



## Новая золото-гачингит-селенодантопаитовая минеральная ассоциация в рудах Озерновского месторождения (Камчатка)\*<sup>1</sup>

Стрельников М.В.<sup>1</sup>, Ханин Д.А.<sup>1,2</sup>, Япаскерт В.О.<sup>1</sup>, Бритвин С.Н.<sup>3,4</sup>,  
 Плетнев П.А.<sup>1</sup>, Янсон С.Ю.<sup>3</sup>, Пеков И.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет; [sva240319600@yandex.ru](mailto:sva240319600@yandex.ru)

<sup>2</sup>Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

<sup>4</sup>Кольский научный центр РАН, Апатиты

Новая золото-гачингит-селенодантопаитовая минеральная ассоциация установлена в богатых самородным теллуром диккит-кварцевых жилах Озерновского месторождения (Камчатка). Для гачингита  $\text{Au}(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)$  и селенодантопаита  $\text{Ag}_5\text{Bi}_{13}\text{Se}_{22}$  это второе местонахождение в мире. Впервые получены порошковые рентгеновские данные для обоих минералов. Параметры элементарной ячейки: гачингит:  $a = 7.557(7)$ ,  $b = 5.740(6)$ ,  $c = 8.940(6)$  Å,  $V = 387.7(4)$  Å<sup>3</sup>; селенодантопаит:  $a = 13.78(2)$ ,  $b = 4.161(8)$ ,  $c = 19.51(4)$  Å,  $\beta = 106.28(13)^\circ$ ,  $V = 1074(2)$  Å<sup>3</sup>. Гачингит и селенодантопаит (ранее известный здесь как «селенопавонит») образуют густую вкрапленность в кварце вместе с баритом, гипогенным золотом, богдановичитом и парагуанахуатитом. Размер зерен гачингита 5–80 мкм, химический состав  $\text{Au}(\text{Te}_{0.67}\text{Se}_{0.33})$ – $\text{Au}(\text{Se}_{0.51}\text{Te}_{0.49})$ . Встречен потенциально новый минерал – Se-доминантный аналог гачингита состава  $\text{Au}(\text{Se}_{0.60}\text{Te}_{0.40})$ . Селенодантопаит (индивиды до 0.3 мм) близок по составу к конечному члену. Это вкпе с литературными данными позволяет считать ряд дантопаит  $\text{Ag}_5\text{Bi}_{13}\text{S}_{22}$  – селендантопаит полным. Селенодантопаит – одна из главных минеральных форм Ag на Озерновском месторождении. Самородное золото четко разделяется на два морфогенетических типа: яснокристаллическое гипогенное и «горчичное» гипергенное. Находки богатых скоплений гачингита и малетойваямита  $\text{Au}_3\text{Se}_4\text{Te}_6$  на Озерновском месторождении показывают, что селенотеллуриды Au распространены шире, чем считалось, и могут образовывать промышленно значимые скопления..

**Ключевые слова:** гачингит, селенодантопаит, селенотеллуриды золота, минералогия эпитермальных месторождений, Озерновское месторождение, Камчатка.

### Введение

Сегодня известно всего два природных селенида золота – фишессерит  $\text{Ag}_3\text{AuSe}_2$  и ауроселенид  $\text{AuSe}$ , а также два селенотеллурида золота – малетойваямит  $\text{Au}_3\text{Se}_4\text{Te}_6$  и гачингит  $\text{Au}(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)$ , где  $x$

= 0.2–0.5. Наиболее распространенным минералом из них является фишессерит. В небольшом количестве он встречается в различных благороднометалльных месторождениях мира. Гачингит,

\* В статье использованы материалы, представленные авторами на XXII Ферсмановской научной сессии, проводимой в ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты, 07–08 апреля 2025 года [Стрельников и др., 2025].

малетойваямит и ауроселенид были совсем недавно открыты на эпитермальном Au-Ag-рудопроявлении Гачинг в пределах Малетойваямского рудного узла на севере Камчатки, где являются важными минералами золота [Tolstykh et al., 2022, 2023<sub>1,2</sub>]. Малетойваямит и гачингит недолго считались эндемиками рудопроявления Гачинг: в недавнее время они в больших количествах встречены на другом эпитермальном золоторудном месторождении Камчатки – Озерновском [Кудаева и др., 2024; Стрельников и др., 2025<sub>1</sub>].

Гачингит из рудопроявления Гачинг по причине малого размера выделений не был исследован рентгенографически. Его кристаллографические и структурные характеристики авторами открытия этого минерала частично приведены по данным для синтетического аналога, а частично получены с использованием методов дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD) и КР-спектроскопии [Tolstykh et al., 2022].

Согласно литературным данным, одним из главных минералов серебра на Озерновском месторождении является «селеновый аналог павонита» (или «селенопавонит») – минерал, химический состав которого приблизительно отвечает формуле  $AgBi_3Se_3$  [Вартанян и др., 1991; Kovalenker, Plotinskaya, 2005]. Из-за малого размера выделений его рентгенографическое изучение не было выполнено. Недавно первооткрыватели нового минерала из месторождения Принц Эвжен (Princ Evžen), Чехия, – селенодантопаита  $Ag_5Bi_{13}Se_{22}$  – высказали предположение, что «селеновый аналог павонита» из Озерновского месторождения может быть идентичен этому минералу [Sejkorova et al., 2026].

Нами в ходе систематического изучения теллуру-селеновой минерализации на Озерновском месторождении выявлена и подробно охарактеризована в настоящей работе новая минеральная ассоциация, где селенодантопаит и гачингит, а также гипогенное самородное золото являются важнейшими концентраторами благородных металлов; ниже она будет именоваться золото-гачингит-селенодантопаитовой ассоциацией. Нашими исследованиями показано, что «селенопавонит» [Вартанян и др., 1991] идентичен утвержденному недавно селенодантопаиту. Таким образом, Озерновское месторождение стало вторым местонахождением этого минерала. Для гачингита и селенодантопаита в этой статье впервые приведены порошковые рентгенографические данные, полученные на природном материале.

### Краткие сведения об Озерновском месторождении и его рудах

Озерновское золоторудное месторождение расположено в 150 км к северу от пос. Ключи Ка-

рагинского района Камчатского края, в пределах Срединного хребта Камчатки. В геологическом отношении оно приурочено к Правоукинской вулкано-тектонической структуре неогенового возраста, которая находится на пересечении Главного Камчатского разлома и Палано-Командорской системы разломов в пределах Центрально-Камчатского вулкано-плутонического пояса [Kovalenker, Plotinskaya, 2005, и др. ссылки в этой работе]. Золотая и серебряная минерализация Озерновского рудного поля заключена в пределах субвулканических тел пропилитизированных андезитов и андезибазальтов неогенового возраста [Вартанян и др., 1991; Kovalenker, Plotinskaya, 2005; Кудаева и др., 2024; Стрельников и др., 2025<sub>1</sub>].

Озерновское месторождение относится к эпитермальным месторождениям золото-теллуридного, кислотно-сульфатного типа (AS/HS: [Kovalenker, Plotinskaya, 2005; Кудаева и др., 2024]). Его руды пространственно связаны с мощными (до первых сотен метров) зонами аргиллизации следующих главных фаций: каолинит-диккит-кварцевой, алунит-кварцевой, диаспор-кварц-пиррофилитовой, монокварцевой, диаспор-кварцевой [Kovalenker, Plotinskaya, 2005, и др. ссылки в этой работе]. Более подробно с данными по геологическому положению, строению Озерновского месторождения и вещественному составу разных типов его руд можно ознакомиться в работах [Вартанян и др., 1991; Kovalenker, Plotinskaya, 2005; Кудаева и др., 2024; Стрельников и др., 2025<sub>1</sub>].

В пределах Озерновского рудного поля выделены два месторождения (Озерновское и Каяуровское) и ряд рудопроявлений (Прометей, Конгломератовый, Малютка и др.). Озерновское месторождение разделено на три крупных участка: БАМ, Промежуточный и Хомут. В данный момент карьерами разрабатываются участки БАМ и Хомут. В пределах участка БАМ, в свою очередь, выделены пять крупных промышленных рудных тел: первое, второе, четвертое, пятое и восьмое.

