

УДК 549.334+553.41

НОВЫЙ ТИП ЗОЛОТОНОСНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ОЗЕРНОВСКОМ Au–Te–Se ЭПИТЕРМАЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ КАМЧАТКА, РОССИЯ)

© 2024 г. Ш. С. Кудяева^{1,*}, В. В. Козлов^{2,**}, Е. Д. Скильская¹, А. В. Сергеева¹,
Н. Д. Толстых³, И. А. Шкилев⁴

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бул. Пийпа 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер. 35, Москва, 119017 Россия

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

⁴АО “Сибирский горно-металлургический альянс”, ул. Мишенная 106,
Петропавловск-Камчатский, 683016 Россия

*E-mail: kudiaeva.sharapat@gmail.com

**E-mail: v.kozlov@oxinst.ru

Поступила в редакцию 15.12.2023 г.

После переработки 16.04.2024 г.

Принята к печати 26.04.2024 г.

Руды Озерновского Au–Te–Se эпитеpмального вулканогенного месторождения располагаются в линейных зонах вторичных кварцитов в вулканических породах неогенового возраста и представлены линейными штокверками и трубками кварцевых гидротермальных брекчий с вкрапленностью рудных минералов — сульфидов, теллуридов и селенидов. На верхнем горизонте месторождения обнаружена и изучена золотоносная минерализация нового типа. Основным минералом золота в ней является малетойваямит ($\text{Au}_3\text{Se}_4\text{Te}_6$), образующий мелкие включения в селенистом самородном теллуре совместно с микровключениями других, обычно тоже очень редких, минералов — бамболлаита ($\text{Cu}_{1-x}(\text{Se}, \text{S}, \text{Te})_2$), блеклых руд подгрупп голдфилдита и усталечита. Этот минеральный комплекс мог образоваться в верхней части кипящей гидротермальной системы в результате смешения восходящего потока гетерогенного водно-парового флюида с обогащенными кислородом приповерхностными водами и окисления содержащихся в нем восстановленных форм серы, селена и теллура. Первичный комплекс рудных минералов обычно частично замещен несколькими генерациями гипергенных минералов: от самородного селена и Au–Ag–селенидов ранней стадии до теллуридов и селенидов поздней стадии окисления.

Ключевые слова: малетойваямит, бамболлаит, усталечит, арсеноусталечит, стибноусталечит, селенистый теллур, Озерновское вулканогенное золоторудное месторождение, Камчатка.

DOI: 10.31857/S0016777024050056, **EDN:** ablhwl

ВВЕДЕНИЕ

Активные геологоразведочные работы на месторождениях северной и центральной Камчатки предоставили возможность детального минералогического изучения ранее известных и новых участков с золотым оруденением. В процессе таких исследований были найдены новые минералы золота и селена: малетойваямит $\text{Au}_3\text{Se}_4\text{Te}_6$, толстыхит $\text{Au}_3\text{S}_4\text{Te}_6$, ауроселенид AuSe , гачингит $\text{Au}(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)$ (месторождение Малетойваям); светланаит SnSe , округинит Cu_2SnSe_3 (месторождение Озерновское), что значительно расширило

наши представления о минералогии этих месторождений (Tolstykh et al., 2020; Okrugin et al., 2020; Tolstykh et al., 2022; Tolstykh et al., 2023; Kasatkin et al., 2023; Vymazalova et al., 2024).

Авторами статьи были изучены образцы верхних горизонтов жильной зоны БАМ Озерновского месторождения, характеризующие новую и необычную минеральную ассоциацию Au–Te–Se руд месторождения. В качестве одного из важнейших минералов золота обнаружен малетойваямит, который находится в парагенезисе с селенистым теллуrom и рядом других редких

минералов, включая бамболлаит и недавно зарегистрированные Комиссией по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации (КНМ ММА) минералы из группы тетраэдрита — арсеноусталечит и стибиоусталечит. За исключением малетойваямита, остальные из перечисленных минералов ранее не были известны на территории России. На основе полученных данных обсуждаются возможные условия происхождения минералов, определяющие специфику минералообразования на Озерновском золоторудном месторождении. Вторая и, возможно, не последняя находка необычного селено-теллурида золота — малетойваямита — в рудах камчатских месторождений позволит использовать его в качестве индикатора определенных физико-химических условий рудоотложения на месторождениях Курило-Камчатской островной дуги.

КРАТКОЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

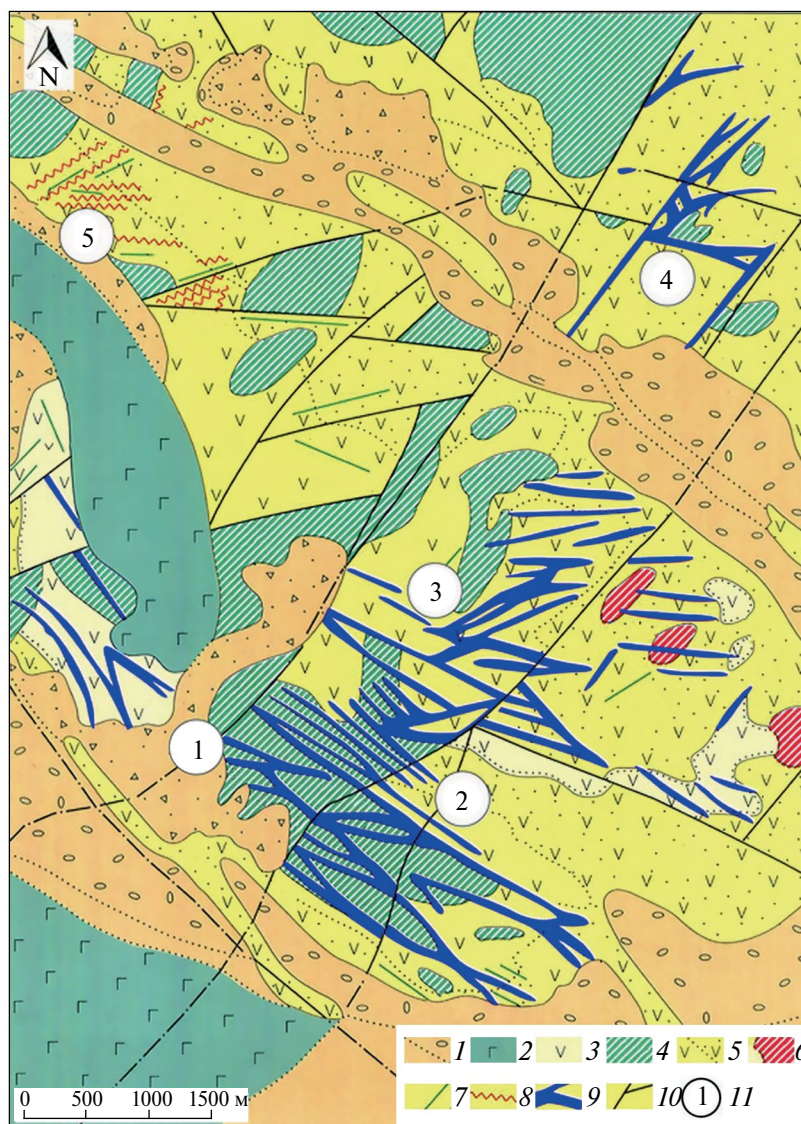
Озерновское золоторудное месторождение принадлежит к эпитермальным месторождениям кислотно-сульфатного/высокосульфидизированного (КС/ВС) типа. Оно расположено в пределах Северо-Камчатского рудного района в 700 км к северу от г. Петропавловска-Камчатского и приурочено к Правоукинской вулканотектонической структуре (ВТС) длительного развития. ВТС располагается в междуречье Правая Ука — Левая Озерная, имеет эллипсовидную форму размером 25×15 км и вытянута в северо-западном направлении (Петренко, 1999; Демин, 2015). По минеральному составу руд месторождение отнесено к золото-сильванит-голдфилдитовому подтипу теллуридного типа золото-серебряной формации, характеризующемуся преобладанием золота над серебром (отношение Au к Ag от 1 до 4) (Щепотьев и др., 1989; Петренко, 1999) с содержаниями до 200 г/т Au, 188 г/т Ag, 450 г/т Bi, 1143 г/т Te and 1280 г/т Se (Литвинов и др., 1999).

В геологическом строении района участвуют дорудные неогеновые вулканогенно-осадочные и вулканогенные образования, послерудные четвертичные потоки лавы и современные аллювиальные отложения. Вмещающими породами являются неогеновые андезиты с горизонтами агломератовых туфов среднего и основного состава, а также эффузивные образования и их туфы умеренно кислого состава (Петренко, 1999). В рудном поле выделяются участки БАМ, Промежуточный, Хомут, сложенные крутопадающими линейными зонами вторичных кварцитов, вмещающих

основное золотое оруденение КС/ВС типа, а также участок Каюрковский, представленный сериями жил адуляр-кварцевого состава, которые, по имеющимся данным, можно отнести к адуляр-серцитовому/низкосульфидизированному типу (АС/НС). Наиболее значимое оруденение локализовано в нескольких рудных телах на участке БАМ и заключено внутри зон сильно измененных пород — вторичных кварцитов и аргиллизитов. Остальные участки менее значимы либо пока хуже изучены.

По данным И.Д. Петренко (1999), продуктивная часть зоны БАМ протяженностью 1200 м полностью располагается в пределах крупного силлообразного субвулканического тела андезибазальтов, мощность которого достигает 300 м. Юго-восточная часть протяженностью более 1800 м располагается в эффузивно-пирокластических образованиях Правоукинского палеовулкана и туфах и туфопесчаниках его фундамента, высокие содержания золота здесь выделяются эпизодически. Северо-западный фланг зоны, локализованный в пределах субвулканического тела, отличается наиболее полным набором фаций метасоматитов. Вертикальный размах оруденения определяется подошвой сила, т. е. составляет примерно 300 м.

Рудные тела контролируются разрывными нарушениями северо-западного и северо-восточного простирания и включают как жилы выполнения, так и участки минерализованных брекчий и штокверков с нечеткими границами, рудные тела в которых выявляются только по данным опробования. Жилы выполнения характеризуются четкими контактами, но обычно также обладают брекчиевой текстурой (фиг. 1). Широкое распространение брекчий, а также трубообразная форма отдельных рудных тел говорят о том, что в формировании продуктивной минерализации ведущая роль принадлежала явлениям гидротермального взрыва (Петренко, 1999). Вторичные кварциты представлены несколькими фациями: монокварцевой, кварц-алунитовой, каолинит-диксит-кварцевой, диаспор-кварц-пиррофилитовой и монтмориллонит-хлорит-кварцевой (Наумова, 1996; Петренко, 1999; Литвинов и др., 1999; Трухачев, 2008, 2011). Во внутренних зонах вторичных кварцитов нами обнаружены, помимо алунита, и другие сульфатные и сульфат-фосфатные минералы — вудхаузеит, сванбергит, крандаллит, флоренсит. Основным рудным минералом метасоматитов является пирит, образующий рассеянную вкрапленность. Состав минеральных ассоциаций метасоматитов указывает на кислый и ультракислый характер формировавших их минералообразующих флюидов.



Фиг. 1. Схематическая геологическая карта Озерновского месторождения (по Литвинову и др., 1999): 1 — четвертичные рыхлые аллювиальные отложения; 2 — четвертичные базальтовые лавовые потоки; 3 — андезитовые лавы (N_2 — плиоцен); 4 — субвулканические тела андезибазальтов (N_1 — миоцен); 5 — лавы и туфы андезитов и андезито-дацитов (N_1 — миоцен); 6 — субвулканические тела андезито-дацитов (N_1 — миоцен); 7 — дайки андезитов (N_1 — миоцен); 8 — кварцевые жилы; 9 — зоны каолинитовых и диккитовых вторичных кварцитов с рудоносными кварцевыми жилами; 10 — пострудные разломы; 11 — рудоносные участки: 1 — БАМ, 2 — Промежуточный, 3 — Хомут; 4 — Прометей; 5 — Каюрковский.

ОБРАЗЦЫ РУД И АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Для изучения малетойваямита и его парагенезисов была использована коллекция из 12 образцов бананцевых руд, собранных в приповерхностной части рудоносной зоны БАМ (см. фиг. 1). Исследование образцов проводилось методами оптической и растровой электронной микроскопии в аншлифах и полированных штуфах.

Количественные электронно-микросондовые анализы были выполнены авторами на нескольких системах Oxford Instruments AZtecLive, с энергодисперсионными (ЭДС) детекторами UltimMax 100 и X-Max 80, а также волнодисперсионными спектрометрами (ВДС) Wave 500, установленными на РЭМ Tescan Vega с вольфрамовым катодом (ИВиС) и Tescan Mira с катодами Шоттки (демонстрационные лаборатории Tescan и Oxford Instruments в Москве).

и Санкт-Петербурге). Для ЭДС-анализа как стандартов, так и образцов использовались представительные спектры с суммарным числом импульсов от 2 до 5 млн. и более. Для определения микроэлементов и контроля полученных данных параллельно с ЭДС использовали ВДС. Ускоряющее напряжение составляло 20 кэВ для относительно крупных выделений минералов ($> 10 \mu\text{м}$), тогда как для анализа микровключений размером менее $10 \mu\text{м}$ — для устранения или снижения влияния других минералов в сростаниях на спектр исследуемого минерала — использовалось напряжение 10 кэВ. Ток пучка 1–3 нА для ЭДС, 20–25 нА для комбинированного ЭДС-ВДС-анализа. В качестве калибровочных эталонов использовались: чистые элементы ($> 99.9\%$) Au, Ag, Bi, C, Fe, Sb, Sn, Ti, синтетические соединения PbTe, HgTe, ZnSe, TeO_2 , CeO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO, NaCl, KBr, а также стехиометричные минералы известного состава: пирит (FeS_2), халькопирит (CuFeS_2), энаргит Cu_3AsS_4 , антимонит (Sb_2S_3) волластонит (CaSiO_3). Спектральные линии для анализа каждого элемента выбирались исходя из условий возбуждения (10 или 20 кэВ), а также наличия/отсутствия существенных наложений. По возможности выбирались линии относительно более высоких энергий, K- или L-серий. Для расчета составов использовался алгоритм количественного анализа, интегрированный в систему AZtecLive, основанный на матричной коррекции XPP (Rouchou, Pichoir, 1991).

