

Гачингит $\text{Au}(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)$ из Озерновского золоторудного месторождения (Камчатка)

Стрельников М. В.¹, Япаскерт В. О.¹, Бритвин С. Н.², Плетнёв П. А.¹, Пеков И. В.¹

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, sva240319600@yandex.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург sbritvin@gmail.com

Аннотация. Гачингит найден в барит-кварцевых участках брекчированных диккит-кварцевых жил, богатых самородным теллуридом, на участке БАМ Озерновского золоторудного месторождения (Камчатка). Он образует выделения неправильной формы размером от 5 до 80 мкм в кварце. С ним тесно ассоциируют селенодантопаит(?) и парагуанахуатит. В зоне окисления гачингит замещается агрегатом теллуридов Fe и самородного золота. Химический состав гачингита отвечает общей формуле $\text{Au}(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)$, где $0.4 \leq x \leq 0.6$, что расширяет представления о пределах замещений Se-Te в этом твердом растворе, для которого ранее фиксировались значения x от 0.2 до 0.5. Принадлежность озерновского образца с составом $\text{Au}_{1.00}(\text{Se}_{0.51}\text{Te}_{0.49})_{\Sigma 1.00}$ к структурному типу гачингита подтверждена рентгенографически: это первые рентгенодифракционные данные для природного гачингита. Параметры его ромбической элементарной ячейки: $a = 7.56(3)$, $b = 5.742(11)$, $c = 8.93(3)$ Å, $V = 387.8(12)$ Å³.

Ключевые слова: Озерновское месторождение, гачингит, селено-теллуриды золота, минералогия эпitherмальных месторождений, изоморфизм селена и теллура.

Gachingite $\text{Au}(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)$ from the Ozernovskoe gold deposit (Kamchatka)

Strelnikov M. V.¹, Yapaskurt V. O.¹, Britvin S. N.², Pletnev P. A.¹, Pekov I. V.¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, sva240319600@yandex.ru

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, sbritvin@gmail.com

Abstract. Gachingite was found in baryte-quartz sections of brecciated dickite-quartz veins, enriched with native tellurium, at the BAM area of the Ozernovskoe gold deposit (Kamchatka, Russia). It forms irregularly shaped grains ranging in size from 5 to 80 µm embedded in quartz. Selenodantopaite(?) and paraguanaujatite are closely associated with gachingite. In the oxidation zone, gachingite is replaced by an aggregate of Fe tellurites and native gold. The chemical composition of gachingite corresponds to the formula $\text{Au}(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)$, where $0.4 \leq x \leq 0.6$, which expands the understanding of the limits of Se-Te substitutions in this solid solution, for which values of x from 0.2 to 0.5 were previously noted. The belonging of the Ozernovskoe sample with the composition $\text{Au}_{1.00}(\text{Se}_{0.51}\text{Te}_{0.49})_{\Sigma 1.00}$ to the structural type of gachingite has been confirmed by the X-ray powder diffraction: these are the first X-ray diffraction data for natural gachingite. The parameters of its orthorhombic unit cell are: $a = 7.56(3)$, $b = 5.742(11)$, $c = 8.93(3)$ Å, $V = 387.8(12)$ Å³.

Keywords: Ozernovskoe deposit, gachingite, selenio-tellurides of gold, mineralogy of epithermal deposits, isomorphism of selenium and tellurium.

Введение

Озерновское золоторудное месторождение расположено в 150 км к северу от пос. Ключи Карагинского района Камчатского края и относится к эпitherмальным месторождениям золото-теллуридного типа (AS/HS: Kovalenker, Plotinskaya, 2005; Spiridonov et al., 2009, а также ссылки в этих работах). В геологическом отношении оно приурочено к Правоукинской вулcano-тектонической структуре неогенового возраста, которая расположена на пересечении Главного Камчатского разлома и Палано-Командорской системы разломов в пределах Центрально-Камчатского вулcano-плутонического пояса. Благороднометальная (золотая и серебряная) минерализация Озерновского рудного поля пространственно связана с мощными зонами аргиллизации субвулканических тел пропилитизированных андезитов и андезибазальтов (Определить..., 1991; Kovalenker, Plotinskaya, 2005, а также ссылки в этих работах). В пределах Озерновского рудного поля выделены два месторождения (Озерновское и Каюковское) и ряд проявлений (Прометей, Конгломератовый, Малютка

и др.). Озерновское месторождение подразделяется на три крупных участка: БАМ, Промежуточный и Хомут (Определить..., 1991). На данный момент карьерами разрабатываются участки БАМ и Хомут.

