



Электронная версия доступна на сайте
[www.fmm.ru/Новые данные о минералах](http://www.fmm.ru/Новые_данные_о_минералах)
 Минералогический музей
 имени А.Е. Ферсмана РАН

Н Д М

Новые данные о минералах, том 54, вып. 2 (2020), 53–60

К вопросу о переизучении минералогических образцов из музейных коллекций.

II. Каннонит и легернит из месторождения Букука (Забайкалье)

Касаткин А.В.¹, Шкода Р.², Чуканов Н.В.³

¹Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, anatoly.kasatkin@gmail.com

²Департамент геологических наук, факультет науки, Масариков университет, Брно, Чехия

³Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка Московской обл.

Редкие сульфаты висмута каннонит $\text{Bi}_2\text{O}(\text{SO}_4)(\text{OH})_2$ и легернит $\text{Bi}_{12.67}\text{O}_{14}(\text{SO}_4)_5$ установлены нами в результате переизучения образцов висмутита из вольфрамового месторождения Букука (В. Забайкалье), хранящихся в систематической коллекции Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН под номером 56077. Оба минерала тесно сростаются между собой в составе полиминеральных псевдоморфоз по грубо-образованным кристаллам висмутита, образуя прожилки длиной до 4 см и мощностью до 0.5 см. Эмпирические формулы: каннонит $\text{Bi}_{2.06}\text{S}_{0.97}\text{O}_5(\text{OH})_2$, легернит $\text{Bi}_{12.67}\text{S}_{5.00}\text{O}_{34}$. Параметры моноклинных элементарных ячеек: у каннонита $a = 7.691(1)$, $b = 13.874(2)$, $c = 5.6569(8)$ Å, $\beta = 109.23(1)^\circ$, $V = 569.90(9)$ Å³ и $Z = 4$; у легернита: $a = 11.197(2)$, $b = 5.714(1)$, $c = 11.879(2)$ Å, $\beta = 99.37(2)^\circ$, $V = 749.9(2)$ Å³ и $Z = 1$. Сильные полосы в КР-спектрах: у каннонита 111, 121, 144, 184, 221, 318, 437, 450, 560, 619, 983, 1059, 3439 см⁻¹, у легернита 150, 183, 216, 313, 474, 969 см⁻¹. Оба минерала найдены впервые на территории Российской Федерации.

Ключевые слова: каннонит, легернит, вольфрамовое месторождение Букука, Восточное Забайкалье, переизучение, первая находка в России.

Введение

Сообщение принадлежит к серии статей, посвященных вопросу переизучения минералогических образцов из музейных коллекций. В первой из них рассматривались общие аспекты переизучения применительно к минералогическим собраниям любительских музеев, обсуждались основные направления и субъекты повторного исследования музейного материала и результаты, к которым оно может привести (Касаткин, 2020). Ниже речь пойдет о практическом результате переизучения конкретных образцов из систематической коллекции Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (далее – ММФ).

В рамках проводившихся нами летом 2019 года работ по переизучению образцов сульфосолей айкнит-висмутиновой серии из собрания ММФ были

отобраны пробы от образцов, записанных в музейном каталоге под общим номером 56077 как «висмутин с базовисмутитом» из вольфрамового месторождения Букука (Забайкалье). Детальное исследование данных проб с помощью оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, электронно-зондового микроанализа, порошковой рентгенографии и КР-спектроскопии выявило, что висмутин в указанном образце частично замещен двумя редкими сульфатами Bi – каннонитом и легернитом. «Базовисмутит» (старое название бисмутита) в этих пробах нами не обнаружен.

Каннонит $\text{Bi}_2\text{O}(\text{SO}_4)(\text{OH})_2$ впервые был описан на месторождении Tunnel Extension в штате Юта, США, в виде находящихся в кварце агрегатов бес-

цветных изометричных и призматических кристаллов размером до 0.2 мм, замещающих висмутин и купробисмутит (Stanley et al., 1992). Его кристаллическая структура была решена на материале другой находки – образце из старинного золотого рудника Alfenza, Пьемонт, Италия, где каннонит образует бесцветные удлинённые скальпелевидные кристаллы, растущие по висмутину (Capitani et al., 2013). Несмотря на то что известный веб-сайт www.mindat.org называет еще два десятка местонахождений каннонита по всему миру, подавляющее большинство таких находок не подкреплено аналитическими данными, или же эти данные ограничиваются ЭДС-диагностикой и потому не являются убедительными (Capitani et al., 2013). Аналогичным образом следует оценивать упоминание о находке каннонита на железорудном месторождении Люпикко, Питкьяранский район, Южная Карелия (Ивашенко, Голубев, 2015) – никаких анализов, подтверждающих ее, в указанной работе не приведено. Таким образом, мы считаем описываемый в настоящей статье каннонит из Букуки первой достоверной находкой этого минерального вида на территории Российской Федерации.

