидроксиды, в которых содержание Pd сохраняется примерно на прежнем уровне, содержание Bi значительно падает, Se не обнаружен, но присутствует Mn, Y и лантаноиды, мас. %: Pd – 50.0, Bi – 8.9, Mn – 1.7, Y – 2.3, La – 0.9, Ce – 0.3, Nd – 1.1, Si – 0.6, O – 17.7. Далее,



**Рис. 6.** Взаимоотношения мертиита, изомертиита/псевдомертиита и золота. Многослойные (интегральные) изображения в характеристическом излучении Au, Sb, As и Cu.

*Ism* – изомертиит/псевдомертиит, *Met* – мертиит, *Au* – золото, *Cc* – халькозин-дигенит, *Cr-Ms* – фуксит, *Aln* – алланит. Полированные шлифы: а, в, г – 21-61-63, б – 24-134-137, д – 1501.

**Fig. 6.** The relationship of mertieite, isomertieite/pseudomertieite and gold. Multilayer (integral) images in the characteristic radiation of Au, Sb, As and Cu.

*Ism* – isomertieite/pseudomertieite, *Met* – mertieite, *Au* – gold, *Cc* – chalcocite-digenite, *Cr-Ms* – fuchsite, *Aln* – allanite. Polished sections: а, в, г – 21-61-63, б – 24-134-137, д – 1501.

**Таблица 3.** Состав атенеита месторождения Чудное, мас. %

**Table 3.** Composition of the atheneite of the Chudnoe deposit, wt %

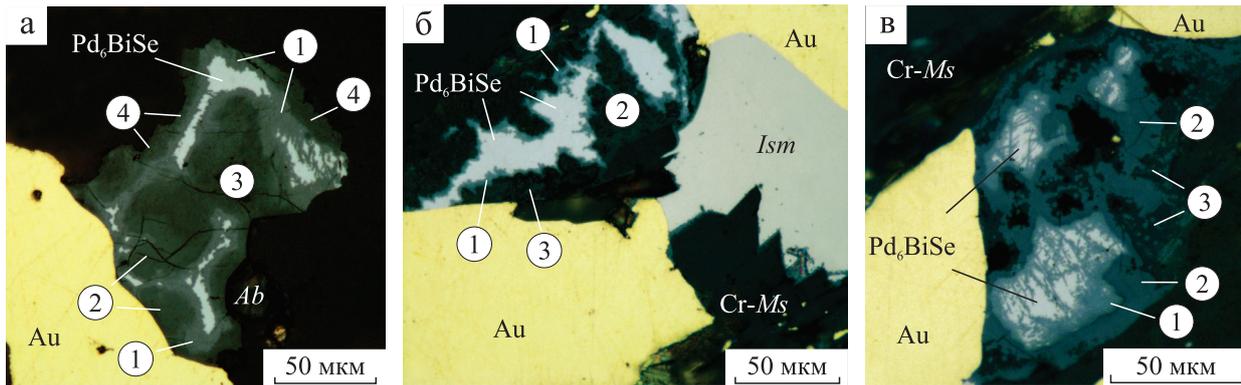
Скважина	Номер пробы	Pd	Cu	Ag	As	Sb	Hg	Сумма	Формула
C-23	51-52	65.81	–	–	16.96	–	13.87	96.64	$Pd_{2.03}As_{0.74}Hg_{0.23}$
	51-52	66.92	–	1.32	17.78	–	13.86	99.88	$Pd_{1.99}Ag_{0.04}As_{0.75}Hg_{0.22}$
	51-52	67.78	0.51	–	18.27	–	13.71	100.27	$Pd_{2.00}Cu_{0.03}As_{0.76}Hg_{0.21}$
	63-68	68.09	–	–	18.00	–	13.62	99.71	$Pd_{2.02}As_{0.76}Hg_{0.22}$
	63-68	67.44	–	–	18.19	–	13.56	99.19	$Pd_{2.01}As_{0.77}Hg_{0.22}$
	70-71	69.75	0.59	–	19.82	–	10.10	100.26	$Pd_{2.01}Cu_{0.03}As_{0.81}Hg_{0.15}$
C-24	89-92	67.03	–	–	17.25	1.28	13.77	99.33	$Pd_{2.01}As_{0.74}Sb_{0.03}Hg_{0.22}$
	97-99	67.11	–	–	16.08	3.12	12.95	99.26	$Pd_{2.02}As_{0.69}Sb_{0.08}Hg_{0.21}$

Примечание. Пояснения – см. табл. 1. Содержание Au во всех анализах ниже предела обнаружения.

Note. Explanations – see Table 1. The Au content in all analyses is below the detection limit.

преимущественно в центральной части выделения, развивается Pd-Bi-Y оксиды-гидроксиды, мас. %:

Pd – 7.3, Bi – 44.2, Y – 6.8, La – 0.5, Nd – 1.0, Sm – 1.1, Gd – 2.1, Dy – 2.4, Er – 1.1, Yb – 0.8, U – 1.6,



**Рис. 7.** Незванный минерал  $Pd_6BiSe$  в рудах месторождения Чудное.

а – минерал  $Pd_6BiSe$  замещается Pd-Bi-Se оксидом (1), Pd-Bi оксидом-гидроксидом (2) и Pd-Bi-Y оксид-гидроксидом (3); внешняя кайма сложена Bi-Y оксид-гидроксидом (4); б – минерал  $Pd_6BiSe$  в виде узкой каймы замещается Pd-оксидом (1) и окружается агрегатом силикатов и арсенофосфатов Y и Ce (2), а также Bi-содержащими гидроксидами Mn (3); изомертит/псевдомертит вторичными минералами практически не замещается; в – минерал  $Pd_6BiSe$  замещается гетерогенными минеральными агрегатами зонального строения: Pd-Bi оксидом (1) и Pd-Bi-Ce оксидом (2) и окаймляется агрегатами силикатов и арсенофосфатов Y и Ce (3) (см. рис. 8). Au – золото, Cr-Ms – фуксит. Полированные шлифы: а, б – 21103, в – 24-134-137. Отраженный свет.

