

ЛЕНГЕНБАХИТ КОЧКОВСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)

Г.И. Шведов¹, О.Ю. Перфилова¹, С.А. Мавринская², С.А. Сильянов¹, Б.М. Лобастов¹

¹Сибирский федеральный университет, пр. Свободный 79, корпус 10, г. Красноярск, 640041 Россия;
g.shvedov@mail.ru

²ООО «Корякмайнинг», ул. Костюшко-Григоровича д. 5, г. Чита, 672000 Россия

LENGENBACHITE FROM THE KOCHKOVSKOE GOLD DEPOSIT (ZABAYKALSKY KRAI)

G.I. Shvedov¹, O.Yu. Perfilova¹, S.A. Mavrinskaya², S.A. Sil'yanov¹, B.M. Lobastov¹

¹Siberian Federal University, pr. Svobodny, 79-10, Krasnoyarsk, 640041 Russia; g.shvedov@mail.ru

²ООО «Koryakmining», ul. Kostyushko-Grigorovicha, 5, Chita, 672000 Russia

В статье приводятся аналитические данные о редкой мышьяковой сульфосоли Pb – ленгенбахите – обнаруженной в сульфидных рудах Кочковского золоторудного месторождения в Забайкальском крае. До настоящего времени находки ленгенбахита известны только на руднике Ленгенбах (Швейцария), месторождениях Негус, Кон (Канада) и Шерловогорское (Забайкальский край). В рудах Кочковского месторождения минерал установлен в двух сульфидных сростках, расположенных в маложелезистом сфалерите золото-кварц-карбонат-полиметаллической стадии минералообразования. Первый сросток представлен иорданитом с включениями ленгенбахита среднего состава $Ag_{4.89}Cu_{1.25}Pb_{18.68}As_{12.46}S_{39.00}$ и галенита, который обрастается зернами арсенопирита и серебросодержащего теннантита. Второй сросток состоит из зерна иорданита с включениями ленгенбахита среднего состава $Ag_{5.23}Cu_{0.79}Pb_{18.57}As_{11.93}S_{39.00}$.

Илл. 5. Табл. 3. Библ. 17

Ключевые слова: Кочковское месторождение золота, ленгенбахит, коэффициент отражения, изоморфизм Cu и Ag, Забайкальский край.

The article presents the analytical data on lengenbachite, a rare As–Pb sulfosalt, which was found in sulfide ores of the Kochkovskoe gold deposit in Zabaykalsky Krai. Until recent, lengenbahite was found only in the Lengenbach quarry (Switzerland), Negus, Kohn (Canada) and Sherlovaya Gora (Zabaikalsky Krai) deposits. The mineral is identified in two sulfide aggregates located in the low-Fe sphalerite of gold-quartz-carbonate-polymetallic stage. Aggregate 1 is composed of jordanite with lengenbachite inclusions ($Ag_{4.89}Cu_{1.25}Pb_{18.68}As_{12.46}S_{39.00}$, on average) and galena, which is overgrown by arsenopyrite and Ag-bearing tennantite. Aggregate 2 consists of an jordanite grain with lengenbachite inclusions ($Ag_{5.23}Cu_{0.79}Pb_{18.57}As_{11.93}S_{39.00}$, on average).

Figures 5. Tables 3. References 17.

Key words: Kochkovskoe gold deposit, lengenbachite, reflection coefficient, Cu and Ag isomorphism, Zabaykalsky Krai.

Введение

Ленгенбахит $Ag_4Cu_2Pb_{18}As_{12}S_{39}$ – редкая сульфосоль сложного состава, до настоящего времени описанная только в нескольких месторождениях: Ленгенбах (Швейцария) (Solly, 1905), Негус и Кон (Канада) (Ridland, 1941) и Шерловогорском в Забайкалье (Касаткин и др., 2014). Авторы настоящей статьи обнаружили ленгенбахит на Кочковском месторождении золота (Забайкальский край), в связи с этим целью статьи является характеристика этого и ассоциирующих с ним минералов.

Кочковское золоторудное месторождение

Кочковское золоторудное месторождение расположено в пределах Широкинского рудного узла в Газимуро-Заводском районе Забайкальского края и представляет собой жильно-штокерковую зону запад-северо-западного простирания (рис. 1). Вмещающие породы представлены средне-позднеюрскими вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями: дацитами, плагиодацитами, дацит-андезитами, андезитами, базальтами, андезибазальтами, их лавобрекчиями и туфами. Породы интенсивно изменены и преобразованы в полевошпат-кварц-серицитовые, кварц-серицитовые и серицит-кварцевые метасоматиты. Редко породы пропилитизированы, карбонатизированы и альбитизированы. Основная масса пород полностью перекристаллизована и превращена в тонкозернистый агрегат серицит-мусковита, кварца, карбоната и глинистых минералов.

Руды на месторождении прожилково-вкрапленного типа. Прожилки сульфидно-кварц-доломитовые, сульфидные. Минеральный состав руд крайне разнообразен и характеризуется наличием, кроме золота и обычных сульфидов (пирита, марказита, арсенопирита, пирротина, халькопирита, галенита, сфалерита), многочисленных и разнообразных сульфосолей Pb, Sb, As, Te, Ag. Наиболее широко представлены минералы Pb, среди которых на сканирующем электронном микроскопе диагностированы геокронит, иорданит, буланжерит, бурнонит, веенит, ленгенбахит, менегинит, робинсонит, твиннит, цинкениит, плагионит, маррит, фрейеслебениит. Золото мелкое, тонкое и наноразмерное. Последнее концентрируется в мышьяковых зонах пирита, где содержание As достигает 15.05 мас. %.