Что касается легернита, то он был открыт в образце из активной высокотемпературной фумаролы FF кратера Ла Фосса, остров Vulcano, Италия, в виде бесцветных и белых игольчатых кристаллов размером до 0.4 мм, слагающих волокнистые агрегаты, находящиеся в ассоциации с англезитом, баллжунчицитом, бисмокайтом, Cd-содержащим вюртцитом, галенобисмутитом, лиллианитом, пиритом, пирротинном и Cd-содержащим сфалеритом (Garavelli et al., 2014). До последнего времени легернит считался эндемиком Vulcano, следовательно, нашу находку этого минерала правомерно считать не только первой на территории Российской Федерации, но и второй в мире.

Краткая историческая и геологическая характеристика объекта

Вольфрамовое (вольфрамитовое) месторождение Букука (Букукинское) расположено в 10 км к северо-востоку от пос. Турга Оловянинского района Забайкальского края, приблизительно в 230 км юго-восточнее Читы, на склонах горы Букука, которая является одной из наиболее крупных в южных отрогах Газимур-Ононского хребта. Географические координаты месторождения: 51°10'59" с.ш., 116°37'59" в.д.

Месторождение Букука было открыто жителями близлежащего селения Камкай в 1911 году. Годом позже на нем были организованы разведочные работы под руководством горного инженера Д.А. Зикса, в результате которых в трудных условиях сплошной затаеженности удалось вскрыть четыре жилы с вольфрамитом. С 1914 г. начались эксплуатационные работы открытым способом, а с 1930-х годов – подземная обработка месторожде-

ния. В 1938 г. начала работать обогатительная фабрика производительностью 60 т вольфрамовой руды в сутки, а в 1950 г. вошла в эксплуатацию новая обогатительная фабрика производительностью 200 т руды в сутки. В 1960 г. месторождение было законсервировано по причине низкой рентабельности. В дальнейшем на нем периодически выполнялись разведочные, поисковые и тематические работы (Барабанов, 1961; данные бизнес-портала <https://nedradv.ru>).

По состоянию на 01.01.2019 г. по Букукинскому месторождению на государственном балансе числятся следующие запасы:

- по категориям A+B+C1 – 587 тыс. т руды (в том числе 3631 т WO₃) при среднем содержании полезного компонента (вольфрама) 0.62%;

- по категории C2 – 377 тыс. т руды (в том числе 2459 т WO₃) при среднем содержании вольфрама 0.65%;

- по категории C1 (забалансовые руды) – еще 195 тыс. т руды (в том числе 732 т WO₃) при среднем содержании вольфрама 0.38% (данные бизнес-портала <https://nedradv.ru>).

Месторождение расположено в зоне разрывов, разделяющих тектонические блоки, и приурочено к массиву гранодиоритов позднемезозойского возраста, прорывающему палеозойские гранитоиды. Останцом песчано-сланцевых пород ранне-среднеюрского возраста Букукинское рудное поле разделяется на две части – восточную и западную. В восточной части, сложенной наиболее поздними роговообманковыми гранодиоритами, рудные жилы имеют близмеридиональное простирание и характеризуются простым составом: кварц, вольфрамит, сфалерит, пирит, флюорит и полевые шпаты. К западу от останца осадочных пород участок рудного поля имеет более сложное строение. Здесь обнажаются порфириовидные и среднезернистые гранодиориты с многочисленными ксенолитами кварцевых диоритов, реже амфиболитов и песчаников. Широко развиты на этом участке различные дайки аплитов, диоритовых порфиринов, гранодиорит-порфиринов и кварцевых порфиринов (рис. 1).

Месторождение относится к кварц-сульфидно-вольфрамитовой формации. Основное оруденение приурочено к серии протяженных кварц-вольфрамитовых жил и вольфрамитсодержащим грейзенам, слагающим штокверк. Всего на месторождении известно около 120 рудных жил длиной от 50 до 800 м, которые по условиям залегания принято делить на две основные группы: 1) пологопадающие и 2) крутопадающие. Первые сгруппированы на северо-западном и северо-восточном склонах вершины Букуки. Угол падения таких жил составляет 15–20°, а мощность колеблется в среднем от 15 до 40 см. Крутопадающие жилы имеют северо-западное и близширотное простирание и локализируются в сбросах. Падают они на запад и юго-запад под углами от 40 до 90° и являются более протяженными, чем пологопадающие, а их мощность достигает

2–3 м. По времени образования пологопадающие жилы принято считать более ранними (более высокотемпературными), чем крутопадающие (Барабанов, 1961; Левицкий, 1964; Рудные месторождения... 1978; Редина и др., 2019).