**Fig. 7.** Unnamed  $Pd_6BiSe$  mineral in the ores of the Chudnoe deposit.

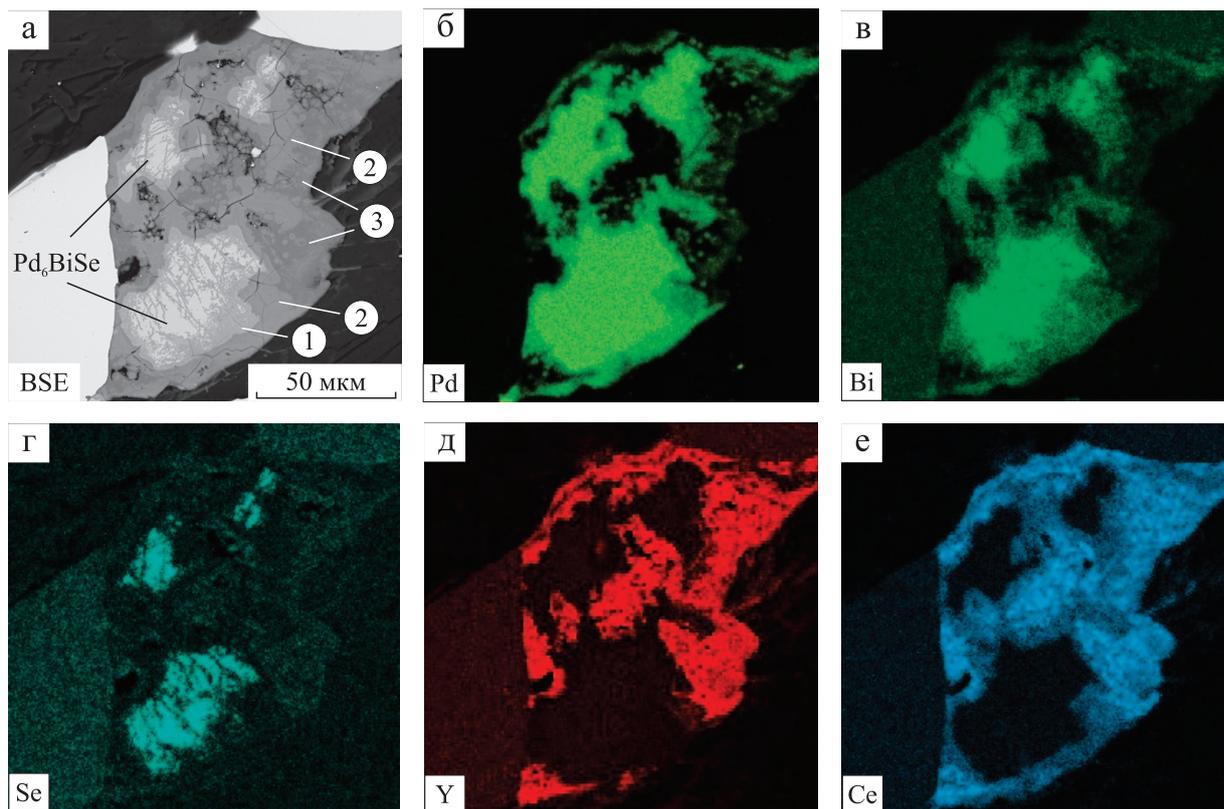
а – mineral  $Pd_6BiSe$  is replaced by Pd-Bi-Se oxide (1), Pd-Bi oxide-hydroxide (2) and Pd-Bi-Y oxide-hydroxide (3). The outer rim is composed of Bi-Y oxide-hydroxide (4); б – mineral  $Pd_6BiSe$  in the form of a narrow border is replaced by Pd-oxide (1) and is surrounded by an aggregate of silicates and arsenophosphates Y and Ce (2), as well as Bi-containing hydroxides Mn (3). Isomertite/pseudomertite is practically not replaced by secondary minerals; в – mineral  $Pd_6BiSe$  is replaced by heterogeneous mineral aggregates of zonal structure: Pd-Bi oxide (1) and Pd-Bi-Ce oxide (2) and is bordered by aggregates of silicates and arsenophosphates Y and Ce (3) (see the Fig. 8). Au – gold, Cr-Ms – fuchsite. Polished sections: а, б – 21103, в – 24-134-137. Reflected light.

Si – 0.7, Ca – 0.9, O – 17.4. Внешняя кайма сложена Bi-Y оксидами-гидроксидами, не содержащими Pd, мас. %: Bi – 49.8, Y – 7.4, La – 0.4, Nd – 1.1, Sm – 1.2, Gd – 2.5, Dy – 2.6, Er – 1.2, Yb – 0.5, U – 1.6, Si – 0.6, Ca – 0.8, O – 16.93.

На рис. 7б незванный минерал  $Pd_6BiSe$  находится в сростании с золотом гомогенного строения, изомертитом/псевдомертитом и фукситом, содержащим 5.5–8.2 мас. %  $Cr_2O_3$ . Минерал  $Pd_6BiSe$  в виде узкой каймы замещается оксидами Pd, содержащими небольшую примесь Bi и Cu, мас. %: Pd – 62.5, Bi – 4.7, Cu – 3.5, Mn – 1.7, Ce – 3.7, U – 1.7, Si – 0.4, As – 0.4, O – 15.0. Выделения Pd-минералов окружены агрегатом силикатов и арсенофосфатов Y и Ce, мас. %: Pd – 2.3, Bi – 1.3, Mn – 0.3, Y – 14.7, Ce – 24.1, Gd – 1.0, Dy – 2.1, Ho – 0.2, Er – 1.4, Yb – 1.2, U – 2.4, Si – 4.8, P – 4.0, As – 5.4, Ca – 0.6, O – 26.7, а также Bi-содержащими гидроксидами Mn, мас. %: Bi – 16.9, Mn – 22.1, Ba – 2.5, Sb – 1.2, Ce – 4.5, Si – 0.8, Ca – 0.5, O – 18.5. Обращает на себя внимание, что изомертит/псевдомертит, находящийся в сростании с золотом и минералом  $Pd_6BiSe$ , вторичными минералами практически не замещается.

Одно из выделений незванного минерала  $Pd_6BiSe$  изучено более детально (рис. 7в, 8). Минерал в сростании с золотом гомогенного строения находится в фукситовом (5.8–8.3 мас. %  $Cr_2O_3$ ) про-

жилке и в значительной степени замещен вторичными минеральными агрегатами зонального строения: Pd-Bi и Pd-Bi-Ce оксидами, которые окружены широкой каймой силикатов и арсенофосфатов Y и Ce. В составе Pd-Bi оксидов, замещающих незванный минерал  $Pd_6BiSe$ , сохраняется высокое содержание Pd, значительно уменьшается содержание Bi, а Se не обнаружен, мас. %: Pd – 68.1, Bi – 8.1, Cu – 2.5, Mn – 1.0, Si – 0.3, O – 14.4. Яркая однородная область распределения Pd охватывает минерал  $Pd_6BiSe$  и прилегающую к ней площадку Pd-Bi оксидов (см. рис. 8б). В Pd-Bi-Ce оксидах, распространение которых лучше всего прослеживается по умеренному содержанию Pd (см. рис. 8б), уменьшается содержание Pd и появляется значительное количество церия, мас. %: Pd – 46.4, Bi – 8.9, Ce – 12.2, Cu – 2.0, Mn – 2.3, Si – 1.3, Fe – 0.7, As – 0.6, P – 0.3, O – 13.7. Кайма силикатов и арсенофосфатов Y и Ce колломорфного строения, проявляющаяся в характеристическом излучении этих элементов (см. рис. 8д, е), характеризуется незначительными содержаниями Pd и Bi, мас. %: Ce – 21.0, Y – 17.2, P – 5.7, As – 3.6, Si – 4.5, Gd – 1.9, Dy – 2.4, Er – 1.5, Yb – 1.0, U – 2.3, Ca – 0.5, Pd – 1.3, Bi – 1.5, O – 26.3. Область распространения силикатов и арсенофосфатов Y и Ce в лучшем случае отражает картина распределения Y, потому что некоторая часть Ce входит в предыдущую зону Pd-Bi-Ce оксидов.



**Рис. 8.** Преобразования неназванного минерала Pd<sub>6</sub>BiSe.

Минерал Pd<sub>6</sub>BiSe замещается гетерогенным минеральным агрегатом зонального строения: Pd-Bi оксидами (1) и Pd-Bi-Ce оксидами (2) и окаймляется агрегатами силикатов и арсенофосфатов Y и Ce (3). Изображения в отраженных электронах (а) и характеристическом излучении Pd, Bi, Se, Y и Ce (б–е). Полированный шлиф 24-134-137.

**Fig. 8.** Transformations of the unnamed Pd<sub>6</sub>BiSe mineral.

The Pd<sub>6</sub>BiSe mineral is replaced by a heterogeneous mineral aggregate of zonal structure: Pd-Bi oxides (1) and Pd-Bi-Ce oxides (2) and is bordered by aggregates of silicates and arsenophosphates Y and Ce (3). Images in reflected electrons (a) and characteristic radiation Pd, Bi, Se, Y and Ce (б–е). Polished section 24-134-137.