Диагностика кристаллической структуры ряда минералов выполнена методом анализа дифракции обратно рассеянных (отраженных) электронов (ДОЭ — EBSD) на системах AZtecLiveHKL с детекторами Symmetry и NordlysF+. Подготовка поверхности шлифов к такому анализу осуществлялась путем механической полировки с коллоидной окисью кремния с последующим травлением расфокусированным пучком ионов аргона с энергией 1 кэВ в течение 20–40 мин. Данный метод позволяет получить картины ДОЭ (Киучи) и сравнить кристаллическую структуру исследуемого минерала с моделями структур, имеющих в кристаллографических базах данных. Для диагностики мы использовали как встроенные в ПО AztecLive HKL базы ICSD и NIST, так и постоянно обновляемые в сети Интернет базы Crystallography Open Database (COD) и American Mineralogist Crystal Structure Database (AMCSD). Критерием хорошего соответствия сравниваемых кристаллических структур является

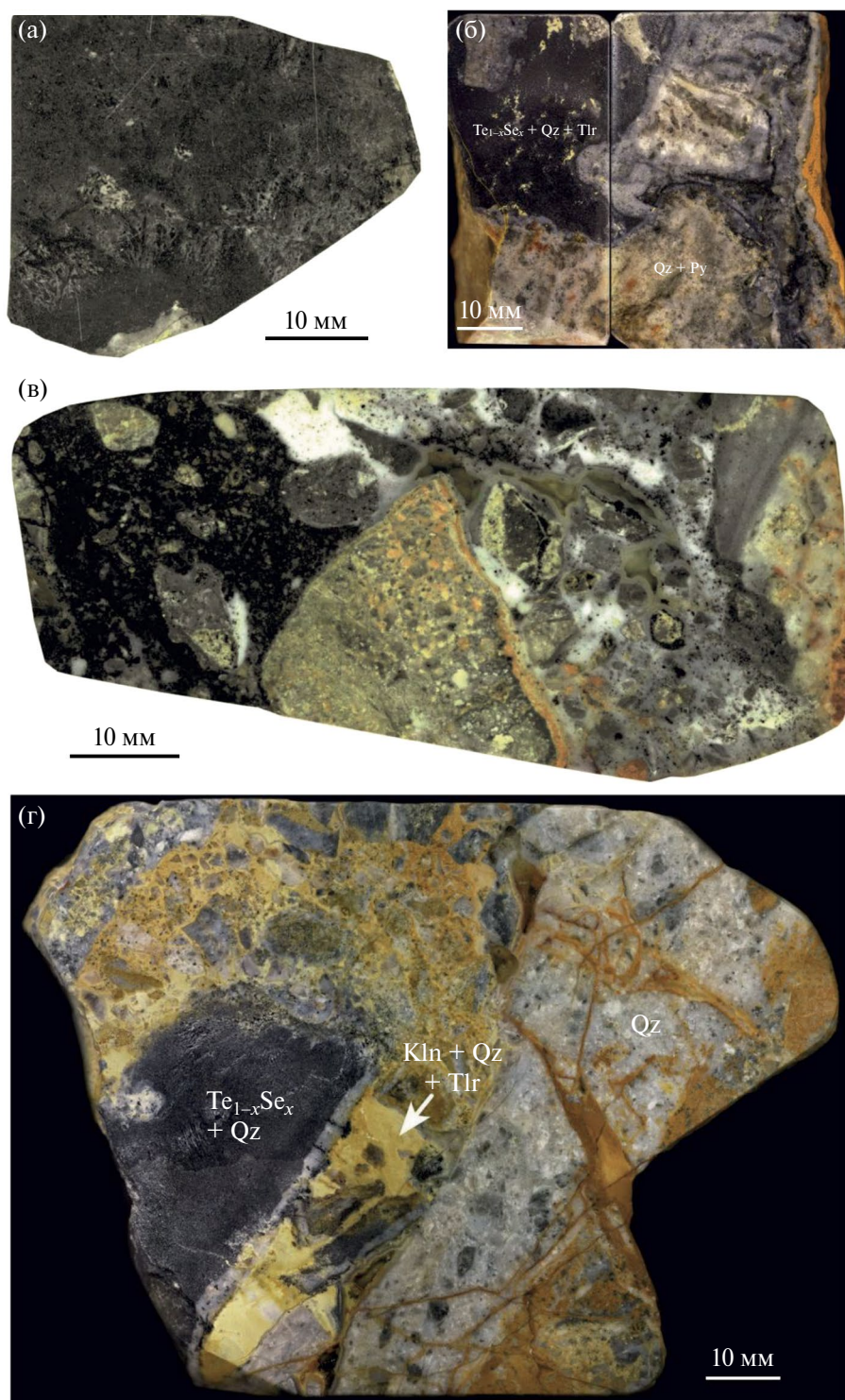
величина среднего углового отклонения (СУО) между индифференцированной с помощью ПО картиной ДОЭ и моделью из базы данных. Если величина СУО составляет менее 0.5° , то можно делать вывод о высокой степени их соответствия.

МИНЕРАЛОГИЯ РУД

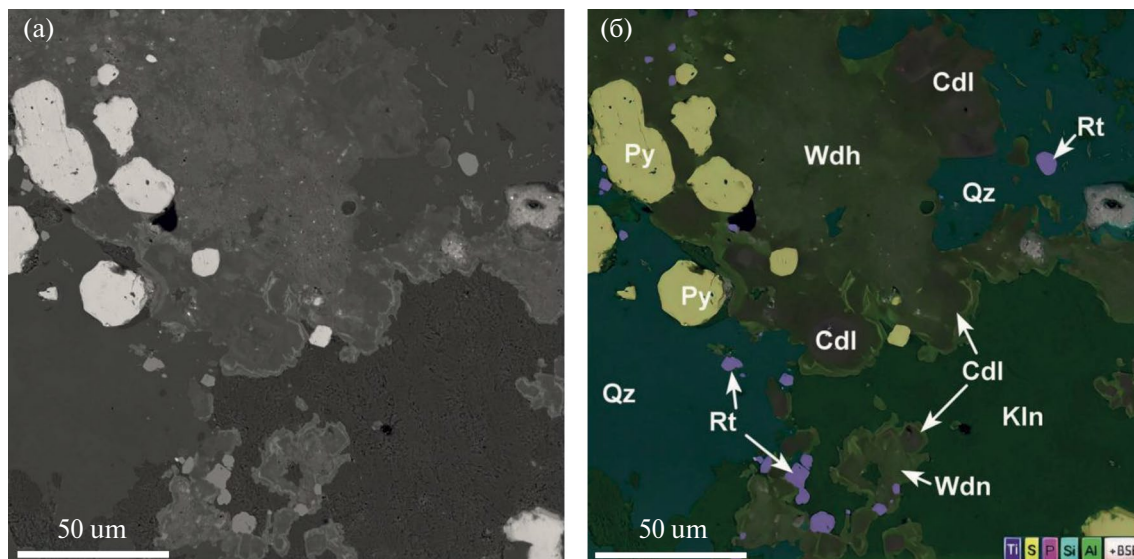
Руды Озерновского месторождения чрезвычайно разнообразны по составу и имеют Au–Te–Se–Cu–Bi специализацию. Предыдущими исследователями на участке БАМ выделено два основных продуктивных минеральных комплекса: теллур-сильванит-голдфилдит-диксит-кварцевый и золото-голдфилдит-кварцевый, каждый из которых включает несколько минеральных ассоциаций (Вартанян и др., 1991). Результаты детальных исследований состава рудных минералов и особенностей процесса рудоотложения представлены в работах Э.М. Спиридонова (Спиридонов, Округин, 1984; Спиридонов и др., 1990; Спиридонов и др., 2009; Спиридонов и др., 2014), В.А. Коваленкера (Kovalenker, Plotinskaya, 2005); В.М. Округина (Okrugin et al., 2022) и др.

Малетойваямит и содержащая его продуктивная минерализация ранее не были охарактеризованы на этом месторождении, но по описанию и местоположению она сходна с выделенной ранее сильванит-теллуровой минеральной ассоциацией в рудном теле № 2 (Петренко, 1999). Исследованные нами образцы с малетойваямитом представляют собой бонанцевые участки частично окисленных руд с высоким содержанием золота и сопутствующих элементов (Te и Se). Текстуры таких руд обычно брекчиевые или прожилково-сетчатые (фиг. 2). Многочисленные обломки измененных пород и кварцевых жил нескольких ранних генераций цементируются колломорфно-полосчатым кварцем более поздних стадий, а также мелкокристаллическими агрегатами диккита/накрита с кварцем, часто насыщенными тонкодисперсными включениями вторичных минералов теллура, окрашивающими их в ярко-желтый цвет.

Гипогенные рудные минералы присутствуют как в поздних кварцевых прожилках цемента брекчии, так и в обломках кварца ранних генераций (в свою очередь, цементирующих обломки кварца и других минералов еще более ранних стадий). Среди них наиболее распространенселенистый самородный теллур. Он образует вкрапленность, гнезда, прожилки размером от первых мм до нескольких см (см. фиг. 2). Часто, но обычно в очень мелких выделениях, встречаются



Фиг. 2. Текстурные особенности Au–Te–Se руд с селенистым теллуридом и малейшей ваянитом. ($Te_{1-x}Se_x$) — селенистый теллур; Py — пирит; Qz — кварц; Tlr — теллурид; Kln — каолинит. Фотографии полированных шлифов: а — массивная текстура руд, сложенная тесным сростанием селенистого теллурида с кварцем; б — прожилки кварца с селенистым теллуридом цементируют обломки окварцованных пород с вкрапленностью пирита, снимки двух взаимно перпендикулярных срезов одного образца; в — характерная текстура золото-теллуридовой руды Озерновского месторождения — полистадийная гидротермальная брекчия с угловатыми и полуокатанными обломками в поздней генерации кварца с селенистым теллуридом; г — крупное выделение селенистого теллурида в сростании с кварцем — обломок в брекчии, цементируемой тонкокристаллическим агрегатом каолинита, пропитанным вторичным теллуридом.



Фиг. 3. Кварц-каолиновый вторичный кварцит (Qz — кварц, Kln — минералы группы каолинита) с вкрапленностью пирита (Py), рутила (Rt) и выделениями минералов ряда вудхаузеит (Wdh) — крандаллит (Cdl): а — снимок в отраженных электронах (BSE); б — изображение в искусственных цветах — наложение рентгеновских карт распределения элементов (Ti, S, P, Si, Al, +BSE).

пирит и блеклые руды подгрупп голдфилдита и усталечита (по классификации, предложенной Biagioni et al., 2020 с дополнением Sejkora et al., 2021, 2022, 2023). Прочие рудные минералы преимущественно представлены микровключениями, чаще всего в самородном теллуре и блеклых рудах, а также в продуктах их гипергенного замещения.

Вмещающие породы в контактах с жилами и в обломках полностью изменены, замещены кварцем и сростаниями кварца с минералами группы каолинита, с тонкой вкрапленностью пирита. Встречаются выделения фосфатно-сульфатных минералов из группы алунита — вудхаузеит и крандаллит (фиг. 3). Иногда в метасоматитах сохраняется порфировая текстура первичных андезито-базальтов.

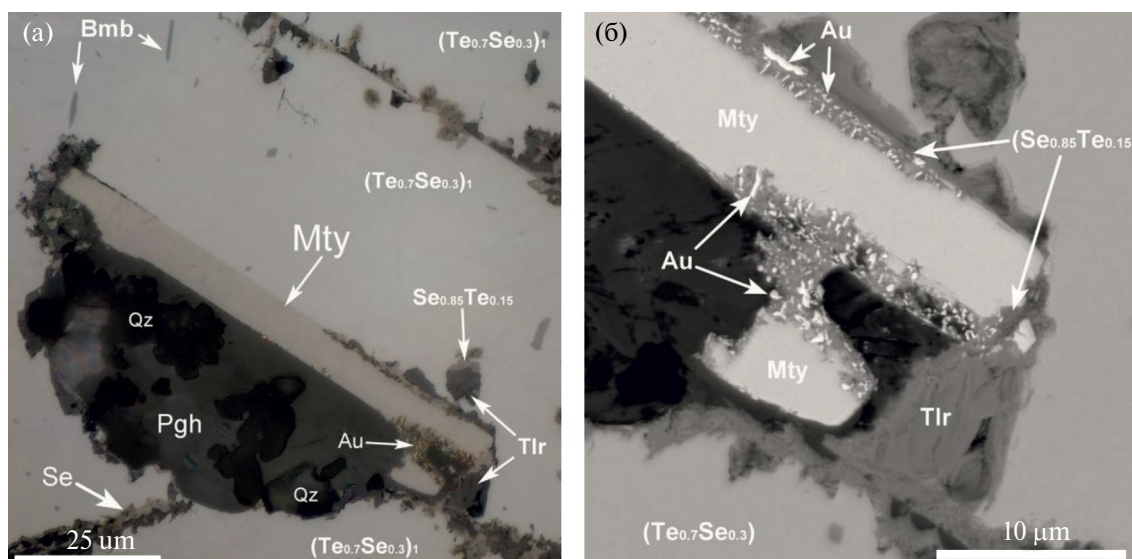
Широко развиты гипергенные минералы, замещающие первичные руды. Среди них следует особо отметить распространение теллурида, эмонсита и поита. Недавно на Озерновском месторождении были зарегистрированы два новых вторичных минерала теллура — озерновскит (Pekov et al., 2021) и рудольфгерманнит (Pekov et al., 2022).

Ниже представлено более детальное описание ряда редких и необычных минералов, расположенных в порядке значимости и распространенности.

ПЕРВИЧНЫЕ МИНЕРАЛЫ — САМОРОДНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ТЕЛЛУРИДЫ И СЕЛЕНИДЫ

Малетойваямит ($\text{Au}_3\text{Se}_4\text{Te}_6$). Ранее этот минерал был известен лишь на месторождении Малетойваям, где был впервые открыт и изучен (Tolstykh et al., 2020, Tolstykh et al., 2023). В рудах месторождения Малетойваям минерал формирует зерна 10–50 мкм, находящиеся в сростаниях с самородным золотом, калаверитом AuTe_2 , твердыми растворами AuSe-AuTe , Te-Se , теннантитом, тетраэдритом, голдфилдитом и ватанабеитом (Tolstykh et al., 2020).

В изученных нами образцах Озерновского месторождения малетойваямит является преобладающим минералом золота, тогда как самородное золото встречается редко. Минерал диагностирован по составу и оптическим свойствам. В отраженном свете минерал светло-серый с коричневатым оттенком. Обычно он образует включения округлой, изометричной или вытянутой формы, а также тонкие пластинки размером от 5 до 20–40 мкм в самородном селенистом теллуре и продуктах его окисления (фиг. 4, 5), реже встречается в виде микровключений в голдфилдите. Включения в самородном теллуре обычно изолированные, но иногда они образуют сростания с мелкими выделениями селенистого голдфилдита, богдановичита, а также



Фиг. 4. Пластинчатый кристалл малетойваямита (Mty) в селенистом теллуре с включениями бамболлаита. Селенистый теллур и малетойваямит замещаются теллуридом (Tlr) и поитом (Pgh) в результате гипергенного окисления, с одновременным образованием горчичного золота (Au) и теллуристого селена ($\text{Se}_{0.85}\text{Te}_{0.15}$): а — снимок в отраженном свете, без поляризации; б — снимок в отраженных электронах (BSE), фрагмент снимка (а), кристалл малетойваямита корродирован и частично замещен агрегатом теллурита и теллуристого селена с тонкодисперсным (“горчичным”) самородным золотом.

с минералом, близким по составу к бамболлаиту. Малетойваямит несколько более устойчив к окислению, чем вмещающий его селенистый теллур, так как сохраняется в виде реликтов при почти полном замещении последнего. На контактах с теллуридом, эммонситом и поитом в малетойваямите развиваются каймы замещения, состоящие из мелкодисперсной смеси самородного золота, самородного селена и теллурита (см. фиг. 4, 5в, г). Конечными продуктами окисления являются небольшие скопления тонкодисперсного золота в селенсодержащем теллуриде.