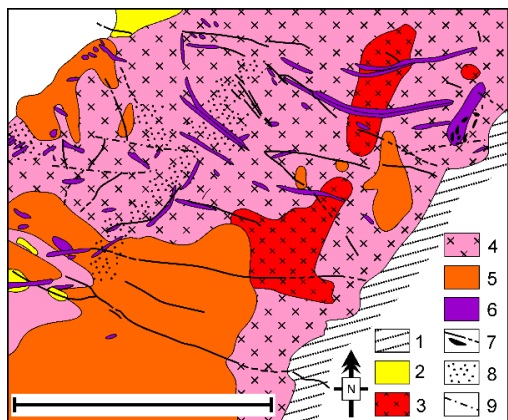


Рис. 1. Схематическая геологическая карта месторождения Букука, по А.В. Дружинину с упрощениями (Рудные месторождения... 1978). 1 – мелкозернистые песчаники с прослоями сланцев, неравномернозернистые песчаники и мелкогалечные конгломераты средней юры; 2 – кварцевые диориты; 3 – мелкозернистые гранодиориты; 4 – среднезернистые гранодиориты; 5 – порфиридные гранодиориты; 6 – аплиты, гранодиорит-порфиры, гранит-порфиры, кварцевые порфиры; 7 – кварцевые жилы, неправильные тела; 8 – грейзены; 9 – тектонические нарушения. Масштабная линейка соответствует 0,5 км.

Главными рудными минералами месторождения являются вольфрамит (как гюбнерит, так и ферберит), сфалерит, халькопирит, пирит, галенит, висмутин, значительно реже встречаются молибденит, пирротин, марказит, борнит, шеелит, блекляе

руды, висмутовые сульфосоли (козалит, лилианит и др.). Из жильных минералов главным является кварц, в подчиненных количествах отмечаются кальцит, флюорит, мусковит, триплаит, топаз, апатит (Рудные месторождения... 1978).

За полувековую историю разведки и эксплуатации Букукинское месторождение стало объектом тщательного изучения со стороны отечественных специалистов. Общая геологическая характеристика месторождения, особенности его генезиса, детальное описание рудных тел, его минералогия по подробнейшим образом освещены в целом ряде работ (Барабанов, 1961; Левицкий, 1964; Онтоев, 1964; Рудные месторождения... 1978; Гайворонский, 1995; Редина и др., 2019).

Описание образца

Под номером 56077 в систематической коллекции ММФ записаны несколько грубообразованных слабоокатанных кристаллов висмутина размерами до 4 x 3 см (рис. 2). Согласно имеющейся информации, они поступили от К.А. Ненадкевича в 1953 году и, по всей видимости, являются частью его коллекции висмутовых минералов, переданной впоследствии в ММФ (рис. 3). Как отмечает Е.М. Янишевский, Букука наряду с Белухой и Шерловой Горой – одно из трех месторождений СССР, где висмутин был встречен в наиболее крупных скоплениях, позволивших снабдить наши музеи хорошими образцами сплошного висмутина (Минералы СССР, 1940). Д.О. Онтоев (1964) указывает, что висмутин встречается преимущественно в пологопадающих жилах месторождения, в штокверковых телах и частично в участках сплошной грейзенизации гранодиоритов. В крутопадающих жилах висмутин, напротив, крайне редок.

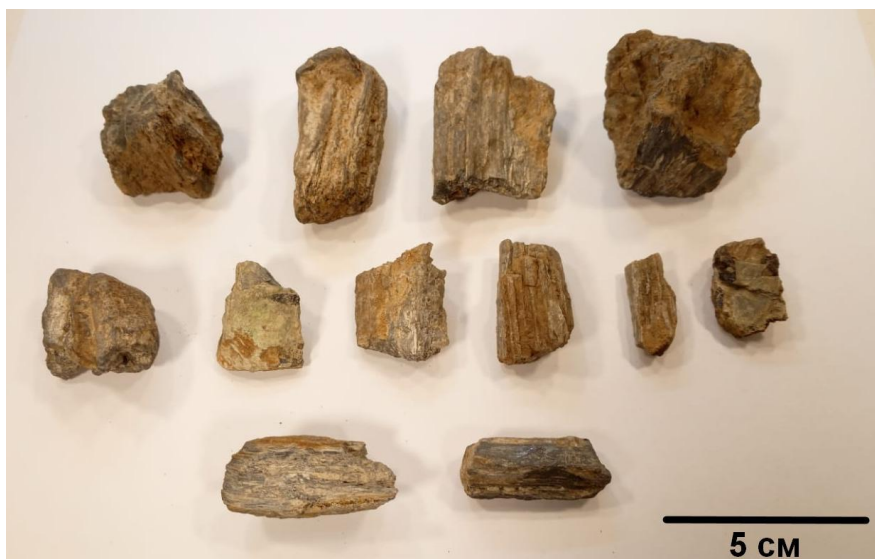


Рис. 2. Грубообразованные кристаллы частично окисленного висмутина, записанные в коллекции ММФ под номером 56077. Фото А.О. Карлова.