На месторождении выделено четыре стадии минералообразования: золото-пирит-марказитовая, золото-кварц-карбонат-полиметаллическая, золото-кварц-карбонат-стибнитовая и карбонатная (безрудная), связанная с формированием поздних низкотемпературных кварц-карбонатных и карбонатных прожилков, иногда содержащих барит и целестин. Ленгенбахит ассоциирует со второй стадией, содержащей золото средней пробыности (содержание Ag составляет, в среднем, 26.1 мас. %). Предполагается, что минералообразование происходило в близповерхностных низкотемпературных условиях, о чем свидетельствуют тонкие размеры ранних сульфидов (пирита, марказита), широкое распространение гипогенного марказита, температура устойчивости которого составляет 240 °C (Murowchick, 1992), значительное количество в рудах аурипигмента и реальгара, ассоциация которых устойчива ниже 263 °C (Чвилёва и др., 1988), колломорфные структуры и флуктуации окислительно-восстановительных условий рудоотложения, о чем свидетельствуют попеременный рост пирита и марказита и смена сульфидов As на самородный мышьяк. Эти и ряд других признаков минерализации позволяет предположительно отнести месторождение к карлинскому типу (Шведов и др., 2018).

Методы исследований

Методы исследований включали петрографическое изучение прозрачных шлифов (микроскоп Axioskop 40A POL) и минераграфическое изучение полированных шлифов (аншлифов) (микроскоп Olympus BX51). Состав минералов определен в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) с использованием СЭМ MIRA 3 LMU (Tescan), оборудованного системой микроанализа Inca Energy 450 XMax 80 (Oxford Instruments) (аналитик Н.С. Карманов), рентгеновского микроанализатора JXA 8100 (аналитик В.Н. Королюк), а также в R&D Центре НН СФУ с использованием СЭМ Tescan Vega III SBH с ЭДС анализатором Oxford X-Act (г. Красноярск, аналитики С.А. Сильянов, Б.М. Лобастов). Состав ленгенбахита из первого сульфидного сростка (см. описание ниже) проанализирован на трех приборах, из второго – только на СЭМ Tescan Vega III SBH.

Условия съемки на СЭМ MIRA 3 LMU (Tescan): ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1.6 нА. В качестве стандартов служили химически чистые элементы, а также $PtAs_2$ – для As и FeS_2 – для S. Для

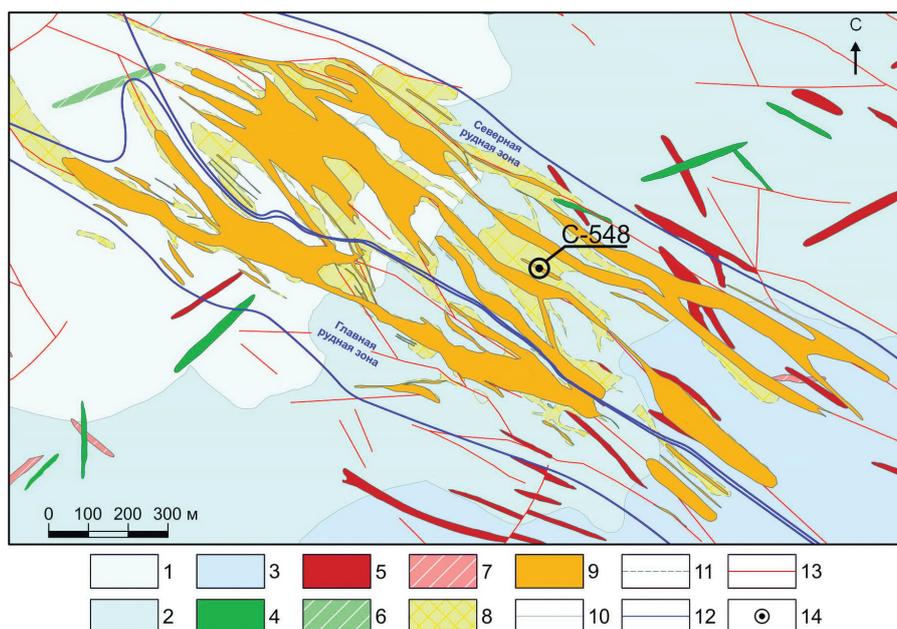


Рис. 1. Геологическое строение Кочковского золоторудного месторождения (по В.И. Чичеву, 2017).

1 – Средне-верхнеюрские дациты, андезибазальты; 2 – андезибазальты, андезиты, лавы, туфобрекчии, туфы, туффиты средней юры; 3 – песчаники, алевролиты, гравелиты, конгломераты нижней юры; 4, 5 – нерчинскозаводской дайковый комплекс (J_{2-3}): 4 – лампрофиры; 5 – диоритовые порфириды; 6, 7 – субвулканические образования шадоронского комплекса (J_{2-3}): 6 – кварцевые диоритовые порфириды; 7 – гранодиорит-порфиры; 8 – зоны гидротермально-метасоматических изменений; 9 – минерализованные зоны; 10 – границы свит; 11 – границы метасоматических образований; 12 – границы рудных зон; 13 – тектонические нарушения; 14 – скважина С-548.

Fig. 1. Geological structure of the Kochkovskoe gold deposit (after V.I. Chichev, 2017).