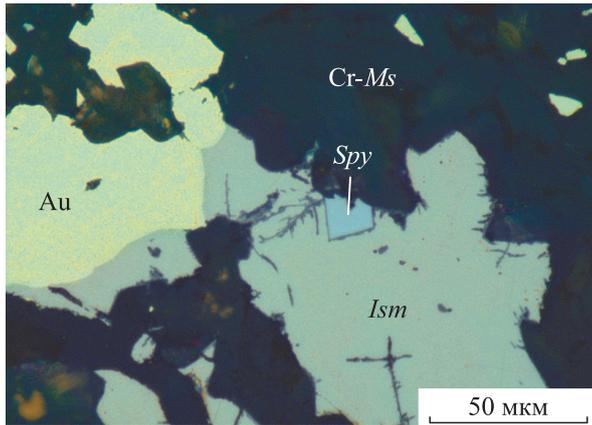
Отмечены и другие варианты замещения неназванного минерала Pd<sub>6</sub>BiSe (Онищенко и др., 2022). В одном из них минерал Pd<sub>6</sub>BiSe замещается оксидами Pd в виде каймы и окружается широкой полосой гидроксидов Mn. Состав оксидов Pd весьма специфичен, от исходного минерала отличаются полным отсутствием Se и значительной потерей Bi при высоком содержании Ce, мас. %: Pd – 48.28, Bi – 5.41, Ce – 8.87, Mn – 4.61, Cu – 3.37, Si – 0.71, P – 0.29, O – 16.2. Высокое содержание церия при очень незначительном количестве фосфора и кремния позволяет предполагать, что он присутствует в форме четырехвалентного оксида или карбоната. Гидроксиды Mn не содержат ни Pd, ни Se, но присутствует Bi и, кроме того, Ce и Ba, мас. %: Mn – 39.89, Bi – 6.93, Ba – 6.09, Ce – 3.04, Ca – 1.1, O – 14.9.

В другом случае минерал Pd<sub>6</sub>BiSe замещается неоднородной массой Pd-Bi-Se-оксидов, которые окружены тонкой каймой оксидов Pd, а промежу-

ток между ними и самородным золотом выполнен Y-Са карбонатом.

**Минералы системы Pd–Bi–Te** в незначительном количестве отмечены в скв. 38 (инт. 96–99 м) в сростании с золотом гомогенного строения, мас. %: Au – 86.3–87.8, Ag – 12.7–13.5, Pd – до 1.0, Cu – до 0.8. Единичное включение в золоте размером 10 мкм содержит, мас. %: Pd – 36.63, Bi – 50.47, Te – 10.15, Sb – 3.2 (формула Pd<sub>1.00</sub>Bi<sub>0.70</sub>Te<sub>0.23</sub>Sb<sub>0.07</sub>), и соответствует **соболевскиту**. Теллуриовисмутиды палладия образуют также редкие выделения размером до 30 мкм, замещаемые оксидами палладия. Ассоциирующие минералы представлены альбитом, калиевым полевым шпатом, кварцем, титанитом и U-Ti минералом.

**Самородный палладий** обнаружен в рудной зоне Людная в виде выделений длиной 15–20 мкм, выполняющих интерстиции между зернами мелкозернистого прозрачного кварца в алланит-альбит-кварцевом прожилке (Борисов, 2005). Самородный



**Рис. 9.** Сперриллит в рудах месторождения Чудное.

*Ism* – изомертиит/псевдомертиит, *Cr-Ms* – фуксит, *Spy* – сперриллит. Полированный шлиф K-409. Отраженный свет.

**Fig. 9.** Sperrylite in the ores of the Chudnoe deposit.

*Ism* – isomertite/pseudomertite, *Cr-Ms* – fuchsite, *Spy* – sperrylite. Polished section K-409. Reflected light.

палладий представлен практически чистым Pd, в качестве примеси зафиксировано до 0.34 мас. % Cu.

Схожий характер локализации имеет неидентифицированный минерал **Pd-Ag-S**, отмеченный в альбит-кварцевом прожилке в виде натечных межзерновых образований в кварцевом агрегате, состав минерала (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 (Онищенко и др., 2024). Образование самородного палладия и минерала Pd-Ag-S отражает, вероятно, наиболее поздний эпизод благороднометалльной минерализации на месторождении.

**Сперриллит** изредка встречается в рудных зонах Славная и Лидер в виде мелких (5–15 мкм) кристалликов в сростаниях с самородным золотом, изомер-

тиитом/псевдомертиитом и фукситом (рис. 9). Золото в сростаниях со сперриллитом имеет гомогенное строение или решетчатое строение, обусловленное распадом твердого раствора. Состав сперриллита близок к теоретической формуле  $PtAs_2$  (табл. 4).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о тесной ассоциации минералов платиновой группы с самородным золотом. При этом их разнообразие в значительной мере взаимосвязано с особенностями состава золота и нахождением в пределах различных рудных зон. В частности, изомертиит/псевдомертиит образует сростания с золотом любого состава и строения, а мертиит встречается только с относительно маломедистым золотом гомогенного строения.

В мощной толще руд центральной части зоны Славная (см. рис. 1, 3) самородное золото в основном содержит 3–4 мас. % меди, что вызывает двухфазный, изредка трехфазный распад твердого раствора. Палладиевые минералы в этой части рудной зоны представлены изомертиитом/псевдомертиитом и в подчиненном количестве атенеитом. Золото в нижней части рудной зоны, а также на северо-восточном и юго-западном ее флангах значительно менее медистое (до 1.4 мас. % Cu), чем и обусловлено его гомогенное строение. Среди палладиевых минералов распространены изомертиит/псевдомертиит, мертиит и неназванный минерал  $Pd_6BiSe$ , причем в этих частях рудной зоны отмечено замещение изомертиита/псевдомертиита мертиитом, что может быть объяснено локальными увеличением отношения  $Sb/As$  в рудообразующем растворе.

В рудной зоне Лидер, самородное золото в которой отличается разнообразием состава и строения, преобладающим палладиевым минералом является изомертиит/псевдомертиит. В зоне Люд-

**Таблица 4.** Состав сперрилита месторождения Чудное, мас. %

**Table 4.** Composition of sperrylite of the Chudnoe deposit, wt %

Скважина, канава	Номер пробы	Pt	Cu	Pb	As	Se	Сумма	Формула
K-181	11236	57.37	–	–	42.57	–	99.94	$Pt_{1.02}As_{1.98}$
C-21	101-103	56.18	–	–	42.25	2.06	100.49	$Pt_{0.98}As_{1.93}Se_{0.09}$
C-23	51-52	56.04	–	–	42.40	1.70	100.14	$Pt_{0.99}As_{1.94}Se_{0.07}$
	51-52	55.19	–	1.74	42.37	–	99.30	$Pt_{0.99}Pb_{0.03}As_{1.98}$
C-24	93-94	56.44	0.57	–	42.98	–	99.99	$Pt_{1.00}Cu_{0.03}As_{1.97}$
C-31	222-227	57.72	0.66	–	42.18	–	100.56	$Pt_{1.02}Cu_{0.04}As_{1.94}$
K-409	K-409	57.21	–	–	42.52	–	99.73	$Pt_{1.02}As_{1.98}$
	K-409	56.80	–	–	43.17	–	99.97	$Pt_{1.01}As_{1.99}$

Примечание. Пояснения – см. табл. 1.

Note. Explanations – see Table 1.

ной распространено серебристое золото гомогенного строения, основные вариации его состава заключаются в изменениях соотношения между Au и Ag, а содержание Cu не превышает 0.5 мас. %. Доминирующим палладиевым минералом является мертиит. Обращает на себя внимание, что на юго-западном фланге рудной зоны Лидер с серебристым золотом, содержащим 28.1–32.7 мас. % Ag и не более 0.4 мас. % Cu, ассоциирует исключительно изомертиит/псевдомертиит.