На Озерновском месторождении выделяют три последовательно сформировавшихся рудных комплекса: (1) теллури-силванит-голдфилдит-диккит-кварцевый, (2) золото-голдфилдит-кварцевый и (3) золото-гессит-смектит-кварцевый [Вартанян и др., 1991]. Каждый из них является продуктом собственного гидротермального этапа. Авторами отчета [Вартанян и др., 1991] тем не менее отмечается, что временные взаимоотношения между комплексами «остаются во многом невыясненными». Так, например, предшественниками не было установлено зон взаимного пересечения комплекса (2) с (1) и (3). Поскольку ниже речь пойдет о пространственной и возможной генетической связи золото-гачингит-селенодантопаито-

вой минеральной ассоциации с определенными типами руд, необходимо кратко охарактеризовать эти рудные комплексы.

(1) Теллур-сильванит-голдфилдит-диккит-кварцевый комплекс представлен жильными теллами мощностью от первых сантиметров до 10–15 м (в раздувах). Для таких жил и прожилков характерна брекчиевая и кокардовая текстуры. Главные нерудные минералы этого комплекса – диккит и кварц. Среди рудных минералов преобладают самородный теллур, пирит, голдфилдит, сильванит, калаверит, петцит, гессит, находящиеся в разных соотношениях в различных участках. Очень редко встречаются халькопирит, сфалерит, тетраэдрит. Гипогенное самородное золото для этого комплекса нехарактерно и встречается в его пределах исключительно редко [Вартанян и др., 1991; Стрельников и др., 2025<sub>1</sub>]. Отличительными чертами этого комплекса являются: (а) отсутствие гипогенного самородного золота (Au полностью связано в теллуридах и селенидах), (б) обилие в рудах самородного теллура, (в) обилие среди нерудных минералов диккита.

(2) Золото-голдфилдит-кварцевый комплекс представлен линейными штокверками тонких (0,5–5 см) кварцевых прожилков, переходящих в зоны гидротермальных брекчий. Рудные минералы образуют густую вкрапленность в кварце с кокардовой текстурой и представлены гипогенным самородным золотом, голдфилдитом, «селенопавонитом», реже богдановичитом, пиритом, скиппенитом, люционитом, фаматинитом, тетраэдритом, пиритом, а также недиагностированными селенидами и теллуридами висмута. Пробность самородного золота здесь варьирует от 925 до 998 [Вартанян и др., 1991]. Главным рудным минералом является кварц, иногда в сильно подчиненном количестве встречаются каолинит, хлорит, мусковит, смектиты. Для всех минеральных ассоциаций этого рудного комплекса характерно: (а) обилие гипогенного высокопробного самородного золота, (б) большое количество «селенопавонита», (в) резкое преобладание кварца среди нерудных минералов и отсутствие диккита [Вартанян и др., 1991]. Авторы этого отчета отмечают, что в некоторых участках месторождения «селенопавонита» много больше, чем голдфилдита.

(3) Золото-гессит-смектит-кварцевый комплекс развит на месторождении незначительно. К нему относятся редкие прожилки мощностью до 10 см, секущие минеральные агрегаты комплекса (1). Такие прожилки сложены тонкозернистым кварцем, минералами группы смектитов, каолинитом, а среди рудных минералов преобладают самородное золото, гессит и петцит. Значительно реже встречаются пирит, блеклые руды, халькопирит и сфалерит. Отличительными чертами это-

го комплекса являются: (а) обилие относительно низкопробного (около 860) самородного золота, (б) присутствие в рудах значительного количества гессита, (в) тесная ассоциация названных минералов со смектитами.

Гачингит и селенодантопаит встречаются нами в барит-диккит-кварцевых и диккит-кварцевых жилах, линейных штокверках и прожилках, как правило, богатых Se-содержащим (до 30 мас.% Se) самородным теллуром. Эта минеральная ассоциация с самородным теллуром отнесена к теллур-сильванит-голдфилдит-диккит-кварцевому комплексу (1) [Кудаева и др., 2024; Стрельников и др., 2025]. Согласно нашим полевым наблюдениям [Стрельников и др., 2025<sub>1</sub>] и данным предшественников [Kovalenker, Plotinskaya, 2005], жилы и прожилки с такой минерализацией приурочены к крутопадающим зонам аргиллизитов юго-восточного простирания. Сами жилы и прожилки характеризуются невыдержанной мощностью (от первых сантиметров в пережимах до 15 м в раздувах) и обычно осложнены зонами брекчирования. Для этих жил наиболее характерны брекчиевая, крустификационно-полосчатая, друзовая, линзовидная и кокардовая текстуры. В пределах диккит-кварцевых жил самородный теллур образует густую вкрапленность в кварце. Наблюдаются обогащенные самородным теллуром отдельные линзы, прожилки, гнезда и зоны крустификационной полосчатости, а также каймы-«кокарды», обрамляющие обломки вмещающих пород. Теллур в диккит-кварцевых жилах и прожилках наиболее часто тесно ассоциирует с пиритом, малетойваямитом и фишессеритом [Спиридонов и др., 2009], реже – с селенистым голдфилдитом, бамболлаитом, усталечитом, богдановичитом, клаусталитом и науманнитом.

В диккит-кварцевых и барит-диккит-кварцевых жилах и прожилках с самородным теллуром, охарактеризованных в предыдущем абзаце, нами встречены участки кварца с густой вкрапленностью гачингита, самородного золота и селенодантопаита. Такие участки представлены гнездами и кокардами размером до 1,5 см, которые имеют с обогащенными самородным теллуром участками резкие границы без признаков взаимного проникновения. В некоторых случаях богатые селенодантопаитом и самородным золотом гнезда и кокарды находятся в кварцевых жилах без самородного теллура и диккита.

## Материалы и методы исследования

В настоящей работе исследован каменный материал, как собранный авторами (П.А.П., М.В.С. и И.В.П.) в 2018–2024 гг., так и любезно предоставленный геологами АО «Сибирский горно-металлургический альянс». Все изученные образцы

отобраны из карьера участка БАМ и происходят из второго, четвертого и пятого рудных тел. Всего нами с различной степенью детальности изучено 15 образцов. Преимущественно это фрагменты диккит-кварцевых, барит-диккит-кварцевых и кварцевых жил и прожилков из богатых рудных блоков.

Изучение взаимоотношений и определение оптических свойств рудных минералов в отраженном свете проводилось в аншлифах с использованием поляризационного микроскопа Carl Zeiss Axiorplane 2. Диагностика всех рудных минералов, базирующаяся на химическом составе, подтверждена их оптическими свойствами.

Определение химического состава и изучение микроморфологии минералов золото-гачингит-селенодантопаитовой ассоциации выполнено методами сканирующей электронной микроскопии и электронно-зондового микроанализа. Работы проводились на трех сканирующих электронных микроскопах: (1) Jeol JSM IT-500 с энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) INCA X-Max-50 в лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова; (2) Tescan Vega II XMU с ЭДС INCA Energy 450 в научном подразделении физических методов исследования вещества ИЭМ РАН (Черноголовка); (3) Hitachi 3000 с ЭДС Oxford SwiftED 3000 в Центре микроскопии и микроанализа Научного парка СПбГУ. Количественный электронно-зондовый анализ выполнялся (Jeol JSM IT-500 / Tescan Vega II XMU / Hitachi 3000) при ускоряющем напряжении 20/20/15 кВ и силе тока 0.7/0.7/1 нА, диаметр электронного зонда 3/3/5 мкм. Накопление энергодисперсионных спектров происходило в течение 100 с (60 с без учета «мертвого» времени). При работе на электронных микроскопах Jeol JSM IT-500 и Tescan Vega II XMU оптимизация условий получения стандартных спектров и последующих аналитических измерений производилась по *Ka*-линии металлического *Co*; были использованы следующие стандарты: *Bi* – металлический *Bi* и  $Bi_2S_3$ , *S* –  $FeS_2$ , *Se* –  $PbSe$ , *Te* –  $PbTe$ , *Au*, *Cu*, *Ag* – чистые простые вещества. Количественный анализ на электронном микроскопе Hitachi 3000 выполнялся с применением встроенных стандартов, оптимизация условий получения спектров производилась по *Ka*-линии металлической *Cu*. При работе на каждом из микроскопов в качестве аналитических были использованы следующие линии: *Cu Ka*, *Ag Ka* и *La*, *Au Ma*, *Bi Ma* и *La*, *S Ka*, *Se La*, *Te La*. Содержания остальных элементов с атомными номерами выше, чем у кислорода, оказались в изученных минералах ниже пределов обнаружения. Количественные анализы, полученные на трех приборах, очень близки между собой.

