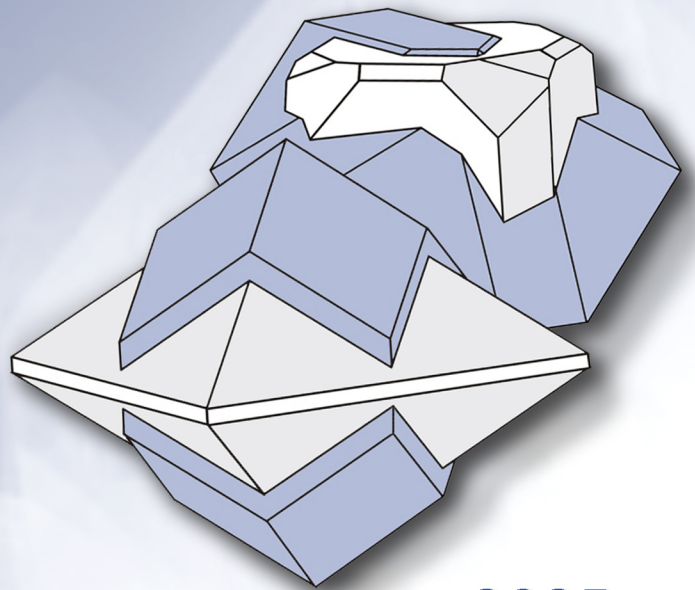


ISSN 2313-545X (print)
ISSN 2782-2044 (online)

МИНЕРАЛОГИЯ MINERALOGY

Том 11 № 2



2025

ISSN 2313-545X (print)
ISSN 2782-2044 (online)

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии
Уральского отделения Российской академии наук

МИНЕРАЛОГИЯ

Том 11 № 2 2025 г. Июнь

Основан в 2014 г.
Выходит 4 раза в год

South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology,
Urals Branch, Russian Academy of Sciences

MINERALOGY

Volume 11 No 2 2025 June
Founded 2014
Issued 4 times a year

МИНЕРАЛОГИЯ, 2025. Том 11. № 2

Международный научный рецензируемый журнал открытого доступа. Выходит 4 раза в год. Основан в 2014 г.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии Уральского отделения Российской академии наук

Тематика журнала «Минералогия» охватывает широкий спектр направлений минералогии, включая глобальную и региональную минералогия и минерогению, минералогия полезных ископаемых, технологическую минералогия, онтогению минералов и топоминералогия, эко- и биоминералогия и археологическую минералогия. Главной особенностью журнала является тесная связь результатов минералогических исследований с приоритетным направлением развития науки в РФ: «Рациональное природопользование».

Главный редактор:

В.В. Масленников, член-корр. РАН, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс, Россия

Зам. главного редактора:

Е.В. Белогуб, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс, Россия

Редакционная коллегия:

А.М. Асхабов, ИГ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар, Россия); А.И. Брусницын, СПбГУ (г. Санкт-Петербург, Россия); И.О. Галускина, Силезский университет (г. Катовице, Польша); Ю.Л. Войтеховский, РГПУ им. А.И. Герцена (г. Санкт-Петербург, Россия); С.Л. Вотяков, ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия); В.Г. Кривовичев, СПбГУ (г. Санкт-Петербург, Россия); Е.П. Макагонов, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс, Россия); И.Ю. Мелекесцева, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс, Россия); В.В. Мурзин, ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия); П. Нимис, Университет г. Падуи (г. Падуа, Италия); Л.А. Паутов, Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН (г. Москва, Россия); И.В. Пеков, МГУ (г. Москва, Россия); Э.В. Сокол, ИГМ СО РАН (г. Новосибирск, Россия); С.Ю. Степанов, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс, Россия); С.Г. Тесалина, Кертин Университет (г. Перт, Австралия); Р. Херрингтон, Музей естественной истории (г. Лондон, Великобритания); В.Н. Удачин, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс, Россия); М.А. Юдовская, ИГЕМ РАН (г. Москва, Россия), Университет Витватерсранда (г. Йоханнесбург, ЮАР).

Адрес издателя и редакции: Россия 456137, г. Миасс, Челябинская обл., тер. Ильменский заповедник, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН

Тел.: +7(3513)29-80-98

E-mail: journal-mineralogy@yandex.ru; *сайт:* www.journal.mineralogy.ru

© ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН

© Авторы статей

MINERALOGY 2025. VOL. 11. NO. 2

International scientific peer-reviewed open-access journal. Issued 4 times per year. Founded in 2014.

Founder: South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology, Urals Branch, Russian Academy of Sciences

Mineralogy covers a wide spectrum of the mineralogical sciences including global and regional mineralogy and minerageny, mineralogy of mineral deposits, technological mineralogy, ontogenesis of minerals and topomineralogy, eco- and biomineralogy, and archaeological mineralogy. The main feature of the Journal is the close relationship of the results of mineralogical studies with the priority area for the development of science in the Russian Federation: "Rational environmental management".

Editor-in-Chief:

Valery Maslennikov, SU FRC MG UB RAS, Miass, Russia

Co-Editor:

Elena Belogub, SU FRC MG UB RAS, Miass, Russia

Editorial Board:

Askhab Askhabov (Institute of Geology KSC RAS, Syktывkar, Russia); Aleksey Brusnitsyn (St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia); Irina Galuskina (University of Silesia, Sosnowiec, Poland); Richard Herrington (Natural History Museum, London, UK); Vladimir Krivovichev (St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia); Evgeny Makagonov (Ilmeny State Reserve SU FRC MG UB RAS, Miass, Russia); Irina Melekestseva (SU FRC MG UB RAS, Miass, Russia); Valery Murzin (Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia); Paolo Nimis (University of Padova, Padova, Italy); Leonid Pautov (Fersman Mineralogical Museum RAS, Moscow, Russia); Igor Pekov (Moscow State University, Moscow, Russia); Ellina Sokol (Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk); Sergey Stepanov (SU FRC MG UB RAS, Miass, Russia); Svetlana Tessalina (Curtin University, Perth, Australia); Valery Udachin (SU FRC MG UB RAS, Miass, Russia); Yuri Voytekhovsky (Russian State Pedagogical University, St. Petersburg, Russia); Sergey Votyakov (Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia); Marina Yudovskaya (IGEM RAS, Moscow, Russia; University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa).

Contacts: Ilmeny State Reserve, Miass, Chelyabinsk district, 456137 Russia, SU FRC MG UB RAS

Тел.: +7(3513)29-80-98

E-mail: journal-mineralogy@yandex.ru; *web-site:* www.journal.mineralogy.ru

СОДЕРЖАНИЕ

11(2), 2025

МИНЕРАЛЫ И МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ

КОКЦИНИТ HgI_2 ИЗ ГОРЯЩЕГО ОТВАЛА УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ «АЛМАЗНАЯ» (ВОСТОЧНЫЙ ДОНБАСС): ПЕРВАЯ НАХОДКА В РОССИИ <i>А.В. Касаткин, И.В. Пеков, О.В. Трофимов, А.А. Агаханов, М.Д. Мильшина, С.Н. Бритвин</i>	5
О СОСТАВЕ КАССИТЕРИТА И ВОЛЬФРАМИТА В РУДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА <i>В.И. Попова, В.А. Попов, И.А. Блинов</i>	22
СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) В РУДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА КОПЫЛОВСКОЕ, КАВКАЗ И КРАСНОЕ (БОДАЙБИНСКИЙ РАЙОН) <i>Е.Е. Паленова, С.А. Садыков</i>	47
ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ В ГРАНИТАХ ЮЖНО- СУХТЕЛИНСКОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ЗОЛОТА (ЮЖНЫЙ УРАЛ) <i>С.И. Брюхов, Д.А. Артемьев, И.А. Блинов, Н.Р. Аюпова, А.С. Целуйко</i>	47

CONTENTS

11(2), 2025

MINERALS AND MINERAL ASSOCIATIONS

COCCINITE, HgI_2 , FROM A BURNING DUMP OF THE ALMAZNAYA COAL MINE
(EASTERN DONBAS): THE FIRST FIND IN RUSSIA

A.V. Kasatkin, I.V. Pekov, O.V. Trofimov,

A.A. Agakhanov, M.D. Milshina, S.N. Britvin..... 5

ABOUT THE COMPOSITION OF CASSITERITE AND WOLFRAMITE
IN ORES FROM THE FAR EAST DEPOSITS

V.I. Popova, V.A. Popov, I.A. Blinov..... 22

STABLE ISOTOPES ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) IN ORES FROM THE
KOPYLOVSKOE, KAVKAZ AND KRASNOE GOLD DEPOSITS (BODAIBO REGION)

E.E. Palenova, S.A. Sadykov..... 47

GOLD-SULFIDE MINERALIZATION OF QUARTZ VEINS IN GRANITES
OF THE SOUTH SUKHTELYA GOLD OCCURRENCE (SOUTH URALS)

S.I. Bryukhov, D.A. Artem'yev, I.A. Blinov, N.R. Ayupova, A.S. Tseluyko..... 47



УДК 549.453 (470.61)

<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-2-1>

КОКЦИНИТ HgI_2 ИЗ ГОРЯЩЕГО ОТВАЛА УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ «АЛМАЗНАЯ» (ВОСТОЧНЫЙ ДОНБАСС): ПЕРВАЯ НАХОДКА В РОССИИ

А.В. Касаткин¹, И.В. Пеков², О.В. Трофимов³,
А.А. Агаханов¹, М.Д. Мильшина⁴, С.Н. Бритвин⁵

¹Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, г. Москва, Ленинский пр-т, 18–2,
119071 Россия; anatoly.kasatkin@gmail.com

²Московский государственный университет, г. Москва, Ленинские горы 1, 119991 Россия

³г. Ростов-на-Дону, пр-т 40-летия Победы 63/17с8–91, 344072 Россия

⁴г. Москва, Рязанский пр-т 97, 109542 Россия

⁵Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

Статья поступила в редакцию 03.02.2025 г., после доработки 11.02.2024 г., принята к печати 14.04.2025 г.

Аннотация. В горящем отвале угольной шахты «Алмазная» (близ г. Гуково, Ростовская обл.) обнаружен чрезвычайно редкий иодид ртути кокцинит HgI_2 . Он образует ярко-красные таблитчатые и короткопризматические кристаллы с алмазным блеском до 0.5 мм на корке самородной серы в трещинах горелой породы. Находка кокцинита является первой на территории Российской Федерации. Коэффициенты отражения кокцинита и его количественный химический анализ опубликованы впервые. Химический состав минерала (мас. %, среднее значение по пяти анализам, электронно-зондовые данные): Hg 45.15, Cl 0.11, Br 0.65, I 53.91, сумма 99.82. Состав отвечает эмпирической формуле, рассчитанной на сумму атомов, равную трем: $\text{Hg}_{1.02}\text{I}_{1.93}\text{Br}_{0.04}\text{Cl}_{0.01}$. Главные линии порошковой рентгенограммы [$d, \text{\AA}(l)$ (hkl)]: 6.220(29)(002), 4.122(82)(101), 3.575(100)(102), 3.008(37)(103), 2.767(35)(112), 2.189(98)(114, 200). Рассчитанные по порошкограмме параметры тетрагональной элементарной ячейки: $a = 4.3744(2)$, $c = 12.4301(7) \text{\AA}$, $V = 237.86(2) \text{\AA}^3$. Кокцинит является продуктом десублимации из газов, образовавшихся при горении углеродсодержащих пород внутренней части отвала.

Ключевые слова: кокцинит, иодид ртути, первая находка в России, горящий отвал, угольная шахта «Алмазная», Восточный Донбасс.

Финансирование. Рентгенографическое исследование выполнено в ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Санкт-Петербургского государственного университета (г. Санкт-Петербург) в рамках государственного задания № АААА-А19-119091190094.

Благодарности. Авторы признательны М.М. Битману, А.И. Тищенко и Н.В. Чуканову за помощь в поиске литературных источников и обсуждение материала. Авторы также благодарят рецензента за конструктивные замечания, которые помогли улучшить статью.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. А.В. Касаткин – разработка концепции, оптико-микроскопические исследования, химические анализы, написание рукописи; И.В. Пеков – рентгеновский анализ, СЭМ-фото, написание рукописи; О.В. Трофимов – полевые работы, поиск литературных источников, написание рукописи; А.А. Агаханов – аналитические работы; М.Д. Мильшина – поиск литературных источников, оформление иллюстраций; С.Н. Бритвин – рентгенография. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Касаткин А.В., Пеков И.В., Трофимов О.В., Агаханов А.А., Мильшина М.Д., Бритвин С.Н. Кокцинит из горелого отвала угольной шахты «Алмазная» (Восточный Донбасс): первая находка в России. Минералогия, 2025, 11(2), 5–21. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-2-1

COCCINITE, HgI_2 , FROM A BURNING DUMP OF THE ALMAZNAYA COAL MINE (EASTERN DONBAS): THE FIRST FIND IN RUSSIA

A.V. Kasatkin¹, I.V. Pekov², O.V. Trofimov³,
 A.A. Agakhanov¹, M.D. Milshina⁴, S.N. Britvin⁵

¹Fersman Mineralogical Museum RAS, Leninskiy pr., 18–2, Moscow, 119071 Russia;
 anatoly.kasatkin@gmail.com

²Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia

³Prospekt 40 letiya Pobedy 63/17c8–91, Rostov-on-Don, 344072 Russia

⁴Ryazanskiy pr., 97, Moscow, 109542 Russia

⁵St. Petersburg State University, Unibersitetskaya nab. 7/9, 199034, St. Petersburg, Russia

Received 03.02.2025, revised 11.02.2025, accepted 14.04.2025

Abstract. An extremely rare mercury iodide coccinite, HgI_2 , was found in a burning dump of the Almaznaya coal mine (near the settlement of Gukovo, Rostov oblast, Russia). It forms bright red tabular and short-prismatic crystals with adamantine luster up to 0.5 mm in size on a crust of native sulfur, which fills the fractures in the burnt rock. This is the first find of coccinite in the Russian Federation. The reflectance values and quantitative chemical analysis of coccinite are published for the first time. The chemical composition of the mineral is as follows (wt. %, mean of five analyses, electron microprobe): Hg 45.15, Cl 0.11, Br 0.65, I 53.91, total 99.82. The empirical formula calculated based on sum of three atoms is $\text{Hg}_{1.02}\text{I}_{1.93}\text{Br}_{0.04}\text{Cl}_{0.01}$. The strongest reflections of the powder X-ray diffraction diagram are [$d, \text{\AA}(hkl)$]: 6.220(29)(002), 4.122(82)(101), 3.575(100)(102), 3.008(37)(103), 2.767(35)(112), 2.189(98)(114, 200). The parameters of the tetragonal unit cell calculated from the powder data are as follows: $a = 4.3744(2)$, $c = 12.4301(7)$ $\text{\AA}$, $V = 237.86(2)$ $\text{\AA}^3$. Coccinite crystallized from hot gases after the combustion of coal-bearing rocks in the inner part of the dump.

Keywords: coccinite, mercury iodide, first find in Russia, burning dump, Almaznaya coal mine, Eastern Donbass.

Funding. The X-ray diffraction study was carried out in the Research Centre for X-ray Diffraction Studies of the St. Petersburg State University (St. Petersburg) in accordance with state contract no. AAAA-A19-119091190094.

Acknowledgements. We are grateful to Mikhail M. Bitman, Alexander I. Tishchenko and Nikita V. Chukanov for the help with literature and discussion. The authors are also thankful to an anonymous reviewer for constructive comments.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Author contribution. A.V. Kasatkin – conceptualization, physical properties, optical data, chemical analyses, writing of the manuscript; I.V. Pekov – X-ray data, SEM photo, writing of the manuscript; O.V. Trofimov – field works, literature data, writing of the manuscript; A.A. Agakhanov – analytical works; M.D. Milshina – literature data, preparation of figures; S.N. Britvin – X-ray diffraction study. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Kasatkin A.V., Pekov I.V., Trofimov O.V., Agakhanov A.A., Milshina M.D., Britvin S.N. Coccinite from the burning dump of Almaznaya coal mine (Eastern Donbass) – the first find in Russia. Mineralogy, 2025, 11(1), 5–21. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-2-1

ВВЕДЕНИЕ

Соединения ртути и иода чрезвычайно редки в природе, хотя и не малочисленны. На сегодняшний день известно десять минералов, в которых оба элемента являются видообразующими или присутствуют в виде примесей. Половина из них – эндемики американских объектов. Ауривиллиусит $\text{Hg}^{1+}\text{Hg}^{2+}\text{OI}$ (Roberts et al., 2004), васильевит $(\text{Hg}_2)^{2+}_{10}\text{O}_6\text{I}_3\text{Br}_2\text{Cl}(\text{CO}_3)$ (Roberts et al., 2003), гейлданнингит $\text{Hg}^{2+}_3[\text{NHg}^{2+}_2]_{18}(\text{Cl}, \text{I})_{24}$ (Cooper et al., 2019) и тедхадлейит $\text{Hg}^{2+}\text{Hg}^{1+}_{10}\text{O}_4\text{I}_2(\text{Cl}, \text{Br})_2$ (Roberts et al., 2002) найдены только в небольшом ртутном

рудопроявлении Клир Крик (Clear Creek claim) в Калифорнии, а радткеит $\text{Hg}_3\text{S}_2\text{ClI}$ (McCormack et al., 1991) – на руднике МакДермитт (McDermitt Mine) в Неваде. Остальные минералы, содержащие одновременно ртуть и иод, известны в России. Гречищевит $\text{Hg}_3\text{S}_2\text{BrCl}_{0.5}\text{I}_{0.5}$ открыт в зоне окисления Hg рудопроявлений Арзак и Кадырэль в Туве (Васильев и др., 1989). Два минерала, описанные впервые из Германии – мошелит Hg_2I_2 (Krupp et al., 1989) и ханауэрит AgHgSI (Pekov et al., 2023), впоследствии отмечались и в российских объектах: первый – на Хаак-Саирском золоторудном месторождении в Туве (Кужугет, 2014), а второй – в зоне окисления Бурановского месторождения и

в Крестовоздвиженском руднике на Южном Урале (Касаткин и др., 2022). В карьере № 3 Гайского медноколчеданного месторождения на Южном Урале в начале 1990-х гг. О.В. Трофимовым найден минерал, инструментально диагностированный как перрудит $\text{Ag}_4\text{Hg}_5\text{S}_5(\text{I},\text{Br})_2\text{Cl}_2$ (В.Ю. Карпенко, персональное сообщение). Кроме исключительной редкости (большинство из них найдены в единичных образцах), все названные минералы объединяет очень мелкий размер агрегатов.

Все это в полной мере относится и к кокциниту – иодиду двухвалентной ртути с формулой HgI_2 , о котором пойдет речь в данной статье. Отметим, что в химии синтетических веществ хорошо известны и изучены, в том числе структурно, три модификации HgI_2 , отличающиеся цветом кристаллов – красная, желтая и оранжевая. Первая (α -модификация) устойчива при комнатной температуре и кристаллизуется в тетрагональной сингонии. Две других модификации метастабильны и за короткое время превращаются в красную, в том числе при механическом воздействии, например, при надавливании стальной иглой. Желтая β -модификация высокотемпературная, она кристаллизуется в ромбической сингонии выше 127°C . Оранжевая модификация существует ниже 127°C ; она имеет тетрагональную элементарную ячейку, с удвоенными по сравнению с красной модификацией параметрами (Jeffrey, Vlasse, 1967; Schwarzenbach, 1969; Gumiński, 1997; Hostettler et al., 2002; Hostettler, Schwarzenbach, 2005; Акорьян et al., 2007 и ссылки в этих статьях). Кокцинит является природным аналогом красной α -модификации (Bijvoet et al., 1926; Witzke, 1997; Hicks et al., 2019), тогда как две другие в природе пока не обнаружены, что, видимо, связано с их неустойчивостью.

ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ И ИЗУЧЕНИЯ КОКЦИНИТА И ОБЗОР ЕГО НАХОДОК

История открытия кокцинита довольно запутанная, и разные литературные источники содержат немало противоречивой информации. Первое упоминание об этом минерале датируется 1829 г., когда во французском сборнике «Анналы горного дела» было опубликовано краткое сообщение о находке в Мексике иодида серебра (“*iodure de mercure*”), похожего на киноварь, но имеющего более темный цвет (Annales..., 1829) испанским минералогом и химиком Мануэлем Дель Рио. В «Трудах Французской Академии Наук» за 1836 г. сообщалось, что в

образцах с селенидами ртути, переданными в Горную школу Мехико Хосе Касасом Вьехасом (*Jose Casas Viejas*), М. Дель Рио обнаружил налеты коричнево-красного цвета, подверг их испытанию методом паяльной трубки и пришел к выводу, что по химическому составу они соответствуют иодиду ртути (Comptes rendus..., 1836). Через три года в британской энциклопедии «Пенни», публикуемой «Обществом распространения полезных знаний», в очерке о ртути говорилось о иодиде ртути лимонно-желтого цвета «из пестрых известняков Касас Вьехас в Мексике» (The Penny Cyclopaedia..., 1839). Таким образом, информация о цвете минерала оказалась искажена, а человек по имени Хосе Касас Вьехас, передавший в Горную школу Мехико образцы, «превратился» в географический объект. Эти сведения, однако, и позже воспроизводились в минералогической литературе (например, Domeyko, 1844).

Название «кокцинит» применительно к иодистой ртути (“*Jodquecksilber*”), изученной М. Дель Рио, впервые встречается в справочнике В.К. фон Гайдингера (Haidinger, 1845). По мнению современных авторов (например, Witzke, 1997; Кривовичев, 2021), В.К. фон Гайдингер назвал так минерал за его цвет – от греческого слова κόκκινος (ярко-красный). Впрочем, у В.К. фон Гайдингера об этом ничего не сказано, но отмечается, что кокцинит «похож на киноварь». Исправив ошибку составителей британской энциклопедии в отношении цвета минерала, В.К. фон Гайдингер, однако, не исправил название места его первой находки и также указал Касас Вьехас, Мексика. К сожалению, это заблуждение перекечевало впоследствии в справочную минералогическую литературу, и «Касас Вьехас» зачастую до сих пор приводится как место первой находки (*type locality*) кокцинита, причем характеризуется как «неустановленное место» (*unidentified locality*) в Мексике. В официальном списке минералов Международной Минералогической Ассоциации (ММА) со ссылкой на справочник В.К. фон Гайдингера указано, что кокцинит открыт в Мексике и описан в 1845 г. (The New IMA List of Minerals, <http://cnmnc.units.it/>).

В 1860–1870-х гг. в разных источниках появилась информация о том, что профессор Горной школы Мехико дон Антонио дель Кастильо снова изучил химический состав образцов М. Дель Рио и пришел к заключению, что иода в них нет, а на самом деле это загрязненный примесями хлорид ртути (Burkart, 1866; Websky, 1877). Таким обра-

зом, само существование кокцинита как минерала в мексиканских образцах, изучавшихся М. Дель Рио, было в тот период опровергнуто.

В начале XX в. появилась информация о находках кокцинита в зоне техногенеза на месторождении Брокен Хилл в Австралии. Этот минерал охарактеризован без диагностической информации как продукт десублимации из газов, образовавшихся в результате пожара на нижних горизонтах карьера Блока 11 (Carne, 1900). Годом позже А. Мозес описал иодид ртути, предположительно из жилы Консолс (*Consols lode*) на месторождении Брокен Хилл (Minerals..., 1999), в виде ярко-красных кубических и кубооктаэдрических кристаллов размером до 0.1 мм, слагающих корки на лимоните. Микрохимические тесты Беренса на ртуть и иод дали положительный результат, и, кроме того, поведение минерала при нагревании на стеклянной пластине и в закрытой трубке оказалось аналогичным поведению синтетического иодида ртути. В отличие от описанных ранее минералов ртути, этот минерал оказался нечувствительным к свету, и за год наблюдений его цвет не претерпел видимых изменений. Однако с учетом уже имевшейся информации о том, что в «кокцините» М. Дель Рио из Мексики иод обнаружен не был, А. Мозес пришел к заключению, что название «кокцинит» вряд ли применимо к изученным им кристаллам (Moses, 1901). В работе (Smith, 1926) предполагалось, что кокцинит входит в состав темно-красных и оранжево-красных агрегатов и налетов на белом каолините в образцах из рудника Пропрайтери (*Proprietary Mine*) также на месторождении Брокен Хилл, однако дальнейшие исследования показали, что они сложены другим Hg-I-содержащим минералом перрудитом (Sarp et al., 1987; Minerals..., 1999).

Сообщение о находке «редкого красновато-коричневого иодида кокцинита» в ассоциации с антимонитом из каньона Сан Эмигдио (*San Emigdio Canyon*) в округе Керн (Калифорния, США) было охарактеризовано как недостоверное (Eakle, 1914).

Таким образом, к середине XX в. сложилась парадоксальная ситуация, когда у минерала на протяжении более чем века есть название, а самого минерала вроде бы и нет. По этому поводу в справочнике «Система минералогии» указывалось, что «название *кокцинит* принято как резервное для иодистой ртути, которая отмечалась, но еще не определена с достоверностью в природе» (Дэна и др., 1953).

Первая достоверная находка кокцинита описана в Украинских Карпатах, в бассейне р. Уж вблизи с. Ставное Ужгородского района Закарпатской области (Маничев и др., 1979). Минерал приурочен к зеленовато-серым тонкоплитчатым алевролитам, аргиллитам и мелкозернистым песчаникам. Кокцинит образует микропрожилки, тонкие примазки и пленки по плоскостям трещин, а в пустотах – дипирамидальные и таблитчатые кристаллики и их сростки размером 0.02–0.10 мм, а также кристаллические и землистые агрегаты извилистой формы. Он тесно ассоциирует с хрупкими смолисто-черными битумами, а в протолочках с кокцинитом также выявлены галенит, сфалерит и пирит. Цвет кокцинита оранжево-красный, в тонких сколах – розовато-оранжевый, черта красно-оранжевая, блеск жирный. Минерал непрозрачный, но просвечивает в тонких сколах. При нагревании легко испаряется. Диагностика кокцинита подтверждена положительными микрохимическими тестами на ртуть и иод, а также рентгеновским анализом: на порошкограмме фиксируются почти все основные линии, присущие синтетической тетрагональной α -модификации HgI_2 . По мнению авторов этой работы, кокцинит образовался на наиболее поздней стадии гидротермальной деятельности, чему способствовали ртутная специализация растворов и иодсодержащие воды.

Подтвержденный рентгенометрически кокцинит был также описан на юге Украины, в мощной толще платформенных карбонатно-хемогенных и терригенно-карбонатных пород Преддобруджского краевого прогиба, в разрезе, вскрытом скважиной, на глубине 600 м (Кузнецов и др., 1987). К сожалению, подробный географический адрес места находки в данной статье отсутствует. Выделения кокцинита приурочены к контакту грубозернистых песчаников с конгломератами, в которых галька представлена кварцем, кварцитом и кремнем, а цемент – глинисто-песчанистым веществом. Кокцинит наблюдается в виде таблитчатых полупрозрачных кристаллов размером 0.05–0.25 мм или пленок оранжевого, реже розовато-оранжевого цвета. Встречается чаще в сростании с зернами кварца, реже – с диккитом и пиритом. По генезису этот минерал аналогичен кокциниту из Карпат.

Микрохимический анализ оранжево-красных агрегатов и мелких кристаллов в образце из отвалов ртутного месторождения Бакофен (*Backofen*) в Мошелландсберге (Пфальц, Германия), показал их соответствие фазе HgI_2 (Nottes, Heidtke, 1986), од-

нако рентгенометрически этот материал не изучался, поэтому его принадлежность к кокциниту или другой модификации иодида двухвалентной ртути осталась невыясненной. Интересно, что эта фаза была найдена в ассоциации с другим иодидом ртути Hg_2I_2 , позднее описанным как мошелит, однако в первом описании мошелита упоминание о ней отсутствует (Krupp et al., 1989).

Достоверный кокцинит в Германии был установлен Т. Витцке в зоне техногенеза на отрабатанном урановом разрезе Лихтенберг (*Lichtenberg open cast*), относящемся к рудному полю Роннебург в Тюрингии (Witzke, 1997). Минерал представлен несовершенными кристаллами до 1 мм, развивающимися на кристаллах самородной серы в ассоциации с селеном, селенистым розицкитом и гипсом. Кокцинит имеет темно-красный цвет, красную черту, стеклянный блеск и совершенную спайность по {001}. В отличие от других галогенидов ртути он устойчив к воздействию света. В связи с неустойчивостью минерала под пучком электронного зонда он диагностирован по качественному химическому составу (с помощью СЭМ-ЭДС) и рентгенометрически. Все отражения на его дифрактограмме соответствуют синтетической тетрагональной фазе $\alpha\text{-HgI}_2$. Впервые для кокцинита приведены рассчитанные из порошкограммы параметры тетрагональной элементарной ячейки: $a = 4.376(4)$, $c = 12.41(1)$ Å, $V = 237.6(4)$ Å³. Здесь кокцинит является продуктом десублимации из газов, возникших в результате самовозгорания граптолитовых сланцев.

Таким образом, несмотря на то, что кокцинит формально известен почти два века, только три его находки – две на территории Украины и одну в Германии (разрез Лихтенберг) – можно признать достоверными. Указание на Мексику как на страну, где находится место первой находки минерала, скорее всего, является ошибочным. Что касается Австралии, то, оценивая описания того времени с позиций сегодняшних знаний о кокцините, мы не исключаем его нахождение в образцах из карьера Блока 11 и жилы Консолс, однако оно требует подтверждения более точными аналитическими методами.

В России, насколько это известно авторам, данный иодид не описывался. Нами кокцинит найден в горящем отвале шахты «Алмазная», разрабатывавшей угольные пласты в восточной части Донецкого угольного бассейна. Это первая находка кокцинита на территории Российской Федерации и, по всей видимости, четвертая его достоверная находка в мире.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕСТЕ НАХОДКИ

Шахта «Алмазная» расположена в 3.5 км юго-западнее г. Гуково и в 1 км севернее хутора Гуково на территории Красносулинского района Ростовской области (рис. 1а). Она была сдана в эксплуатацию в 1958 г. и входила (до 1971 г. как шахта № 25) в состав крупного производственного объединения «Гуковуголь», осуществлявшего добычу угля в восточной части Донецкого угольного бассейна. Производственная мощность шахты в начале эксплуатации составляла 600 тыс. т угля в год, а после реконструкции в 1970–1990-х гг. увеличилась до 1.2 млн т (Шахты..., 1965; Концепция..., 2012). В 2015 г. шахта была закрыта в связи с нерентабельностью, а через несколько лет ее стволы были разрушены.

В геологическом отношении Гуковский район расположен в пределах Северной (Колпаковской) антиклинали и северного крыла Садкинской котловины. Поле шахты «Алмазная» (4.1 км по простиранию и 2.1 км по падению) расположено на южном крыле этой антиклинали. Залегание пород здесь на большей части простое, с углами падения до 20°, осложненное двумя флексурными складками с углами падения 40–60° и рядом разрывных нарушений, в основном, надвигами широтного и меридионального направления с амплитудами 40–60 м (Шахты..., 1965). В геологическом строении района принимают участие отложения каменноугольного и неогенового возраста (рис. 1б). Первые сложены песчаниками, песчанистыми и глинистыми сланцами, известняками и антрацитами среднего и верхнего карбона. На большей части района они перекрыты толщей глин и песков верхнего плиоцена, и только на небольших площадях по долинам рек и балок породы карбона выходят на поверхность. На шахте «Алмазная» добывался антрацит.

Отвал шахты «Алмазная» расположен к северу от нее и имеет специфическую форму: он узкий и длинный, сильно вытянут с юга на север и доходит практически до южной оконечности г. Гуково (рис. 1б). Его приблизительные размеры $1.70 \times 0.02 \times 0.03$ км. По классификации Б.В. Чеснокова и Е.П. Щербаковой (1991), отвал шахты «Алмазная» следует отнести к плоским. Это единственный плоский отвал в данном районе Восточного Донбасса, все остальные отвалы угледобывающих предприятий представлены терриконами или имеют хребтовидную форму. Отвал шахты «Алмазная» сложен углисто-глинистыми породами отработанных

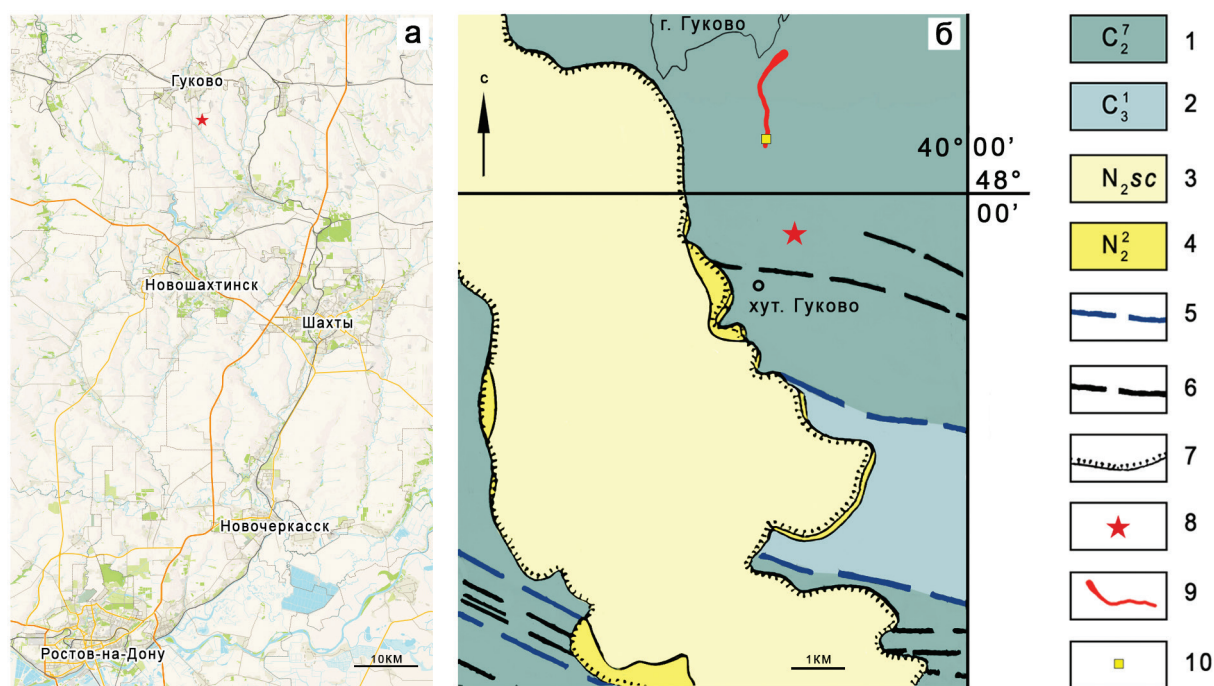


Рис. 1. Географическое положение угольной шахты «Алмазная» (а) и геологическая схема Гуковского района, с изменениями и упрощениями по (Геологическая..., 1956, 1958) (б).

1 – песчаники, сланцы, известняки и антрациты среднего карбона; 2 – песчаники, сланцы, известняки и антрациты верхнего карбона; 3 – красно-бурые, желто-бурые и серые скифские глины верхнего плиоцена; 4 – разномерные пески с прослоями глин верхнего плиоцена; 5 – известняки, разделяющие свиты карбона; 6 – выход антрацита на поверхность; 7 – границы несогласного залегания отложений; 8 – угольная шахта «Алмазная»; 9 – отвал шахты «Алмазная»; 10 – место находки кокцинита.

Fig. 1. Geographical location of the Almaznaya coal mine (a) and schematic geological map of the Gukovo district, modified and simplified after (Geological..., 1956, 1958) (b).

1 – Middle Carboniferous sandstone, shale, limestone, anthracite; 2 – Upper Carboniferous sandstone, shale, limestone, anthracite; 3 – Upper Pliocene red-brown, yellow-brown and gray Scythian clay; 4 – variously granular sand with Upper Pliocene clay beds; 5 – limestone separating Carboniferous formations; 6 – anthracite outcrops; 7 – boundaries of unconformable occurrence of sediments; 8 – Almaznaya coal mine; 9 – dump of the Almaznaya coal mine; 10 – site of coccinite sampling.

угленосных пластов. В отвале нередко встречается пирит, окисление которого приводит к возгоранию углесодержащей отвальной массы. Горение отвала началось до 2018 г. и наблюдается по настоящий день, хотя его интенсивность с каждым годом падает. По состоянию на конец 2024 г., поверхностное горение еще прослеживается на относительно небольшом ($\sim 200 \times 20$ м) участке плоской поверхности отвала вдоль его западного склона (рис. 2). На выходе горячих газов, в устьях псевдофумарол кристаллизуются обычные для таких систем минералы. Так, регулярные, начиная с 2018 г., посещения отвала одним из авторов (О.В. Трофимовым) дали несколько десятков коллекционных образцов серы, нашатыря, масканьита и алунита.

Кокцинит был отобран в октябре 2024 г. О.В. Трофимовым и ростовским коллекционером А.В. Албулом из трещины с корками серы, нашатыря и масканьита в месте выхода горячих газов на поверхность (рис. 3). GPS координаты места находки $48^{\circ}0'33.76''$ N и $39^{\circ}56'32.53''$ E (рис. 16).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кокцинит описан по результатам наблюдений под стереомикроскопом Zeiss Discovery V8. Микротвердость измерена методом микровдавливаний на приборе ПМТ-3 (аналитик А.А. Агаханов). Оптические свойства минерала исследованы с помощью поляризационных микроскопов ПОЛАР-3 и ПОЛАМ-215. Спектры отражения измерены в воз-



Рис. 2. Отвал угольной шахты «Алмазная».

Место отбора кокцинита помечено стрелкой. На заднем плане – дым в месте выхода газов от горения отвала. Поле зрения ~20 м. Октябрь 2024 г. Фото: О.В. Трофимов.

Fig. 2. Dump of the Almaznaya coal mine.

The site of coccinite sampling is shown by red arrow. Smoke against background is related to gas release from dump combustion. The field of view is ~20 m. October 2024. Photo: O.V. Trofimov.



