

УДК 549.31, 549.747, 553.41 (470.54)

DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-1-1

**ТЕЛЛУРОВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ЗОЛОТО-КВАРЦЕВОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПРИОЗЁРНОЕ (СЕВЕРНЫЙ УРАЛ)****А.В. Касаткин¹, М.В. Цыганко², Ф. Нестола³**¹ Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Ленинский пр. 18/2, г. Москва, 119071 Россия;
anatoly.kasatkin@gmail.com² Минералогический музей «Штуфной кабинет», ул. Ватутина 17а,
Североуральск, Свердловская обл., 624480 Россия³ Департамент наук о Земле, Университет Падуи, Виа Градениго 6, Падуя, 35131 Италия

Статья поступила в редакцию 05.03.2023 г., принята к печати 14.03.2023 г.

**TELLURIUM MINERALIZATION OF THE PRIOZERNOE GOLD-QUARTZ DEPOSIT
(NORTHERN URALS, RUSSIA)****A.V. Kasatkin¹, M.V. Tsyganko², F. Nestola³**¹ Fersman Mineralogical Museum RAS, Leninskiy pr. 18/2, Moscow, 119071 Russia; anatoly.kasatkin@gmail.com² Mineralogical Museum «Shtufnoi Kabinet», ul. Vatutina 17a, Severouralsk,
Sverdlovsk oblast, 624480 Russia³ Department of Geosciences, University of Padova, Via Gradenigo 6, Padova, 35131 Italy

Received 05.03.2023, accepted 14.03.2023

Аннотация. В кварцевых жилах Приозёрного месторождения (Свердловская обл., Северный Урал) с помощью оптических методов, электронно-зондового микроанализа, рентгенографии и КР-спектроскопии изучена гипогенная и гипергенная теллуровая минерализация. Теллуриды представлены алтаитом, гесситом, мелонитом, петцитом и сильванитом, которые по отдельности и в сростках друг с другом образуют мелкие включения в кварце. Среди гипергенных минералов установлены теллуropерит, нортстарит, аданит, буркхардит, куранахит и шиффелинит. Они развиваются по галениту, гесситу и церусситу, а также образуют мономинеральные зерна и прожилки в кварце. Находки нортстарита, аданита и шиффелинита являются первыми, а теллуropерита и буркхардита – вторыми на территории Российской Федерации. Куранахит найден впервые на Северном Урале. В статье также приведен обзор находок гипергенных минералов теллура в России.

Ключевые слова: месторождение Приозёрное, Северный Урал, теллуровая минерализация, теллуриды, теллуриды, теллулаты, нортстарит, аданит, шиффелинит, буркхардит, первые находки минералов в России, гипергенные минералы.

Abstract. Primary and supergene Te minerals are identified in quartz veins of the Priozerne deposit (Sverdlovsk oblast, Northern Urals, Russia) and studied by optical methods, electron microprobe analysis, X-ray diffraction and Raman spectroscopy. Tellurides include altaite, hessite, melonite, petzite, and sylvanite. Their individual grains and intergrowths occur as small inclusions in quartz. Supergene minerals include telluroperite, northstarite, adanite, burckhardtite, kuranakhite, and schiefelinite. They replace galena, hessite and cerussite or form monomineral grains and veinlets in quartz. Northstarite, adanite, and schiefelinite are found for the first time in Russian Federation, while the findings of telluroperite and burckhardtite are second. Kuranakhite is found for the first time in the Northern Urals. The findings of supergene Te minerals in Russia are reviewed.

Keywords: Priozerne deposit, Northern Urals, tellurium mineralization, tellurides, tellurates, northstarite, adanite, schiefelinite, burckhardtite, first finds of minerals in Russia, supergene minerals.

Введение и краткая характеристика объекта

Приозёрное золото-кварцевое месторождение (59°58'06" с.ш., 60°23'14" в.д.) находится на Северном Урале в 25 км к северу от г. Краснотурьинск Свердловской области. Оно было открыто в 1894 г., разведывалось с 1894 по 1897 гг. и отрабатывалось открытым и подземным способами на кварцевые флюсы медеплавильного производства с попутной добычей золота. В дореволюционное время на месторождении был заложен карьер (разрез) глубиной до 8 м и пробито несколько шахт глубиной до 36 м (Трифонов, 1948). Карьер вытянут с юго-запада на северо-восток и имеет длину около 200 м.

Месторождение расположено в пределах Устейского массива альпинотипных гипербазитов. Рудоносная зона состоит из нескольких кварцевых жил, приуроченных к контакту небольшого тела диоритов и диоритовых порфиринов с апогарцбургитовыми серпентинитами (рис. 1). Длина жил меридионального простирания с крутым восточным падением составляет от 100 до 200 м. По падению жилы имеют варьирующую мощность – от 0.1 до 6 м с резкими раздувами и пережимами. По данным разведочных шурфов протяженность рудной зоны – до 500 м (Трифонов, 1948; Мурзин, 1997).

В настоящее время карьер месторождения затоплен грунтовыми водами в летние месяцы и затянута коркой льда в зимние (рис. 2). Лишь в очень засушливые годы обнажается дно карьера с кварцевыми жилами. Сохранились многочисленные разведочные выработки конца XIX – начала XX вв.: канавы, глубокие шурфы с деревянным креплением, а также множество неглубоких шурфов. В северо-западном борту карьера складировано несколько штабелей чистого кварца и кварца с вкрапленностью рудных минералов. В самом карьере рудная минерализация визуально не прослеживается.

Несмотря на более чем вековую историю, Приозёрное месторождение изучено очень слабо. Краткие сведения о его геологии и минералогии содержатся, по сути, всего в двух работах (Трифонов, 1948; Мурзин, 1997). Согласно В.П. Трифонову

(1948), рудная минерализация в кварцевых жилах представлена вкрапленностью пирита, галенита, аргентита (скорее всего, речь идет о параморфозах акантита по аргентиту – *прим. авт.*) и, редко, халькопирита, а из гипергенных образований отмечены азурит и лимонит. Также в этой работе отмечалось крайне невыдержанное содержание Au в кварце, развитом преимущественно у зальбандов жил. В.В. Мурзин (1997) описал золото, пирит, галенит и халькопирит, а также оптически и электронно-зондовым методом установил на месторождении редкие сульфиды Ag, Fe, Cd, Ni и Zn (аргентопентландит, гринокит, пирротин, полидимит, сфалерит, ульманнит), теллуриды и сульфотеллуриды (алтаит, гессит, тетрадимит, штютцит).

В 2017 г. в материале, собранном М.В. Цыганко, нами впервые на месторождении были диагностированы такие гипергенные минералы, как биверит-(Cu), малахит, осаризаваит, пироморфит, фосфогедифан, форнасит, церуссит. Они обычно образуют тонкие корки и примазки на кварце площадью до 5×5 мм². Тогда же впервые для России здесь был найден редкий Mn-Fe-хлорит – гониерит (Касаткин, 2021).

В декабре 2022 г. М.В. Цыганко отобрал образцы кварца с видимой вкрапленностью галенита и пирита. Размер гнезд сульфидов обычно не превышает 1–2 см. В них нами установлена разнообразная теллуровая минерализация, представленная гипогенными и гипергенными минералами. К числу первых относятся теллуриды – алтаит, гессит, мелонит, петцит и сильванит, к числу вторых – теллуриды (нортстарит, аданит), теллулаты (буркхардтит, куранахит, шиффелинит) и Те-содержащий оксихлорид (теллуруперит). Кроме них в изученных образцах найдены и другие рудные минералы. Золото образует мелкие, длиной первые десятки микрометров прожилки в гессите. Акантит, гринокит и ковеллин развиваются по галениту в виде зерен размером 0.005–0.03 мм. Малахит слагает тонкие зеленые примазки на кварце площадью до нескольких мм². Церуссит и англезит образуют ни-

Для цитирования: Касаткин А.В., Цыганко М.В., Нестола Ф. Теллуровая минерализация золото-кварцевого месторождения Приозерное (Северный Урал). Минералогия, 9(1), 5–22. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-1-1.

For citation: Kasatkin A.V., Tsyganko M.V., Nestola F. Tellurium mineralization of the Priozernoe gold-quartz deposit (Northern Urals, Russia). Mineralogy, 9(1), 5–22. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-1-1.

Рис. 1. Геологическая схема золото-кварцевого месторождения Приозёрное, по (Мурзин, 1997) с изменениями.

1 – серпентиниты; 2 – андезитовые порфириды; 3 – диориты и диоритовые порфириды; 4 – зоны березитизации и лиственитизации; 5 – кварцевые жилы.

Fig. 1. Geological map of the Priozernoe gold-quartz deposit, modified after (Murzin, 1997).

1 – serpentinite; 2 – andesitic porphyryite; 3 – diorite, dioritic porphyryite; 4 – zones of beresitization and listvenitization; 5 – quartz veins.

тевидные агрегаты и прожилки в кварце длиной до 1 мм, а также каймы вокруг зерен галенита мощностью до первых десятков микрометров. В церуссите диагностированы вросстки перита (редкого оксихлорида Bi) размером до 0.02 мм. Подробное описание найденных нами минералов Те приводится в настоящей статье.

Методы исследования

Минералы описаны по результатам наблюдений под стереомикроскопом Zeiss Discovery V8. Оптические свойства рудных минералов в отраженном свете исследованы с помощью поляризационных микроскопов ПОЛАР-3 и ПОЛАМ-215. Спектры отражения измерены в воздухе по стандарту Si на микроскопе-спектрофотометре МСФ-Р фирмы ЛОМО (диаметр фотометрической диафрагмы 0.3 мм, размер выходной щели монохроматора 0.1 мм, спектральный интервал 6 нм; аналитик А.В. Касаткин).



Рис. 2. Вид на месторождение Приозёрное. Декабрь 2022 года. Фото: А.М. Цыганко.

Fig. 2. View to the Priozernoe deposit. December 2022. Photo: A.M. Tsyganko.

Микроморфология и химический состав минералов изучались с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi FlexSEM 1000 с ЭДС-детектором Xplore Contact 30 и системой анализа Oxford AZtecLive STD при ускоряющем напряжении 20 кВ, диаметре зонда 2 мкм и поглощенном токе 5 нА на эталоне – металлическом кобальте (аналитик А.В. Касаткин). Определявшиеся элементы, аналитические рентгеновские линии и стандарты: $AlK\alpha$ – кианит; $SiK\alpha$ – SiO_2 ; $SK\alpha$ и $FeK\alpha$ – FeS_2 ; $ClK\alpha$ – $TlCl$; $MnK\alpha$ – Mn_2SiO_4 ; $NiK\alpha$ – Ni ; $CuK\alpha$ – Cu ; $AgL\alpha$ – Ag ; $TeL\beta$ – $HgTe$; $CdL\beta$ – Cd ; $AuM\alpha$ – Au ; $PbM\alpha$ – $PbSe$ и $PbWO_4$; $BiM\beta$ – Bi_2WO_6 . На СЭМ изображениях использованы символы, рекомендованные Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной минералогической ассоциации (Warr, 2021).

Спектры комбинационного рассеяния (КР) света регистрировались в Департаменте наук о земле Университета г. Падуя, Италия (аналитики Л. Сантелло и А.В. Касаткин) с помощью спектрометра WITec alpha300 R, оснащенного оптическим микроскопом (объектив 50 $\times$), голографической решеткой (300 штрих/мм) и CCD-детектором на основе кремния с Пельтье-охлаждением. Источником монохроматического возбуждающего излучения служил полупроводниковый лазер с рабочей длиной волны излучения 532 нм. КР спектры регистрировались в 180-градусной геометрии рассеяния в диапазоне 50–4000 cm^{-1} с выходной мощностью лазера 0.5 мВт и временем накопления спектра 30 сек. Отметим, что такая низкая мощность оказалась оптимальной для регистрации КР спектров теллуридов и теллуриатов. Попытки ее увеличения приводили к разрушению поверхности исследуемых образцов.