Малетойваямит Озерновского месторождения имеет незначительные отличия по составу от минерала из Малетойваяма (Tolstykh et al., 2020, 2023): он постоянно содержит примесь Ag (от 0.7 до 2 мас.%) и в нем не обнаружено значимой примеси серы (не более 0.13 мас.% в единичных анализах), тогда как в малетойваямите из месторождения Малетойваам замещение селена серой существенно, вплоть до образования непрерывного ряда твердых растворов от малетойваямита до толстыхита (сернистого аналога малетойваямита) (фиг. 6). Также в нем наблюдается небольшой избыток теллура, замещающего селен. Эти особенности, вероятно, отражают отличия в условиях образования, в частности в соотношениях окисленных и восстановленных форм серы, селена и теллура

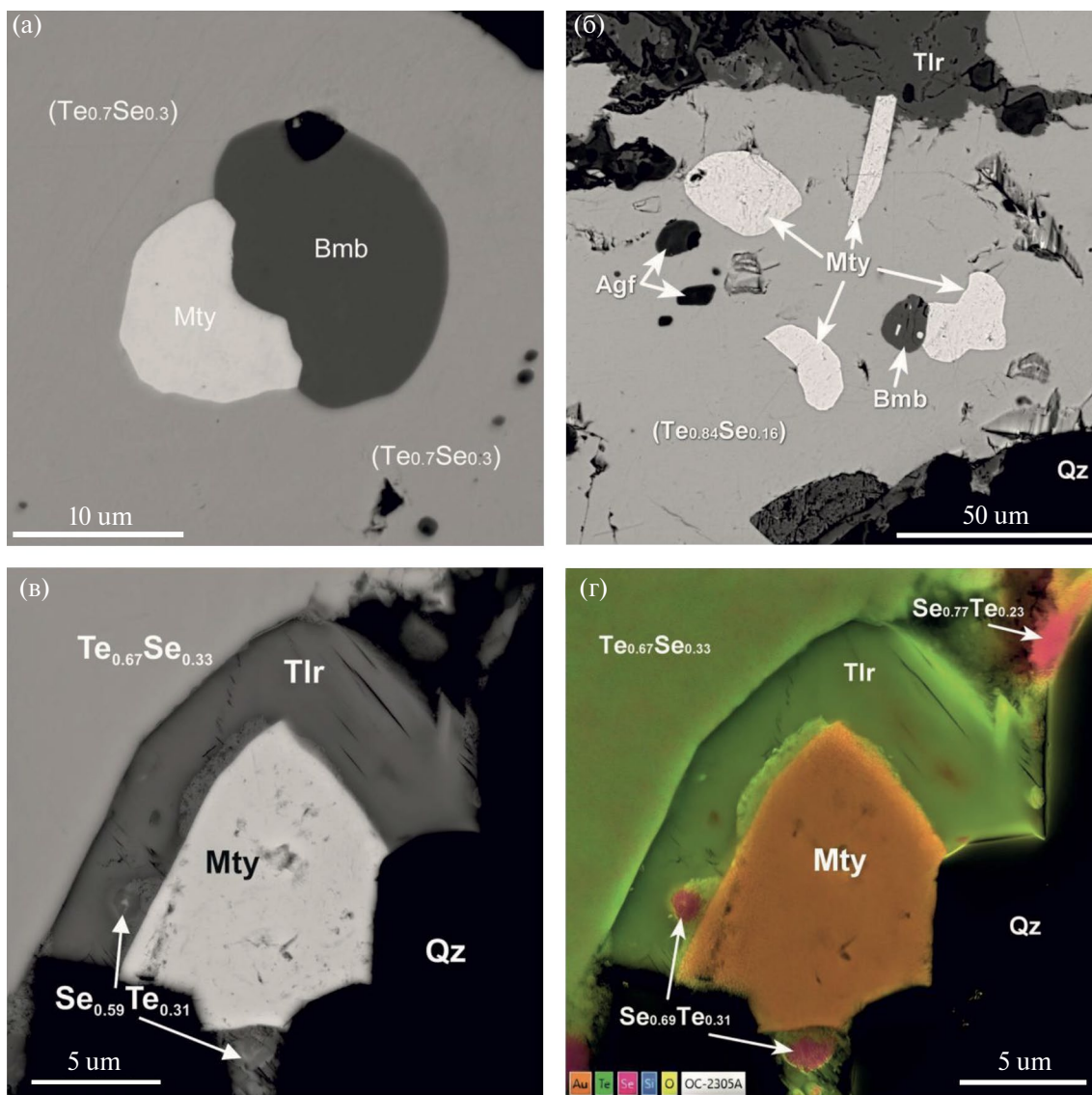
в рудообразующем флюиде. С учетом указанных взаимных замещений, эмпирическая формула малетойваямита из Озерновского месторождения близка к теоретической для этого минерала и соответствует $(\text{Au}_{2.81}\text{Ag}_{0.17})_{2.98}(\text{Se}_{3.81}\text{Te}_{0.19})_4\text{Te}_{6.03}$ или $(\text{Au}_{2.81}\text{Ag}_{0.17})_{2.98}(\text{Te}_{6.22}\text{Se}_{3.81})_{10.03}$ (среднее из 57 анализов — табл. 1).

Самородный селенистый теллур ($\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$). Самородный теллур давно известен и довольно широко распространен в золотоносных минеральных парагенезисах Озерновского месторождения, но в изученной нами серии образцов он весьма необычен по составу, так как содержит значительные количества селена. Распространены твердые растворы Se—Te с довольно устойчивыми соотношениями между этими элементами, близкими к SeTe_2 и SeTe_5 (табл. 2, фиг. 7). Они формируют веретенообразные, овальные и изометричные кристаллы (фиг. 8, 9), при этом размер отдельных кристаллов достигает 5–25 мм, а размер их срастаний — 5–7 см² в сечении (см. фиг. 2г). Макроскопически минерал легко диагностируется в штуфах благодаря серебристому цвету и наличию совершенной спайности (подобной спайности галенита, но не кубической). Интересной особенностью крупных зерен селенистого теллура является их однородный состав без признаков зональности по

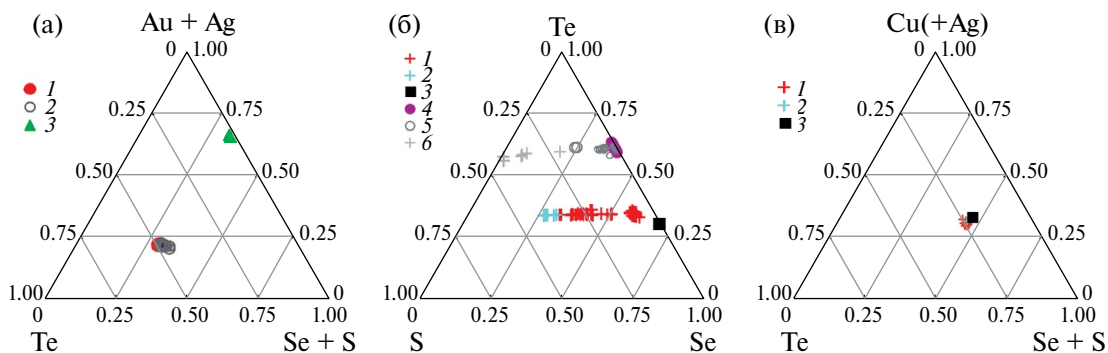
соотношениям Se/Te. Это резко контрастирует с большинством других рудных минералов в тех же образцах — с бамболлаитом и минералами подгруппы голдфилдита — имеющими зональный и крайне неоднородный состав на микроуровне. Учитывая довольно устойчивые соотношения Se и Te, нередко близкие по стехиометрии к SeTe_2 и SeTe_5 , можно было бы предположить, что они являются самостоятельными минеральными видами, но изучение методом дифракции обратно рассеянных электронов показало, что по кристаллической структуре они не отличаются

от самородного теллура, являясь его разновидностью — селенистым теллуrom. По данным экспериментальных исследований (Ghosh et al., 1994), Se и Te полностью смешиваются друг с другом в жидком и твердом состояниях и образуют изоморфную систему. Сходным составом обладает селенистый теллур месторождения Гачинг Малетойваймского рудного поля (Tolstykh et al., 2018).

Выделяется несколько генераций этого минерала, отличающихся по содержанию селена. Наиболее ранние мелкие выделения селенистого теллура образуют микровключения



Фиг. 5. Формы выделений малетойваямита Озерновского месторождения. Снимки в отраженных электронах: а — включения малетойваямита, бамболлаита и арсеноголдфилдита в селенистом теллуре; б — включение малетойваямита в сростании с бамболлаитом; в — кристалл малетойваямита в селенистом теллуре замещается теллуридом (Tlr) с выделением самородного селена на контакте (Se); г — тот же снимок с наложением карт распределения элементов (Au, Te, Se, Si, O).



Фиг. 6. Вариации состава (соотношения атомов) минералов — (сульфо)-селенотеллуридов Au, Ag, Cu: а — составы минералов Au в координатах Te — Se(+S) — Au(+Ag): малетойваямита из месторождений Озерновское (1, данные авторов) и Малетойваям (2, данные из Tolstykh et al., 2020, 2023), 3 — гипергенный фишессерит, Озерновское; б — составы минералов Au и Cu в координатах S — Se — Te: 1 — бамболлаит и 2 — неназванный минерал $Cu_{1-x}((S, Se), Te)_{2+x}$, данные авторов; 3 — бамболлаит из Моктесумы (Harris and Nuffield, 1972); 4 — малетойваямит (данные авторов); 5 — малетойваямит и 6 — толстихит из Малетойваяма (Tolstykh et al., 2020, 2023); в — составы бамболлаита и минерала $Cu_{1-x}((S, Se), Te)_{2+x}$ в координатах Te — Se(+S) — Cu(+Ag) [условные обозначения см. (б)].

Таблица 1. Химический состав (мас.%) малетойваямита из Озерновского месторождения

Элемент	Среднее*	Мин.	Макс.	1	2	3	4	5**
Au	33.13	31.66	34.64	31.92	31.91	32.89	33.37	34.64
Ag	1.10	0.70	2.03	1.87	2.03	0.84	1.09	0.89
Te	47.54	45.94	49.36	48.48	49.36	47.75	47.31	47.58
Se	17.99	17.14	19.64	17.67	18.19	17.70	19.07	17.67
Сумма	99.77	(98.02)	(101.8)	99.94	101.49	99.18	100.84	100.89
Коэффициенты в расчете на 13 атомов в формуле								
Au	2.81	2.63	2.92	2.68	2.63	2.81	2.78	2.92
Ag	0.17	—	0.31	0.29	0.31	0.13	0.17	0.14
Te	6.22	6.01	6.37	6.29	6.28	6.29	6.09	6.18
Se	3.81	3.68	4.10	3.74	3.78	3.77	3.97	3.71
Au+Ag	2.97	2.90	3.07	2.97	2.94	2.94	2.95	3.05
Se+Te+S	10.03	9.93	10.10	10.03	10.06	10.06	10.05	9.95
Элемент	6	7	8	9	10	11	12	13
Au	33.20	33.40	33.44	33.57	34.11	33.68	33.11	33.37
Ag	0.93	0.96	1.2	0.96	1.07	1.14	0.96	1.09
Te	45.94	47.02	47.46	47.22	47.38	47.12	47.55	47.31
Se	18.11	18.53	17.49	17.40	17.98	17.58	17.63	19.07
Сумма	98.18	99.91	99.59	99.15	100.54	99.52	99.25	100.84
Коэффициенты в расчете на 13 атомов в формуле								
Au	2.86	2.82	2.85	2.88	2.88	2.87	2.83	2.78
Ag	0.15	0.15	0.19	0.15	0.17	0.18	0.15	0.17
Te	6.11	6.13	6.25	6.25	6.17	6.21	6.27	6.09
Se	3.89	3.90	3.72	3.72	3.79	3.74	3.76	3.97
Au+Ag	3.01	2.97	3.04	3.03	3.04	3.05	2.98	2.95
Se+Te+S	10.00	10.03	9.96	9.97	9.96	9.95	10.02	10.05

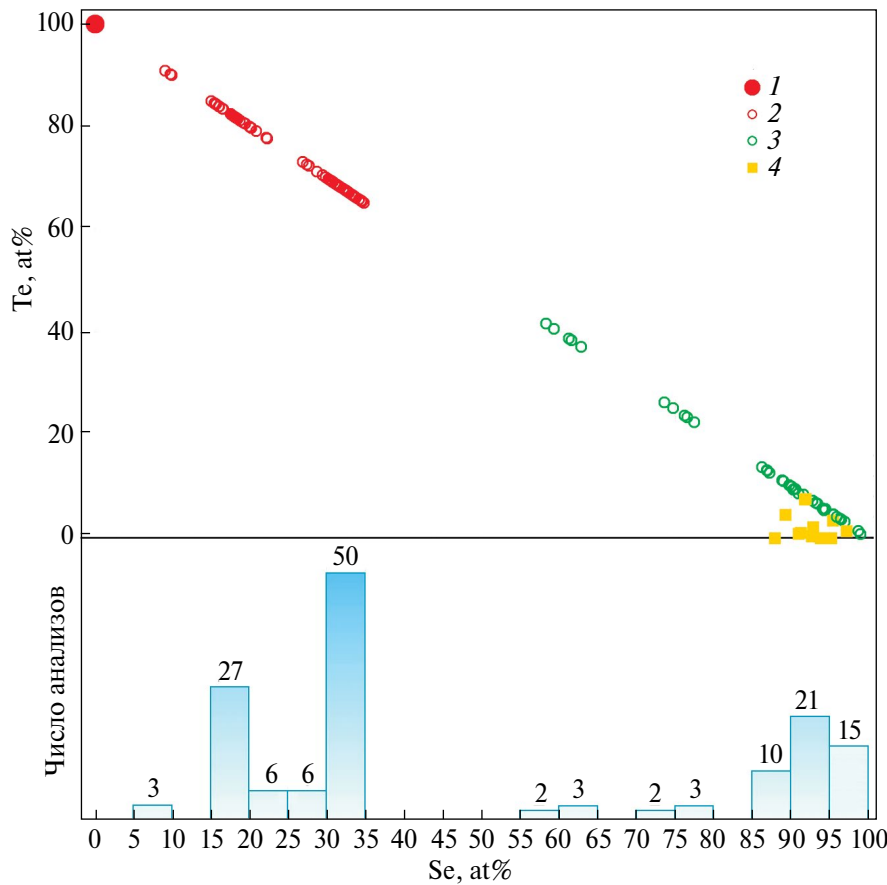
Примечание. * — среднее из 57 анализов и выборка наиболее характерных составов (1–14);

** — в анализ входит сера, 0.11 мас.%. (коэффициент в формуле 0.06).

Таблица 2. Химический состав (мас.%) самородного селенистого теллура из Озерновского месторождения

Элемент	Среднее*	Мин.	Макс.	1	2	3	4	5
Se	18.47	6.38	46.44	5.85	10.49	13.32	21.78	23.32
Te	80.94	53.63	93.62	94.87	88.77	85.95	77.77	75.58
Total	99.69	(98.03)	(101.78)	100.72	99.26	99.27	99.55	98.90
Доля селена в твердом растворе, ат. %:								
Se	6.22	6.38	46.44	9.07	16.03	20.03	31.16	33.27

Примечание. * — среднее из 93 анализов и выборка характерных составов (1–5).