Для решения проблемы перекрытия аналитических рентгеновских линий *Ma Bi* и *Ka S* в ЭД-спектре, которая потенциально способна исказить результаты анализа в соединениях *Bi* и *S*, измерение содержания *Bi* проводилось с использованием аналитических линий *L*-серии.

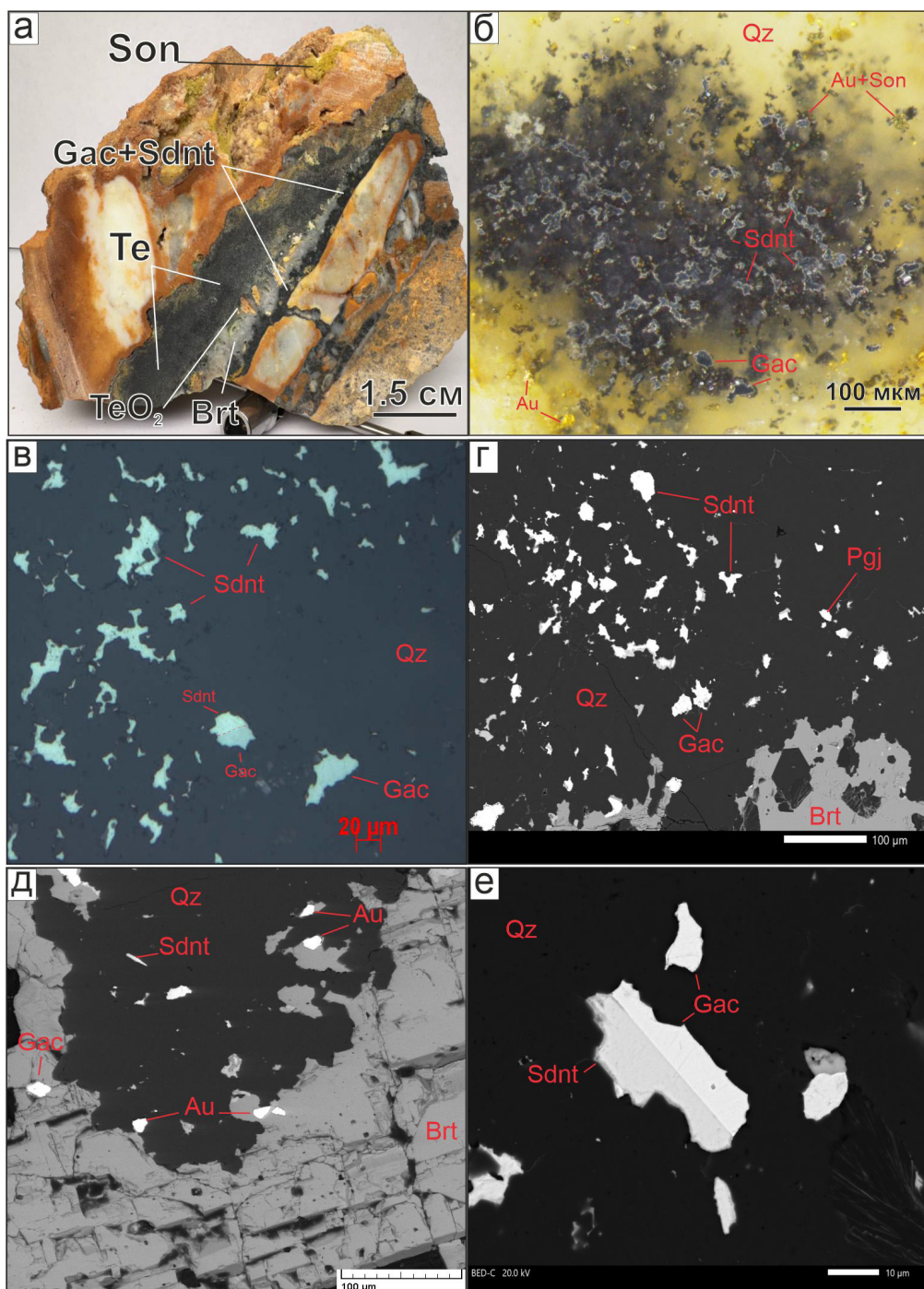
Всего методом электронно-зондового микроанализа исследовано 11 образцов. Получено более 90 точечных анализов. При анализе минералов выбирались однородные зерна размером не менее 5 мкм. Однородность выделений всех изученных минералов размером более 5 мкм контролировалась под сканирующим электронным микроскопом при больших увеличениях.

Рентгенографическое исследование гачингита и селенодантопаита выполнено в Центре рентгеноструктурных исследований Научного парка СПбГУ (Санкт-Петербург). Порошковые рентгенограммы получены на дифрактометре Rigaku R-AXIS Rapid II с цилиндрическим IP-детектором (монохроматизированное *CoKa*-излучение, 40 кВ, 15 мА с экспозицией 15 мин; геометрия Дебая–Шеррера,  $d = 127.4$  мм, экспозиция 12 мин); интегрирование исходных данных с цилиндрического детектора произведено с помощью программного пакета *Osc2Tab* [Бритвин и др., 2017]. Расчет параметров элементарной ячейки осуществлялся с помощью программного обеспечения STOE WinXPOW Crystallinity, версия 2.02.

## Результаты

*Условия нахождения, минеральные ассоциации, морфология минералов и их оптические свойства*

Гачингит и селенодантопаит встречены нами в барит-диккит-кварцевых, диккит-кварцевых и кварцевых жилах и прожилках, как правило, богатых самородным теллуром. Гачингит и селенодантопаит формируют густую вкрапленность в кварце, реже в барите, образуя в таких жилах кокарды и гнезда черного цвета (рис. 1а) размером до 1.5 см; сростания с диккитом для них нехарактерны. С ними тесно ассоциируют парагуанахуатит  $Bi_2Se_3$  (рис. 1г) и богдановичит  $AgBiSe_2$ , присутствующие в меньших количествах. Все эти минералы представлены ксеноморфными, обычно несколько вытянутыми обособлениями размером 5–80 мкм (рис. 1); нередко они образуют сростки друг с другом (рис. 1в, е, 2а). В одном образце встречены сростания относительно крупных (до 0.3 мм) гипидиоморфных призматических кристаллов селенодантопаита с включениями призматических гипидиоморфных кристаллов (до 80 мкм) парагуанахуатита и ксеноморфных выделений (до 40 мкм) богдановичита. Также в этой ассоциации обнаружены единичные зерна малетойваемита, калаверита  $AuTe_2$ , науманнита  $Ag_2Se$ , фишессерита  $Ag_3AuSe_2$  и голдфиллита  $Cu_{10}Te_4S_{12}$ . Они образу-