Получение рентгенодифракционных данных оказалось затруднено вследствие малого размера выделений соответствующих минералов и необходимости их извлечения из твердой кварцевой породы. Тем не менее, для части минералов рентгеновское исследование было проведено в лаборатории Департамента наук о Земле Университета г. Падуя, Италия (аналитик Ф. Нестола) с помощью многофункционального рентгеновского дифрактометра Rigaku Oxford Diffraction SuperNova с детектором Pilatus 200K Dectris, на $MoK\alpha$ -излучении при ускоряющем напряжении 50 кВ, силе тока 0.12 мА и размере фокуса рентгеновского пучка 0.12 мм. Стандартное расстояние образец–детектор составляло 68 мм, время экспозиции – до 30 минут.

Описание минералов

Алтаит и гессит уже отмечались на Приозёрном месторождении (Мурзин, 1997), остальные теллуриды обнаружены нами здесь впервые.

Алтаит $PbTe$ образует сростки с гесситом и золотом в кварце (рис. 3а). Размер индивидов алтаита не превышает 0.02 мм. В отраженном свете он диагностируется по высокой отражательной способности и изотропности. На контакте с гесситом алтаит ярко-белый с отчетливо зеленоватым оттенком.

Гессит Ag_2Te – самый распространенный среди всех встреченных теллуридов, и он же образует наиболее крупные индивиды. Его гипидиоморфные и ксеноморфные зерна размером до 0.12 мм, а также сростки с другими теллуридами и золотом размером до 0.08 мм заключены в кварце и галените (рис. 3а–г). В сростках гессит хорошо отличается от соседствующих с ним теллуридов по бледно-коричневатому оттенку при одном никеле, отчетливо цветному двуотражению и особенно по характерным сине-фиолетовым цветам анизотропии. Некоторые зерна гессита частично или полностью замещены гипергенными минералами – теллуритами и теллуриатами (рис. 4в, г, и).

Мелонит $NiTe_2$ встречен в виде очень тонких пластинчатых кристаллов до 0.04×0.005 мм в сечении, сростающихся с гесситом и сильванитом (рис. 3б, в). От очень близкого к нему по отражательной способности и силе двуотражения сильванита мелонит отличается слабым розоватым оттенком, заметным при одном никеле. При этом оба они существенно ярче гессита, а также имеют другие цвета анизотропии – светло-серый против сине-фиолетового.

Петцит Ag_3AuTe_2 сростается с гесситом в составе очень мелких зерен размером до 0.007 мм (рис. 3г).

Сильванит $AgAuTe_4$ установлен в сложном сростке с мелонитом и гесситом размером 0.08×0.03 мм (рис. 3в). В отраженном свете на контакте с этими теллуридами он выглядит ярко-белым, остальные его оптические свойства указаны выше.

Химический состав всех теллуридов близок к стехиометричному (табл. 1).

Теллуриперит $Pb_3Te^{4+}O_4Cl_2$, редкий оксихлорид из группы надорита, выявлен впервые на Северном Урале и второй раз – на территории Российской Федерации. Минерал обнаружен в виде тонковолокнистых кристаллов, слагающих прожилки

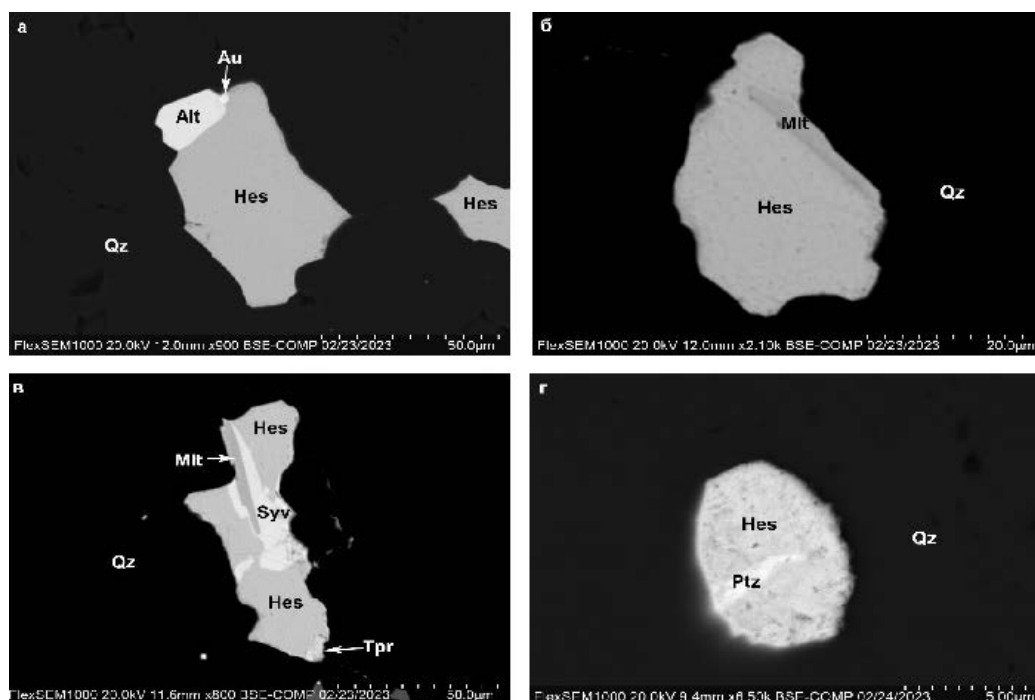


Рис. 3. Морфология теллуридов месторождения Приозёрное:

а – сросток алтаита (Alt), гессита (Hes) и самородного золота (Au) в кварце (Qz); б – сросток мелонита (Mlt) и гессита в кварце; в – сросток теллуридов (гессит, мелонит, сильванит (Syv) и теллуроперита (Tpr)) в кварце; г – мелкое включение петцита (Ptz) и гессита в кварце.

РЭМ-фото в отраженных электронах.

Fig. 3. Morphology of tellurides from the Priozernoe deposit:

а – aggregate of altaite (Alt), hessite (Hes) and native gold (Au) in quartz (Qz); б – intergrowth of melonite (Mlt) and hessite in quartz; в – aggregate of tellurides (hessite, melonite, sylvanite (Syv) and telluroperite (Tpr)) in quartz; г – small inclusion of petzite (Ptz) and hessite in quartz.

BSE images.

Таблица 1

Химический состав (мас. %) теллуридов из месторождения Приозёрное

Table 1

Chemical composition (wt. %) of tellurides from the Priozernoe deposit

№ п/п	Минерал	Ni	Ag	Au	Pb	Te	Сумма	Эмпирические формулы
1	Алтаит	—	—	—	61.34	37.94	99.28	$Pb_{1.00}Te_{1.00}$
2	Гессит	—	63.25	—	—	36.33	99.58	$Ag_{2.02}Te_{0.98}$
3	Мелонит	18.50	—	—	—	80.74	99.24	$Ni_{1.00}Te_{2.00}$
4	Петцит	—	42.62	24.46	—	32.62	99.70	$Ag_{3.06}Au_{0.96}Te_{1.98}$
5	Сильванит	—	13.47	24.66	—	61.78	99.91	$Ag_{1.02}Au_{1.02}Te_{3.96}$

Примечание. Здесь и в табл. 2, прочерк – содержание компонента ниже предела обнаружения. Формулы минералов рассчитаны на сумму атомов, равную двум (алтаит), трем (гессит, мелонит) и шести (петцит, сильванит).

Note. Here and in Table 2, dash – the content of element is below detection limit. The formulas of minerals are recalculated to atom sum of two (altaite), three (hessite, melonite) and six (petzite, sylvanite).

в кварце длиной 0.1 мм и мощностью не более 0.02 мм (рис. 4а), а также зерна размером 10 мкм в краевой части сростка теллуридов (рис. 3в). Теллуриды имеют зеленоватый цвет и алмазный блеск. В отраженном свете минерал серый, немного светлее

вмещающего кварца и приблизительно одинаковой отражательной способности с ассоциирующим цитрусовым: $R = 12-8\%$ при $\lambda = 550$ нм (Чвилева и др., 1988). К сожалению, мелкий размер индивидов теллуридов не позволил провести никаких

Таблица 2

Химический состав (мас. %) гипергенных минералов Те из месторождения Приозёрное

Table 2

Chemical composition (wt. %) of supergene Te minerals of the Priozernoe deposit

№ п/п	Минерал	CuO	PbO	Bi ₂ O ₃	TeO ₂	SO ₃	TeO ₃	Cl/S ¹	O=Cl/S ¹	Сумма	Эмпирические формулы
1	Теллуруперит	—	74.39	—	18.89	—	—	7.45	-1.68	99.05	Pb _{2.96} Te ⁴⁺ _{1.05} O _{4.13} Cl _{1.87}
2	Нортстарит	—	68.35	4.32	20.26	—	—	7.59	-1.72	98.80	Pb _{2.64} Te ⁴⁺ _{1.10} Bi _{0.16} O _{4.15} Cl _{1.85}
3	Аданит	—	59.47	—	34.63	3.55 ²	—	1.42 ²	-0.71	98.36	Pb _{6.07} Te ⁴⁺ _{4.95} S ⁶⁺ _{1.01} O _{17.99}
4	Аданит	—	65.58	—	22.54	12.57	—	—	—	100.69	Pb _{1.96} Te ⁴⁺ _{0.94} S _{1.05} O ₇
5	Буркхардит	2.63	45.11	1.57	—	—	16.81	—	—	100.00 ³	(Pb _{1.83} Bi _{0.06}) _{0.91} (Cu _{0.30} Fe ³⁺ _{0.76} Mn ³⁺ _{0.16} Te ⁶⁺ _{0.88}) _{2.10} (Al _{0.88} Si _{3.21}) _{4.09} O ₁₄
6	Куранахит	0.49	45.97	6.82	—	—	30.88	—	—	99.01	Pb _{1.11} Cu _{0.03} Cd _{0.03} Zn _{0.02} Bi _{0.16} Mn ⁴⁺ _{0.86} Te ⁶⁺ _{0.95} O ₆
7	Шифелинит	—	61.80	—	—	1.16	29.13	—	—	98.78	Pb _{10.01} Te ⁶⁺ _{6.00} O _{20.98} (OH) _{13.02} (SO ₄) _{0.52} (H ₂ O) _{6.92}

Примечание. В сумму анализов также входят (мас. %): 4.91 Al₂O₃, 1.38 Mn₂O₃, 6.58 Fe₂O₃, 21.01 SiO₂, 0.34 ZnO, 0.74 CdO, 13.77 MnO₂ (ан. 6), 6.69 H₂O (ан. 7). Формулы минералов рассчитаны на: сумму анионов, равную 6 (теллуруперит) и 19 (нортстарит); количество атомов O, равное 6 (курапахит), 7 (аданит) и 14 (буркхардит); 6 атомов Te и 43 атома O (шиффелинит). ¹ – для теллуруперита – Cl, для нортстарита – S; ² – общая сера (7.10 мас. % SO₃) разделена между SO₃ и S в отношении S⁶⁺ : S²⁻ = 1 : 1 (Kampf et al., 2020b); ³ – анализ нормализован на 100 мас. % после вычета примеси клинохлора.

Note. The analytical totals also include (wt. %): 4.91 Al₂O₃, 1.38 Mn₂O₃, 6.58 Fe₂O₃, 21.01 SiO₂, 0.34 ZnO, 0.74 CdO, 13.77 MnO₂ (an. 6), 6.69 H₂O (calculated by stoichiometry, an. 7). The empirical formulas of minerals are recalculated to six (telluroperite) and 19 (northstarite) anions, six (kuranakite), seven (adanite) and 14 (burckhardtite) O atoms, six Te atoms and 43 O atoms per formula unit (schiffelinite); ¹ – Cl for telluroperite and S for northstarite; ² – total sulfur measured as 7.10 wt. % SO₃ was divided between SO₃ and S based upon S⁶⁺ : S²⁻ = 1 : 1 (Kampf et al., 2020b); ³ – the analysis was normalized to 100 wt. % after subtraction of clinocllore.