Рис. 3. Корки самородной серы, нашатыря и масканиита в месте выхода газов горящего угольного отвала на поверхность.

Поле зрения 20 см. Октябрь 2024 г. Фото: А.В. Албул.

Fig. 3. Crusts of native sulfur, salammmoniac and mascagnite in area, where gases are released from the burning coal dump.

The field of view is ~20 cm. October 2024. Photo: A.V. Albul.

духе 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).

Микроморфология и химический состав изучались с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi FlexSEM 1000 с энергодисперсионным (ЭД) 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 металлическом кобальте (аналитик А.В. Касаткин). Определявшиеся элементы, аналитические рентгеновские

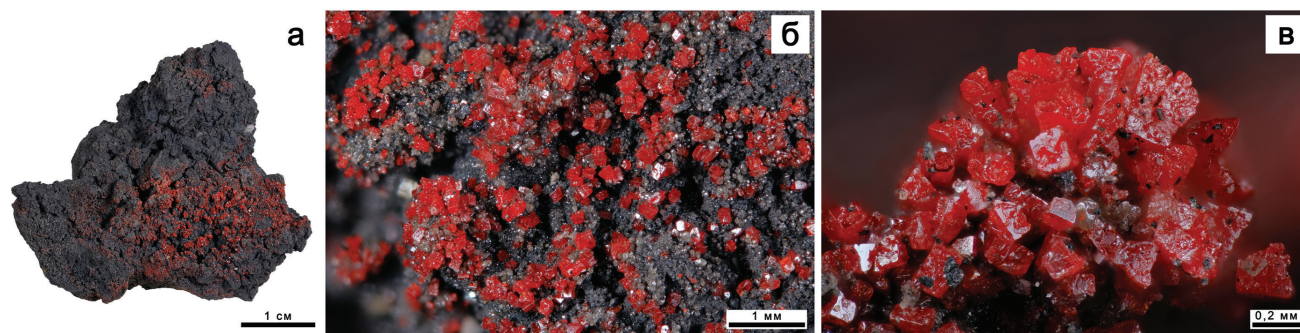


Рис. 4. Кристаллы кокцинита на самородной сере: а – общий вид образца; б, в – увеличенные фрагменты.

Фото: М.Д. Мильшина.

Fig. 4. Coccinite crystals on native sulfur: а – general view of the specimen; б, в – enlarged fragments.

Photo: M.D. Milshina.

линии и стандарты: $HgMa - HgTe$; $ClK\alpha - TiCl$; $BrLa - TiBr$; $IL\alpha - Ti$. Содержания остальных элементов с атомными номерами выше, чем у бериллия, оказались ниже пределов обнаружения ЭДС анализом.

Порошковая рентгенограмма получена на дифрактометре Rigaku R-AXIS Rapid II, оснащенном вращающимся анодом, в качестве источника микрофокусного рентгеновского излучения (40 кВ, 15 мА, $CoK\alpha$, $\lambda = 1.79021 \text{ \AA}$), конфокальной рентгеновской оптикой VariMax и полуцилиндрическим детектором отраженных рентгеновских лучей Image Plate (радиус 127.4 мм), с использованием геометрии Дебая-Шеррера (аналитики И.В. Пеков, С.Н. Бритвин). Угловое разрешение детектора составляет $0.045^\circ 2\theta$ (размер пикселя 0.1 мм). Дифракционные данные проинтегрированы в программном комплексе *Osc2Tab* (Бритвин и др., 2017).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Кокцинит найден в единственном образце размером $4.0 \times 3.5 \times 1.0 \text{ см}$ (рис. 4а). Он образует таблитчатые и короткопризматические кристаллы размером до 0.5 мм, в среднем, 0.1–0.2 мм, и их сростки до 2 мм на корке грубых изометричных кристаллов самородной серы до 0.7 мм, окрашенной в темно-серый, почти черный цвет включениями угольной пыли (рис. 4б, в). Также в образце присутствуют редкие пучки белых волокнистых кристаллов галотрихита длиной до 0.5 мм. Кристаллы кокцинита несовершенные, обладают неровной поверхностью. Рельеф поверхности обусловлен развивающимися на ней ступеньками роста и микроиндивидами скелетного строения, на некоторых кристаллах наблюдаются элементы многоглавого роста (рис. 4в, 5). Кристаллы образованы гранями

пинакоида $\{001\}$ и тетрагональной призмы, вероятно, $\{100\}$. На некоторых кристаллах наблюдаются другие слабо развитые и несовершенные грани, проиндентировать которые при таком качестве кристаллов не представляется возможным, можно только сказать, что это грани еще одной призмы и двух дипирамид. Спайность совершенная по (001). Цвет кокцинита ярко-красный, черта оранжево-красная, блеск очень сильный алмазный. В шлифе и тонких сколах он просвечивает. Микротвердость кокцинита $VHN = 51 \text{ кг/мм}^2$ (разброс значений 42–59 по пяти замерам, нагрузка 10 г), что соответствует значению 2 по шкале Мооса. Плотность минерала измерить не удалось, т. к. она существенно превышает плотность жидкости Клеричи. Значение плотности кокцинита, полученное с использованием его эмпирической формулы и рассчитанных по порошкограмме параметров элементарной ячейки, составляет 6.32 г/см^3 .

В проходящем свете в прозрачно-полированном шлифе кокцинит плеохроирует от оранжево-красного до темно-красного. Он оптически одноосный отрицательный. Его показатели преломления существенно выше имеющихся иммерсионных жидкостей. В отраженном свете кокцинит серый, несколько светлее соседствующей с ним серы. Двухотражение и анизотропия заметны слабо, чему мешают обильные и очень сильные внутренние рефлексии красно-оранжевого цвета, хорошо заметные даже при одном николе. Это создало трудности при измерении спектров отражения: коэффициенты отражения, вероятно, получились несколько заниженными (табл. 1). Показатели преломления кокцинита, рассчитанные исходя из измеренного отражения по формуле, производной от формулы Френеля, составляют $n_1 = 2.86$ и $n_2 = 2.66$ при $\lambda = 546 \text{ нм}$.

Таблица 1
Коэффициенты отражения кокцинита из горящего отвала шахты «Алмазная»

Table 1
Reflectance values of coccinite from the burning dump of the Almaznaya mine

λ (нм)	$R_{\max}$	$R_{\min}$
400	28.0	25.1
420	27.3	24.0
440	26.7	23.6
460	26.1	23.2
480	25.6	22.8
500	24.9	22.2
520	24.4	21.7
540	23.5	20.7
560	22.6	20.2
580	21.8	19.8
600	21.4	19.6
620	21.3	19.4
640	21.1	19.2
660	20.9	19.0
680	20.7	18.8
700	20.5	18.7

В отличие от других Hg–I-содержащих минералов кокцинит устойчив к воздействию света и не меняет окраски. Для сравнения, лимонно-желтые кристаллы мошелита Hg_2I_2 на свету быстро становятся темно-зелеными (Krupp et al., 1989). Т. Витцке отмечал летучесть кокцинита при комнатной температуре (Witzke, 1997) и запаивал образцы с ним в стеклянные трубки (Т. Витцке, персональное сообщение; <https://www.mindat.org/photo-9433.html>). Наши опыты показывают, что, по крайней мере, к кокциниту из отвала шахты «Алмазная» это не относится. Никакие видимые изменения нескольких кристаллов кокцинита на открытом воздухе при комнатной температуре не произошли за месяц хранения. При нагревании тигля с кристаллами в пламени спички минерал улетучился в течение нескольких секунд. Эта особенность кокцинита отмечалась и предыдущими исследователями (Маничев и др., 1979; Кузнецов и др., 1987).

В отличие от кокцинита из разреза Лихтенберг (Witzke, 1997), гуковский иодид устойчив под пучком электронного зонда. Его химический со-

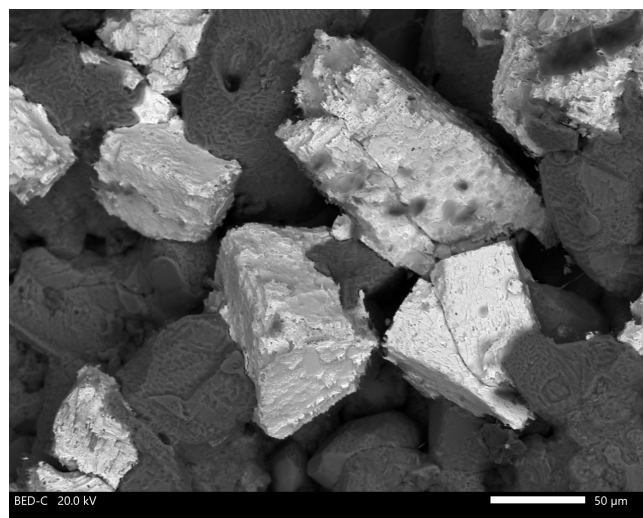


Рис. 5. BSE фото кристаллов кокцинита (светлое) среди кристаллов самородной серы (темное).

Fig. 5. BSE image of the coccinite crystals (light) between native sulfur crystals (dark).

став (мас. %, среднее значение для пяти анализов): Hg 45.15, Cl 0.11, Br 0.65, I 53.91, сумма 99.82. Он отвечает эмпирической формуле, рассчитанной на сумму атомов, равную трем: $\text{Hg}_{1.02}\text{I}_{1.93}\text{Br}_{0.04}\text{Cl}_{0.01}$. Отметим, что это первый количественный анализ кокцинита, приводимый в литературе.

Микроблочное строение кристаллов не позволило выполнить их исследование монокристалльным методом, поэтому рентгеновские данные были получены методом порошка (табл. 2). Как видно из таблицы, все измеренные межплоскостные расстояния и интенсивности аналогичны таковым для α -модификации синтетического соединения HgI_2 . Параметры тетрагональной элементарной ячейки, рассчитанные по данным порошкограммы с помощью программы (Holland, Redfern, 1997): $a = 4.3744(2)$, $c = 12.4301(7)$ Å, $V = 237.86(2)$ Å³. Они близки как к параметрам ячейки синтетического аналога (табл. 2), так и к расчетным данным Т. Витцке (см. выше). По данным рентгеновских исследований, самородная сера в ассоциации с кокцинитом представлена ромбической модификацией (α -серой). Параметры ее ромбической элементарной ячейки, вычисленные по порошкограмме: $a = 10.463(1)$, $b = 12.883(1)$, $c = 24.545(3)$ Å, $V = 3308.4(5)$ Å³.

ОБСУЖДЕНИЕ

Редкая, экзотическая минерализация горящих отвалов угольных разработок на протяжении многих десятилетий является предметом исследо-

Таблица 2

Порошковая рентгенограмма и рассчитанные параметры элементарной ячейки кокцинита из горящего отвала шахты «Алмазная» и синтетического α -HgI₂

Table 2

Powder X-ray diffraction data and unit cell parameters of coccinite from burning dump of the Almaznaya mine and synthetic α -HgI₂

Кокцинит		Синтетика α-HgI ₂ (JCPDS-ASTM 21-1157)		<i>hkl</i>
<i>d</i> , Å	<i>I</i> , %	<i>d</i> , Å	<i>I</i> , %	
6.220	29	6.223	55	0 0 2
4.122	82	4.122	70	1 0 1
3.575	100	3.577	100	1 0 2
3.107	5	3.113	3	0 0 4
3.087	5	3.092	2	1 1 0
3.008	37	3.009	40	1 0 3
2.767	35	2.768	30	1 1 2
2.534	6	2.534	7	1 0 4
2.189	98	2.192	60	1 1 4
		2.186	55	2 0 0
2.164	21	2.163	8	1 0 5
2.073	14	2.074	4	0 0 6
		2.062	6	2 0 2
1.931	15	1.931	9	2 1 1
1.868	28	1.874	6	1 0 6
		1.865	4	2 1 2
1.782	3	1.789	1	2 0 4
1.768	10	1.768	6	2 1 3
1.725	2	1.722	1	1 1 6
1.647	9	1.654	3	2 1 4
		1.646	5	1 0 7
1.554	10	1.555	5	0 0 8
		1.545	4	2 2 0
1.539	11	1.537	5	2 1 5
1.504	14	1.504	6	2 0 6
1.465	5	1.466	2	1 0 8
1.447	2	1.447	2	3 0 1
1.421	12	1.422	4	2 1 6
		1.418	5	3 0 2
1.375	3	1.375	2	3 0 3
1.349	5	1.349	2	3 1 2
1.316	8	1.318	3	1 0 9
		1.314	4	2 1 7
1.265	18	1.267	5	2 0 8
		1.263	7	3 1 4
1.239	4	1.239	2	2 2 6
1.217	4	1.217	1	2 1 8
1.207	2	1.206	1	3 2 1
1.197	3	1.197	1	1 0 10
1.192	5	1.192	2	3 0 6
Параметры тетрагональной ячейки				
<i>a</i> = 4.3744(2) Å		<i>a</i> = 4.369 Å		
<i>c</i> = 12.4301(7) Å		<i>c</i> = 12.440 Å		
<i>V</i> = 237.86(2) Å ³		<i>V</i> = 237.49 Å ³		

Примечание. Жирным шрифтом выделены наиболее сильные отражения.

Note. The strongest reflections are typed in bold.

вания в разных странах. Наиболее систематически и детально изучена минералогия горящих и горелых отвалов шахт и разрезов Челябинского угольного бассейна на Южном Урале (Чесноков, Щербатова, 1991; Чесноков и др., 2008). Немало работ посвящено соответствующим минералам Восточной Пенсильвании в США, Верхней Силезии в Польше, районов Кладно и Радванице в Чехии и многих других объектов и стран (Lapham et al., 1980; Žáček, Ondruš, 1997; Stracher et al., 2014; Parafiniuk, Siuda, 2021; и мн. др.). Что касается Донбасса, то ранее в горящих угольных отвалах шахт этого региона отмечались самородная сера, нашатырь, реальгар, гематит, цинкит, многочисленные сульфаты (алунген, ангидрит, галотрихит, гексагидрит, гипс, калиевые и натриевые квасцы, летовицит, масканьит, мелантерит, пиккерингит, ссомольнокит, тамаругит, халькантит, чермидит, эпсомит) и другие минералы (Сребродольский, 1973; Лазаренко и др., 1975; Панов и др., 1974, 2000; Труфанов и др., 1999; Проскурня, 2000; Панов, Проскурня, 2001 и ссылки в этих работах).

Насколько это известно авторам, минералы ртути и иода ранее в горящих угольных отвалах не находили, и находка кокцинита в отвале шахты «Алмазная» первая. Кокцинит возник в устье псевдофумаролы, скорее всего, в результате прямого осаждения (десублимации) из газов, образовавшихся при горении углеродсодержащего материала во внутренней части отвала. Об образовании в неравновесных условиях говорит характерный рельеф поверхности его кристаллов (рис. 4в, 5). Генезис кокцинита из Тюрингии (Witzke, 1997), в целом, сходен, но здесь его появление связано с горением не угольных отвалов, а граптолитовых сланцев на заброшенном урановом руднике.

Кокцинит – один из поздних минералов ассоциации: он кристаллизовался позже нашатыря и самородной серы и немного раньше галотрихита. Авторами не производились замеры температуры газов, выходящих на поверхность отвала, однако по литературным данным известно, что отложение ромбической α -серы в местах выходов горячих газов на приповерхностных участках угольных отвалов происходит в диапазоне 90–110 °С (Панов и др., 1974). Поэтому мы полагаем, что кокцинит осаждается при температурах, близких или чуть ниже этих значений. Это предположение согласуется с данными относительно температурного поля стабильности красной α -модификации HgI_2 , природным аналогом которой является кокцинит. Как

отмечалось выше, эта модификация устойчива до 127 °С, выше этой температуры она превращается в желтую β -модификацию (Schwarzenbach, 1969; Gumiński, 1997; Hostettler et al., 2002; Hostettler, Schwarzenbach, 2005).

Источником ртути могли послужить как сульфиды, так и углисто-глинистые породы, находящиеся в отвале. В литературе неоднократно отмечалась уникально высокая ртутоносность углей Донбасса, в том числе Восточного (Беляев и др., 1972; Дворников, 1981; Дворников, Кирикилица, 1987; Kizilstein, Kholodkov, 1999; Юдович, Кетрис, 2004, 2005). Она объяснялась, прежде всего, геологическим строением района: именно в антиклинальных структурах геохимический фон ртути выше, чем в синклинальных, и гораздо выше процентная доля геохимических аномалий (Дворников, Кирикилица, 1987; Юдович, Кетрис, 2004, 2005). Через разломы, надвиги и разрывные нарушения Северной антиклинали Восточного Донбасса ртутоносные гидротермы проникали в угленосную толщу среднекаменноугольного возраста, обогащая породы ртутью. Так, в южной части Северной антиклинали, где расположено поле шахты «Алмазная», отмечались повышенные фоновые содержания Hg в антрацитах: до 0.09 г/т при среднем показателе по всему Восточному Донбассу 0.025 г/т (Юдович, Кетрис, 2005). Кроме того, именно в Гуковском районе по результатам опробования выявлены участки с резко аномальным содержанием Hg до 3 г/т (Беляев и др., 1972). По данным геохимических исследований, основным носителем ртути в углях Восточного Донбасса являются сульфиды; ее меньшая часть содержится в составе глинистых минералов и органических веществ (Юдович, Кетрис, 2005).

Что касается иода, то данных о его концентрациях в углях Восточного Донбасса мы не обнаружили. Имеется общая информация о кларке иода в каменных углях (1.5 ± 0.3 г/т) и оценка этого элемента как высокоуглефильного (Юдович, Кетрис, 2006). Поскольку угленосные отложения Донбасса характеризуются как полифациальные с широким развитием и переслаиванием морских, лагунных и континентальных осадков (Зарицкий, 1970), то иод из морских вод мог накапливаться во время углеотложения в средне- и позднекаменноугольное время. Не исключено эпигенетическое обогащение углей иодом из подземных вод. В частности, экспериментально доказано, что каменные угли способны поглощать значительное количество иода из иодсодержащих водных растворов (Юдович, Кетрис,

2006). В этой связи немаловажно отметить, что отвал шахты «Алмазная» насыпан по руслу мелкой балки, а у северного и южного краев отвала имеются небольшие пруды, заполненные грунтовыми водами. Наконец, источником иода могут быть и органические вещества, входящие в состав углей.

Происхождение кокцинита еще недавно считалось бы чисто техногенным так же, как и любых других минералов, образующихся при горении угольных отвалов. Однако в 2020 г. Комиссия по новым минералам, номенклатуре и классификации ММА приняла правила, существенно смягчающие требования к таким веществам (Parafiniuk, Hatert, 2020). Они стали рассматриваться как природные при соблюдении двух условий: 1) возникновении горения без участия человека (самовозгорание отвала и т. д.) и 2) неучастии в процессе минералообразования «антропогенных материалов» (технический мусор, металлические предметы, оставленные человеком на отвале и т. п.). Обоим этим формальным критериям кокцинит из отвалов угольной шахты «Алмазная» в полной мере отвечает и может считаться природным, а не техногенным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате детального исследования при помощи современных методов в составе минеральной псевдофумарольной ассоциации, найденной в горящем отвале угольной шахты «Алмазная» в Восточном Донбассе, впервые на территории Российской Федерации охарактеризован очень редкий иодид ртути кокцинит HgI_2 . В его химическом составе присутствуют малые примеси Br и Cl . Все отражения на дифрактограмме кокцинита соответствуют синтетической тетрагональной фазе $\alpha\text{-HgI}_2$. Минерал образовался при самовозгорании углесодержащей отвальной массы. Эта находка говорит о целесообразности дальнейших работ по поиску других редких минералов на горящем участке отвала. Работы необходимо проводить как можно быстрее не только потому, что термическая активность отвала постепенно снижается, что ведет к затуханию минералообразующих процессов, но и потому, что с 2023 г. происходит планомерная разборка отвала частными компаниями на уголь и щебенку. На эти явления применительно к горелым отвалам Челябинского угольного бассейна указывали Б.В. Чесноков с соавторами (2008), отмечая, что через несколько лет эти интереснейшие для науки объекты могут полностью исчезнуть с лица Земли.

ЛИТЕРАТУРА

- Беляев В.К., Мошкин В.М., Пономарев Е.А. (1972) Новые данные о ртутоносности Восточного Донбасса (Ростовская область). Геологическое строение Ростовской и сопредельных областей. Ростов, РГУ, 204 с.
- Бритвин С.Н., Доливо-Добровольский Д.В., Кржижановская М.Г. (2017) Программный пакет для обработки рентгеновских порошковых данных, полученных с цилиндрического детектора дифрактометра Rigaku Raxis Rapid II. *Записки РМО*, 146(3), 104–107.
- Васильев В.И., Усова Л.В., Пальчик Н.А. (1989) Гречищевит – $\text{Hg}_3\text{S}_2(\text{Br}, \text{Cl}, \text{I})_2$ – новый гипергенный сульфогалогенид ртути. *Геология и геофизика*, 7, 61–69.
- Геологическая карта L-37-IV (1956) Государственная геологическая карта СССР. Серия Донбасская, масштаб 1:200000. Северо-Кавказское геологическое управление, 1956.
- Геологическая карта и карта полезных ископаемых дочетвертичных образований M-37-XXXIV (1958). Карта дочетвертичных отложений и полезных ископаемых СССР. Серия Донбасская, масштаб: 1:200 000. Киевское геологическое управление, 1958.
- Дворников А.Г. (1981) Новые данные о генезисе ореолов ртути в углях Донбасса. *Доклады Академии наук СССР*, 256(6), 1478–1480.
- Дворников А.Г., Кирикилица С.И. (1987) Ртутоносность углей Донецкого бассейна. М., Недра, 155 с.
- Дэна Дж.Д., Дэна Э.С., Пэлач Ч., Берман Г., Фрондель К. (1953) Система минералогии. Т. II. Полутом 1. М., Изд. иностранной литературы, 773 с.
- Зарицкий П.В. (1970) Минералогия и геохимия диагенеза угленосных отложений (на материалах Донецкого бассейна). Харьков, ХГУ, 223 с.
- Касаткин А.В., Кузнецов А.М., Арзамасцев Н.А. (2022) Рудные минералы Бурановского вольфрамового месторождения (Южный Урал). *Минералогия*, 8(3), 23–46. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2022-8-3-2>.
- Концепция развития угольной промышленности Ростовской области на период до 2030 года. Утверждена постановлением Правительства Ростовской области от 05.07.2012 № 599. <http://special.gukovo.donland.ru/Default.aspx?pageid=111881>
- Кривовичев В.Г. (2021) Минеральные виды. СПб, СПбГУ, 600 с.
- Кужугет Р.В. (2014) Иодидная и бромидная минерализация в окисленных рудах Хаак-Саирского золоторудного месторождения, Западная Тува. *Записки РМО*, 143(2), 64–80.
- Кузнецов Ю.А., Куц В.П., Сиденко О.Г. (1987) Кокцинит из палеозойских отложений юга Украины. *Доклады АН УССР. Серия Б*, 8, 9–10.
- Лазаренко Е.К., Панов Б.С., Павлишин В.И. (1975) Минералогия Донецкого бассейна. Киев, Наукова Думка, т. 1, 221 с.

- Маничев В.И., Ивантишина О.М., Егорова Л.Н. (1979) О находке йодистой ртути во флише Украинских Карпат. *Доклады АН УССР. Серия Б*, 9, 702–704.
- Панов Б.С., Проскурня Ю.А. (2001) Новые минералы Донбасса. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-геологічна*, 32, Донецьк, ДонНТУ, 3–8.
- Панов Б.С., Дорфман М.Д., Смольянинова Н.Н. (1974) О нашатыре из Донецкого бассейна. *Труды Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана*, 23, 220–223.
- Панов Б.С., Проскурня Ю.А., Мельников В.С., Гречановская Е.Е. (2000) Неоминерализация горящих угольных отвалов Донбасса. *Минералогический журнал*, 22(4), 37–46.
- Проскурня Ю.А. (2000) Минералогия отвалов угольных шахт (на примере Донецко-Макеевского промышленного района). Дисс. на соиск. степ. канд. геол.-мин. наук. Донецк, ДТГУ, 165 с.
- Сребродольский Б.И. (1973) Минеральные ассоциации самородной серы в угленосных толщах. *Минералогический сборник Львовского университета*, 27(3), 287–296.
- Труфанов В.Н., Гипич Л.В., Мешанинов Ф.В. (1999) Наноминеральные ассоциации горящих терриконов Восточного Донбасса. *Тезисы IX съезда ВМО*, Санкт-Петербург, 27–28.
- Чесноков Б.В., Щербакова Е.П. (1991) Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (опыт минералогии техногенеза). М., Наука, 152 с.
- Чесноков Б.В., Щербакова Е.П., Нишанбаев Т.П. (2008) Минералы горелых отвалов Челябинского угольного бассейна. Миасс, ИМин УрО РАН, 139 с.
- Шахты Донецкого бассейна (1965) Под ред. А.П. Судоплатова, А.М. Курносова. М., Недра, 612 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2004) Проблема ртути в углях. *Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН*, 10(118), 6–13
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2005) Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. Екатеринбург, УрО РАН, 650 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2006) Ценные элементы-примеси в углях. Екатеринбург, УрО РАН, 538 с.
- Akopyan I.K., Labzovskaya M.É., Novikov B.V., Smirnov V.M. (2007) Metastable modifications in mercury diiodide nanocrystals. *Physics of the Solid State*, 49, 1375–1381. <https://doi.org/10.1134/S106378340707030X>
- Annales des mines ou recueil de mémoires sur l'exploitation des mines et sur les sciences qui s'y rapportent (1829). Deuxième série, 5, 324 p. (in French)
- Bijvoet J., Claassen A., Karssen A. (1926) The crystal structure of red mercuric iodide. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen*, 29, 529–546.
- Burkart H.J. (1866) Über einige mexikanische Mineralien. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, 409–417. (in German)
- Carne J.E. (1900) Mercury, or “Quicksilver”, in New South Wales, with notes on its occurrence in other colonies and countries. *New South Wales Department of Mines, Mineralogical Resources*, 7, 36 p.
- Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences (1836). Tome troisième, juillet – décembre 1836. Paris, Bachelier, Imprimeur-Libraire, 582–583. (in French)
- Cooper M.A., Hawthorne F.C., Roberts A.C., Stanley C.J., Spratt J.C., Andrew G. (2019) Gaidunningite, ideally $\text{Hg}^{2+}_3[\text{NHg}^{2+}_2]_{18}(\text{Cl}, \text{I})_{24}$, a new mineral from the Clear Creek Mine, San Benito County, California, USA: description and crystal structure. *The Canadian Mineralogist*, 57, 295–310. <https://doi.org/10.3749/canmin.1800080>.
- Domeyko I. (1844) Tratado de ensayes, tanto por la via seca como por la via humeda, de toda clase de minerales y pastas de cobre, plomo, plata, oro, mercurio, &c: con descripcion de los caracteres de los principales minerales y productos de las artes en America, y en particular en Chile, Serena, Imprenta eel Colejio, 282–283. (in Spanish)
- Eakle A.S. (1914) Minerals of California. Bulletin No. 67, California State printing office, 226 p.
- Gumiński C. (1997) The Hg-I (mercury-iodine) system. *Journal of Phase Equilibria*, 18(2), 206–215. <https://doi.org/10.1007/bf02665707>
- Haidinger W. (1845) Handbuch der bestimmenden Mineralogie. Wien, Braumüller and Seidel, 572 p. (in German)
- Hicks D., Mehl M.J., Gossett E., Toher C., Levy O., Hanson R.M., Hart G., Curtarolo S. (2019) The AFLOW library of crystallographic prototypes: Part 2. *Computational Materials Science*, 161, S1. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2018.10.043>
- 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. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.404.07>
- Hostettler M., Schwarzenbach D. (2005) Phase diagrams and structures of HgX_2 (X = I, Br, Cl, F). *Comptes Rendus Chimie*, 8, 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2004.06.006>
- Hostettler M., Birkedal H., Schwarzenbach D. (2002). The structure of orange HgI_2 . I. Polytropic layer structure. *Acta Crystallographica Section B Structural Science*, 58(6), 903–913. <https://doi.org/10.1107/s010876810201618x>
- Jeffrey G.A., Vlasse M. (1967) On the crystal structures of the red, yellow and orange forms of mercuric iodide. *Inorganic Chemistry*, 6, 396–399.
- Kizilstein L.Ya., Kholodkov Yu.I. (1999) Ecologically hazardous elements in coals of the Donets Basin. *International Journal of Coal Geology*, 40, 189–197. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(98\)00068-8](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(98)00068-8)
- Krupp E.R., Nottes G., Heidtke U. (1989) Moschelite (Hg_2I_2): a new mercury mineral from Landsberg-Obermoschel. *Neues Jahrbuch für Mineralogie - Monatshefte*, 1989, 524–526.

- Lapham M.D., Barnes J.H., Downey W.F., Jr., Finkelman R.B. (1980) Mineralogy associated with burning anthracite deposits of Eastern Pennsylvania. Mineral Resource Report 78. Harrisburg, Pennsylvania Topographic and Geologic Survey, 788 p.
- McCormack J.K., Dickson F.W., Leshendok M.P. (1991) Radtkeite, $\text{Hg}_3\text{S}_2\text{Cl}_2$, a new mineral from the McDermitt mercury deposit, Humboldt County, Nevada. *American Mineralogist*, 76, 1715–1721. [https://doi.org/0003-004X/91/0910-1715\\$02.00](https://doi.org/0003-004X/91/0910-1715$02.00)
- Minerals of Broken Hill (1999) Ed. by W.D. Birch. Broken Hill City Council, 135–136.
- Moses A.J. (1901) Mineralogical notes. Mercuric iodide from New South Wales. *American Journal of Science*, 12, 98–99.
- Nottes G., Heidtke U. (1986) Zur Kenntnis der Jodquecksilber-Mineralen vom Moschellandsberg, Pfalz. *Aufschluß*, 37, 31–36. (in German)
- Parafiniuk J., Hatert F. (2020) New IMA CNMNC guidelines on combustion products from burning coal dumps. *European Journal of Mineralogy*, 32, 215–217. <https://doi.org/10.5194/ejm-32-215-2020>
- Parafiniuk J., Siuda R. (2021) High temperature sulfate minerals forming on the burning coal dumps from Upper Silesia, Poland. *Minerals*, 11, 228. <https://doi.org/10.3390/min11020228>
- Pekov I.V., Zubkova N.V., Britvin S.N., Agakhanov A.A., Polekhovsky Y.S., Pushcharovsky D.Y., Möhn G., Desor J., Blass G. (2023) A new mineral hanauerite, AgHgSI , and common crystal chemical features of natural mercury sulphohalides. *Crystals*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/cryst13081218>
- Roberts A.C., Cooper M.A., Hawthorne F.C., Criddle A.J., Stirling J.A.R., Dunning G.E. (2002) Tedhadleyite, $\text{Hg}^{2+}\text{Hg}^{1+}_{10}\text{O}_4\text{I}_2(\text{Cl},\text{Br})_2$, a new mineral species from the Clear Creek Claim, San Benito County, California. *The Canadian Mineralogist*, 40, 909–914. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.40.3.909>
- Roberts A.C., Cooper M.A., Hawthorne F.C., Stirling J.A.R., Paar W.H., Stanley C.J., Dunning G.E., Burns P.C. (2003) Vasilyevite, $(\text{Hg}_2^{2+})_{10}\text{O}_6\text{I}_3\text{Br}_2\text{Cl}(\text{CO}_3)$, a new mineral species from the Clear Creek claim, San Benito County, California. *The Canadian Mineralogist*, 41, 1167–1172. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.5.1167>
- Roberts A.C., Stirling J.A.R., Criddle A.J., Dunning G.E., Spratt J. (2004) Aurivilliusite, $\text{Hg}^{2+}\text{Hg}^{1+}\text{OI}$, a new mineral species from the Clear Creek claim, San Benito County, California, USA. *Mineralogical Magazine*, 68, 241–245. <https://doi.org/10.1180/0026461046820184>
- Sarp H., Birch W.D., Hlava P.F., Pring A., Sewell D.K.B., Nickel E.H. (1987) Perroudite, a new sulfide-halide of Hg and Ag from Cap-Garonne, Var, France, and from Broken Hill, New South Wales, and Coppin Pool, Western Australia. *American Mineralogist*, 72, 1251–1256. [https://doi.org/0003-004X/1112-1251\\$02.00](https://doi.org/0003-004X/1112-1251$02.00)
- Schwarzenbach D. (1969) The crystal structure and one-dimensional disorder of the orange modification of HgI_2 . *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials*, 128, 97–114. <https://doi.org/10.1524/zkri.1969.128.16.97>
- Smith G. (1926) A contribution to the mineralogy of New South Wales. Geological Survey of New South Wales. *Mineralogical Resources*, 34, 145 p.
- Stracher G.B., Prakash A., Sokol E.V. (2014) Coal and peat fires: a global perspective. Volume 3: Case studies – coal fires. Amsterdam, Elsevier Science, 816 p.
- The Penny cyclopædia of the society for the diffusion of useful knowledge (1839). Volume XV. London, Charles Knight and Co., 103 p.
- Websky M. (1877) Über Hornquecksilber von el Doctor in Mexico. *Auszug aus dem Monatsbericht der Königl. Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 461–467. (in German)
- Witzke T. (1997) New data on the mercury iodide mineral coccinite, HgI_2 . *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 11, 505–510. <https://doi.org/10.1127/njmm/1997/1997/505>
- Žáček V., Ondruš P. (1997) Mineralogy of recently formed sublimates from Kateřina colliery in Radvanice, Eastern Bohemia, Czech Republic. *Věstník Českého geologického ústavu*, 72, 289–302.

REFERENCES

- Akopyan I.K., Labzovskaya M.É., Novikov B.V., Smirnov V.M. (2007) Metastable modifications in mercury diiodide nanocrystals. *Physics of the Solid State*, 49, 1375–1381. <https://doi.org/10.1134/S106378340707030X>
- Annales des mines ou recueil de mémoires sur l'exploitation des mines et sur les sciences qui s'y rapportent (1829). Deuxième série, 5, 324 p. (in French)
- Belyaev V.K., Moshkin V.M., Ponomarev E.A. (1972) New data on Hg potential of Eastern Donbas (Rostov region). *Geological structure of Rostov and adjacent regions*. Rostov, RGU, 204 p. (in Russian).
- Bijvoet J., Claassen A., Karssen A. (1926) The crystal structure of red mercuric iodide. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen*, 29, 529–546.
- Britvin S.N., Dolivo-Dobrovolsky D.V., Krzhizhanovskaya M.G. (2017) Software for processing the X-ray powder diffraction data obtained from the curved image plate detector of Rigaku RAXIS Rapid II diffractometer. *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 146, 104–107 (in Russian).
- Burkart H.J. (1866) Über einige mexikanische Mineralien. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, 409–417. (in German)
- Carne J.E. (1900) Mercury, or “Quicksilver”, in New South Wales, with notes on its occurrence in other colonies

and countries. *New South Wales Department of Mines, Mineralogical Resources*, 7, 36 p.

Chesnokov B.V., Shcherbakova E.P. (1991) *Mineralogy of burnt dumps of the Chelyabinsk coal basin (an experience of technogene mineralogy)*. Moscow, Nauka, 152 p. (in Russian)

Chesnokov B.V., Shcherbakova E.P., Nishanbaev T.P. (2008) *Minerals of burnt dumps of the Chelyabinsk coal basin*. Miass, IMin UrO RAN, 139 p. (in Russian)

Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences (1836). Tome troisième, juillet – décembre 1836. Paris, Bachelier, Imprimeur-Libraire, 582–583. (in French)

Cooper M.A., Hawthorne F.C., Roberts A.C., Stanley C.J., Spratt J.C., Andrew G. (2019) Gaildunningite, ideally $\text{Hg}_3^{2+}[\text{NHg}_2^{2+}]_{18}(\text{Cl},\text{I})_{24}$, a new mineral from the Clear Creek Mine, San Benito County, California, USA: description and crystal structure. *The Canadian Mineralogist*, 57, 295–310. <https://doi.org/10.3749/canmin.1800080>.

Dana J.D., Dana E.S., Palache Ch., Berman H., Frondel C. (1953) *The system of mineralogy*. Volume II. Half-volume 1. Moscow, Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 773 p. (in Russian)

Domeyko I. (1844) Tratado de ensayes, tanto por la via seca como por la via humeda, de toda clase de minerales y pastas de cobre, plomo, plata, oro, mercurio, &c: con descripcion de los caracteres de los principales minerales y productos de las artes en America, y en particular en Chile, Serena, Imprenta eel Colejio, 282–283. (in Spanish)

Dvornikov A.G. (1981) New data on genesis of mercury areas in Donbas coals. *Doklady Akademii nauk SSSR (Doklady Academy of Sciences of the USSR)*, 256(6), 1478–1480 (in Russian).

Dvornikov A.G., Kirikilitsa S.I. (1987) *Mercury potential of coals of the Donetsk basin*. Moscow, Nedra, 155 p. (in Russian).

Eakle A.S. (1914) Minerals of California. Bulletin No. 67, California State printing office, 226 p.

Geological map L-37-IV (1956). *State geological map of the USSR*. Donbas series, scale 1:200 000. North Caucasian Geological Survey, 1956. (in Russian)

Geological map and map of ores of pre-Quaternary formations M-37-XXXIV (1958). Map of pre-Quaternary deposits and ores of the USSR. Donbas series, scale: 1:200000. Kiev Geological Survey, 1958. (in Russian)

Gumiński C. (1997) The Hg-I (mercury-iodine) system. *Journal of Phase Equilibria*, 18(2), 206–215. <https://doi.org/10.1007/bf02665707>

Haidinger W. (1845) *Handbuch der bestimmenden Mineralogie*. Wien, Braumüller and Seidel, 572 p. (in German)

Hicks D., Mehl M.J., Gossett E., Toher C., Levy O., Hanson R.M., Hart G., Curtarolo S. (2019) The AFLOW library of crystallographic prototypes: Part 2. *Computational Materials Science*, 161, S1. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2018.10.043>

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. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.404.07>

Hostettler M., Schwarzenbach D. (2005) Phase diagrams and structures of HgX_2 (X = I, Br, Cl, F). *Comptes Rendus Chimie*, 8, 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2004.06.006>

Hostettler M., Birkedal H., Schwarzenbach, D. (2002). The structure of orange HgI_2 . I. Polytropic layer structure. *Acta Crystallographica Section B Structural Science*, 58(6), 903–913. <https://doi.org/10.1107/s010876810201618x>

Jeffrey G.A., Vlasse M. (1967) On the crystal structures of the red, yellow and orange forms of mercuric iodide. *Inorganic Chemistry*, 6, 396–399.