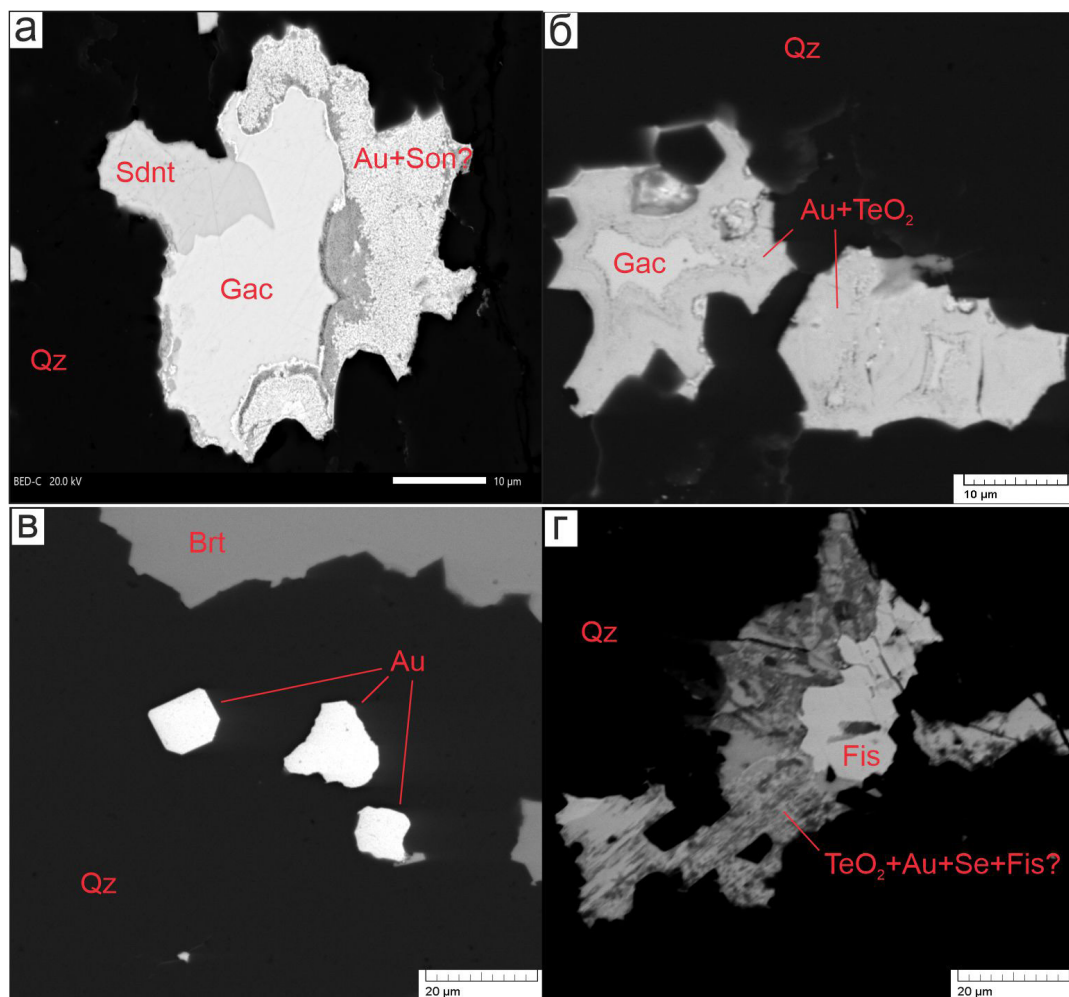
**Рис. 1.** Минералы золото-гачингит-селенодантопаитовой ассоциации в руде Озерновского месторождения: а – фрагмент богатой самородным теллуrom барит-диксит-кварцевой жилы с кокардово-брекчиевой текстурой в тектонизированном аргиллизите; б, в – обособления гачингита, селенодантопаита и самородного золота в кварце; г – селенодантопаит, гачингит и парагуанахуатит в кварце; д – кварц и барит с включениями гачингита, гипогенного самородного золота и селенодантопаита; е – сросток гачингита и селенодантопаита. Фотография (в) – в отраженном свете; изображения (г), (д) и (е) сделаны под сканирующим электронным микроскопом в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE). Au – самородное золото, Brt – барит, Gac – гачингит, Mda – мандариноит, Pgj – парагуанахуатит, Qz – кварц, Te – Se-содержащий самородный теллур, Sdnt – селенодантопаит, Son – сонораит.

ют ксеноморфные включения размером 3–30 мкм в кварце, реже дают сростания с гачингитом или селенодантопаитом.

В аншлифе в отраженном свете гачингит имеет серую с голубоватым оттенком окраску (рис. 1в), обладает заметным двуотражением и выраженной анизотропией с цветным эффектом от бледного голубовато-серого до синевато-серого. Селенодантопаит обладает более высоким показателем отражения (рис. 1в), чем гачингит, характеризуется слабым двуотражением и хорошо выраженной анизотропией с цветным эффектом от голубовато-серого до голубого. Внутренние рефлексы у

обоих минералов замечены не были.

В ассоциации с гачингитом, селенодантопаитом, богдановичитом и парагуанахуатитом нами в большом количестве встречено самородное золото, по всей видимости, гипогенное. Оно ян-нокристаллическое, формирует ксеноморфные выделения, а иногда гипидиоморфные кристаллы (рис. 2в) размером 5–50 мкм и имеет золоти-сто-желтый цвет. Это золото не образует совместных агрегатов с кислородными соединениями Te и Se. Такое самородное золото тесно ассоциирует с селенодантопаитом (с которым иногда формирует сростки), гачингитом, богдановичитом и па-



**Рис. 2.** Минералы золото-гачингит-селенодантопаитовой ассоциации из Озерновского месторождения: а – сросток селенодантопаита с гачингитом, который частично замещен тонкой смесью гипергенных «горчичного» золота и сонораита(?); б – реликты гачингита в окружении тонкого агрегата гипергенных диоксида теллура и «горчичного» самородного золота; в – кристаллы гипогенного золота в кварце; г – частичная псевдоморфоза тонкой смеси гипергенных диоксида теллура и самородных золота и селена по фишессериту. Все изображения получены под сканирующим электронным микроскопом в режиме BSE. Au – самородное золото, Brt – барит, Fis – фишессерит, Gac – гачингит, Qz – кварц, Sdnt – селенодантопаит, Se – самородный селен, Son – сонораит.

**Таблица 1.** Химический состав минералов золото-гачингит-селенодантопаитовой ассоциации (мас. % и формулы) из руд Озерновского месторождения, гачингита из рудопроявления Гачинг, Камчатка, и селенодантопаита из месторождения Принц Эвжен, Чехия

№ образца – № анализа	Минерал	Cu	Au	Ag	Pb	Bi	S	Te	Se	Сумма, мас. %	Формула
Serav_2_3-09	Гачингит	-	65.31	-	-	-	-	27.22	8.09	100.62	Au <sub>1,01</sub> (Te <sub>0,65</sub> Se <sub>0,34</sub> ) <sub>20,99</sub>
Serav_2_4-22	Гачингит	-	65.64	-	-	-	-	25.88	10.02	101.54	Au <sub>1,01</sub> (Te <sub>0,61</sub> Se <sub>0,38</sub> ) <sub>20,99</sub>
Serav_2_2-05	Гачингит	-	65.41	-	-	-	-	25.09	10.57	101.07	Au <sub>1,00</sub> (Te <sub>0,59</sub> Se <sub>0,40</sub> ) <sub>20,99</sub>
Serav_2_3-20	Гачингит	-	65.79	0.10	-	-	-	20.84	13.35	100.08	Au <sub>1,00</sub> (Se <sub>0,51</sub> Te <sub>0,49</sub> ) <sub>21,00</sub>
Serav_2_2-19	Гачингит	-	68.36	0.05	-	-	-	16.75	16.65	101.81	Au <sub>1,01</sub> (Se <sub>0,61</sub> Te <sub>0,38</sub> ) <sub>20,99</sub>
Serav_2_3-11	Гачингит	-	67.06	-	-	-	-	16.54	16.31	99.91	Au <sub>1,01</sub> (Se <sub>0,61</sub> Te <sub>0,38</sub> ) <sub>20,99</sub>
Serav_3_1-05	Селенодантопаит	-	-	11.02	-	54.92	-	-	35.57	101.51	Ag <sub>5,01</sub> Bi <sub>12,89</sub> Se <sub>21,10</sub>
Serav_2_2-10	Селенодантопаит	-	-	11.12	-	55.16	0.44	-	34.00	100.72	Ag <sub>5,08</sub> Bi <sub>13,01</sub> (Se <sub>2,123</sub> S <sub>0,68</sub> ) <sub>21,91</sub>
Serav_2_1-03	Селенодантопаит	-	-	11.07	-	54.63	0.60	-	33.75	100.05	Ag <sub>5,06</sub> Bi <sub>12,91</sub> (Se <sub>2,110</sub> S <sub>0,92</sub> ) <sub>22,03</sub>
6853a-34	Селенодантопаит	-	-	11.04	-	54.11	1.02	-	32.72	98.89	Ag <sub>5,07</sub> Bi <sub>12,83</sub> (Se <sub>2,053</sub> S <sub>1,586</sub> ) <sub>22,10</sub>
6853a-09-2	Селенодантопаит	0.33	-	11.24	-	54.19	1.61	-	32.06	99.43	(Ag <sub>5,05</sub> Cu <sub>0,26</sub> ) <sub>25,31</sub> Bi <sub>12,57</sub> (Se <sub>2,19</sub> S <sub>1,69</sub> ) <sub>24,65</sub> ) <sub>22,12</sub>
6853a-31	Богдановичит	-	-	23.61	-	44.07	-	-	33.22	100.90	Ag <sub>1,03</sub> Bi <sub>0,99</sub> Se <sub>1,98</sub>
6853a-12	Парагуанахуаит	-	-	-	-	64.21	0.55	0.59	34.82	100.17	Bi <sub>2,00</sub> (Se <sub>2,86</sub> S <sub>0,11</sub> Te <sub>0,03</sub> ) <sub>23,00</sub>
Serav_2_2-07	Калаверит	-	42.43	0.45	-	-	-	53.70	1.25	97.83	(Au <sub>0,99</sub> Ag <sub>0,02</sub> ) <sub>21,01</sub> (Te <sub>1,92</sub> Se <sub>0,07</sub> ) <sub>21,99</sub>
Serav_3_1-15	Фишсерит	-	29.40	48.32	-	-	-	-	23.89	101.61	Ag <sub>2,99</sub> Au <sub>1,00</sub> Se <sub>2,01</sub>
Serav_3_1-14	Науманнит	-	-	75.41	-	-	-	-	27.26	102.67	Ag <sub>2,01</sub> Se <sub>0,99</sub>
3a <sup>1</sup>	Гачингит	-	61.46	0.74	-	-	-	27.72	9.84	99.76	(Au <sub>0,94</sub> Ag <sub>0,02</sub> ) <sub>20,96</sub> (Te <sub>0,66</sub> Se <sub>0,38</sub> ) <sub>21,04</sub>
G-1C 3 6 <sup>1</sup>	Гачингит	-	65.15	0.54	-	-	-	22.60	13.47	101.76	(Au <sub>0,97</sub> Ag <sub>0,01</sub> ) <sub>20,98</sub> (Te <sub>0,52</sub> Se <sub>0,50</sub> ) <sub>21,02</sub>
2 <sup>2</sup>	Селенодантопаит	0.07	-	11.98	2.72	54.87	4.92	-	24.73	99.29	(Ag <sub>5,20</sub> Cu <sub>0,05</sub> ) <sub>25,25</sub> (Bi <sub>12,29</sub> Pb <sub>0,62</sub> ) <sub>21,29</sub> (Se <sub>14,66</sub> S <sub>7,18</sub> ) <sub>22,84</sub>
3 <sup>3</sup>	Селенодантопаит	0.99	-	8.95	1.03	57.14	3.97	0.69	26.70	99.47	(Ag <sub>5,93</sub> Cu <sub>0,74</sub> ) <sub>24,65</sub> (Bi <sub>12,95</sub> Pb <sub>0,23</sub> ) <sub>21,18</sub> (Se <sub>16,05</sub> S <sub>5,87</sub> Te <sub>0,26</sub> ) <sub>22,15</sub>