Срастания золота с палладиевыми минералами обычно не имеют признаков, указывающих на их возрастные соотношения, но нарастание изомертиита/псевдомертиита, реже мертиита на частицы золота свидетельствует о некотором запаздывании в отложении палладиевых минералов относительно золота. В то же время в арсеноантимидах палладия присутствуют включения самородного золота, поглощенные, видимо, их растущими зернами. Кроме того, отмечаются пересечения зерен изомертиита/псевдомертиита тонкими прожилками фуксита, содержащими мелкие частицы золота. Замещение изомертиита/псевдомертиита мертиитом с образованием субграфических золотомертиитовых срастаний указывает на участие золота в процессе этих преобразований. В целом наблюдения свидетельствуют о том, что формирование фуксита, золота и минералов палладия происходило в некотором временном интервале в ходе единого процесса. Об этом же свидетельствует эпизодическое присутствие примеси Au в изомертиите/псевдомертиите.

Рудообразующие флюиды содержали хром, золото, палладий, серебро, ртуть, платину и другие элементы, из которых отлагались фуксит, самородное золото, палладиевые минералы, принадлежащие к системам Pd–Sb–As, Pd–Bi–Se, Pd–Bi–Te, атенеит и сперрилит. Образование самородного золота и сопутствующих минералов происходило в условиях низкой активности сульфид-иона, что создавало возможность для вхождения меди в самородное золото (Murzin et al., 2018) и отчасти в минералы палладия. Это заключение подтверждается характером рудной минерализации в андезитах (C-116) на продолжении по падению руд в риолитах. В сульфидсодержащих андезитах самородное золото, формирующееся в поле устойчивости пирита, в качестве примеси содержит только серебро, а медь и палладий не обнаружены. В этих условиях медь заключена в халькопирите, примесь меди в арсеноантимидах палладия незначительна, а некоторая часть палладия фиксируется в арсеносульфиде – Pd-содержащем кобальтине.

Ассоциация хрома, палладия, платины и золота свидетельствует, по нашему мнению, о едином глубинном источнике этих элементов, в качестве которого наиболее вероятны производные базит-гипербазитового магматизма. Наиболее важным

обстоятельством, оказывающим влияние на генетические представления, является неопределенность, связанная с наличием в рудах хромсодержащих минералов. Как показано в ряде работ, высокохромистый фуксит формируется только в непосредственной близости от ультрабазитов (Сазонов и др., 2001). Между тем наличие пород ультраосновного или близкого состава в районе месторождения не установлено.

Из месторождений, имеющих черты сходства с месторождением Чудное, хромсодержащие минералы распространены в слюдястых метасоматитах уран-ванадиевого месторождения Средняя Падма в Южной Карелии, сопровождающихся Au-Pd минерализацией. Основным носителем хрома является хромселадит (Пеков и др., 2000), минералы металлов платиновой группы представлены висмутидами, сульфоселенидами, селеносульфидами палладия, падмаитом PdBiSe, мальшевитом PdBiCuS<sub>3</sub>, судовиковитом PtSe<sub>2</sub> (Полеховский и др., 1991а, б, 1997; Черников и др., 2006), присутствует также самородное золото и фаза Au-Ag-Cu-Pd (Кулешевич, Голубев, 2012). Наличие в рудах элементов платиновой группы, V, Ti, Cr, Co, Cu указывает на то, что интенсивным преобразованиям под действием щелочных флюидов подвергались породы базит-гипербазитового ряда и шунгиты, содержащие эти элементы (Кулешевич, Голубев, 2012).

В ряде месторождений распространена прожилковая Au-Pd минерализация с незначительным развитием сульфидных минералов, сходная с наблюдаемой на месторождении Чудное. На месторождении Бурако ду Оро (Бразилия) самородное золото ассоциирует с калунгаитом PdAsSe, изомертиитом Pd<sub>11</sub>Sb<sub>2</sub>As<sub>2</sub>, мертиитом Pd<sub>8</sub>Sb<sub>2.5</sub>As<sub>0.5</sub>, сперрилитом и падмаитом (Menez, Botelho, 2017).

На месторождении Блейда Фар Вест (Анти-Атлас, Марокко) в ассоциации с самородным золотом (в том числе Pd-содержащим) выявлены изомертиит/псевдомертиит Pd<sub>11</sub>Sb<sub>2</sub>As<sub>2</sub>, кейтконнит Pd<sub>3-x</sub>Te, палладсеит Pd<sub>17</sub>Se<sub>15</sub>, меренскийит PdTe<sub>2</sub>, меренскийит-мончеит (Pd,Pt)(Te,Bi)<sub>2</sub>, котульскийит PdTe и сперрилит (El Ghorfi et al., 2006), позднее обнаружены мертиит Pd<sub>8</sub>Sb<sub>2.5</sub>As<sub>0.5</sub>, остербошит (Pd,Cu)<sub>7</sub>Se<sub>5</sub>, падмаит и фазы PdSe, Pd<sub>2</sub>BiSe, Pd<sub>3</sub>BiSe, Pd<sub>4</sub>BiSe, Pd<sub>5</sub>BiSe (Калинин и др., 2022).

На месторождении Серра-Пелада (Бразилия) в виде включений или в срастании с самородным золотом, в том числе палладистым, находятся минерал Pd<sub>3</sub>As, атенеит, изомертиит, судовиковит, палладсеит, а также фазы Pd-Pt-Se, Pd-Se, Pd-Hg-Se и Pd-Bi-Se (Cabral et al., 2002). Последняя фаза имеет состав Pd<sub>2.976</sub>Au<sub>0.084</sub>Pt<sub>0.008</sub>Se<sub>0.439</sub>Bi<sub>0.492</sub>, что соответствует неназванному минералу Pd<sub>6</sub>BiSe, присутствующему в рудах месторождения Чудное.

Во всех палладиевых минералах месторождения Чудное фиксируются эпигенетические изменения, имеющие окислительный характер. В арсе-

ноантимонидах палладия эти процессы проявлены слабо, но минерал  $Pd_6BiSe$  всегда в той или иной степени замещается оксидами палладия и висмута зонального строения, во внешних зонах в составе минеральных агрегатов преобладают оксиды-гидроксиды  $Y$ ,  $Se$  и  $Mn$ , иногда силикаты и арсенофосфаты  $Y$  и  $Se$ . В свою очередь, новообразованные агрегаты минералов  $Y$ ,  $Se$  и  $Mn$  обычно содержат некоторое количество  $Pd$  и  $Bi$ , причем содержания последнего иногда бывают довольно высокими. Следует отметить, что в рудах месторождения Чудное, помимо замещения палладиевых минералов оксидами  $Pd$ , наблюдается замещение первичного самородного золота вторичным высокопробным золотом, но эти процессы, видимо, не являются взаимосвязанными.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Минералы палладия и платины месторождения Чудное находятся в сростании с самородным золотом и локализованы преимущественно в прожилках хромсодержащего мусковита (фуксита), выполняющих многочисленные трещины в риолитах. Прожилки обычно согласные с региональной сланцеватостью пород и простиранием крупных разрывных нарушений. Формирование золотофукситовых прожилков связано с гидротермальными процессами, проявившимися, вероятнее всего, в послеордовикское время. Ассоциация хрома, палладия, платины и золота свидетельствует о едином глубинном источнике этих элементов, в качестве которого наиболее вероятны производные базит-гипербазитового магматизма. Образование самородного золота и сопутствующих минералов происходило в условиях низкой активности сульфид-иона, что создавало возможность для вхождения меди в самородное золото и отчасти в минералы палладия.