инструментальных исследований, кроме химических анализов. Отметим, что если состав волокнистых кристаллов теллуруперита близок к идеальному (табл. 2, ан. 1), то в зерне, замещающем теллуриды, присутствует небольшая примесь Bi₂O₃ (табл. 2, ан. 2). Это второй случай выявленного изоморфизма между теллуруперитом и его Bi-аналогом перитом. Ранее ограниченный ряд твердых растворов между этими минералами был установлен нами в образцах из Бурановского месторождения на Южном Урале (Касаткин и др., 2022). Отметим также, что в составе присутствующего в этой минеральной ассоциации перита (см. выше) примесь Те не установлена.

Нортстарит Pb₆(Te⁴⁺O₃)₅(S⁶⁺O₃S²⁻), чрезвычайно редкий теллури-тиосульфат свинца, до настоящего времени известный только в образцах из месторождений Норт Стар (*North Star*) в штате Юта (США), являющегося его первоначальным местонахождением (Kampf et al., 2020b), и Деламар (*Delamar*) в штате Невада (США) (Kampf et al., 2022). Наша находка нортстарита является первой на территории Российской Федерации и третьей в мире.

Минерал образует мономинеральные обособления в кварце, а также развивается в краевых зонах зерен галенита и гессита, замещая их (рис. 4а–е). Некоторые зерна нортстарита представляют собой практически полные псевдоморфозы по гесситу; последний обнаруживается лишь в виде реликтов (рис. 4г). Максимальный размер индивидов нортстарита достигает 0.2 мм. Минерал имеет бурый цвет и алмазный блеск. В отраженном свете на фоне вмещающего кварца нортстарит светло-серый с очень слабым болотно-зеленым оттенком (рис. 4д), однако на контакте с гораздо более ярким, белым галенитом он выглядит темно-серым. Двухотражение в воздухе очень слабое. В скрещенных николях наблюдается отчетливая анизотропия в серых тонах. Коэффициенты отражения нортстарита и других гипергенных минералов Те, установленных нами, приведены в табл. 3, а спектры – на рис. 5. Нортстарит обладает дисперсией

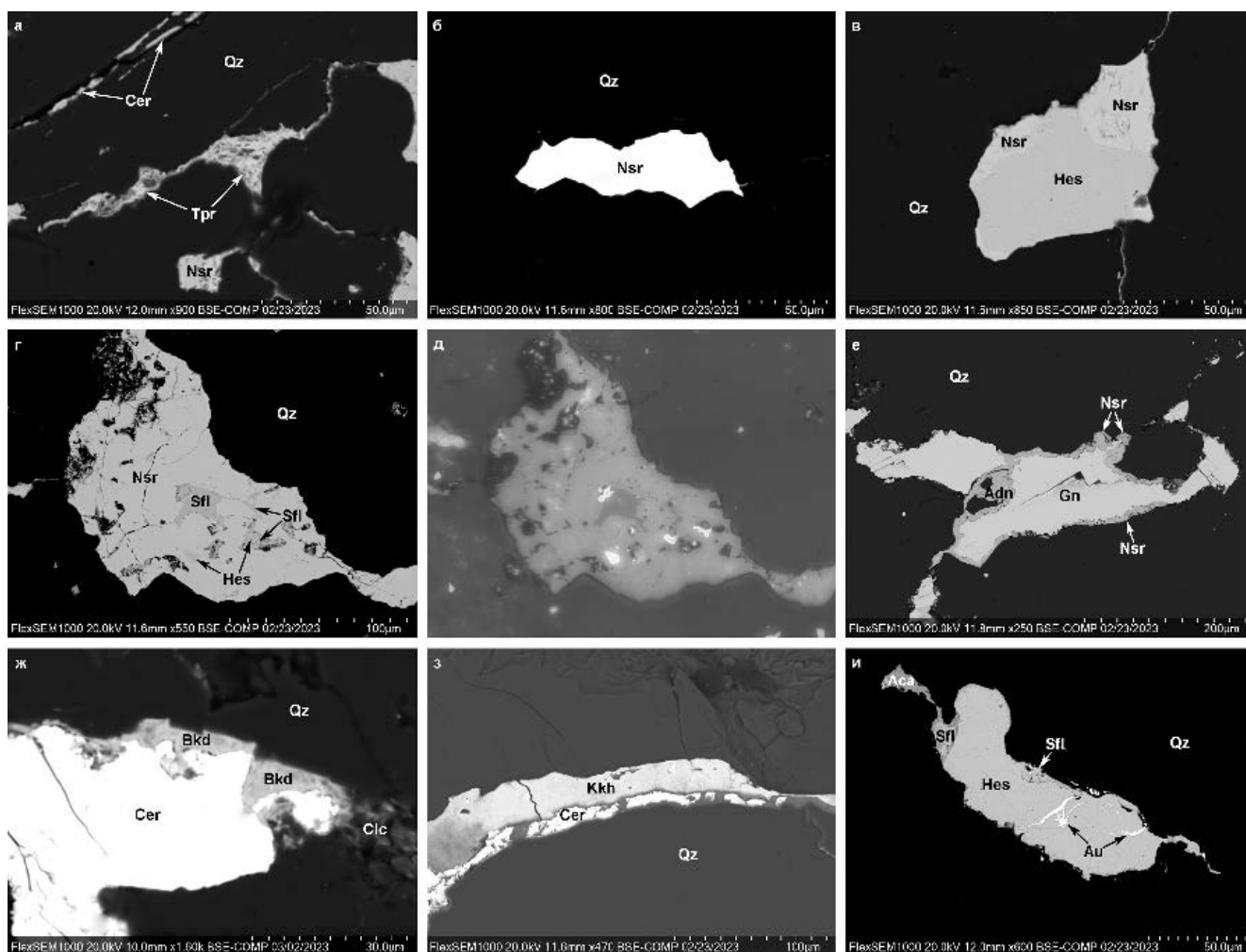


Рис. 4. Морфология гипергенных минералов месторождения Приозёрное:

а – прожилок теллулоперита в кварце в ассоциации с нортстаритом (Nsr) и церусситом (Cer); б – мономинеральное обособление нортстарита в кварце; в – частичная псевдоморфоза нортстарита по гесситу в кварце; г – зерно нортстарита и шиффелинита (Sfl) с реликтами гессита в кварце; д – то же зерно в отраженном свете; е – кайма нортстарита и зерно аданита (Adn), развивающиеся по галениту (Gn) в кварце; ж – кайма буркхардтита (Bkd) по прожилку церуссита с клинохлором (Clc) в кварце; з – прожилок куранахита (Kkh) и церуссита в кварце; и – зерна шиффелинита, замещающие по краям гессит с самородным золотом и акантитом (Aca) в кварце.

а–г, е–и – РЭМ-фото в отраженных электронах. д – фото в отраженном свете.

Fig. 4. Morphology of supergene minerals from the Priozernoe deposit:

а – telluroperite veinlet in quartz in assemblage with northstarite (Nsr) and cerussite (Cer); б – northstarite grain in quartz; в – partial pseudomorphosis of northstarite after hessite in quartz; г – northstarite and schiefelinite (Sfl) aggregate with hessite relics in quartz; д – the same aggregate in reflected light; е – northstarite rim and adanite (Adn) grain after galena (Gn) in quartz; ж – burckhardtite (Bkd) rim on cerussite veinlet with clinocllore (Clc) in quartz; з – kuranakhite (Kkh) and cerussite veinlet in quartz; и – schiefelinite grains replacing hessite with native gold and acanthite (Aca) in quartz.

а–г, е–и –BSE images. д – reflected light.

смешанного типа с очень слабо выраженным максимумом в красной области.

Химический состав нортстарита показан в табл. 2, ан. 3. Одно из его зерен, извлеченное из аншлифа, было изучено рентгенографически. После вычета интенсивных линий вмещающего кварца на рентгенограмме остаются средние по интенсив-

ности и слабые отражения на 3.09, 2.95, 2.14, 1.72, 1.62 и 5.80 Å, принадлежащие нортстариту. Рассчитанные с помощью программы UnitCell (Holland, Redfern, 1997) параметры гексагональной ячейки уральского минерала ($a = 10.246(1)$, $c = 11.687(2)$ Å, $V = 1062.5(2)$ Å³) близки параметрам элементарной ячейки голотипа нортстарита из месторожде-

Таблица 3

Коэффициенты отражения гипергенных минералов Те из месторождения Приозёрное

Table 3

Reflectance values of supergene Te minerals of the Priozernoe deposit

	Нортстарит		Аданит		Куранахит		Шиффелинит
λ (нм)	$R_{\max}$	$R_{\min}$	$R_{\max}$	$R_{\min}$	$R_{\max}$	$R_{\min}$	R
400	13.2	12.4	10.0	9.8	15.3	14.7	9.0
420	13.4	12.7	10.3	10.2	15.5	14.9	9.1
440	13.5	12.8	10.7	10.6	15.6	14.9	9.3
460	13.6	12.9	11.0	10.9	15.8	15.0	9.4
480	13.6	13.0	11.2	11.1	16.0	15.2	9.5
500	13.7	13.0	11.6	11.4	16.0	15.3	9.6
520	13.7	13.0	11.9	11.7	16.0	15.3	9.7
540	13.7	12.9	11.9	11.7	16.1	15.3	9.7
560	13.7	13.0	12.0	11.8	16.1	15.3	9.7
580	13.6	12.9	12.0	11.8	16.0	15.2	9.7
600	13.6	12.9	11.9	11.7	15.9	15.0	9.8
620	13.6	12.9	12.1	11.8	15.8	14.8	9.8
640	13.6	12.9	12.3	11.9	15.6	14.7	9.8
660	13.7	13.0	12.4	11.9	15.5	14.6	9.9
680	13.8	13.1	12.5	12.0	15.6	14.6	10.0
700	14.0	13.2	12.9	12.3	15.7	14.8	10.2

Примечание. По результатам десяти замеров трех разных зерен шиффелинита разница между $R_{\max}$ и $R_{\min}$ не превышает 0.1 %, поэтому приведено среднее значение R для каждой длины волны.

Note. According to ten measurements of three schiefelinite grains, the difference between $R_{\max}$ and $R_{\min}$ does not exceed 0.1 %, therefore the average R value is given for each wavelength.

ния Норт Стар $a = 10.2495(5)$, $c = 11.6677(8)$ Å, $V = 1061.50(13)$ Å³ (Kampf et al., 2020b).

КР спектр минерала (рис. 6-1) идентичен КР спектру нортстарита из месторождения Норт Стар (Kampf et al., 2020b). Интерпретация характеристических полос спектров нортстарита и других установленных нами теллуридов и теллуридов основана на данных из работ (Gabelica, 1980; Jensen, 2002; Bindi et al., 2011; Welch et al., 2016; Weil et al., 2018; Kampf et al., 2020a; Kampf et al., 2023).

Самая сильная полоса при 736 см⁻¹ соответствует симметричным, а полосы при 685 и 609 см⁻¹ – асимметричным валентным колебаниям связей Te⁴⁺–O. Полосы в районе 450–320 см⁻¹ являются результатом деформационных колебаний O–Te⁴⁺–O. Целый ряд полос относится к различным колебательным модам тиосульфат-иона S₂O₃²⁻. Так, слабые полосы при 1114 и 992 см⁻¹ могут быть интерпретированы как асимметричные и симметричные валентные колебания S–O связей, соответственно. Слабые полосы при 657 и 541 см⁻¹ трактуются как

симметричные и асимметричные деформационные колебания S–O. Слабая полоса при 423 см⁻¹ вызвана, возможно, валентными колебаниями связей S–S. Полосы с частотами ниже 210 см⁻¹ относятся к валентным и деформационным колебаниям связей Pb–O и решеточным модам. Отсутствие полос в диапазоне выше 1200 см⁻¹ подтверждает безводный характер минерала.