Недавно на Озерновском месторождении в рудах, богатых самородным теллуридом, был обнаружен малейший ваямнит $\text{Au}_3\text{Se}_4\text{Te}_6$. Примечательно, что этот крайне редкий селено-теллурид является, по всей видимости, главной минеральной формой золота в одном из типов руд участка БАМ (Кудаева и др., 2024; Стрельников и др., 2024). Это позволило говорить о выделении в пределах месторождения нового типа руд (Кудаева и др., 2024). Чрезвычайно разнообразные в минералогическом аспекте руды Озерновского месторождения ещё недостаточно исследованы и требуют дальнейшего изучения.

Гачингит $\text{Au}(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)$ – исключительно редкий селено-теллурид золота, открытый в 2022 г. на золото-серебряном рудопроявлении Гачинг в пределах Малейшего ваямского рудного узла на севере Камчатки и более нигде пока не отмечавшийся. Он описан с формулой $\text{Au}(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)$, в которой $x = 0.2\text{--}0.5$. Гачингит образует субизометричные включения размером от 2 до 10 мкм в зёрнах самородного золота (Tolstykh et al., 2022). По причине малого размера выделений этот минерал не был исследован рентгенографически: его кристаллографические и структурные характеристики частично приведены по данным для синтетического аналога, а частично получены с использованием методов дифракции отражённых электронов (EBSD) и КР-спектроскопии.

В настоящей работе изучен гачингит, найденный нами в рудах Озерновского месторождения, в т. ч. впервые приведены результаты рентгенографического исследования природного образца этого минерала.

Материалы и методы

Исследован каменный материал, собранный одним из авторов (М.В.С.) в 2024 г. Все изученные в данной работе образцы происходят из Второго рудного тела участка БАМ.

Изучение полированных препаратов руд Озерновского месторождения выполнено под поляризационным микроскопом Carl Zeiss Axioplane 2 на кафедре минералогии МГУ имени М. В. Ломоносова.

Определение химического состава и изучение микроморфологии минералов и их взаимоотношений выполнено методами сканирующей электронной микроскопии и электронно-зондового анализа. Использовался сканирующий электронный микроскоп Jeol JSM-6480LV, оснащённый энергодисперсионным спектрометром INCA X-Maxⁿ, в Лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии МГУ имени М.В. Ломоносова. Для количественного анализа выбирались только зёрна размером более 20 мкм.

Порошковые рентгенограммы получены на дифрактометре Rigaku R-AXIS Rapid II с цилиндрическим детектором (монокроматизированное $\text{CoK}\alpha$ -излучение, 40 кВ, 15 мА, экспозиция 15 мин; геометрия Дебая–Шеррера, $d = 127.4$ мм). Дифракционные данные проинтегрированы в программном комплексе *Osc2Tab* (Бритвин и др., 2017). Расчёт параметров элементарных ячеек осуществлялся с помощью программного обеспечения STOE WinXPOW Crystallinity, версия 2.02.