Палладиевые минералы в рудах месторождения по составу относятся к системам  $Pd-Sb-As$  (изомертиит/псевдомертиит, мертиит, атенит),  $Pd-Bi-Se$  (падмаит, неназванные минералы  $Pd_6BiSe$  и  $Pd_3Bi_2Se_2$ ),  $Pd-Bi-Te$  (соболевскит), отмечается самородный палладий. Платиновый минерал представлен сперрилитом. Наиболее распространенными минералами палладия в рудах месторождения Чудное являются изомертиит/псевдомертиит и мертиит. Изомертиит/псевдомертиит образует сростания с золотом любого состава и строения, а мертиит встречается только с относительно маломедистым золотом гомогенного строения. Для значительных участков рудных зон характерно наличие одного из арсеноантимонидов палладия. В отдельных участках руд отмечено замещение изомертиита/псевдомертиита мертиитом, что может быть обусловлено локально проявленным увеличением отношения  $Sb/As$  в рудоносном растворе в процессе минералообразования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аникина Е.В., Алексеев А.В. (2010) Минералого-геохимическая характеристика золото-палладиевого оруденения в Волковском габбро-диоритовом массиве (Платиноносный пояс Урала). *Литосфера*, (5), 75-100.
- Билибина Т.В., Мельников Е.К., Савицкий А.В. (1991) О новом типе месторождений комплексных руд в Южной Карелии. *Геология рудн. месторождений*, **33**(6), 3-14.
- Борисов А.В. (2005) Геолого-генетические особенности  $Au-Pd-REE$  рудопроявлений хребта Малдыньрд (Приполярный Урал). Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 27 с.
- Галанкина О.Л., Гавриленко В.В., Гайдамако И.М. (1998) Новые данные о минералогии гидротермального золото-платиноидного оруденения Приполярного Урала. *Зан. ВМО*, (3), 72-78.
- Калинин Ю.А., Боровиков А.А., Маача Л., Zuhair M., Пальянова Г.А., Житова Л.М. (2022)  $Au-Pd$  минерализация и рудообразующие флюиды месторождения Блейда Фар Вест (Анти-Атлас, Марокко). *Литосфера*, **22**(5), 644-666. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-5-644-666>
- Калустов С.В., Ефанова Л.И. (2013) Золоторудное месторождение Чудное на этапе подготовки к промышленному освоению. *Горн. журн.*, (9), 42-44.
- Кузнецов С.К., Андреичев В.Л. (1998) Возраст золотофукситовой минерализации в риолитах хребта Малдыньрд. *Золото, платина и алмазы Республики Коми и сопредельных регионов*. Мат-лы Всерос. конф. Сыктывкар, 18-19.
- Кузнецов С.К., Майорова Т.П., Шайбеков Р.И., Сокерина Н.В., Филиппов В.Н. (2014) Минеральный состав и условия формирования золото-платино-палладиевых проявлений севера Урала и Пай-Хоя. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*, **S3-1**, 81-85.
- Кузнецов С.К., Онищенко С.А. (2018) Золотоносность локальных участков метасоматического изменения риолитов месторождения Чудное (Приполярный Урал). *Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН*, (12), 39-45. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2018-12-39-45>
- Кулешевич Л.В., Голубев А.И. (2012) Благородные металлы в щелочных метасоматитах Средней Падмы, Карелия. *Руды и металлы*, (1), 17-25.
- Моралев Г.В., Борисов А.В., Суренков С.В., Тарбаев М.Б., Пономарчук В.А. (2005) Первые  $^{39}Ar/^{40}Ar$  датировки слюд  $Au-Pd-P3Э$  проявления Чудное (Приполярный Урал). *Докл. АН*, **400**(2), 243-246.
- Мурзин В.В., Пальянова Г.А., Аникина Е.В., Молошаг В.П. (2021) Минералогия благородных металлов ( $Au, Ag, Pd, Pt$ ) Волковского  $Cu-Fe-Ti-V$  месторождения (Средний Урал). *Литосфера*, **21**(5), 643-659. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-643-659>
- Онищенко С.А., Кузнецов С.К. (2019) Палладий-золотосульфидная минерализация в андезитах на месторождении Чудное (Приполярный Урал). *Вестн. Ин-та геол. Коми НЦ УрО РАН*, (6), 20-27. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-6-20-27>
- Онищенко С.А., Кузнецов С.К. (2022) Распад твердого раствора в системе  $Au-Ag-Cu$  в богатой золотом области. *Геохимия*, **67**(7), 639-654. <https://doi.org/10.31857/S0016752522060061>