Аданит Pb₂(Te⁴⁺O₃)(SO₄), безводный теллури-сульфат свинца, впервые найден также на месторождении Норт Стар (Kampf et al., 2020c). По степени редкости аданит сопоставим с нортстаритом. До настоящего времени сообщалось о находках аданита только на месторождении Норт Стар в штате Юта, в рудном районе Томбстоун в штате Аризона (Kampf et al., 2020c), а также на месторождении Деламар в Неваде (Kampf et al., 2022). Наша находка является первой на территории Российской Федерации и четвертой в мире.

Аданит установлен нами в единственном зерне размером ~0.1 × 0.05 мм, развивающемся по

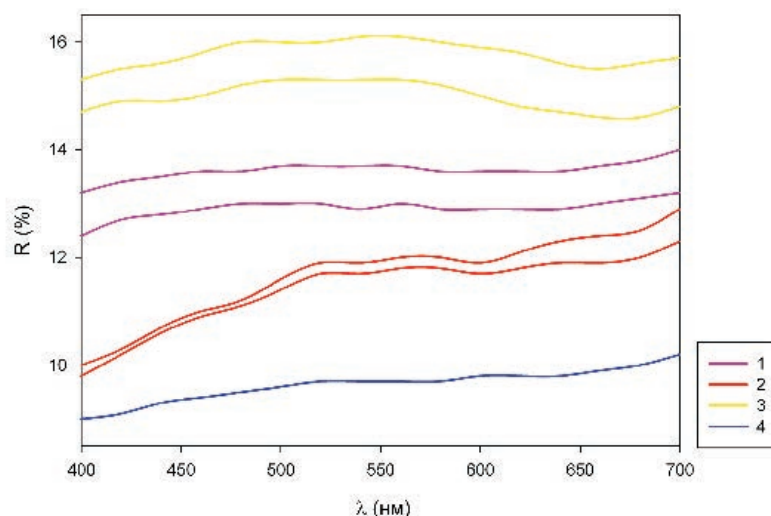


Рис. 5. Спектры отражения гипергенных минералов Те месторождения Приозёрное.

1 – нортстарит, 2 – аданит, 3 – куранахит, 4 – шиффелинит.

Fig. 5. Reflectivity curves of supergene Te minerals from the Priozernoe deposit.

1 – northstarite, 2 – adanite, 3 – kuranakhite, 4 – schieffelinite.

галениту (рис. 4е). Цвет минерала светло-коричневый, блеск алмазный. В отраженном свете аданит серый на фоне ярко-белого галенита, светлее вмещающего кварца, но чуть темнее нортстарита, что подтверждается сравнительными данными об их отражательной способности (табл. 3). Двухотражение в воздухе не наблюдается. В скрещенных николях аданит отчетливо анизотропен, в серых тонах. Кривые спектров отражения имеют аномальную дисперсию (рис. 5).

Диагностика уральского аданита подтверждена данными химического состава (табл. 2, ан. 4) и КР спектром (рис. 6-2), который практически совпадает с опубликованными КР спектрами аданита из первоначального местонахождения (Kampf et al., 2020с) и из рудного района Томбстоун, Аризона (образец из базы данных RRUFF № R190033). КР спектр аданита из месторождения Приозёрное имеет сходные черты с КР спектром нортстарита. Сильнейшая полоса при 739 см^{-1} в спектре аданита относится к симметричным валентным модам анионов TeO_3^{2-} . Полоса при 637 см^{-1} соответствует асимметричным валентным модам этих же анионов, а полосы в диапазоне $441\text{--}330\text{ см}^{-1}$ – их деформационным колебаниям. За валентные и деформационные колебания связей Pb–O и решеточные моды отвечают полосы с частотами 250 см^{-1} и ниже. Как и у нортстарита, здесь отсутствуют полосы, свидетельствующие о наличии в минерале OH-групп

и молекулярной H_2O . Главное отличие между КР спектрами этих теллуридов – отсутствие у аданита полос, относящихся к колебаниям тиосульфат-иона $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ и, напротив, присутствие разных полос, интерпретируемых как колебания анионов SO_4^{2-} . В первую очередь, речь идет о двух сильных полосах, которых нет в КР спектре нортстарита: при 974 и 441 см^{-1} . Первая соответствует моде ν_1 (симметричные валентные колебания анионов SO_4^{2-}), а вторая – моде ν_2 (симметричные деформационные колебания этих же анионов).

Буркхардтит $\text{Pb}_2(\text{Fe}^{3+}\text{Te}^{6+})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)\text{O}_6$, безводный слоистый теллуриат-алюмосиликат Pb и Fe, ранее в России установлен только в зоне окисления золоторудного месторождения Агинское на Камчатке (Касаткин, 2019). Минерал тесно сростается с клинохлором, образуя кайму вокруг церусситового прожилка в кварце (рис. 4ж). Несмотря на малый размер ($0.04 \times 0.1\text{ мм}$), под бинокляром отчетливо наблюдаются характерный карминно-красный цвет минерала и алмазный блеск. Отражательная способность буркхардтита низкая, он выглядит серым, темнее церуссита и практически одинакового цвета с вмещающим кварцем. В составе уральского буркхардтита, в отличие от структурно изученного образца из Мексики (Christy et al., 2014), установлены примеси Cu и Bi (табл. 2, ан. 5), которые, вероятно, изоморфно входят в позиции M (с Te^{6+} , Fe^{3+} и Mn^{3+}) и A (с Pb) соответственно. Несмотря на то, что в силу

мелкого размера выделений и тесного срастания с клинохлором никаких иных исследований с минералом проведено не было, мы считаем, что в этом конкретном случае данных о физических свойствах и химическом составе достаточно для того, чтобы с уверенностью считать его буркхардтитом.

Куранахит $\text{PbMn}^{4+}\text{Te}^{6+}\text{O}_6$, безводный свинцово-марганцевый теллуриат, является очень редким минералом. На территории Российской Федерации минерал описан на золоторудных месторождениях Куранахское в Якутии (Яблокова и др., 1975) и Тукан на Южном Урале (Рахимов и др., 2022). Без диагностических данных он также упоминался среди гипергенных минералов золоторудного месторождения Агинское (Округин и др., 2014). Наша находка является первой на Северном Урале.

Минерал тесно сростается с церусситом, частично замещая его в составе прожилка размером около 1×0.1 мм в кварце (рис. 4з). Североуральский куранахит имеет темно-коричневый цвет и алмазный блеск. В отраженном свете минерал светло-серый на фоне серого церуссита и темно-серого кварца. Двухотражение в воздухе очень слабое. В скрещенных николях наблюдается отчетливая анизотропия в темно-серых и бурых тонах. Куранахит имеет наибольшую отражательную способность из всех измеренных нами гипергенных минералов Те (табл. 3). Тем не менее, она оказалась ниже, чем отражательная способность, указанная для куранахита с места его первой находки на Куранахском золоторудном месторождении в Южной Якутии: R_{max} от 24.2 до 22.7 % в интервале 460–700 нм (Яблокова и др., 1975). Причина этого, скорее всего, связана с реликтами церуссита (см. ниже данные о химическом составе), понижающего отражательную способность зерен куранахита. В то же время, замеры отражательной способности беспримесного церуссита и кварца, непосредственно ассоциирующих с куранахитом, показали значения, соответствующие справочным. Характерно, что профили спектров отражения (рис. 5) североуральского и якутского куранахита совпадают. Минерал обладает смешанной дисперсией со слабо выраженным максимумом в зеленой и частично желтой областях.

Отдельно необходимо остановиться на особенностях химического состава куранахита из месторождения Приозёрное (табл. 2, ан. 6). Полученная нами эмпирическая формула (среднее значение по пяти анализам) отличается от идеальной повышенным содержанием Pb, пониженным – Mn, а также примесями Cu, Zn, Cd и Bi. Несколько завы-

шенное содержание Pb вызвано, очевидно, тесным срастанием с церусситом. Что касается дефицита Mn, то он наблюдался и предыдущими исследователями. В голотипном образце из Якутии количество Mn составляет 0.88 а.ф., что предположительно связывалось с неустойчивостью куранахита в зоне окисления и его дальнейшим преобразованием, сопровождающимся выносом Mn (Яблокова и др., 1975). В куранахите из золоторудного месторождения Тукан на Южном Урале количество Mn ниже – 0.73–0.75 а.ф. (Рахимов и др., 2022). Очевидно, что определение идеальной химической формулы минерала, включая данные о валентности Mn и Те в нем и возможных вариантах изоморфных замещений видообразующих элементов, невозможно без расшифровки его кристаллической структуры. Рентгеновское исследование североуральского куранахита позволило получить все основные отражения минерала (3.43, 2.57, 2.06, 1.85, 1.65, 1.60, 1.48 и 1.38 Å), , однако качество дифракции не позволяет уточнить его кристаллическую структуру.

Шиффелинит $\text{Pb}_{10}\text{Te}^{6+}_6\text{O}_{20}(\text{OH})_{14}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_5$, водный теллуриат-сульфат свинца, впервые описан более 40 лет назад в образцах из шахт Джо (Joe) и Гранд Сэнтрал (*Grand Central*) в рудном районе Томбстоун (Williams, 1980). После он был найден в горах Отто (*Otto Mountains*) в штате Калифорния (США) (Kampf et al., 2010) и на золоторудном месторождении Дунпин (*Dongping*) в китайской провинции Хэбэй (Wang et al., 2019). Наша находка – первая на территории Российской Федерации.

Минерал обнаружен в виде обособлений размером до 0.025 мм (рис. 4г) в нортстарите и в краевых частях зерна гессита с золотом и акантитом (рис. 4и). Шиффелинит бесцветный, но просвечивающая подложка нортстарита придает ему светло-бурый оттенок. Блеск алмазный. В отраженном свете шиффелинит серый, темнее нортстарита, но светлее вмещающего кварца (рис. 4д). Его отражательная способность самая низкая из всех измеренных минералов Те (табл. 3) и приблизительно соответствует отражательной способности церуссита. Двухотражение в воздухе не наблюдается. Эффекты анизотропии отчетливые, в серых тонах, более сильные, чем у нортстарита. Спектр отражения имеет слабо аномальный профиль (рис. 5).

В химическом составе минерала установлен ощутимый дефицит S по отношению к идеальной формуле (табл. 2, ан. 7). Переизучение котипа шиффелинита и решение его кристаллической структуры, а также описание его Cr^{6+} -аналога хромшиффе-

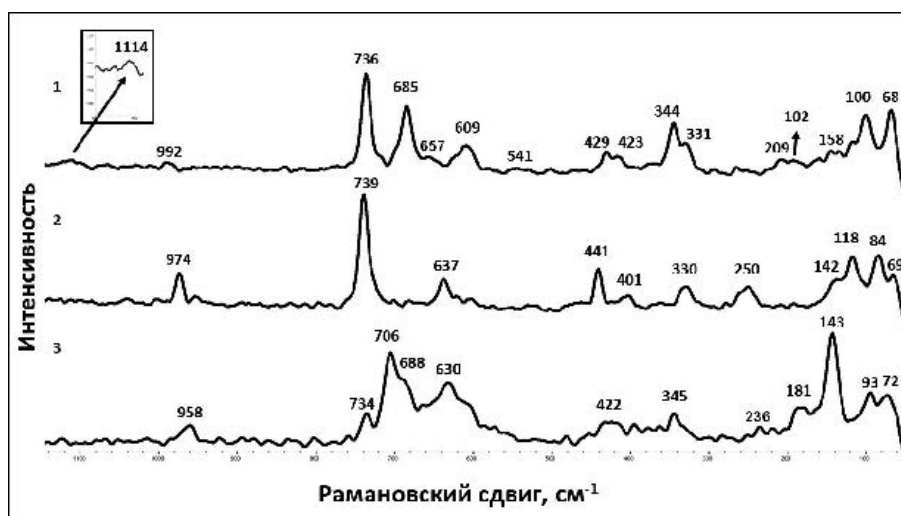


Рис. 6. КР спектры гипергенных минералов Te месторождения Приозёрное.