1 – Middle-Late Jurassic dacites, basaltic andesites; 2 – Middle Jurassic basaltic andesites, andesites, lavas, tuff breccias, tufts, tuffites; 3 – Lower Jurassic sandstones, siltstones, gravelites, conglomerates; 4, 5 – Middle-Late Jurassic Nerchinsky Zavod dike complex: 4 – lamprophyres; 5 – porphyry diorites; 6, 7 – subvolcanic rocks of the Middle-Late Jurassic Shadoronsk complex: 6 – quartz porphyry diorites; 7 – porphyry granodiorites; 8 – zones of hydrothermal-metasomatic alteration; 9 – mineralized zones; 10 – boundaries of formations; 11 – boundaries of metasomatic rocks; 12 – boundaries of ore zones; 13 – faults; 14 – borehole C-548.

Ag и Sb использовалась аналитическая линия L, для Fe и Cu – линия K, для Pb – линия M. Полученные спектры обрабатывались при помощи штатного программного обеспечения. Условия съемки на микроанализаторе JXA 8100: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 50 нА, размер пучка 3–4 мкм; аналитические линии: S – K α , As – K β , Sb – L α , Ag – L α , Cu – K α , Pb – M α . В качестве стандартов использованы минералы: PbS (S и Pb), FeAsS (As), CuFeS₂ (Fe и Cu), Ag₃AsS₃ (Ag) и Sb₂S₃ (Sb). Область генерации излучения (размер зонда) над образцом составляет около 1 мкм. Условия съемки на Tescan Vega III SBH: ускоряющее напряжение 20 кВ; ток зонда (на чаше Фарадея) 2.3 нА; аналитические линии для элементов: Cu – K α , Ag – L α , Sb – L α , As – K β , Pb – M α , S – K α . Стандартами служили сплавы, чистые металлы и полуметаллы: чистая Cu, Ag, Sb, InAs (для As), PbTe (для Pb), FeS₂ (для S).

Спектрофотометрические исследования ленгенбахита проведены С.А. Сильяновым (Сибирский федеральный университет) на микроскопическом спектрофотометре ЛОМО МСФУ-К Ю-30.54.072 с использованием монокристаллического кремния КЭФ 4.5/0.3 (аттестован в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова) в качестве эталона. Условия эксперимента: диапазон 400–700 нм, напряжение на ФЭУ 400, шаг дискретизации 20 нм, скорость 1000 нм/мин, решетка 600 штр/мм, диаметр коллиматорного отверстия 0.010 мм. Спектры отражения получены в пяти разных участках наиболее крупного зерна, находящихся в различной ориентировке.

Ленгенбахит Кочковского месторождения

Ленгенбахит обнаружен в образце, отобранном на глубине 62.55 м из керна скважины С-548,

пробуренной в северной части месторождения (рис. 1). Образец представлен метасоматитом по андезибазальту с сульфидным прожилком мощностью 3.5–5.5 см (рис. 2). В составе прожилка преобладают пирит и галенит; также присутствуют сфалерит, иорданит, геокронит, арсенопирит, халькопирит, бурнонит, блеклая руда (серебросодержащий теннантит), пирротин и самородное золото второй генерации. По агрегатам галенита развиваются тонкие прожилки прустита-пираргирита. Мелкие сростки маррита и фрейслебенита обнаружены в виде включений в сфалерите. Ленгенбахит входит в состав двух мелких сростков сульфидов.

Первый сросток находится на границе между маложелезистым сфалеритом с тонкой эмульсионной вкрапленностью халькопирита и пирротина и сфалеритом с более крупной вкрапленностью халькопирита и пирротина, возможно, приуроченной к интерстициям отдельных индивидов сфалерита (рис. 3а). Наибольшие размеры (30×130 мкм) в составе сростка имеет иорданит, образовавшийся, вероятнее всего, за счет замещения галенита, о чем свидетельствуют мелкие реликты галенита, расположенные по краям и внутри иорданита. Иорданит в краевых частях обрастается более поздним серебросодержащим теннантитом, а также мелкими кристаллами и зернами арсенопирита. В иорданите выявлены четыре включения ленгенбахита, размеры которых варьируют от 1.5×4.0 до 10×32 мкм. Форма сечений ленгенбахита меняется от слабо

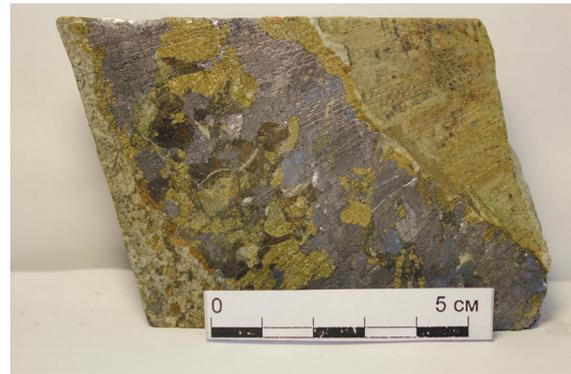


Рис. 2. Метасоматит по андезибазальту с сульфидной жилкой, в которой обнаружен ленгенбахит. Скважина С-548, интервал 62.55 м.

Fig. 2. Metasomatite after basaltic andesite with a sulfide vein, which hosts lengenbachite. Borehole C-548, depth of 62.55 m.

вытянутой до изометричной (рис. 3а). Два зерна минерала контактируют с блеклой рудой, одно – со сфалеритом. Наиболее крупное зерно минерала полностью заключено в иорданите и соприкасается с тонким прожилком серебросодержащего теннантита.