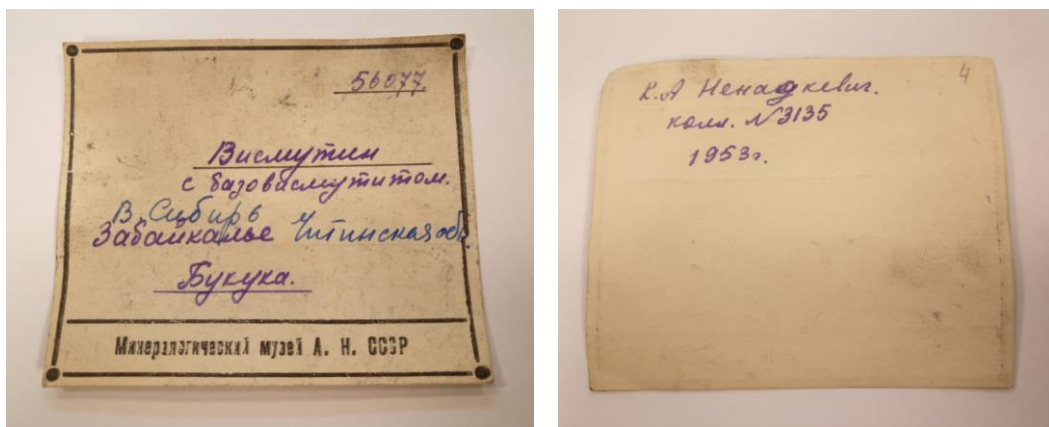


Рис. 3. Оригинальная этикетка к образцам под общим номером 56077. Фото А.О. Карпова.

Внешний вид изученных нами кристаллов и их фрагментов свидетельствует, что они были найдены в зоне гипергенеза месторождения. Темно-серый висмутин частично покрыт с поверхности бурыми корочками гидроксидов железа, а сами его кристаллы пронизаны тонкими белыми прожилками вторичных минералов Bi , образующих частичные псевдоморфозы по этому сульфиду (рис. 2, 4). Именно в них нами диагностированы описываемые ниже сульфаты Bi – каннонит и легернит.



Рис. 4. Фрагмент окисленного слабоокатанного кристалла висмутина (№ 56077 в коллекции ММФ). Тонкие белые прожилки сложены каннонитом и легернитом. 2 x 1,8 x 1,5 см. Фото А.Д. Касаткиной.

Методы исследования

Исследование проб, отобранных из описанных выше образцов, проводилось в лабораториях ММФ, департамента геологических наук факультета науки Масарикова университета (Брно, Чехия) и департамента наук о Земле Университета Падуи (Италия).

Физические свойства минералов изучались с помощью стереомикроскопа Zeiss Discovery V8,

микроморфология и химический состав – методами сканирующей электронной микроскопии и электронно-зондового микроанализа с применением как энергодисперсионного, так и волнодисперсионного спектрометра.

Анализ с использованием энергодисперсионного спектрометра проводился на сканирующем электронном микроскопе CamScan-4D с системой анализа INCA при ускоряющем напряжении 20 кВ и поглощенном токе 5 нА на эталоне – металлическом кобальте. Анализ на волнодисперсионном спектрометре проводился на микроанализаторе Cameca SX 100 (условия анализа: ускоряющее напряжение 15 кВ, сила тока электронного зонда 10 нА, диаметр электронного зонда на поверхности образца 8 мкм, время накопления импульсов на пике 10 с, на фоне 5 с). Определявшиеся элементы, аналитические рентгеновские линии и стандарты: $\text{SKa} - \text{SrSO}_4$; $\text{BiM}\beta - \text{Bi}$. К измеренным интенсивностям применена X-PHI-коррекция матрицы (Merlet, 1994).

Регистрация спектров комбинационного рассеяния света (КР) проводилась с помощью спектрометра Horiba LabRAM HR Evolution, оснащенного оптическим микроскопом Olympus BX 41, голографической решеткой (600 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 и выходной мощностью 10 мВт. Эффективный диаметр лазерного пучка вблизи поверхности образца составил около 2,6 мкм. КР-спектры регистрировались в диапазоне 100–4000 cm^{-1} со спектральным разрешением $\sim 2 \text{ cm}^{-1}$.