1 – нортстарит, 2 – аданит, 3 – шиффелинит.

Fig. 6. Raman spectra of supergene Te minerals from the Priozernoe deposit.

1 – northstarite, 2 – adanite, 3 – schieffelinite.

линита выявило существенные вариации в содержании S/Cr в химическом составе этих минералов и позволило уточнить их обобщенную формулу как $Pb_{10}Te_6O_{22-2x}(OH)_{12+2x}(TO_4)_x(H_2O)_{9-4x}$, где $T = Cr$ или S , а x варьирует от 0.46 до 1.00 а.ф. (Kampf et al., 2012). Таким образом, в шиффелините из месторождения Приозёрное содержание S (0.52 а.ф.) находится у нижней границы этого диапазона.

Шиффелинит – единственный из изученных нами минералов Te, имеющий в составе воду, причем как молекулярную, так и в виде OH-групп. Из-за сильной люминесценции подтвердить их присутствие с помощью КР спектроскопии не удалось, поэтому приведенный спектр (рис. 6-3), как и в случае с безводными минералами, ограничен диапазоном 50–1200 cm^{-1} . Тем не менее, в указанной области он сходен с КР спектром проверенного монокристалльным рентгеновским методом шиффелинита из рудного района Томбстоун, Аризона (образец из базы данных RRUFF № R140572) как по интенсивности рамановских полос, так и по их частотам. В КР спектрах теллуридов валентные колебания связей Te–O обычно немного сдвинуты в более низкочастотную область по сравнению с теллуридами (Missen et al., 2019; Kampf et al., 2020a; 2023), поэтому сильные полосы при 706 и 630 cm^{-1} интерпретируются соответственно как симметричные и ассиметричные валентные моды анионов TeO_4^{2-} . Вторая из этих полос, кроме того, маскирует деформационные колебания сульфат-ионов. Полосы при 422 и 345 cm^{-1} относятся к деформационным

колебаниям анионов TeO_4^{2-} . Слабые полосы при 236 и 181 cm^{-1} интерпретируются как валентные колебания связей Pb–O, а полосы в более низком диапазоне (в частности, сильная полоса при 143 cm^{-1}) – как деформационные колебания связей Pb–O–Pb, а также решеточные моды. Полоса при 958 cm^{-1} является главным индикатором присутствия сульфатных групп в минерале: она соответствует симметричным валентным колебаниям анионов SO_4^{2-} . Полосы при 688 и 734 cm^{-1} , вероятнее всего, связаны с небольшой примесью нортстарита, вмещающего зерно шиффелинита, на котором регистрировался КР спектр (рис. 4г).

Обсуждение результатов

В литературе отмечались две стадии формирования руд месторождения Приозёрное (Мурзин, 1997). На среднетемпературной стадии синхронно со становлением оклорудных метасоматитов березит-лиственитовой формации отлагались пирит, галенит и халькопирит. Образование золота и теллуридов происходило на второй стадии при более низких температурах – менее 300 °C. По мнению В.В. Мурзина (1997), появление минералов Te обусловлено базальтоидным типом мелких массивов верхне-лобвинского комплекса, с которыми пространственно и генетически связаны кварцевые жилы.

В целом, рудная минерализация месторождения Приозёрное весьма убога. Обнаруженные

нами в 2017 г. и в ходе нынешних исследований вторичные минералы редки, их обособления имеют малый размер и большей частью видны только под СЭМ. Тем не менее, присутствие в рудах месторождения теллуридов в непосредственном контакте с галенитом в зоне гипергенеза привело к появлению экзотической минерализации, представленной кислородными соединениями Pb, Te и S, причем Te в них имеет две степени окисления – 4+ и 6+. Наши исследования показывают, что гипергенные минералы четырехвалентного теллура (нортстарит, аданит, теллуруперит) преимущественно развиваются по гесситу и галениту, корродируя краевые части зерен вплоть до полного их замещения. Теллулаты, т. е. оксосоли с Te^{6+} , являются наиболее поздними минералами данной ассоциации. Буркхардтит и куранахит замещают церуссит, а шиффелинит, по всей видимости, образуется в результате дальнейшего окисления нортстарита, при котором Te^{4+} переходит в Te^{6+} , а $(\text{S}^{6+}\text{O}_3\text{S}^{2-})$ в $(\text{S}^{6+}\text{O}_4)$; при этом в минерале появляются гидроксильные группы и молекулярная вода.

Одной из геохимических особенностей Te является низкая скорость протекания окислительно-восстановительных реакций с участием его соединений, в результате чего атомы Te^{4+} и Te^{6+} нередко сосуществуют в одном растворе (Filella, May, 2019; Missen et al., 2020). По этой причине сонахождение теллуридов и теллуратов является обычным для зон окисления рудных месторождений с теллуридной минерализацией, что хорошо прослеживается, например, на многочисленных золото-серебряно-полиметаллических объектах в штатах Аризона, Юта, Невада и Калифорния в США и мексиканском штате Сонора. Более того, существуют минералы, в структурах которых есть как теллуриды, так и теллурат-ионы, например, тлапаллит $(\text{Ca,Pb})_3\text{CaCu}_6\text{O}_2[\text{Te}^{4+}_3\text{Te}^{6+}\text{O}_{12}]_2(\text{Te}^{4+}\text{O}_3)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, карлфризит $\text{CaTe}^{4+}_2\text{Te}^{6+}\text{O}_8$ (Missen et al., 2019) или томбстонеит $(\text{Ca}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{Pb}_3\text{Cu}^{2+}_6\text{Te}^{6+}_2\text{O}_6(\text{Te}^{4+}\text{O}_3)_6(\text{Se}^{4+}\text{O}_3)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (Kampf et al., 2023).

Обзор находок гипергенных минералов Te в России

В Российской Федерации количество местонахождений со сколь-либо охарактеризованной гипергенной теллуровой минерализацией невелико. Самое крупное из них – Агинское золоторудное месторождение на Камчатке с богатой золото-теллуридной минерализацией и развитой зоной

гипергенеза. Здесь впервые найдены и описаны экзотические гипергенные теллуриды Cu, Au и Pb – безсмертновит $(\text{Au,Ag})_4\text{Cu}(\text{Te,Pb})$, билибинскит $\text{PbAu}_3\text{Cu}_2\text{Te}_2$ и богдановит $(\text{Au,Te,Pb})_3(\text{Cu,Fe})$ (Спиридонов и др., 1978; Спиридонов, Чвилева, 1979а, б; Спиридонов, 1991, 2008, 2011). В литературе высказывалось мнение, что Te в указанных минералах присутствует в форме TeO_2 , и они являются новыми гибридными минералами типа интерметаллид + оксид (Бочек и др., 1982). Подтвердить или опровергнуть это мнение не представляется возможным, т. к. структуры данных минералов до сих пор не решены.

На Агинском, а также на Пионерском золоторудном месторождении в Бурятии описан теллуриды Cu балякинит $\text{Cu}^{2+}(\text{Te}^{4+}\text{O}_3)$ (Спиридонов, 1980). Позднее на Агинском месторождении отмечалось множество других вторичных минералов Te – оксидов (теллуриды TeO_2), теллуридов (грэммит $\text{Cu}^{2+}(\text{Te}^{4+}\text{O}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$, маккейт $\text{Fe}^{3+}\text{Te}^{4+}_2\text{O}_5(\text{OH})$, плюмботеллуриды $\text{Pb}(\text{Te}^{4+}\text{O}_3)$, раджит $\text{CuTe}^{4+}_2\text{O}_5$, тейнеит $\text{Cu}^{2+}(\text{Te}^{4+}\text{O}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, фэйрбанкит $\text{Pb}_{12}(\text{Te}^{4+}\text{O}_3)_{11}(\text{SO}_4)$) и теллуратов (джозлбрюггерит $\text{Pb}_3\text{Zn}_3\text{Sb}^{5+}\text{As}_2\text{O}_{13}(\text{OH})$, ксоколатлит $\text{Ca}_2\text{Mn}^{4+}_2\text{Te}^{6+}_2\text{O}_{12} \cdot \text{H}_2\text{O}$, ксокомекатлит $\text{Cu}_3(\text{Te}^{6+}\text{O}_4)(\text{OH})_4$, кукусит $\text{Pb}_3\text{Zn}_3\text{Te}^{6+}\text{O}_6(\text{PO}_4)_2$, куранахит, кхинит $\text{Cu}^{2+}_3\text{PbTe}^{6+}\text{O}_6(\text{OH})_2$, оттоит $\text{Pb}_2\text{Te}^{6+}\text{O}_5$), однако без описания и диагностической информации (Спиридонов, 2008, 2011; Округин и др., 2014). Там же, помимо буркхардтита, нами достоверно идентифицирован медно-свинцовый теллуриды чолоалит $(\text{Pb,Ca})_3(\text{Cu,Sb})_3\text{Te}^{4+}_6\text{O}_{18}\text{Cl}$ (Касаткин, 2019).

Уникальная свинцово-цинково-теллуратная минерализация установлена в зоне окисления Куранахского золоторудного месторождения в Якутии: дугганит $\text{Pb}_3\text{Zn}_3(\text{Te}^{6+}\text{O}_6)(\text{AsO}_4)_2$, кукусит, куранахит, черемныхит $\text{Pb}_3\text{Zn}_3(\text{Te}^{6+}\text{O}_6)(\text{VO}_4)_2$, яфсоанит $\text{Ca}_3\text{Te}^{6+}_2(\text{ZnO}_4)_3$ (Яблокова, 1975; Ким и др., 1982, 1988, 1990). Находки теллуратов Pb и Zn здесь приурочены к кальцитовым жилам с очень высоким содержанием гипергенного золота (Ким, 2000).

На золото-серебряном месторождении Сентябрьское (Чукотка) гипергенные минералы Te^{4+} – илирнейт $\text{Mg}_{0.5}[\text{ZnMn}^{3+}(\text{TeO}_3)_3] \cdot 4.5\text{H}_2\text{O}$ и парателлуриды TeO_2 – и Te^{6+} – раисаит $\text{CuMg}[\text{Te}^{6+}\text{O}_4(\text{OH})_2] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и ксокомекатлит – развиваются по трещинам и пустотам в кварцевых жилах с карбонатами, мусковитом, накритом, шамозитом и богатой сульфидно-теллуридной минерализацией (Pekov et al., 2016, 2018).

В последние годы в качестве объекта гипергенной теллуровой минерализации все громче заявляет о себе Озерновское золоторудное месторождение на Камчатке. Ранее здесь отмечались оксиды Те – теллурид и парателлурид (Kovalenker, Plotinskaya, 2005), а недавно были открыты два новых теллурида Fe – озерновскит $\text{Fe}^{3+}_4(\text{Te}^{4+}\text{O}_4)(\text{Te}^{4+}\text{O}_3)_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Pekov et al., 2021) и рудольфгерманнит $\text{Fe}^{3+}_2(\text{Te}^{4+}\text{O}_3)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Pekov et al., 2022). Следует подчеркнуть, что озерновскит принадлежит к новому структурному типу и является первым минералом, в структуре которого Te^{4+} образует не только привычные для теллуридов анионы TeO_3^{2-} , но и чрезвычайно редкие TeO_4^{4-} .

Остальные находки гипергенных минералов Те на территории России носят единичный характер. В списке гипергенных минералов золоторудного проявления Контактный шток на Чукотке упомянуты теллуриды и теллулаты Bi – монтанит $\text{Bi}^{3+}_2\text{Te}^{6+}\text{O}_6 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($0 \leq n \leq 2/3$), пинггуйт $\text{Bi}_6\text{Te}^{6+}_2\text{O}_{15}$, смирит $\text{Bi}_2\text{Te}^{4+}\text{O}_5$ и екораит $\text{Fe}^{3+}_3\text{Bi}_5\text{O}_9(\text{Te}^{4+}\text{O}_3)(\text{Te}^{6+}\text{O}_4)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Сидоров и др., 2007).