*Примечание.*

Расчет формул производился на сумму атомов, равную 2 для гачингита, 3 для науманнита, 4 для парагуанахуаита, 5 для богдановичита, 6 для фишсерита, 40 для селенодантопаита.

<sup>1</sup>Рудопроявление Гачинг [Tolstykh et al., 2022].

<sup>2</sup>Месторождение Принц Эвжен [Sejhora et al., 2025].

<sup>3</sup>Селенодантопаит («селенопаовит») из Озерновского месторождения [Варганян и др., 1991].

рагуанахуатитом и, что надо подчеркнуть особо, не встречается вместе с самородным теллуrom. В одних образцах гачингита больше, чем такого самородного золота, в других же именно оно выступает главной минеральной формой Au.

В богатых самородным теллуrom барит-диккит-кварцевых и диккит-кварцевых жилах и прожилках можно отчетливо выделить две непересекающихся ассоциации: (1) самородного теллура с малетойваямитом, пиритом, селенистым голдфилдитом, фишессеритом, науманнитом, богдановичитом; (2) золото-гачингит-селенодантопаитовую. Рудные минералы обеих ассоциаций преимущественно образуют интерстиционные включения в кварце, однако границы между гнездами и кокардами этих двух ассоциаций резкие, без «смешения» и признаков какого-либо замещения (рис. 1а). Ассоциация (1) отличается не только обилием самородного теллура, но и отсутствием гипогенного самородного золота, главной минеральной формой Au в ней выступает редчайший селенотеллурид – малетойваямит. Золото-гачингит-селенодантопаитовая ассоциация характеризуется полным отсутствием самородного теллура, а две главные минеральные формы золота здесь – гипогенное самородное золото и гачингит. Также для этой минеральной ассоциации типично обилие барита, с которым рудные минералы образуют тесные сростания, в том числе включения в нем.

В зоне окисления при изменении селенодантопаита, богдановичита и парагуанахуатита образуются гипергенные порошковатый черный самородный селен и хлораргирит. При окислении гачингита картина несколько сложнее: как правило, он замещается агрегатом теллурита/парателлурита, эммонсита, сонораита, мандариноита или поита с выделением «горчичного» (рис. 2а,б,г) тонкодисперсного самородного золота, придающего таким агрегатам горчично- или красновато-желтый цвет. В отраженном свете такие агрегаты имеют бледно-красный цвет. Как правило, гачингит легче подвергается вторичному замещению, чем соседствующие с ним селениды Vi и Ag. Диагностика гипергенных минералов подтверждена КР-спектрами и/или рентгенографическими данными; более подробно эти минералы охарактеризованы в отдельных наших работах

[Пеков и др., 2026; Pekov et al., 2026].

Приблизительное количественное соотношение минералов золото-гачингит-селенодантопаитовой ассоциации в описываемых агрегатах следующее (обобщенно): селенодантопаит > гипогенное самородное золото = гачингит >> парагуанахуатит > богдановичит > фишессерит, малетойваямит, голдфилдит, калаверит, науманнит.

#### Химический состав

Химический состав изученных минералов представлен в табл. 1.

Для гачингита характерны широкие вариации содержаний селена и теллура: Se 8.9–16.7, Te 16.5–30.8 мас.%. В качестве элементов-примесей отмечаются Ag (0.0–1.0 мас.%) и S (0.0–0.7 мас.%), табл. 1. Расчет формулы произведен на сумму всех атомов, равную двум.

Для селенодантопаита свойственны вариации содержания Se: 32.0–37.9 мас.%. Содержания элементов-примесей колеблются в следующих пределах: S 0.0–1.6 мас.%, Cu 0.0–0.4 мас.%, Te 0.0–0.5 мас.%. Расчет формул произведен на сумму всех атомов, равную 40.

Все исследованные электронно-зондовым ана-

**Таблица 2.** Рентгеновские порошковые данные гачингита из обр. O24-6-sepav-2; для сравнения приведены данные синт. аналога гачингита [Tolstykh et al., 2022]

<i>hkl</i>	O24-6-sepav-2		[Tolstykh et al., 2022]	
	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> (%)	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> (%)
002	4.46	34	4.461	65
200	3.77	27	3.777	11
112	3.20	32	3.194	36
202	2.886	100	2.883	99
021	2.726	100	2.734	100
004	2.230	15	2.231	33
221	2.212	53	2.215	51
023	2.085	28	2.066	21
222	2.028	30	2.035	26
204	1.931	15	1.921	28
223	1.817	25	1.813	63
421	1.554	14	1.554	18
025	1.512	15	1.516	22

**Таблица 3.** Параметры ромбической элементарной ячейки гачингита из обр. O24-6-sepav-2, рассчитанные по порошковым данным (табл. 2); для сравнения приведены данные для синт. аналога гачингита [Tolstykh et al., 2022]

Образец	Формула	<i>a</i> , Å	<i>b</i> , Å	<i>c</i> , Å	<i>V</i> , Å <sup>3</sup>
O24-6-sepav-2	Au <sub>1.00</sub> (Se <sub>0.51</sub> Te <sub>0.49</sub> ) <sub>Σ1.00</sub>	7.557(7)	5.740(6)	8.940(6)	387.7(4)
[Tolstykh et al., 2022]	Au <sub>1.00</sub> (Se <sub>0.47</sub> Te <sub>0.53</sub> ) <sub>Σ1.00</sub>	7.5379(12)	5.7415(10)	8.8985(13)	385.12(11)

лизом зерна гачингита и селенодантопайта по своему составу оказались однородны.

Изученные нами бождановичит, парагуанахуатит, науманнит, малетойваямит, голдфилдит, калаверит и фишессерит очень близки по составу к своим конечным членам, описываемым идеализированными формулами (табл. 1).

Самородное золото обоих морфогенетических типов оказалось очень высокопробным: в нем установлена только незначительная примесь Ag – не более 0.5 мас. %.

#### Рентгенографические данные

Полученные порошковые рентгенограммы соответствуют гачингиту состава  $Au_{1.00}(Se_{0.51}Te_{0.49})_{\Sigma 1.00}$  и селенодантопайту состава  $Ag_{5.06}Bi_{12.91}(Se_{21.10}S_{0.92})_{\Sigma 22.03}$ . Главные отражения порошковых гачингита и селенодантопайта приведены в табл. 2 и 4. Параметры элементарных ячеек, рассчитанные на их основе, представлены в табл. 3 и 5.