Результаты и их обсуждение

Гачингит на Озерновском месторождении приурочен к «ураганно» богатым самородным теллуридом диксит-кварцевым жилам в аргиллизитах. По всей видимости, такие богатые теллуридом и селено-теллуридами золота жилы следует отнести к теллур-сильванит-голдфилдит-диксит-кварцевому рудному комплексу, по классификации, приведенной в работе (Определить..., 1991). Гачингит здесь находится в пределах барит-кварцевых гнезд и кокард чёрного цвета в брекчированных участках жил (рис. 1 а). Он преимущественно ассоциирует с селенистым самородным теллуридом, минералом с идеализированной формулой $\text{Ag}_5\text{Bi}_{13}\text{Se}_{22}$ (селенодантопаитом?) и парагуанахуатитом (рис. 1 b, c, d). Гачингит образует несколько вытянутые обособления неправильной формы размером от 5 до 80 мкм в кварце. С селенодантопаитом (?) он нередко образует сростки (рис. 1 e, f).

В зоне окисления гачингит замещается поитом, мандариноитом, сонораитом, парателлуридом, теллуридом, самородным золотом и селеном (рис. 1 f). Нередко можно встретить полные псевдоморфозы тонкого агрегата сонораита и золота по гачингиту.

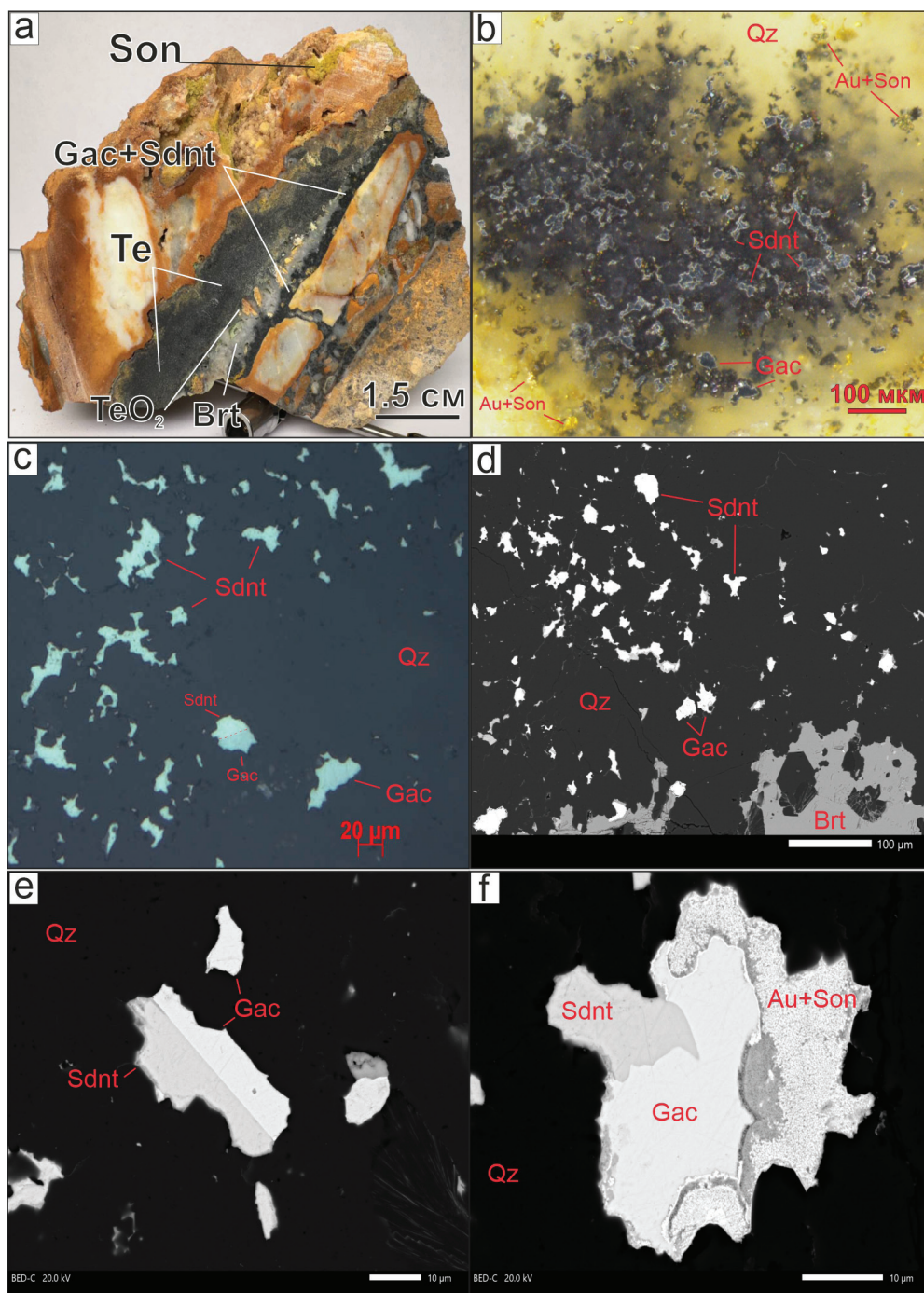


Рис. 1. а – Фрагмент теллур-диксит-барит-кварцевой жилы с кокардово-брекчиевой текстурой в тектонизированных аргиллизитах монокварцевой фации; б, с – обособления гачингита и селенодантопайта(?) в кварце. Фотографии в отражённом свете; все последующие изображения сделаны под сканирующим электронным микроскопом в режиме отражённых электронов; д – барит, селенодантопайт(?) и гачингит в кварце; е – сросток гачингита и селенодантопайта(?); ф – частичная псевдоморфоза золота и сонорайта по сростку гачингита и селенодантопайта(?). Используемые символы минералов: Gac – гачингит, Son – сонорайт, Sdnt – селенодантопайт(?), Te – селенистый самородный теллур, Brt – барит, Qz – кварц, Au – самородное золото