Смирнит также отмечался в качестве типичного минерала прожилково-вкрапленных руд золоторудного месторождения Бодороно в Якутии, где он развивается по лиллианиту, теллурувисмутиту и золоту (Кардашевская и др., 2020).

В Харбейском вольфрам-молибденовом месторождении на Полярном Урале при окислении жозеита отмечался теллурад-молибдат Bi чилуит $\text{Bi}_3\text{Te}^{6+}\text{Mo}^{6+}\text{O}_{10.5}$ (Астахова, Шевчук, 2013).

В альбит-карбонатных метасоматитах молибден-уранового рудопроявления Озерное в Северной Карелии в ассоциации с молибденитом, мелонитом и алтаитом найден теллурид U шмиттерит (UO_2) (Te^{4+}O_3) (Волошин и др., 2015).

В образцах из отвалов Бурановского вольфрамового месторождения на Южном Урале, помимо теллураперита, установлен чолалит (Касаткин и др., 2022). Эти минералы здесь развиваются по галениту, халькопириту и теллуридам в кварц-полевошпат-шеелитовых жилах.

Из недавних находок отметим новый теллурад TI амгаит $\text{Ti}^{3+}_2\text{Te}^{6+}\text{O}_6$, обнаруженный среди продуктов окисления пирит-адуляр-кварцевых метасоматитов Хохойского рудопроявления золота в Якутии (Kasatkin et al., 2022).

Единственный на сегодняшний день кислородсодержащий минерал Те, описанный на вулкане Толбачик – набокоит $\text{Cu}_7\text{Te}^{4+}\text{O}_4(\text{SO}_4)_5 \cdot \text{KCl}$ (Попова и др., 1987) имеет не гипергенное, а фумарольное происхождение.

Всего по нашим подсчетам с учетом данных этой статьи, на территории России в литературе отмечено 39 гипергенных минералов Те, в том числе три, предположительно, теллурида (безсмертновит, билибинскит и богдановит), один оксихлорид (теллураперит), два оксида (теллурид и парателлурид), 15 теллуридов, 17 теллурадов и один теллурид-теллурад (екораит). Шесть из них (амгаит, илирнейит, озерновскит, раисаит, рудольфгерманнит, черемныхит) пока остаются эндемиками тех объектов, где они открыты.

Несмотря на небольшое количество объектов с гипергенной теллуровой минерализацией в России (по сравнению, например, с теллуридной), число найденных на них гипергенных минералов Те составило чуть более 40 % от всех известных на сегодняшний день оксосолей Те. Такое внушительное число связано с кристаллохимическими особенностями Те, в частности, с его способностью легко менять валентность ($\text{Te}^{4+}/\text{Te}^{6+}$) и способностью образовывать с кислородом как изолированные полиэдры, так и полиэдры, объединенные в нециклические конечные группы, бесконечные цепочки, слои и каркасы (Christy et al., 2016a, b; Missen et al., 2020). Результатом этого является, с одной стороны, широкое структурное разнообразие теллуридов и теллурадов, а с другой, их большая редкость. По нашим подсчетам, из 96 известных на сегодняшний день кислородсодержащих минералов Те только в отношении 15 имеются опубликованные сведения о находках в пяти или более объектах. Редкость большинства кислородных минералов Те, малый размер их выделений, а также отсутствие необходимых для экспериментов синтетических аналогов и невозможность в большинстве случаев их произвести объясняет довольно слабую изученность геохимии Те в зоне гипергенеза. Условия кристаллизации конкретных теллуридов и теллурадов известны плохо, хотя бесспорно влияние на эти процессы геохимической обстановки на том или ином геологическом объекте, показателя pH и окислительно-восстановительных условий (Christy et al., 2016b; Filella, May, 2019; Missen et al., 2020).

Таким образом, в результате наших исследований сравнительно небольшой перечень местонахождений гипергенной теллуровой минерализации в России пополнился месторождением Приозерное – первым на Северном Урале, где она обнаружена. Отбор нового материала на этом объекте и продолжение аналитических работ, как представляется, могут в будущем пополнить российский и регио-

нальный кадастры новыми теллурсодержащими минералами.

Авторы благодарны И.В. Пекову и И.Ю. Мелекесцевой за обсуждение и редакторскую правку статьи, М.Д. Мильшиной и К.А. Касаткину – за содействие в оформлении иллюстраций и Д.А. Клейменову – за помощь в поиске литературных источников.

Литература

- Астахова И.С., Шевчук С.С.** (2013) Висмутовая минерализация Харбейского вольфрам-молибденового месторождения (Полярный Урал). *Записки РМО*, **142**(5), 63–75.
- Бочек Л.И., Малиновский Ю.А., Сандомирская С.М., Чувикина Н.Г.** (1982) Билибинскит и безсмертновит не интерметаллиды золота, а новые гибридные минералы типа интерметаллид + оксид. *Доклады АН СССР*, **266**(5), 1255–1259.
- Волошин А.В., Карпов С.М., Чернявский А.В.** (2015) Новые данные о минералах. Первые находки в России и Кольском регионе. / Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона. Апатиты, К & М, 244–250.
- Кардашевская В.Н., Анисимова Г.С., Баданина Е.В., Бочаров В.Н., Пономарева Н.И.** (2020) Условия образования золоторудного месторождения Бодорно, Саха (Якутия). *Записки РМО*, **149**(3), 96–110.
- Касаткин А.В.** (2019) Новые находки редких минералов на территории постсоветских государств. *Минералогический альманах*, **24**(2), 4–47.
- Касаткин А.В.** (2021) Новые находки редких минералов на территории России. Часть II. *Минералогический альманах*, **26**(2), 20–55.
- Касаткин А.В., Кузнецов А.М., Арзамасцев Н.А.** (2022) Рудные минералы Бурановского вольфрамового месторождения (Южный Урал). *Минералогия*, **8**(3), 23–46.
- Ким А.А.** (2000) Золото-теллуридно-селенидная минерализация в Куранахском месторождении (Центральный Алдан). *Записки ВМО*, **129**(5), 51–57.
- Ким А.А., Заякина Н.В., Лаврентьев Ю.Г.** (1982) Яфсоанит $(\text{Zn}_{1.38}\text{Ca}_{1.36}\text{Pb}_{0.26})_3\text{Te}_1\text{O}_6$ – новый минерал теллура. *Записки ВМО*, **111**(1), 118–121.
- Ким А.А., Заякина Н.В., Лаврентьев Ю.Г., Мохотко В.Ф.** (1988) V_2Si разновидность дугганита – первая находка в СССР. *Минералогический журнал*, **10**(6), 85–89.
- Ким А.А., Заякина Н.В., Мохотко В.Ф.** (1990) Кукуцит $\text{Pb}_3\text{Zn}_3\text{Te}^{6+}\text{O}_6(\text{PO}_4)_2$ и черемныхит $\text{Pb}_3\text{Zn}_3\text{Te}^{6+}\text{O}_6(\text{VO}_4)_2$ – новые теллулаты из золоторудного месторождения Куранах (Центральный Алдан, Южная Якутия). *Записки ВМО*, **119**(5), 50–57.
- Мурзин В.В.** (1997) Редкие рудные минералы Приозёрного золотокварцевого месторождения (Северный Урал). *Уральский минералогический сборник*, **7**, 82–89.
- Округин В.М., Андреева Е.Д., Яблокова Д.А., Округина А.М., Чубаров В.М., Ананьев В.В.** (2014) Новые данные о рудах Агинского золото-теллуридного месторождения (Центральная Камчатка). *Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вуканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы»*. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 335–341.
- Попова В.И., Попов В.А., Рудашевский Н.С., Главатских С.Ф., Поляков В.О., Бушмакин А.Ф.** (1987) Набокоит $\text{Cu}_7\text{TeO}_4(\text{SO}_4)_5 \cdot \text{KCl}$ и атласовит $\text{Cu}_6\text{Fe}^{3+}\text{Bi}^{3+}\text{O}_4(\text{SO}_4)_5 \cdot \text{KCl}$ – новые минералы вулканических эксгальций. *Записки ВМО*, **116**(6), 92–100.
- Рахимов И.Р., Савельев Д.Е., Шагалов Е.С., Анкушева Н.Н., Панкрушина Е.А.** (2022) Геология, минералогия, геохимия и условия формирования золотокварцевого месторождения Тузан (Худолазовская мульда, Южный Урал). *Литосфера*, **22**(2), 200–218.
- Сидоров В.А., Волков А.В., Вольфсон А.А., Сидоров А.А.** (2007) Золото-висмут-теллуридное оруденение в гранит-порфировом штоке Контактный (Северо-Восток России). *Доклады академии наук*, **416**(6), 789–793.
- Спиридонов Э.М.** (1980) Балякинит CuTeO_3 – новый минерал из зоны окисления. *Доклады АН СССР*, **253**(6), 1448–1450.
- Спиридонов Э.М.** (1991) О составе и структуре минералов группы билибинскита-богдановита. *Новые данные о минералах*, **37**, 138–145.
- Спиридонов Э.М.** (2008) Железистый богдановит $\text{Au}_5\text{CuFe}_2(\text{Te,Pb})_2$ из зоны цементации Агинского золото-теллуридного месторождения на Камчатке. *Новые данные о минералах*, **43**, 143–145.
- Спиридонов Э.М.** (2011) Билибинскит $(\text{Au}_{5.6}\text{Cu}_{3.2})_8(\text{Te,Pb,Sb})_5$ зоны цементации золото-теллуридных месторождений Агинское (Камчатка) и Пионерское (Саяны). *Новые данные о минералах*, **46**, 162–164.
- Спиридонов Э.М., Чвилева Т.Н.** (1979а) Безсмертновит $\text{Au}_4\text{Cu}(\text{Te,Pb})$ – новый минерал из зоны окисления месторождения Дальнего Востока. *Доклады АН СССР*, **249**, 185–189.
- Спиридонов Э.М., Чвилева Т.Н.** (1979б) Богдановит $\text{Au}_5(\text{Cu,Fe})_3(\text{Te,Pb})_2$ – новый минерал из группы интерметаллических соединений золота. *Вестник Московского Университета, сер. Геология*, **1**, 44–52.
- Спиридонов Э.М., Безсмертная М.С., Чвилева Т.Н., Безсмертный В.В.** (1978) Билибинскит $\text{Au}_3\text{Cu}_2\text{PbTe}_2$ – новый минерал золото-теллуридных месторождений. *Записки ВМО*, **107**(3), 310–315.
- Трифонов В.П.** (1948) Золоторудные месторождения северной части Среднего Урала. / 200 лет золотой промышленности Урала. Свердловск, УФАН СССР, 169–176.