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. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2022-8-3-2> (in Russian)

Kizilstein L.Ya., Kholodkov Yu.I. (1999) Ecologically hazardous elements in coals of the Donets Basin. *International Journal of Coal Geology*, 40, 189–197. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(98\)00068-8](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(98)00068-8)

Krivovichev V.G. (2021) *Mineral species*. St. Petersburg, SPbGU, 600 p. (in Russian)

Krupp E.R., Nottes G., Heidtke U. (1989) Moschelite (Hg_2I_2): a new mercury mineral from Landsberg-Obermoschel. *Neues Jahrbuch für Mineralogie - Monatshefte*, 1989, 524–526.

Kuzhuget R.V. (2014) Iodide and bromide mineralization in oxidized ores of the Khaak-Sair gold deposit, Western Tuva. *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 143(2), 64–80. (in Russian)

Kuznetsov Yu.A., Kuts V.P., Sidenko O.G. (1987) Coccinite from the Paleozoic deposits of southern Ukraine. *Doklady AN USSR. Seria B (Doklady of Academy of Sciences of the USSR. Series B)*, 8, 9–10. (in Russian)

Lapham M.D., Barnes J.H., Downey W.F., Jr., Finkelman R.B. (1980) Mineralogy associated with burning anthracite deposits of Eastern Pennsylvania. Mineral Resource Report 78. Harrisburg, Pennsylvania Topographic and Geologic Survey, 788 p.

Lazarenko E.K., Panov B.S., Pavlichin V.I. (1975) *Mineralogy of the Donetsk basin*. Kiev, Naukova Dumka, Vol. 1, 221 p. (in Russian)

Manichev V.I., Ivantishina O.M., Egorova L.N. (1979) The finding of mercury iodide in flysch of the Ukrainian Carpathians. *Doklady AN USSR. Seria B (Doklady of Academy of Sciences of the USSR. Series B)*, 9, 701–703. (in Russian)

McCormack J.K., Dickson F.W., Leshendok M.P. (1991) Radtkeite, $\text{Hg}_3\text{S}_2\text{ClI}$, a new mineral from the McDermitt mercury deposit, Humboldt County, Nevada. *American Mineralogist*, 76, 1715–1721. [https://doi.org/0003-004X/91/0910-1715\\$02.00](https://doi.org/0003-004X/91/0910-1715$02.00)

Minerals of Broken Hill (1999) Ed. by W.D. Birch. Broken Hill City Council, 135–136.

Mines of the Donetsk Basin (1965) Eds. by A.P. Sudoplatov and A.M. Kurnosov. Moscow, Nedra, 612 p. (in Russian)

Moses A.J. (1901) Mineralogical notes. Mercuric iodide from New South Wales. *American Journal of Science*, 12, 98–99.

Nottes G., Heidtke U. (1986) Zur Kenntnis der Jodquecksilber-Mineralie vom Moschellandsberg, Pfalz. *Aufschluß*, 37, 31–36. (in German)

Panov B.S., Proskurnya Yu.A. (2001) New minerals of Donbas. *Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu, seria girnichno-geologichna (Scientific Proceedings of the Donetsk National Technical University. Geological Series)*, 32, Donetsk, DonNTU, 3–8. (in Russian)

Panov B.S., Dorfman M.D., Smolyaninova N.N. (1974) Salammoniac from the Donetsk basin. *Trudy Mineralogicheskogo muzeia imeni A.E. Fersmana (Proceedings of the Fersman Mineralogical Museum)*, 23, 220–223. (in Russian)

Panov B.S., Proskurnya Yu.A., Melnikov V.S., Grechanovskaya E.E. (2000) Neomineralization of burning coal dumps in Donbas. *Mineralogicheskii Zhurnal (Mineralogical Journal)*, 22(4), 37–46. (in Russian)

Parafiniuk J., Hatert F. (2020) New IMA CNMNC guidelines on combustion products from burning coal dumps. *European Journal of Mineralogy*, 32, 215–217. <https://doi.org/10.5194/ejm-32-215-2020>

Parafiniuk J., Siuda R. (2021) High temperature sulfate minerals forming on the burning coal dumps from Upper Silesia, Poland. *Minerals*, 11, 228. <https://doi.org/10.3390/min11020228>

Pekov I.V., Zubkova N.V., Britvin S.N., Agakhanov A.A., Polekhovsky Y.S., Pushcharovsky D.Y., Möhn G., Desor J., Blass G. (2023) A new mineral hanauerite, AgHgSI , and common crystal chemical features of natural mercury sulphohalides. *Crystals*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/cryst13081218>

Proskurnya Yu.A. (2000) *Mineralogy of coal mine dumps (on example of the Donetsk-Makeevka industrial region)*. (PhD Dissertation). Donetsk, DTGU, 165 p. (in Russian)

Roberts A.C., Cooper M.A., Hawthorne F.C., Criddle A.J., Stirling J.A.R., Dunning G.E. (2002) Tedhadleyite, $\text{Hg}^{2+}\text{Hg}^{1+}_{10}\text{O}_4\text{I}_2(\text{Cl},\text{Br})_2$, a new mineral species from the Clear Creek Claim, San Benito County, California. *The Canadian Mineralogist*, 40, 909–914. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.40.3.909>

Roberts A.C., Cooper M.A., Hawthorne F.C., Stirling J.A.R., Paar W.H., Stanley C.J., Dunning G.E., Burns P.C. (2003) Vasilyevite, $(\text{Hg}_2)^{2+}_{10}\text{O}_6\text{I}_3\text{Br}_2\text{Cl}(\text{CO}_3)$, a new mineral species from the Clear Creek claim, San Benito County, California. *The Canadian Mineralogist*, 41, 1167–1172. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.5.1167>

Roberts A.C., Stirling J.A.R., Criddle A.J., Dunning G.E., Spratt J. (2004) Aurivilliusite, $\text{Hg}^{2+}\text{Hg}^{1+}\text{OI}$, a new mineral species from the Clear Creek claim, San Benito County, California, USA. *Mineralogical Magazine*, 68, 241–245. <https://doi.org/10.1180/0026461046820184>

Sarp H., Birch W.D., Hlava P.F., Pring A., Sewell D.K.B., Nickel E.H. (1987) Perroudite, a new sulfide-halide of Hg and Ag from Cap-Garonne, Var, France, and from Broken Hill, New South Wales, and Coppin Pool, Western Australia. *American Mineralogist*, 72, 1251–1256. [https://doi.org/0003-004X/1112-1251\\$02.00](https://doi.org/0003-004X/1112-1251$02.00)

Schwarzenbach D. (1969) The crystal structure and one-dimensional disorder of the orange modification of HgI_2 . *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials*, 128, 97–114. <https://doi.org/10.1524/zkri.1969.128.16.97>

Smith G. (1926) A contribution to the mineralogy of New South Wales. Geological Survey of New South Wales. *Mineralogical Resources*, 34, 145 p.

Srebrodolskiy B.I. (1973) Mineral assemblages of native sulfur in coal-bearing strata. *Mineralogicheskii sbornik L'vovskogo universiteta (Mineralogical proceedings of the Lvov University)*, 27(3), 287–296. (in Russian)

Stracher G.B., Prakash A., Sokol E.V. (2014) Coal and peat fires: a global perspective. Volume 3: Case studies – coal fires. Amsterdam, Elsevier, 816 p.

The concept of the development of coal industry of the Rostov region for the period up to 2030. Approved by the Decree of the Government of the Rostov Region dated 05.07.2012 No. 599. <http://special.gukovo.donland.ru/Default.aspx?pageid=111881>. (in Russian)

The Penny cyclopædia of the society for the diffusion of useful knowledge (1839). Volume XV. London, Charles Knight and Co., p. 103 p.

Trufanov V.N., Gipich L.V., Meshaninov F.V. (1999) Nanomineral assemblages of burning waste heaps in Eastern Donbas. Tezisy IX s'ezda VMO. *Abstracts of the IX VMO Congress*. St. Petersburg, 27–28 (in Russian).

Vasiliev V.I., Usova L.V., Palchik N.A. (1989) Grechishchevite– $\text{Hg}_3\text{S}_2(\text{Br},\text{Cl},\text{I})_2$ – a new supergene mercury sulfohalide. *Geologiya i geofizika (Geology and Geophysics)*, 7, 61–69. (in Russian).

Websky M. (1877) Über Hornquecksilber von el Doctor in Mexico. *Auszug aus dem Monatsbericht der Königl. Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 461–467. (in German)

Witzke T. (1997) New data on the mercury iodide mineral coccinite, HgI_2 . *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 11, 505–510. <https://doi.org/10.1127/njmm/1997/1997/505>

Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2004) The problem of mercury in coals. *Vestnik Instituta geologii Komi nauchnogo centra Uralskogo otdeleniya RAN (Bulletin of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Uralian Branch of RAS)*, 10(118), 6–13 (in Russian).

Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2005) *Toxic trace elements in fossil coals*. Yekaterinburg, UrO RAN, 650 p. (in Russian).

Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2006) *Valuable trace elements in coals*. Yekaterinburg, UrO RAN, 538 p. (in Russian).

Žáček V., Ondruš P. (1997) Mineralogy of recently formed sublimates from Kateřina colliery in Radvanice, Eastern Bohemia, Czech Republic. *Věstník Českého geologického ústavu*, 72, 289–302.

Zaritsky P.V. (1970) *Mineralogy and geochemistry of diagenesis of coal-bearing deposits (based on materials from the Donetsk basin)*. Kharkov, KhGU, 223 p. (in Russian).

Информация об авторах

Касаткин Анатолий Витальевич – ведущий специалист, Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, г. Москва, Россия; anatology.kasatkin@gmail.com

Пеков Игорь Викторович – член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой минералогии геологического факультета МГУ, Московский государственный университет, г. Москва, Россия; igorpekov@mail.ru

Трофимов Олег Викторович – коллекционер, г. Ростов-на-Дону, Россия; ovtr@yandex.ru

Агаханов Атали Акмурадович – кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе, Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, г. Москва, Россия; atali99@mail.ru

Мишель Мария Дмитриевна – фотограф минералов, коллекционер, г. Москва, Россия; narrata@mail.ru

Бритвин Сергей Николаевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры кристаллографии, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; sbritvin@gmail.com

Information about the authors

Anatoly V. Kasatkin – Leading Researcher, Fersman Mineralogical Museum RAS, Moscow, Russia; anatology.kasatkin@gmail.com

Igor V. Pekov – Corresponding Member of the RAS, Head of the Department of Mineralogy, Faculty of Geology, Moscow State University, Moscow, Russia; igorpekov@mail.ru

Oleg V. Trofimov – collector, Rostov-on-Don, Russia; ovtr@yandex.ru

Atali A. Agakhanov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Deputy Director, Fersman Mineralogical Museum RAS, Moscow, Russia; atali99@mail.ru.

Maria D. Milshina – Mineral photographer, collector, Moscow, Russia; narrata@mail.ru.

Sergey N. Britvin – Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor of the Department of Crystallography, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; sbritvin@gmail.com



УДК 549.550

<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-2-2>

О СОСТАВЕ КАССИТЕРИТА И ВОЛЬФРАМИТА В РУДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

В.И. Попова, В.А. Попов, И.А. Блинов

*Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; popov@mineralogy.ru*

Статья поступила в редакцию 11.04.2025 г., после доработки 04.05.2024 г., принята к печати 16.05.2025 г.

Аннотация. В статье приведены формулы, отражающие вариации состава касситерита, вольфрамит (ферберита и гюбнерита) и сопутствующих минералов (силикатов, фосфатов, танталониобатов, сульфидов и др.) из оловорудных месторождений Малого Хингана (Хинганское и Берёзовое), оловорудно-вольфрамовых месторождений Приамурья (Правоурмийское и Мерекское) и Приморья (Тигринное, Усть-Микулинское, Забытое, Шибановское) и олово-полиметаллического месторождения Зимнее. Во всех проанализированных кристаллах касситерита выявлены небольшие примеси Ti, Ta, реже – W, Nb, In и Sc, а в кристаллах вольфрамит – иногда примеси Nb или Nb и Ta.

Ключевые слова: Малый Хинган, Приамурье, Приморье, оловорудные и олово-вольфрамовые месторождения, касситерит, вольфрамит, ферберит, гюбнерит, состав минералов.

Финансирование. Аналитические работы выполнены в рамках государственного задания ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (тема № 122040600006-1).

Благодарности. Авторы благодарны И.В. Кислюк и Н.П. Ивановой за подготовку препаратов для исследований.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. В.И. Попова – выбор объектов исследования, обработка иллюстраций, расчет формул минералов, написание рукописи и редактирование ее финального варианта; В.А. Попов – обсуждение текста, изготовление препаратов и участие в их исследовании; И.А. Блинов – аналитические работы.

Для цитирования: Попова В.И., Попов В.А., Блинов И.А. О составе касситерита и вольфрамит в рудах месторождений Дальнего Востока. Минералогия, 2025, 11(2), 22–46. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-2-2.

ABOUT THE COMPOSITION OF CASSITERITE AND WOLFRAMITE IN ORES FROM THE FAR EAST DEPOSITS

V.I. Popova, V.A. Popov, I.A. Blinov

*South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, 456317
Russia; popov@mineralogy.ru*

Received 11.04.2025, revised 04.05.2025, accepted 16.05.2025

Abstract. The paper presents formulas, which reflect the variations in the composition of cassiterite, wolframite (ferberite and hübnerite) and associated minerals (silicates, phosphates, tantaloniobates, sulfides, etc.) from the Maly Khingan tin deposits (Khingan and Berezovoe), tin-tungsten deposits of the Amur Region (Pravy Urmiy and Merek), and Primorye (Tigrinoe, Ust-Mikulinskoe, Zabytoe, and Shibanovskoe) and, partly, from the Zimnee tin-polymetallic deposit. All studied cassiterite crystals contain a low amount of Ti and Ta, and less often W, Nb, In, and Sc; wolframite locally contains Nb or Nb and Ta.

Keywords: Maly Khingan, Amur region, Primorye, tin and tin-tungsten deposits, cassiterite, wolframite, ferberite, hübnerite, compositional variations.

Thanks: The authors are grateful to I.V. Kislyuk and N.P. Ivanova for the preparation of samples for studies.

Funding. This work was supported by state contract of the South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS no. 122040600006-1.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interest related to the manuscript.

Author contribution. V.I. Popova – conceptualization, investigation, visualization, writing – original draft, writing – review and editing; V.A. Popov – investigation, writing – original draft; I.A. Blinov – formal analysis.

For citation: Popova V.I., Popov V.A., Blinov I.A.. About the composition of cassiterite and wolframite in ores of the far east deposits. Mineralogy, 2025, 11(2), 22–46. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-2-2

ВВЕДЕНИЕ

На Дальнем Востоке России известно более 200 месторождений олова и вольфрама, но из них отрабатывали лишь перспективные и доступные. Наше ознакомление с месторождениями Хингана и Баджала началось в 1963–1965 гг. в процессе студенческих практик Свердловского горного института, а в 1970–1973 гг. и 1984–1987 гг. во время работы в Дальневосточном институте минерального сырья (ДВИМС, г. Хабаровск) с месторождениями Приморского края.

На Малом Хингане разведано пять оловорудных месторождений: Хинганское, Берёзовое, Олонойское, Карадубское и Джалиндинское (рис. 1). Геология и минеральный состав месторождений (без месторождения Берёзовое) обобщены в монографии «Оловорудные месторождения Малого Хингана» (Ициксон и др., 1959). Касситерит месторождения Хинганское промышленно добывался комбинатом «Хинганолово», а небольшие месторождения (Берёзовое, Олонойское, Карадубское и Джалиндинское) почти не отрабатывались из-за бедных руд с преобладанием микрозернистого или колломорфного касситерита («деревянистого олова»). На востоке Хабаровского края в процессе поисковых работ 1974–1977 гг. выявлены Правоурмийское месторождение (в настоящее время отрабатывается) в юго-западных отрогах Баджальского хребта, а также крупная россыпь касситерита по р. Мерек (рис. 2).

В Приморском крае на западном склоне хребта Сихотэ-Алинь в Арминском рудном районе известно 34 месторождения олова и вольфрама, а также около 200 рудопроявлений и ряд россыпей, открытых в XX в. Наиболее продуктивны месторождения Тигриное, Забытое и Усть-Микулинское, а менее богатые – Зимнее (рис. 3) и Шибановское (рис. 4).

В процессе разведки и отработки перечисленных месторождений главной целью являлись количество и качество руды, а состав минералов был охарактеризован, в основном, по результатам «валовых» химических и спектральных анализов.

Ранее нами на оловорудных месторождениях Приамурья и Приморья была собрана рабочая коллекция образцов руд, исследованных только частично. Наибольший интерес вызывали не только редкие и впервые встреченные минералы во вмещающих породах и рудах, но и рудные минералы – касситерит и вольфрамит. Во второй половине XX в. на всех перечисленных месторождениях минералы были изучены преимущественно в монофракциях методами мокрой химии и приближенно-количественного спектрального анализа. Получение чистых мономинеральных фракций практически невозможно, поэтому достоверность результатам анализов была невысокой. Возникла неопределенность в их использовании для расчетов изоморфной емкости минералов или для типоморфического моделирования. Для разработки улучшенной технологии обогащения минерального сырья желательное доизучение анатомической картины индивидов касситерита, вольфрамита и других минералов. В 2024–2025 гг. нами изучен состав касситерита и минералов группы вольфрамита, включений в них сингенетичных или поздних минералов из месторождений Приамурья и Приморья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из нашей коллекции для исследования использованы 28 препаратов из 15 образцов с касситеритом и вольфрамитом из руд месторождений Хинганское (3 образца), Мерекское (6), Правоурмийское (1), Тигриное (1), Забытое (1) и Шибановское (3). Относительно крупные кристаллы воль-



Рис. 1. Местонахождение оловорудных месторождений на Малом Хингане.

1 – кварцевые порфиры и порфиристы; 2 – гранит-порфиры; 3 – серицит-кварцевые породы; 4 – оловорудные месторождения.

Fig. 1. Position of the Maly Khingan tin deposits.

1 – quartz porphyry and porphyrite; 2 – granite porphyry; 3 – sericite-quartz rocks; 4 – tin deposits

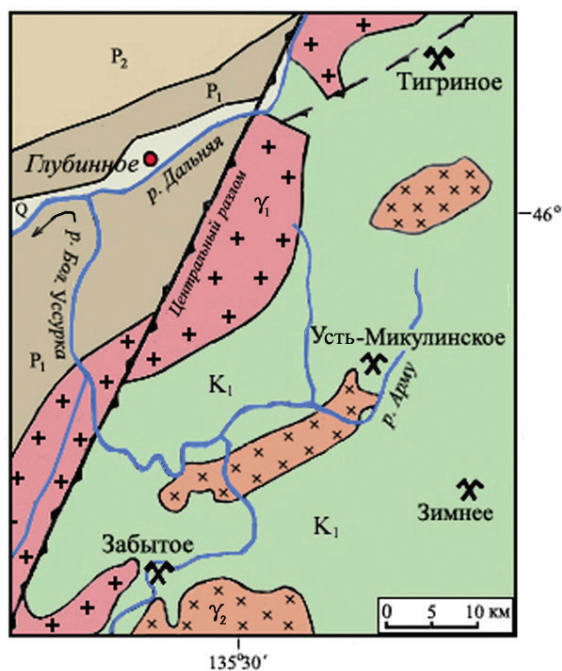


Рис. 3. Локализация оловорудных месторождений Приморья в осадочных породах (K_1) с интрузиями гранит-порфиров Излучинского массива (γ_1) и гранитоидов Приисковского массива (γ_2) в восточной зоне Центрального Сихотэ-Алиньского разлома, отделяющего блок вулканогенно-осадочных пород (P_{1-2}).

Fig. 3. Localization of Primorye tin deposits in sedimentary rocks (K_1) with intrusions of granite porphyry of the Izluchinsky pluton (γ_1) and granitoids of the Priiskovy pluton (γ_2) in the eastern zone of Central Sikhote-Alin Fault, which divides a block of volcanosedimentary rocks (P_{1-2}).



Рис. 2. Положение Правуормийского и Мерекского оловорудных месторождений в субщелочных гранитах Баджалского и Дуссе-Алиньского рудных районов.

Fig. 2. Localization of the Pravy Urmiy and Meretsk tin deposits in subalkali granites of the Badzhal and Dusse-Alin ore regions.



Рис. 4. Местонахождение Шибановского месторождения с Sn-W россыпями в пойме руч. Шибановского среди гранитов (γP_2) с пегматитами (γPg) и щелочных сиенитов (P) на юге Приморья, с упрощением по (Степнова, 2013).

Fig. 4. Location of the Shibanovskoye deposit with Sn-W placers in the floodplain of the Shibanovskiy Creek in granite (γP_2) with pegmatite (γPg) and alkali syenite (P) in South Primorye, simplified after (Stepnova, 2013).

фрамита отобраны из Мерекской россыпи и месторождения Забытое.

Кристаллы касситерита и вольфрамитов распилены параллельно или перпендикулярно оси [001], из них пять крупных – на две части. Химический состав минералов и включений в них исследован в Южно-Уральском федеральном научном центре минералогии и геоэкологии УрО РАН (г. Миасс) с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Vega-3 Tescan с энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) Oxford Instruments X-act (аналитик И.А. Блинов). Параметры анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, время набора спектра 120 с, мертвое время 10–15 %, ток эмиссии 75 мкА, набор и расчет спектров проводился с помощью программы Inca 5.02. При анализе использовались следующие стандарты для сульфидов: S (K линия) – пирит, сфалерит и арсенопирит для соответствующих минералов, Fe (K линия) – пирит для пирита и сфалерита, арсенопирит для арсенопирита и леллингита, халькопирит для халькопирита и станнина, Mn (K линия) – металлический марганец, Zn (K линия) – сфалерит, As (K линия) – арсенопирит, Cd (L линия) – металлический кадмий, Cu (K линия) халькопирит, Sn (L линия) – металлическое олово, Bi (L линия) – металлический висмут, Pb (L линия) – галенит, Sb (L линия) – стибнит, In (L линия) – металлический индий; для флюорита – F, Ca (K линия) – флюорит, Y (L линия) – ксенотим, Sr (L линия) – SrF_2 ; для оксидов: Sn (L линия) – металлическое олово, Fe (K линия) – гематит, Mn (K линия) – металлический марганец, W, Nb, Ta, Sc (L линия) – соответствующие металлы, Ti (K линия) – рутил.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Касситерит и вольфрамит оловорудных месторождений Приамурья

Хинганское оловорудное месторождение расположено вблизи пос. Хинганск, в 20 км к ССВ от железнодорожной станции Облучье (рис. 1). В результате поисковых работ 1943–1947 гг. контуры перспективных касситеритосодержащих площади (Ициксон и др., 1959). Хинганское месторождение выявлено по результатам шлихового опробования в 1944 г. В геологическом отношении месторождение находится в Хингано-Олонойском прогибе в северной части Малого Хингана и локализовано в крупных телах «взрывных» брекчий гранит-порфиров, включающих многочисленные

рудные жилы и прожилки; предполагалась тектоническая природа брекчий (Ициксон и др., 1959). Позднее шахтным геологом Е.Я. Синяковым (1975) также отмечалось, что эти брекчии тектонические – без признаков импактного метаморфизма, обычного при взрыве. Рудные тела месторождения – субвертикальные трубообразные штокверки протяженностью до 10–420 м и более в гранит-порфирах и риолитах. Геологами комбината «Хинганолово» выявлена многоэтажность месторождения на глубину более 800 м (Попова, Синяков, 1978). В 2006 г. добыча руды была прекращена. Гигантские оловорудные отвалы Хинганского месторождения с 2014 г. обрабатывались международной компанией ООО «Ресурсы Малого Хингана».

Касситерит в рудных прожилках составлял 10–23 % объема и ассоциировал с флюоритом, кварцем, железистым хлоритом, калиевым полевым шпатом (адуляром) и мусковитом при содержании сульфидов 2–3 %, включая станнин (Попова, Синяков, 1978). В зальбандах рудных прожилков секториальные кристаллы касситерита размером до 1–3 мм образуют сростки двойников, тройников и шестерников до 2–4 мм с вариациями желтовато-коричневатого и оранжево-коричневого цвета. Касситерит содержал включения сопутствующих минералов (Ициксон и др., 1959). Спектральным анализом в касситерите отмечались примеси Fe и W (до 1–3 мас. %) и In (Ициксон и др., 1959); средний состав касситерита близок формуле $(\text{Sn}_{0.98}\text{Fe}_{0.01})\text{O}_2$. Нами исследованы образцы из полиминеральных прожилков штольни № 7 в штреке 17 на глубине 77 м и в штреке № 25 – на глубинах 209 м и 240 м от устья штольни.

Образец № 7-17-77 (рис. 5) представлен агрегатом кварца с железистым гюбнеритом $(\text{Mn}_{0.57}\text{Fe}_{0.43})_{1.00}(\text{WO}_4)$ (e, i: здесь и далее латинские буквы обозначают точки анализов на соответствующих рисунках), топазом $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)\text{F}_2$ (j), мусковитом $(\text{K}_{0.89}\text{Mg}_{0.11})_{1.00}(\text{Al}_{1.43}\text{Mg}_{0.36}\text{Fe}_{0.28}\text{Mn}_{0.04}\text{Ti}_{0.01})_{2.12}((\text{Si}_{3.40}\text{Al}_{0.60})_{4.00}\text{O}_{10})[(\text{OH})_{1.17}\text{F}_{0.83}]_{2.00}$ (n), фторapatитом $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}_{1.02}$ (f), рутилом $(\text{Ti}_{0.96}\text{Ta}_{0.02}\text{W}_{0.01}\text{Fe}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (o), цирконом $\text{Zr}(\text{SiO}_4)$ (m), монацитом $(\text{Ce}_{0.38}\text{La}_{0.21}\text{Ca}_{0.12}\text{Th}_{0.12}\text{Nd}_{0.10}\text{Pr}_{0.04}\text{U}_{0.01})_{0.98}\text{O}_4$ (q), флюоритом CaF_2 (r), галенитом PbS (u), герсдорфитом $\text{Ni}(\text{AsS})$ (v), сфалеритом $(\text{Zn}_{0.88}\text{Fe}_{0.11}\text{Mn}_{0.01})_{1.00}$ S (d), $(\text{Zn}_{0.94}\text{Fe}_{0.06}\text{Mn}_{0.01}\text{Cd}_{0.01})_{1.02}$ S (h, i), леллингитом $\text{Fe}(\text{As}_{1.92}\text{S}_{0.08})_{2.00}$ (a), арсенопиритом $\text{Fe}_{1.02}\text{As}_{1.02}\text{S}_{1.00}$ (b) и $\text{Fe}_{1.00}\text{As}_{1.02}\text{S}_{0.98}$ (l), станнином $\text{Cu}_{1.95}(\text{Fe}_{0.81}\text{Zn}_{0.22})_{1.03}\text{Sn}_{1.04}\text{S}_4$ (g), самородным висмутом (c) и редкими микрозернами касситерита.

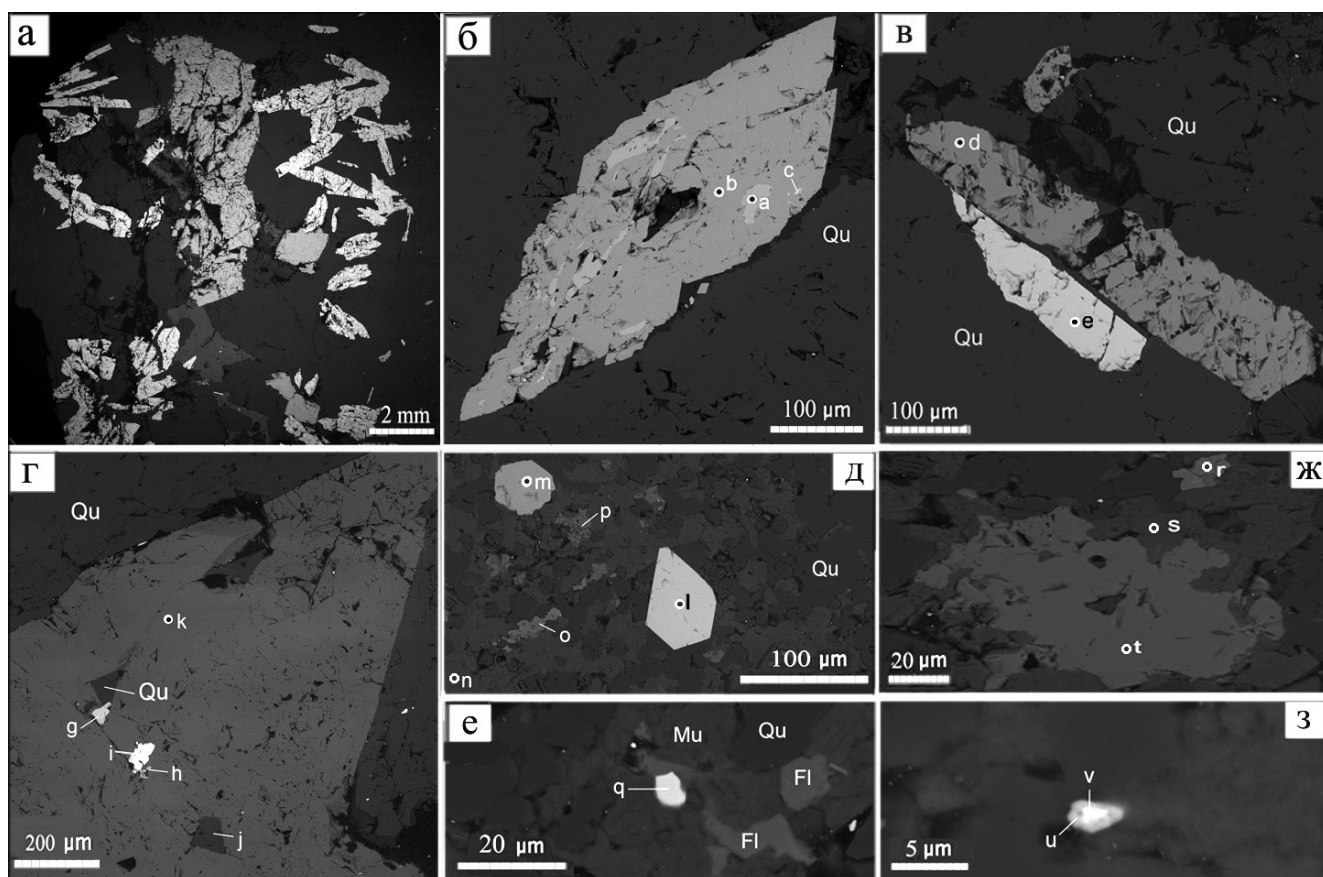


Рис. 5. Парагенезисы минералов в кварцевых жилах.

Обр. № 7-17-77 (а) и участки анализа минералов (б–з) из Хинганского месторождения. Здесь и на рис. 6, 7, 11в, 12–24, 27–30, BSE фото.

Fig. 5. Mineral assemblages in quartz veins.

Sample no. 7-17-77 (a) and analytical areas (б–з) from the Khingan deposit. Here and in Figs. 6, 7, 11в, 12–24, and 27–30, BSE image.

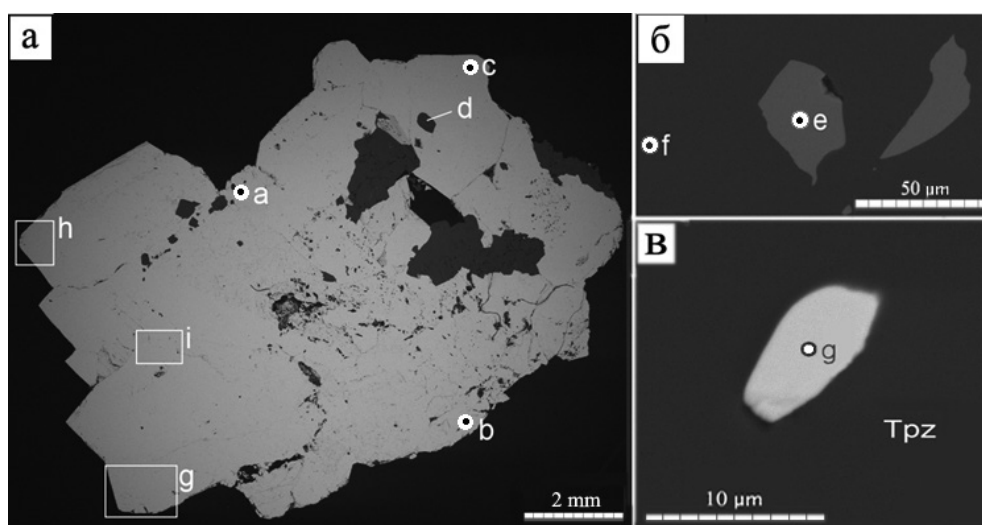


Рис. 6. Касситерит из штольни № 7 Хинганского месторождения (а) и детали его проанализированных участков (б, в).

Fig. 6. Cassiterite from adit no. 7 of the Khingan deposit (a) and details of its analyzed areas (б, в).

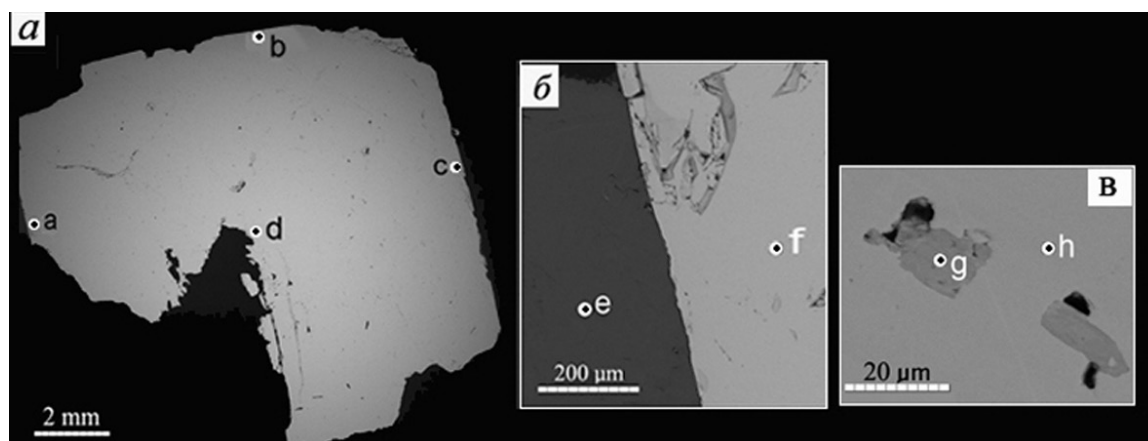


Рис. 7. Кристаллы касситерита в сечении перпендикулярно оси [001] (а) и детали его участков (б, в) из штольни № 7 Хинганского месторождения.

Fig. 7. Cassiterite crystal in section perpendicular to [001] axis (a) and details of its areas (б, в) from adit no. 7 of the Khinggan deposit.

Касситерит из штольни № 7 (рис. 6) содержит в составе (мас. %): SnO_2 96.39–98.05; Ta_2O_5 0.58–0.88; TiO_2 0.59–0.73; Nb_2O_5 0–0.54; WO_3 0.24–0.44; FeO 0.00–0.31; Σ 99.23–99.56. Расчетные формулы состава касситерита: $(\text{Sn}_{0.98}\text{Ti}_{0.01}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (а), $(\text{Sn}_{0.97}\text{Ti}_{0.01}\text{Ta}_{0.01})_{0.99}\text{O}_2$ (б) и $(\text{Sn}_{0.99}\text{Ti}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (с). В агрегате присутствует топаз $\text{Al}_{2.09}(\text{SiO}_4)[\text{F}_{1.49}(\text{OH})_{0.51}]_{2.00}$ (d) и $\text{Al}_{2.05}(\text{SiO}_4)[\text{F}_{1.52}(\text{OH})_{0.48}]_{2.00}$ (f). В топазе выявлены включения железистого гюбнерита $(\text{Mn}_{0.60}\text{Fe}_{0.40})_{1.00}(\text{WO}_4)$ (g), сфалерита $(\text{Zn}_{0.92}\text{Fe}_{0.07})_{0.99}\text{S}$ (h) и триплита $(\text{Mn}_{1.51}\text{Fe}_{0.30}\text{Mg}_{0.13})_{1.94}(\text{PO}_4)[\text{F}_{0.84}(\text{OH})_{0.16}]_{1.00}$ (e).

Касситерит из штольни № 25 (рис. 7) с примесями Ta, Ti, Nb и W характеризуется следующими формулами: $\text{Sn}_{1.00}\text{O}_2$ (а, б), $(\text{Sn}_{0.99}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (с, f), $(\text{Sn}_{0.96}\text{Ti}_{0.03}\text{Ta}_{0.01}\text{Nb}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$ (d) и $(\text{Sn}_{0.97}\text{Ti}_{0.02}\text{Fe}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (h). С касситеритом ассоциирует железистый мусковит $(\text{K}_{0.92}\text{Mg}_{0.08})_{1.00}(\text{Al}_{1.54}\text{Fe}_{0.36}\text{Mn}_{0.07}\text{Mg}_{0.03})_{2.00}((\text{Si}_{3.26}\text{Al}_{0.74})_{4.00}\text{O}_{10})[(\text{OH})_{1.53}\text{F}_{0.47}]_{2.00}$ (e) и колумбит-Мн $(\text{Mn}_{0.65}\text{Fe}_{0.35})_{1.00}(\text{Nb}_{1.28}\text{Ta}_{0.28}\text{W}_{0.23}\text{Ti}_{0.20})_{1.99}\text{O}_6$ (g).