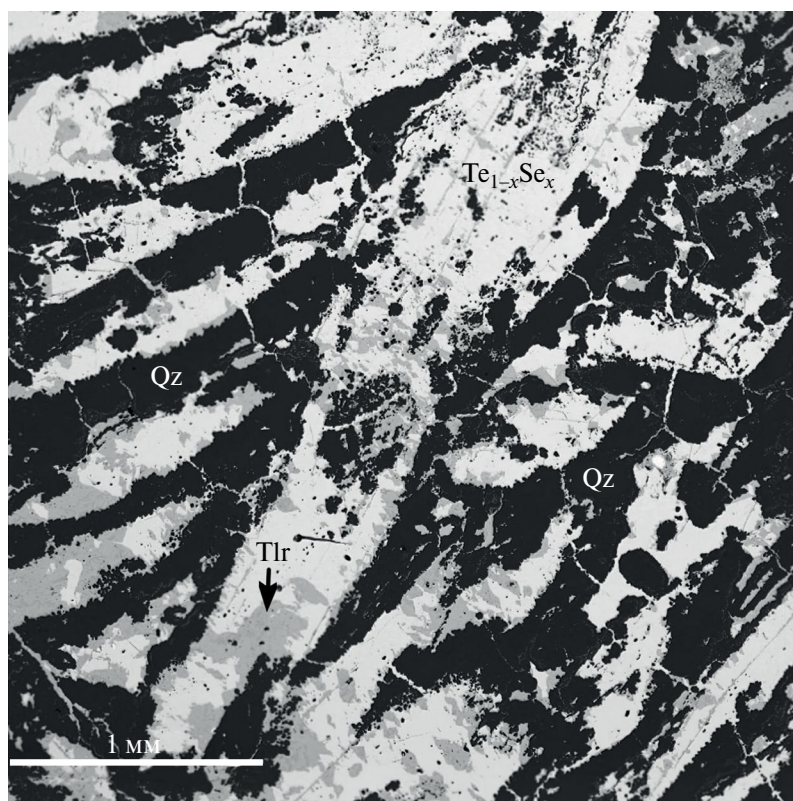


Фиг. 7. Диаграмма вариаций состава минералов ряда Te–Se, совмещенная с гистограммой распределения содержания Se (148 микронзондовых анализов): 1 — самородный теллур (исключен из выборки для гистограммы); 2 — селенистый теллур; 3 — теллуристый селен; 4 — самородный селен с примесью серы > 0.5 ат. %.

в голдфилдите (фиг. 10а), по составу они близки к $\text{Se}_{0.05-0.2}\text{Te}_{0.95-0.8}$. Более поздние и более крупные выделения селенистого теллура приближаются по составу к $\text{Se}_{0.33}\text{Te}_{0.67}$ (т.е. SeTe_2). Принимая во внимание отсутствие зональности в них, а также относительно низкие температуры плавления растворов Se–Te такого состава (< 300 °С, Ghosh et al., 1994), нельзя исключить, что, по

крайней мере, часть выделений селенистого теллура откладывалась в форме расплава, а не кристаллического вещества.

Поздние генерации селенистого теллура содержат довольно многочисленные включения бамболлаита, малетойваямита, блеклых руд (селенистый арсено- и стибиоголдфилдит, а также



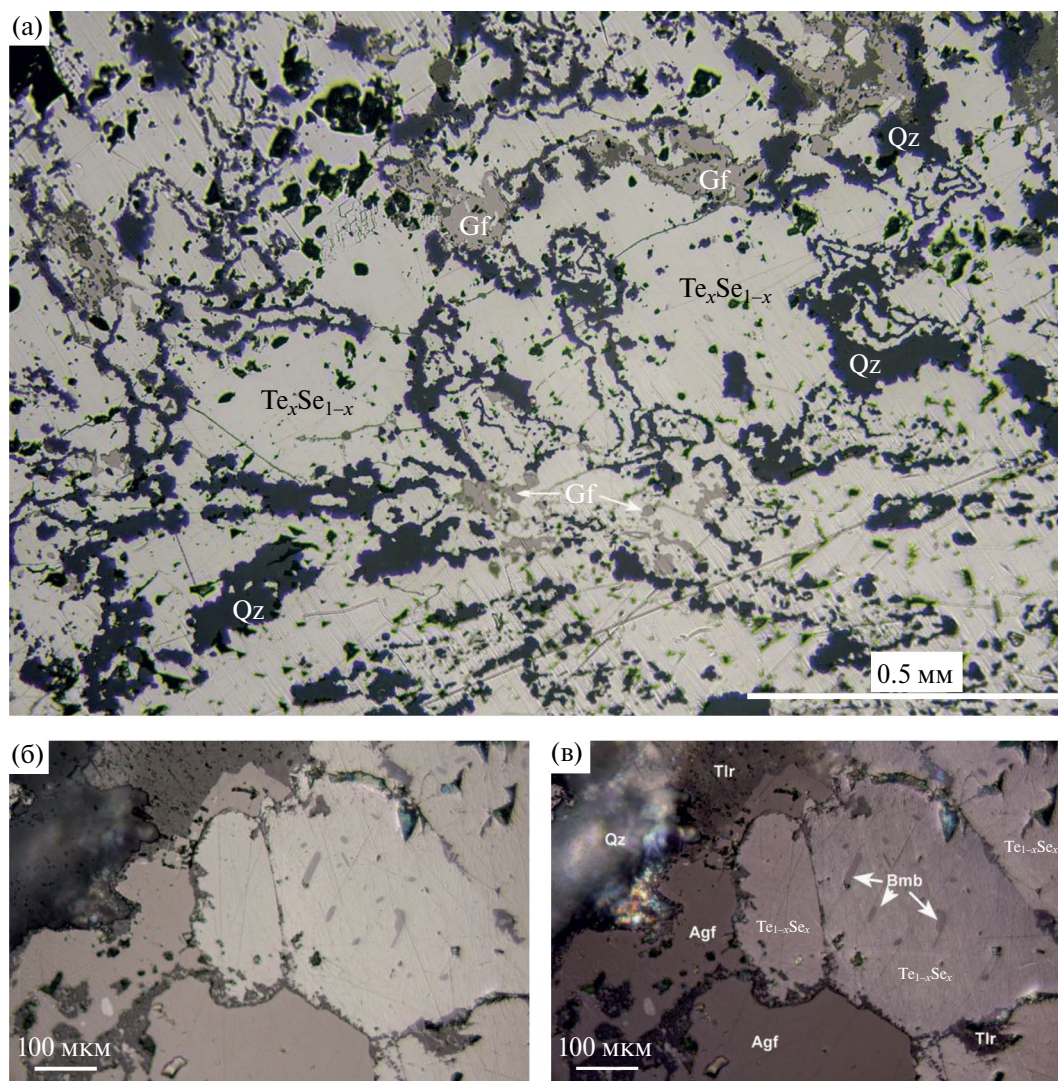
Фиг. 8. Крупные веретенообразные кристаллы селенистого теллура в кварце. Снимок в отраженных электронах.

арсенусталечит и стибииусталечит), галеноклаусталита, богдановичита (см. фиг. 10). Включения клаусталита $PbSe$ и богдановичита $AgBiSe_2$ часто находятся в сростаниях друг с другом. Некоторые зерна богдановичита содержат ориентированные вроски галеноклаусталита, а зерна галеноклаусталита — вроски богдановичита (см. фиг. 10д, е), возникшие в результате распада твердых растворов. Богдановичит также отмечен в виде самостоятельных изометричных выделений размером 15–20 мкм в кварцевой жильной массе.

Бамболлаит, $Cu_{1-x}((Se, S), Te)_2$. Ранее этот минерал был открыт и изучен только на месторождении Моктесума (Бамболла) в Мексике (Harris and Nuffield, 1972). В отраженном свете кремово-белый, слабо анизотропен. Опубликованные данные о нем скудны — его состав охарактеризован лишь одним анализом ($Cu_5Se_7Te_3$, или $Cu(Se, Te)_2$), а кристаллическая структура определена по порошковой дифрактограмме. Минерал тетрагональный, пространственная группа $I41/amd$ (141). В изученных нами образцах Озерновского месторождения часто встречаются микровключения сульфоселентеллурида меди, близкие к бамболлаиту по соотношению

компонентов, с учетом возможных взаимных замещений между теллуром, селеном и серой. Включения мелкие, их размер не превышает 25–30 мкм. Они находятся преимущественно внутри зерен селенистого теллура (см. фиг. 5а, б; фиг. 10), изредка — в мелких гнездах селенистого голдфилдита среди кварца. Форма включений чаще округлая и изометричная, но в селенистом теллуре также встречаются мелкие таблитчатые включения, ориентированные по кристаллографическим направлениям (с удлинением, параллельным видимым трещинам спайности, фиг. 10в). По-видимому, часть включений бамболлаита является продуктом распада твердого раствора в селенистом теллуре. Минерал кремово-серый в отраженном свете, заметно темнее вмещающего селенистого теллура, анизотропия незаметна на фоне сильно анизотропных зерен теллура.

Для диагностики этого минерала мы применили метод ДОЭ (EBSD). В качестве материала для сравнения использованы структуры селенидов, сульфидов и теллуридов меди, имеющиеся в кристаллографических базах данных ICSD, COD, AMCSDB, включая крутаит и петручекит (оба — структурные модификации $CuSe_2$), но мы

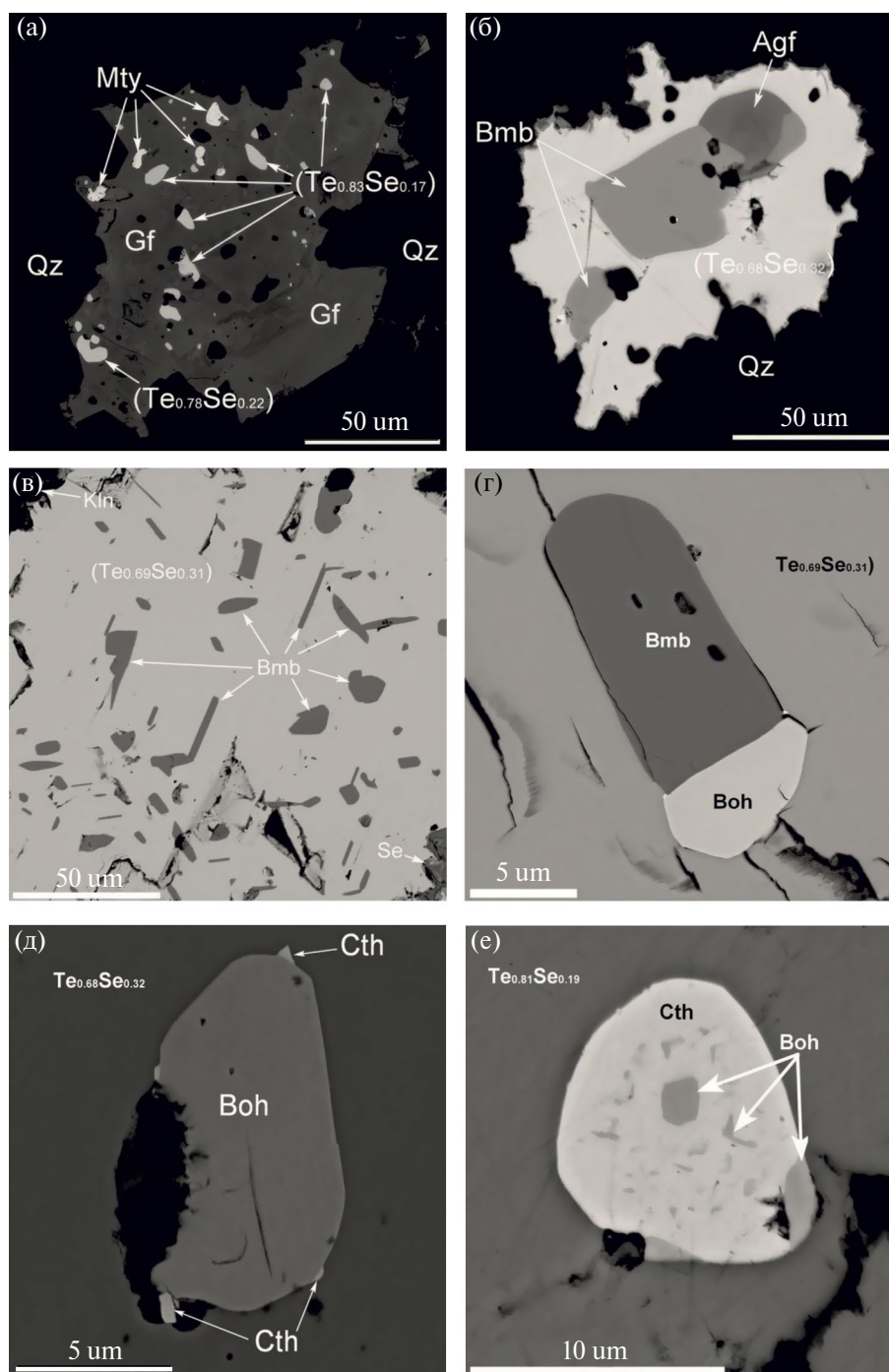


Фиг. 9. Выделения самородного селенистого теллура — снимки образца на фиг. 2г в отраженном свете: а — срастание селенистого теллура с кварцем и минералами подгруппы голдфилдита (Gf), без поляризации; б — разноориентированные зерна селенистого теллура с микровключениями бамболлаита (Bmb), Agf — арсеноголдфилдит, поляризация, николи параллельны; в — тот же участок, николи скрещены.

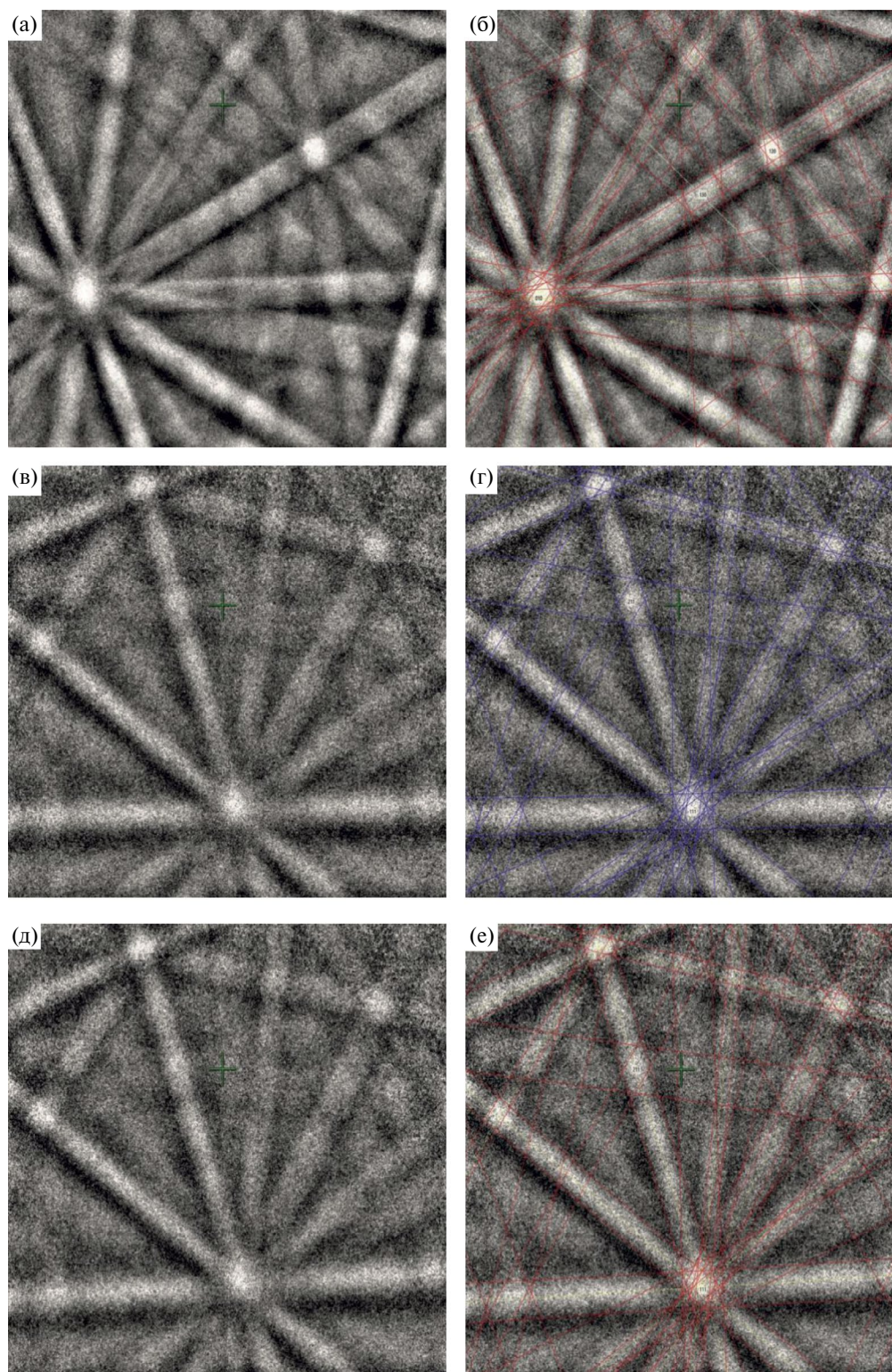
не обнаружили среди них сходства с исследуемым минералом. Структура собственно бамболлаита в указанных базах данных отсутствует, так как для нее не определены позиции атомов в решетке, необходимые для расчета дифракционной картины отраженных электронов. В связи с этим для сравнительного анализа мы использовали модельную структуру аналогичной бамболлаиту пространственной группы I41/amd (141). Наилучшее соответствие по углам между кристаллическими плоскостями обеспечила модель тетрагональной структуры типа CuIr_2S_4 (ICSD[75532]). Картины дифракции нашего минерала индицируются в тетрагональной сингонии с пространственной группой I41/amd (141) со средним угловым

отклонением 0.17° – 0.26° (фиг. 11) и, таким образом, соответствуют структуре бамболлаита, определенной первооткрывателями. Вместе с тем кристаллическая структура этого минерала требует дальнейшего изучения, так как охарактеризована недостаточно.