Fig. 1. а – Fragment of a tellurium-dickite-baryte-quartz vein with a cockade-breccia texture in tectonized argillissites of the monoquartz facies; б, с – Separations of gachingite and selenodantopaite(?) in quartz. Photos in reflected light; all subsequent images were taken under a scanning electron microscope in BSE mode; д – Baryte, selenodantopaite(?) and gachingite in quartz; е – An intergrowth of gachingite and selenodantopaite(?); ф – An intergrowth of gachingite and selenodantopaite(?) that is partly replaced by an aggregate of gold and sonoraite. The mineral symbols used are: Gac – gachingite, Son – sonoraite, Sdnt – selenodantopaite(?), Te – se-bearing native tellurium, Brt – baryte, Qz – quartz, Au – native gold

В отражённом свете гачингит имеет серую окраску с голубоватым оттенком (рис. 1 с), обладает сильными двуотражением и анизотропией от голубоватого-серого до сине-серого. Внутренние рефлексы замечены не были.

По химическому составу гачингит из Озерновского месторождения чаще всего близок к наиболее высокоселенистому гачингиту из рудопоявления Гачинг (Tolstykh et al., 2022; табл. 1); как правило он содержит небольшую, не более 0.8 мас. %, примесь Ag. Однако некоторые анализы отвечают более селенистой разновидности (или Se-доминантному аналогу?) этого минерала – с содержанием Se до 16.65 мас. %, что отвечает формуле $Au_{1.01}(Se_{0.61}Te_{0.38})_{\Sigma 0.99}$.

Таблица 1. Химический состав гачингита (мас. % и формулы) из руд участка БАМ Озерновского месторождения (наши данные) и из руд проявления Гачинг (по Tolstykh et al., 2022)

Table 1. Chemical composition of gachingite (wt. % and formula) from ores of the BAM area of the Ozerovskoe deposit (our data) and from ores of the Gaching ore occurrence (after Tolstykh et al., 2022)