Вольфрамит темно-коричневого и черного цвета встречался в прожилках в парагенезисе с касситеритом, железистым хлоритом, кварцем и сульфидами в виде веерообразных агрегатов таблитчатых кристаллов до 1–2 см, содержащих ~10 мас. % Fe, менее 1 % Mn, малые примеси Sn, Pb и микровключения шеелита (Ищиксон и др., 1959). Позднее встречен ферберит с расчетной формулой $(\text{Fe}_{0.90}\text{Fe}^{3+}_{0.05}\text{Mn}_{0.04})_{0.99}(\text{WO}_4)$ и микропримесями Ti, Mg, Ca и Sc. В касситерите нами выявлено сингенетичное микровключение железистого гюбнерита $(\text{Mn}_{0.61}\text{Fe}_{0.34})_{0.95}(\text{WO}_4)$ (g) (рис. 7в).

Берёзовое оловорудное месторождение открыто в 1961 г. близ станции Облучье ДВЖД,

в 10 км юго-западнее месторождения Хинганское (рис. 1). Месторождение содержит линзовидные тела касситеритсодержащих метасоматитов СЗ и ССВ простираения в зонах слабо окварцованных, серицитизированных и хлоритизированных риолитов и гранит-порфиров (K_2). К протяженной субмеридиональной зоне Обещающая (~1500 м) с СВ на ЮЗ примыкают зоны Малютка, Средняя, Бархатная, Третья и Четвёртая (длиной до 100–400 м). В этих зонах выявлены касситерит-кварцевые и касситерит-топаз-кварцевые рудные тела длиной до 200–250 м мощностью 0.5–4.0 м, прослеженные на глубину более 600 м. В 2019 г. компанией «Ресурсы Малого Хингана» получена лицензия на разработку месторождения.

В 1970–1972 гг. в рудных зонах частично исследована минералогия руд и окколорудных метасоматитов (Попова, 1980) и выявлены касситерит-кварцевые прожилки выполнения полостей трещин (рис. 8а) с обрастанием касситерита двойниками флюоцерита-(Ce) $(\text{Ce}_{0.44}\text{La}_{0.21}\text{Nd}_{0.20}\text{Pr}_{0.05}\text{Y}_{0.04}\text{Sm}_{0.03}\text{Gd}_{0.02}\text{Dy}_{0.01})_{1.00}\text{F}_3$ до 0.5 мм (Попова, Баженова, 1976), пересекаемые поздними сульфидно-кварцевыми жилками.

Касситерит в кварцевых метасоматитах зоны Обещающая распределен неравномерно; размер зерен и комплексных двойников варьирует от 0.001–0.200 мм до 1 мм. Монокристаллы касситерита редки, их облик варьирует от субизометричного до короткопризматического и призматического с преобладанием комплексных двойников и зональных сферолитов (рис. 8). Прожилки выполнения полостей, содержащие касситерит, наиболее часто встречались в участках максимального оруденения,

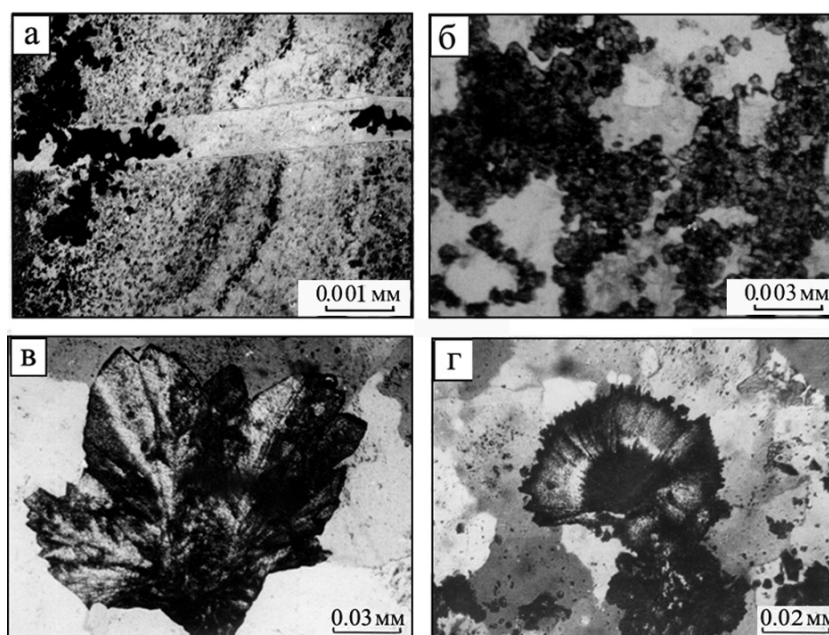


Рис. 8. Агрегаты касситерита (а, б), комплексный сросток касситерита (в) и зональный сферолит «деревянистого» касситерита (г) из месторождения Берёзовое.

Fig. 8. Cassiterite aggregates (a, б), complex cassiterite intergrowth (в), and zoned spherulite of “woody” cassiterite (г) from the Berezovoe deposit.

где в пробе по керну скважин среднее содержание касситерита составляло ~1.45 %, кварца ~80 %, мусковита ~15 %, топаза ~1.43 %, флюорита ~0.8 %. Прочие минералы включают арсенопирит, борнит, галенит, пирит, сфалерит, халькозин, халькопирит, хлорит, адуляр, вольфрамит, кальцит, каолинит, лимонит, монацит, пирротин, станнин, скородит, турмалин, циркон.

По результатам выполненного ранее фазового анализа проб из руд месторождения около ~90 % олова находится в кристаллическом касситерите, ~9 % – в станнине и ~1 % – в «коллоидном олове» в участках с «деревянистым» касситеритом. Вариации химического состава касситерита составили (мас. %): Sn 74–76, Fe 0.4–0.6, W 0.01–0.20 (аналитики И.К. Клочков и В.Ю. Гурьянов) с рассчитанной нами формулой среднего состава касситерита $(\text{Sn}_{0.98}\text{Fe}_{0.01})_{0.99}\text{O}_2$. Спектральным анализом в порошковых пробах выявлены примеси Nb 0.001–0.020, In 0.002–0.06 и Sc 0.002–0.01 мас. % (аналитик А.И. Пермина). Ферберит в рудных телах Берёзового месторождения редкий и мелкий (~0.01 мм), по составу $(\text{Fe}_{0.91}\text{Mn}_{0.09})_{1.00}(\text{WO}_4)$ близок вольфрамиту месторождения Хинганское.

Карадубское оловорудное месторождение выявлено в 1952 г. Н.Н. Никулиным при геологической съемке в 10 км южнее пос. Кульдур, в 20 км севернее Олонойского месторождения (рис. 1).

На месторождении выявлены сближенные рудные участки Верхний, Нижний, Обещающий, Каменистый, Холодный и Лесной в кварцевых порфирах (K_{1-2}) (Ициксон и др., 1959) с дайками плагиоклазовых и диабазовых порфиритов и интрузиями гранит-порфиров. Месторождение разведано скважинами колонкового бурения и штольнями на трех горизонтах. Участки Нижний и Каменистый были перспективнее, чем участок Обещающий. Позднее эти участки рассматривались как рудопроявления Карадубского рудного поля СЗ простирания на площади ~15 км². Содержания касситерита (до 0.08 мас. %) отмечались в каолинит-топаз-кварцевых породах (Крюков и др., 1988). Главные минералы руд – касситерит, кварц, мусковит (серицит), топаз, турмалин; менее распространены флюорит, каолинит, редкий вольфрамит и сульфиды (с преобладанием арсенопирита). В 2013 г. месторождение было куплено ООО «Эко-Тех-Эм» (интернет-данные).

Касситерит в рудах месторождения мелкокристаллический, коричневый и темно-коричневый, часто в агрегатах с сопутствующими силикатами. Состав образца № 40 темно-коричневого касситерита (мас. %): SnO₂ 96.55; Fe₂O₃ 1.40; FeO 0.11; TiO₂ 0.09; MnO 0.01; WO₃ 0.18; Nb₂O₅ 0.01; SiO₂ 1.80; Al₂O₃ 0.16; ZrO 0.06; CaO 0.05; MgO 0.05, Σ = 99.53. Рассчитанная нами формула за вычетом компонентов силикатов и оксидов Zr, Ca и Mg $(\text{Sn}_{0.97}\text{Fe}^{3+}_{0.03})_{1.00}\text{O}_2$.

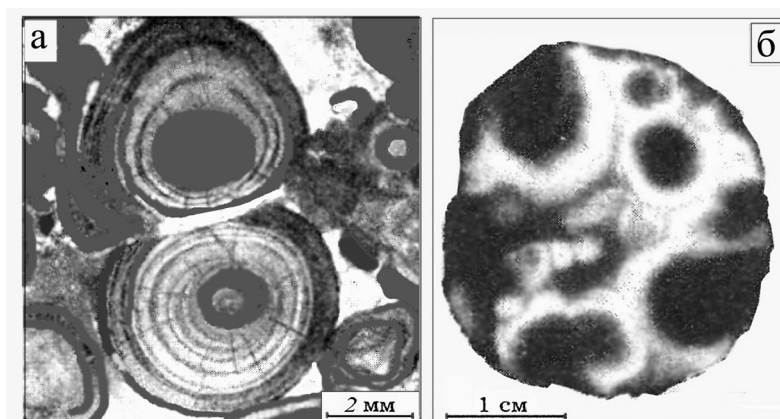


Рис. 9. Сечения «деревянистого» касситерита (а, фото) и их нейтронно-активационная радиография (б), Джалиндинское месторождение.

Fig. 9. Cross-sections of “woody” cassiterite (a) and their neutron activation radiography (б), Dzhalinda deposit.

Вольфрамит в рудах редкий и мелкий, железосодержащий, по спектрограмме близок фербериту.

Джалиндинское месторождение «деревянистого» касситерита (рис. 1) выявлено в 12 км севернее Карадубского месторождения в 1952 г. П.Н. Кошманом в процессе съемочно-поисковых работ и разведано в 1952–1954 гг. П.Н. Кошманом с В.А. Кузьмичёвым и Р.П. Феклович (Ициксон и др., 1959). Месторождение локализовано в кварцевых порфирах и включает три основных участка: Центральный (собственно Джалиндинское месторождение), участок Восточный и аллювиальную россыпь ключей Богатый и Маристый. Участки в форме линз и «гнезд» размером до 30 см обогащены «деревянистым» касситеритом и тонкодисперсной его разновидностью (как на месторождении Берёзовое). В элювиально-делювиальной россыпи северной части Центрального участка руда с содержанием «деревянистого» касситерита более 100 г на 1 м³ прослежена на глубину до 20–30 м.

Касситерит «деревянистый» в кварцевых метасоматитах образует жилообразные концентрически-зональные скопления (рис. 9а) с вариацией коричневых, светло-коричневых и почти белых зон, контрастно различающихся на радиографии (рис. 9б) после облучения потоком тепловых нейтронов. Были встречены тонкодисперсные порошковые скопления касситерита, облекающие более ранние концентрически-зональные «овоиды» до 2–5 мм. Состав «овоидов» неоднородный с содержанием SnO₂ 94–96 мас. % и вариациями примесей компонентов вмещающих силикатов.

Правоурмийское W-Sn месторождение открыто в 1974–1975 гг. в Верхнебуреинском районе Хабаровского края, в 117 км от ж.-д. станции Сулук

(БАМ) в Баджалском рудном районе восточной части Верхнеурмийского рудного узла (рис. 2). Рудные тела локализованы в висячем контакте дайки гранит-порфиоров (Богданов и др., 1979; Банщикова, Крюкова, 1988). Месторождение отрабатывается с 1990 г. и включает касситерит-топаз-кварцевые и касситерит-сидерофиллит-кварц-топазовые грейзены с вольфрамитом по риолитовым игнимбритах в экзоконтактной зоне Верхнеурмийского гранитного массива (K₁₋₂) (Погребс, 1993). Месторождение с 1990 г. отрабатывали артель «Амгунь», в 1995–1998 гг. – АО «Горнорудная компания Солнечная», «Дальневосточная горная компания», ООО «Востоколово» и по настоящее время – ООО «Правоурмийское».

В формировании месторождения выделены два этапа (Семеняк и др., 2006): 1 – молибденит-полевошпат-кварцевый с шеелитом, сидерофиллитом, топазом, флюоритом и малыми количествами вольфрамитов и касситеритов; 2 – грейзеновый этап, включавший стадии касситерит-полевошпат-кварцевую с вольфрамитом, кварц-турмалин-сульфидную, эпидот-хлоритовую с мусковитом, турмалином, карбонатами, сульфидами, а также позднюю карбонатно-кварцевую. Отдельно был выделен кварц-антимонитовый «этап» с малыми количествами тетраэдрита, хлорита, эпидота, мусковита, карбоната и флюорита. Кварц-топазовые жилки с касситеритом, вольфрамитом и лёллингитом преимущественно локализованы в породах сидерофиллит-кварц-топазовой стадии. С касситеритом установлены сингенетичные фергусонит-(Y), эвксенит-(Y), плюмбопирохлор и хедлейит (Алексеев и др., 2019).

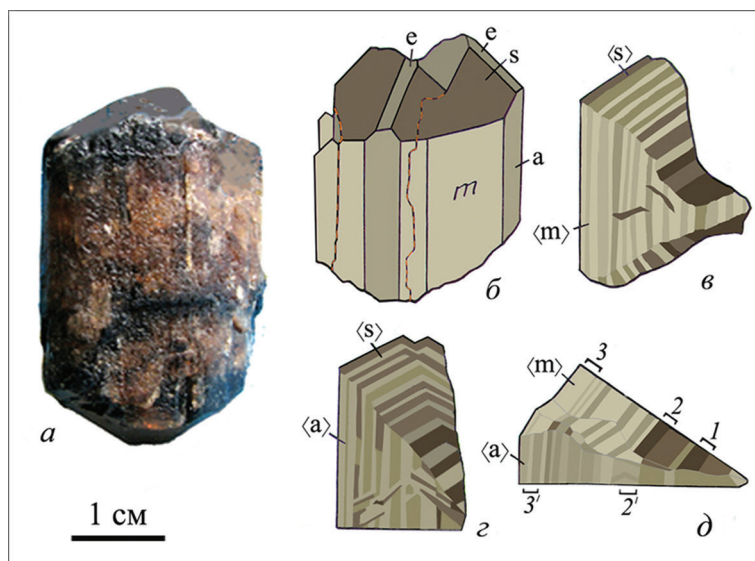


Рис. 10. Кристаллы касситерита из Мерекской россыпи (а, фото) и зарисовка кристалла № 1-85 (б) и его зонально-секториальных сечений (в–д).

Fig. 10. Cassiterite crystals from the Merek placer (a, photo) and a sketch of crystal no. 1-85 (б) and its zoned-sectorial sections (в–д).

Касситерит из жил и прожилков коротко-призматический размером 0.2–16.0 мм, часто в виде комплексных двойников. Средние содержания элементов в касситерите по 134 пробам составили (мас. %): W 0.057; Nb 0.028; In 0.006; Sc 0.0027 (Погребс, 1993), что отвечает расчетной формуле $(\text{Sn}_{0.93}\text{Nb}_{0.04}\text{W}_{0.04})_{1.00}\text{O}_2$.

Вольфрамит в прожилках относительно ранний, нередко рассекается касситерит-топазовым агрегатом. Были встречены жилы мощностью до 10–40 см с крупнокристаллическим вольфрамитом с составом (среднее для пяти проб, мас. %): MnWO_4 36.0; Sn 0.095; Nb 0.086; Sc 0.017; Y 0.014 (Погребс, 1993), что при расчетном FeWO_4 ~63.79 мас. % отвечает фербериту $(\text{Fe}_{0.64}\text{Mn}_{0.36})_{1.00}(\text{WO}_4)$.

Мерекское месторождение представляет собой W-Sn россыпь на р. Мерек (левый приток р. Амгунь). Было выявлено в 1974 г. на стыке Буринского и Дуссе-Алиньского хребтов, в 120 км на З-СЗ от Комсомольска-на Амуре и в 80 км западнее оз. Эворон (рис. 2). Россыпь образована продуктами деструкции вольфрамит-касситерит-кварцевых жил в гранитоидах и метаосадочных породах K_{1-2} . Россыпь была отработана в 1975–1978 гг. артелями старателей.

Касситерит из Мерекской россыпи преимущественно крупный (до 5–7 см), короткопризматический ($c/a \sim 1.25$), с гранями форм $m\{110\}$, $a\{100\}$, $s\{111\}$, $e\{101\}$ (рис. 10а, б; кристалл № 1-85 из кол-

лекции В.М. Коропа). В разных сечениях кристаллов и сростков касситерита отчетливо проявлена зонально-секториальная неоднородность (Попова, Тимошин, 1987). Темно-коричневые зоны характерны для «центральных» зон пирамид роста m , s , менее темные – для средних и периферических зон, а наиболее светлые – для периферических зон призмы m (рис. 10б–д).

Ранее по данным спектрального анализа разных зон касситерита отмечалось, что темные зоны содержат почти в 10 раз больше микропримесей (среднее из восьми анализов, мас. %): Ti 0.30; Ta 0.00–0.05; Zr 0.05; W 0.00–0.03; Fe 0.01; Nb 0.003; In 0.0005; Sc 0.0005 (Косовец, Ставров, 1983), что при расчетном содержании Sn ~99.606 мас. % отвечает формуле $(\text{Sn}_{0.93}\text{W}_{0.04}\text{Nb}_{0.04})_{1.00}\text{O}_2$. Последовательные нейтронографии сечения препарата касситерита через 1.5 часа (рис. 10а) и через 9.5 часов (рис. 11б) после облучения в реакторе потоком тепловых нейтронов отличаются картинками секториальности и количеством зон. В этом препарате определены соотношения изотопов разных участков касситерита (относительно «стандарта» $^{120}\text{Sn}/^{122}\text{Sn} = 6.96$): в дипирамиде $s\{111\}$ соотношение $^{120}\text{Sn}/^{122}\text{Sn} \sim 4.5$, в призмах $m\{110\}$ и $a\{100\} \sim 6$ (Попова, Тимошин, 1987). «Головка» кристалла касситерита содержит примеси Ta_2O_5 0.52–0.83 мас. %, реже – WO_3 0.42–0.52 мас. %. Зоны дипирамиды $s\{111\}$ и призмы $m\{110\}$ (рис. 11в) близки по соста-

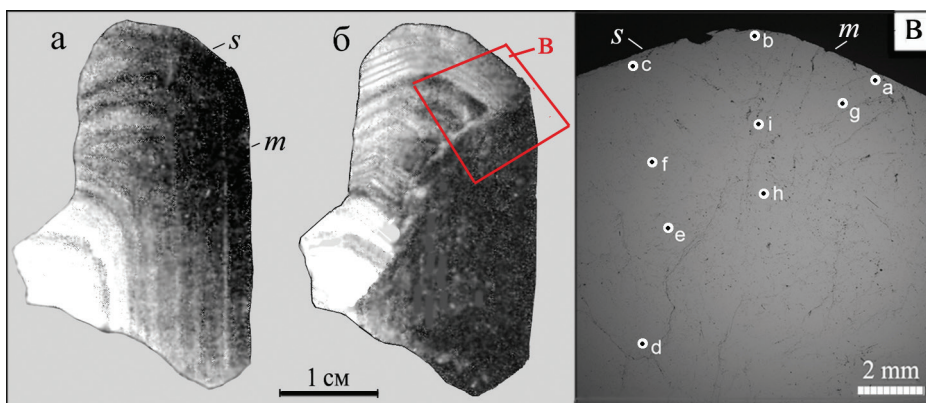


Рис. 11. Последовательная нейтронография зонально-секториального касситерита № 1-85 (а, б) и участка анализа (в) кристалла из Мерекской россыпи.

Fig. 11. Sequential neutronography of zoned-sectoral cassiterite no. 1-85 (a, б) and analytical area (в) of the crystal from the Merék placer.

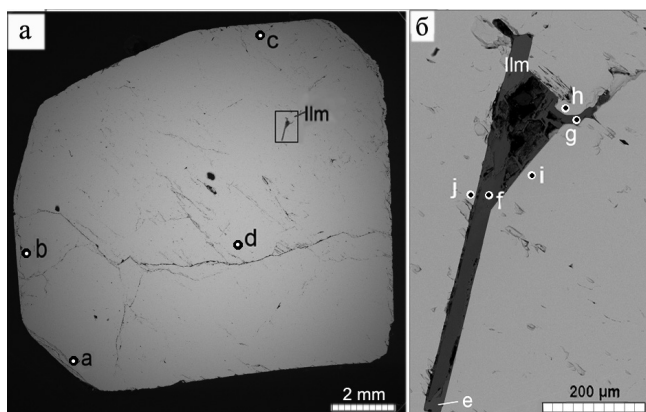


Рис. 12. Поперечное сечение кристалла касситерита № 91/86 из Мерекской россыпи (а) с включениями ильменита (Ilm, е) и рутила (f) (б).

Fig. 12. Cross-section of cassiterite crystal no. 91/86 from the Merék placer (a) with inclusions of ilmenite (Ilm, e) and rutile (f) (б).

ву с формулами: $\text{Sn}_{1.00}\text{O}_2$ (a, b, d), $(\text{Sn}_{1.00}\text{Ta}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$ (c, e, f, g, h) и $\text{Sn}_{0.99}\text{O}_2$ (i), отличаясь от картины нейтронографии. В касситерите выявлены включения железистого мусковита $(\text{K}_{0.82}\text{Na}_{0.05}\text{Mg}_{0.03})_{0.95}(\text{Al}_{1.83}\text{Fe}_{0.26}\text{Mn}_{0.03}\text{Ti}_{0.01})_{2.13}((\text{Si}_{3.15}\text{Al}_{0.85})_{4.00}\text{O}_{10})((\text{OH})_{1.80}\text{F}_{0.20})_{2.00}$ (j) размером до 0.02–0.80 мм.

Касситерит № 91/86 в сечении $\perp[001]$ (рис. 12а) с примесями Ti, Ta и W характеризуется следующими формулами: а – $\text{Sn}_{1.00}\text{O}_2$, б – $(\text{Sn}_{0.98}\text{W}_{0.01}\text{Ti}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$, с – $(\text{Sn}_{0.99}\text{Ti}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$, д – $(\text{Sn}_{0.99}\text{W}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$. В трещинах касситерит содержит микровключения ильменита $(\text{Fe}_{0.85}\text{Mn}_{0.13})_{0.98}\text{Ti}_{1.02}\text{O}_3$ (е), рутила $(\text{Ti}_{0.96}\text{Fe}_{0.02}\text{W}_{0.02})_{1.00}\text{O}_2$ (f) и гётита (g) (рис. 11б).

Касситерит № 91/86а (рис. 13) характеризуется формулами $(\text{Sn}_{0.99}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (d) и $(\text{Sn}_{0.98}\text{Fe}_{0.02})_{1.00}\text{O}_2$ (g) и содержит включения мусковита переменного состава $(\text{K}_{0.94}\text{Na}_{0.03})_{0.97}(\text{Al}_{1.67}\text{Fe}_{0.27}\text{Mg}_{0.04}\text{Mn}_{0.03}\text{Ti}_{0.01})_{2.02}((\text{Si}_{3.17}\text{Al}_{0.83})_{4.00}\text{O}_{10})((\text{OH})_{1.68}\text{F}_{0.32})_{2.00}$ (a) и $(\text{K}_{0.92}\text{Na}_{0.06})_{0.98}(\text{Al}_{1.46}\text{Fe}_{0.51}\text{Mn}_{0.03})_{2.00}((\text{Si}_3\text{Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ (c). Трещины в касситерите нередко заполнены агрегатом лимонита с глиной и хлоритом (e, f) с реликтами кварца и силикатов (рис. 13б).

Касситерит № 92/86 в сечении $\wedge[001]$ призматического кристалла (рис. 14) содержит небольшие примеси Ta, W и характеризуется близким составом: $\text{Sn}_{0.99}\text{O}_2$ (a, b) и $(\text{Sn}_{0.99}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (c).

Касситерит № 93/86а (рис. 15) представляет собой часть крупного деформированного кристалла в сечении $\perp[001]$ с серией поздних трещин с рутилом $(\text{Ti}_{0.97}\text{Fe}_{0.03})_{1.00}\text{O}_2$ (g) и лимонитом (j) с кварцем. Состав касситерита характеризуется формулами в участках: $(\text{Sn}_{0.99}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (a, b, c, e), $\text{Sn}_{1.00}\text{O}_2$ (d) и $(\text{Sn}_{0.98}\text{Ti}_{0.01}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (f), где точки a, b, c дипирамиды $s\{111\}$ немного однороднее точек d, e, f призмы $m\{110\}$.

Касситерит № 93/86б – вторая часть этого кристалла в сечении $\perp[001]$ с вариациями состава (мас. %): SnO_2 99.07–100.22; Ta_2O_5 0.47–0.84; WO_3 0.00–0.45; TiO_2 0.00–0.24; Σ 99.98–100.73. Состав касситерита «центральной» части (рис. 16а) характеризуется формулой $\text{Sn}_{1.00}\text{O}_2$ (g), в «средних» участках – $(\text{Sn}_{0.99}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (f, h), а относительно поздний Ti-содержащий участок – $(\text{Sn}_{0.99}\text{Ta}_{0.01}\text{Ti}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$ (e). Периферические зоны в точках a, b, c, d близки по

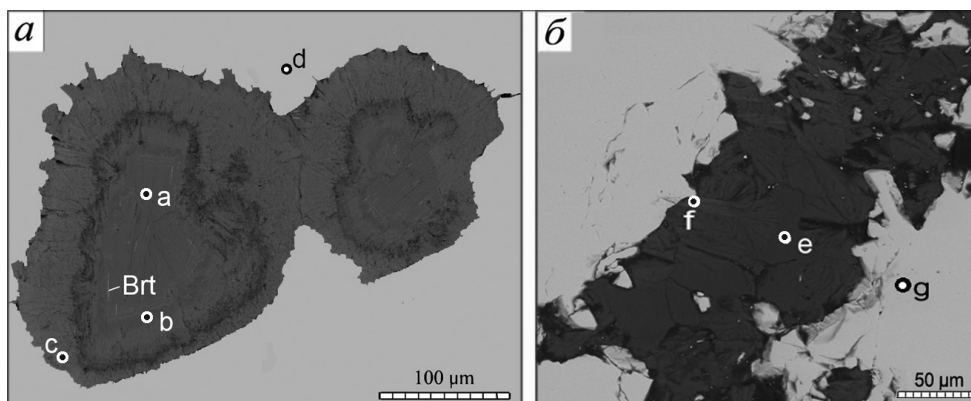


Рис. 13. Касситерит (d, g) с включениями мусковита (a, b, c) с баритом (Brt) и Fe-хлоритом в обр. № 91/86а из Мерекской россыпи.

Fig. 13. Cassiterite (d, g) with inclusions of muscovite (a, b, c) and barite (Brt) and Fe-chlorite in sample no. 91/86a from the Merek placer.

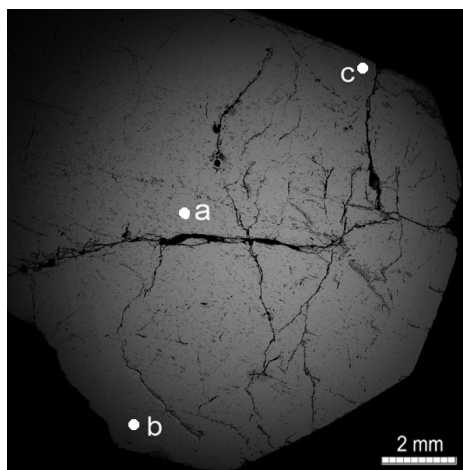


Рис. 14. Сечение $\perp$ [001] касситерита № 92/86 из Мерекской россыпи.

Fig. 14. Cross-section $\perp$ [001] of cassiterite no. 92/86 in the Merek placer.

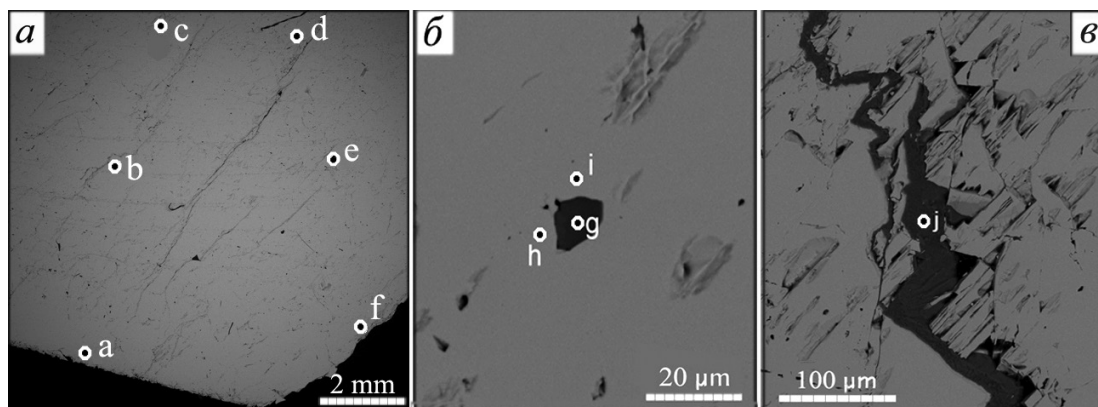


Рис. 15. Кристалл касситерита № 93/86а из Мерекской россыпи (а) с участками анализа (б, в).

Fig. 15. Cassiterite crystal no. 93/86a from the Merek placer (a) with analytical areas (b, v).

составу. Касситерит точек m, n (рис. 16б) содержит Ta_2O_5 0.60–0.62 мас. %; секущие трещины заполнены поздним монтмориллонитом (k) с лимонитом (l) и микровключениями обломков касситерита.

Касситерит № 94/86-1 (рис. 17а) представляет собой часть кристалла в сечении $\perp$ [001] с

примесью Ta_2O_5 0.54–0.64 мас. % и характеризуется формулами $(\text{Sn}_{1.00}\text{Ta}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$ (a) и $\text{Sn}_{0.99}\text{O}_2$ (b, c). Трещины в касситерите заполнены агрегатом хлорита (d) с глиной и микровключением рутила $(\text{Ti}_{0.72}\text{V}_{0.02}\text{Fe}_{0.02}\text{Sn}_{0.01})_{0.77}\text{O}_2$ (e) (рис. 17б).

Рис. 16. Кристалл касситерита № 93/86б из Мерекской россыпи перпендикулярно оси [001] с точками анализа.

Fig. 16. Cassiterite crystal no. 93/86b from the Merek placer perpendicular to [001] axis with analysis points.

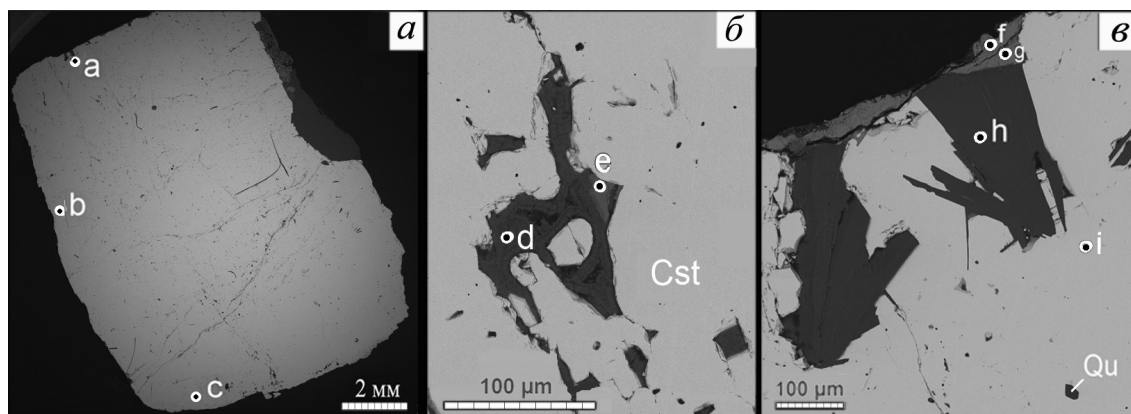
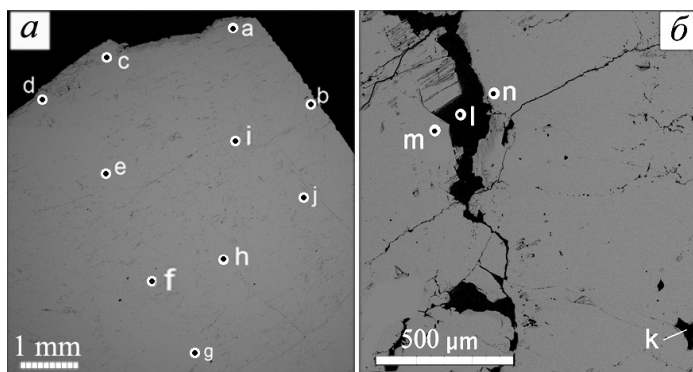


Рис. 17. Образец касситерита № 94/86-1 из Мерекской россыпи (а) с прожилками шамозита с рутилом (б) и мусковита с прожилком скородита (в).

Fig. 17. Cassiterite sample no. 94/86-1 from the Merek placer (a) with chamosite veinlets with rutile (б) and muscovite with skorodite veinlet (в).

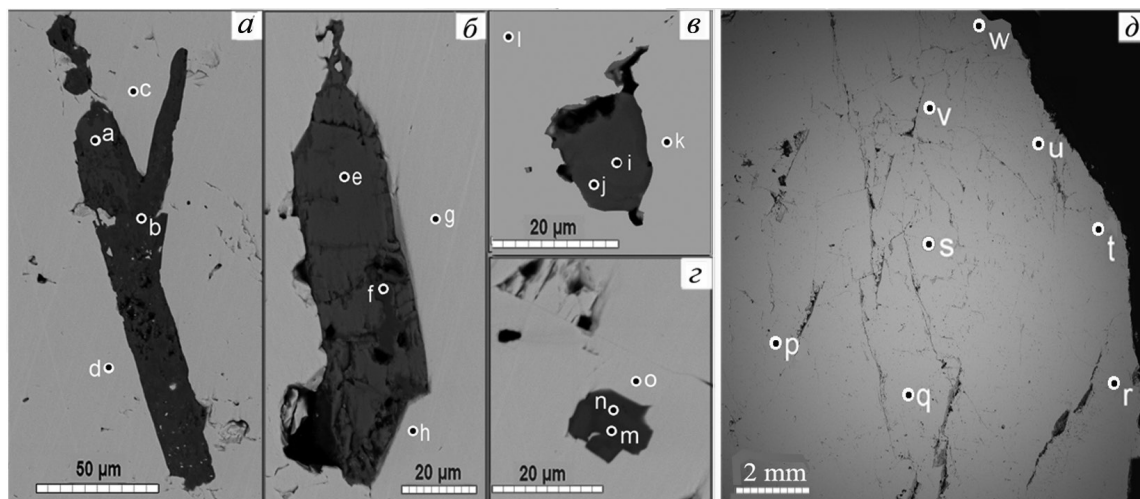


Рис. 18. Образец касситерита № 94/86 из Мерекской россыпи с участками анализов.

Fig. 18. Cassiterite sample no. 94/86 from the Merek placer with analytical areas.

В периферической зоне касситерита (рис. 17в) с кварцем (Qu) и мусковитом ($K_{0.90}Mg_{0.06}Na_{0.04})_{1.00}(Al_{1.70}Fe_{0.15}Mg_{0.12}Mn_{0.02}Ti_{0.01})_{2.00}(Si_{3.2}Al_{0.8}O_{10})((OH)_{1.78}F_{0.22})_{2.00}$ (h) наблюдается поздний прожилок скородита ($Fe^{3+}_{0.63}Ca_{0.34})_{0.97}(As_{0.88}Al_{0.06}Fe_{0.06}Si_{0.03})_{1.03}O_4 \cdot 2H_2O$ (f)

и — ($Fe^{3+}_{0.87}Ba_{0.10}Ca_{0.02}K_{0.02})_{1.01}(As_{0.97}Al_{0.07}Si_{0.02})_{1.06}O_4 \cdot 2H_2O$ (g) (с примесью глины).

Касситерит № 94/86 в сечении $\perp[001]$ кристалла «диаметром» 3 см содержит TiO_2 0.00–0.56, Ta_2O_5 0.41–0.88 и WO_3 0.00–0.69 мас. % (рис. 18).

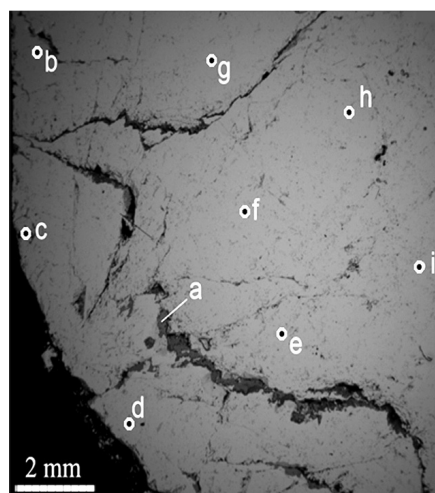


Рис. 19. Образец касситерита № 94/86а из Мерекской россыпи с участками анализов.

Fig. 19. Cassiterite sample no. 94/86a from the Merek placer with analytical areas.