- Онищенко С.А., Кузнецов С.К. (2023) Самородное золото Au-Pd месторождения Чудное (Приполярный Урал, Россия). *Геология и геофизика*, **64**(2), 233-254. <https://doi.org/10.15372/GiG2022122>
- Онищенко С.А., Кузнецов С.К., Тропников Е.М. (2022) Минеральные фазы системы Pd-Bi-Se в рудах Au-Pd-месторождения Чудное (Приполярный Урал, Россия). *Докл. РАН. Науки о Земле*, **504**(1), 41-45. <https://doi.org/10.31857/S2686739722050115>
- Онищенко С.А., Онищенко Л.В., Ефанова Л.И., Артева Т.А. (2014) Золоторудное месторождение Чудное на Приполярном Урале. *Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России*. Матлы XVI съезда Республики Коми. Т. III. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 172-175.
- Онищенко С.А., Сокина Н.В., Кузнецов С.К., Исаенко С.И., Тропников Е.М. (2024) Стадийность формирования кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилков на Au-Pd-месторождении Чудное (Приполярный Урал). *Вестн. геонаук*. **349**(1), 4-15. <https://doi.org/10.19110/geov.2024.1.1>
- Пеков И.В., Чуканов Н.В., Румянцева Е.В., Кабалов Ю.К., Шнайдер Ю., Леденева Н.В. (2000) Хромселадонит  $KCrMg[Si_4O_{10}](OH)_2$  – новый минерал из группы слюд. *Зан. ВМО*, **129**(1), 38-44.
- Полеховский Ю.С., Волошин А.В., Тарасова И.П., Никитин С.А., Пахомовский Я.А., Меньшиков Ю.П., Крецер Ю.Л., Колычева Т.И. (1991а) Падмаит  $PdBiSe$  – новый селенид палладия и висмута из метасоматитов южной Карелии. *Зан. ВМО*, (3), 85-88.
- Полеховский Ю.С., Волошин А.В., Тарасова И.П., Пахомовский Я.А., Крецер Ю.Л. (1991б) Новый тип палладийсодержащей минерализации в метасоматитах Карелии. *Изв. АН СССР. Сер. геол.*, (7), 86-95.
- Полеховский Ю.С., Тарасова И.П., Нестеров А.Р., Пахомовский Я.А., Бахчисарайцев А.Ю. (1997) Судовиковит  $PtSe_2$  – новый селенид платины из метасоматитов Южной Карелии. *Докл. АН*, **354**(1), 82-85.
- Пыстин А.М., Потапов И.Л., Пыстина Ю.И., Генералов В.И., Онищенко С.А., Филиппов В.Н., Шлома А.А., Терешко В.В. (2011) Малосульфидное платинометаллическое оруденение на Полярном Урале. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 150 с.
- Рудашевский Н.С., Рудашевский В.Н., Ниелсен Т.Ф.Д. (2015) Интерметаллиды и сплавы меди и палладия в золото-палладиевых рудах Скаергардского массива (Гренландия). *Зан. РМО*, **144**(1), 30-53.
- Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А. (2001) Месторождения золота Урала. Екатеринбург: УГГА, 622 с.
- Спирidonov Э.М., Кулагов Э.А., Куликова И.М. (2004) Ассоциация минералов палладия, платины и золота в рудах Норильского месторождения. *Геология рудн. месторождений*, **46**(2), 175-192.
- Спирidonov Э.М., Кулагов Э.А., Серова А.А., Куликова И.М., Коротаяева Н.Н., Середа Е.В., Тушенцова И.Н., Беляков С.Н., Жуков Н.Н. (2015) Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в Норильских сульфидных рудах. *Геология рудн. месторождений*, **57**(5), 445-476. <https://doi.org/10.7868/S0016777015050068>
- Тарбаев М.Б., Кузнецов С.К., Моралев Г.В., Соболева А.А., Лапутина И.П. (1996) Новый золото-палладиевый тип минерализации в Кожимском районе Приполярного Урала (Россия). *Геология рудн. месторождений*, **38**(1), 15-30.
- Черников А.А., Чистякова Н.И., Уваркина О.М., Дубинчук В.Г., Рассулов В.А., Полеховский Ю.С. (2006) Малышевит  $PdBiCuS_3$  – новый минерал из месторождения Средняя Падма в Южной Карелии. *Новые данные о минералах*, (41), 14-17.
- Шумилов И.Х., Осташенко Б.А. (2000) Минералогические особенности Au-Pd-TR оруденения на Приполярном Урале. Сыктывкар: Геопринт, 104 с.
- Bindi L. (2010) Atheneite,  $[Pd_2][As_{0.75}Hg_{0.25}]$ , from Itabira, Minas Gerais, Brazil: Crystal structure and revision of the chemical formula. *Canad. Miner.*, **48**, 1149-1155. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.5.1149>
- Cabral A.R., Lehmann B., Kwitko-Ribeiro R., Cravo Costa C.H. (2002) Palladium and Platinum Minerals from the Serra Pelada Au-Pd-Pt Deposit, Carajas Mineral Province, Northern Brazil. *Canad. Miner.*, **40**(5), 1451-1463.
- Cabri L.J. (2002) The Platinum-Group Minerals. In *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements*. (Ed. L.J. Cabri). Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Spec. V. 54, 13-129.
- El Ghorfi M., Oberthur T., Melcher F., Luders V., El Boukhari A., Maacha L., Ziadi R., Baoutoul H. (2006) Gold-palladium mineralization at Bleida Far West, Bou Azzer-El Graara Inlier, Anti-Atlas, Morocco. *Miner. Depos.*, **41**, 549-564. <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0077-3>
- Karimova O.V., Grokhovskaya T.L., Zolotarev A.A., Gurchiy V.V. (2016) Crystal structure refinements of isomertieite,  $Pd_{11}Sb_2As_2$ , and tornroosite,  $Pd_{11}As_7Te_2$ . *Canad. Miner.*, **54**, 511-517. <https://doi.org/10.3749/canmin.1500039>
- Karimova O.V., Mezhueva A.A., Zgurskiy N.A., Zolotarev A.A., Chareev D.A. (2022) The crystal structure of  $Pd_8As_3$ , a synthetic analogue of stillwaterite. *Miner. Mag.*, **86**(3), 492-499. <https://doi.org/10.1180/mgm.2022.57>
- Karimova O.V., Zolotarev A.A., Evstigneeva T.L., Johanson B.S. (2018) Mertieite-II,  $Pd_8Sb_{2.5}As_{0.5}$ , crystal-structure refinement and formula revision. *Miner. Mag.*, **82**, 247-257. <https://doi.org/10.1180/minmag.2017.081.052>
- Karimova O.V., Zolotarev A.A., Johanson B.S., Evstigneeva T.L. (2020) The crystal structure of arsenopalladinite,  $Pd_8As_{2.5}Sb_{0.5}$ , and its relation to mertieite-II,  $Pd_8Sb_{2.5}As_{0.5}$ . *Miner. Mag.*, **84**, 746-752. <https://doi.org/10.1180/mgm.2020.65>
- Menez J., Botelho N.F. (2017) Ore characterization and textural relationships among gold, selenides, platinum-group minerals and uraninite at the granite-related Buraco do Ouro gold mine, Cavalcante, Central Brazil. *Miner. Mag.*, **81**(3), 463-475. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.101>
- Miyawaki R., Hatert F., Pasero M., Mills S.J. (2022) CNMNC Newsletter 69. *Eur. J. Mineral.*, **34**, 463-468. <https://doi.org/10.5194/ejm-34-463-2022>
- Murzin V.V., Chudnenko K.V., Palyanova G.A., Varlamov D.A., Naumov E.A., Pirajno F. (2018) Physico-chemical model for the genesis of Cu-Ag-Au-Hg solid solutions and intermetallics in the rodingites of the Zolotaya Gora gold deposit (Urals, Russia). *Ore Geol. Rev.*, **93**, 81-97. <https://doi.org/10.1016/j.oregeo>