Для получения рентгенодифракционных данных предварительно изученные электронно-зондовым методом и КР-спектроскопически зерна извлекались из шлифов и анализировались с помощью монокристалльного дифрактометра Rigaku Oxford

Diffraction с детектором Pilatus 200K Dectris на MoKa-излучении при ускоряющем напряжении 50 кВ и силе тока 0.8 мА. Расстояние образец–детектор составляло 68 мм, время экспозиции 60 мин.

Результаты

Каннонит и легернит тесно срastaются, образуя полиминеральные частичные псевдоморфозы по висмутину. Макроскопически эти сульфаты висмута неотличимы друг от друга. Они слагают прожилки длиной до 4 см и мощностью до 0.5 см в темно-сером висмутине. Цвет прожилков белый до очень светло-коричневого, блеск алмазный, черта белая. В тонких сколах минералы прозрачные. Спайность отсутствует. В УФ-лучах эти сульфаты не люминесцируют. Под растровым электронным микроскопом (РЭМ) в режиме отраженных электронов (BSE) каннонит и легернит хорошо различимы по яркости и по текстуре агрегатов. Первый из них чуть менее яркий (на рис. 5 темно-серый), а его выделения имеют гладкую, ровную поверхность, тогда как второй более яркий (на рис. 5 светло-серый), агрегаты же его выглядят неоднородно, имеют пористую структуру. При этом оба сульфата прекрасно контрастируют с наиболее ярким (белым на рис. 5) висмутином (рис. 5).

В составе обоих минералов электронно-зондовым методом установлены только Вi, S и O. Химический состав каннонита (мас.%, содержание H₂O рассчитано по стехиометрии, среднее значение по трем анализам): Вi₂O₃ 82.51, SO₃ 13.41, H₂O 3.10, сумма 99.02. Он отвечает эмпирической формуле (расчет на 7 атомов O, два из которых принадлежат OH-группам) Вi_{2.06}So_{0.97}O₅(OH)₂. Химический состав легернита (мас.%, среднее значение по четырем анализам): Вi₂O₃ 79.59, SO₃ 10.80, сумма 90.39 – отвечает эмпирической формуле (расчет на 34 атома O) Вi_{12.67}S_{5.00}O₃₄, практически точно соответствующей идеальной формуле минерала. Низкая сумма электронно-зондового анализа объясняется, скорее всего, тем, что, в отличие от каннонита, легернит очень плохо полируется. Его крупные выделения об-

разованы тесным срastанием мельчайших индивидов, имеют пористую текстуру и поэтому дают в шлифе неровную поверхность (рис. 4). Подобные трудности отмечали и авторы первого описания легернита, которые в силу тонковолокнистого характера минерала получили сумму анализа 90.54 мас.%, сравнимую с нашей (Garavelli et al., 2014). При этом идеальная стехиометрия легернита из Букуки свидетельствует о правильном выборе эталонных и аналитических линий.

Диагностика минералов подтверждена рентгенографически. Главные линии порошкограмм, *d*, Å, (*h*): у каннонита 7.40 (37), 6.90 (10), 6.40 (23), 5.00 (12), 4.15 (28), 3.63 (14), 3.46 (26), 3.32 (78), 3.20 (100), 2.92 (40), 2.83 (46), 2.78 (26), 1.98 (15), 1.93 (11); у легернита 5.82 (12), 5.02 (10), 3.21 (100), 3.10 (40), 2.98 (27), 2.92 (30), 2.83 (40), 2.48 (10), 2.04 (9), 1.96 (15), 1.86 (11). Рассчитанные по порошковым рентгенограммам параметры моноклинных элементарных ячеек четко отвечают каннониту и легерниту, что видно из табл. 1.

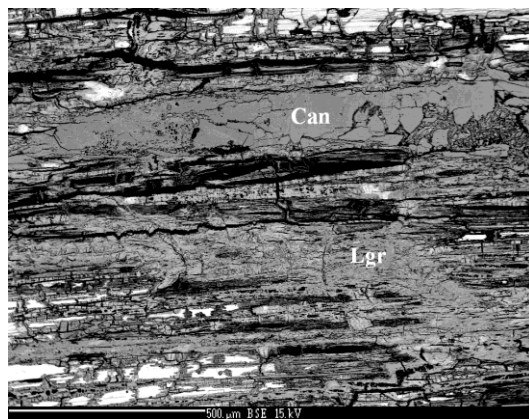


Рис. 5. Частичная псевдоморфоза тесно срastaющихся каннонита (Can) и легернита (Lgr) по висмутину (белые участки). РЭМ-фото в отраженных электронах.