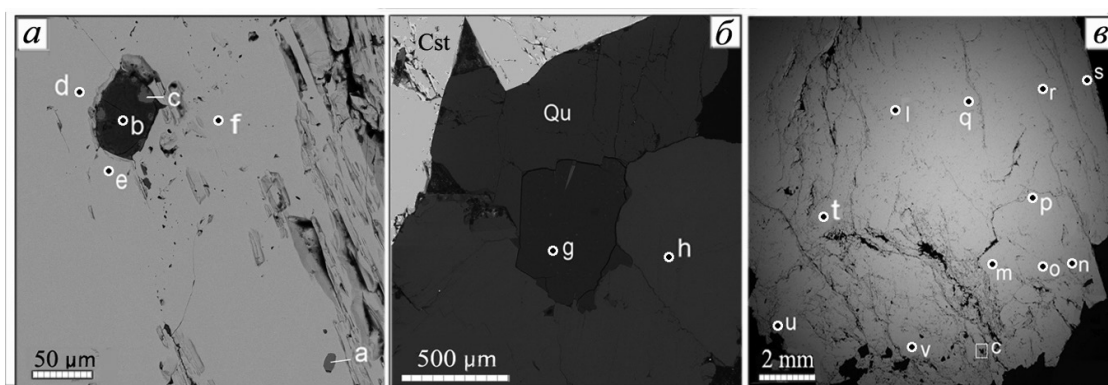


Рис. 20. Образец касситерита № 10/84 из Мерекской россыпи с точками анализа.

Fig. 20. Cassiterite sample no. 10/84 from the Merek placer with analytical areas.

Касситерит № 94/86 содержит 97.64–98.76 мас. % SnO_2 с небольшими примесями Ta, Ti, W и по составу отвечает формуле $(\text{Sn}_{0.98}\text{Ti}_{0.01})_{0.99}\text{O}_2$ (с, d). Состав касситерита около включений рутила характеризуется формулами: $(\text{Sn}_{0.98}\text{Ti}_{0.01})_{0.99}\text{O}_2$ (с), $(\text{Sn}_{0.99}\text{Ti}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (d, h, k), $(\text{Sn}_{1.00}\text{Ta}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$ (g) и $(\text{Sn}_{0.99}\text{W}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (о). В участках деформации касситерита (рис. 18а–г) выявлены включения рутила $(\text{Ti}_{0.91}\text{W}_{0.05}\text{Fe}^{3+}_{0.03})_{0.99}\text{O}_2$ (а), железистого рутила $(\text{Ti}_{0.62}\text{Fe}^{3+}_{0.34}\text{W}_{0.02}\text{Al}_{0.01})_{0.99}\text{O}_2$ (b) и $(\text{Ti}_{0.50}\text{Fe}^{3+}_{0.24}\text{Mn}_{0.14}\text{Zn}_{0.12})_{1.00}\text{O}_2$ (е) и участки относительно «чистого» рутила $(\text{Ti}_{0.96}\text{Fe}^{3+}_{0.03}\text{Nb}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (f), $(\text{Ti}_{0.97}\text{Sn}_{0.03})_{1.00}\text{O}_2$ (i) и $(\text{Ti}_{0.98}\text{Sn}_{0.02})_{1.00}\text{O}_2$ (j). Встречен также V-содержащий рутил (рис. 18г): $(\text{Ti}_{0.93}\text{Nb}_{0.02}\text{V}_{0.02}\text{Fe}^{3+}_{0.02}\text{Sn}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (m) и $(\text{Ti}_{0.92}\text{Nb}_{0.03}\text{Fe}^{3+}_{0.02}\text{Sn}_{0.01}\text{V}_{0.01}\text{W}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (n).

Касситерит № 94/86а в сечении $\perp[001]$ $\frac{1}{4}$ кристалла (рис. 19) в периферической «зоне» с примесью Ti и Ta характеризуется близким составом $(\text{Sn}_{0.99}\text{Ti}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (b, c, d), а центральный участок отвечает формуле $\text{Sn}_{1.00}\text{O}_2$ (h, i). Трещины в касситерите «залечены» агрегатом Fe-хлорита с микро-

включениями станнина, куприта и самородного висмута.

Касситерит № 10/84 представляет собой фрагмент размером 2.5 см призматического кристалла в сечении $\parallel$ грани $m(110)$ с примесью Ta_2O_5 0.58–0.81 мас. % и формулой состава $\text{Sn}_{1.00}\text{O}_2$ (d, e, f). Поздние трещины частично заполнены смесью лимонита (b, c) с аллофаном (g) и варламовитом $(\text{Sn,Fe})(\text{O,OH})_2$, а также халькопиритом $\text{Cu}_{1.03}\text{Fe}_{0.97}\text{S}_2$ (a) и мусковитом $(\text{K}_{0.88}\text{Na}_{0.07}\text{Mg}_{0.05})_{1.00}(\text{Al}_{1.74}\text{Fe}_{0.23}\text{Mg}_{0.03})_{2.00}((\text{Si}_{3.30}\text{Al}_{0.70})_{4.00}\text{O}_{10})((\text{OH})_{1.80}\text{F}_{0.20})_{2.00}$ (h') с микрообломками касситерита (рис. 20а).

Вольфрамит Мерекского месторождения из делювия по ключу Фома представлен удлиненно-уплощенными кристаллами $\parallel$ оси $[001]$ и их сростками длиной 3–6 см и более, со следами деформации и сколов. На кристаллах вольфрамита сохранились грани пинакоидов $a\{100\}$, $t\{102\}$ и призм $m\{110\}$, $f\{011\}$.

В ранее исследованных кристаллах вольфрамита выявлено возрастание содержаний

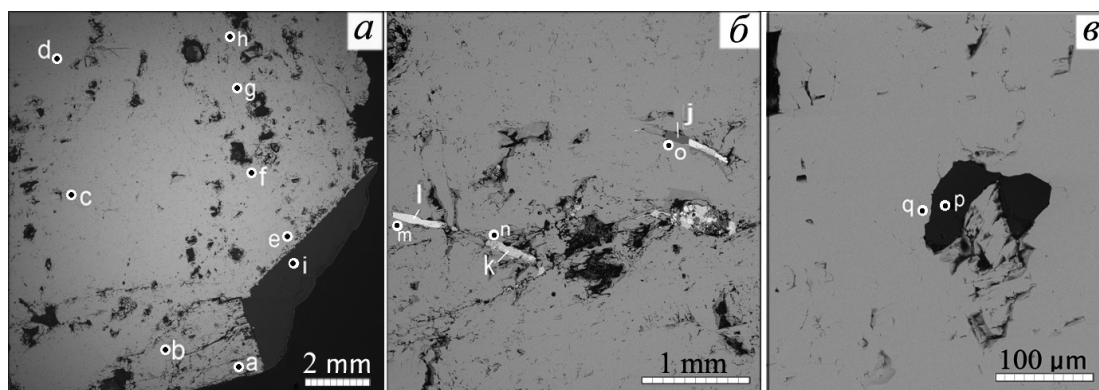
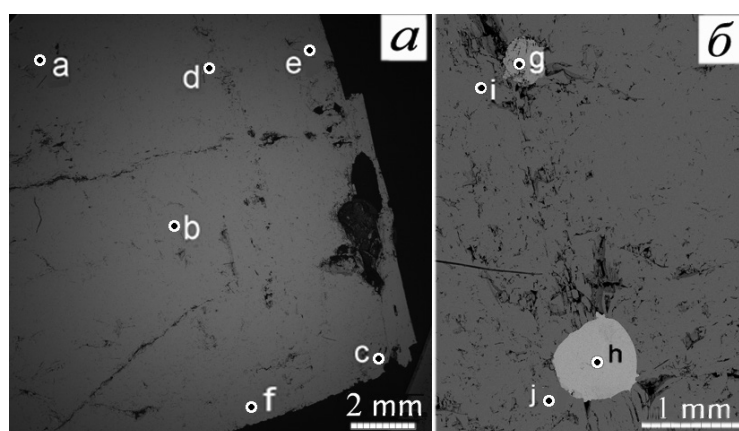


Рис. 21. Образец вольфрамита № 73а с включениями сульфидов и топаза из Мерекской россыпи.
Fig. 21. Wolframite sample no. 73a with inclusions of sulfides and topaz from the Merek placer.

Рис. 22. Образец вольфрамита № 73б с включениями козалиита (?) и самородного висмута из Мерекской россыпи.

Fig. 22. Wolframite sample no. 73b with inclusions of cozalite (?) and native bismuth from the Merek placer.



MnO 5–19 мас. % при снижении содержаний FeO от центра кристаллов к периферии: от ферберита ($(\text{Fe}_{0.86}\text{Mn}_{0.14})_{1.00}(\text{WO}_4)$) и железистого гюбнерита ($(\text{Mn}_{0.53}\text{Fe}_{0.47})_{1.00}(\text{WO}_4)$) до гюбнерита ($(\text{Mn}_{0.92}\text{Fe}_{0.08})_{1.00}(\text{WO}_4)$). На одном из кристаллов гюбнерита, облученных потоком тепловых нейтронов в реакторе ВВР-К (г. Алматы), проявилась тонкая периферическая Fe-Mn зона призмы $s\{121\}$.

Вольфрамит характеризуется вариациями содержаний MnO (6.90–16.32 мас. %) и FeO (6.63–15.58 мас. %) в зональных кристаллах (рис. 21а), где периферическая зона образована гюбнеритом ($(\text{Mn}_{0.70}\text{Fe}_{0.28}\text{Fe}^{3+}_{0.02})_{1.00}(\text{WO}_4)$) (а), средние зоны – ферберитом ($(\text{Fe}_{0.66}\text{Mn}_{0.30}\text{Fe}^{3+}_{0.04})_{1.00}(\text{WO}_4)$) (b, d), а центральные участки – железистым гюбнеритом ($(\text{Mn}_{0.50}\text{Fe}_{0.46})_{0.96}(\text{WO}_4)$) (c), ($(\text{Mn}_{0.50}\text{Fe}_{0.45})_{0.95}(\text{WO}_4)$) (e, h) и ($(\text{Mn}_{0.51}\text{Fe}_{0.47})_{0.98}(\text{WO}_4)$) (h). В вольфрамите выявлены микровключения арсениопирита $\text{Fe}_{0.99}\text{As}_{1.00}\text{S}_{1.00}$ (j), висмутита $\text{Bi}_{2.01}\text{S}_3$ (k), самородного висмута (l) и топаза (p) (рис. 21б, в).

Вольфрамит № 73б (рис. 22) с вариациями содержаний MnO 9.39–13.93 мас. %, FeO 9.26–13.87 мас. % и WO_3 76.66–77.98 мас. % характе-

ризуется более железистым составом внутренних зон марганцовистого ферберита с формулами ($(\text{Fe}_{0.58}\text{Mn}_{0.42})_{1.00}(\text{WO}_4)$) (а), ($(\text{Fe}_{0.55}\text{Mn}_{0.40})_{0.95}(\text{WO}_4)$) (b), ($(\text{Fe}_{0.54}\text{Mn}_{0.40})_{0.94}(\text{WO}_4)$) (d), ($(\text{Fe}_{0.56}\text{Mn}_{0.43})_{0.98}(\text{WO}_4)$) (f) и ($(\text{Fe}_{0.56}\text{Mn}_{0.41})_{0.97}(\text{WO}_4)$) (i, j), но с тонкой периферической зоной железистого гюбнерита ($(\text{Mn}_{0.59}\text{Fe}_{0.39})_{0.98}(\text{WO}_4)$) (c) и ($(\text{Mn}_{0.54}\text{Fe}_{0.42})_{0.96}(\text{WO}_4)$) (e). В ферберите встречены сингенетичные микровключения сульфида Pb и Bi состава $(\text{Pb}_{0.50}\text{Bi}_{0.35}\text{Sb}_{0.01})_{0.86}\text{S}$ (g) и самородного висмута (h).

Удлиненно-уплощенный кристалл железистого гюбнерита № 74 длиной 5.5 см был распилен на две части (№№ 74а и 74б) (рис. 23а, б) и исследован в сечении $\sigma\sigma$ грани пинакоида $\{100\}$. В образце № 74а минерал характеризуется следующими формулами: ($(\text{Mn}_{0.50}\text{Fe}_{0.41})_{0.91}(\text{WO}_4)$) (а), ($(\text{Mn}_{0.50}\text{Fe}_{0.42})_{0.92}(\text{WO}_4)$) (b), ($(\text{Mn}_{0.49}\text{Fe}_{0.43})_{0.92}(\text{WO}_4)$) (c), ($(\text{Mn}_{0.51}\text{Fe}_{0.45})_{0.96}(\text{WO}_4)$) (d), ($(\text{Mn}_{0.49}\text{Fe}_{0.42})_{0.91}(\text{WO}_4)$) (e), ($(\text{Mn}_{0.50}\text{Fe}_{0.44})_{0.94}(\text{WO}_4)$) (f), ($(\text{Mn}_{0.51}\text{Fe}_{0.44})_{0.95}(\text{WO}_4)$) (h). Вольфрамит из центрального участка является марганцовистым ферберитом ($(\text{Fe}_{0.60}\text{Mn}_{0.32})_{0.92}(\text{WO}_4)$) (g). Ферберит из образца № 74б с содержанием MnO 1.25–8.23 мас. % характеризуется следую-

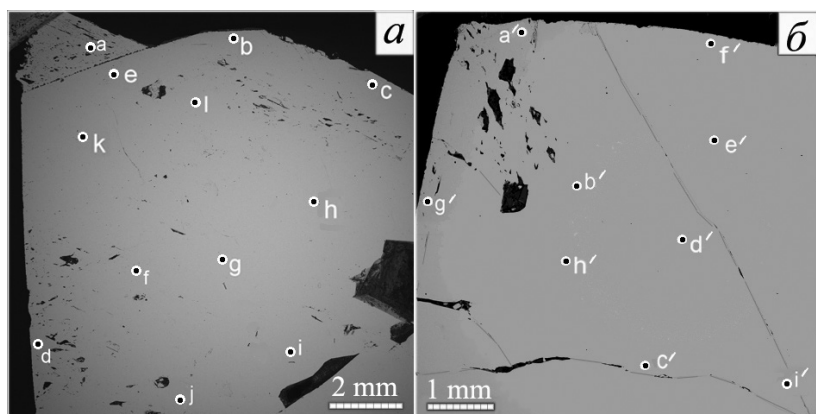


Рис. 23. Две части кристалла вольфрамита № 74 (а, б) из Мерекской россыпи с участками анализа.

Fig. 23. Two parts of wolframite crystal no. 74 (a, b) from the Merek placer with analytical areas.

щими формулами: $(\text{Fe}_{0.70}\text{Mn}_{0.30})_{1.00}(\text{WO}_4)$ (a'), $(\text{Fe}_{0.86}\text{Mn}_{0.10})_{0.96}(\text{WO}_4)$ (b'), $(\text{Fe}_{0.89}\text{Mn}_{0.10})_{0.99}(\text{WO}_4)$ (c'), $(\text{Fe}_{0.61}\text{Mn}_{0.35})_{0.96}(\text{WO}_4)$ (d'), $(\text{Fe}_{0.66}\text{Mn}_{0.27})_{0.93}(\text{WO}_4)$ (e'), $(\text{Fe}_{0.73}\text{Mn}_{0.23})_{0.96}(\text{WO}_4)$ (f'), $(\text{Fe}_{0.80}\text{Mn}_{0.19})_{0.99}(\text{WO}_4)$ (g'), $(\text{Fe}_{0.80}\text{Mn}_{0.15})_{0.95}(\text{WO}_4)$ (h', i), $(\text{Fe}_{0.80}\text{Mn}_{0.13})_{0.93}(\text{WO}_4)$ (i'), $(\text{Fe}_{0.81}\text{Mn}_{0.14})_{0.95}(\text{WO}_4)$ (k), $(\text{Fe}_{0.79}\text{Mn}_{0.14})_{0.93}(\text{WO}_4)$ (l).

Деформированный ферберит содержит включения мусковита $(\text{K}_{0.86}\text{Mg}_{0.09})_{0.95}(\text{Al}_{1.80}\text{Fe}_{0.10}\text{Mg}_{0.10})_{2.00}(\text{Si}_{3.36}\text{Al}_{0.64})_{4.00}\text{O}_{10}((\text{OH})_{1.83}\text{F}_{0.17})_{2.00}$ (n), кальцита (m, o) с небольшими примесями Fe, Mn и Mg, марганцовистого сидерита (p), а также сфалерита $(\text{Zn}_{0.84}\text{Fe}_{0.14}\text{Cu}_{0.02})_{1.00}\text{S}$ (t) в агрегате со стanniном $\text{Cu}_{1.93}(\text{Fe}_{0.93}\text{Zn}_{0.16})_{1.09}\text{Sn}_{0.98}\text{S}_4$ (u).

Касситерит и вольфрамит оловорудных месторождений Приморья

Тигриное W-Sn месторождение в Арминском рудном районе (рис. 2) выявлено П.И. Чёрным в 1954 г. по шлиховым ореолам касситерита и вольфрамита в россыпи ключей Снежного и Рудного в процессе геологической съемки и поисков масштаба 1:50 000 (Материкив, Шацкая, 1958ф; Гаев, Гаева, 1959ф). Исследования руд начаты в 1954–1956 г. под руководством М.П. Материкива, а в 1957–1958 г. – геологами Татибинской партии проведены поисково-оценочные работы с проходкой канав и штолен. В 1978–1985 г. на месторождении начаты отработка россыпи и разведочные работы (Акимов и др., 1985ф; Ивакин и др., 1985; Лариошкин и др., 1990ф), завершившиеся в 1992 г. В результате были выявлены протяженные линейные штокерковые зоны шириной >1200 м и до 800–1000 м на глубину, а также грейзеновая залежь «Тигрёнок» с рудами высокого качества, и обоснована возможность переработки бедных комплексных руд (Попова и др., 1988; 2013; Коростелёв и др., 1990; Попов, Попова, 1992; Гоневчук и др., 2005; Шнайдер, 2011).

Касситерит в ассоциации с вольфрамитом локализованы в рудных прожилках (до 20–40 штук на 1 метр выработок), рассекающих ранние прожилки рекристаллизованного (гранулированного) кварца с микрозернистым молибденитом. Рудные прожилки формировались в последовательности: 1) циннвальдит-ортоклаз-кварцевые, содержащие до 1–2 об. % касситерита и вольфрамита (с редким молибденитом); 2) касситерит-циннвальдит-кварцевые с содержанием касситерита до 10–20 об. % в ассоциации с вольфрамитом, арсенопиритом и сфалеритом; 3) сульфидно-триплит-ортоклазовые прожилки с касситеритом (до 1–3 об. %), железистым гюбнеритом и силикатами в зальбандах прожилков; 4) кварц-ортоклазовые прожилки с содержанием до 2–10 об. % гюбнерита и до 30 об. % триплита. На 2013 г. в месторождении были известны 123 минерала (Попова и др., 2013).

Касситерит из разных прожилков характеризуется варьирующей окраской от темно-коричневой до коричневой, светло-коричневой и розовато-коричневой или желтовато-сероватой. По результатам микронзондового анализа (Гоневчук и др., 2005), касситерит содержит 99.0–99.5 мас. % SnO_2 с небольшими примесями Fe, W, Ti, Nb, Ta и Sc. Отмечалось, что светло-коричневый касситерит содержит больше Sc (до 0.06 мас. %).

Нами исследован образец № 1985-О с касситеритом и вольфрамитом в разных участках кварц-полевошпатового агрегата (рис. 24).

Касситерит с формулой $(\text{Sn}_{1.00}\text{Ta}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$ (a) в сростании с вольфрамитом $(\text{Fe}_{0.61}\text{Mn}_{0.39})_{1.00}(\text{WO}_4)$ (b) образует сингенетичные сростки с кварцем периферической зоны кристаллов в друзовых полостях, а также прожилки в кварце (рис. 24а, б). Агрегаты касситерита нередко рассекаются прожилками кварца с шамозитом $(\text{Fe}_{3.96}\text{Al}_{1.91}\text{Mn}_{0.13})_{6.00}((\text{Si}_{2.72}\text{Al}_{1.28})_{4.00}\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ (c) (рис. 24в). На дру-

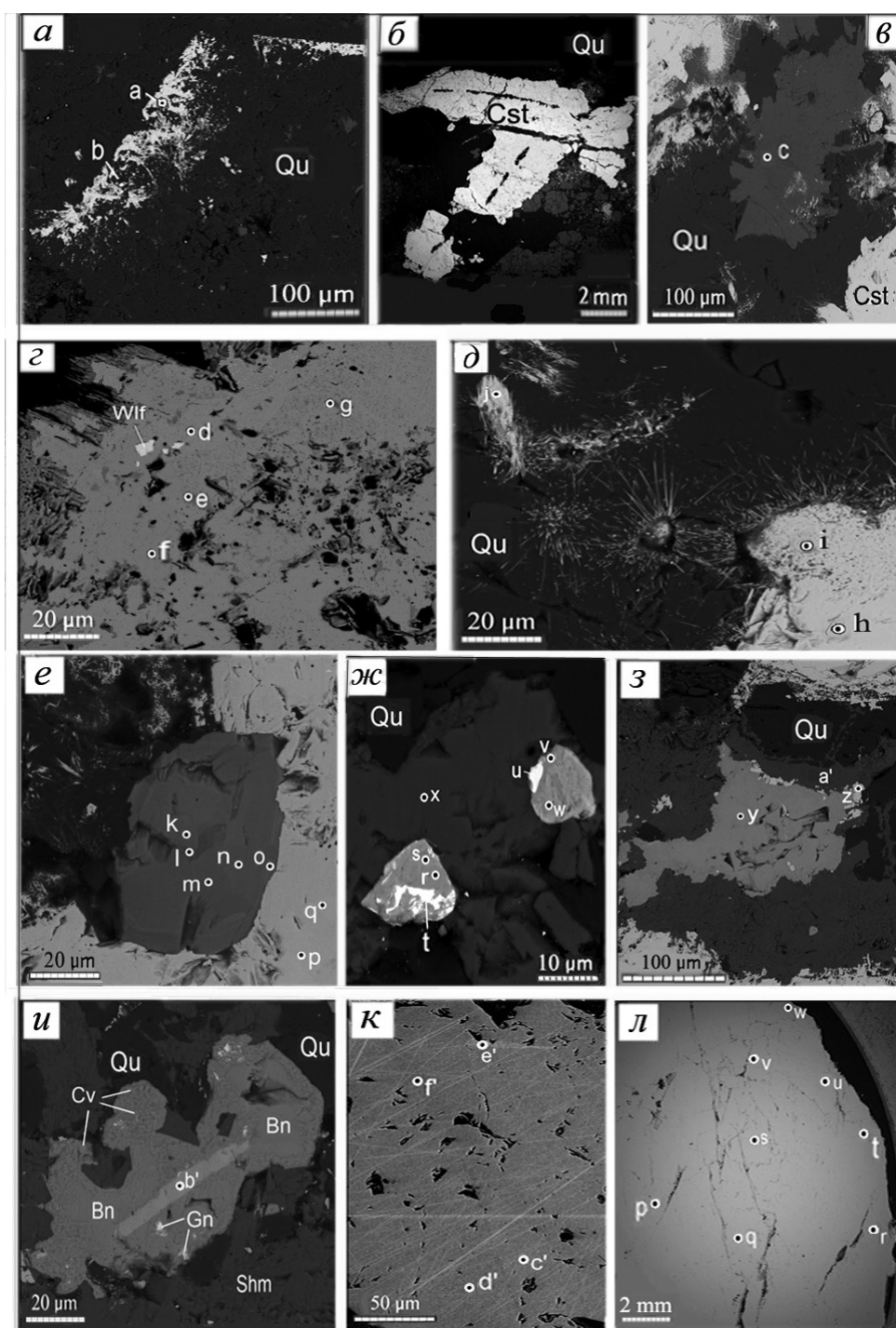


Рис. 24. Проанализированный образец касситерита № 1985-О из месторождения Тигриное.
Fig. 24. Analyzed cassiterite sample no. 1985-O from the Tigrinoe deposit.

гих участках образца (рис. 24г) состав касситерита с примесями Fe, Ta и W отвечает формулам: $(\text{Sn}_{0.99}\text{Ta}_{0.01}\text{W}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$ (d), $(\text{Sn}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}\text{Ta}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$ (e), $(\text{Sn}_{0.96}\text{Fe}_{0.03}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (f) и $(\text{Sn}_{0.96}\text{Fe}_{0.04})_{1.00}\text{O}_2$ (g). В касситерите присутствуют сингенетические микровключения вольфрамитов размером до 3 мкм. В деформированном касситерите выявлена при-

месь Al_2O_3 (0.36–0.44 мас. %), возможно, связанная с микровключениями диаспора $\text{AlO}(\text{OH})$, что отражается в формулах состава участков касситерита: $(\text{Sn}_{0.98}\text{W}_{0.01}\text{Ta}_{0.01}\text{Ti}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$ (h), $(\text{Sn}_{0.99}\text{Ta}_{0.02}\text{Al}_{0.01}\text{W}_{0.01}\text{Ti}_{0.01})_{1.04}\text{O}_2$ (i) и $(\text{Sn}_{0.96}\text{Al}_{0.02}\text{Ta}_{0.01}\text{W}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (j) (рис. 24д).

В касситерите $\text{Sn}_{1.00}\text{O}_2$ (p) и $(\text{Sn}_{0.95}\text{Fe}_{0.04}\text{W}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (q) на контакте с кварцем встречено

включение ксенотима-(Y) ($Y_{0.74}Gd_{0.07}Dy_{0.06}Yb_{0.06}Er_{0.04}Sm_{0.01}U_{0.01}O_{0.99}(PO_4)$ (k), ($Y_{0.88}Gd_{0.04}Dy_{0.03}Yb_{0.03}Er_{0.03}Sm_{0.01}Nd_{0.01}Ho_{0.01}O_{1.04}(PO_4)$ (l), ($Y_{0.79}Gd_{0.07}Dy_{0.06}Yb_{0.05}Er_{0.04}Th_{0.01}Sm_{0.01}O_{1.02}(PO_4)$ (m), ($Y_{0.73}Gd_{0.08}Dy_{0.08}Yb_{0.06}Er_{0.04}Ho_{0.02}Tb_{0.01}Sm_{0.01}O_{1.03}(PO_4)$ (n) и ($Y_{0.72}Gd_{0.09}Dy_{0.09}Yb_{0.06}Er_{0.05}Tb_{0.02}Sm_{0.01}O_{1.04}(PO_4)$ (o) (рис. 24е).

В агрегате кварца с флюоритом (x) выявлены включения халькозина (s, r, w), галенита (t), виттихенита (u) и сфалерита (v) (рис. 24ж). В прожилке кварца с шамозитом – ($Fe_{3.94}Al_{0.84}Mn_{0.13}Cu_{0.05}Mg_{0.04}Al(Si_{2.72}Al_{1.28}O_{10})(OH)_8$ (a') обнаружен борнит $Cu_{5.04}Fe_{1.04}S_4$ (y) с включением обломков касситерита ($Sn_{0.98}Fe_{0.01}Ta_{0.01}O_{1.00}O_2$ (z), рассеянного шамозит-кварцевым прожилком (рис. 24з). На другом участке шамозит-кварцевого агрегата (рис. 24и) выявлен борнит (Bn) с включением рокезита $Cu_{1.10}(In_{0.96}Fe_{0.04})_{1.00}S_2$ (b'), ганита (Gn) и ковеллина (Cv).

Состав касситерита характеризуется следующими формулами (рис. 24к, л): ($Sn_{0.97}Fe_{0.02}Ta_{0.01}O_{1.00}O_2$ (c'), ($Sn_{0.97}Fe_{0.03}O_{1.00}O_2$ (d'), ($Sn_{0.97}W_{0.02}Fe_{0.01}Ta_{0.01}O_{1.01}O_2$ (e'), ($Sn_{0.95}Fe_{0.04}Ta_{0.01}O_{1.00}O_2$ (f'), $Sn_{0.99}O_2$ (p), ($Sn_{0.99}Ta_{0.01}O_{1.00}O_2$ (q), ($Sn_{1.00}Ta_{0.01}O_{1.01}O_2$ (r), ($Sn_{0.98}Ti_{0.01}Ta_{0.01}O_{1.00}O_2$ (s), ($Sn_{0.99}Ti_{0.01}Ta_{0.01}O_{1.01}O_2$ (t, u, w) и ($Sn_{0.98}Ti_{0.01}Ta_{0.01}O_{1.00}O_2$ (v). Вариации содержания Fe и W в составе касситерита месторождения обусловлены, вероятно, микровключениями вольфрамитов.

Вольфрамит выявлен в серии последовательных рудных прожилков. Кристаллы и «зерна» вольфрамитов таблитчатые, размером до 2–3 см и более; часто встречались двойники по {100} и {023}. В разных по составу рудных прожилках вольфрамит сокристаллизовался с кварцем, циннвальдитом, топазом, касситеритом, арсенопиритом и сфалеритом. В рудных прожилках выявлен вольфрамит последовательных генераций со следующим содержанием $MnWO_4$ (мол. %): 5–20 – в топаз-кварцевых прожилках (ферберит), 45–70 – в касситерит-адуляр-кварцевых прожилках (марганцовистый вольфрамит и гюбнерит), 75–95 мол. % – гюбнерит (Попов, Попова, 1992). Вольфрамит из прожилков в штольне № 7 отличается составом зон от центра кристаллов к периферии. Так, в прожилке из кваршлага № 17 состав вольфрамитов в центре кристалла – ($Mn_{0.69}Fe_{0.30}O_{0.99}(WO_4)$, в периферической зоне пинакоида (100) – ($Mn_{0.51}Fe_{0.49}O_{1.00}(WO_4)$, в зоне призмы (102) – ($Mn_{0.66}Fe_{0.34}Nb_{0.01}O_{1.01}(WO_4)$.

Усть-Микулинское Sn-W месторождение выявлено в 1952 г. шлиховым методом близ устья р. Микуды – правого притока р. Арму (рис. 3) геологами Средне-Иманской поисково-разведочной

партии Ю.Н. Размахниным и Э.М. Размахниной в пределах Приисковского рудного узла Арминского рудного района. В 1954–1989 гг. в грейзенизированных осадочных породах выявлено 150 минерализованных зон северо-западного простирания с тремя перспективными рудными зонами – Арминская, Спутница и Надежда. Ориентировочные запасы рудных минералов в рудных зонах Арминская и Надежда составляли (тыс. т): вольфрамит – 95.6, касситерит – 18.9, сфалерит – 22.4, халькопирит – 79.0, арсенопирит – 219.4, пирротин – 236.9, пирита – 599.2 (Попов, Попова, 1993).

Нами минералогия месторождения исследована в 1990–1991 гг. по заказу Таёжной ГРЭ ПГО «Приморгеология» (Попов, Попова, 1993). В выработках штольни № 1, канавах и керне скважин выявлены взаимоотношения и состав разных прожилков с относительно ранними вольфрамитсодержащими жилками и секущими их жилками с касситеритом (рис. 25). В грейзенах содержание касситерита и вольфрамитов составляло 0.01–0.03 об. %, в рудных зонах – касситерита до 0.02–0.20 об. % и вольфрамитов 0.07–0.24 об. %.

Касситерит в рудах мелкий, но встречались и дипирамидально-призматические кристаллы и сростки до 2–6 мм с преобладающими гранями призмы $m\{110\}$ и дипирамиды $s\{111\}$, иногда с участками граней дитетрагональной дипирамиды $z\{231\}$ и проявляющимися (на просвет) внутренними зонами пирамиды роста пинакоида $c\{001\}$ (рис. 26). Цвет кристаллов и двойников касситерита неоднородно-коричневый, более темный в зонах дипирамиды $s\{111\}$, а наиболее светлый – в зонах призмы $m\{110\}$. В шлихах и керне скважин встречались оолиты «деревянистого» касситерита.

Относительно повышенные количества касситерита отмечались в зональных прожилках зоны Арминской. Касситерит сокристаллизовался с кварцем, топазом и поздними зонами вольфрамитов. Касситерит из керна скважины № 25 в зонах пирамиды роста (от центра к периферии) отвечает формулам: в призме $m\{110\}$ и дитетрагональной дипирамиде $z\{231\}$ – $Sn_{1.00}O_2$, в последовательных зонах дипирамиды $s\{111\}$ – $Sn_{1.00}O_2$ и ($Sn_{0.99}Fe_{0.01}O_{1.00}O_2$.

Вольфрамит в прожилках из рудных зон образует агрегаты с кварцем, мусковитом, касситеритом, арсенопиритом, лёллингитом, пирротинном, топазом, сфалеритом и станнином. Размер индивидов и двойников вольфрамитов составляет 2–10 мм, изредка до 5–10 см (в зоне Надежда). Наиболее железистый вольфрамит встречен в касси-

Рис. 25. Аподацитовый грейзен (1) с вольфрамит-содержащими прожилками (2), рассеянным прожилком с касситеритом (3) и прожилками гизингерита в штольне № 1 Усть-Микулинского месторождения.

Fig. 25. Greisen after dacite (1) with wolframite-bearing veins (2) crossed by a vein with cassiterite (3) and gisingerite veins in adit no. 1 of the Ust-Mikulinskoe deposit.

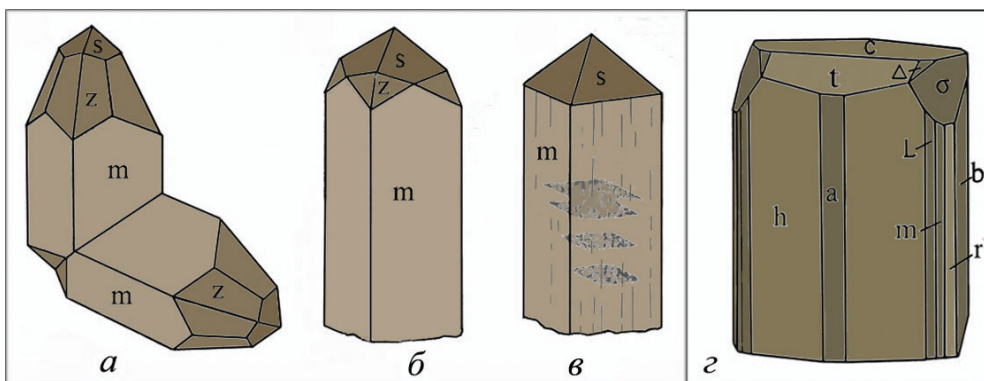
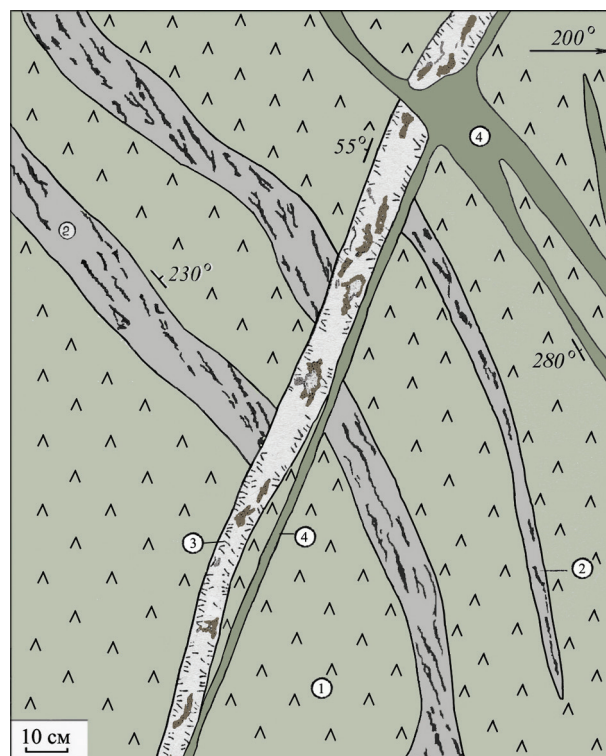


Рис. 26. Двойник (а) и монокристаллы касситерита (б, в) с внутренними зонами пирамиды роста пинакоида {001}; г – вольфрамит Усть-Микулинского месторождения

Fig. 26. Twin (a) and crystals of cassiterite (a, б) with inner zones of pinakoid {001} growth pyramid; г – wolframite from the Ust-Mikulinskoe deposit.

терит-кварцевых прожилках с топазом, пирротинном, арсенопиритом и сфалеритом. В кристаллах вольфрамитовые центральные участки – железистые (ферберит) с марганцовистыми периферическими зонами: 1а, центр – $(\text{Fe}_{0.79}\text{Mn}_{0.25})_{0.94}(\text{WO}_4)$; 1б, край – $(\text{Fe}_{0.62}\text{Mn}_{0.41})_{1.03}(\text{WO}_4)$; 2а, центр – $(\text{Fe}_{0.77}\text{Mn}_{0.29})_{1.06}(\text{WO}_4)$; 2б, край – $(\text{Fe}_{0.54}\text{Mn}_{0.48})_{1.02}(\text{WO}_4)$; 3а, центр – $(\text{Fe}_{1.02}\text{Mn}_{0.03}\text{Nb}_{0.01})_{1.06}(\text{WO}_4)$; 3б, край – $(\text{Mn}_{0.80}\text{Fe}_{0.22})_{1.02}(\text{WO}_4)$. В зоне окисления вольфрамит иногда частично замещен темно-серым тунгستنитом.