По составу бамболлаит из Озерновского месторождения близок, но не идентичен минералу из Моктесумы. В некоторых анализах отмечена небольшая примесь серебра (около 0.3 мас.%). Постоянно присутствует сера, с широкими вариациями соотношений селена и серы, при относительно стабильной концентрации теллура (см. фиг. 6б, в). По результатам 84



Фиг. 10. Селенистый теллур и микровключения в нем, снимки в отраженных электронах: а — включения малетойва-
ямита и селенистого теллура в селенсодержащем зональном голдфилдите (Gf) среди кварца; б — включения бамболла-
ита и арсеноголдфилдита (Agf) в селенистом теллуре среди кварца; в — включения и ориентированные срращения
бамболлаита (Bmb), на контакте с вторичным теллуридом — самородный селен (Se), Kln — каолинит; г — включение
бамболлаита в срращениях с богдановичитом (Boh); д — включение богдановичита в срращениях с клаусталитом (Cth),
в богдановичите содержатся трудноразличимые субмикронные ориентированные вросстки клаусталита; е — вклю-
чения богдановичита в зерне клаусталита.



Фиг. 11. Представительные картины дифракции отраженных электронов бамболлаита и неназванного минерала $\text{Cu}_{1-x}((\text{S}, \text{Se}), \text{Te})_2$, индцированные в тетрагональной ячейке с пространственной группой $I41/\text{amd}$ (141) по ICSD[75532] в качестве структурной модели: а, б — бамболлаит, среднее угловое отклонение для индцированной картины (б) 0.17° ; в–е — две идентичные картины ДОЭ для двух точек внутри одного зерна с разными соотношениями серы и селена: в–г минерал состава $\text{Cu}_{0.99}((\text{S}_{0.70}\text{Se}_{0.59}), \text{Te}_{0.72}))_{2.01}$, среднее угловое отклонение для индцированной картины (г) 0.31° ; д–е — бамболлаит состава $\text{Cu}_{0.95}((\text{Se}_{0.82}\text{S}_{0.40}), \text{Te}_{0.83}))_{2.05}$, среднее угловое отклонение для индцированной картины (Е) 0.35° .

Таблица 3. Химический состав (мас.%) бамболлаита $\text{Cu}_{1-x}((\text{Se}, \text{S}), \text{Te})_2$ из Озерновского месторождения

Элемент	Среднее*	Мин.	Макс.	1	2	3	4	5
Cu	23.77	21.69	26.09	22.89	22.39	23.21	24.45	25.80
Ag	0.11	нпо	0.68	0.29	0.30	нпо	0.15	нпо
S	3.90	1.49	9.52	1.60	1.75	1.93	4.00	8.18
Se	34.79	23.71	39.83	38.73	39.30	38.18	34.58	26.73
Te	36.49	33.70	39.21	35.92	36.64	36.09	36.53	38.54
Total	99.05	(97.39)	(100.75)	99.43	100.38	99.41	99.72	99.25
Коэффициенты в формуле в расчете на сумму из 2 атомов серы, селена и теллура								
Cu	0.88	0.80	0.95	0.88	0.84	0.88	0.91	0.91
Ag	0.00	—	0.01	0.01	0.01	—	—	—
S	0.28	0.11	0.66	0.12	0.13	0.15	0.29	0.57
Se	1.04	0.67	1.23	1.19	1.19	1.17	1.03	0.76
Te	0.67	0.65	0.71	0.69	0.68	0.68	0.67	0.67
Cu+Ag	0.88	0.82	0.95	0.89	0.85	0.88	0.91	0.91
Se+S+Te	2	2	2	2	2	2	2	2

Примечание. * — среднее из 49 анализов и выборка наиболее характерных составов (1–5).

Таблица 4. Химический состав (мас.%) неназванного минерала $\text{Cu}_{1-x}((\text{S}, \text{Se}), \text{Te})_2$ из Озерновского месторождения

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	Среднее*
Cu	26.14	27.07	27.35	27.11	27.11	27.36	27.10	27.03
S	9.97	10.40	11.25	11.22	11.52	11.64	11.63	11.09
Se	23.29	23.08	21.60	21.67	21.18	20.98	20.81	21.80
Te	38.78	39.22	39.93	39.79	39.98	39.94	39.65	39.61
Total	98.19	99.77	100.13	99.79	99.79	99.91	99.20	99.54
Коэффициенты в формуле в расчете на сумму из 2 атомов серы, селена и теллура								
Cu	0.90	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
S	0.68	0.70	0.75	0.75	0.76	0.77	0.77	0.74
Se	0.65	0.63	0.58	0.59	0.57	0.56	0.56	0.59
Te	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.66	0.66	0.67
Se+S	1.33	0.78	1.90	1.31	1.32	1.32	1.33	1.33
Se+S+Te	2	2	2	2	2	2	2	2

Примечание. * — среднее из 7 анализов.

микронзондовых анализов (табл. 3) минерал хорошо рассчитывается на формулу $(\text{Cu}, \text{Ag})_4(\text{Se}, \text{S})_6(\text{Te}, \text{Se})_3$ или, если использовать модифицированную формулу бамболлаита с тремя атомами в ячейке, — $\text{Cu}_{1-x}((\text{Se}, \text{S}), \text{Te})_2$, где x находится в интервале от 0 до 0.13. Вероятно, атомы теллура и селена занимают самостоятельные фиксированные позиции в структуре минерала при свободном замещении селена серой и ограниченном — теллура селеном.

В некоторых участках внутри зональных зерен бамболлаита число атомов серы превышает число атомов селена и теллура. Вероятно, они представляют собой новый минеральный вид с формулой $\text{Cu}_{1-x}((\text{S}, \text{Se}), \text{Te})_2$ (табл. 4). Обогащенные серой зоны заключены внутри зерен “обычного” бамболлаита, они не отличаются от основного зерна ни по оптическим свойствам, ни по картинам ДОО (т. е. имеют одинаковую ориентацию кристаллитов и индицируются в тетрагональной сингонии — фиг. 11).

Таблица 5. Химический состав (мас.%) селенистых голдфилдитов и усталечитов из ассоциации с малейшеймалейшим Озерновского месторождения

Символ минерала	Gf*	Asgf	Sbgf	Sbgf	Aúĉ	Aúĉ	Aúĉ	Súĉ	Súĉ
Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cu	38.7	43.58	43.67	36.78	35.36	36.63	35.88	36.67	36.38
Ag	0.51	нпо	нпо	0.18	0.38	1.85	2.94	0.21	0.23
As	3.43	4.53	3.63	2.06	2.50	6.34	7.08	2.21	2.75
Sb	0.32	6.20	8.22	3.69	3.40	нпо	0.45	4.29	5.23
Te	23.24	16.07	15.25	20.85	18.40	15.79	13.3	18.36	16.38
Se	15.76	8.47	8.25	21.43	31.03	30.86	34.83	28.77	28.73
S	16.86	21.09	21.02	13.96	8.57	8.81	6.77	9.77	9.39
Сумма	98.82	99.92	100.04	98.95	99.63	100.28	101.25	100.27	99.09
Коэффициенты в формуле в расчете на сумму из 13 атомов серы и селена									
Cu	10.92	11.66	11.76	10.65	10.96	11.26	11.25	11.21	11.34
Ag	0.08	—	—	0.03	0.07	0.34	0.54	0.04	0.04
As	0.82	1.03	0.83	0.51	0.66	1.65	1.88	0.57	0.73
Sb	0.05	0.87	1.15	0.56	0.55	—	0.07	0.68	0.85
Te	3.26	2.14	2.04	3.01	2.84	2.42	2.08	2.79	2.54
Se	3.58	1.82	1.79	4.99	7.74	7.63	8.79	7.08	7.20
S	9.42	11.18	11.21	8.01	5.26	5.37	4.21	5.92	5.80
Te+Sb+As	4.13	4.03	4.03	4.07	4.04	4.07	4.03	4.05	4.12
Sb/As	0.06	0.84	1.39	1.10	0.84	—	0.04	1.19	1.17
Se/(Se+S)	0.28	0.14	0.14	0.38	0.60	0.59	0.68	0.54	0.55
Te/(Te+Sb+As)	0.79	0.53	0.51	0.74	0.70	0.59	0.51	0.69	0.62
Символ минерала	Gf*	Asgf	Asgf	Asgf	Asgf	Sbgf	Aúĉ	Aúĉ	Aúĉ
Элемент	p346**	p358	p351	p348	p341	p361	p344	p340	p352
Cu	37.67	37.67	40.41	42.12	39.24	36.69	36.54	36.31	36.02
Ag	нпо	нпо	нпо	нпо	0.30	0.50	0.40	0.41	0.49
As	3.62	4.00	5.14	5.16	5.20	3.16	3.33	3.88	3.33
Sb	нпо	0.49	1.54	2.24	2.24	2.94	2.96	1.56	2.43
Te	22.27	21.28	19.27	19.2	17.33	19.26	18.04	19.00	18.9
Se	22.68	24.76	16.15	11.01	23.14	25.63	30.04	30.29	30.68
S	13.8	12.82	17.33	20.21	13.36	11.49	9.55	9.36	9.03
Сумма	100.04	101.02	99.84	99.94	100.81	99.67	100.86	100.81	100.88
Коэффициенты в формуле в расчете на сумму из 13 атомов серы и селена									
Cu	10.74	10.80	11.10	11.19	11.31	10.99	11.02	11.00	10.99
Ag	—	—	—	—	0.05	0.09	0.07	0.07	0.09
As	0.87	0.97	1.20	1.16	1.27	0.80	0.85	1.00	0.86
Sb	—	0.07	0.22	0.31	0.34	0.46	0.47	0.25	0.39
Te	3.16	3.04	2.63	2.54	2.49	2.87	2.71	2.87	2.87
Se	5.20	5.71	3.57	2.36	5.37	6.18	7.29	7.38	7.54
S	7.80	7.29	9.43	10.64	7.63	6.82	5.71	5.62	5.46
Te+Sb+As	4.04	4.08	4.05	4.01	4.10	4.13	4.03	4.11	4.12
Sb/As	—	0.075	0.184	0.267	0.264	0.574	0.548	0.249	0.448
Se/(Se+S)	0.40	0.44	0.27	0.18	0.41	0.48	0.56	0.57	0.58
Te/(Te+Sb+As)	0.783	0.744	0.650	0.633	0.607	0.695	0.673	0.697	0.697

Примечание. * — символы минералов: Gf — голдфилдит; Asgf — арсеноголдфилдит; Sbgf — стибьоголдфилдит; Aúĉ — арсеноусталечит; Súĉ — стибьоусталечит; ** — номера точек анализа на фиг. 12.

Минералы группы тетраэдрита (блеклые руды).

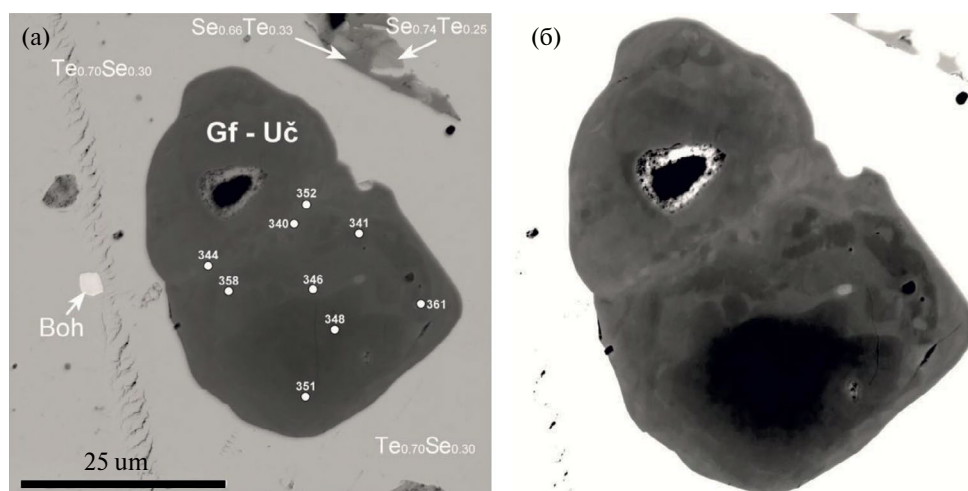
Широко распространены на Озерновском месторождении практически во всех золотоносных минеральных ассоциациях. Здесь был впервые описан селенистый голдфилдит (Спиридонов, Округин, 1984). В дальнейшем минералы группы были изучены и другими исследователями (Pohl et al., 1996; Спиридонов и др., 1990, 2014; Plotinskaya et al., 2005; Kozlov, Okrugin, 2022).

В описываемой ассоциации с малетойваямитом блеклые руды сравнительно мало распространены — в отличие от других золотосодержащих парагенезисов месторождения. В обломках кварца гидротермальных брекчий присутствуют выделения блеклых руд еще более ранних стадий рудотложения с микровключениями калаверита и самородного теллура без примеси селена. Блеклые руды из ассоциации с малетойваямитом образуют мелкие гнезда в кварце и микровключения в селенистом теллуре и относятся к числу наиболее ранних минералов парагенезиса (после пирита). Они содержат характерное сообщество микровключений — малетойваямит и селенистый теллур с относительно низкой концентрацией селена (до 6.5 мас.%). Их замещает более поздний селенистый теллур (> 9 мас.% селена). Выделения блеклых руд крайне неоднородны по составу и демонстрируют ярко выраженную зональность с варьирующими соотношениями основных компонентов. От ранних к поздним генерациям увеличивается содержание селена в их составе. Округлые микровключения резко обогащенных селеном блеклых руд

часто встречаются в крупных выделениях селенистого теллура, нередко в сростаниях с бамболлаитом и малетойваямитом.