Таблица 1. Параметры элементарных ячеек каннонита и легернита из Букуки и других месторождений

№	Сингония	<i>a</i> , Å	<i>b</i> , Å	<i>c</i> , Å	β , °	<i>V</i> , Å ³	<i>Z</i>
1	Монокл.	7.691(1)	13.874(2)	5.6569(8)	109.23(1)	569.90(9)	4
2	Монокл.	7.700(3)	13.839(6)	5.686(2)	109.11(3)	572.5(4)	4
3	Монокл.	7.7196(5)	13.8856(9)	5.6980(4)	109.174(10)	576.89	4
4	Монокл.	7.7100(8)	13.8717(14)	5.6939(6)	109.155(2)	575.25	4
5	Монокл.	11.197(2)	5.714(1)	11.879(2)	99.37(2)	749.9(2)	1
6	Монокл.	11.2486(11)	5.6568(6)	11.9139(10)	99.177(7)	748.39(12)	1

Примечание. 1 – каннонит, Букука; 2 – каннонит, Tunnel Extension, Юта, США (Stanley et al., 1992); 3, 4 – каннонит, Alfenza, Пьемонт, Италия (Caritani et al., 2013); 5 – легернит, Букука; 6 – легернит, фумарола FF, кратер Ла Фосса, о. Vulcano, Италия (Garavelli et al., 2014).

На рис. 6 представлен КР-спектр каннонита из Букуки в сравнении со спектром из рудника Alfenza, Пьемонт, Италия (Capitani et al., 2013). Сопоставление показывает их практическую полную идентичность. Присутствие в спектре интенсивного синглета при 983–984 см^{-1} (невыврожденная мода $A_1(\nu_1)$ – полносимметричные валентные колебания сульфатных групп) согласуется с присутствием в структуре каннонита тетраэдров SO_4^{2-} только одного сорта. Искаженность сульфатных тетраэдров проявляется в присутствии «запрещенных» для симметричной группы SO_4 мод в диапазоне 1050–1150 см^{-1} (вырожденная мода $F_2(\nu_3)$ – асимметричные валентные колебания сульфатных групп). Полосы в интервалах 430–460 и 550–620 см^{-1} относятся к деформационным колебаниям группы SO_4^{2-} – соответственно моды $E(\nu_2)$ и $F_2(\nu_4)$. Более низкочастотные полосы связаны с решеточными модами с участием Bi-O -валентных колебаний и вибрационных колебаний сульфатных анионов. Слабая полоса при 3439 см^{-1} относится к валентным колебаниям

гидроксильной группы.

На рис. 7 представлен КР-спектр легернита из Букуки в сравнении со спектром этого минерала из места его первой находки в кратере Ла Фосса (Garavelli et al., 2014). Несмотря на сильную интерференцию на текстурированном образце из Букуки, можно констатировать, что оба спектра относятся к одному и тому же минералу. Небольшие различия могут быть связаны как с наложением интерференционной кривой, так и с различными преимущественными ориентировками индивидов. В КР-спектре итальянского образца, не осложненного эффектом интерференции, отчетливо проявляются две полосы полносимметричных валентных колебаний сульфатных групп (при 970 и 1019 см^{-1}), соответствующие двум неэквивалентным положениям аниона SO_4^{2-} в структуре этого минерала. В области выше 1300 см^{-1} полос в КР-спектрах обоих образцов не наблюдается, что подтверждает безводный характер легернита.