- rev.2017.12.018
- Murzin V., Palyanova G., Mayorova T., Beliaeva T. (2022) The Gold-Palladium Ozernoe Occurrence (Polar Urals, Russia): Mineralogy, Conditions of Formation, Sources of Ore Matter and Fluid. *Minerals*, **12**, 765. <https://doi.org/10.3390/min12060765>
- Nielsen T.F.D., Keiding J.K., Andersen J.C.Ø., Holness M.B., Keiding J.K., Rudashevsky N.S., Rudashevsky V.N., Salmonsens L.P., Tegner C., Veksler I.V. (2015) The Skaergaard PGE and gold deposit: The result of in situ fractionation, sulphide saturation, and magma chamber-scale precious metal redistribution by immiscible Fe-rich melt. *J. Petrol.*, **56**(8), 1643-1676. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egv049>
- Olivo G.R., Gauthier M., Bardoux M., Leao de Sa E., Fonseca J.T.F., Santana F.C. (1995) Palladium-bearing gold deposit hosted by Proterozoic lake superior-type iron-formation at the Caue iron mine, Itabira District, southern Sao Francisco Craton, Brazil: Geologic and structural controls. *Econ. Geol.*, **90**, 118-134. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.1.118>
- Olivo G.R., Gauthier M., Williams-Jones A.E., Levesque M. (2001) The Au-Pd mineralization at the Conceição iron mine, Itabira District, southern Sao Francisco Craton, Brazil: An example of a jacutinga-type deposit. *Econ. Geol.*, **96**, 61-74. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.1.61>
- Orth K., Meffre S., Davidson G. (2014) Age and paragenesis of mineralisation at Coronation Hill uranium deposit, Northern Territory, Australia. *Miner. Depos.*, **49**(5), 595-623. <https://doi.org/10.1007/s00126-013-0501-4>
- Palyanova G., Murzin V., Borovikov A., Karmanov N., Kuznetsov S. (2021) Native Gold in the Chudnoe Au-Pd-REE Deposit (Subpolar Urals, Russia): Composition, Minerals in Intergrowth and Genesis. *Minerals*, **11**, 451. <https://doi.org/10.3390/min11050451>
- Şener A.K., Grainger C.J., Groves D.I. (2002) Epigenetic gold-platinum-group element deposits: examples from Brazil and Australia. *Trans. Inst. Mining Metall.*, **111**(1), 65-73. <http://dx.doi.org/10.1179/aes.2002.111.1.65>
- Sluzhenikin S.F., Mokhov A.V. (2015) Gold and silver in PGE-Cu-Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia. *Miner. Depos.*, **50**(4), 465-492. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0543-2>
- ta C.H. (2002) Palladium and Platinum Minerals from the Serra Pelada Au-Pd-Pt Deposit, Carajas Mineral Province, Northern Brazil. *Canad. Miner.*, **40**(5), 1451-1463.
- Cabri L.J. (2002) The Platinum-Group Minerals. In *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements.* (Ed. L.J. Cabri). Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Spec. V. 54, 13-129.
- Chernikov A.A., Chistyakova N.I., Uvarkina O.M., Dubinchuk V.G., Rassulov V.A., Polekhovskiy Yu.S. (2006) Malyshevite PdBiCuS<sub>3</sub> – a new mineral from the Srednaya Padma deposit in South Karelia. *New Data Miner.*, **41**, 14-17. (In Russ.)
- El Ghorfi M., Oberthur T., Melcher F., Luders V., El Boukharri A., Maacha L., Ziadi R., Baoutoul H. (2006) Gold-palladium mineralization at Bleida Far West, Bou Azzer-El Graara Inlier, Anti-Atlas, Morocco. *Miner. Depos.*, **41**, 549-564. <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0077-3>
- Galankina O.L., Gavrilenko V.V., Gaidamako I.M. (1998) New data on mineralogy of the hydrothermal gold-PGE mineralization at the Polar Urals. *Zapiski VMO*, (3), 72-78. (In Russ.)
- Kalinin Yu.A., Borovikov A.A., Maacha L., Zuhair M., Palyanova G.A., Zhitova L.M. (2022) Au-Pd mineralization and ore-forming fluids of the Bleida Far West deposit (Anti-Atlas, Morocco). *Lithosphere (Russia)*, **22**(5), 644-666. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-5-644-666>
- Kalustov S.V., Efanova L.I. (2013) The Chudnoe gold deposit at the stage of preparation for commercial exploration. *Gornyi Zhurnal*, (9), 42-44. (In Russ.)
- Karimova O.V., Grokhovskaya T.L., Zolotarev A.A., Gurchiy V.V. (2016) Crystal structure refinements of isomertieite, Pd<sub>11</sub>Sb<sub>2</sub>As<sub>2</sub>, and tornroosite, Pd<sub>11</sub>As<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>. *Canad. Miner.*, **54**, 511-517. <https://doi.org/10.3749/canmin.1500039>
- Karimova O.V., Mezhueva A.A., Zgurskiy N.A., Zolotarev A.A., Chareev D.A. (2022) The crystal structure of Pd<sub>8</sub>As<sub>3</sub>, a synthetic analogue of stillwaterite. *Miner. Mag.*, **86**(3), 492-499. <https://doi.org/10.1180/mgm.2022.57>
- Karimova O.V., Zolotarev A.A., Evstigneeva T.L., Johanson B.S. (2018) Mertieite-II, Pd<sub>8</sub>Sb<sub>2.5</sub>As<sub>0.5</sub>, crystal-structure refinement and formula revision. *Miner. Mag.*, **82**, 247-257. <https://doi.org/10.1180/minmag.2017.081.052>
- Karimova O.V., Zolotarev A.A., Johanson B.S., Evstigneeva T.L. (2020) The crystal structure of arsenopalladinite, Pd<sub>8</sub>As<sub>2.5</sub>Sb<sub>0.5</sub>, and its relation to mertieite-II, Pd<sub>8</sub>Sb<sub>2.5</sub>As<sub>0.5</sub>. *Miner. Mag.*, **84**, 746-752. <https://doi.org/10.1180/mgm.2020.65>
- Kuznetsov S.K., Andreichev V.L. (1998) The age of gold-fuchsite mineralization in rhyolites of the Maldynyrd Ridge. *Gold, Platinum, and Diamonds of the Komi Republic and Adjacent Regions.* Proceedings of the All-Russian Conference. Syktyvkar, 18-19. (In Russ.)
- Kuznetsov S.K., Maiorova T.P., Shaibekov R.I., Sokerina N.V., Filippov V.N. (2014) Mineral composition and conditions for the formation of gold-platinum-palladium occurrences in the north of the Urals and Pai-Khoi. *Geologiya i Mineral'nye Resursy Sibiri*, **S3-1**, 81-85. (In Russ.)
- Kuznetsov S.K., Onishchenko S.A. (2018) Gold content of local areas of metasomatic alteration of rhyolites of the Chudnoe deposit (Subpolar Urals). *Vestnik IG Ko-*

## REFERENCES

Anikina E.V., Alekseev A.V. (2010) Mineral-geochemical characteristic of gold-palladium mineralization in the Volkov gabbro massif (Platiniferous Urals Belt). *Lithosphere (Russia)*, (5), 75-100. (In Russ.)

Bilibina T.V., Mel'nikov E.K., Savitskii A.V. (1991) A new type of deposits of composite ores in southern Karelia. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **33**(6), 3-14. (In Russ.)

Bindi L. (2010) Atheneite, [Pd<sub>2</sub>][As<sub>0.75</sub>Hg<sub>0.25</sub>], from Itabira, Minas Gerais, Brazil: Crystal structure and revision of the chemical formula. *Canad. Miner.*, **48**, 1149-1155. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.5.1149>

Borisov A.V. (2005) Geological and genetic features of the Au-Pd-REE ore occurrences of the Maldynyrd ridge (Subpolar Urals). Cand. geol. and min. sci. diss. Moscow, 27 p. (In Russ.)