В серии изученных нами образцов диагностировано несколько редких минералов подгрупп голдфилдита и усталечита, отличающихся очень высоким содержанием селена, вплоть до $Se > S$. Среди них голдфилдит ($Te > 3$ атомов в формуле, $S > Se$), арсеноголдфилдит и стибиоголдфилдит (это три названия по новой классификации для минеральных видов, ранее уже известных на месторождении под общим названием “селенистый голдфилдит”), а также новые недавно зарегистрированные КНМ ММА минералы группы усталечита, селенового аналога голдфилдита (Sejkora et al., 2022; 2023). Идеализированная формула усталечитов: $(Cu_4(\square, Cu)_2(Cu_4Cu^{+2})((Te, Sb, As)_2Te_2)Se_{12}Se)$, а упрощенная эмпирическая формула $Cu_{12-x}(Te, As, Sb)_4(Se, S)_{13}$, где величина x — вакансия в структуре; отношение $Se/(Se+S) > 0.5$; Te от 1 до 3 атомов в формуле (Sejkora et al., 2022). По составу выделяются арсеноусталечит и стибиоусталечит (см. табл. 5, фиг. 12). Они встречаются в виде отдельных зон внутри зональных выделений блеклой руды в селенистом теллуре и в кварце. Эти два минерала ранее на месторождении не были известны и представляют собой первые находки в России.

Более детальное описание этой сложной и разнообразной группы минералов выходит за рамки данной статьи.



Фиг. 12. Включения зональной блеклой руды переменного состава (твёрдый раствор ряда голдфилдит Gf — усталечит Uč) в селенистом теллуре: а — снимок в отраженных электронах (BSE), ускоряющее напряжение 10кэВ; б — то же зерно блеклой руды, с усиленным контрастом для выявления неоднородности состава. Кругжками обозначены точки анализа, номера возле точек соответствуют номерам анализов в табл. 5. Наиболее темная область (348) представлена арсеноголдфилдитом с минимальным содержанием селена в данном зерне (11.01 мас.%), она обрастает зонами с возрастающими содержанием селена, вплоть до усталечитов.

ВТОРИЧНЫЕ МИНЕРАЛЫ

В близповерхностной части месторождения развита зона окисления, в которой большинство первичных минералов частично или полностью замещены. Наблюдается несколько стадий гипергенных преобразований: для ранних характерно образование самородного селена и селенидов, а для поздних — оксидов. Необычный характер первичного оруденения — обилие селена и теллура — отражается и в составе вторичных минералов. Они встречаются как в виде тесных сростаний друг с другом, так и самостоятельных зерен и идиоморфных кристаллов (размером до 300 мкм и более), замещая селенистый теллур и другие минералы, включая пирит (фиг. 13).

Самородное золото (Au, Ag). Выделения размером от менее 1 мкм до 15 мкм обычно находятся в сростании с фишессеритом (см. фиг. 4, 13) и теллуридом. Большая часть гипергенных выделений самородного золота образовалась при замещении малейшей ваямита и фишессерита теллуридом и другими вторичными минералами теллура, часто с одновременным выделением самородного селена. По составу золото высокопробное (920–963‰). В первичных рудах без малейшей ваямита самородное золото обычно входит в число гипогенных минералов и довольно широко распространено в парагенезисе с теллуридами золота.

Самородный селен и теллуристый селен (Se_{1-x}Te_x). Самородный селен распространен в изученных образцах, но в отличие от описанного выше самородного теллура не образует крупных выделений (не более 50–70 мкм) и, очевидно, образуется при гипергенном окислении селенистого теллура и других минералов-селенидов, так как все его

выделения были найдены в сростании с теллуридами — теллуридом, эммонситом и поитом, а также внутри зерен этих минералов, нередко в парагенезисе с гипергенными селенидами Au, Ag, Cu (см. фиг. 8; фиг. 9в, г, е; фиг. 13б, г).

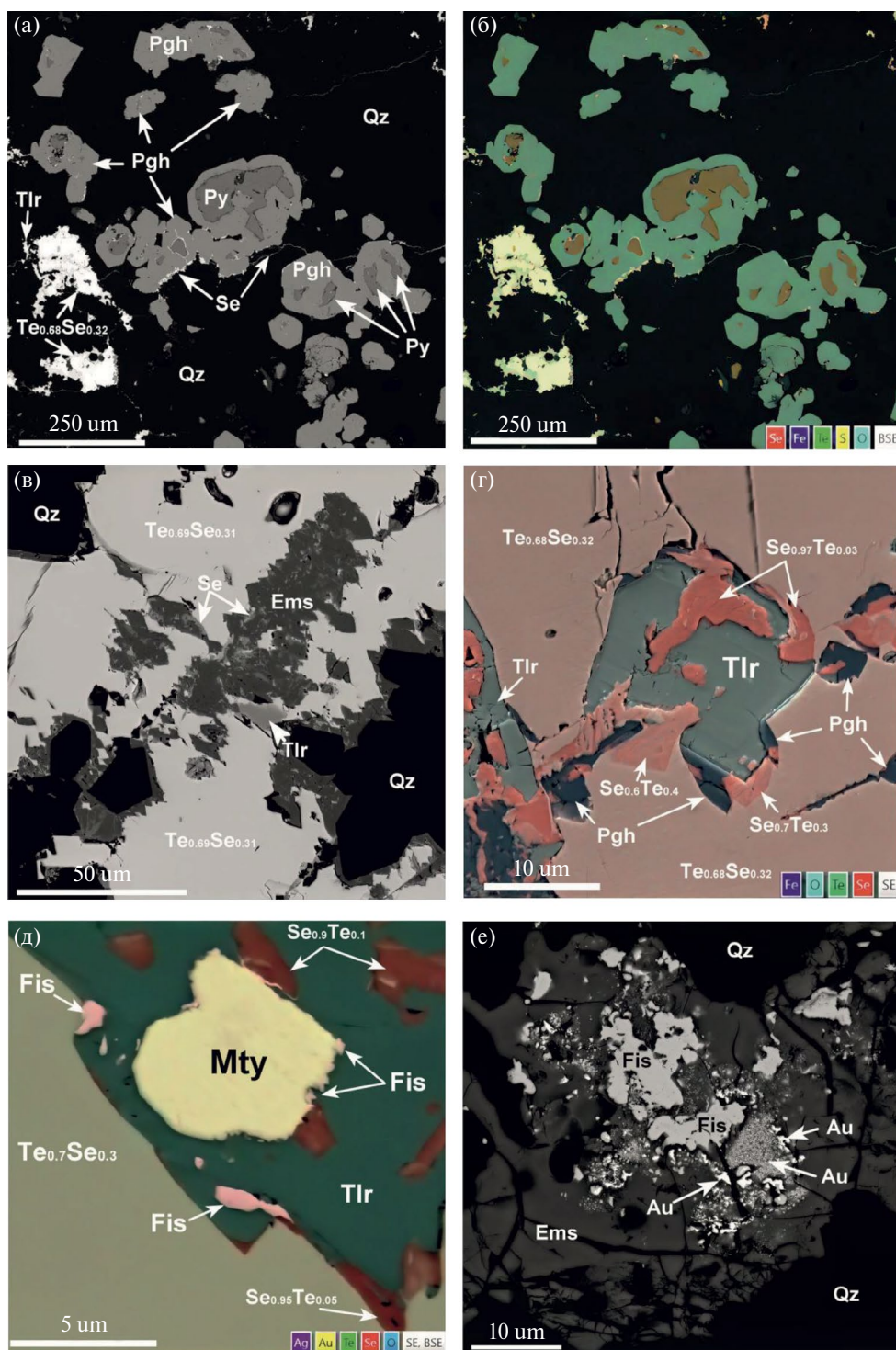
Особенностью изученного нами самородного селена является его необычный состав, варьирующий от чистого селена до теллуристого селена с содержанием до 42 ат.% Те (табл. 6, фиг. 7). В редких случаях в составе самородного селена присутствует сера, с диапазоном содержания от 0.1 до 5.3 мас.%, при этом теллур в обогащенных серой выделениях обычно отсутствует. Теллуристый селен является промежуточным продуктом окисления селенистого теллура при замещении его теллуридами. Выделение селена и селенидов в начальной стадии гипергенеза можно объяснить тем, что в кислых растворах с нарастающим окислительным потенциалом преобладающими формами теллура и серы являются хорошо растворимые в воде сульфаты и плохо растворимые теллуриды, тогда как селен сохраняется в своей восстановленной форме до более высоких значений фугитивности кислорода (McPhail, 1995). По мере развития процесса окисления теллуристый селен сменяется почти чистым селеном, а далее замещается селенсодержащими теллуридами и селенидами (мандариноит).

Фишессерит Ag₃AuSe₂ — довольно широко распространенный минерал на многих Au–Ag месторождениях Камчатки, включая Озерновское месторождение (Спиридонов и др., 2009, 2014). Но он обычно не образует сколько-нибудь значимых скоплений. Этот минерал может

Таблица 6. Химический состав (мас.%) самородного теллуристого селена из Озерновского месторождения

Элемент	Среднее*	Мин.	Макс.	1	2	3	4	5
S	0.50	нпо	5.28	нпо	нпо	2.57	2.04	0.11
Se	84.91	47.67	99.75	64.11	81.28	90.27	97.7	97.88
Te	14.55	нпо	52.88	35.00	19.79	7.37	нпо	1.21
Сумма	99.96	97.58	101.96	99.11	101.07	100.21	99.74	99.2
Доля в твердом растворе, ат. %:								
S	1.19	—	12.12	—	—	6.25	4.88	0.27
Se	88.70	59.30	98.97	74.75	86.91	89.24	95.12	98.97
Te	10.10	—	40.70	25.25	13.09	4.51	—	0.76

Примечание. * — средние значения из 56 анализов и выборка наиболее характерных составов (1–5).



Фиг. 13. Формы выделений гипергенных минералов, замещающих первичные рудные минералы. Снимки в отраженных (BSE) и вторичных (SE) электронах: а, б — поит (Pgh) замещает кристаллы пирита в кварце, каемки самородного селена вокруг некоторых реликтовых зерен пирита в поите и на его контактах с кварцем, BSE (а) и изображение в искусственных цветах (б) — наложение на изображение BSE рентгеновских карт распределения элементов (Se, Fe, Te, S, O); в — метакристаллы эммонсита (Ems) замещают селенистый теллур вдоль трещин спайности и контактов с кварцем, BSE; г — в селенистом теллуре — метакристаллы теллурита (Tlr) с вростками поита и теллуристого селена переменного состава, снимок SE с наложением цветных рентгеновских карт Fe, O, Te, Se; д — реликтовый кристалл малейваемита заключен в теллуристе, заместившем селенистый теллур, вдоль контактов малейваемита с теллуристом развита прерывистая тонкая кайма фишессерита (Fis), снимок SE+BSE с наложением цветных рентгеновских карт Ag, Au, Te, Se, O; е — фишессерит (Fis) замещается эммонситом с выделением тонкодисперсного самородного золота, снимок BSE.

быть как гипогенным, отлагающимся обычно на поздних стадиях рудообразующего процесса, так и гипергенным. В исследованной нами серии образцов он встречается в виде каемок на контакте малейваймита с теллуридом, а также в виде мелких включений в теллуриде, эммонсите и поите. Фишессерит замещает зерна малейваймита и в свою очередь замещается теллуридом и эммонситом, с выделением самородного золота, самородного селена и науманнита. Вероятно, здесь он имеет гипергенное происхождение. Состав минерала приводится в табл. 7. В парагенезисе с фишессеритом изредка встречается науманнит.

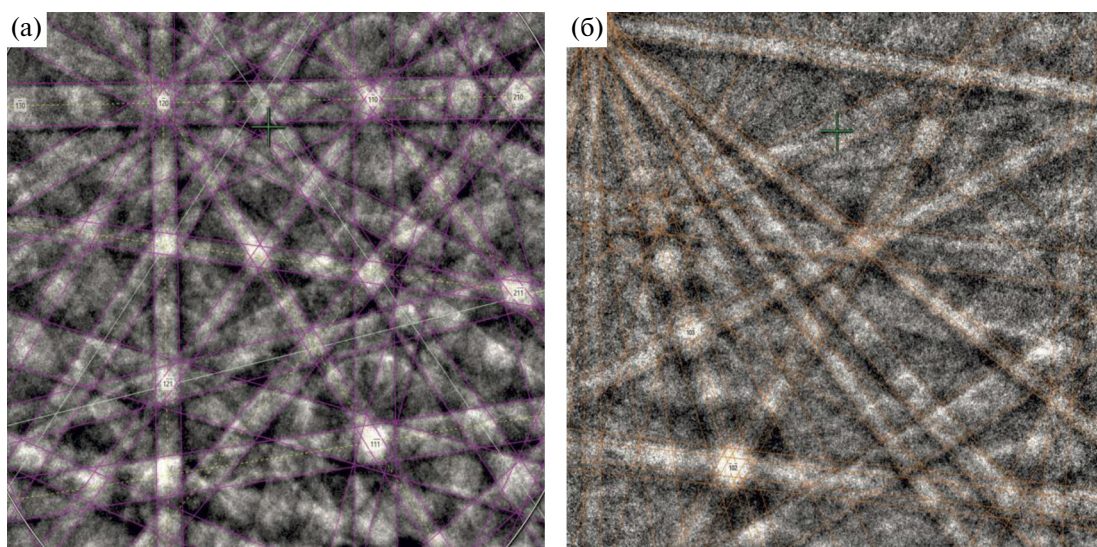
Теллурид (TeO_2) и $(\text{Te}, \text{Se})\text{O}_2$. Наиболее распространен среди гипергенных минералов в изученных образцах. Диагностирован по составу (табл. 8) и структуре (фиг. 14). Нередко содержит примесь селена (до 9.5 мас.%), но чаще встречаются разновидности без примесей, особенно среди поздних генераций минерала, формирующих тонкие мономинеральные прожилки в окисленных рудах.

Поит $\text{Fe}^{3+}_2(\text{TeO}_3)_2(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Второй по распространенности среди гипергенных минералов, уступает только теллуриду. Диагностирован по составу (см. табл. 8) и структуре (см. фиг. 14). В большинстве анализов отмечена примесь селена в диапазоне от 0.19 до 8.12 мас.% SeO_2 , в некоторых — примесь мышьяка до 1.2

мас.% As_2O_3 . Минерал содержит воду, но ее прямое определение методами ЭДС и ВДС件 невозможно. Кроме того, при воздействии электронного зонда минерал может нагреваться и разрушаться с потерей воды, искажая результаты анализа (завышение суммы определяемых компонентов). Для устранения такого эффекта при анализе этого и других водосодержащих минералов мы использовали ускоряющее напряжение 10 кэВ и ток зонда не выше 1 нА. Содержание воды рассчитывалось исходя из теоретической формулы минерала, в которую включено 3 молекулы H_2O .