- Чвилева Т.Н., Безсмертная М.С., Спиридонов Э.М., Агроскин А.С., Папаян Г.В., Виноградова Р.А., Лебедева С.И., Завьялов Е.Н., Филимонова А.А., Петров В.К., Раутиан Л.П., Свешникова О.Л.** (1988) Справочник-определитель рудных минералов в отраженном свете. М., Недра, 504 с.
- Яблокова С.В., Дубакина Л.С., Дмитрик А.Л., Соколова Т.В.** (1975) Куранахит – новый гипергенный минерал теллура. *Записки ВМО*, **104**(3), 310–313.
- Bindi L., Nestola F., Kolitsch U., Guastoni A., Zorzi F.** (2011) Fassinaite, $\text{Pb}^{2+}_2(\text{S}_2\text{O}_3)(\text{CO}_3)$, the first mineral with coexisting thiosulphate and carbonate groups: description and crystal structure. *Mineralogical Magazine*, **75**, 2721–2732.
- Christy A.G., Kampf A.R., Mills S.J., Housley R.M., Thorne B.** (2014) Crystal structure and revised chemical formula for burckhardtite, $\text{Pb}_2(\text{Fe}^{3+}\text{Te}^{6+})[\text{AlSi}_3\text{O}_8]\text{O}_6$: a double-sheet silicate with intercalated phyllotellurate layers. *Mineralogical Magazine*, **78**, 1763–1773.
- Christy A.G., Mills S.J., Kampf A.R.** (2016a). A review of the structural architecture of tellurium oxyc compounds. *Mineralogical Magazine*, **80**, 415–545.
- Christy A.G., Mills S.J., Kampf A.R., Housley R.M., Thorne B., Marty J.** (2016b) The relationship between mineral composition, crystal structure and paragenetic sequence: the case of secondary Te mineralization at the Bird Nest drift, Otto Mountain, California, USA. *Mineralogical Magazine*, **80**, 291–310.
- Filella M., May P.M.** (2019) The aqueous chemistry of tellurium: critically-selected equilibrium constants for the low-molecular-weight inorganic species. *Environmental Chemistry*, **16**(4), 289–295.
- Gabelica Z.** (1980) Structural study of solid inorganic thiosulfates by infrared and Raman spectroscopy. *Journal of Molecular Structure*, **60**, 131–138.
- Holland T.J.B., Redfern S.A.T.** (1997) Unit cell refinement from powder diffraction data: the use of regression diagnostics. *Mineralogical Magazine*, **61**, 65–77.
- Jensen J.O.** (2002) Vibrational frequencies and structural determinations of $\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}$. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, **587**, 111–121.
- Kampf A.R., Housley R.M., Mills S.J., Rossman G.R., Marty J.** (2020a) Hagstromite, $\text{Pb}_8\text{Cu}^{2+}(\text{Te}^{6+}\text{O}_6)_2(\text{CO}_3)\text{Cl}_4$, a new lead–tellurium oxysalt mineral from Otto Mountain, California, USA. *Mineralogical Magazine*, **84**, 517–523.
- Kampf A.R., Housley R.M., Rossman G.R.** (2020b) Northstarite, a new lead-tellurite-thiosulfate mineral from the North Star mine, Tintic, Utah, USA. *The Canadian Mineralogist*, **58**(4), 533–542.
- Kampf A.R., Housley R.M., Rossman G.R., Yang H., Downs R.T.** (2020c) Adanite, a new lead-tellurite-sulfate mineral from the North Star mine, Tintic, Utah, and Tombstone, Arizona, USA. *The Canadian Mineralogist*, **58**, 403–410.
- Kampf A.R., Mills S.J., Housley R.M.** (2010) The crystal structure of munakataite, $\text{Pb}_2\text{Cu}_2(\text{Se}^{4+}\text{O}_3)(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$, from Otto Mountain, San Bernardino County, California, USA. *Mineralogical Magazine*, **74**, 991–998.
- Kampf A.R., Mills S.J., Housley R.M., Ma C., Thorne B.** (2023) Tombstoneite, a new mineral from Tombstone, Arizona, USA, with a pinwheel-like $\text{Te}^{6+}\text{O}_3(\text{Te}^{4+}\text{O}_3)_3$ cluster. *Mineralogical Magazine*, **87**, 10–17.
- Kampf A.R., Mills S.J., Housley R.M., Rumsey M.S., Spratt J.** (2012) Lead-tellurium oxysalts from Otto Mountain near Baker, California: VII. Chormschieffelinite, $\text{Pb}_{10}\text{Te}_6\text{O}_{20}(\text{OH})_{14}(\text{CrO}_4)(\text{H}_2\text{O})_5$, the chromate analog of schieffelinite. *American Mineralogist*, **97**, 212–219.
- Kampf A.R., Missen O.P., Mills S.J., Ma C., Housley R.M., Chorazewicz M., Marty J., Coolbaugh M., Momma K.** (2022). Matthiasweilite, $\text{PbTe}^{4+}\text{O}_3$, a new tellurite mineral from the Delamar mine, Lincoln County, Nevada, USA. *The Canadian Mineralogist*, **60**, 805–814.
- Kasatkin A.V., Anisimova G.S., Nestola F., Plášil J., Sejkora J., Škoda R., Sokolov E.P., Kondratieva L.A., Kardashevskaya V.N.** (2022) Amgaite, $\text{Ti}^{3+}_2\text{Te}^{6+}\text{O}_6$, a new mineral from the Khokhoyskoe gold deposit, Eastern Siberia, Russia. *Minerals*, **12**, 1064.
- Kovalenker V.A., Plotinskaya O.Yu.** (2005) Te and Se mineralogy of Ozerovskoe and Prasolovskoe epithermal gold deposits, Kuril-Kamchatka volcanic belt. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, **43**, 118–123.
- Missen O.P., Kampf A.R., Mills S.J., Housley R.M., Spratt J., Welch M.D., Coolbaugh M.F., Marty J., Chorazewicz M., Ferraris C.** (2019) The crystal structures of the mixed-valence tellurium oxysalts tlappallite, $(\text{Ca,Pb})_3\text{CaCu}_6[\text{Te}^{4+}_3\text{Te}^{6+}\text{O}_{12}]_2(\text{Te}^{4+}\text{O}_3)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, and carlfriesite, $\text{CaTe}^{4+}_2\text{Te}^{6+}\text{O}_8$. *Mineralogical Magazine*, **83**, 539–549.
- Missen O.P., Ram R., Mills S.J., Etschmann B., Reith F., Shuster J., Smith D.J., Brugger J.** (2020) Love is in the Earth: A review of tellurium (bio)geochemistry in surface environments. *Earth-Science Reviews*, **204**, 103150.
- Pekov I.V., Vlasov E.A., Zubkova N.V., Yapaskurt V.O., Chukanov N.V., Belakovskiy D.I., Lykova I.S., Apletalin A.V., Zolotarev A.A., Puschcharovsky D.Y.** (2016) Raisaite, $\text{CuMg}[\text{Te}^{6+}\text{O}_4(\text{OH})_2] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, a new mineral from Chukotka, Russia. *European Journal of Mineralogy*, **28**, 459–466.
- Pekov I.V., Siidra O.I., Vlasov E.A., Yapaskurt V.O., Polekhovsky Y.S., Apletalin A.V.** (2018) Ilirneyite, $\text{Mg}_{0.5}[\text{ZnMn}^{3+}(\text{TeO}_3)_3] \cdot 4.5\text{H}_2\text{O}$, a new mineral from Chukotka, Russia. *The Canadian Mineralogist*, **56**, 913–921.
- Pekov I.V., Britvin S.N., Pletnev P.A., Chukanov N.V., Belakovskiy D.I., Yapaskurt V.O.** (2021) Ozerovskite, IMA 2021-059. CNMNC Newsletter 63; *Mineralogical Magazine*, **85**, 910–915.
- Pekov I.V., Britvin S.N., Pletnev P.A., Yapaskurt V.O., Belakovskiy D.I., Chukanov N.V., Vigasina M.F., Ponomarev A.P.** (2022) Rudolfhermannite, IMA 2021-099. CNMNC Newsletter 66, *European Journal of Mineralogy*, **34**, 253–257.

Wang D., Liu J., Zhai D., Carranza E.J.M., Wang Y., Zhen S., Wang J., Liu Z., Zhang F. (2019) Mineral paragenesis and ore-forming processes of the Dongping gold deposit, Hebei province, China. *Resource Geology*, **69**(3), 287–313.

Warr L.N. (2021) IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, **85**, 291–320.

Weil M., Shirkhanlou M., Füglein E., Libowitzky E. (2018) Determination of the correct composition of «hydrous lead(II) oxotellurate(IV)» as PbTeO_3 , crystallizing as a new polymorph. *Crystals*, **8**, 51.

Welch M.D., Rumsey M.S., Kleppe A.K. (2016) A naturally-occurring new lead-based halocuprate(I). *Journal of Solid State Chemistry*, **238**, 9–14.

Williams S.A. (1980) Schieffelinite, a new lead tellurate-sulphate from Tombstone, Arizona. *Mineralogical Magazine*, **43**, 771–773.

References

Astakhova I.S., Shevchuk S.S. (2013) [Bi mineralization of the Kharbey W-Mo deposit, Polar Urals]. *Zapiski RMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **142**(5), 63–75. (in Russian)

Bindi L., Nestola F., Kolitsch U., Guastoni A., Zorzi F. (2011) Fassinaite, $\text{Pb}^{2+}_2(\text{S}_2\text{O}_3)(\text{CO}_3)$, the first mineral with coexisting thiosulphate and carbonate groups: description and crystal structure. *Mineralogical Magazine*, **75**, 2721–2732.

Bochek L.I., Malinovsky Y.A., Sandomirskaya S.M., Chuvikina N.G. (1982) [Bilibinskite and bezsmertnovite, new hybrid minerals of the intermetallic compound-oxide type rather than intermetallic compounds of gold]. *Doklady Akademii Nauk SSSR [Doklady Academy of Sciences of the USSR]*, **266**(5), 1255–1259. (in Russian)

Christy A.G., Kampf A.R., Mills S.J., Housley R.M., Thorne B. (2014) Crystal structure and revised chemical formula for burckhardtite, $\text{Pb}_2(\text{Fe}^{3+}\text{Te}^{6+})[\text{AlSi}_3\text{O}_8]\text{O}_6$: a double-sheet silicate with intercalated phyllosulfate layers. *Mineralogical Magazine*, **78**, 1763–1773.

Christy A.G., Mills S.J., Kampf A.R. (2016a). A review of the structural architecture of tellurium oxycompounds. *Mineralogical Magazine*, **80**, 415–545.

Christy A.G., Mills S.J., Kampf A.R., Housley R.M., Thorne B., Marty J. (2016b) The relationship between mineral composition, crystal structure and paragenetic sequence: the case of secondary Te mineralization at the Bird Nest drift, Otto Mountain, California, USA. *Mineralogical Magazine*, **80**, 291–310.

Chvileva T.N., Bezsmertnaya M.S., Spiridonov E.M., Agroskin A.S., Papayan G.V., Vinogradova R.A., Lebedeva S.I., Zavyalov E.N., Filimonova A.A., Petrov V.K., Rautian L.P., Sveschnikova O.L. (1988) [Handbook of ore minerals in reflected light]. Moscow, Nedra, 504 p. (in Russian)

Filella M., May P.M. (2019) The aqueous chemistry of tellurium: critically-selected equilibrium constants for the low-molecular-weight inorganic species. *Environmental Chemistry*, **16**(4), 289–295.

Gabelica Z. (1980) Structural study of solid inorganic thiosulfates by infrared and Raman spectroscopy. *Journal of Molecular Structure*, **60**, 131–138.

Holland T.J.B., Redfern S.A.T. (1997) Unit cell refinement from powder diffraction data: the use of regression diagnostics. *Mineralogical Magazine*, **61**, 65–77.

Jensen J.O. (2002) Vibrational frequencies and structural determinations of $\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}$. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, **587**, 111–121.

Kampf A.R., Mills S.J., Housley R.M. (2010) The crystal structure of munakataite, $\text{Pb}_2\text{Cu}_2(\text{Se}^{4+}\text{O}_3)(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$, from Otto Mountain, San Bernardino County, California, USA. *Mineralogical Magazine*, **74**, 991–998.

Kampf A.R., Mills S.J., Housley R.M., Rumsey M.S., Spratt J. (2012) Lead-tellurium oxysalts from Otto Mountain near Baker, California: VII. Chromschieffelinite, $\text{Pb}_{10}\text{Te}_6\text{O}_{20}(\text{OH})_{14}(\text{CrO}_4)(\text{H}_2\text{O})_5$, the chromate analog of schieffelinite. *American Mineralogist*, **97**, 212–219.

Kampf A.R., Housley R.M., Mills S.J., Rossman G.R., Marty J. (2020a) Hagstromite, $\text{Pb}_8\text{Cu}^{2+}(\text{Te}^{6+}\text{O}_6)_2(\text{CO}_3)\text{Cl}_4$, a new lead-tellurium oxysalt mineral from Otto Mountain, California, USA. *Mineralogical Magazine*, **84**, 517–523.

Kampf A.R., Housley R.M., Rossman G.R. (2020b) Northstarite, a new lead-tellurite-thiosulfate mineral from the North Star mine, Tintic, Utah, USA. *The Canadian Mineralogist*, **58**(4), 533–542.