№ образца и анализа	Au	Ag	Te	Se	Сумма	Формула
Sepav_2_2-05	65.41	–	25.09	10.57	101.07	$Au_{1.00}(Se_{0.40}Te_{0.59})_{\Sigma 0.99}$
Sepav_2_2-07	64.85	–	25.03	10.3	100.17	$Au_{1.00}(Se_{0.40}Te_{0.60})_{\Sigma 1.00}$
Sepav_2_2-12	64.73	–	25.42	10.14	100.29	$Au_{1.00}(Se_{0.39}Te_{0.61})_{\Sigma 1.00}$
Sepav_2_2-13	65.61	–	24.33	11.04	100.98	$Au_{1.00}(Se_{0.42}Te_{0.58})_{\Sigma 1.00}$
Sepav_2_2-19	68.36	0.05	16.75	16.65	101.8	$Au_{1.01}(Se_{0.61}Te_{0.38})_{\Sigma 0.99}$
Sepav_2_2-20	65.79	0.09	20.84	13.35	100.07	$Au_{1.00}(Se_{0.51}Te_{0.49})_{\Sigma 1.00}$
G-1C 3_5*	62.64	0.46	30.67	6.80	100.57	$(Au_{0.98}Ag_{0.01})_{\Sigma 0.99}(Se_{0.27}Te_{0.74})_{\Sigma 1.01}$
3а*	61.46	0.74	27.72	9.84	99.76	$(Au_{0.94}Ag_{0.02})_{\Sigma 0.96}(Se_{0.38}Te_{0.66})_{\Sigma 1.04}$
G-1C 3_6*	65.15	0.54	22.60	13.47	101.76	$(Au_{0.97}Ag_{0.01})_{\Sigma 0.98}(Se_{0.50}Te_{0.52})_{\Sigma 1.02}$

Примечание. Расчёт формул произведён на сумму атомов, равную 2. *Анализы из работы (Tolstykh et al., 2022).

Для рентгеновских исследований было выбрано зерно из образца O24-6-sepav-2 состава $Au_{1.00}(Se_{0.51}Te_{0.49})_{\Sigma 1.00}$. Полученная порошковая дифрактограмма однозначно отвечает гачингиту; помимо его рефлексов на дифрактограмме наблюдались линии примесных барита, кварца и сонораита. Основные отражения дифрактограммы и рассчитанные по ним параметры ромбической элементарной ячейки озерновского гачингита приведены в табл. 2. Небольшие различия в параметрах элементарной ячейки озерновского гачингита и синтетического образца (Tolstykh et al., 2022) обусловлены их слабо отличающимся химическим составом.

Таблица 2. Главные отражения порошковой рентгенограммы и рассчитанные по ним параметры ромбической элементарной ячейки гачингита из обр. O24-6-sepav-2 на порошковой рентгенограмме; для сравнения приведены данные для синтетического аналога гачингита из статьи (Tolstykh et al., 2022)

Table 2. Main reflections on the X-ray powder diffraction pattern and orthorhombic unit cell dimensions of gachingite from the Ozerovskoe deposit (sample O24-6-sepav-2); for comparison, data on synthetic analogue of gachingite from the article (Tolstykh et al., 2022) are given

<i>hkl</i>	002	112	202	021	221
	<i>d</i> (Å), <i>I</i> (%)	<i>d</i> (Å), <i>I</i> (%)	<i>d</i> (Å), <i>I</i> (%)	<i>d</i> (Å), <i>I</i> (%)	<i>d</i> (Å), <i>I</i> (%)
O24-6-sepav-2	4.46, 34	3.20, 32	2.89, 99	2.73, 100	2.21, 81**
Tolstykh et al., 2022*	4.461, 65	3.194, 36	2.883, 99	2.734, 100	2.215, 51

Образец	Формула	<i>a</i> , Å	<i>b</i> , Å	<i>c</i> , Å	<i>V</i> , Å ³
O24-6-sepav-2	$Au_{1.00}(Se_{0.51}Te_{0.49})_{\Sigma 1.00}$	7.56(3)	5.742(11)	8.93(3)	387.8(12)
Tolstykh et al., 2022*	$Au_{1.00}(Se_{0.47}Te_{0.53})_{\Sigma 1.00}$	7.5379(12)	5.7415(10)	8.8985(13)	385.12(11)

Примечание. *Данные для синтетического аналога гачингита; **интенсивность этого рефлекса несколько завышена в связи перекрытием линии гачингита с линией барита (*d* = 2.210 Å, *I* = 28 % для чистого барита).