Эммонсит $\text{Fe}^{3+}_2(\text{TeO}_3)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Часто встречается в сростании с поитом и теллуридом, а также выделяется в виде цепочек мелких идиоморфных кристаллов, замещающих селенистый теллурид вдоль его контактов с кварцем и по трещинам спайности. Диагностирован по составу (см. табл. 8). Помимо основных компонентов обычно содержит примесь селена (до 4 мас.%).

Мандариноидит $\text{Fe}^{3+}_2(\text{Se}^{4+}\text{O}_3)_3 (6-x)\text{H}_2\text{O}$ ($x = 0.0-1.0$). Редкий минерал, ранее он не отмечался на месторождении, а также не был описан на территории России. Диагностирован по составу (см. табл. 8). Он встречается в виде перистых выделений в пустотках выщелачивания среди кварца и, по-видимому, относится к числу наиболее поздних среди гипергенных селенидов-теллуридов.



Фиг. 14. Индексированные картины дифракции отраженных электронов теллурита и поита: а — картина ДОО теллурита индексирована в ромбической сингонии, пространственная группа 61 (Pbca), соответствует теллуриду из базы данных ICSD26844 с СУО 0.20; б — картина ДОО поита индексирована в ромбической сингонии, пространственная группа 33 (Pna2_1), соответствует поиту из базы данных COD9011949 с СУО 0.23.

Таблица 7. Химический состав (мас.%) фишессерита из Озерновского месторождения

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8
Au	27.1	25.35	28.14	28.62	27.86	27.74	31.7	27.85
Ag	49.47	48.99	47.22	47.36	47.37	48.19	44.35	49.59
S	нпо	нпо	0.11	0.20	0.17	0.08	0.38	0.26
Se	22.28	21.68	22.35	22.61	22.01	22.36	21.79	21.92
Te	0.83	2.68	0.89	0.93	1.16	0.7	0.82	1.12
Total	99.68	98.7	98.71	99.72	98.57	99.07	99.04	100.74
Коэффициенты в расчете на 6 атомов в формуле								
Au	0.94	0.88	0.98	0.99	0.97	0.96	1.11	0.95
Ag	3.11	3.1	3.01	2.98	3.02	3.05	2.85	3.08
S	—	—	0.02	0.04	0.04	0.02	0.08	0.06
Se	1.91	1.87	1.94	1.94	1.91	1.93	1.91	1.86
Te	0.04	0.14	0.05	0.05	0.06	0.04	0.04	0.06
Au+Ag	4.05	3.98	3.99	3.97	3.99	4.01	3.96	4.03
Se+S+Te	1.95	2.01	2.01	2.03	2.01	1.99	2.04	1.97

Таблица 8. Химический состав (мас.%) теллурита, поита, эммонсита и мандариноита Озерновского месторождения

Минерал	Теллурит		Поит		Эммонсит		Мандариноит	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Fe₂O₃	нпо	нпо	26.25	25.97	22.33	22.23	24.81	24.10
CuO	нпо	нпо	0.26	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
As₂O₃	нпо	нпо	0.69	нпо	нпо	нпо	1.38	1.52
SO₃	нпо	нпо	12.19	13.10	0.24	нпо	1.16	1.62
SeO₂	0.20	9.39	0.19	1.93	3.67	3.71	29.67	23.50
TeO₂	100.26	90.93	50.95	49.78	67.88	67.54	28.23	32.70
Сумма	100.46	100.32	90.53	90.78	94.12	93.48	85.25	83.44
H₂O (расч.)	—	—	8.67	8.84	5.39	5.32	14.22	16.47
Сумма+H₂O	100.46	100.32	99.20	99.62	99.51	98.80	99.47	99.91
Коэффициенты в формуле, расчет по кислороду								
O	2	2	10	10	9	9	9	9
Fe	—	—	2.05	1.99	1.87	1.88	1.97	1.98
Cu	—	—	0.02	—	—	—	—	—
As	—	—	0.04	—	—	—	0.09	0.10
S	—	—	0.95	1.00	0.02	—	0.09	0.13
Se	—	0.13	0.01	0.11	0.22	0.23	1.70	1.39
Te	1.00	0.87	1.99	1.90	2.84	2.86	1.12	1.35
H₂O	—	—	3	3	2	2	5	6
Se+S+Te	1.00	1.00	2.95	3.01	3.08	3.09	2.91	2.87
Se+Te	1.00	1.00	2.00	2.01	3.06	3.09	2.82	2.74

ОБСУЖДЕНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ

Месторождение Озерновское по характеру околорудных метасоматитов и особенностям состава руд является ярким представителем месторождений кислотно-сульфатного/высоко-сульфидизированного (КС/ВС) типа в Курило-Камчатском регионе (Коваленкер и др., 1989; Округин, 2003; Kovalenker, Plotinskaya, 2005; Okrugin et al., 2022; Tolstykh et al., 2023). Для подобных месторождений (Heald et al., 1987; Hedenquist, 1987; White, Hedenquist, 1990; Arribas, 1995; Hedenquist, Arribas, 2000) характерен определенный тип минералообразующих флюидов, отличающихся, помимо высоких значений фугитивности серы, как правило, низкими величинами pH, а также относительно высокой степенью окисления серы в зоне рудоотложения. Характерными признаками месторождений КС/ВС-типа являются жильные и прожилковые сульфидно-кварцевые золотые руды, расположенные в зонах вторичных кварцитов и аргиллизитов, содержащих, помимо кварца, минералы группы алунита и каолинита, а рудные минералы, помимо распространенного пирита, представлены энаргитом, люционитом, теннантитом, голдфилдитом, высокопробным золотом, теллуридами Au и Ag (White, Hedenquist, 1990). К месторождениям этого типа в регионе Курило-Камчатской вулканической дуги отнесены также Малетойваям (Tolstykh et al., 2023) и Прасоловское (Kovalenker, Plotinskaya, 2005). За пределами региона заметными чертами сходства с Озерновским месторождением обладают месторождения Кочбулак и, в особенности, Кайрагач, расположенные в верхнепалеозойских вулканитах Кураминской металлогенической провинции Бельтау-Кураминского вулcano-плутонического пояса Центрального Тянь-Шаня (Коваленкер и др., 1997; Коваленкер и др., 2003).

Ряд других месторождений в Камчатском регионе также обладают признаками КС/ВС-типа минерализации, но они требуют более внимательного изучения, так как характерные для КС/ВС-типа метасоматиты и золото-сульфидно-кварцевые жилы соседствуют в одних и тех же рудных полях и даже в одних и тех же рудовмещающих структурах с рудами адуляр-серицитового, низкосульфидизированного типа (АС/НС) в результате широко развитого телескопирования минеральных ассоциаций и совмещения более ранних руд с более поздними в связи с меняющимися условиями минералообразования

внутри активных вулканотектонических структур. В качестве такого примера можно привести месторождение Мутновское (Петренко и др., 2001; Takahashi et al., 2006; Округин и др., 2010 и материалы авторов). На Озерновском месторождении также имеются проявления минерализации АС/НС-типа (участок Каюлковский).

Названные выше три месторождения КС/ВС-типа отличаются от большинства других вулканогенных золото-серебряных месторождений как в регионе, так и за его пределами необычно широким распространением и разнообразием минералов — селенидов, теллуридов и селенотеллуридов. Минералы теллура и селена отмечаются и на камчатских месторождениях, относящихся к АС/НС-типу, но при этом теллуриды доминируют в распространении и, за редким исключением, не образуют парагенезисы с селенидами. Наиболее богатая Au—Ag-теллуридная минерализация развита в рудах Агинского золоторудного месторождения (Андреева и др., 2010; Andreeva et al., 2013). На некоторых других месторождениях АС/НС-типа, например, Спрут и Асачинское, имеются проявления Au—Ag-селенидной минерализации, а теллуриды представлены скудным набором минералов, преимущественно, соединениями с серебром (Округин и др., 2014; Шишканова, Лобзин, 2014; Яблокова и др., 2014).

Особенности текстур кварцевых жил Озерновского золоторудного месторождения, широкое распространение гидротермальных брекчий и взаимоотношения рудных минералов указывают на крайне нестабильные условия рудоотложения. Образование основной массы руд связано с многократно повторяющимися однотипными циклами гидротермального процесса. Каждый цикл начинался с дробления более раннего материала жил и цементации его новой генерацией кварца в парагенезисе с новой порцией рудных минералов. В каждом цикле осаждения выделяется от одной до пяти стадий отложения рудных минералов, частично повторяющих друг друга, но с выпадением одних парагенезисов и появлением других, соответствующих меняющимся условиям. К числу наиболее ранних минералов каждого цикла относятся пирит, а также существенно менее распространенные молибденит, а на относительно глубоких горизонтах — касситерит, шеелит и сульфо-селеностаннаты меди (Vymazalova et al., 2024). Далее следует отложение энаргита-люционита и/или блеклых руд (с трендом на увеличение содержания теллура и селена от раннего теннантита и тетраэдрита к более позднему голдфилдиту), а также теллуридов

и селенотеллуридов висмута, сурьмы, золота, серебра, самородного теллура и самородного золота. Пульсирующий характер гидротермального процесса отмечается и в течение каждого цикла, находя свое отражение в ярко выраженной зональности внутри кристаллов практически всех рудных минералов — от пирита до блеклых руд и селенотеллуридов висмута. Зональность чаще всего выражается в переменных соотношениях между серой и селеном и/или между теллуром и селеном в соответствующих минералах. Особенно широкими вариациями состава отличаются блеклые руды. На месторождении найдены все известные минеральные виды теллуросодержащих блеклых руд, а также несколько новых неназванных (Kozlov, Okrugin, 2022).

Минеральная ассоциация малетойваямита с селенистым теллуром обнаружена в верхней, относительно слабо эродированной части рудообразующей системы Озерновского месторождения и отличается от остальных развитых на месторождении золотоносных ассоциаций не только по составу, но, вероятно, и по условиям отложения.

Как отмечалось выше, для более эродированных частей системы, а также более ранних стадий рудоотложения, характерны минеральные парагенезисы с самородным золотом, теллуридами золота, селенотеллуридами висмута, селенистым голдфилдитом и теннантит-тетраэдритом, а также самородным теллуром без примесей селена. На глубине > 100 м также встречаются парагенезисы, включающие касситерит, шеелит, селениды и сульфоселениды олова и меди. По данным В.М. Округина (Okrugin et al., 2020), отложение большей части рудных минералов месторождения связано с многократно повторяющимися циклами вскипания, дросселирования и параллельного с ними образования гидротермальных breccий.

Малетойваямит Озерновского месторождения, в отличие от своего аналога, найденного на месторождениях рудного поля Малетойваям, содержит постоянную примесь серебра до 2 мас.% при полном отсутствии примеси серы и тесно ассоциирует с селен-теллуровыми твердыми растворами, а также с другими исключительно редкими минералами — сульфоселенотеллуридами и селенидами (бамболлаит и блеклые руды новой группы усталечита). Отсутствие серы в структуре малетойваямита может быть объяснено понижением активности восстановленных форм серы вследствие их окисления и аномально

высоким значением отношения H_2Se/H_2S в процессе его отложения. Условия формирования малетойваямит-селенотеллуридной ассоциации Озерновского месторождения весьма сходны с описанными Н.Д. Толстых и др. (Tolstykh et al., 2018) условиями образования месторождения Гачинг Малетойваямского рудного поля, в котором золотое оруденение связано с алунитовыми вторичными кварцитами и, по-видимому, формировалось в обстановке конденсации и окисления магматогенной парогазовой смеси вблизи палеоповерхности.

Парагенезис селенистого теллура с малетойваямитом в Озерновском месторождении мог образоваться в верхней части кипящей гидротермальной системы при смешивании восходящей гетерогенной водно-парогазовой смеси (H_2O , H_2S , H_2Se , H_2Te) с обогащенными кислородом приповерхностными водами. В результате образовался кислый флюид, в котором сера была представлена преимущественно в форме высокорастворимого сульфат-иона, а окисление H_2Se и H_2Te приводило к осаждению селенсодержащего теллура и ряда сопутствующих обогащенных селеном рудных минералов из-за их низкой растворимости.

Описанная в этой статье вторая находка малетойваямита позволяет считать, что он не уникален для камчатских месторождений и в дальнейшем мы сможем перевести его в число минералов-индикаторов Au-оруденения. Присутствие малетойваямита в парагенезисе с селенистым теллуром на двух объектах кислотно-сульфатного типа эпитермальных месторождений Камчатки может свидетельствовать о весьма специфических физико-химических условиях рудоотложения в приповерхностной части гидротермальной системы и служить одним из признаков незначительного уровня эрозии месторождений.

При этом необходимо отметить, что в условиях близповерхностного рудоотложения в сильно окислительной обстановке наблюдается определенная конвергенция гипогенных и гипергенных процессов: начальные стадии окисления руд внутри активных вулканотектонических структур могут быть связаны с обогащением кислородом термальных вод конечных стадий единого гидротермального процесса при одновременном понижении температуры ниже 100 °C либо с проявлениями независимой более поздней низкотемпературной гидротермальной деятельности. Об этом свидетельствуют крайне интересные взаимоотношения и парагенезисы

некоторых оксидных соединений золота, сурьмы и железа с селенидами и сульфидами золота (Tolstykh et al., 2023). Для месторождения Малетойваям был предложен механизм образования ассоциирующих с малетойваямитом селен-теллурических твердых растворов как следствие теллуризации калаверита с последующим замещением его на горчичное самородное золото (Tolstykh et al., 2023), однако такой сценарий не может быть применим к Озерновскому месторождению ввиду отсутствия в ассоциации с малетойваямитом калаверита и самородного золота. С подобными вторичными процессами “типогенного гипергенеза” может быть связано образование части самородного селена, некоторых селенидов и сульфидов золота (фишессерит, петровскаит, ауроселенид) вместе с тонкодисперсным (горчичным) самородным золотом, как на Озерновском, так и на Агинском и ряде других месторождений региона (Okrugin et al., 2014), но их нелегко отделить от результатов воздействия обычного гипергенеза на необычные минеральные парагенезисы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Озерновское эпипермальное Au–Te–Se месторождение относится к группе месторождений кислотно-сульфатного высокосульфидизированного (КС/ВС) типа, но в то же время обладает рядом отличительных особенностей минерального состава, связанных с необычно широким распространением в рудах селенотеллуридов, сульфоселенидов и селенидов. Изучение таких руд расширяет наши представления о месторождениях КС/ВС-типа.

2. На месторождении обнаружена и изучена новая продуктивная минеральная ассоциация руд, в которой главным минералом золота является селенотеллурид золота — малетойваямит, в тесном парагенезисе с чрезвычайно редкими минералами — бамболлаитом, арсеноусталечитом и стибиоусталечитом. Эти минералы до сих пор были известны только в местах своего открытия. Они находятся в тесной ассоциации с селенистым теллуридом, также весьма редким соединением, отмеченным не более чем на 1-2 других месторождениях в мире.

3. Парагенезис селенистого теллура с малетойваямитом, бамболлаитом и усталечитом мог образоваться при смешивании рудосодержащего гидротермального флюида с обогащенными кислородом приповерхностными

водами. По-видимому, он является признаком незначительного уровня эрозионного среза месторождения.

4. Озерновское месторождение обладает определенными чертами сходства по минеральному составу и условиям образования руд с некоторыми другими месторождениями КС/ВС-типа, расположенными как в пределах Курило-Камчатской вулканической дуги (Малетойваям, Прасоловское), так и за пределами региона — в верхнепалеозойском Бельтау-Кураминском вулканоплутоническом поясе Центрального Тянь-Шаня (Кайрагач, Кочбулак).