Второй сросток представлен небольшим (9.0×32.0 мкм) изогнутым зерном иорданита, заключенным в маложелезистом (2.52 мас. %) сфалерите с тончайшей эмульсионной вкрапленностью халькопирита (рис. 4а). В иорданите располагаются четыре реликтовых зерна ленгенбахита, наибольшее из которых имеет размеры 4.0×15.0 мкм.

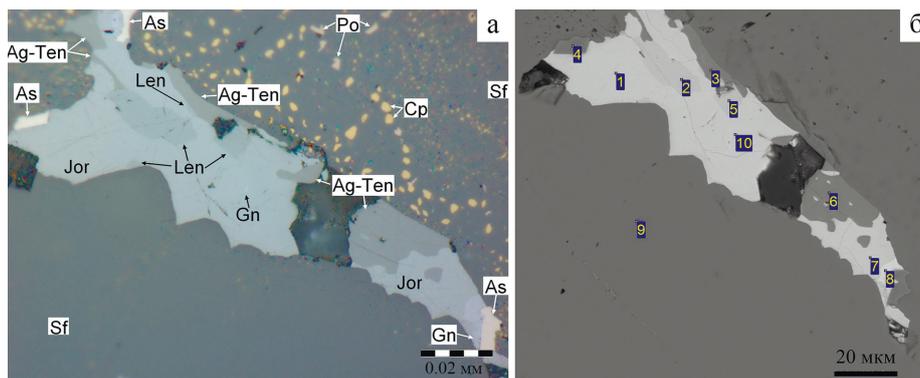


Рис. 3. Первый сульфидный сросток с зернами ленгенбахита (Len) в иорданите (Jor) и на контакте с серебросодержащим теннантитом (Ag-Ten):

а – отраженный свет; б – BSE фото (СЭМ MIRA 3 LMU).

As – арсенопирит, Gn – галенит, Cp – халькопирит, Sf – сфалерит, Po – пирротин. Точки и номера анализов на рис. 3б соответствуют таковым в таблице 1.

Fig. 3. Sulfide aggregate 1 with lengenbachite grains (Len) in jordanite (Jor) and at the contact with Ag-bearing tennantite (Ag-Ten):

а – reflected light; б – BSE photo (SEM MIRA 3 LMU).

As – arsenopyrite, Gn – galena, Cp – chalcopyrite, Sf – sphalerite, Po – pyrrhotite. Points and numbers of analyses correspond to those in Table 1.

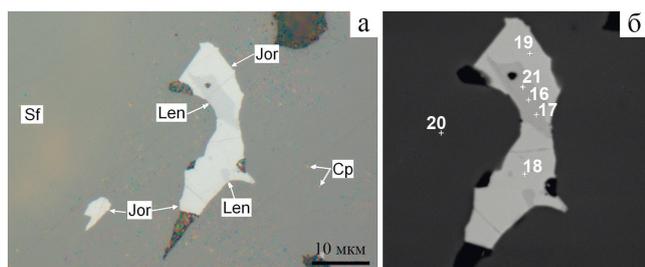


Рис. 4. Второй сульфидный сросток с реликтами ленгенбахита (Len) в иорданите (Jor).

а – отраженный свет; б – BSE фото (СЭМ Tescan Vega III SBH). Цифры на рис. 4б соответствуют номерам анализов в таблице 1.

Fig. 4. Sulfide aggregate 2 with relics of lengenbachite (Len) in jordanite (Jor):

а – reflected light; б – BSE photo (SEM Tescan Vega III SBH). Numbers in Fig. 4б corresponds to analysis numbers in Table 1.

В отраженном свете ленгенбахит имеет белый цвет с серым оттенком (рис. 3а, 4а). Двухотражение не заметно, анизотропия очень слабая. По данным сайта <http://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/lengenbachite.pdf> коэффициенты отражения для R_g и R_p у ленгенбахита из рудника Ленгенбах отличаются не более чем на 2–3 %, что говорит о его слабой анизотропии. Как показало сравнение спектров отражения (рис. 5), изученный нами минерал из первого сростка характеризуется более низкими показателями отражения (в среднем, 32–34 %) по сравнению с ленгенбахитом из рудника Ленгенбах (36.7 %) (Минералы, 1960), что может быть связано отклонениями его химического состава от эталонного либо мелкими размерами зерен и влиянием более крупного зерна иорданита. Исходя из полученных данных, можно утверждать, что доминирующей длиной волны для минерала является 485.5 нм при чистоте цвета около 1.7.

Результаты анализов ленгенбахита приведены в таблице 1. Необходимо отметить значительную разницу в содержаниях Си в составе ленгенбахита двух сростков. В ленгенбахите из первого сростка содержания Си по данным анализов трех приборов варьируют от 0.85 до 1.35 мас. % (в среднем, 1.19 мас. %). В ленгенбахите из второго сростка содержание Си стабильно (в среднем, 0.77 мас.%). По данным микрозондового анализа ленгенбахит из первого сростка содержит незначительную (до 0.15 мас. %) примесь Sb, не подтвержденную ЭДС анализами. По данным ВДС анализа (JXA 8100), содержание Pb в ленгенбахите из первого сростка,

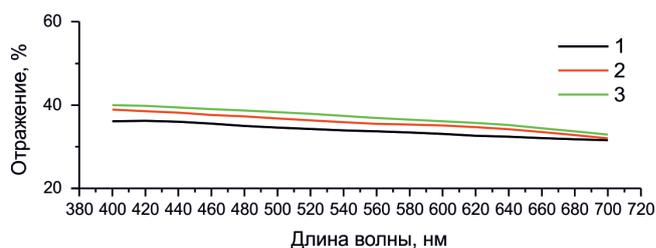


Рис. 5. Спектры отражения ленгенбахита Кочковского месторождения (1) и рудника Ленгенбах (2, 3) (<http://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/lengenbachite.pdf>).