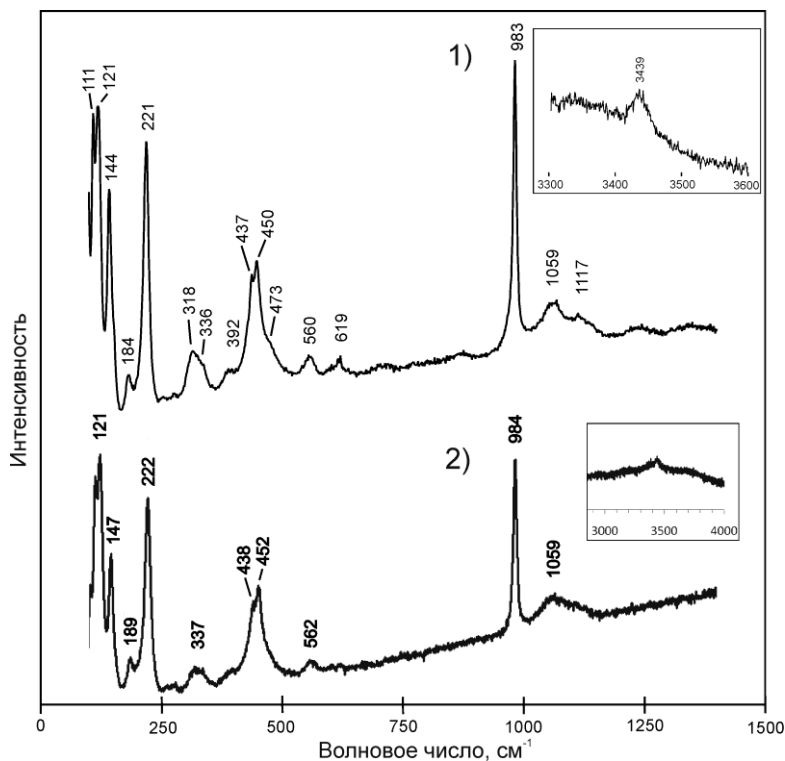


Рис. 6. КР-спектры каннонита из месторождения Букука (1) и рудника Alfenza, Пьемонт, Италия (Capitani et al., 2013) (2).

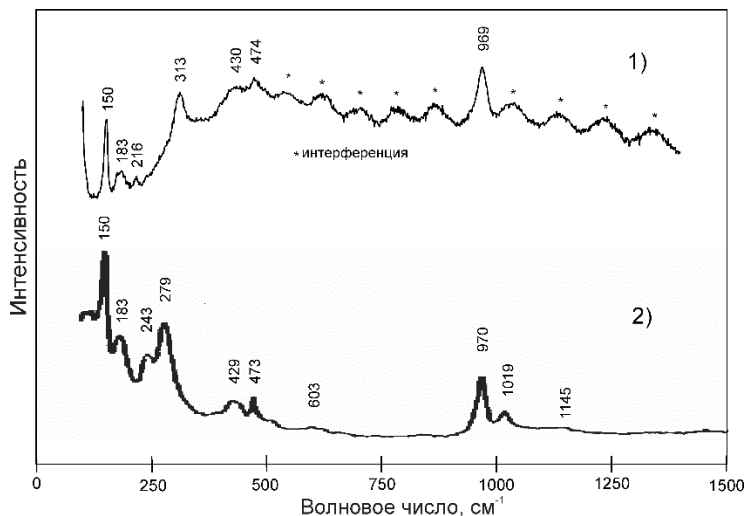


Рис. 7. КР-спектры легернита из месторождения Букука (1) и фумаролы FF, кратер Ла Фосса, о. Vulcano, Италия (по данным Garavelli et al., 2014, модифицирован авторами) (2).

Обсуждение результатов

Как известно, висмут – малоподвижный в гипергенных условиях элемент, который практически не выносится из зоны окисления рудных месторождений. Наиболее распространенным продуктом гипергенного изменения висмута является бисмутит (ранее часто называвшийся «базобисмутитом» или «базовисмутитом»). Он обнаруживается в зоне окисления практически любого месторождения, где есть висмутин или самородный висмут, которые под действием воды и атмосферного кислорода окисляются до малоустойчивых сульфатов висмута, в свою очередь гидролизующихся с образованием гидроксидов висмута. Последние в результате обработки водами, насыщенными атмосферной углекислотой, замещаются основным карбонатом Bi – бисмутитом. Этот процесс близок к тому, например, который приводит к образованию церуссита из анлезита. Именно этим путем главным образом и происходит замещение висмута бисмутитом в зоне гипергенеза (Смирнов, 1936). Например, в других обогащенных Bi объектах Забайкалья, на Шерловой Горе и в пегматитовых жилах Маханского пегматитового поля, нередко полные псевдоморфозы плотного или землистого бисмутита по висмутину. В таких агрегатах часто отсутствуют даже реликты последнего. Неудивительно поэтому, что К.А. Ненадкевич (1917), описавший «базобисмутит» с Шерловой Горы как новый минерал¹, посчитал, видимо, на основании одной лишь визуальной диагностики, что и висмутин с Букуки замещен им же. Предпринятое нами переизучение хранящихся в ММФ образцов висмута из различных месторождений бывшего СССР показало, что в тех из них, где

имеются продукты окисления, они в подавляющем большинстве случаев состоят из чистого бисмутита. Крайне редко, иногда в сростании с тем же самым бисмутитом, фиксируются другие вторичные минералы Bi , такие как бисмит, бисмоклит и заварикит, и уж совсем в единичных случаях – ателестит и прайзингерит.