**Таблица 4.** Рентгеновские порошковые данные селенодантопайта из обр. O24-6-sepav-1; для сравнения приведены расчетные данные селенодантопайта из месторождения Принц Эвжен [Sejkora et al., 2025]

<i>hkl</i>	O24-6-sepav-1		[Sejkora et al., 2022]*	
	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> (%)	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> (%)
205	3.74	26	3.700	31
112	3.55	30	3.525	38
401	3.43	24	3.397	14
204	3.40	31	3.359	33
312	3.05	32	3.037	27
313	2.96	100	2.936	100
205	2.92	65	2.892	30

Примечание. \*Рассчитано с использованием монокристаллических рентгеновских данных.

**Таблица 5.** Параметры моноклинной эл. ячейки селенодантопайта из обр. O24-6-sepav-1, рассчитанные по порошковым данным (табл. 4); для сравнения приведены данные для селенодантопайта из [Sejkora et al., 2025]

Образец	Химический состав	<i>a</i> , Å	<i>b</i> , Å	<i>c</i> , Å	$\beta$ , °	<i>V</i> , Å <sup>3</sup>
O24-6-sepav-1	$Ag_{5.06}Bi_{12.91}(Se_{21.10}S_{0.92})_{\Sigma 22.03}$	13.78(2)	4.161(8)	19.51(4)	106.28(13)	1074(2)
[Sejkora et al., 2025] <sup>1</sup>	$(Ag_{4.49}Cu_{0.32})_{\Sigma 4.81}(Bi_{13.29}Pb_{0.14})_{\Sigma 13.43}(Se_{15.98}S_{6.02})_{\Sigma 22.00}$	13.670(4)	4.1400(11)	19.282(6)	106.385(11)	1046.9(5)

## Обсуждение результатов

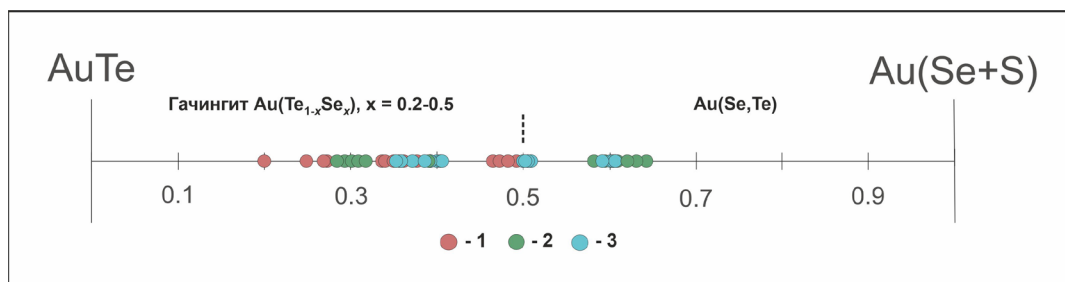
*Гачингит и некоторые особенности ряда твердых растворов AuTe – AuSe*

Диагностика гачингита из Озерновского месторождения (вторая находка в мире) подтверждена не только оптическими и электронно-зондовыми, но и рентгенографическими данными. Порошковая рентгенограмма зерна состава  $Au_{1.00}(Se_{0.51}Te_{0.49})$ , табл. 2, однозначно отвечает структурному типу гачингита, а рассчитанные на ее основе параметры элементарной ячейки (табл. 3) очень близки к таковым из работы [Tolstyk et al., 2022]. Порошковые рентгеновские данные получены для природного образца этого минерала впервые. Изучение гачингита из Озерновского месторождения методом электронно-зондового анализа показало, что его химический состав в целом близок к составу гачингита из рудопроявления Гачинг [Tolstyk et al., 2022]. Несколько зерен этого минерала содержат Se 15.9–16.7 мас.%, и такие анализы при пересчете на формулу отвечают усред-

ненному составу  $Au(Se_{0.60}Te_{0.40})^1$ . Надо сказать, что подобное природное соединение встречается впервые: оно ранее отмечалось в рудопроявлении Гачинг [Tolstyk et al., 2023]. Если руководствоваться принятыми в современной минералогической номенклатуре критериями, оно может рассматриваться как потенциально новый минеральный вид – Se-доминантный аналог гачингита. Мы считаем маловероятным то, что зерна состава  $Au(Se_{0.60}Te_{0.40})$  могут относиться к структурному типу ауроселенида  $\beta$ -AuSe. Согласно данным из работы Г. Крантона и Р. Хейдинга, изоморфная «емкость» синтетического аналога ауроселенида по отношению к Te крайне ограничена [Cranton and Heyding, 1968; Rabenau and Schulz, 1976].

Интересно, что 12 анализов гачингита из Озер-

<sup>1</sup> По своим оптическим свойствам в отраженном свете зерна такого состава идентичны гачингиту с формулой  $Au(Se_{0.51}Te_{0.49})$ , диагностика которого подтверждена данными порошковой рентгенографии.



**Рис. 3.** Химический состав халькогенидной части гачингита и его Se-доминантного аналога, выраженный отношением (Se+S)/(Te+S+Se). 1 – рудопоявление Гачинг из [Tolstykh et al., 2022], 2 – рудопоявление Гачинг из [Tolstykh et al., 20231], 3 – Озерновское месторождение.

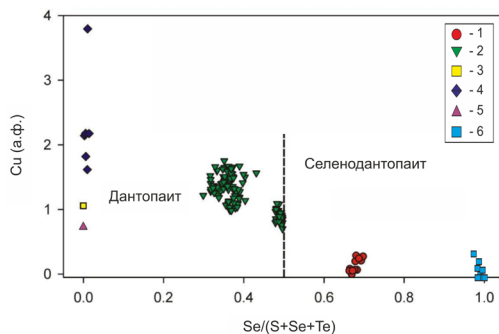
новского месторождения попали в очень узкий диапазон составов,  $Au(Te_{0.59}Se_{0.41}) - Au(Te_{0.61}Se_{0.39})$ ; 14 анализов –  $Au(Te_{0.51}Se_{0.49}) - Au(Se_{0.51}Te_{0.49})$ , пять анализов –  $Au(Se_{0.58}Te_{0.42}) - Au(Se_{0.61}Te_{0.39})$ , и при этом ни один из 37 полученных для разных зерен гачингита анализов не оказался в промежутках между этими составами (рис. 3). Такие «квазистехиометричные» соотношения Se и Te могут косвенно указывать на возможность упорядочения этих халькогенов в ряду твердых растворов  $AuTe - AuSe$  с образованием соединений состава  $Au(Te_{0.6}Se_{0.4})$ ,  $Au(Te_{0.5}Se_{0.5})$  и  $Au(Se_{0.6}Te_{0.4})$ .

*Селенодантопаит и особенности его химического состава*

Для селенодантопаита Озерновское месторождение является вторым достоверным местом находки, его диагностика здесь подтверждена электронно-зондовыми и рентгенографическими исследованиями. Селенодантопаит здесь отвечает усредненной формуле  $Ag_{5.06}Bi_{12.91}(Se_{21.10}S_{0.92})_{\Sigma 22.03}$  и, таким образом, по химическому составу значительно ближе к конечному члену  $Ag_5Bi_{13}S_{22}$ , чем селенодантопаит из своего первоначального местонахождения – месторождения Принц Эвжен в Чехии, для которого приводятся формулы  $Cu_{0.24}Ag_{5.09}Fe_{0.17}Pb_{0.51}Bi_{12.32}(Se_{15.11}S_{6.89})_{\Sigma 22.00}$  и  $Cu_{0.05}Ag_{5.23}Fe_{0.06}Pb_{0.62}Bi_{12.38}(Se_{14.77}S_{7.23})_{\Sigma 22.00}$  [Sejkora et al., 2026], рис. 4 и табл. 1. Среди наших образцов наиболее богатый серой отвечает формуле  $Ag_{5.08}Bi_{12.65}(Se_{19.81}S_{2.45})_{\Sigma 22.26}$ . Стоит отметить и то, что селенодантопаит из месторождения Принц Эвжен обладает несколько другим характером оптической анизотропии – от светло-серого до светло-серого с фиолетово-коричневым оттенком [Sejkora et al., 2026], что, вероятно, обусловлено нахождением в нем значительного количества примесей.