Fig. 5. Reflectance spectra of lengenbachite from the Kochkovskoe deposit (1) and Lengenbach quarry (2, 3) (<http://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/lengenbachite.pdf>).

в среднем, составляет 56.75 мас. %, тогда как ЭДС анализы разных приборов дают близкие результаты – 58.67 и 59.08 мас. %. Аналогичные результаты (в среднем, 59.08 мас. % Pb) получены для ленгенбахита из второго сростка. Также хорошо сопоставляются средние результаты ЭДС анализа ленгенбахита из обоих сростков по As (табл. 1).

Химический состав других рудных минералов сростков приведены в таблице 2. Сфалерит в обоих сростках маложелезистый (3.06 и 2.52 мас. % Fe), а иорданит отличается повышенным содержанием Sb (первый сросток) и Ag (второй сросток). Иорданит из первого сростка характеризуется значительным дефицитом S в отличие от иорданита из второго сростка.

Обсуждение результатов

Ленгенбахит Кочковского месторождения ассоциирует с маложелезистым сфалеритом, галенином и находится в иорданите подобно ленгенбахиту из рудника Ленгенбах (Минералы, 1960; Чвилёва и др., 1988), который также ассоциирует с реальгаром (mindat.org). В отличие от ленгенбахита Кочковского месторождения ленгенбахит из рудника Ленгенбах встречается в виде тонких, часто изогнутых листочков, а также игольчатых кристаллов и их радиально-лучистых агрегатов (mindat.org). Отмечаются двойниковые пластинки (Минералы, 1960). Макроскопически имеет свинцово-серый цвет.

Таблица 1

Химический состав ленгенбахита Кочковского месторождения золота, мас. %

Table 1

Chemical composition of lengenbachite from Kochkovskoe gold deposit, wt. %

№ анализа	Pb	Ag	Cu	As	Sb	S	Сумма	Прибор	Кристаллохимические формулы
Первый сросток (точки анализов см. рис. 36)									
1	57.51	8.01	1.14	15.19	0.14	19.45	101.44	JXA 8100	$Ag_{4.76}Cu_{1.15}Pb_{17.81}As_{13.01}S_{39.00}$
2	56.48	9.26	1.11	15.04	0.13	19.56	101.58		$Ag_{5.48}Cu_{1.11}Pb_{17.39}As_{12.81}S_{39.00}$
3	56.41	7.48	1.14	13.68	0.14	18.83	97.75		$Ag_{4.60}Cu_{1.19}Pb_{18.04}As_{12.10}S_{39.00}$
4	56.76	7.57	1.16	14.43	0.12	19.03	99.14		$Ag_{4.60}Cu_{1.20}Pb_{17.97}As_{12.63}S_{39.00}$
5	56.60	9.35	1.17	14.97	0.15	19.54	101.78		$Ag_{5.54}Cu_{1.18}Pb_{17.45}As_{12.76}S_{39.00}$
Среднее	56.75	8.33	1.14	14.66	0.14	19.28	100.34		$Ag_{5.00}Cu_{1.16}Pb_{17.73}As_{12.67}S_{39.00}$
2	57.67	7.52	1.21	13.72	–	18.56	98.69	MIRA 3 LMU	$Ag_{4.70}Cu_{1.28}Pb_{18.75}As_{12.34}S_{39.00}$
5	59.66	7.54	1.32	13.78	–	18.61	100.9		$Ag_{4.70}Cu_{1.40}Pb_{19.35}As_{12.36}S_{39.00}$
Среднее	58.67	7.53	1.25	13.75	–	18.59	99.81		$Ag_{4.70}Cu_{1.34}Pb_{19.05}As_{12.35}S_{39.00}$
5	60.43	8.04	1.14	13.66	–	18.66	101.93	Tescan Vega 3	$Ag_{4.99}Cu_{1.20}Pb_{19.51}As_{12.19}S_{39.00}$
6	56.95	8.50	1.35	13.95	–	18.19	98.95		$Ag_{5.41}Cu_{1.46}Pb_{18.86}As_{12.77}S_{39.00}$
7	58.16	8.80	1.26	14.41	–	18.68	101.30		$Ag_{5.45}Cu_{1.32}Pb_{18.75}As_{12.85}S_{39.00}$
8	59.88	7.37	1.12	13.57	–	18.53	100.48		$Ag_{4.60}Cu_{1.19}Pb_{19.46}As_{12.20}S_{39.00}$
9	59.13	7.60	1.01	13.39	–	18.53	99.65		$Ag_{4.75}Cu_{1.07}Pb_{19.22}As_{12.04}S_{39.00}$
10	58.67	7.42	0.85	13.44	–	18.41	98.79		$Ag_{4.66}Cu_{0.91}Pb_{19.19}As_{12.16}S_{39.00}$
11	59.50	7.64	1.31	13.81	–	18.57	100.83		$Ag_{4.76}Cu_{1.39}Pb_{19.30}As_{12.39}S_{39.00}$
12	59.95	8.09	1.31	13.61	–	18.37	101.32	$Ag_{5.10}Cu_{1.40}Pb_{19.66}As_{12.34}S_{39.00}$	
Среднее	59.08	7.93	1.17	13.73	–	18.49	100.41		$Ag_{4.96}Cu_{1.24}Pb_{19.25}As_{12.37}S_{39.00}$
Второй сросток (точки анализов см. рис. 46)									
16	59.13	8.38	0.77	13.55	–	19.30	101.13	Tescan Vega 3	$Ag_{5.03}Cu_{0.79}Pb_{18.49}As_{11.72}S_{39.00}$
17	59.20	8.87	0.78	13.80	–	19.33	101.98		$Ag_{5.32}Cu_{0.79}Pb_{18.48}As_{11.92}S_{39.00}$
21	58.91	8.76	0.76	13.82	–	18.98	101.23		$Ag_{5.35}Cu_{0.79}Pb_{18.73}As_{12.15}S_{39.00}$
Среднее	59.08	8.67	0.77	13.72	–	19.20	101.45		$Ag_{5.23}Cu_{0.79}Pb_{18.57}As_{11.93}S_{39.00}$