Kampf A.R., Housley R.M., Rossman G.R., Yang H., Downs R.T. (2020c) Adanite, a new lead-tellurite-sulfate mineral from the North Star mine, Tintic, Utah, and Tombstone, Arizona, USA. *The Canadian Mineralogist*, **58**, 403–410.

Kampf A.R., Missen O.P., Mills S.J., Ma C., Housley R.M., Chorazewicz M., Marty J., Coolbaugh M., Momma K. (2022). Matthiasweilite, $\text{PbTe}^{4+}\text{O}_3$, a new tellurite mineral from the Delamar mine, Lincoln County, Nevada, USA. *The Canadian Mineralogist*, **60**, 805–814.

Kampf A.R., Mills S.J., Housley R.M., Ma C., Thorne B. (2023) Tombstoneite, a new mineral from Tombstone, Arizona, USA, with a pinwheel-like $\text{Te}^{6+}\text{O}_3(\text{Te}^{4+}\text{O}_3)_3$ cluster. *Mineralogical Magazine*, **87**, 10–17.

Kardashevskaya V.N., Anisimova G.S., Badanina E.V., Bocharov V.N., Ponomareva N.I. (2020) [Formation conditions of the Bodorono gold deposit, Sakha (Yakutia)]. *Zapiski RMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **149**(3), 96–110. (in Russian)

Kasatkin A.V. (2019) New findings of rare minerals at the territory of the Former Soviet Union states. *Mineralogical Almanac*, **24**(2), 4–47.

- Kasatkin A.V.** (2021) New findings of rare minerals in Russia. Part II. *Mineralogical Almanac*, **26**(2), 20–58.
- Kasatkin A.V., Anisimova G.S., Nestola F., Plášil J., Sejkora J., Škoda R., Sokolov E.P., Kondratieva L.A., Kardashevskaya V.N.** (2022) Amgaite, $\text{Ti}^{3+}_2\text{Te}^{6+}\text{O}_6$, a new mineral from the Khokhoykoe gold deposit, Eastern Siberia, Russia. *Minerals*, **12**, 1064.
- Kasatkin A.V., Kuznetsov A.M., Arzamastsev N.A.** (2022) [Ore minerals of the Buranovskoe tungsten deposit (Southern Urals)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **8**(3), 23–46. (in Russian)
- Popova V.I., Popov V.A., Rudashevskiy N.S., Glavatskikh S.F., Polyakov V.O., Bushmakina A.F.** (1987) [Nabokoite $\text{Cu}_7\text{TeO}_4(\text{SO}_4)_5 \cdot \text{KCl}$ and atlasovite $\text{Cu}_6\text{Fe}^{3+}\text{Bi}^{3+}\text{O}_4(\text{SO}_4)_5 \cdot \text{KCl}$ – new minerals of volcanic exhalations]. *Zapiski VMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **116**(6), 92–100. (in Russian)
- Kim A.A.** (2000) [Gold-telluride-selenide mineralization of the Kuranakh gold deposit (Central Aldan)]. *Zapiski VMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **129**(5), 51–57. (in Russian)
- Kim A.A., Zayakina N.V., Lavrentiev Y.G.** (1982) [Yafsoanite, $(\text{Zn}_{1.38}\text{Ca}_{1.36}\text{Pb}_{0.26})_3\text{Te}_1\text{O}_6$, a new tellurium mineral]. *Zapiski VMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **111**(1), 118–121. (in Russian)
- Kim A.A., Zayakina N.V., Lavrentiev Y.G., Mokhotko V.F.** (1988) [V,Si variety of dugganite – first find in USSR]. *Mineralogicheskiy Zhurnal [Mineralogical Magazine]*, **10**(6), 85–89. (in Russian)
- Kim A.A., Zayakina N.V., Mokhotko V.F.** (1990) [Kuksite $\text{Pb}_3\text{Zn}_3\text{TeO}_6(\text{PO}_4)_2$ and cheremnykhite $\text{Pb}_3\text{Zn}_3\text{TeO}_6(\text{VO}_4)_2$ – new tellurates from the Kuranakh gold deposit (Central Aldan, Southern Yakutia)]. *Zapiski VMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **119**(5), 50–57. (in Russian)
- Kovalenker V.A., Plotinskaya O.Yu.** (2005) Te and Se mineralogy of Ozerovskoe and Prasolovskoe epithermal gold deposits, Kuril-Kamchatka volcanic belt. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, **43**, 118–123.
- Missen O.P., Kampf A.R., Mills S.J., Housley R.M., Spratt J., Welch M.D., Coolbaugh M.F., Marty J., Chorazewicz M., Ferraris C.** (2019) The crystal structures of the mixed-valence tellurium oxysalts tlapallite, $(\text{Ca,Pb})_3\text{CaCu}_6[\text{Te}^{4+}_3\text{Te}^{6+}\text{O}_{12}]_2(\text{Te}^{4+}\text{O}_3)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, and carlfriesite, $\text{CaTe}^{4+}_2\text{Te}^{6+}\text{O}_8$. *Mineralogical Magazine*, **83**, 539–549.
- Missen O.P., Ram R., Mills S.J., Etschmann B., Reith F., Shuster J., Smith D.J., Brugger J.** (2020) Love is in the Earth: A review of tellurium (bio)geochemistry in surface environments. *Earth-Science Reviews*, **204**, 103150.
- Murzin V.V.** (1997) [Rare ore minerals of Priozernoe gold-quartz deposit (Northern Urals)]. *Uralskiy mineralogicheskiy sbornik [Ural Mineral Digest]*, **7**, 82–89. (in Russian)
- Okrugin V.M., Andreeva E.D., Yablokova D.A., Okrugina A.M., Chubarov V.M., Ananiev V.V.** (2014) [New data on ores of Aginskoe gold-telluride deposit (Central Kamchatka)]. *Materials of annual conference dedicated to the Volcanologist's Day «Volcanism and related processes»*. Petropavlovsk-Kamchatskiy, IViS DVO RAN, 335–341. (in Russian)
- Pekov I.V., Vlasov E.A., Zubkova N.V., Yapaskurt V.O., Chukanov N.V., Belakovskiy D.I., Lykova I.S., Apletalin A.V., Zolotarev A.A., Puschcharovsky D.Y.** (2016) Raisaite, $\text{CuMg}[\text{Te}^{6+}\text{O}_4\text{OH}]_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, a new mineral from Chukotka, Russia. *European Journal of Mineralogy*, **28**, 459–466.
- Pekov I.V., Siidra O.I., Vlasov E.A., Yapaskurt V.O., Polekhovskiy Y.S., Apletalin A.V.** (2018) Ilirneyite, $\text{Mg}_{0.5}[\text{ZnMn}^{3+}(\text{TeO}_3)_3] \cdot 4.5\text{H}_2\text{O}$, a new mineral from Chukotka, Russia. *The Canadian Mineralogist*, **56**, 913–921.
- Pekov I.V., Britvin S.N., Pletnev P.A., Chukanov N.V., Belakovskiy D.I., Yapaskurt V.O.** (2021) Ozerovskite, IMA 2021-059. CNMNC Newsletter 63; *Mineralogical Magazine*, **85**, 910–915.
- Pekov I.V., Britvin S.N., Pletnev P.A., Yapaskurt V.O., Belakovskiy D.I., Chukanov N.V., Vigasina M.F., Ponomarev A.P.** (2022) Rudolfhermannite, IMA 2021-099. CNMNC Newsletter 66, *European Journal of Mineralogy*, **34**, 253–257.
- Rakhimov I.R., Saveliev D.E., Shagalov E.S., Ankusheva N.N., Pankrushina E.A.** (2022) [Geology, mineralogy, geochemistry and formation conditions of the Tukan gold-quartz deposit (Khudolazovo Trough, Southern Urals)]. *Litosfera [Lithosphere]*, **22**(2), 200–218. (in Russian)
- Sidorov V.A., Volkov A.V., Volfson A.A., Sidorov A.A.** (2007) Gold-bismuth-telluride mineralization in the Kontaktovyy granite-porphyry stock (Northeast Russia). *Doklady Earth Sciences*, **416**(6), 789–793.
- Spiridonov E.M.** (1980) [Balyakinite CuTeO_3 – a new mineral from the oxidation zone]. *Doklady Akademii Nauk SSSR [Doklady Academy of Sciences of the USSR]*, **253**(6), 1448–1450. (in Russian)
- Spiridonov E.M.** (1991) [Composition and structure of the bilibinskite-bogdanovite mineral group]. *Novye dannye o mineralakh [New Data on Minerals]*, **37**, 138–145. (in Russian)
- Spiridonov E.M.** (2008) Fe-dominant bogdanovite from cementation zone of the Aginsky gold-telluride deposit, Kamchatka Peninsula, Russia. *New Data on Minerals*, **43**, 143–145.
- Spiridonov E.M.** (2011) Bilibinskite, $(\text{Au}_{5-6}\text{Cu}_{3-2})_8(\text{Te,Pb,Sb})_5$, from the cementation zone of the Aginskoe, Kamchatka and Pionerskoe, Sayan Mountains gold-telluride deposits. *New Data on Minerals*, **46**, 162–164.
- Spiridonov E.M., Chvileva T.N.** (1979a) [Bezsmertnovite $\text{Au}_4\text{Cu}(\text{Te,Pb})$ – a new mineral from the oxidation zone of the Far East deposits]. *Doklady Akademii Nauk SSSR [Doklady Academy of Sciences of the USSR]*, **249**, 185–189. (in Russian)
- Spiridonov E.M., Chvileva T.N.** (1979b) [Bogdanovite $\text{Au}_5(\text{Cu,Fe})_3(\text{Te,Pb})_2$ a new mineral of the group of gold intermetallic compounds]. *Vestnik Moskovskogo*

Universiteta, ser. Geologiya [Bulletin of Moscow University, Series Geology], **1**, 44–52. (in Russian)

Spiridonov E.M., Bezsmertnaya M.S., Chvileva T.N., Bezsmertny V.V. (1978) [Bilibinskite, $\text{Au}_3\text{Cu}_2\text{PbTe}_2$ – a new mineral of gold-telluride deposits]. *Zapiski VMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **107**(3), 310–315. (in Russian)

Trifonov V.P. (1948) [Gold deposits of the northern part of Central Urals]. In: *200 let zolotoy promyshlennosti Urala [200 Years of Gold Industry of the Urals]*. Sverdlovsk, UFAN SSSR, 169–176. (in Russian)

Voloshin A.V., Karpov S.M., Chernyavsky A.V. (2015) [New data on minerals. The first findings in Russia and Kola region]. In: *Geologiya i strategicheskie poleznye iskopaemye Kol'skogo regiona [Geology and Strategic Mineral Deposits of the Kola Region]*. Apatity, K & M, 244–250. (in Russian)

Wang D., Liu J., Zhai D., Carranza E.J.M., Wang Y., Zhen S., Wang J., Liu Z., Zhang F. (2019) Mineral paragenesis and ore-forming processes of the Dongping gold deposit, Hebei province, China. *Resource Geology*, **69**(3), 287–313.

Warr L.N. (2021) IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, **85**, 291–320.

Weil M., Shirkhanlou M., Füglein E., Libowitzky E. (2018) Determination of the correct composition of «hydrous lead(II) oxotellurate(IV)» as PbTeO_3 , crystallizing as a new polymorph. *Crystals*, **8**, 51.

Welch M.D., Rumsey M.S., Kleppe A.K. (2016) A naturally-occurring new lead-based halocuprate(I). *Journal of Solid State Chemistry*, **238**, 9–14.

Williams S.A. (1980) Schieffelinite, a new lead tellurate-sulphate from Tombstone, Arizona. *Mineralogical Magazine*, **43**, 771–773.

Yablokova S.V., Dubakina L.S., Dmitrik A.L., Sokolova T.V. (1975) [Kuranakhite, a new supergene Te mineral]. *Zapiski VMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **104**(3), 310–313. (in Russian)