Отнесение селенодантопаита из Озерновского месторождения к структурному типу селенодантопаита однозначно подтверждено данными порошковой рентгенографии, порошковая диа-

грамма для зерна состава  $Ag_{5.06}Bi_{12.91}(Se_{21.10}S_{0.92})_{\Sigma 22.03}$ . Рентгенограмма селенодантопаита из месторождения Принц Эвжен в силу малого размера его выделений не снималась. В оригинальном описании приведены только рассчитанные на основе монокристалльных рентгеновских данных значения межплоскостных расстояний и интенсивностей рефлексов. Таким образом, наша порошковая рентгенограмма селенодантопаита является первой, полученной для природного образца этого минерала. Рассчитанные по ней параметры элементарной ячейки селенодантопаита из Озерновского месторождения представлены в табл. 5; они заметно больше, чем у селенодантопаита из работы [Sejkora et al., 2026]. Это однозначно объясняется в первую очередь большей величиной отношения Se:S в селенодантопаите из Озерновского месторождения. Кроме того, в изученном нами образце отсутствует медь, замещающая серебро, что



**Рис. 4.** Соотношение количества примесной Cu (в атомах на формулу, рассчитанную на сумму всех атомов, равную 40) и атомной доли Se в халькогенидной части формулы (S+Se+Te) у минералов ряда дантопаит – селенодантопаит из разных месторождений мира: 1 – Принц Эвжен, Чехия; 2 – Мохавк, Голдфилд, Невада, США; 3 – Эрцвайс, Австрия; 4 – Розалия, Словакия; 5 – Юго-Корневское, Южный Урал [Sejkora et al., 2025, и ссылки в этой работе]; 6 – Озерновское, наши данные.

тоже приводит к увеличению параметров элементарной ячейки относительно минерала из месторождения Принц Эвжен. Полученные нами составы отвечают самой селенистой части природного ряда твердых растворов  $Ag_5Bi_{13}S_{22} - Ag_5Bi_{13}Se_{22}$  и вкуче с литературными данными (рис. 4) позволяют предположить существование протяженного, скорее всего, полного ряда между дантопаитом и селенодантопаитом.

Описанный нашими предшественниками «селеновый аналог павонита», или «селенопавонит» [Вартанян и др., 1991; Kovalenker, Plotinskaya, 2005], по химическому составу очень близок к селенодантопаиту. Мы считаем, что этот минерал является именно селенодантопаитом. В пользу этого говорит и сходство минеральных ассоциаций. Таким образом, можно заключить, что селенодантопаит является одной из главных минеральных форм серебра на Озерновском месторождении.

#### *Самородное золото*

В изученной золото-гачингит-селенодантопаитовой ассоциации можно выделить два морфологических типа самородного золота, различающихся, судя по взаимоотношениям с другими минералами, своим происхождением: (1) первичное, гипогенное золото, образующее гипидиоморфные кубические кристаллы и ксеноморфные, комковидные обособления характерного золотисто-желтого цвета; (2) вторичное, гипергенное «горчичное» золото, которое формирует тонкокристаллические агрегаты горчично- и красновато-желтого цвета в смеси с кислородными соединениями теллура и образует псевдоморфозы по гачингиту и малетойваямиту. По химическому составу самородное золото обоих типов сходно и содержит лишь небольшую примесь Ag, до 0.5 мас.%. Надо отметить, что гипогенное золото (первого типа) в диккит-кварцевых жилах и прожилках связано именно с гачингит-селенодантопаитовой ассоциацией и не было встречено в сростаниях с самородным теллуrom ни нами [Стрельников и др., 2025<sub>1</sub>], ни коллегами, изучавшими схожие образцы [Вартанян и др., 1991; Кудяева и др., 2024, и ссылки в этих работах]. В отличие от него, определенно гипергенное золото (второго типа) ассоциирует как с самородным теллуrom, так и с минералами золото-гачингит-селенодантопаитовой ассоциации. Таким образом, речь идет не просто о двух морфологических, но о разных морфогенетических типах самородного золота в этих рудах.

Мы придерживаемся мнения, что «горчичное» золото (золото второго типа) на Озерновском месторождении имеет именно гипергенное происхождение. Среди изученных нами образцов наиболее богатые «горчичным» золотом (а также вторичными минералами  $Te^{4+}$  и  $Fe^{3+}$ ) происходят

из зон пересечения богатых теллуrom и теллуридами руд и систем водопроницаемых трещин, выходящих на дневную поверхность. Тем не менее мы не можем полностью исключить, что формирование такого «горчичного» золота может быть связано с деятельностью гидротермальных низкотемпературных растворов с высоким окислительным потенциалом [Некрасов, 1991; Makovsky et al., 2007].

#### *Общая характеристика золото-гачингит-селенодантопаитовой минеральной ассоциации*

Золото-гачингит-селенодантопаитовая минеральная ассоциация в барит-диккит-кварцевых и диккит-кварцевых жилах и прожилках имеет несколько особенностей, резко отличающих ее от ассоциации с самородным теллуrom. (1) Минералы золото-гачингит-селенодантопаитовой ассоциации никогда не образуют с самородным теллуrom сростаний – они всегда сконцентрированы в собственных гнездах и кокардах; такие обособления имеют с агрегатами, содержащими самородный теллуr, резкие границы без «смешения» или признаков замещения. (2) Гипогенное самородное золото тесно ассоциирует с гачингитом и селенодантопаитом и, в отличие от гипергенного «горчичного» золота, не встречается в сростаниях с самородным теллуrom. (3) В отличие от самородного теллура и тесно ассоциирующих с ним минералов, для которых характерны сростания с диккитом, минералы золото-гачингит-селенодантопаитовой ассоциации пространственно связаны с баритом: сростаются с ним, а нередко образуют включения в нем. На основании всего этого мы полагаем, что формирование золото-гачингит-селенодантопаитовой минеральной ассоциации и ассоциации, богатой самородным теллуrom, происходило раздельно.

Минеральную ассоциацию с самородным теллуrom мы вслед за нашими коллегами относим к теллуr-силванит-голдфилдит-диккит-кварцевому рудному комплексу [Кудяева и др., 2024; Стрельников и др., 2025<sub>1</sub>, и ссылки в этих работах]. В отличие от нее, золото-гачингит-селенодантопаитовая ассоциация обладает, скорее, признаками, характерными для минеральных ассоциаций золото-голдфилдит-кварцевого рудного комплекса. Как мы считаем, она может быть (пусть и с некоторой долей условности) отнесена именно к нему. Аргументы в пользу этого следующие: (а) одной из главных минеральных форм Au в ней выступает высокопробное (не ниже 950) гипогенное самородное золото, (б) главной минеральной формой Ag является селенодантопаит; (в) минералы этой ассоциации не образуют сростаний как с самородным теллуrom, так и с типичными для двух других рудных комплексов, охарактеризованных выше, слоистыми силикатами

– диккитом и смектитами.

Золото-гачингит-селенодантопаитовая минеральная ассоциация встречена нами в богатых выделениях в пределах трех рудных тел (второго, четвертого и пятого) участка БАМ и, согласно нашей качественной оценке, имеет промышленную значимость на Озерновском месторождении. Тем не менее, для того чтобы количественно оценить распространенность этой ассоциации в разных рудных телах, требуется проведение дополнительных исследований.

## Основные результаты и выводы

Два редчайших минерала – гачингит  $Au(Te_{1-x}Se_x)$  и селенодантопаит  $Ag_5Bi_{13}Se_{22}$  – достоверно установлены в диккит-кварцевых и барит-диккит-кварцевых жилах и прожилках второго, четвертого и пятого рудных тел участка БАМ Озерновского золоторудного месторождения на Камчатке. Они находятся здесь в больших количествах, и их диагностика надежно подтверждена электронно-зондовым, рентгенофазовым и оптическим методами. Это второе и наиболее богатое местонахождение в мире для обоих минералов. Порошковые рентгенографические данные для природных образцов гачингита и селенодантопаита получены впервые.

Гачингит и селенодантопаит сконцентрированы в пределах гнезд и кокард размером в сечении до 1 см. Они образуют ксеноморфные (изредка гипидиоморфные) включения размером 5–80 мкм в кварце и барите, а единичные индивиды селенодантопаита достигают 300 мкм. Они ассоциируют друг с другом, а также с самородным золотом, богдановичитом, парагуанахуатитом, фишессеритом, науманитом, голдфилдитом, калаверитом и пиритом. При гипергенном окислении теллуридов, селенидов и сульфидов здесь образуются «горчичное» самородное золото, порошковатый самородный селен, сонораит, поит, мандариноит, теллурит и парателлурит.