Забывтое Sn-W месторождение открыто в 1952 г. геологами Средне-Иманской партии Э.М. Размахниной и Ю.Н. Размахниным по свалам вольфрамит-кварцевых жил на крутом правом берегу р. Иман (Большой Уссурки) в Арминском рудном районе в зоне Главного синклинария Сихотэ-Алиня (рис. 3). Минералогия месторождения изложена в рукописных отчётах Э.М. Размахниной и В.Т. Шацкой в 1959 г. Геологическое строение месторождения с данными о рудах и минералах уточнено В.Т. Шацкой, а позднее – рядом исследователей (Гвоздев и др., 1990). В 2013 г. часть месторожде-

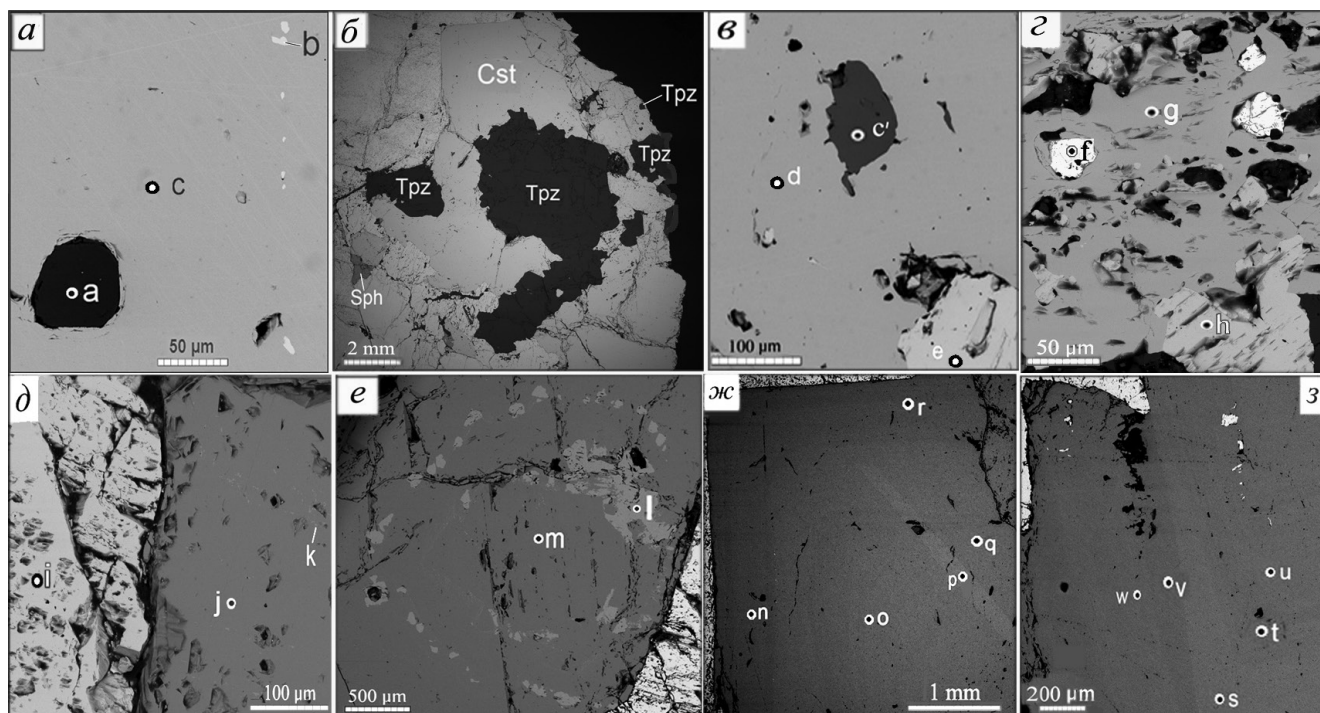


Рис. 27. Агрегат касситерита (Cst) с сингенетичными минералами и участками анализа (а–з) из месторождения Забытое.

Fig. 27. Cassiterite aggregate (Cst) with syngenetic minerals and analytical areas (a–z) from the Zabytoe deposit.

ния Забытое приобретена ООО «Приморвольфрам» (www.nedradv.ru).

Нами месторождение обследовано в 1991 г. (Попов и др., 1992). Субмеридиональные кварцевые жилы с касситеритом и вольфрамитом локализованы в биотитизированных и грейзенизированных вулканогенно-осадочных породах (K_1V) и в гранитоидах западного участка Приискового массива.

На месторождении известно 95 минералов (Попов и др., 1992). В грейзеновую стадию (послеранних кварц-адуляровых и кварц-сидерофиллитовых жил) сформировались последовательные Sn-W рудные жилы пяти типов: 1) циннвальдит-кварцевые с касситеритом, вольфрамитом, топазом, бериллом, флюоритом и сульфидами (сфалеритом, халькопиритом, молибденитом); 2) берилл-топаз-кварцевые с вольфрамитом, молибденитом, висмутином и самородным висмутом; 3) вольфрамит-кварцевые с берtrandитом, гельвином, молибденитом, флюоритом, висмутином и самородным висмутом; 4) топаз-кварцевые с вольфрамитом, пирротинитом и сфалеритом; 5) топаз-кварцевые с вольфрамитом, касситеритом, стanniном и арсенопиритом.

Касситерит в рудах мелкий (0.1–3.0 см) и редкий: его содержание в зоне Озорная составляет 0.01 об. %, в зонах Зелёная и Кварцевая – по 1.00 %, в технологической пробе из зоны Майская (с экзо-

контактовыми метасоматитами) – 0.04 %. Касситерит образует комплексные двойники по (100) и (110) с числом индивидов от 2 до 10 в агрегатах с топазом, кварцем, вольфрамитом, флюоритом, циннвальдитом и сульфидами. Касситерит визуально зонально-секториальный со светло-коричневыми и темно-коричневыми зонами и повышенными содержаниями Fe, Ti, W, Nb и Mn (в 5–10 раз) в темных зонах по данным спектрального анализа.

Нами касситерит исследован в агрегатах с кварцем, топазом и сопутствующими минералами (рис. 27). Состав касситерита характеризуется формулами: $(\text{Sn}_{0.97}\text{Ti}_{0.03})_{1.00}\text{O}_2$ (c), $(\text{Sn}_{0.98}\text{Ti}_{0.01}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (d, q, o), $(\text{Sn}_{0.98}\text{Ti}_{0.02}\text{Ta}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$ (g, t, u), $(\text{Sn}_{0.98}\text{Ti}_{0.02})_{1.00}\text{O}_2$ (n), $(\text{Sn}_{0.98}\text{Ti}_{0.01}\text{Ta}_{0.01}\text{W}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$ (p), $(\text{Sn}_{0.97}\text{Ti}_{0.02}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (r), $(\text{Sn}_{0.99}\text{Ti}_{0.01}\text{Ta}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$ (s), $(\text{Sn}_{0.96}\text{Ti}_{0.03}\text{Ta}_{0.01}\text{Nb}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$ (v) и $(\text{Sn}_{0.94}\text{Ti}_{0.03}\text{Ta}_{0.02}\text{Nb}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (w). Нередко касситерит содержит сингенетичные вроски железистого гюбнерита $(\text{Mn}_{0.50}\text{Fe}_{0.46})_{0.96}(\text{WO}_4)$ (b), $(\text{Mn}_{0.50}\text{Fe}_{0.45})_{0.95}(\text{WO}_4)$ (e), $(\text{Mn}_{0.57}\text{Fe}_{0.43})_{1.00}(\text{WO}_4)$ (h, i), топаза и флюорита $(\text{Ca}_{0.99}\text{Y}_{0.01})_{1.00}\text{F}_2$ (a). Относительно поздние минералы включают уранинит $(\text{U}_{0.82}\text{Th}_{0.17}\text{Pb}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (f), станнин $\text{Cu}_{2.03}(\text{Fe}_{0.65}\text{Zn}_{0.35})_{1.00}\text{Sn}_{1.06}\text{S}_4$ (l), сфалерит $(\text{Zn}_{0.88}\text{Fe}_{0.10})_{0.98}\text{S}$ (j, m), триплит $(\text{Mn}_{1.39}\text{Fe}_{0.46}\text{Mg}_{0.14}\text{Ca}_{0.06})_{2.05}(\text{PO}_4)[\text{F}_{0.87}(\text{OH})_{0.13}]_{1.00}$ (c') и торит.

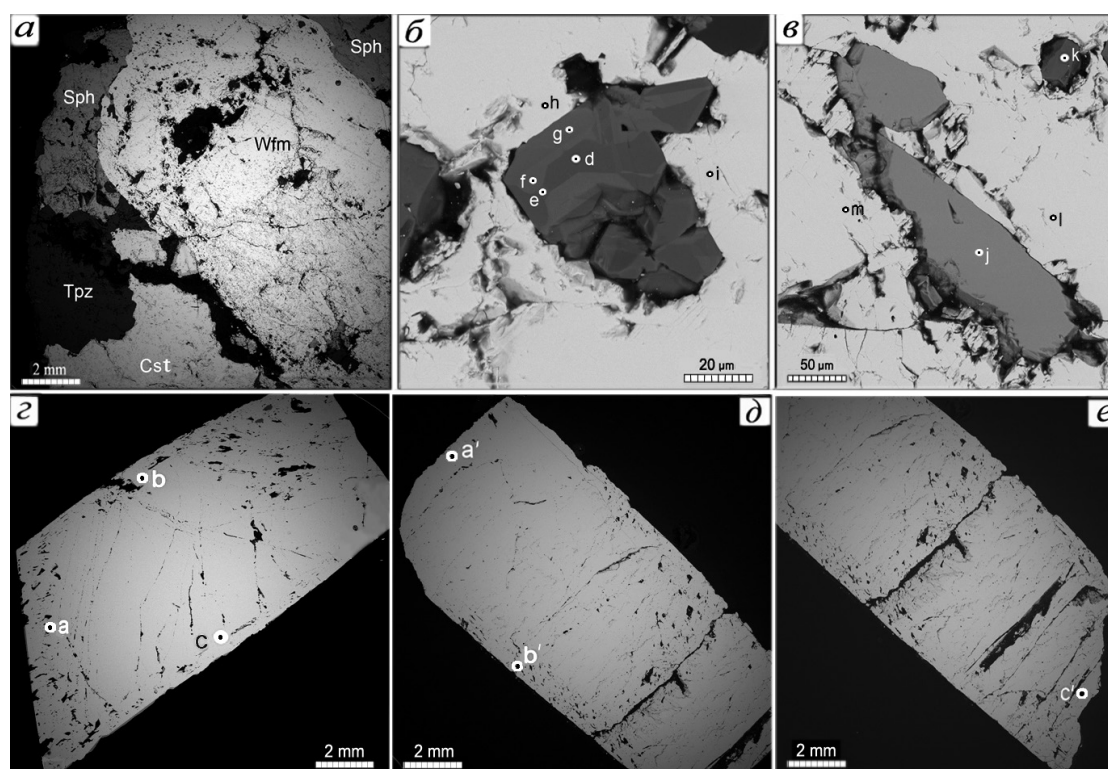


Рис. 28. Вольфрамит (Wfm) с касситеритом (Cst), топазом (Trpz), сфалеритом (Sph), рутилом и кристаллы гюбнерита (г–е) из месторождения Забытое.

Fig. 28. Wolframite (Wfm) with cassiterite (Cst), topaz (Trpz), sphalerite (Sph), rutile and hubnerite crystals (г–е) from the Zabytoe deposit.

Вольфрамит образует удлиненно-таблитчатые кристаллы размером 1–7 см и более с участками граней пинакоидов $a\{100\}$ и $b\{010\}$ в комбинации с гранями призм с топазом, касситеритом, железистым фтормусковитом, сфалеритом и рутилом (рис. 28).

По составу вольфрамит относится к железистому гюбнериту с содержанием FeO 10.76 мас. % и формулой $(\text{Mn}_{0.52}\text{Fe}_{0.45}\text{Sc}_{0.03})_{0.99}(\text{WO}_4)$ (h) (рис. 28б). В сечении кристаллов периферическая зона пинакоида $\{102\}$ образована гюбнеритом с формулой $(\text{Mn}_{0.70}\text{Fe}_{0.30})_{1.00}(\text{WO}_4)$ (a); а периферические зоны пинакоида $\{100\}$ высокожелезистые – $(\text{Mn}_{0.52}\text{Fe}_{0.48})_{1.00}(\text{WO}_4)$ (b) и $(\text{Mn}_{0.51}\text{Fe}_{0.49})_{1.00}(\text{WO}_4)$ (c) (см. рис. 28г). В другом кристалле (рис. 28д, е) состав зон пинакоида $\{100\}$ более железистый – $(\text{Fe}_{0.55}\text{Mn}_{0.45})_{1.00}(\text{WO}_4)$ (a') и $(\text{Mn}_{0.53}\text{Fe}_{0.47})_{1.00}(\text{WO}_4)$ (b'), а в зоне пинакоида $\{102\}$ – $(\text{Fe}_{0.55}\text{Mn}_{0.45})_{1.00}(\text{WO}_4)$ (c').

В гюбнерите встречено включение зонального рутила (рис. 28б) с вариациями содержаний примесей (мас. %): V_2O_5 1.04–2.11; FeO 0–2.47; Nb_2O_5 0.32–1.11; WO_3 1.12–7.91; SnO_2 2.26–3.03; Al_2O_3 0.23–0.35 и следами Ta_2O_5 . Состав рутила в темной зоне характеризуется формулой $(\text{Ti}_{0.95}\text{V}_{0.02}\text{Sn}_{0.02})_{0.99}\text{O}_2$

(d), а в темно-серой зоне – $(\text{Ti}_{0.91}\text{Fe}_{0.03}\text{W}_{0.03}\text{V}_{0.01}\text{Sn}_{0.01})_{0.99}\text{O}_2$ (g).

На другом участке состав вольфрамит (рис. 28а) соответствует марганцовистому фербериту с примесью Nb и Sc: $(\text{Fe}_{0.50}\text{Mn}_{0.47}\text{Nb}_{0.03})_{0.98}(\text{WO}_4)$ (t) и $(\text{Fe}_{0.65}\text{Mn}_{0.30}\text{Nb}_{0.03})_{0.98}(\text{WO}_4)$ (u). Минерал содержит сингенетичное включение зонального гюбнерита (рис. 29а). Зоны гюбнерита (более темные в режиме BSE) содержат Fe, Ba, F и Th: – $(\text{Sr}_{0.82}\text{Ba}_{0.31}\text{Fe}_{0.09})_{1.22}\text{Al}_{3.35}(\text{PO}_4)_2[\text{F}_{1.27}(\text{OH})_{0.73}]_{2.00}(\text{OH})_5$ (q) и $(\text{Sr}_{0.68}\text{Ba}_{0.27}\text{Fe}_{0.03})_{0.99}\text{Al}_{3.07}(\text{PO}_4)_2[\text{F}_{0.88}(\text{OH})_{0.25}]_{1.03}(\text{OH})_6$ (s), а менее темные зоны (горсейскит) – $(\text{Ba}_{0.57}\text{Sr}_{0.44})_{1.01}\text{Al}_{3.28}(\text{PO}_4)_2[(\text{OH})_{1.08}\text{F}_{0.91}]_{1.99}(\text{OH})_5$ (r). Присутствие F и повышенные содержания Al пока не нашли объяснения.

В агрегате кварца со сфалеритом $(\text{Zn}_{0.86}\text{Fe}_{0.13})_{0.99}\text{S}_{1.02}$ (x) (рис. 29б) и $(\text{Zn}_{0.92}\text{Fe}_{0.07})_{0.99}\text{S}$ выявлены включения станнина $\text{Cu}_{1.97}(\text{Fe}_{0.88}\text{Zn}_{0.22})_{1.00}\text{Sn}_{1.03}\text{S}_4$, арсенопирита, лёллингита $\text{Fe}(\text{As}_{1.81}\text{S}_{0.12})_{0.93}$, а также триплит, флюорит и уранинит $(\text{U}_{0.82}\text{Th}_{0.16}\text{Pb}_{0.02})_{1.00}\text{O}_2$.

Шибановское Sn-W месторождение (рудный узел площадью 120 км²) выявлено в 1952 г. шлиховым методом в процессе геологической

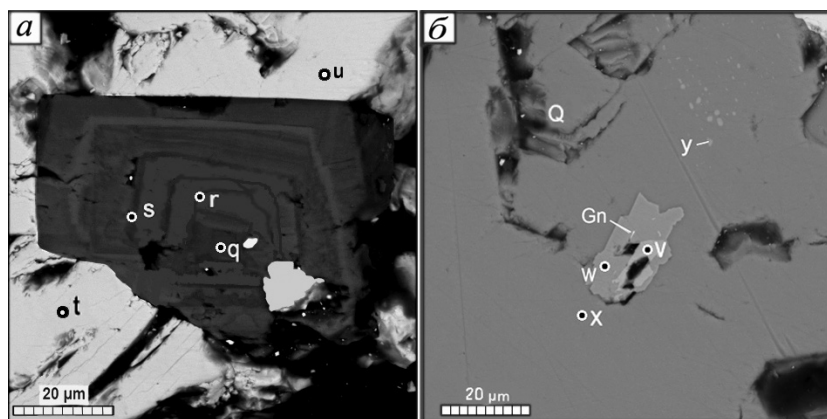


Рис. 29. Зональный гожаит-горсейсит в ферберите (а) и включения сфалерита (х) со станнином и ганитом (б) в кварце из месторождения Забытое.

Fig. 29. Zoned gojaite-gorseixite in ferberite (a) and inclusions of sphalerite (x) with stannite and ganite (b) in quartz from the Zabytoe deposit.

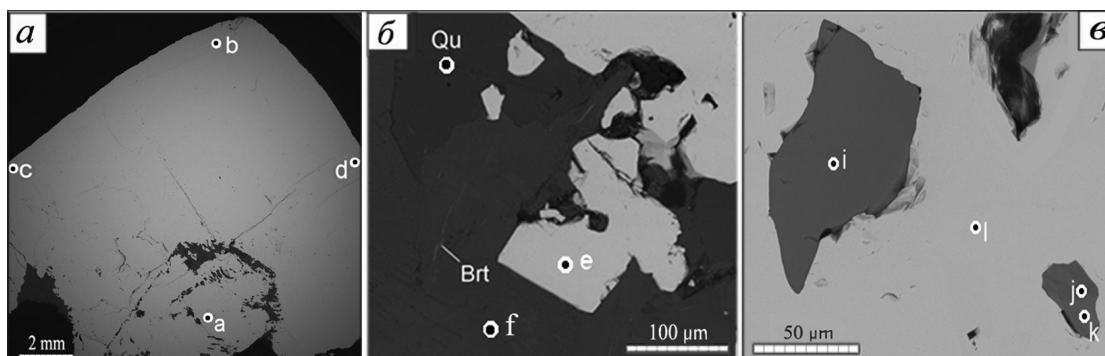


Рис. 30. Кристалл касситерита № 97 с участками анализа с ассоциирующими минералами из месторождение Шибановское.

Fig. 30. Cassiterite crystal no. 97 with analytical areas with associated minerals from the Shibanovskoe deposit.

съемки Средне-Иманской партией в Спасском районе, в 200 км на ССВ от Владивостока и в 20 км на СЗ от Арсеньева в верховьях ручья Шибановского (впадающего в р. Арсеньевку) на ЮВ склоне хребта «Синий» (западные отроги хребта Сихотэ-Алинь) с Sn-W-россыпями (рис. 4). Месторождение объединяет Верхне-Шибановское Sn-W рудопоявление и россыпи Западно-Шибановскую и Восточно-Шибановскую, содержащих касситерит от знаков до 5 г/м³.

Верхне-Шибановское олово-вольфрамовое рудопоявление включает серию жил блоковых гранитных пегматитов мощностью до 20 см в гранитах палеогенового возраста и в небольших зонах касситеритсодержащих мусковитовых грейзенов в зонах дробления гранита, а также аллювиальные россыпи касситерита с вольфрамитом и монацитом (Степнова, 2013). Содержания Sn в жилах и грейзенах составляют 0.01–0.6 мас. %, редко до 1–2 мас. %. В гранитоидах, кроме касситерита, вольфрамит и монацита-(Ce), отмечались алланит-(Ce), берилл, чералит $\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2$, дэлит $\text{K}_2\text{Zr}(\text{Si}_6\text{O}_{15})$, ильменит, ксенотим-(Y), турмалин (шерл),

фергусонит-(Ce), а в россыпях – топаз, морион и дымчатый кварц. Прогнозные ресурсы касситерита в россыпях Западно-Шибановского поля составляли 600 т при среднем содержании касситерита ~300 г/м³.

Касситерит образца № 97 в сечении $\perp[001]$ по составу почти однородный (рис. 30) с примесью Ta_2O_5 0.069–0.091 мас. % и близкими формулами на разных участках: $(\text{Sn}_{0.99}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$ (a, d, e), $(\text{Sn}_{1.00}\text{Ta}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$ (b, c) и $(\text{Sn}_{0.96}\text{Ti}_{0.04})_{1.00}\text{O}_2$ (l). Касситерит ассоциирует с кварцем, мусковитом $\text{K}_{0.92}(\text{Al}_{1.68}\text{Fe}_{0.30}\text{Mn}_{0.02})_{2.00}((\text{Si}_{3.12}\text{Al}_{0.88})_{4.00}\text{O}_{10})((\text{OH})_{1.75}\text{F}_{0.25})_2$ (f), баритом и содержит включения триплита $(\text{Mn}_{1.50}\text{Fe}_{0.32}\text{Mg}_{0.19}\text{Ca}_{0.06})_{2.07}(\text{PO}_4)\text{F}_{0.91}$ (i), рутила $(\text{Ti}_{0.93}\text{V}_{0.28}\text{Nb}_{0.01}\text{Sn}_{0.01}\text{W}_{0.01}\text{Fe}_{0.01})_{1.26}\text{O}_2$ (j) и топаза.

Вольфрамит отмечался в аллювиальных россыпях гранитов и жил блоковых гранитных пегматитов с касситеритом, монацитом, фергусонитом, ксенотимом, ильменитом, кварцем, топазом, бериллом, биотитом, мусковитом и турмалином (Степнова, 2013). В наших образцах вольфрамит не встречен.

Таблица

Вариации формул преобладающего состава касситерита в ассоциации с вольфрамитом в месторождениях Приамурья и Приморья

Table

Variations in formulas of the predominant composition of cassiterite associated with wolframite in deposits of the Amur region and Primorye

Касситерит		Вольфрамит
Хинганское месторождение		
1	$(\text{Sn}_{0.99}\text{Ti}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$	$(\text{Mn}_{0.60}\text{Fe}_{0.34})_{0.94}(\text{WO}_4)$
2	$(\text{Sn}_{0.98}\text{Ti}_{0.01}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$	$(\text{Mn}_{0.61}\text{Fe}_{0.34})(\text{WO}_4)$
Берёзовое месторождение		
3	$(\text{Sn}_{0.98}\text{Fe}_{0.01})_{0.99}\text{O}_2$	$(\text{Fe}_{0.91}\text{Mn}_{0.09})_{1.00}(\text{WO}_4)$
Карадубское месторождение		
4	$(\text{Sn}_{0.97}\text{Fe}_{0.03})_{1.00}\text{O}_2$	$(\text{Fe}_{0.91}\text{Mn}_{0.08})_{0.99}(\text{WO}_4)$
Правоурмийское месторождение		
5	$(\text{Sn}_{0.93}\text{Nb}_{0.04})_{0.97}\text{O}_2$	$(\text{Fe}_{0.64}\text{Mn}_{0.36})_{1.00}(\text{WO}_4)$
Мерекская россыпь		
6	$\text{Sn}_{1.00}\text{O}_2$	$(\text{Mn}_{0.51}\text{Fe}_{0.47})_{0.98}(\text{WO}_4)$ – центр
7	$(\text{Sn}_{0.99}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$	$(\text{Fe}_{0.70}\text{Mn}_{0.30})_{1.00}(\text{WO}_4)$ – середина
8	$(\text{Sn}_{0.98}\text{Ti}_{0.01})_{0.99}\text{O}_2$	$(\text{Mn}_{0.70}\text{Fe}_{0.30})_{1.00}(\text{WO}_4)$ – край
Тигриное месторождение		
9	$(\text{Sn}_{0.99}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$	$(\text{Fe}_{0.52}\text{Mn}_{0.38})_{1.00}(\text{WO}_4)$
10	$(\text{Sn}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}\text{Ta}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$	$(\text{Mn}_{0.69}\text{Fe}_{0.30})_{0.99}(\text{WO}_4)$
11	$(\text{Sn}_{0.98}\text{Ti}_{0.01}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$	$(\text{Mn}_{0.51}\text{Fe}_{0.49})_{1.00}(\text{WO}_4)$
Усть-Микулинское месторождение		
12	$\text{Sn}_{1.00}\text{O}_2$	$(\text{Fe}_{0.77}\text{Mn}_{0.29})_{1.06}(\text{WO}_4)$ – центр
13	$(\text{Sn}_{0.99}\text{Fe}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$	$(\text{Fe}_{0.54}\text{Mn}_{0.48})_{1.02}(\text{WO}_4)$ – край
14	$\text{Sn}_{1.00}\text{O}_2$	$(\text{Mn}_{0.80}\text{Fe}_{0.22})_{1.02}(\text{WO}_4)$
Забывое месторождение		
15	$(\text{Sn}_{0.97}\text{Ti}_{0.03})_{1.00}\text{O}_2$	$(\text{Mn}_{0.50}\text{Fe}_{0.46})_{0.96}(\text{WO}_4)$
16	$(\text{Sn}_{0.98}\text{Ti}_{0.01}\text{Ta}_{0.01})_{1.00}\text{O}_2$	$(\text{Mn}_{0.50}\text{Fe}_{0.45})_{0.95}(\text{WO}_4)$
17	$(\text{Sn}_{0.98}\text{Ti}_{0.01}\text{Ta}_{0.01}\text{W}_{0.01})_{1.01}\text{O}_2$	$(\text{Mn}_{0.57}\text{Fe}_{0.43})_{1.00}(\text{WO}_4)$

ВЫВОДЫ

Оловорудные касситеритовые и вольфрамит-касситеритовые месторождения Приамурья и Приморья отличаются строением и минерализацией с варьирующим составом главных рудных минералов – касситерита и вольфрамита (таблица). Среди исследованных образцов наиболее частыми примесями касситерита являются Ti, Ta, Nb, Fe и W (вероятно, в некоторых случаях из-за микровключений рутила, тантало-ниобатов и вольфрамита). Вольфрамит обычно не содержит примесей, гюбнерит преобладает над ферберитом, иногда минерал содержит Nb или Nb с Ta. Вариации преобладающего состава касситерита в парагенезисе с вольфрамитом из некоторых месторождений Приамурья и Приморья приведены в таблице. Характерно, что нередко касситерит содержит Ti, Ta и Nb, которые

отсутствуют в сингенетичном с ним вольфрамите, а также встречаются и обратные случаи.

В исследованных образцах из разных месторождений Приамурья и Приморья также выявлены ранее неизвестные минералы: герсдорфит, колумбит-Mn, монацит-(Ce), триплит, циркон (Хинганское месторождение), арсенопирит, самородный висмут, висмутин, ильменит, сульфиды Pb и Bi, сфалерит, V-содержащий рутил, варламовит и скородит (Мерекская россыпь), виттихенит и рокезит (Тигриное месторождение), гизингерит (Усть-Микулинское), уранинит и гоэцит-горсейскит (Забывое), триплит (Шибановское).

Все упомянутые в статье месторождения олова и вольфрама связаны с гранитами, представлены жилками и зонами штокверков. Типичная минеральная ассоциация с кварцем, железистым мусковитом, топазом, турмалином позволяет отнести

их формирование к грейзеновой формации. Состав минералообразующих элементов в касситерите и вольфрамите из разных месторождений сходен. Тем не менее, различия в морфологии и размере выделений минералов Sn и W обуславливают невозможность обогащения руд по унифицированной технологической схеме.

ЛИТЕРАТУРА

- Акимов В.М., Орловский В.В., Алёшин В.В., Ивакин А.И., Левшук А.Е. (1985ф) Результаты поисково-разведочных работ на месторождении Тигриное (Приморье). Рошино, Таёжная ГРЭ, 270 с.
- Алексеев В.И., Марин Ю.Б., Гавриленко В.В. (2019) Редкометалльная минерализация оловорудных проявлений в районе развития литий-фтористых гранитов (Верхнеурмийский рудный узел, Приамурье). *Тихоокеанская геология*, 38(2), 27–40. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2019-38-2-27-40>
- Банщикова Т.С., Крюкова Г.В. (1988) Типоморфные особенности минералов Правоурмийского месторождения (Приамурье). *Минералогия месторождений Дальнего Востока*. Владивосток, ДВО АН СССР, 50–57.
- Богданов В.И., Кокорин А.М., Коростелёв В.Г. и др. (1979) Вещественный состав и условия образования Правоурмийской оловорудной зоны. *Минералогия и геохимия оловорудных месторождений*. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 36–51.
- Гаев И.А., Гаева Н.М. (1959ф) Отчет о геологических результатах работ, проведенных Татибинской партией в 1957–1958 гг. в бассейне реки Татибе и на Тигрином вольфрам-оловорудном месторождении. Рошино, Иманская ГСЭ, 202 с.
- Гвоздев В.И., Коростелёв П.Г., Игнатьев А.В. и др. (1990) Минеральные ассоциации и генезис руд месторождения Забытого (Приморье). *Минеральные ассоциации месторождений олова и вольфрама на Дальнем Востоке*. Владивосток, ДВО АН СССР, 3–16.
- Гоневчук В.Г., Коростелёв П.Г., Семеняк Б.И. (2005) О генезисе оловорудного месторождения Тигринное (Россия). *Геология рудных месторождений*, 47(3), 249–264.
- Ивакин А.Н., Левшук А.Е., Орловский В.В., Акимов В.Н. (1985) Олово-вольфрамовое оруденение порфирового типа в Приморье. *Разведка и охрана недр*, 8, 22–26.
- Ициксон Г.В., Рундквист Д.В., Павлова И.Г., Щербинин Е.С., Огнянов Н.В., Феклович О.П., Шишканова О.Ф., Попкова М.И. (1959) Оловорудные месторождения Малого Хингана. *Труды ВСЕГЕИ*, 27, 344 с.
- Коростелёв П.Г., Гоневчук В.Г., Гоневчук Г.А. и др. (1990) Минеральные ассоциации грейзенового вольфрам-оловянного месторождения (Приморье). *Минеральные ассоциации месторождений олова и вольфрама на Дальнем Востоке*. Владивосток, ДВО АН СССР, 17–61.
- Косовец Ю.Г., Ставров О.Д. (1983) Локальный спектральный анализ в геологии. М., Недра, 103 с.
- Крюков В.Г., Никулин Н.Н., Грушкин Н.Н. (1988) Состав и зональность околорудных метасоматитов Карадубского рудного поля. *Минералогия месторождений Дальнего Востока*. Владивосток, ДВО АН СССР, 28–40.
- Лариошкин А.К., Орловский В.В., Акимов В.Н., Колотова Т.А. (1990ф) Материалы к ТЭО постоянных кондиций по результатам детальной разведки Тигриного месторождения. Рошино, Таёжная ГРЭ, т. 1, 178 с.
- Материков М.П., Шацкая В.Т. (1958ф) Геология оловорудных месторождений Арму-Иманского района в Приморье. М., ВИМС, 120 с.
- Погребс Н.А. (1993) Минералогия и генезис рудных образований Правоурмийского оловорудного месторождения. Автореферат дисс. на соиск. степ. канд. геол.-мин. наук. Санкт-Петербург, 21 с.
- Попов В.А., Попова В.И. (1992) Методика и результаты минералогического картирования вольфрам-оловянного месторождения Тигриное (Приморье). Екатеринбург, Наука, 92 с.
- Попов В.А., Попова В.И. (1993) Минералогия руд Усть-Микулинского оловянно-вольфрамового месторождения (Приморье). Миасс, ИМин УрО РАН, 77 с.
- Попов В.А., Попова В.И., Виноградова Л.Г. (1992) Минералогия редкометалльного месторождения Забытое (Приморье). Миасс, ИМин УрО РАН, 65 с.
- Попова В.И. (1980) Минералогия руд Берёзового оловорудного месторождения. *Минералогические исследования гидротермалитов Урала*. Свердловск, УНЦ АН СССР, 82–93.
- Попова В.И., Баженова Л.Ф. (1976) Первая находка флюоцерита на Дальнем Востоке. *Минералы и парагенезисы минералов горных пород*. Ленинград, Наука, 135–139.
- Попова В.И., Синяков Е.Я. (1978) Минералогическое картирование месторождений (на примере Хинганского оловорудного месторождения). *Материалы к минералогии Южного Урала*. Свердловск, УНЦ АН СССР, 30–42.
- Попова В.И., Тимошин В.Т. (1987) О зонально-секториальном распределении стабильных изотопов олова в касситерите из россыпи р. Мерек (Хабаровский край). *Минералогия рудных районов Дальнего Востока*. Владивосток, ДВО АН СССР, 52–58.
- Попова В.И., Попов В.А., Долгопят Л.Г. (1988) Методика и результаты изучения состава и распределения вольфрамита на Тигрином месторождении в Приморье. *Минералогия месторождений Дальнего Востока*. Владивосток, ДВО АН СССР, 40–50.
- Попова В.И., Попов В.А., Коростелёв П.Г., Орловский В.В. (2013) Минералогия руд W-Sn месторождения Тигриное на Сихотэ-Алине и перспективы его освоения. Екатеринбург, РИО УрО РАН, 132 с.
- Семеняк Б.И., Родионов С.М., Гоневчук В.Г., Коростелёв П.Г., Кокорин А.М. (2006). Правоурмийское

месторождение. *Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России*. Владивосток, Дальнаука, 20 с.

Синяков Е.Я. (1975) Зоны брекчий Хинганского месторождения и некоторые вопросы их генезиса. *Геология и геофизика*, 6, 95–101.

Степнова Ю.А. (2013) Генезис и флюидный режим формирования рудно-магматической системы Шибановского рудного узла. Автореферат дисс. на соиск. степ. канд. геол.-мин. наук. Владивосток, 30 с.

Шнайдер А.А. (2011) Вольфрамиты оловянно-вольфрамового месторождения Тигриное (Приморье). *Записки РМО*, 5, 63–75.

REFERENCES

- Akimov V.M., Orlovsky V.V., Alyoshin V.V., Ivakin A.I., Levshuk A.E. (1985) Results of prospecting and exploration works at the Tigrinoe deposit (Primorye). *Roshchino, Tayozhnaya GRE*, 270 p. (in Russian).
- Alekseev V.I., Marin Y.B., Gavrilenko V.V. (2019) Rare-metal mineralization of Sn occurrences in the area of Li-F granites, Verkhneurmisky ore cluster, Amur region. *Russian Journal of Pacific Geology*, 13(2), 120–131. <https://doi.org/10.1134/S1819714019020027>
- Banshchikova T.S., Kryukova G.V. (1988) Typomorphic features of minerals of the Pravy Urmii deposit (Amur region). *Mineralogiya mestorozhdeniy Dal'nego Vostoka (Mineralogy of Deposits of the Far East)*. Vladivostok, DVO AN SSSR, 50–57. (in Russian).
- Bogdanov V.I., Kokorin A.M., Korostelev V.G. et al. (1979) Composition and formation conditions of the Pravy Urmii Sn-bearing zone. *Mineralogiya i geokhimiya olovorudnykh mestorozhdeniy (Mineralogy and Geochemistry of Tin Deposits)*. Vladivostok, DVNTs AN SSSR, 36–51. (in Russian).
- Gaev I.A., Gaeva N.M. (1959) Unpublished report on geological results of works carried out by the Tatibe party in 1957–1958 in the basin of the Tatibe River and at the Tigrinoe W-Sn deposit. *Roshchino, Iman GSE*, 202 p. (in Russian).
- Gonevchuk V.G., Korostelev P.G., Semenyak B.I. (2005) Genesis of the Tigrinoe tin deposit (Russia). *Geology of Ore Deposits*, 47(3), 223–237.
- Gvozdev V.I., Korostelev P.G., Ignatiev et al. (1990) Mineral assemblages and genesis of ores of the Zabytoe deposit (Primorye). *Mineral'nye assotsiatsii olova i volframa na Dal'nem Vostoke (Mineral Assemblages of Sn and W Deposits of the Far East)*. Vladivostok, DVO AN SSSR, 3–16. (in Russian).
- Ivakin A.N., Levshuk A.E., Orlovskiy V.V., Akimov V.N. (1985) Tin-tungsten porphyry mineralization in Primorye. *Razvedka i okhrana neдр (Exploration and Protection of Mineral Resources)*, 8, 22–26. (in Russian).
- Itsikson G.V., Rundqvist D.V., Pavlova I.G., Shcherbinin E.S., Ognyanov N.V., Feklovich O.P., Shishkanova O.F., Popkova M.I. (1959) Tin-tungsten deposits of Maly Hingan. *Trudy VSEGEI (Proceedings of VSEGEI)*, 27, 344 p. (in Russian).
- Korostelev P.G., Gonevchuk V.G., Gonevchuk G.A., et al. (1990) Mineral assemblages of a greisen Sn-W deposit (Primorye). *Mineral'nye assotsiatsii olova i volframa na Dal'nem Vostoke (Mineral Assemblages of Sn and W Deposits of the Far East)*. Vladivostok, 17–61. (in Russian).
- Kosovets Yu.G., Stavrov O.D. (1983) *Local spectral analysis in geology*. Moscow, Nedra, 103 p. (in Russian).
- Kryukov V.G., Nikulin N.N., Grushkin N.N. (1988) Composition and zonation of wall-rock metasomatites of the Karadub ore field. *Mineralogiya mestorozhdeniy Dal'nego Vostoka (Mineralogy of Deposits of the Far East)*. Vladivostok, DVNTs AN SSSR, 28–40. (in Russian).
- Larioskin A.K., Orlovsky V.V., Akimov V.N., Kolotova T.A. (1990) *Unpublished materials for feasibility study of permanent conditions based on results of detailed exploration of the Tigrinoe deposit*. *Roshchino, Tazhnaya GRE*, vol. 1, 178 p. (in Russian).
- Materikov M.P., Shatskaya V.T. (1958) *Geology of tin deposits of the Armu-Iman district in Primorye*. Moscow, VIMS, 120 p. (in Russian).
- Pogrebs N.A. (1993) *Mineralogy and genesis of ores of the Pravy Urmii tin deposit. (Abstract of Candidate dissertation)*. St. Petersburg, 21 p. (in Russian).
- Popov V.A., Popova V.I. (1992) *Methodology and results of mineralogical mapping of the Tigrinoe tungsten-tin deposit (Primorye)*. Yekaterinburg, Nauka, 92 p. (in Russian).
- Popov V.A., Popova V.I. (1993) *Mineralogy of ores of the Ust-Mikulinskoe tin-tungsten deposit (Primorye)*. Miass, IMin UrO RAN, 77 p. (in Russian).
- Popov V.A., Popova V.I., Vinogradova L.G. (1992) *Mineralogy of the Zabytoe rare metal deposit (Primorye)*. Miass, IMin UrO RAN, 65 p. (in Russian).
- Popova V.I. (1980) Mineralogy of ores of the Berezovoe tin deposit. *Mineralogicheskie issledovaniya gidrotermal'nykh Urala (Mineralogical Studies of Hydrothermalites of the Urals)*. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR, 82–93. (in Russian).
- Popova V.I., Bazhenova L.F. (1976) *The first finding of fluorocerite in the Far East. Mineraly i paragenезisы mineralov gornykh porod (Minerals and Mineral Parageneses of Rocks)*. Leningrad, Nauka, 135–139. (in Russian).
- Popova V.I., Popov V.A., Dolgopyat L.G. (1988) Methodology and results of study of the composition and distribution of wolframite in the Tigrinoe deposit in Primorye. *Mineralogiya mestorozhdeniy Dal'nego Vostoka (Mineralogy of Deposits of the Far East)*. Vladivostok, DVNTs AN SSSR, 40–50. (in Russian).
- Popova V.I., Popov V.A., Korostelev P.G., Orlovskiy V.V. (2013) *Mineralogy of ores from the Tigrinoe W-Sn deposit in Sikhote-Alin and prospects for its exploitation*. Yekaterinburg, RIO UrO RAN, 132 p. (in Russian).