Примечание. Формулы рассчитаны на 39 атомов серы

Note. Formulas are recalculated to 39 S atoms.

Первоначальная формула ленгенбахита, обнаруженного в 1903 г. Р. Солли (Solly, 1905), выглядела как $Pb_6(Ag,Cu)_2As_4S_{13}$ (Hutchinson, 1906). В таком же виде она представлена в большинстве минералогических справочников (Бетехтин, 1950; Дэна и др., 1951; Минералы, 1960; Рамдор, 1962). Позднее Cu была полностью исключена из состава минерала (Костов, 1971), но в справочнике-определителе она входит в теоретическую формулу минерала – $Ag_7Cu_6Pb_{37}As_{23}S_{78}$ (Чвилёва и др., 1988). К настоящему времени формула ленгенбахита приобрела следующий вид $Cu_2Ag_4Pb_{18}As_{12}S_{39}$ (Moëlo et al., 2008). Она является утроенным вариантом первоначальной формулы, в которой зафиксировано присутствие Cu в одной позиции с Ag.

Структура минерала исследовалась рентгеноструктурным методом (Nuffield, 1944) и методом просвечивающей электронной микроскопии и дифракции электронов (Williams, Pring, 1988). На базе этих структурных исследований кристаллохимия минерала позднее была пересмотрена (Makovicky et al., 1994). Вследствие двойникования и ковкости, препятствующих получению монокристалльных данных, структура минерала до настоящего времени остается неясной, поэтому остается неясной и роль в ней Cu и Ag.

Мелкие размеры обнаруженного нами ленгенбахита не позволили выполнить структурные исследования, поэтому предположения об изоморфизме можно сделать только на основании имею-

Таблица 2

Химический состав минералов сульфидных сростков, мас. %

Table 2

Chemical compositions of minerals of aggregates, wt. %

№ анализа	Fe	Cu	Zn	Ag	Pb	Sb	As	S	Сумма	Кристаллохимические формулы
Первый сросток (точки анализов см. рис. 3б)										
1	–	–	–	–	72.38	0.41	10.32	17.2	100.31	$Pb_{14.63}(As_{5.77}Sb_{0.14})_{5.91}S_{22.46}$
4	34.18	–	–	–	–	–	43.04	22.65	99.87	$Fe_{0.97}As_{0.91}S_{1.12}$
6	5.09	28.62	4.01	18.27	–	–	19.26	26.27	101.52	$(Ag_{2.66}Cu_{7.07})_{9.72}(Fe_{1.44}Zn_{0.96})_{2.40}As_{4.03}S_{12.85}$
8	–	–	–	–	87.39	–	–	13.12	100.51	$Pb_{1.02}S_{0.98}$
9	3.06	–	63.29	–	–	–	–	32.47	98.82	$(Zn_{0.95}Fe_{0.05})_{1.00}S_{1.00}$
10	–	–	–	–	71.59	0.44	10.49	17.32	99.84	$Pb_{14.43}(As_{5.85}Sb_{0.15})_{6.00}S_{22.57}$
Второй сросток (точки анализов см. рис. 4б)										
18	–	–	–	0.09	70.53	–	10.18	18.56	99.37	$(Pb_{13.86}Ag_{0.03})_{13.89}As_{5.53}S_{23.57}$
19	–	–	–	–	71.66	–	10.82	17.95	100.44	$Pb_{14.16}As_{5.91}S_{22.92}$
20	2.52	–	64.88	–	–	–	–	35.01	102.41	$(Zn_{0.93}Fe_{0.04})_{0.97}S_{1.03}$

Примечание. Анализы 1, 10, 18, 19 – иорданит; 6 – серебросодержащий теннантит; 4 – арсенопирит; 8 – галенит; 9, 20 – сфалерит.

Note. Analyses 1, 10, 18, 19 – jordanite; 6 – Ag-bearing tennantite; 4 – arsenopyrite; 8 – galena; 9, 20 – sphalerite.