По химическому составу некоторые образцы гачингита из Озерновского месторождения заметно отличаются от гачингита из его первоначального местонахождения – рудопроявления Гачинг на севере Камчатки. Также содержание Se в отдельных кристаллах из Озерновского месторождения достигает 16,7 мас.%, что отвечает формуле  $Au_{1,01}(Se_{0,61}Te_{0,38})_{0,99}$ . Эта находка расширяет представления об изоморфизме между Se и Te в этом природном твердом растворе и позволяет более уверенно, чем ранее [Tolstykh et al., 2023], говорить о потенциально новом минерале – Se-доминантном аналоге гачингита с упрощенной формулой  $Au(Se,Te)$ . Статистика по химическому составу для 37 разных зерен минералов серии гачингита из Озерновского месторождения может,

пусть и косвенно, указывать на возможность существования в природе соединений с составами  $Au(Te_{0,6}Se_{0,4})$ ,  $Au(Te_{0,5}Se_{0,5})$  и  $Au(Se_{0,6}Te_{0,4})$ .

Селенодантопаит из Озерновского месторождения в сравнении с селенодантопаитом из своего первоначального местонахождения в Чехии беден Cu, S (в некоторых наших анализах содержание серы ниже предела обнаружения электронно-зондовым методом) и не содержит Pb и Fe. Некоторые изученные нами образцы весьма близки к конечному члену  $Ag_5Bi_{13}Se_{22}$ . Данные из этой работы вкупе с литературными позволяют с большой вероятностью предположить, что между дантопаитом  $Ag_5Bi_{13}Se_{22}$  и селенодантопаитом реализуется полный ряд твердых растворов.

Самородное золото, ассоциирующее с гачингитом и селенодантопаитом, четко разделяется на два морфогенетических типа: (1) гипогенное, образовавшееся совместно с гачингитом и селенодантопаитом и формирующее гипидиоморфные кристаллы и ксеноморфные зерна размером 5–50 мкм; (2) гипергенное тонкокристаллическое «горчичное» золото, возникшее в результате окисления теллуридов и селенидов Au и тесно ассоциирующее с кислородными соединениями теллура.

Самородное золото, гачингит и селенодантопаит, в том числе кратко описанные ранее [Стрельников и др., 2025<sub>1,2</sub>] в составе барит-диккит-кварцевых и диккит-кварцевых жил и прожилков с самородным теллуrom, в данной работе выделены нами в отдельную рудную минеральную ассоциацию – золото-гачингит-селенодантопаитовую, которая отнесена к золото-голдфилдит-кварцевому рудному комплексу Озерновского месторождения.

Новая золото-гачингит-селенодантопаитовая (с фишессеритом в подчиненном количестве) минеральная ассоциация обнаружена в богатых блоках сразу в трех рудных телах участка БАМ – главного промышленного участка Озерновского золоторудного месторождения. Особо примечательно то, что гачингит является одной из главных минеральных форм золота в такой руде. Эта находка вкупе с обнаружением в рудах Озерновского месторождения богатых скоплений малетойваямита  $Au_3Se_4Te_6$  [Кудаева и др., 2024; Стрельников и др., 2025<sub>1</sub>] позволяет считать, что селенотеллуриды золота распространены шире, чем это представлялось ранее, и в том числе могут образовывать промышленно значимые скопления.

## Благодарности

Коллектив авторов выражает огромную благодарность руководству, геологам и всем сотрудникам АО «Сибирский горно-металлургический альянс», которые оказали неоценимую помощь в сборе материала для исследований. Работа вы-

полнена в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова, госбюджетная тема № 121061600049-4. Электронно-зондовое исследование трех образцов и рентгенографические исследования двух образцов выполнены в Центре микроскопии и микроанализа Научного парка СПбГУ в рамках проекта 125021702335-5.

#### Список литературы:

- Бритвин С.Н., Доливо-Добровольский Д.В., Кржижановская М.Г. Программный пакет для обработки рентгеновских порошковых данных, полученных с цилиндрического детектора дифрактометра Rigaku Raxis Rapid II // Записки РМО. 2017. Т. 146. Вып. 3. С. 104–107.
- Вартанян С.С., Орешин В.Ю., Ершова Н.А., Вакин М.Е., Наумова О.А., Морозова Л.В. Отчет по теме «Определить критерии локализации и вещественный состав золотоносных образований Озерновского рудного поля». М.: ФГБУ ЦНИГРИ, 1991.
- Кудаева Ш.С., Козлов В.В., Скильская Е.Д., Сергеева А.В., Толстых Н.Д., Шкилев И.А. Новый тип золотоносной минерализации на Озерновском Au-Te-Se эпitherмальном месторождении (Центральная Камчатка, Россия) // Геология рудных месторождений. 2024. Т. 66. Вып. 5. С. 505–532.
- Некрасов И.Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений // М.: Наука, 1991. 302 с.
- Пеков И.В., Стрельников М.В., Зубкова Н.В., Ханин Д.А., Япаскурт В.О., Вигасина М.Ф., Плетнев П.А., Бритвин С.Н., Янсон С.Ю., Пушаровский Д.Ю. Первый природный пример широкого изоморфизма между селенитами и теллуридами: непрерывный ряд твердых растворов мандариноит–теллуromanандариноит, его кристаллохимические и генетические особенности // Записки РМО. 2026. В печати.
- Спиридонов Э.М., Филимонов С.В., Брызгалов И.А. Твердый раствор фишессерит-науманнит  $(Ag,Au)_2Se$  в рудах вулканогенного месторождения золота Озерновское, Камчатка // Доклады АН. 2009. Т. 425. Вып. 3. С. 391–394.
- Стрельников М.В., Пеков И.В., Япаскурт В.О., Ксе-нофонтов Д.А., Плетнев П.А. Высокоселенитый самородный теллур из Озерновского золоторудного месторождения (Камчатка) и особенности изоморфизма в природной системе теллур–селен // Записки РМО. 2025. Т. 154. Вып. 2. С. 88–105.
- Стрельников М.В., Япаскурт В.О., Бритвин С.Н., Плетнев П.А., Пеков И.В. Гачингит  $Au(Te_{1-x}Se_x)$  из Озерновского золоторудного месторождения (Камчатка) // Труды Ферсмановской научной сессии. Апатиты: Изд-во ГИ КНЦ РАН. 2025. Т. 22. С. 202–206.
- Cranton G.E. and Heyding R.D. The gold/selenium system and some gold seleno-tellurides // Canadian Journal of Chemistry. 1968. V. 46. P. 2637–2640.
- Kovalenker V.A., Plotinskaya O.Yu. Te and Se mineralogy of Ozerovskoe and Prasolovskoe epithermal gold deposits, Kuril – Kamchatka volcanic belt // Geochemistry, Mineralogy and Petrology. 2005. V. 43. P. 14–19.
- Makovicky E., Chovan M., Bakos F. The stibian mustard gold from the Kriván Au deposit, Tatry Mts., Slovak Republic // N. Jb. Miner. Abh. 2007. V. 184. No. 2. P. 207–215.
- Pekov I.V., Britvin S.N., Pletnev P.A., Chukanov N.V., Belakovskiy D.I., Yapaskurt V.O., Turchkova A.G. Ozerovskite,  $Fe^{3+}_4(Te^{4+}O_4)(Te^{4+}O_3)_4(H_2O)_7$ , a new supergene mineral with a unique crystal structure containing two types of pyramidal tellurite groups // Mineralogical Magazine. 2026 (in press).
- Rabenau A. and Schulz H. The crystal structures of  $\alpha$ -AuSe and  $\beta$ -AuSe // Journal of the Less-Common Metals. 1976. V. 48. P. 89–101.
- Sejkora J., Biagioni C., Mackovicky E. Selenodantopaite,  $Ag_5Bi_{13}Se_{22}$ , a new member of the pavonite homologous series from Potůčky, Czech Republic // Mineralogical Magazine. 2026. (in press).
- Tolstykh N.D., Tuhy M., Vymazalová A., Laufek F., Plášil J., Košek F. Gachingite,  $Au(Te_{1-x}Se_x)_{0.2} \approx x \leq 0.5$ , a new mineral from Maletoyvayam deposit, Kamchatka peninsula, Russia // Mineralogical Magazine. 2022. V. 86, No. 2. P. 205–213.
- 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. No. 420.
- Tolstykh N., Kasatkin A., Nestola F., Vymazalova A., Agakhanov A., Palyanova G., Korolyuk V. Auroselenide, AuSe, a new mineral from Maletoyvayam deposit, Kamchatka peninsula, Russia // Mineralogical Magazine. 2023. V. 87. No. 2. P. 284–291.