Popova V.I., Sinyakov E.Ya. (1978) Mineralogical mapping of the deposits (on example of the Khingan tin deposit). *Materialy k mineralogii Yuzhnogo Urala (Materials for Mineralogy of the Southern Urals)*. Sverdlovsk, UNTs UrO RAN, 30–42. (in Russian).

Popova V.I., Timoshin V.T. (1987) On zonal-sectoral distribution of stable Sn isotopes in cassiterite from the placer of the Merek River (Khabarovsk krai). *Mineralogiya rudnykh rayonov Dal'nego Vostoka (Mineralogy of Ore Regions of the Far East)*. Vladivostok, DVO AN SSSR, 52–58. (in Russian).

Semenyak B.I., Rodionov S.M., Gonevchuk V.G., Korostelev P.G., Kokorin A.M. (2006). Pravy Urmii deposit. *Geodinamika, magmatism i metallogeniya Vostoka Rossii (Geodynamics, Magmatism, and Metallogeny of East Russia)*. Vladivostok, Dalnauka, 20 p. (in Russian).

Shnaider A.A. (2011) Wolframites of the Tigrinoe Sn-W deposit (Primorye). *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 5, 63–75. (in Russian)

Sinyakov E.Ya. (1975) Breccia zones of the Khingan deposit and some issues of their genesis. *Geologiya i geofizika (Geology and Geophysics)*, 6, 95–101. (in Russian).

Stepnova Yu.A. (2013) *Genesis and fluid regime of formation of ore-magmatic system of the Shibansky ore cluster. (Abstract of Candidate dissertation)*. Vladivostok, 30 p. (in Russian).

Информация об авторах

Попова Валентина Ивановна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия, popov@mineralogy.ru

Попов Владимир Анатольевич – доктор геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия, popov@mineralogy.ru

Блинов Иван Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия, ivan_a_blinov@mail.ru

Information about the authors

Valentina I. Popova – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia, popov@mineralogy.ru

Vladimir A. Popov – Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia, popov@mineralogy.ru

Ivan A. Blinov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology, Urals Branch, Russian Academy of Sciences, ivan_a_blinov@mail.ru



УДК 550.42

<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-2-3>

СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) В РУДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА КОПЫЛОВСКОЕ, КАВКАЗ И КРАСНОЕ (БОДАЙБИНСКИЙ РАЙОН)

Е.Е. Паленова, С.А. Садыков

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; palenova@mineralogy.ru

Статья поступила в редакцию 15.04.2025 г., после доработки 22.05.2025 г., принята к печати 01.06.2025 г.

Аннотация. В статье приводятся данные об изотопном составе кислорода в жильном кварце и карбонатах, углерода в карбонатах и серы в сульфидах золоторудных месторождений Копыловское, Кавказ и Красное, расположенных в пределах Байкало-Патомского нагорья и залегающих в догалдынской (Копыловское, Кавказ) и аунакитской (Красное) свитах эдиакарского возраста. Изотопный состав кислорода кварца укладывается в узкий диапазон значений от +16.7 до +19.3 ‰, расчет $\delta^{18}\text{O}$ воды во флюиде показал постепенное увеличение значений в ряду месторождений Кавказ (+9.59...+10.59 ‰), Копыловское (+10.92...+11.42 ‰), Красное (+12.14...+12.94 ‰). Полученные данные близки к значениям $\delta^{18}\text{O}$ кварца из золоторудных месторождений Сухой Лог, Голец Высочайший и Вернинское, расположенных в том же районе, и, соответственно, источник флюида интерпретируется как метаморфогенно-гидротермальный. Изотопный состав кислорода железо-магнезиальных карбонатов из углеродистых сланцев месторождений Копыловское и Кавказ близок значениям, полученным для жильного кварца ($\delta^{18}\text{O}_{\text{карб.}} = +16.64...+18.38$ ‰), тогда как значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб.}}$ доломита из кварц-карбонатных жил Копыловского месторождения значительно ниже (+12.80 и +13.88 ‰). Вероятно, образование жил происходило из единого эволюционирующего метаморфогенно-гидротермального флюида при фракционировании изотопов кислорода между кварцем и карбонатом. Изотопные соотношения серы для пирита месторождений Копыловское и Кавказ перекрываются и составляют –11.91...–1.68 и –16.86...–6.66 ‰, соответственно. Сера в пирите месторождения Красное более тяжелая: –6.35...–0.09 ‰. Золотоносные галенит (месторождение Красное) и халькопирит (месторождение Кавказ) из поздних кварцевых жил также характеризуются изотопно-легкой серой: –3.12 и –6.32 ‰, соответственно. Значения $\delta^{34}\text{S}$ коррелируют с таковыми для метаморфогенного пирита вмещающих месторождения догалдынской и аунакитской свит, что указывает на коровый источник формирования золото-сульфидных руд.

Ключевые слова: Ленский золотоносный район, орогенные месторождения, черные сланцы, докембрий, рудогенез.

Финансирование. Работы выполнены в рамках государственной бюджетной темы ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № 122031600292-6.

Благодарности. Авторы признательны д.г.-м.н. Т.А. Веливецкой и д.г.-м.н. С.Г. Кряжеву за выполнение изотопных анализов. Особая благодарность д.г.-м.н. Е.В. Белогуб за обсуждение статьи и полезные комментарии.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с данной рукописью.

Вклад авторов. Е.Е. Паленова – разработка концепции, исследование, написание рукописи. С.А. Садыков – аналитические исследования. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Паленова Е.Е., Садыков С.А. Стабильные изотопы ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) в рудах месторождений золота Копыловское, Кавказ и Красное (Бодайбинский Район). Минералогия, 2025, 11(2), 47–69. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-2-3.

STABLE ISOTOPES ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) IN ORES FROM THE
KOPYLOVSKOE, KAVKAZ AND KRASNOE GOLD DEPOSITS (BODAIBO REGION)

E.E. Palenova, S.A. Sadykov

South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,
Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia; palenova@mineralogy.ru

Received 15.04.2025, revised 22.05.2025, accepted 01.06.2025

Abstract. The article presents data on isotopic composition of oxygen of vein quartz and carbonates, carbon of carbonates, and sulfur of sulfides of the Kopylovskoe, Kavkaz and Krasnoe gold deposits located within the Baikal-Patom Highland in the Ediacaran Dogaldyn (Kopylovskoe, Kavkaz) and Aunakit (Krasnoe) Formations. The oxygen isotopic composition of quartz fits a narrow range of values from +16.7 to +19.3 ‰; the calculated $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values of the fluid showed a gradual increase in a range from Kavkaz (+9.59 to +10.59 ‰) to Kopylovskoe (+10.92 to +11.42 ‰) and Krasnoe (+12.14 to +12.94 ‰) deposits. Our data are close to $\delta^{18}\text{O}$ values of quartz from the Sukhoi Log, Golets Vysochaishy and Verninskoe gold deposits located in the same region, thus, the fluid source is interpreted as metamorphic-hydrothermal. The oxygen isotopic composition of Fe-Mg carbonates from carbonaceous shales of the Kopylovskoe and Kavkaz deposits is close to those values of vein quartz ($\delta^{18}\text{O}_{\text{carb.}} = +16.64$ to $+18.38$ ‰), whereas the $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb.}}$ values of dolomite from quartz-carbonate veins of the Kopylovskoe deposit are significantly lower (+12.80 and +13.88 ‰). It is likely that the veins formed from a single evolving metamorphic-hydrothermal fluid upon oxygen isotopic fractionation between quartz and carbonate. Sulfur isotopic ratios for pyrite from the Kopylovskoe and Kavkaz deposits are overlapped: -1.68 to -11.91 , and -16.86 to -6.66 ‰, respectively. The $\delta^{34}\text{S}$ values of pyrite from the Krasnoe deposit are lower: -0.09 to -6.35 ‰. Gold-bearing galena (Krasnoe deposit) and chalcopyrite (Kavkaz deposit) from late quartz veins are also characterized by low $\delta^{34}\text{S}$ values: -3.12 and -6.32 ‰, respectively. The $\delta^{34}\text{S}$ values are correlated with those for metamorphic pyrite from the host Dogaldyn and Aunakit Formations, indicating a crustal source for the gold-sulfide ores.

Keywords: Lena gold province, orogenic deposits, black shales, Precambrian, ore genesis.

Funding. This work was supported by state contract of the South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS no. 122031600292-6.

Acknowledgements. The authors are grateful to T.A. Velivetskaya and S.G. Kryazhev for performing isotope analyses. We also sincerely thanks to E.V. Belogub for discussing the article and useful comments.

Conflict of interests. The authors declare that there are no conflicts of interest related to this manuscript.

Author contribution. E.E. Palenova – conceptualization, investigation, writing; S.A. Sadykov – analytical work. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Palenova E.E., Sadykov S.A. Stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) in ores of the Kopylovskoe, Kavkaz And Krasnoe gold deposits (Bodaibo Region) Mineralogy, 2025, 11(2), 47–69. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-2-3.

ВВЕДЕНИЕ

Орогенные месторождения золота эпизодически формировались на протяжении более 3 млрд лет истории Земли в период от среднего архея до позднего докембрия и непрерывно – в течение всего фанерозоя. Этот класс месторождений связан с блоками земной коры, деформированными и метаморфизованными в процессе аккреционно-коллизийного этапа орогенеза (Goldfarb et al., 2001). Они являются источником большей части мировых запасов золота, значительную долю которых занимают месторождения в углеродисто-терригенных комплексах. Последние вмещают более половины запасов золота России, в т. ч. крупнейшие место-

рождения Сухой Лог, Олимпиада, Нежданнинское, Майское и др. Ленская золотоносная провинция, расположенная в Байкало-Патомском нагорье, – один из эталонных примеров объектов этого типа в нашей стране.

Месторождения Ленской провинции, в том числе крупные и гигантские (Сухой Лог ~2000 т Au, Вернинское ~300 т, Голец Высочайший ~100 т, Красный ~100 т и т. д.; Будяк и др., 2024) залегают в углеродистых терригенных и карбонатных отложениях Патомского комплекса, накопившихся на окраине и склоне Сибирского кратона в Палеоазиатском океане в криогении-эдиакаре (Чугаев и др., 2018 и ссылки в этой работе). Михайловская свита палеопротерозоя также вмещает месторождение

Чертово Корыто (80 т Au; Верховин и др., 2007). Рудные тела приурочены к зонам разломов и замкам складок высоких порядков.

Генезис коренных месторождений Ленской провинции обсуждается с момента открытия месторождения Сухой Лог в 1969 г. (Буряк, 1982). Ряд исследователей признают существенную роль процессов докембрийского осадконакопления в первичном концентрировании металла, а его дальнейшее перераспределение и формирование рудных тел связывают с процессами регионального метаморфизма (Немеров, 1989; Буряк, Хмелевская, 1997; Large et al., 2007). По другой точке зрения основным источником золота являлись палеозойские гранитоиды, а его концентрирование связано с орогенным метаморфизмом (Шер, 1972; Рундквист и др., 1992; Дистлер и др., 1996; Кучеренко и др., 2011). Современные исследователи (Tarasova et al., 2020; Будяк и др., 2024), развивая представления (Буряк, Хмелевская, 1997; Немеров и др., 2010), выделяют следующие этапы формирования месторождений, связанные с геологической историей региона: 1) накопление специализированных на золото осадков за счет гидротермальной активности задугового бассейна и сноса терригенного материала со стороны Муйского орогена (Чугаев, 2024), 2) катагенетическое перераспределение осадочно-поровых флюидов в сводовые части пологих антиклиналей с образованием аномально высоких концентраций золота и 3) метаморфогенно-метасоматическое перераспределение металла в результате декарбонизации катагенетического флюида с образованием экономически значимых рудных тел. Последний этап протекал в условиях коллизии и зонального метаморфизма, связанных с закрытием Палеоазиатского океана, на пике которых сформировались граниты Мамского комплекса (Зорин и др., 2008; Немеров и др., 2010; Tarasova et al., 2020). Также обосновано более позднее формирование золото-кварцевых жильных руд, связанное с герцинским магматизмом и становлением Конкудеро-Мамаканского комплекса гранитов (Chugaev et al., 2022).

Большинство генетических моделей образования вышеуказанных золоторудных месторождений основаны на геологических, минералогических, геохронологических и геохимических данных, в том числе на использовании геохимии стабильных изотопов (Вагина, 2011, 2012; Кряжев, 2017; Горячев и др., 2017; Tarasova et al., 2020, Тарасова и др., 2021, 2022; Онищенко, Сокерина, 2021; Будяк и др., 2024), которая является инструментом для

определения типа источников рудоносного флюида и металла. Наиболее полно изучено месторождение Сухой Лог (Distler et al., 2004; Лаверов и др., 2007; Meffre et al., 2008; Гаврилов, Кряжев, 2008; Кряжев и др., 2009; Иконникова и др., 2009; Чернышов и др., 2009; Дубинина и др., 2014), другие объекты охарактеризованы с разной степенью детальности. Исследования показывают, что, несмотря на общее сходство месторождений Ленской провинции, положение объектов на разных стратиграфических горизонтах и в зонах с различным уровнем метаморфизма придает особенности каждому из них. Поэтому изучение разномасштабных месторождений актуально с точки зрения и прикладной, и фундаментальной геологии. В статье приводятся данные анализа стабильных изотопов серы в сульфидах, углерода и кислорода в карбонатах, а также кислорода в жильном кварце месторождений золота Копыловское, Кавказ и Красное.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Ленская золотоносная провинция расположена в пределах Байкало-Патомского складчатого пояса (БПП), обрамляющего с юга в виде дуги архейско-раннепротерозойский фундамент Сибирской платформы. БПП рассматривается как один из крупных структурных элементов Центрально-Азиатского орогенного пояса (Рыцк и др., 2011; Ярмолюк и др., 2012), а его внутреннее строение определяется присутствием выступов раннепротерозойского фундамента (Чуйско-Тонодско-Нечерская цепочка блоков), а также палеорифтов, поднятий и эпикратонных прогибов, сложенных позднедокембрийскими и раннепалеозойскими осадочными комплексами. В БПП выделяют Прибайкальскую, Патомскую и Бодайбинскую структурно-фациальные зоны, корреляция неопротерозойских отложений которых проводилась многими исследователями (Салоп, 1964; Казакевич и др., 1971; Кориковский, Федоровский, 1980; Иванов и др., 1995; Немеров и др., 2010; Гладкочуб и др., 2013). Внутренняя Бодайбинская зона (БЗ) представляет собой широкий, серповидный синклиний, который с юга полукольцом ограничивает выходы палеозойских гранитоидов. Патомский комплекс углеродистых терригенно-карбонатных пород слагает Патомскую и Бодайбинскую зоны БПП, в нем снизу вверх выделяются баллаганакская, дальнетайгинская, жуинская и юдомская серии (рис. 1; Немеров и др., 2010; Гладкочуб и др., 2013).

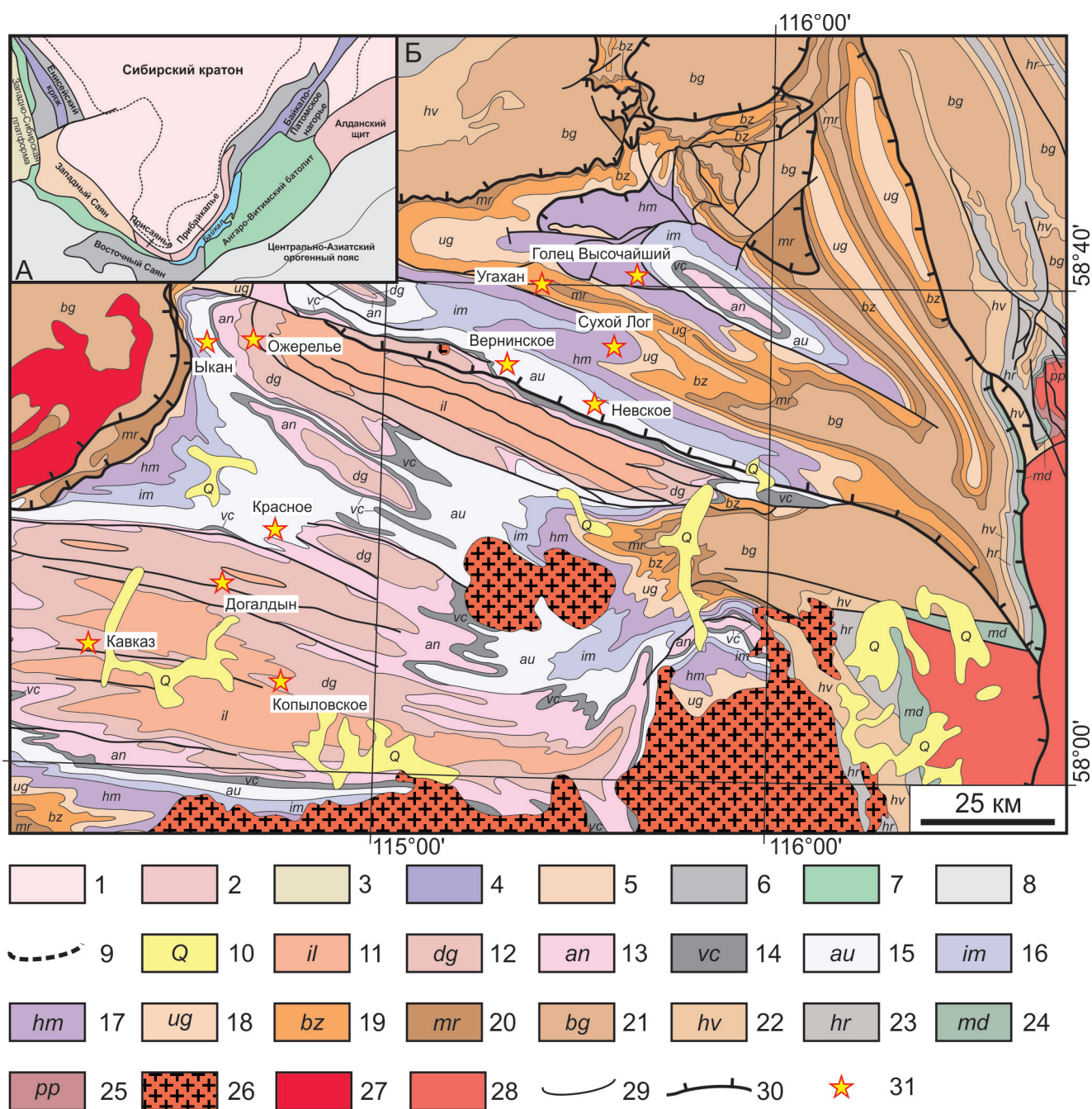


Рис. 1. Тектоническое положение Байкало-Патомского нагорья, с упрощениями по (Yudovskaya et al., 2016) (А) и геологическое строение Бодайбинской зоны, с изменениями по (Chugaev et al., 2022) (Б).

Рис. 1А: 1 – чехол Сибирской платформы; 2 – фундамент Сибирской платформы; 3 – Западно-Сибирская плита; 4 – рифтовые зоны; 5 – докембрийский фундамент складчатых поясов; 6 – пассивные континентальные окраины; 7 – активные окраины; 8 – Центрально-Азиатский орогенный пояс; 9 – границы докембрийской трансгрессии.

Рис 1Б: 10 – кайнозойские отложения; 11–23 – неопротерозойские отложения патомского комплекса (свиты): 11 – илигирская, 12 – догалдынская, 13 – анангская, 14 – вачская, 15 – аунакитская, 16 – имняхская, 17 – хомолхинская, 18 – угаханская, 19 – бужуихтинская, 20 – мариинская, 21 – бугорихтинская, 22 – хайвергинская, 23 – хорлухтахская; 24, 25 – тепторгинская серия мезопротерозоя (свиты): 24 – медвежьевская, 25 – пурпольская; 26–28 – гранитные интрузии: 26 – Конкудеро-Мамаканского комплекса, карбон; 27 – Мамского комплекса, силур, 28 – Чуйско-Кодарского комплекса, палеопротерозой; 29 – основные разломы; 30 – надвиги; 31 – месторождения золота.

Fig. 1. Tectonic setting of the Baikal-Patom Highland, simplified after (Yudovskaya et al., 2016) (A) and geological map of the Bodaibo zone, modified after (Chugaev et al., 2022) (B).

Fig. 1A: 1 – cover of the Siberian Platform; 2 – basement of the Siberian Platform; 3 – West Siberian Platform; 4 – rift zones; 5 – Precambrian basement of fold belts; 6 – passive margins; 7 – active margins; 8 – Central Asian orogeny belt; 9 – boundary of Precambrian transgression.

Fig. 1B: 10 – Cenozoic sediments; 11–23 – formations of the Neoproterozoic Patom complex: 11 – Ilgir; 12 – Dogaldyn; 13 – Anangra; 14 – Vacha; 15 – Aunakit; 16 – Imnyakh; 17 – Khomolkho; 18 – Ugakhan; 19 – Buzuikhta; 20 – Mariinskaya; 21 – Bugarikhta; 22 – Khaiverga; 23 – Khorlukhtakh; 24; 25 – formations of the Mesoproterozoic Teptorgo Group: 24 – Medvezhevka; 25 – Purpol; 26–28 – granitoid complexes: 26 – Carboniferous Konkudera-Mamakan; 27 – Silurian Mama; 28 – Paleoproterozoic Chuya-Kodar; 29 – main faults; 30 – thrusts; 31 – gold deposits.

Патомский комплекс (рис. 2) несогласно залегает на вулканогенно-осадочных отложениях медвежевской свиты, маркирующей начало рифтогенеза, приведшего к распаду Родинии и открытию Палеоазиатского океана между 715 и 665 млн лет (Gladkochub et al., 2019). По современным представлениям, Палеоазиатский океан существовал как открытый бассейн с океанической корой в интервале 665–625 млн лет, а затем около 610 млн лет назад был преобразован в бассейн форланда за счет причленения к Сибирскому кратону ряда микроконтинентов и островных дуг, в том числе Байкало-Муйской островной дуги (Gladkochub et al., 2019). Накопление патомского комплекса углеродистых терригенно-карбонатных пород протекало в условиях как открытого морского бассейна Палеоазиатского океана (баллаганакская серия, часть дальнотайгинской вплоть до угаханской свиты, включительно), так и бассейна форланда (начиная с хомолхинской свиты дальнотайгинской серии вплоть до юдомской серии включительно) (Чугаев и др., 2018). Бассейн форланда в жуинское и юдомское время состоял из частично изолированных участков с разной глубиной и гидродинамическим режимом, что определило появление фациальных зон, отличающихся по условиям осадконакопления (Чугаев и др., 2018). В основании джемкуканской свиты дальнотайгинской серии обнаружены ледниковые отложения, относимые к Мариноанскому оледенению, что позволило ограничить возраст ее накопления 635 млн лет (Чумаков и др., 2011, 2013). Считается, что дальнотайгинская и жуинская серии отлагались 635–580 млн лет назад, а юдомская – 580–540 млн лет назад (Melezhik et al., 2009; Юдовская и др., 2011; Kuznetsov et al., 2013; Gladkochub et al., 2013; Чумаков и др., 2011, 2013; Powerman et al., 2015; Покровский, Буякайте, 2015).

Закрытие Палеоазиатского океана привело к коллизионно-аккреционным событиям (Зорин и др., 2008, 2009), сопровождавшимся зональным региональным метаморфизмом и интенсивными пластическими деформациями пород патомского

комплекса (Буряк, 1982). Центральная часть Бодайбинского синклинория была метаморфизована в условиях зеленосланцевой фации. Метаморфизм эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций приурочен к периферийным частям выступов Чуйско-Тонодско-Нечерской зоны и контактам палеозойских гранитоидов (Кориковский, Федоровский, 1980; Иванов и др., 1995). Возраст регионального метаморфизма оценивается в 520 млн лет (Виноградов и др., 1996; Scott et al., 2007), а его пик был достигнут 450–420 млн лет назад, когда сформировались граниты S-типа Мамского комплекса (Зорин и др., 2008). Более молодые герцинские (320–300 млн лет) гранитоиды Конкудеро-Мамаканского комплекса связаны со становлением Ангара-Витимского батолита (Бухаров и др., 1992; Неймарк и др., 1993; Ярмолук и др., 1997; Цыганков и др., 2010, 2017; Рыцк и др., 2021).

Большинство золоторудных объектов расположено в пределах бодайбинского синклинория БЗ в зоне зеленосланцевого метаморфизма серицит-хлоритовой и биотит-хлоритовой субфаций (рис. 1, 2). Региональные структуры – Бодайбинская и Маракано-Тунгусская синклинали второго порядка вмещают месторождения: Копыловское, Кавказ, Красное и Догадлынская жила в первой, и Сухой Лог, Голец Высочайший, Вернинское, Невское, Ыкан и др. во второй.

Месторождение Копыловское приурочено к одноименной антиклинали субширотного простирания, осложненной складками более высокого порядка. Шарнир антиклинали изогнут и полого погружается в юго-западном и восточном направлениях. На участке изгиба наблюдаются кварцевые жилы и штокверковые зоны, а также сдвиги-сбросы северо-восточного простирания. В строении месторождения участвуют отложения третьей (dg_3) и четвертой (dg_4) подсвит догадлынской свиты (Вамбольдт и др., 2011ф). Вмещающие породы представлены метапесчаниками, метаалевролитами, углеродисто-серицитовыми и серицитовыми сланцами, метаморфизованными в условиях серицит-

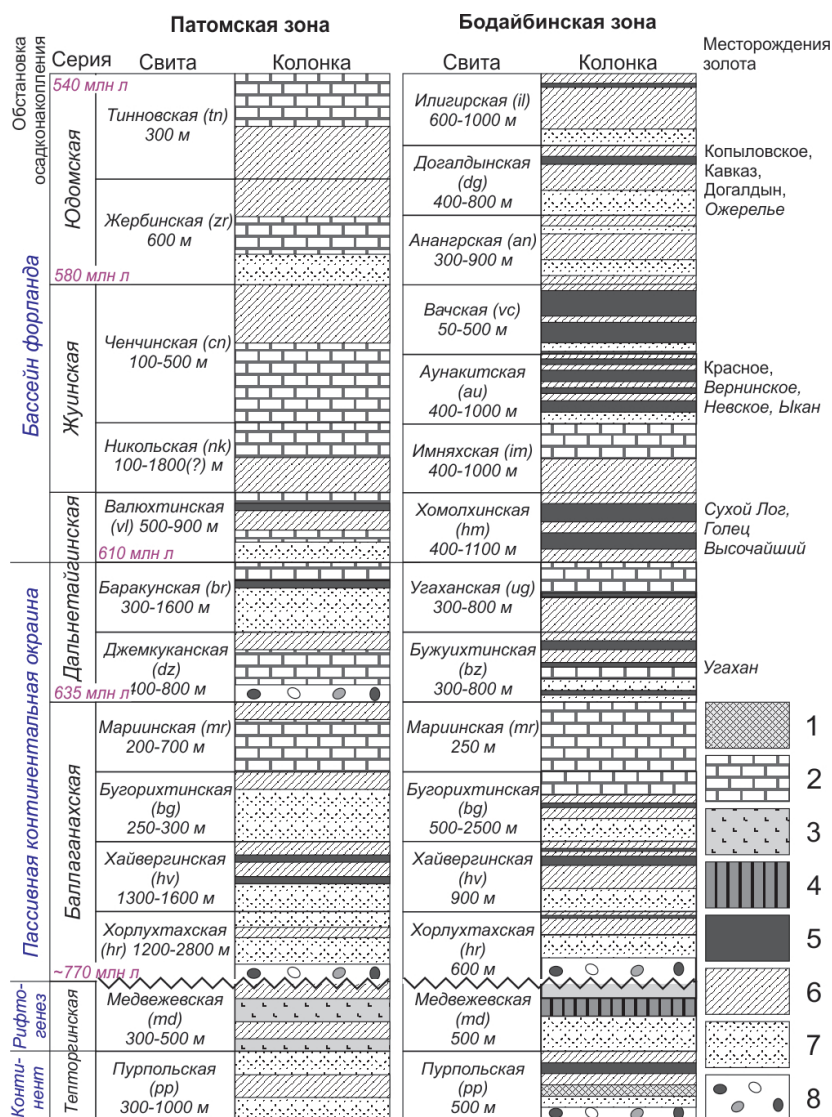


Рис. 2. Стратиграфическая корреляция неопротерозойских отложений патомского комплекса для Бодайбинской и Патомской зон Байкало-Патомского нагорья на основе стратиграфических колонок и данных (Иванов и др., 1995; Немеров и др., 2010; Чугаев и др., 2018). Курсивом выделены месторождения, расположенные в Маракано-Тунгусской синклинали.

1 – кварциты; 2 – известняки, доломиты; 3 – базальты; 4 – железистые кварциты; 5 – углеродистые сланцы; 6 – переслаивание сланцев и песчаников; 7 – песчаники; 8 – гравелиты, конгломераты.

Fig. 2. Stratigraphic correlation between the Neoproterozoic rocks of the Patom and Bodaibo zones within the Baikal-Patom Highland based on stratigraphic schemes and data from (Ivanov et al., 1995; Nemerov et al., 2010; Chugaev et al., 2018). Deposits located in the Marakan-Tunguska Syncline are italicized.

1 – chert; 2 – limestone, dolostone; 3 – basalt; 4 – banded iron formation; 5 – carbonaceous shale; 6 – intercalation of shale and sandstone; 7 – sandstone; 8 – gravelites, conglomerate.

хлоритовой субфации зеленосланцевой фации (Паленова и др., 2013). Из магматических образований на площади известны редкие маломощные дайки лампрофиров. Ближайший гранитный массив расположен в 40 км к востоку (Аксенов и др., 2004ф). Золотое оруденение приурочено к ядру и северному крылу Копыловской антиклинали (Вамбольдт и др., 2011ф). Выделяют золото-сульфидно-кварце-

вый (кварцевые жилы и штокверковые зоны в ядре антиклинальной складки) и золото-сульфидный (минерализованные зоны во вмещающих породах) типы руд (Аксенов и др., 2004ф). Запасы золота категории $C_1 + C_2 - 5260$ кг при среднем содержании металла 1.5 г/т (Иванов, 2014; Информационный..., 2011ф).

В строении месторождения Кавказ выделяют сеть кварцевых жил, образующих полосу субширотного простирания шириной 200–800 м, контролирующуюся Миллионным и Корольковским взбросо-сдвигами. Последние осложняют северное крыло Кайро-Ленинской антиклинали и сопряжены со складками более высоких порядков, таких как Васильевская антиклиналь, к которой приурочено месторождение. Вмещающие породы относятся ко второй подсвите догалдынской свиты (dg_2), на незначительной территории наблюдаются отложения третьей и четвертой подсвит (dg_{3-4}) (Бенедюк и др., 1984ф; Вамбольдт и др., 2012ф). Они представлены метапесчаниками, метаалевролитами, углеродисто-серицитовыми и серицитовыми сланцами, по минералого-петрографическим и геохимическим характеристикам сходными с породами Копыловского месторождения (Паленова и др., 2013). Наблюдаются редкие дайки лампрофиров (Бенедюк и др., 1984ф). Золотое оруденение расположено в зоне влияния Миллионного разлома и в ядре Васильевской антиклинали (Вамбольдт и др., 2012ф). Выделяются золото-сульфидно-кварцевый (кварцевые жилы и штокверковые зоны в ядре антиклинальной складки) и золото-сульфидный (минерализованные зоны во вмещающих породах, преимущественно в зоне Миллионного разлома) типы руд (Суслов и др., 1981ф; Вамбольдт и др., 2012ф).

Месторождение Красное приурочено к шарнирам Рудной и Верхне-Бодайбинской антиклиналей третьего порядка, разделенных Ложковой синклиналью (Божко, Кузнецов, 2012ф; Кузьменко, 2013). Рудовмещающая антиклиналь представляет собой опрокинутую складку юго-восточного простирания, осложненную малоамплитудными дислокациями, сдвиговыми зонами, катаклазом, зонами трещиноватости (Tarasova et al., 2020). Месторождение залегает в аунакитской свите, отложения которой представлены переслаивающимися горизонтами углеродсодержащих ($\text{C}_{\text{орг}}$ до 4 мас. %) метапесчаников и алевролитов и согласно залегают на карбонатных породах имняхской свиты. В верхней части разреза породы перекрыты углеродистыми ($\text{C}_{\text{орг}} = 10$ мас. %) кварц-серицитовыми сланцами с прослоями углеродистых кварцевых песчаников вачской свиты (Tarasova et al., 2020). Все породы метаморфизованы в условиях серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации (Паленова и др., 2013). На месторождении выделено два рудных тела: верхнее протяженностью 1100 м и мощностью 60 м и нижнее протяженностью 1440 м и

мощностью 90 м, разделенные безрудными зонами. Золотое оруденение приурочено к зонам рассеянной и прожилково-вкрапленной пиритовой минерализации, в меньшей степени к кварцевым жилам и прожилкам с гнездами сульфидов (Tarasova et al., 2020).

Сульфидная минерализация на всех месторождениях образует послойную и рассеянную вкрапленность в сланцах, метапесчаниках и метаалевролитах, послойные кварц-пиритовые прожилки и просечки в штокверковых зонах, гнездовую и убогую рассеянную вкрапленность в кварцевых жилах. В рудах выделяются следующие последовательные минеральные ассоциации:

1. Седиментогенная и диагенетическая в виде послойной и рассеянной вкрапленности тонких кристаллов и фрамбоидов пирита-1, а также более поздних микроконкреций и «дендритовидных» форм пирита-1а. Очень редко в составе этой ассоциации встречаются тонкие выделения халькопирита и сфалерита (месторождение Красное).

2. Золотоносная метаморфогенная ассоциация мелко-среднезернистого ангедрального до эвгедрального микропористого пирита-2, обрастающего пирит-1 и 1а, с включениями нерудных минералов, сульфидов и самородного золота, а также субгедрального до эвгедрального пирита-2а в кварцевых линзах и прожилках (Паленова и др., 2015а).

3. Поздняя золотоносная ассоциация в секущих кварцевых и карбонат-кварцевых жилах с пиритом, халькопиритом, галенитом, сфалеритом и пирротинном в разных соотношениях (Паленова и др., 2015б).

Кроме того, за пределами рудных тел на месторождениях во вмещающих породах всех литологических разновидностей встречается крупнокристаллический не золотоносный эвгедральный пирит-3 размером до 2–5 см.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Фактический материал для исследования отобран сотрудниками ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (Е.В. Белогуб, К.А. Новоселовым, Е.Е. Паленовой) в ходе полевых работ 2010–2012 гг., а также представлен дочерними предприятиями Kory Goldfields Ltd и ЗАО «СЖС Восток-Лимитед». Для изотопных анализов отбирались пробы из рудных зон и безрудных интервалов, пробоподготовка проводилась вручную Е.Е. Паленовой. Образцы были раздроблены в яшмовой ступке и просеяны до крупности

от -0.25 до $+0.10$ и -0.10 мм. Монофракции кварца и карбонатов извлечены и очищены с использованием бинокулярного микроскопа Stemi-2000C (Zeiss). Фракции сульфидов получены с помощью разделения минералов в бромформе (плотность 2.89 г/см^3) и очистки под бинокулярным микроскопом. Локальные пробы пирита разных генераций извлечены с поверхности образцов микробуром с алмазным наконечником.

Изотопный состав кислорода кварца определен в Аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток, Россия, аналитик д.г.-м.н. Т.А. Веливецкая). Проанализировано по пять проб жильного кварца из месторождений Копыловское и Красное и три пробы – из месторождения Кавказ. Пробы подготовлены лазерным методом фторирования. Кислород выделялся при нагреве проб инфракрасным лазером (MIR-10-30, New Wave Research, США) в атмосфере паров BrF_5 . Кислород очищен методом криогенного разделения, химическим методом с использованием KBr и хроматографическим методом на капиллярной колонке MOLSIV (длина 25 м, внутренний диаметр 0.32 мм, рабочая температура 60°C). Изотопный состав кислорода измерен на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (Thermo Scientific, Germany), работающем в режиме постоянного потока гелия, относительно лабораторного стандарта O_2 , откалиброванного по международному стандарту NBS-28 и стандарту UWG-2 (Valley et al., 1995). Воспроизводимость результатов определения $\delta^{18}\text{O}$ по стандартам составляла 0.1‰ , что соответствует величине 1σ при $n = 10$.

Изотопный состав кислорода воды во флюиде рассчитан с помощью уравнения $1000\ln a_{\text{Q-H}_2\text{O}} = 3.38(10^6 \times T^{-2}) - 2.9$, где T – температура кристаллизации в градусах Кельвина, выражение $1000\ln a_{\text{Q-H}_2\text{O}} \approx \delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$, а $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ – измеренное отношение изотопов кислорода в кварце (Clayton et al., 1972). Температуры гомогенизации первичных включений в изученных жилах месторождений Копыловское, Кавказ и Красное составляют $300\text{--}350$, $212\text{--}280$ и $260\text{--}330^\circ\text{C}$, соответственно (Ankushcheva et al., 2020). Учитывая, что температуры гомогенизации флюидных включений принимаются за минимальные температуры процесса минералообразования (Реддер, 1987), для расчета использованы максимальные значения полученных температур гомогенизации: 350 , 280 и 330°C для месторождений Копыловское, Кавказ и Красное соответственно.