БЛАГОДАРНОСТИ

Инициатором и организатором проведения этих исследований выступил Виктор Михайлович Округин, светлой памяти которого мы посвящаем свою работу.

Авторы выражают искреннюю признательность рецензентам, ценные комментарии и замечания которых позволили улучшить текст статьи, а также руководству и геологам АО “СиГМА” за возможность изучения образцов руд Озерновского месторождения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования проводились в рамках планов НИР лаборатории вулканогенного рудообразования Института Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН, финансируемых Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева Е.Д., Округин В.М., Матсуеда Х., Буханова Д.С. Особенности формирования золото-серебряной и теллуридной минерализации Агинского месторождения (Центральная Камчатка) // Материалы конференции “Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования”. М.: ИГЕМ РАН, 2010. С. 391–392.
- Вакин М.Е., Наумова О.Н. Геолого-структурная позиция и условия локализации богатых руд на Озерновском золото-серебряном месторождении (Камчатка) // Руды и металлы. 1994. № 2. С. 97–104.
- Вартанян С.С., Орешин В.Ю., Ершова Н.А. и др. Определить критерии локализации и вещественный состав золотоносных образований Озерновского рудного поля. М.: ФГБУ ЦНИГРИ, 1991.

- Демин А.Г. Озерновское месторождение как новый перспективный рудный объект Центральной Камчатки с комплексными рудами на золото, вольфрам, серебро и медь (своеобразие геологического строения, рудный потенциал и методика изучения) // Золото и технологии. 2015. № 1. С. 22–30.
- Коваленкер В.А., Некрасов И.Я., Сандомирская С.М. и др. Сульфидно-селенидно-теллуридная минерализация эпипетермальных проявлений Курило-Камчатского вулканического пояса // Минералогический журн. 1989. Т. 11. № 6. С. 3–18
- Коваленкер В.А., Плотинская О.Ю., Прокофьев В.Ю. и др. Минералогия, геохимия и генезис золото-сульфидно-селенидно-теллуридных руд месторождения Кайрагач (Республика Узбекистан) // Геология руд. месторождений. 2003. Т. 45. № 3. С. 195–227.
- Коваленкер В.А., Сафонов Ю.Г., Наумов В.Б., Русинов В.Л. Эпипетермальное золототеллуридное месторождение Кочбулак (Узбекистан) // Геология руд. месторождений. 1997. Т. 39. № 2. С. 127–152.
- Куриная У.Н., Лапухов А.С., Гузман Б.В. Типоморфизм руд Асачинского эпипетермального Au–Ag месторождения (Южная Камчатка) // Материалы конференции “Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования”. М.: ИГЕМ РАН, 2010. 291 с.
- Литвинов А.Ф., Марковский Б.А., Патока М.Г. (редакторы) Карта полезных ископаемых Камчатской области масштаба 1:500000. Краткая объяснительная записка. Каталог месторождений, проявлений, пунктов минерализации и ореолов рассеяния полезных ископаемых. Петропавловск-Камчатский: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 1999.
- Наумова О.А. Гидротермально-измененные породы золото-серебряных месторождений Центральной и Южной Камчатки. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1996.
- Округин В.М., Андреева Е.Д., Яблокова Д.А. и др. Новые данные о рудах Агинского золото-теллуридного месторождения (Центральная Камчатка) // Материалы конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 335–341.
- Округин В.М., Ким А.У., Москалева С.В. и др. О рудах Асачинского золото-серебряного месторождения (Южная Камчатка) // Материалы конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 330–334.
- Округин В.М., Матсуеда Х., Цусима Н. и др. Мутновское (Камчатка), Тойеха (Япония) — крупные комплексные вулканогенные рудные объекты (генезис, поисковые критерии) // Материалы конференции “Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования”. М.: ИГЕМ РАН, 2010. 291 с.
- Петренко И.Д. Золото-серебряная формация Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Изд-во СПб. картографической фабрики ВСЕГЕИ, 1999. 115 с.
- Спиридонов Э.М., Игнатов А.М., Шубина Е.В. Эволюция блеклых руд вулканогенного месторождения Озерновское, Камчатка // Известия АН СССР. 1990. № 9. С. 82–94.
- Спиридонов Э.М., Округин В.М. Селенистый голдфиллит — новая разновидность блеклых руд // Докл. АН СССР. 1984. Т. 280. № 2. С. 476–478.
- Спиридонов Э.М., Филимонов С.Ф., Брызгалов И.А. Твердый раствор фишессерит-науманнит (Ag, Au)₂Se в рудах вулканогенного месторождения золота Озерновское, Камчатка // Докл. РАН. 2009. Т. 425. № 3. С. 391–394.
- Спиридонов Э.М., Филимонов С.В., Янакурт В.О. Селенистый голдфиллит и твердый раствор фишессерит AuAg₃Se₂ — петцит AuAg₃Te₂ в рудах вулканогенного месторождения золота Озерновское (Камчатка) // Докл. РАН. 2014. Т. 458. № 2. С. 209–213.
- Трухачев А.В. Формирование и закономерности распределения рудного золота Озерновского рудного поля в пределах участка Центральной Камчатки // Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Геология. 2008. № 2. С. 216–221.
- Трухачев А.В. Зависимость концентрации самородного золота от типа вмещающих пород в пределах Озерновского рудного поля участка “Хомут” (Центральная Камчатка) // Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Геология. 2011. № 1. С. 164–175.
- Шишканова К.О., Лобзин Е.И. Сфалерит в рудах месторождения Спрут // Материалы XII молодежной конференции “Исследования в области наук о Земле”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 39–50.
- Щепотьев Ю.М., Вартамян С.С., Орешин В.Ю., Гузман Б.В. Золоторудные месторождения островных дуг Тихого океана. М.: Недра, 1989.
- Яблокова Д.А., Зобенько О.А., Лобзин Е.И. Пирит месторождения Спрут (Северная Камчатка) // Материалы молодежной конференции “Исследования в области наук о Земле”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 17–30.

- Andreeva E.D., Matsueda H., Okrugin V., Takahashi R., Ono S.* Au–Ag–Te Mineralization of the Low-Sulfidation Epithermal Aginskoe Deposit, Central Kamchatka, Russia // *Resource Geology*. 2013. V. 63. № 4. P. 337–349. URL: <https://doi.org/10.1111/rge.12013>
- Arribas Jr A.* Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid // *Mineralogical Association of Canada Short Course*. 1995. V. 23. P. 419–454.
- Biagioni C., George L.L., Cook N.J. et al.* The tetrahedrite group: Nomenclature and classification // *American Mineralogist*. 2020. V. 105. № 1. P. 109–122. URL: <https://doi.org/10.2138/am-2020-7128>
- Ghosh G., Sharma R.C., Li D.T., Chang Y.A.* The Se–Te (selenium–tellurium) system // *Journal of phase equilibria*. 1994. V. 15. P. 213–224. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02646370>
- Harris, D.C., Nuffield, E.W.* Bambollaite, a new copper telluro-selenide // *Canadian Mineralogist*. 1972. V. 11. P. 738–742.
- Heald P., Foley N.K., Hayba D.O.* Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits; acid-sulfate and adularia-sericite types // *Economic Geology*. 1987. V. 82. № 1. P. 1–26. URL: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.1.1>
- Hedenquist J.W.* Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal systems in the Circum Pacific basin // *Circum-Pacific Energy and Mineral Resources Conference*, Singapore, 1987. P. 513–524.
- Hedenquist J.W., Arribas A., Gonzalez-Urien E.* Exploration for epithermal gold deposits. Reviews // *SEG Reviews*. 2000. V. 13. P. 245–277. URL: <https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>
- Kasatkin A.V., Nestola F., Plášil J. et al.* Tolstykhite, $\text{Au}_3\text{S}_4\text{Te}_6$, a new mineral from Maletoyvayam deposit, Kamchatka peninsula, Russia // *Mineralogical Magazine*. 2023. V. 87. № 1. p. 34–39. URL: <https://doi.org/10.1180/mgm.2022.109>
- Kovalenker V.A., Plotinskaya O.Y.* Te and Se mineralogy of Ozernovskoe and Prasolovskoe epithermal gold deposits, Kuril-Kamchatka volcanic belt // *Geochemistry, Mineralogy and Petrology* (Sofia). 2005. V. 43. P. 118–124.
- Kozlov V., Okrugin V.* New data on Se-bearing minerals of the tetrahedrite group from Ozernovskoe deposit (Kamchatka, Russia) and some proposed additions to the goldfieldite subgroup // *Preprint*. 2022. P. 1–28. URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24284.46727>
- McPhail D.C.* Thermodynamic properties of aqueous tellurium species between 25 and 350° // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1995. V. 59. № 5. P. 851–866. URL: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)00353-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)00353-X)
- Okrugin V.M., Andreeva E., Etschmann B. et al.* Microporous gold: Comparison of textures from Nature and experiments // *Amer. Miner.* 2014. V. 99. № 5–6. P. 1171–1174. URL: <https://doi.org/10.2138/am.2014.4792>
- Okrugin V.M., Vymazalová A., Kozlov V.V. et al.* Svetlanaite, SnSe , a new mineral from the Ozernovskoe deposit, Kamchatka peninsula, Russia // *Mineralogical Magazine*. 2022. V. 86. № 2. P. 234–242. URL: <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.80>
- Pekov I.V., Britviz S.N., Pletnev P.A. et al.* Ozernovskite, IMA 2021–059 // *CNMNC Newsletter* 63; *Mineralogical Magazine*. 2021. V. 85. P. 910–915.
- Pekov I.V., Britvin S.N., Pletnev P.A. et al.* Rudolfhermannite, IMA 2021–099 // *CNMNC Newsletter* 66, *Eur. J. Mineral.* 2022 34. URL: <https://doi.org/10.5194/ejm-34-253-2022>
- Pohl D., Liessmann W., Okrugin, V.M., Rietveld* analysis of selenium-bearing goldfieldites. *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie, Monatshefte*. 1996. V. 1. P. 1–8.
- Pouchou J.L., Pichoir F.* Quantitative analysis of homogeneous or stratified microvolumes applying the model “PAP” // *Electron probe quantitation*. 1991. P. 31–75.
- Sejkora J., Biagioni C., Škácha P., Musetti S., Mauro D.* Arsenoustalečite, IMA 2022–116. *CNMNC Newsletter* 72 // *Mineralogical Magazine*. 2023. V. 87. P. 512–518. URL: <https://doi.org/10.1180/mgm.2023.21>
- Sejkora J., Plášil J., Makovicky E.* Stibioústalečite, $\text{Cu}_6(\text{Sb}_2\text{Te}_2)\text{Se}_{13}$, the first Te–Se member of tetrahedrite group, from the Ústaleč, Czech Republic // *J. of Geosciences*. 2022. V. 67. P. 275–283. URL: <http://dx.doi.org/10.3190/jgeosci.359>
- Tolstykh N., Kasatkin A., Nestola F. et al.* Aurosele-nide, AuSe , a new mineral from Maletoyvayam deposit, Kamchatka peninsula, Russia // *Mineralogical Magazine*. 2023. V. 87. № 2. P. 284–291. URL: <https://doi.org/10.1180/mgm.2022.137>
- Tolstykh N., Shapovalova M., Podlipsky M.* Au–Ag–Se–Te–S Mineralization in the Maletoyvayam High-Sulfidation Epithermal Deposit, Kamchatka Peninsula // *Minerals*. 2023. V. 13. № 3. P. 420–440. URL: <https://doi.org/10.3390/min13030420>
- Tolstykh N.D., Tuhý M., Vymazalová A., Laufek F., Plášil J., Košek F.* Gachingite, $\text{Au}(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)_{0.2 \approx x \leq 0.5}$, a new mineral from Maletoyvayam deposit, Kamchatka peninsula, Russia // *Mineralogical Magazine*. 2022.

- V. 86. № 2. P. 205–213. URL: <https://doi.org/10.1180/mgm.2022.9>
- Tolstykh N.D., Tuhý M., Vymazalová A. et al.* Maletoyvayamite, $\text{Au}_3\text{Se}_4\text{Te}_6$, a new mineral from Maletoyvayam deposit, Kamchatka peninsula, Russia // Mineralogical Magazine. 2020. V. 84. № 1. P. 117–123. URL: <https://doi.org/10.1180/mgm.2019.81>
- Tolstykh N., Vymazalová A., Tuhý M., Shapovalova M.* Conditions of formation of Au–Se–Te mineralization in the Gaching ore occurrence (Maletoyvayam ore field), Kamchatka, Russia // Mineralogical Magazine. 2018. V. 82. № 3. P. 649–674. URL: <https://doi.org/10.1180/mgm.2018.84>
- Vymazalová A., Kozlov V.V., Laufek F. et al.* Okruginite, Cu_2SnSe_3 , a new mineral from the Ozernovskoe deposit, Kamchatka peninsula, Russia // Mineralogical Magazine. 2024. V. 88. № 1. P. 31–39. doi:10.1180/mgm.2023.78
- White N.C., Hedenquist J.W.* Epithermal environments and styles of mineralization: variations and their causes, and guidelines for exploration // J. of Geochemical Exploration. 1990. V. 36. № 1–3. P. 445–474. URL: [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90063-G](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90063-G)

NEW TYPE OF GOLD-BEARING MINERALIZATION AT THE OZERNOVSKOE Au-Te-Se EPITHERMAL DEPOSIT (CENTRAL KAMCHATKA, RUSSIA)

Sh.S. Kudaeva^{a,*}, V.V. Kozlov^{b,**}, E.D. Skilskaia^a, A.V. Sergeeva^a,
N.D. Tolstykh^c, I.A. Shkilev^d

^a*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky, blvd. Piip 9, 683006*

^b*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Russia,
Россия, Moscow, Staromonetny lane 35, 119017*

^c*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk,
Russia, ave. Akademika Koptyuga 3, 630090*

^d*JSC Siberian Mining and Metallurgical Alliance, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky,
106 Mishennaya str., 683016*

Abstract. The ores of the Ozernovsky Au-Te-Se epithermal volcanogenic deposit are located in linear zones of secondary quartzites in volcanic rocks of Neogene age and are represented by linear stockworks and tubes of quartz hydrothermal breccias interspersed with ore minerals — sulfides, tellurides and selenides. A new type of gold-bearing mineralization has been discovered and studied on the upper horizon of the deposit. The main gold mineral is maletoyvayamite ($\text{Au}_3\text{Se}_4\text{Te}_6$), which forms small inclusions in selenium native tellurium, together with micro inclusions of other, usually also very rare, minerals — bambollaite ($\text{Cu}_{1-x}(\text{Se}, \text{S}, \text{Te})_2$), fahlores of the goldfieldite and ústalečite subgroups. This mineral complex could have been formed in the upper part of a boiling hydrothermal system as a result of mixing of the ascending flow of heterogeneous water-steam fluid with oxygen-enriched surface waters and oxidation of the reduced forms of sulfur, selenium and tellurium contained therein. The primary complex of ore minerals is usually partially replaced by several generations of hypogenic minerals: from native selenium and Au-Ag selenides of the early stage to tellurites and selenites of the late stage of oxidation.

Keywords: maletoyvayamite, bambollaite, ústalečite , arseno ústalečite , stibio ústalečite , Selen-tellurium, Ozernovskoe volcanogenic gold deposit, Kamchatka.