Заключение

В рудах участка БАМ Озерновского золоторудного месторождения (Ц. Камчатка) установлен гачингит, идентификация которого однозначно подтверждена данными оптической микроскопии, электронно-зондового анализа и порошковой рентгенографии (рентгенографическое изучение гачингита на природном материале выполнено впервые). Это вторая находка гачингита в мире.

По химическому составу (величине отношения Se:Te) некоторые образцы гачингита из Озерновского месторождения заметно отличаются от гачингита из его первоначального местонахождения – рудопоявления Гачинг на севере Камчатки: содержание селена в отдельных его кристаллах достигает 16.65 мас. %, что отвечает формуле $\text{Au}_{1.01}(\text{Se}_{0.61}\text{Te}_{0.38})_{\Sigma 0.99}$, которая «выходит за рамки» вариаций состава этого минерала, предложенных Н. Д. Толстых с коллегами: $\text{Au}(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x) 0.2 \approx x \leq 0.5$ (Tolstykh et al., 2022). Наши данные не только расширяют представления об изоморфизме между Se и Te в этом природном твёрдом растворе, но и дают основания для уточнения его формулы. Не затрагивая вопроса о возможном номенклатурном статусе этого минерала (высокоселенистая разновидность или Se-доминантный аналог гачингита?), отметим, что предложенный первооткрывателями гачингита $\text{Au}(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)$ диапазон значений x может быть расширен: $0.2 \approx x \leq 0.6$.

Гачингит является новой и, вероятно, достаточно распространённой минеральной формой золота на Озерновском месторождении. Его богатые скопления в барит-кварцевых с селенидами и Se-содержащим самородным теллуром агрегатах позволяют, пусть пока и с осторожностью, говорить о выделении в пределах участка БАМ Озерновского месторождения нового типа благороднометалльной минерализации. Однако этот вопрос, конечно, требует дальнейшего, более подробного изучения.

Благодарности

Коллектив авторов выражает огромную благодарность руководству, геологам и всем сотрудникам АО «СиГМА», которые оказали неоценимую помощь в сборе материала для исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова, госбюджетная тема № 121061600049-4.

Литература

1. 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, № 3. С. 104–107.
2. Определить критерии локализации и вещественный состав золотоносных образований Озерновского рудного поля / Ред. С. С. Вартанян. М. Изд-во: ЦНИГРИ, 1991. 185 с.
3. Спиридонов Э. М., Филимонов С. В., Брызгалов И. А. Твёрдый раствор фишессерит-науманнит в рудах вулканогенного месторождения золота Озерновское, Камчатка // Доклады АН. 2009. Т. 425, № 3. С. 391–394.
4. Стрельников М. В., Пеков И. В., Япаскурт В. О., Ксенофонтов Д. А., Плетнёв П. А. Высокселенистый самородный теллур из озерновского месторождения (Камчатка): Матер. Годичного собрания РМО «Минералогические исследования в интересах развития минерально-сырьевого комплекса России и создания современных технологий». Апатиты. Изд-во: ФИЦ КНЦ РАН, 2024. С. 340–341.
5. Kovalenker V. A., Plotinskaya O. Yu. Te and Se mineralogy of Ozernovskoe and Prasolovskoe epithermal gold deposits, Kuril – Kamchatka volcanic belt // Geochemistry, Mineralogy and Petrology. 2005. V. 43. P. 14–19.
6. Kudaeva Sh. S., Kozlov V. V., Skilskaya E. D., Sergeeva A. V., Tolstykh N. D., Shkilev I. A. New type of gold-bearing mineralization at the Ozernovskoe Au–Te–Se epithermal deposit (Central Kamchatka, Russia) // Geology of Ore Deposits. 2024. V. 66, No. 5. P. 547–569. <https://doi.org/10.1134/S1075701524600427>.
7. 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, No. 2. P. 205–213. <https://doi.org/10.1180/mgm.2022.9>.