В этой связи замещение висмута из Букуки не бисмутитом и даже не оксидами, оксогалогенидами или арсенатами висмута, а его сульфатами во многом уникально. Причина такого явления, вероятно, заключается в том, что в зоне гипергенеза Букукинского месторождения формируются весьма кислые дренажные воды, относящиеся к сульфатному типу. Опробование вод в период 1982–2005 гг. показало, что концентрация сульфат-иона в них достигает 985 мг/л, притом что, например, содержание HCO_3^- колеблется от 0 до 88 мг/л. Для сравнения, концентрация SO_4^{2-} в дренажных водах зоны гипергенеза соседнего с Букукой месторождения Белуха, относящегося к той же кварц-сульфидно-вольфрамитовой формации, не превышает 143 мг/л (Чечель, Замана, 2009). Таким образом, особо кислые сульфатные растворы здесь, очевидно, препятствуют гидролитическому распаду висмутовых сульфатов, и именно последние становятся главным продуктом гипергенного изменения висмута. Иными словами, здесь сохранились продукты первых стадий окисления этого сульфида – сульфаты, на большинстве других месторождений полностью исчезнувшие в результате последующих процессов оксидизации и карбонатизации.

¹ В начале 1940-х годов К. Фрондель переизучил оригинал первого исследования «базобисмутита» и показал, что он идентичен бисмутиту, открытому ранее (Frondel, 1943).

Источник финансирования

Работа частично выполнена в соответствии с темой государственного задания, номер госрегистрации АААА-А19-119092390076-7.

Благодарности

Авторы благодарны И.В. Пекову за ценные замечания и редакторскую правку статьи, Л.А. Паутову

– за обсуждение и конструктивные комментарии, Ф. Нестале (Университет Падуи, Италия) – за рентгеновскую съемку каннонита и легернита, А.О. Карпову и М.Е. Генералову – за содействие в фотографировании образца № 56077, а В.Ю. Карпенко – за помощь в нахождении ряда литературных источников.

Список литературы:

Барабанов В.Ф. Минералогия вольфрамитовых месторождений Восточного Забайкалья. Т. 1. Букука и Белуха. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1961. 360 с.

Гайворонский Б.А. Букукинское месторождение. Месторождения Забайкалья. Чита–Москва: Геоинформмарк, 1995. Т. 1. Кн. 1. С. 146–148.

Иващенко В.И., Голубев А.И. Новые аспекты минералогии и металлогении Питкярантского рудного района // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 7. С. 127–148.

Касаткин А.В. К вопросу о переизучении минералогических образцов из музейных коллекций. I. Общие аспекты // Новые данные о минералах. 2020. Т. 54. В. 1. С. 38–51.

Левинский О.Д. Геология рудных месторождений Забайкалья. М.: Наука, 1964. 366 с.

Минералы СССР. Т. II. Сульфиды, сульфосоли и подобные им соединения. М.-Л.: Издательство АН СССР, 1940. 747 с.

Ненадкевич К.А. Висмутовые минералы Забайкалья // Известия Академии наук. 1917. № 7. С. 447–454.

Онтюев Д.О. Особенности висмутовой минерализации в некоторых вольфрамовых месторождениях Восточного Забайкалья // Труды Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана. 1964. В. 15. С. 134–153.

Редина А.А., Мокрушников В.П., Редин Ю.О. Условия формирования и возраст редкометалльного оруднения Кукульбейского рудного района (Восточное Забайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 9. С. 90–102.

Рудные месторождения СССР. В 3-х т. Под ред. акад. В.И. Смирнова. Изд. 2-е, перераб. и доп. Т. 3. М.: Недра, 1978. 496 с.

Смирнов С.С. Зона окисления сульфидных месторождений. Л.-М.: ОНТИ НТКП СССР, 1936. 292 с.

Чечель Л.П., Замана Л.В. Основные геохимические типы дренажных вод вольфрамовых месторождений Юго-Восточного Забайкалья // Вестник Томского государственного университета. 2009. № 329. С. 271–277.

Capitani G.C., Catelani T., Gentile P., Lucotti A., Zema M. Cannonite $[Bi_2O(SO_4)(OH)_2]$ from Alfenza (Crodo, Italy): crystal structure and morphology // Mineralogical Magazine. 2013. Vol. 77. P. 3067–3079.

FrondeL C. Mineralogy of the oxides and carbonates of bismuth // American Mineralogist. 1943. Vol. 28. P. 521–535.

Garavelli A., Pinto D., Mitolo D., Bindi L. Leguernite, $Bi_{12.67}O_{14}(SO_4)_5$, a new Bi oxysulfate from the fumarole deposit of La Fossa crater, Vulcano, Aeolian Islands, Italy // Mineralogical Magazine. 2014. Vol. 78. P. 1629–1645.

Merlet C. An Accurate Computer Correction Program for Quantitative Electron Probe Microanalysis // Microchimica Acta. 1994. Vol. 114/115. P. 363–376.

Stanley C.J., Roberts A.C., Harris D.C., Criddle A.J., Szymanski J.T. Cannonite, $Bi_2O(OH)_2SO_4$, a new mineral from Marysvale, Utah, USA // Mineralogical Magazine. 1992. Vol. 56. P. 605–609.