Таблица 3

Состав ленгенбахита из рудника Ленгенбах, мас. %

Table 3

Chemical composition of lengenbachite from Lengenschach quarry, wt. %

№ п/п	Pb	Ag	Cu	Fe	As	Sb	S	Сумма	Кристаллохимические формулы
1	58.13	5.93	2.44	–	14.01	–	19.49	100.00	$Ag_{3.52}Cu_{2.46}Pb_{17.96}As_{11.97}S_{39.00}$
2	57.89	5.64	2.36	0.17	13.46	0.77	19.33	99.62	$Ag_{3.38}(Cu_{2.40}Fe_{0.20})_{2.60}Pb_{18.04}As_{11.60}S_{39.00}$
3	54.5	9.4	2.50	–	13.3	–	20.8	100.50	$Ag_{5.23}Cu_{2.36}Pb_{15.78}As_{10.65}S_{39.00}$
4	59.4	5.7	2.90	–	13.0	–	19.0	100.00	$Ag_{3.47}Cu_{3.00}Pb_{18.83}As_{11.40}S_{39.00}$

Примечание. Анализы 1, 2 – (Дэна и др., 1951); 3, 4 – (Чвилёва и др., 1988).

Note. Analyses 1, 2 – (Dana et al., 1951); 3, 4 – (Chvileva et al., 1988).

щихся химических анализов. Химический состав ленгенбахита из рудника Ленгенбах нами заимствован из двух источников (табл. 3). Сопоставление результатов исследований показывает, что минерал Кочковского месторождения характеризуется пониженным содержанием Cu и повышенными – Ag. Предположение, что это может быть связано с близостью зерен серебросодержащего теннантита для ленгенбахита из первого сростка опровергается еще более низкими содержаниями Cu в составе ленгенбахита из второго сростка, где блеклая руда отсутствует.

По данным (Moëlo et al., 2008) в ленгенбахите существует ограниченный изоморфизм между Cu и Ag, и для теоретического состава ленгенбахита сумма коэффициентов этих элементов составляет

6.0. Для минерала из рудника Ленгенбах она близка и составляет 5.97 и 5.98 (ан. 1, 2, табл. 3). Для минерала из Кочковского месторождения эта сумма варьирует от 5.57 до 6.86, составляя, в среднем, 6.13 и 6.02 для зерен из первого и второго сростков, соответственно. Пониженные содержания Cu компенсируются повышенными содержаниями Ag по сравнению с теоретическим составом. Этот факт подтверждает наличие изоморфизма между Cu и Ag в составе ленгенбахита, причем, степень изоморфных замещений между Cu и Ag в сульфосолях определяется, главным образом, их координационным числом (Поваренных, 1967). Поскольку окончательно структура ленгенбахита не расшифрована и позиция Cu и Ag в этой структуре до конца неясна, нет ясности в определении их координаци-

онных чисел и соответственно нет возможности окончательно установить предел их изоморфизма. В любом случае, он будет ограниченный вследствие большой разницы межатомных расстояний (Поваренных, 1967).

Обращает на себя внимание нестабильность содержания и других компонентов минерала. Так, содержание Рb в ленгенбахите из рудника Ленгенбах в пересчете на 75 ф.е. либо завышено, либо занижено по сравнению с теоретическим (Чвилёва и др., 1988) (табл. 3). Еще более завышены содержания Рb (до 19.66 ф.е.) (по данным ЭДС анализа) в составах ленгенбахита из первого сростка Кочковского месторождения (см. табл. 1). Содержания Рb в ленгенбахите из второго сростка также завышены по сравнению с теоретическим содержанием и первоисточником. С другой стороны, содержания As в ленгенбахите из второго сростка ниже таковых в ленгенбахите из первого сростка, и, как следствие, сумма формульных коэффициентов As и Рb во втором сростке близка аналогичной сумме в ленгенбахите из рудника Ленгенбах. Тем самым подтверждается предположение, что между Рb и As в составе ленгенбахита возможно изоморфное замещение. Таким образом, разница содержаний составных элементов ленгенбахита связана, скорее всего, не столько с ошибками анализов, сколько с нестехиометрией самого минерала.

Выводы

В рудах Кочковского золоторудного месторождения (Забайкальский край) обнаружена крайне редкая свинцово-мышьяковая сульфосоли – ленгенбахит. Химический состав обнаруженного минерала с учетом его нестехиометричности хорошо согласуется с составом ленгенбахита из места первоначальной находки (рудник Ленгенбах, Швейцария).

Авторы благодарят сотрудников Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) Н.С. Карманова и В.Н. Королюка за выполненные анализы состава минералов. Выражаем признательность рецензентам за конструктивные предложения, реализация которых позволила улучшить статью.