Cabral A.R., Lehmann B., Kwitko-Ribeiro R., Cravo Cos-

- mi NTs UrO RAN*, (12), 39-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2018-12-39-45>
- Kuleshevich L.V., Golubev A.I. (2012) Noble metals in alkaline metasomatites at Srednyia Padma, Karelia. *Rudy i Metally*, (1), 17-25. (In Russ.)
- Menez J., Botelho N.F. (2017) Ore characterization and textural relationships among gold, selenides, platinum-group minerals and uraninite at the granite-related Buraco do Ouro gold mine, Cavalcante, Central Brazil. *Miner. Mag.*, **81**(3), 463-475. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.101>
- Miyawaki R., Hatert F., Pasero M., Mills S.J. (2022) CNMNC Newsletter 69. *Eur. J. Mineral.*, **34**, 463-468. <https://doi.org/10.5194/ejm-34-463-2022>
- Moralev G.V., Borisov A.V., Surenkov S.V., Tarbaev M.B., Ponomarchuk V.A. (2005). First <sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar datings on micas from the Chudnoe Au-Pd-REE occurrence, Near-Polar Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **400**(2), 109-112 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **400**(2), 243-246).
- Murzin V.V., Chudnenko K.V., Palyanova G.A., Varlamov D.A., Naumov E.A., Pirajno F. (2018) Physico-chemical model for the genesis of Cu-Ag-Au-Hg solid solutions and intermetallics in the rodingites of the Zolotaya Gora gold deposit (Urals, Russia). *Ore Geol. Rev.*, **93**, 81-97. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.018>
- Murzin V.V., Palyanova G.A., Anikina E.V., Moloshag V.P. (2021) Mineralogy of noble metals (Au, Ag, Pd, Pt) in Volkovskoe Cu-Fe-Ti-V deposit (Middle Urals, Russia). *Lithosphere (Russia)*, **21**(5), 643-659. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-643-659>
- Murzin V., Palyanova G., Mayorova T., Beliaeva T. (2022) The Gold-Palladium Ozernoe Occurrence (Polar Urals, Russia): Mineralogy, Conditions of Formation, Sources of Ore Matter and Fluid. *Minerals*, **12**, 765. <https://doi.org/10.3390/min12060765>
- Nielsen T.F.D., Keiding J.K., Andersen J.C.Ø., Holness M.B., Keiding J.K., Rudashevsky N.S., Rudashevsky V.N., Salmonsén L.P., Tegner C., Veksler I.V. (2015) The Skaergaard PGE and gold deposit: The result of in situ fractionation, sulphide saturation, and magma chamber-scale precious metal redistribution by immiscible Fe-rich melt. *J. Petrol.*, **56**(8), 1643-1676. <https://doi.org/10.1093/petrology/egv049>
- Olivo G.R., Gauthier M., Bardoux M., Leao de Sa E., Fonseca J.T.F., Santana F.C. (1995) Palladium-bearing gold deposit hosted by Proterozoic lake superior-type iron formation at the Caue iron mine, Itabira District, southern Sao Francisco Craton, Brazil: Ggeologic and structural controls. *Econ. Geol.*, **90**, 118-134. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.1.118>
- Olivo G.R., Gauthier M., Williams-Jones A.E., Levesque M. (2001) The Au-Pd mineralization at the Conceição iron mine, Itabira District, southern Sao Francisco Craton, Brazil: An example of a jacutinga-type deposit. *Econ. Geol.*, **96**, 61-74. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.1.61>
- Onishchenko S.A., Kuznetsov S.K. (2022) Exsolution in the Au-Ag-Cu System in a Gold-Rich Area. *Geochem. Int.*, **60**(7), 657-671 (translated from *Geochimiya*, **67**(7), 639-654). <https://doi.org/10.1134/S0016702922060064>
- Onishchenko S.A., Kuznetsov S.K. (2023) Native Gold of the Chudnoe Gold-Palladium Deposit (Subpolar Urals, Russia). *Russ. Geol. Geophys.*, **64**(2), 192-209 (translated from *Geologiya i Geofizika*, **64**(2), 233-254). <https://doi.org/10.2113/RGG20214452>
- Onishchenko S.A., Kuznetsov S.K. (2019) Palladium-gold-sulphide mineralization in andesites at Chudnoe deposit (Subpolar Urals). *Vestnik IG Komi NTs UrO RAN*, (6), 20-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-6-20-27>
- Onishchenko S.A., Kuznetsov S.K., Tropnikov E.M. (2022) Mineral Phases of the Pd-Bi-Se System in the Ores at the Chudnoe Au-Pd Deposit (Subpolar Urals, Russia). *Dokl. Earth Sci.*, **504**(1), 266-270 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **504**(1), 41-45). <https://doi.org/10.1134/S1028334X22050117>
- Onishchenko S.A., Onishchenko L.V., Efanova L.I., Arteva T.A. (2014) The Chudnoe gold deposit in the Subpolar Urals. *Geology and Mineral Resources of the European Northeastern Russia*. Proceedings of the 16th Komi Republic Meeting. V. 3. Syktyvkar, IG Komi NTs UrO RAN Publ., 172-175. (In Russ.)
- Onishchenko S.A., Sokerina N.V., Kuznetsov S.K., Isaenko S.I., Tropnikov E.M. (2024) Stages of formation of quartz-albite-allanite-fuchsite veins at the Chudnoe Au-Pd deposit (Subpolar Urals). *Vestnik of Geosciences* **349**(1), 4-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.19110/geov.2024.1.1>
- Orth K., Meffre S., Davidson G. (2014) Age and paragenesis of mineralisation at Coronation Hill uranium deposit, Northern Territory, Australia. *Miner. Depos.*, **49**(5), 595-623. <https://doi.org/10.1007/s00126-013-0501-4>
- Palyanova G., Murzin V., Borovikov A., Karmanov N., Kuznetsov S. (2021) Native Gold in the Chudnoe Au-Pd-REE Deposit (Subpolar Urals, Russia): Composition, Minerals in Intergrowth and Genesis. *Minerals*, **11**, 451. <https://doi.org/10.3390/min11050451>
- Pekov I.V., Chukanov N.V., Rumiantseva E.V., Kaba-lov Yu.K., Schneider Yu., Ledeneva N.V. (2000) Chrom-celadonite KCrMg[Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>](OH)<sub>2</sub> – a new mineral of the mica group. *Zapiski VMO*, **129**(1), 38-44. (In Russ.)
- Polekhovskii Yu.S., Tarasova I.P., Nesterov A.R., Pakhomovskiy Ya.A., Bakhchisaraitsev A.Yu. (1997) Sudovikovite PtSe<sub>2</sub> – a new platinum selenide from Karelia metasomite. *Dokl. Akad. Nauk*, **354**(1), 82-85. (In Russ.)
- Polekhovskii Yu.S., Voloshin A.V., Tarasova I.P., Nikitin S.A., Pakhomovskii Ya.A., Men'shikov Yu.P., Kretser Yu.L., Kolycheva T.I. (1991a) Padmaite PdBiSe – a new selenide of palladium and bismuth from metasomatites of South Karelia. *Zapiski VMO*, (3), 85-88. (In Russ.)
- Polekhovskii Yu.S., Voloshin A.V., Tarasova I.P., Pakhomovskii Ya.A., Kretser Yu.L. (1991b) A new type of palladium-containing mineralization in Karelian metasomatites. *Izv. AN SSSR. Ser. Geol.*, (7), 86-95. (In Russ.)
- Pystin A.M., Potapov I.L., Pystina Yu.I., Generalov V.I., Onishchenko S.A., Filippov V.N., Shloma A.A., Tereshko V.V. (2011) Low-sulfide platinum-metal mineralization in the Polar Urals. Ekaterinburg, UrO RAN, 150 p. (In Russ.)
- Rudashevsky N.S., Rudashevsky V.N., Nielsen T.F.D. (2015) Intermetallic compounds, copper-palladium alloys in the Au-Pd ores of the Skaergaard pluton, Greenland. *Geol. Ore Depos.*, **57**(8), 674-690 (translated from *Zapiski RMO*, **144**(1), 30-53). <https://doi.org/10.1134/S1075701515080085>

- Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Pole-  
nov Yu.A. (2001) Gold Deposits of the Urals. Ekaterin-  
burg, UGGGA, 622 p. (In Russ.)
- Şener A.K., Grainger C.J., Groves D.I. (2002) Epigenetic  
gold-platinum-group element deposits: examples from  
Brazil and Australia. *Trans. Inst. Mining Metall.*, **111**(1),  
65-73. <http://dx.doi.org/10.1179/aes.2002.111.1.65>
- Shumilov I.Kh., Ostashchenko B.A. (2000) Mineral and  
technological features of Au-Pd-TR mineralization in  
the Subpolar Urals. Syktyvkar, Geoprint Publ., 104 p. (In  
Russ.)
- Sluzhenikin S.F., Mokhov A.V. (2015) Gold and silver in  
PGE-Cu-Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Rus-  
sia. *Miner. Dep.*, **50**(4), 465-492. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0543-2>
- Spiridonov E.M., Kulagov E.A., Kulikova I.M. (2004) Pal-  
ladium, platinum, and gold mineral assemblages in ores  
of the Noril'sk deposit. *Geol. Ore Depos.*, **46**(2), 150-166  
(translated from *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **46**(2), 175-  
192).
- Spiridonov E.M., Serova A.A., Korotaeva N.N., Zhu-  
kov N.N., Kulagov E.A., Belyakov S.N., Kulikova I.M.,  
Sereda E.V., Tushentsova I.N. (2015) Genetic Pd, Pt,  
Au, Ag and Rh mineralogy in Noril'sk sulfide ores. *Geol.  
Ore Depos.*, **57**(5), 402-432 (translated from *Geol. Rudn.  
Mestorozhd.*, **57**(5), 445-476). <https://doi.org/10.1134/S1075701515050062>
- Tarbaev M.B., Kuznetsov S.K., Moralev G.V., Sobole-  
va A.A., Laputina I.P. (1996) A new gold-palladium type  
of mineralization in the Kozhim region of the Circumpo-  
lar Urals (Russia). *Geol. Ore Depos.*, **38**(1), 11-25 (trans-  
lated from *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **38**(1), 15-30).