Литература

- Бетехтин А.Г.** (1950) Минералогия. М, ГИГЛ. 956 с.
- Дэна Дж.Д., Дэна Э.С., Пэлач Ч., Берман Г., Фрондель К.** (1951) Система минералогии. 1(1). Элементы, сульфиды, сульфосоли. М., ИЛ, 608 с.
- Касаткин А.В., Клопотов К.И., Плашил Я.** (2014) Гипергенные минералы Шерловой Горы. *Минералогический альманах*, 19(2), 94–137.
- Костов И.** (1971) Минералогия. М., Мир, 584с.
- Минералы. Справочник (1960), 1, М., АН СССР, 617 с.
- Поваренных А.С.** (1967) Основные черты кристаллохимии меди и серебра. *Проблемы кристаллохимии и минералов эндогенного минералообразования*. М., Наука, 77–95.
- Рамдор П.** (1962) Рудные минералы и их сростания. М., ИЛ, 1132 с.
- Чвилёва Т.Н., Безмертная М.С., Спиридонов Э.М. и др.** (1988) Справочник-определитель рудных минералов в отраженном свете. М., Недра, 504 с.
- Шведов Г.И., Перфилова О.Ю., Карнаухова О.М., Мавринская С.А.** (2018) Гидротермалиты и минералогия руд месторождения Кочковское как индикатор условий золотооруденения. *Геодинамика и минерагения Северной и Центральной Азии*. Улан-Удэ, БГУ, 401–403.
- Hutchinson A.** (1906) The chemical composition of lengenbachite. *Mineralogical Magazine*, 14, 204–206.
- Makovicky E., Leonardsen E., Moëlo Y.** (1994) The crystallography of lengenbachite, a mineral with the non-commensurate layer structure. *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Abhandlungen*, 2, 169–191.
- Moëlo Y., Makovicky E., Mozgova N., Jambor J.L., Cook N., Pring A., Paar W., Nickel E.H., Graeser S., Karup-Møller S., Balic-Žunic T., Mumme W.G., Vurro F., Topa D., Bindi L., Bente K., Shimizu M.** (2008) Sulfosalt systematic: a review. Report of the sulfosalt subcommittee of the IMA Commission on Ore Mineralogy. *European Journal Mineralogy*, 20, 7–46.
- Murowchick J.B.** (1992) Marcasite inversion and the petrographic determination of pyrite ancestry. *Economic Geology*, 87, 1141–1152.
- Nuffield E.W.** (1944) Studies of mineral sulphosalts: IX. Lengenbachite. *Transactions of the Royal Society of Canada III. Series* 38, 59–64.
- Ridland G.C.** (1941) Mineralogy of the Negus and Con mines, Yellowknife, Northwest Territories. *Economic Geology*, 36, 45–70.
- Solly R.H.** (1905) Some new minerals from the Binenthal, Switzerland. *Mineralogical Magazine*, 14, 72–82.
- Williams T.B., Pring A.** (1988) Structure of lengenbachite: A high-resolution transmission electron microscope study. *American Mineralogist*, 73, 1426–1433.

References

- Betekhtin A.G.** (1950) [Mineralogy]. Moscow, GIGL, 956 p. (in Russian)
- Chvileva T.N., Bezsmertnaya M.S., Spiridonov E.M. et al.** (1988). [A guide-book for ore minerals in reflected light]. Moscow, Nedra, 504 p. (in Russian).
- Dana J.D., Dana E.S., Palache C., Berman H., Frondel C.** (1951) [The system of mineralogy, 1(1), elements, sulfides, sulfosalts]. Moscow, IL, 608 p. (in Russian).
- Hutchinson A.** (1906) The chemical composition of lengenbachite. *Mineralogical Magazine*, **14**, 204–206.
- Kasatkin A.V., Klopotov K.I., Plashil Ya.** (2014) [Supergene minerals of Sherlovaya Mountain]. [*Mineralogicheskiy almanah*], [Mineralogical almanac]. **19**(2), 94–137. (in Russian).
- Kostov I.** (1971) [Mineralogy]. Moscow, Mir, 584 p. (in Russian).
- Makovicky E., Leonardsen E., Moëlo Y.** (1994) The crystallography of lengenbachite, a mineral with the non-commensurate layer structure. *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Abhandlungen*, **2**, 169–191.
- Minerals. Guide-book (1960), **1**, Moscow, AN SSSR, 617 p. (in Russian)
- Moëlo Y., Makovicky E., Mozgova N. Jambor J.L., Cook N., Pring A., Paar W., Nickel E.H., Graeser S., Karup-Møller S., Balic-Žunic T., Mumme W.G., Vurro F., Topa D., Bindi L., Bente K., Shimizu M.** (2008) Sulfosalt systematic: a review. Report of the sulfosalt subcommittee of the IMA Commission on Ore Mineralogy. *European Journal Mineralogy*, **20**, 7–46.
- Murowchick J.B.** (1992) Marcasite inversion and the petrographic determination of pyrite ancestry. *Economic Geology*, **87**, 1141–1152.
- Nuffield E.W.** (1944) Studies of mineral sulphosalts: IX. Lengenbachite. *Transactions of the Royal Society of Canada III. Series* **38**, 59–64.
- Povarennykh A.S.** (1967) [Main features of crystal chemistry of copper and silver]. *Problemy kristallogimii i mineralov endogennogo mineraloobrazovaniya [Problems of crystal chemistry and minerals of endogenic mineral formation]*. Moscow, Nauka, 77–95 (in Russian).
- Ramdohr P.** (1962) [Ore minerals and their aggregates]. Moscow, IL, 1132 p. (in Russian).
- Shvedov G.I., Perfilova O.Yu., Karnaukhova O.M., Mavrinskaya S.A.** (2018) [Hydrothermalites and mineralogy of ores from the Kochkovskoe deposit as an indicator of formation conditions of gold mineralization]. *Geodinamika i minerageniya Severnoi i Tsentral'noi Azii [Geodynamics and minerageny of North and Central Asia]*. Ulan-Ude, Buryat State University, 401–403 (in Russian).
- Solly R.H.** (1905) Some new minerals from the Bin-nenthal, Switzerland. *Mineralogical Magazine*, **14**, 72–82.
- Ridland G.C.** (1941) Mineralogy of the Negus and Con mines, Yellowknife, Northwest Territories. *Economic Geology*, **36**, 45–70.
- Williams T.B., Pring A.** (1988) Structure of lengenbachite: A high-resolution transmission electron microscope study. *American Mineralogist*, **73**, 1426–1433.

Статья поступила в редакцию 6 ноября 2019 года