Изотопный состав кислорода и углерода в карбонатах месторождений Копыловское (три пробы) и Кавказ (две пробы), а также изотопный состав серы в сульфидах месторождений Копыловское (шесть проб), Кавказ (четыре пробы) и Красное (четыре пробы) определены на масс-спектрометре DeltaPlus Advantage производства фирмы Thermo Finnigan, сопряженном с высокотемпературным конвектором ЕА/ТС и элементным анализатором Flash1112 с интерфейсом ConFlo III (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс, Россия, аналитик к.г.-м.н. С.А. Садыков). Изотопные отношения измерены в непрерывном потоке газа. При определении изотопного состава кислорода и углерода в карбонатах использовались стандарты кальцита NBS-18 и NBS-19. Погрешность анализа при определении $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб.}}$ равна $\pm 0.08\text{‰}$, VSMOW; $\delta^{13}\text{C} = \pm 0.06\text{‰}$, PDB. При измерении изотопных отношений серы в сульфидах использован стандарт NBS-123, погрешность анализа $\delta^{34}\text{S}$ составила 0.08‰ , CDT.

Изотопные соотношения серы в пирите месторождения Копыловское (четыре анализа) также определены в ФГБУ ЦНИГРИ (г. Москва, Россия, аналитик д.г.-м.н. С.Г. Кряжев). Сера сульфидов переводили в SO_2 посредством реакции с CuO при 760°C в вакууме с последующей криогенной очисткой газа и анализом изотопного состава серы на масс-спектрометре МИ-1201. Результаты пересчитывали по отношению к метеоритному стандарту V–CDT. В качестве эталонов использовали лабораторный стандартный образец ЦНИГРИ МСА-«пирит» ($\delta^{34}\text{S} = +0.7\text{‰}$) и стандартный образец сульфата NBS-127 ($\delta^{34}\text{S} = +20.3\text{‰}$). Точность измерений составила $\pm 0.2\text{‰}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изотопный состав кислорода жильного кварца. Жилы кварцевого и карбонат-кварцевого состава на изученных месторождениях представлены несколькими типами: 1) мощные (1–8 м) седловидные в замках складок и флексур; 2) тонкие (от нескольких мм до 1–5 см) согласные слоистости и сланцеватости кварц-пиритовые прожилки и просечки; 3) секущие жилы различной мощности (от 1 см до $n \times 10$ см). Последние могут содержать золотоносную сульфидную минерализацию, представленную как пиритом, так и сульфидами Cu , Pb и Zn , а также рядом редких для изученных месторождений минералов (Паленова и др., 2015а, 2015б; Ankushcheva et al., 2020).

Таблица 1

Изотопный состав кислорода жильного кварца
месторождений Копыловское (1–5), Кавказ (6–8) и Красное (9–13)

Table 1

Oxygen isotopic composition of vein quartz of the
Kopylovskoe (1–5), Kavkaz (6–8) and Krasnoe (9–13) deposits

№ п/п	№ пробы	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$, ‰	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$, ‰ ¹	Примечание
1	338-36	+17.10	+11.32	1.96 г/т Au**
2	358/2	+17.00	+11.22	0.73 г/т Au**
3	3048-10	+16.70	+10.92	< 0.5 г/т Au**
4	504a/80.2	+17.00	+11.22	не золотоносная*
5	504a/145.65	+17.20	+11.42	не золотоносная*
6	284/5	+18.70	+10.59	с видимым золотом
7	3151-2	+18.70	+10.59	с видимым золотом
8	3151-0	+17.70	+9.59	41.3 г/т Au**
9	141422/251.8	+19.10	+12.74	1.85 г/т Au*
10	141429/85.1	+19.30	+12.94	1.62 г/т Au*
11	141425/135.6	+18.50	+12.14	с галенитом, Au, Ag (Паленова и др., 2015б)
12	141419/147	+19.00	+12.64	не золотоносная*
13	141422/349	+18.90	+12.54	не золотоносная*

Примечание. ¹ – рассчитанный изотопный состав кислорода воды (методику расчета см. в тексте). Здесь и в табл. 3: * – содержание золота в рядовой керновой пробе интервала, к которому принадлежит жила (Божко, Кузнецов, 2012ф); ** – содержание золота в штучном образце по данным атомно-абсорбционного анализа (Perkin-Elmer 3110, ЮУ ФНИЦ МиГ УрО РАН), данные авторов.

Note. ¹ – the calculated $\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ isotopic composition (see text for calculation method). Here and in Table 3: * – the Au content in a common core sample of an interval, to which the vein belongs (Bozhko, Kuznetsov, 2012f); ** – the Au content in a hand specimen according to atomic absorption analysis (Perkin-Elmer 3110, SU FRC MG UB RAS), our data.

Изотопный состав кислорода кварца месторождений Копыловское, Кавказ и Красное укладывается в узкий диапазон значений $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ от +16.7 до +19.3 ‰ (табл. 1). Для месторождения Копыловское характерны слегка пониженные значения $\delta^{18}\text{O}$ от +16.7 до +17.2 ‰, для рудопроявления Красное – немного более высокие по сравнению с другими объектами: от +18.5 до +19.3 ‰. Изотопный состав кислорода в жильном кварце не зависит от содержания золота как в самой жиле, так и во вмещающих ее интервалах. Рассчитанный изотопный состав кислорода воды во флюиде постепенно увеличивается в ряду месторождений Кавказ (+9.59...+10.59 ‰), Копыловское (+10.92...+11.42 ‰), Красное (+12.14...+12.94 ‰).

Изотопный состав кислорода и углерода железо-магнезиальных карбонатов. Карбонаты в составе пелитоморфных пород догалдынской свиты на месторождениях Копыловское и Кавказ и аунакитской свиты на месторождении Красное распространены в виде крупных округлых и овальных выделений размером до 5–7 мм, а также ром-

боэдрических кристаллов размером 0.05–2.00 мм. В метапесчаниках карбонаты образуют пойкило-кристаллы размером до 3 мм с элементами огранки, а также ксеноморфные выделения в составе цемента. Ранняя форма выделений – мелкие ромбоэдрические кристаллы анкерита или железистого доломита размером 0.05–0.30 мм, равномерно распределенные в породе, свободные от включений минералов матрицы и углеродистого вещества. Они часто захватываются крупными метакристаллами железисто-магнезиальных карбонатов («брейнерита») округлой, овальной или ромбоэдрической формы с включениями минералов матрицы и углеродистого вещества, частично замещаются ими (рис. 3). Также карбонаты присутствуют в жильной ассоциации и представлены железистым доломитом.

Изотопный состав кислорода поздних железомagneзиальных карбонатов из углеродистых сланцев месторождений Копыловское и Кавказ (табл. 2) близок значениям, полученным для жильного кварца ($\delta^{18}\text{O}_{\text{карб.}} = +16.64...+18.38$ ‰), тогда как значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб.}}$ жильных карбонатов Копылов-

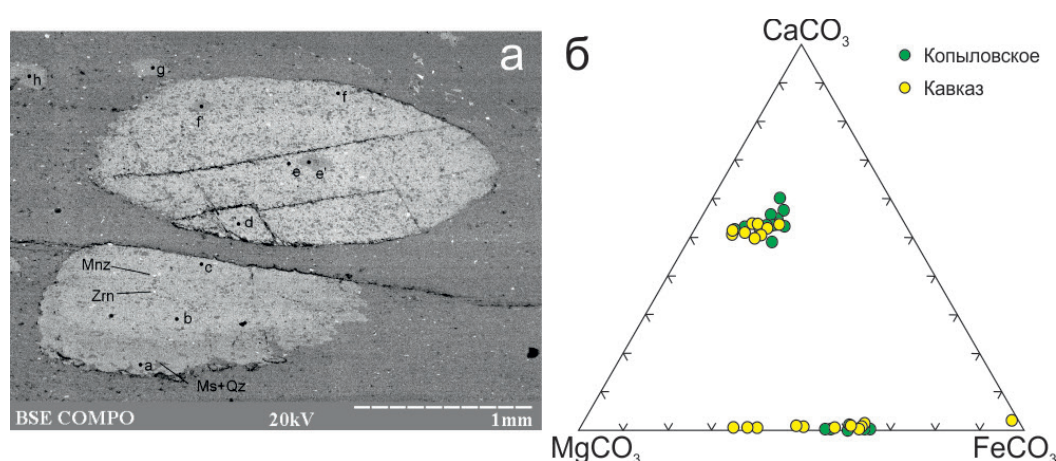


Рис. 3. Овальные агрегаты железо-магнезиальных карбонатов («брейнерита») с включениями мелких кристаллов железистого доломита (точки e', f, g, h), а также монацита (Mnz) и циркона (Zrn) в углеродистом сланце месторождения Копыловское (а) и вариации состава карбонатов на треугольной диаграмме, формульные коэффициенты (б).

СЭМ РЭММА-202М с ЭДА (ЮУ ФНИЦ МиГ УрО РАН, аналитик В.А. Котляров).

Fig. 3. Oval aggregates of Fe-Mg carbonates ("breinerite") with inclusions of small crystals of Fe-bearing dolomite (points e', f, g, h), monazite (Mnz) and zircon (Zrn) in carbonaceous shale of the Kopylovskoe deposit (a) and variations in the composition of carbonates on ternary diagram, apfu (b).

REMMA-202M SEM with EDA (SU FRC MG UB RAS, analyst V.A. Kotlyarov).

Таблица 2

**Изотопный состав кислорода и углерода карбонатов
месторождений Копыловское (1–3) и Кавказ (4, 5)**

Table 2

**Oxygen and carbon isotopic composition of carbonates of the
Kopylovskoe (1–3) and Kavkaz (4, 5) deposits**

№ п/п	№ пробы	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}, \text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}, \text{‰}$	Примечание
1	K-23	+18.38	–13.00	Брейнерит из сланца
2	511/135	+12.80	–13.30	Доломит из кварц-карбонатной жилы
3	514/126.5	+13.88	–13.16	Доломитовая жила с пиритом
4	516/70.3	+16.64	–9.76	Брейнерит из сланца
5	121518/72	+17.38	–8.93	Брейнерит из сланца

ского месторождения значительно ниже (+12.80 и +13.88 ‰). Вместе с тем, изотопный состав углерода карбоната во вмещающих породах и жилах Копыловского постоянен; $\delta^{13}\text{C} = -13.16 \dots -13.00 \text{ ‰}$.

Изотопный состав серы сульфидов. Изотопный состав серы пирита разных генераций, а также халькопирита и галенита из поздних секущих кварцевых жил с золотом характеризуется широкими вариациями с отрицательными значениями (табл. 3). Измеренные изотопные соотношения серы для пирита месторождений Копыловское и Кавказ перекрываются и варьируют от –11.91 до –1.68 и от –16.86 до –6.66 ‰, соответственно. Из-

топный состав серы пирита месторождения Красное имеет более высокие значения: –6.35 от до –0.09 ‰. Наиболее ранние (диагенетические) генерации пирита-1 характеризуются относительно высокими значениями $\delta^{34}\text{S} -1.68$ от до –0.09 ‰, тогда как в метаморфических генерациях (пирит-2, 2а, 3) происходит постепенное «облегчение» изотопного состава серы, причем весьма неравномерное (даже в одном образце значения $\delta^{34}\text{S}$ сильно варьируют, рис. 4) и в широких пределах от –16.86 до –3.7 ‰. Золотоносные галенит и халькопирит из поздних кварцевых жил также характеризуются низкими значениями $\delta^{34}\text{S}$: –3.12 и –6.32 ‰, соответственно. Примечательно, что сульфиды месторождения

Таблица 3

Изотопный состав серы сульфидов
месторождений Копыловское (1–10), Кавказ (11–14) и Красное (15–18)

Table 3

Sulfur isotopic composition of sulfides of the
Kopylovskoe (1–10), Kavkaz (11–14) and Krasnoe (15–18) deposits

№ п/п	№ пробы	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$, ‰	Примечание
1	514/86.1	–1.68	Пирит-1, тонкозернистый
2	513/90.1	–3.70	Пирит-2, мелкозернистый
3	514/216.4a	–11.71	Пирит-2, мелкозернистый, золотоносный
4	513/90.1	–7.30	Пирит-2, среднезернистый с оторочкой кварца
5	513/90.1	–8.20	Пирит-2а, из кварцевой жилы
6	513/90.1	–9.30	Пирит-2а, из кварцевой жилы
7	358/2	–3.75	Пирит-2а, из кварцевой жилы с золотом (0.73 г/т Au)**
8	514/126.5	–8.32	Пирит-2а, из карбонатной жилы
9	К-23	–9.23	Пирит-2а, из кварцевой жилы
10	514/216.4б	–11.91	Пирит-3, крупнокрист., не золотоносный
11	516/110.5	–9.61	Пирит-2, мелкозернистый, золотоносный зона Милионного разлома (3.83 г/т Au)*
12	121518/109	–6.66	Пирит-3, крупнокрист., не золотоносный зона Милионного разлома
13	516/119.25	–16.86	Пирит-3, крупнокрист., не золотоносный зона Милионного разлома (0.08 г/т Au)*
14	3151-0	–6.32	Халькопирит из кварцевой жилы с золотом (41.3 г/т Au)**
15	141150/1516	–0.09	Пирит-1, тонкозернистый, конкреция
16	141401285	–6.35	Пирит-2, мелкозернистый, золотоносный
17	141411110	–0.74	Пирит-3, крупнокрист., не золотоносный
18	141425/135.6	–3.12	Галенит золотоносный с теллуридами из кварцевой жилы (1.13 г/т Au)*

Красное (аунакитская свита) характеризуются менее широкими вариациями изотопного состава серы, чем образцы из месторождений Копыловское и Кавказа (догалдынская свита), что, однако, может отражать недостаточность выборки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Вариации изотопного состава кислорода в жильном кварце подробно изучены для месторождения золота Сухой Лог и менее детально – для месторождений Голец Высочайший и Вернинское (Distler et al., 2004; Иконникова и др., 2009; Кряжев и др., 2009; Дубинина и др., 2014). Значения $\delta^{18}\text{O}$ в жильном кварце этих объектов варьируют от +14.8 до +18.1 ‰. В работе (Distler et al., 2004) получены более низкие значения (от +8.8 до +13.5 ‰), которые впоследствии оказались близки к данным

для валовых проб углеродистых сланцев Западного, Центрального и Основного участков месторождения Сухой Лог; $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = +8.9...+14.7$ ‰ (Иконникова и др., 2009) до +17.3 ‰ (Дубинина и др., 2014). Показано локальное «облегчение» изотопного состава кислорода вмещающих сланцев в зальбандах кварцевых прожилков, что объяснялось нарушением изотопно-кислородной системы вмещающих пород при формировании жил (Иконникова и др., 2009). Изотопный состав кислорода флюидной фазы, рассчитанный по уравнениям фракционирования в системе кварц-вода в зависимости от температуры, показал значения $\delta^{18}\text{O} = +10...+12$ ‰, при предполагаемой максимальной температуре кристаллизации в 360 °С, и +4...+6 ‰ при минимальной температуре 200 °С (Иконникова и др., 2009). На основании полученных данных сделан вывод о взаимодействии флюида с вмещаю-

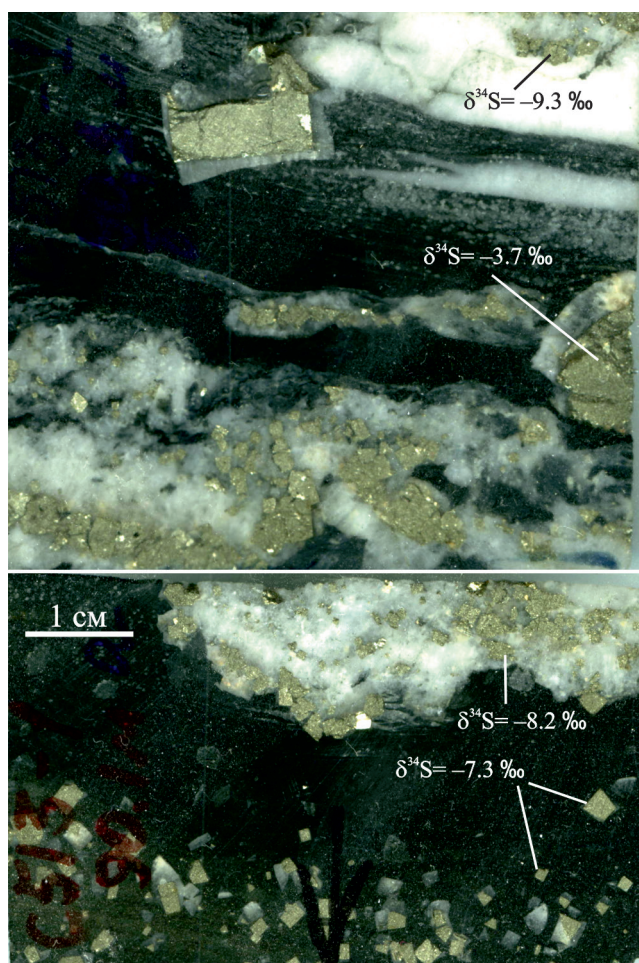


Рис. 4. Вариации изотопного состава серы в метаморфогенном мелко-, среднезернистом пирите-2 (вкрапленность в сланце) и пирите-2а (кварц-пиритовые прожилки).

Образец 513/90.1, месторождение Копыловское.

Fig. 4. Variations in $\delta^{34}\text{S}$ values of metamorphic fine- to medium-grained pyrite-2 (dissemination in shale) and pyrite-2a (quartz-pyrite veinlets).

Sample 513/90.1, Kopylovskoe deposit.

щими породами и отложении жильного кварца в условиях низкого соотношения флюид–порода, что отличает метаморфогенно-гидротермальное оруденение от магматогенно-гидротермального (Иконникова и др., 2009; Кряжев и др., 2009).

По-видимому, аналогичные процессы происходили и при формировании жильных и штокверковых руд месторождений Копыловское, Кавказ и Красное, изученных в этой работе. Узкий диапазон значений $\delta^{18}\text{O}$ для золотоносных и безрудных жил (от +16.7 до +19.3 ‰), близок к таковым для месторождений Сухой Лог (рис. 5), Вернинское и Голец Высочайший. Рассчитанный изотопный состав

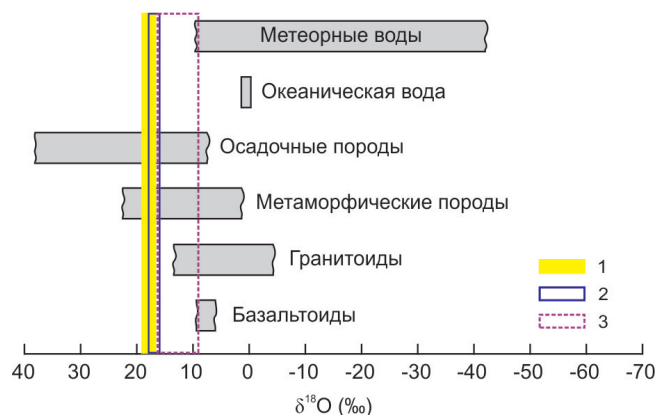


Рис. 5. Изотопный состав кислорода жильного кварца месторождений Копыловское, Кавказ и Красное (1) в сравнении с $\delta^{18}\text{O}$ жильного кварца (2) и вмещающих пород (3) месторождения Сухой Лог (Иконникова и др., 2009; Дубинина и др., 2014).

Диапазоны $\delta^{18}\text{O}$ в важнейших геологических резервуарах приведены по (Hoefs, 2009).

Fig. 5. Oxygen isotopic composition of vein quartz of the Kopylovskoe, Kavkaz and Krasnoe deposits (1) in comparison with $\delta^{18}\text{O}$ values of vein quartz (2) and host rocks (3) of the Sukhoy Log deposit (Ikonnikova et al., 2009; Dubinina et al., 2014).

The $\delta^{18}\text{O}$ ranges of most important geological reservoirs are given after (Hoefs, 2009).

кислорода воды во флюиде от +9.59 до +12.94 ‰ укладывается в диапазоны, оцененные для флюида на месторождении Сухой Лог. Вероятно, источник флюида и механизм формирования жильной минерализации был общим для всех объектов Ленской провинции, вне зависимости от их стратиграфического и регионального положения, по крайней мере, в зоне зеленосланцевой фации метаморфизма. Изотопно-кислородные данные показывают, что флюид не отвечает равновесию с магматическими породами при высоких температурах (Иконникова и др., 2009), а также средним значениям $\delta^{18}\text{O}$ в гранитоидах (Hoefs, 2009). Расчеты отношений флюид/порода (Дубинина и др., 2014) указывают на образование жильных тел с участием флюида дегидратационной или метаморфогенной природы под действием механизма пересыщения, вызванного перепадами давления («pressure solution»).

Изотопный состав кислорода в карбонатах месторождений Сухой Лог, Голец Высочайший и Вернинское также укладывается в диапазон значений от +15.5 до +20.0 ‰ (Кряжев и др., 2009; Дубинина и др., 2014), более высокие значения получены В.В. Дистлером с соавторами; от +24.2 до +29.8 ‰ (Distler et al., 2004). Анкерит месторождения Чер-

тово Корято, которое залегает в раннепротерозойской михайловской свите, имеет более легкий состав кислорода от +14.2 до +15.1 ‰ (Вагина, 2012). В целом, изотопный состав кислорода «брейнерита» из пород месторождений Копыловское и Кавказ (от +16.64 до +18.38 ‰), близок к таковому для жильного кварца этих объектов, тогда как жильный карбонат характеризуется более низкими значениями изотопного состава кислорода от +12.80 до +13.88 ‰. Последнее, вероятно, указывает на фракционирование изотопов кислорода при кристаллизации кварца и карбонатов в жилах. В то же время, можно предполагать общий источник флюида, участвовавшего в формировании кварцевых жил и поздних карбонатов во вмещающих породах.

Углерод в карбонатах месторождений Сухой Лог, Голец Высочайшей и Вернинское показывает значительно более высокие значения изотопного состава от –9.2 до –3.8 ‰ (Кряжев и др., 2009; Дубинина и др., 2014), чем в месторождениях Копыловское и Кавказе от –13.30 до –8.93 ‰. Еще более низкие значения (от –18.5 до –17.4 ‰ $\delta^{13}\text{C}$) имеют карбонаты месторождения Чертово Корято (Вагина, 2012). Узкий диапазон значений изотопного состава углерода карбонатов месторождения Копыловское в жилах и во вмещающих породах от –13.3 до –13.0 ‰ можно объяснить их кристаллизацией при участии одного эволюционирующего флюида. При сопоставлении изотопного состава углерода в разных месторождениях Бодайбинского района наблюдается широкий разброс данных для месторождений, залегающих в разных свитах: Чертово Корято – в михайловской, Сухой Лог и Голец Высочайший – в хомолхинской, Вернинское – в аунakitской и Копыловское и Кавказ – в догалдынской (рис. 6). Для месторождения Сухой Лог также характерна разница в изотопном составе углерода карбоната вмещающих пород (от –6.1 до –3.8 ‰) и жил (от –9.2 до –4.6 ‰).

Причины вариаций изотопного состава углерода в карбонатах дискуссионны. Так, С.Г. Кряжев с соавторами (2009), предполагал, что при карбонатизации пород определяющую роль играли процессы перераспределения углерода (органического и осадочно-карбонатного) в пределах рудовмещающих толщ при диагенезе и последующем метаморфизме без участия внешних источников углерода. По другой точке зрения, карбонат в рудовмещающих сланцах хомолхинской свиты месторождения Сухой Лог привнесен во время гидротермально-метасоматического процесса, а его источником

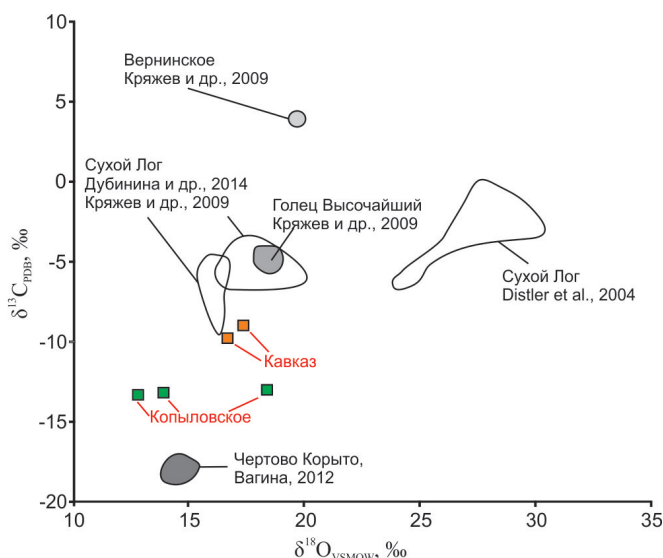


Рис. 6. Изотопный состав кислорода и углерода карбонатов месторождений Копыловское и Кавказ в сравнении с опубликованными данными по $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ для месторождений Сулой Лог, Голец Высочайший, Вернинское, Чертово Корято.

Fig. 6. Oxygen and carbon isotopic composition of carbonates of the Kopylovskoe and Kavkaz deposits in comparison with published $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values for the Sukhoy Log, Golets Vysochaishy, Verninskoe and Chertovo Koryto deposits.

были известняки имняхской свиты (Дубинина и др., 2014). Е.А. Вагина (2012) интерпретирует изотопный состав углерода анкерита месторождения Чертово Корято как результат смешения «тяжелого» мантийного углерода и «легкого» углерода керогена михайловской свиты (–26.2...–24.6 ‰ $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$). Отсутствие единого взгляда на процесс карбонатизации углеродисто-терригенных толщ Байкало-Патомского нагорья, по-видимому, связан с недостаточно систематическим подходом к его изучению. Возможно, более детальное исследование изотопного состава карбонатов во всем разрезе патомского комплекса, а также для других месторождений Ленской провинции позволит выработать единый взгляд на его генезис.

Наиболее систематические сведения получены по изотопии сульфидной серы, где главным минералом для исследования выступал пирит разных генераций, как в рудных зонах, так и в различных стратиграфических единицах за пределами месторождений. Кроме того, изучались пирротин и арсенипирит в месторождениях, где они присутствуют в качестве главных рудных минералов (табл. 4). Наиболее хорошо изучен изотопный состав серы

Таблица 4

Вариации изотопного состава серы в сульфидах месторождений Ленской золотоносной провинции

Table 4

Variations in S isotopic composition of sulfides from deposits of the Lena gold-bearing province

Месторождение (свита)	Минерал	$\delta^{34}\text{S}$, ‰	Ссылка
Чертово Кoryто (михайловская, mh)	Пирит	–0.2...+4.7	Вагина, 2011
	Арсенопирит	–3.8...+1.3	Вагина, 2011
	Пирротин	+2.7...+7.1	Вагина, 2011
	Галенит	+1.8...+2.5	Вагина, 2011
Угахан (bz)	Пирит	+2.1...+9.1	Тарасова и др., 2022
	Пирротин	+8.3...+8.9	Тарасова и др., 2022
	Марказит	+8.8...+9.1	Тарасова и др., 2022
Сухой Лог (hm)	Пирит	+3.5...+15	Distler et al., 2004
		+6.2...+21.6	Гаврилов, Кряжев, 2008
		+5.8...+10.6	Кряжев и др., 2009
		+9.1...+21.2	Горячев и др., 2017
Голец Высочайший (hm)	Пирит	+4.5...+7.9	Кряжев и др., 2009
		+5.7...+8.9	Горячев и др., 2017
		+6.1...+6.9	Онищенко, Сокерина, 2021
		+5.3...+8.7	Тарасова и др., 2021
Вернинское (au)	Пирит	+4.2...+9.5	Горячев и др., 2017
		+4.6...+7.0	Онищенко, Сокерина, 2021
	Арсенопирит	+3.8...+4.6	Тарасова и др., 2021
Ыкан (au)	Пирит	+4.5...+6.5	Кряжев и др., 2009
	Пирротин	+12.4...+17.8	Горячев и др., 2017
Красное (au)	Пирит	+11.3...+11.6	Кряжев и др., 2009
	Галенит	+10.5...+14.0	Горячев и др., 2017
Копыловское (dg)	Пирит	–7.9...–2.4	Будяк и др., 2024
	Пирротин	–5.1...–3.4	Будяк и др., 2024
Кавказ (dg)	Пирит	–7.4...–4.5	Tarasova et al., 2020
	Галенит	–6.35...–0.09	Эта работа
Кавказ (dg)	Пирит	–3.12	Эта работа
	Халькопирит	–11.91...–1.68	Эта работа
Кавказ (dg)	Пирит	–16.86...–6.66	Эта работа
	Халькопирит	–6.32	Эта работа

пирита месторождения Сухой Лог (Distler et al., 2004; Кряжев и др., 2009; Иконникова, 2010; Кряжев, 2017), для которого установлено уменьшение значений $\delta^{34}\text{S}$ от +22 до +10 ‰, связанное с его гидротермально-метаморфической перекристаллизацией в рудной зоне (Иконникова, 2010). Закономерное «облегчение» серы сульфидов (пирита и пирротина) от ранних генераций к поздним установлено и для месторождения Чертово Кoryто, однако здесь разброс значений невысок: от +4.7 до +1.7 ‰ в пирите и от +7.1 до +2.7 ‰ в пирротине (Вагина, 2011).

Отрицательные значения $\delta^{34}\text{S}$ установлены ранее для пирита и пирротина месторождений Красное (–7.4...–4.5) и Ыкан (–7.9...–2.4 ‰), залегающих в аунакитской свите в зоне серицит-хлоритовой и эпидот-амфиболитовой фаций метаморфизма, соответственно. От ранних генераций к поздним здесь наблюдается небольшое «утяжеление» сульфидной серы (Tarasova et al., 2020; Будяк и др., 2024). Значения $\delta^{34}\text{S}$, полученные для пирита и галенита месторождения Красное в этой работе, показывают более «тяжелый» состав серы пирита от –6.35 до –0.09 ‰, тем не менее, перекрываю-

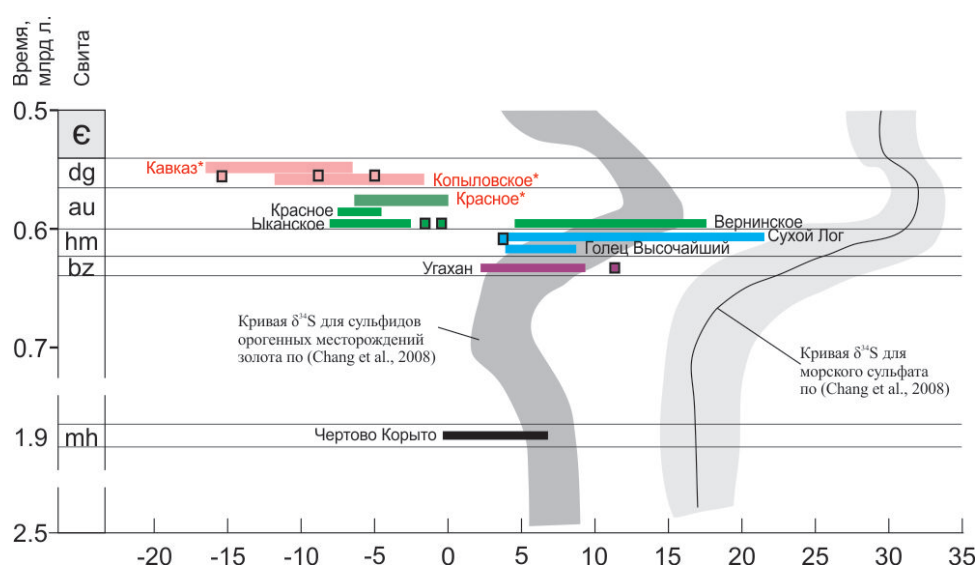


Рис. 7. Изотопный состав серы в сульфиде месторождений Копыловское, Кавказ и Красное (* – наши данные) в сравнении с $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов месторождений Чертово Кoryто (Вагина, 2011), Угахан (Тарасова и др., 2022), Голец Высочайший (Кряжев и др., 2009; Горячев и др., 2017; Онищенко, Сокерина, 2021; Тарасова и др., 2021), Сухой Лог (Distler et al., 2004; Гаврилов, Кряжев, 2008; Кряжев и др., 2009; Горячев и др., 2017), Вернинское (Кряжев и др., 2009; Горячев и др., 2017), Ыканское (Будяк и др., 2024), Красное (Tarasova et al., 2020). Точками показаны значения $\delta^{34}\text{S}$ в метаморфогенном пирите бужуихтинской, хомолхинской, аунакитской и догалдынской свит за пределами месторождений, по (Чугаев и др., 2018).

Fig. 7. Sulfur isotopic composition of sulfides from the Kopylovskoe, Kavkaz, and Krasnoe deposits (* – our data) in comparison with $\delta^{34}\text{S}$ values of sulfides from the Chertovo Koryto (Vagina, 2011), Ugakhan (Tarasova et al., 2022a), Golets Vysochaishy (Kryazhev et al., 2009; Goryachev et al., 2017; Onishchenko, Sokerina, 2021; Tarasova et al., 2022b), Sukhoi Log (Distler et al., 2004; Gavrilov, Kryazhev, 2008; Kryazhev et al., 2009; Goryachev et al., 2017), Verninskoe (Kryazhev et al., 2009; Goryachev et al., 2017), Ykan (Budyak et al., 2024) and Krasnoe (Tarasova et al., 2020) deposits. The points show the $\delta^{34}\text{S}$ values of metamorphic pyrite of the Buzhuikhita, Khomolkho, Aunakit and Dogaldyn formations outside the deposits, after (Chugaev et al., 2018).

шийся с предыдущими данными. Наиболее широкие вариации, и вместе с тем «легкий» изотопный состав, имеет сера пирита месторождений Копыловское и Кавказ, залегающих в догалдынской свите; от -11.91 до -1.68 и от -16.86 до -6.66 ‰, соответственно. Локальные колебания изотопного состава серы в пирите месторождения Копыловское показаны на рис. 4. В целом, от ранних генераций пирита к более поздним на этих объектах происходит неравномерное постепенное «облегчение» изотопного состава серы.

Установлено (Чугаев и др., 2018), что в Бодайбинской зоне за пределами месторождений золота изотопный состав серы метаморфогенного пирита закономерно изменяется в сторону «облегчения» от бужуихтинской свиты к догалдынской, причем значения $\delta^{34}\text{S}$ в пирите из бужуихтинской и хомолхинской свит положительные ($+10.86$ и $+3.44$ ‰, соответственно), а начиная с аунакитской свиты – отрицательные и постепенно уменьшаются. Так, в аунакитской свите значения $\delta^{34}\text{S}$ в пирите

составляют от -1.90 до -1.03 ‰, а к концу разреза в догалдынской свите уменьшаются до интервала от -15.49 до -8.86 ‰. Такое резкое «облегчение» сульфидной серы не согласуется с кривой $\delta^{34}\text{S}$ для сульфидов орогенных месторождений золота, которая, в целом, повторяет кривую $\delta^{34}\text{S}$ для морского сульфата (Chang et al., 2008). На основании этих данных сделан вывод о том, что на рубеже 600–580 млн лет бассейн осадконакопления (бассейн форланда) был изолирован от мирового океана и имел свой уникальный изотопный состав сульфата (Чугаев и др., 2018).

Сравнение изотопного состава серы сульфидов в рудах разных месторождений с данными, полученными по рудовмещающим свитам за пределами месторождений (Чугаев и др., 2018), показывает хорошую согласованность значений для целого ряда объектов, в том числе для месторождений Красное, Копыловское и Кавказ (рис. 7). С.Г. Кряжев (2017) предлагал использовать данные изотопного состава серы пирита для оконтуривания потенциальных слепых рудных зон месторождений сухоложского

типа по критерию выделения аномалий $\delta^{34}\text{S}$, превышающих +4 ‰. Как видно из табл. 4 и рис. 7, по этому критерию выделяются месторождения Угахан, Сухой Лог, Голец Высочайший и Вернинское, однако в эту область не попадают ряд других объектов, в том числе крупных – месторождения Красное и Чертово Корыто. В целом, широкие вариации и неоднородность изотопного состава серы сульфидов может свидетельствовать о ее коровом источнике, ведущую роль в котором играют рудовмещающие осадочные толщи, а отличия в поведении изотопного состава серы от ранних генераций к поздним, возможно, указывают на особенности механизмов рудоотложения в Ленской провинции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ впервые для золоторудных месторождений Копыловское, Кавказ и Красное, расположенных в пределах Байкало-Патомского нагорья, установлен изотопный состав кислорода в жильном кварце, а для месторождений Копыловское и Кавказ – также изотопный состав кислорода и углерода в карбонатах и серы в золотоносных сульфидах. Сходство изотопного состава кислорода в кварце золотоносных жил и поздних железо-магнезиальных карбонатов в рудовмещающих толщах указывает на их образование из единого эволюционирующего метаморфогенно-гидротермального флюида. Изотопный состав серы сульфидов изменяется в широких пределах и коррелирует с изменением значений $\delta^{34}\text{S}$ в метаморфогенном пирите вмещающих углеродисто-терригенных свит, что указывает на коровый источник формирования золото-сульфидных руд.

ЛИТЕРАТУРА

- Аксенов И.М., Кангаров И.Ю., Вилор Н.В. (2004ф) Отчет о результатах геологоразведочных работ 2000–2004 г. с подсчетом запасов в пределах золоторудного месторождения «Копыловское» по состоянию на 1.09.2004 (лицензия ИРК 01466 БР). Т. 1. Бодайбо–Иркутск, ООО «Угрюм-река», 92 с.
- Бенедюк В.Ф., Жукович М.А., Суслов Н.А. (1984ф) Отчет о результатах поисково-оценочных работ на рудное золото в пределах участка Кавказ за 1982–84 гг. Иркутск, Фонды Бодайбинской экспедиции, 78 с.
- Божко Е.Н., Кузнецов А.Ю. (2012ф) Информационный отчет по результатам поисково-оценочных работ на рудопроявлении «Красное» в 2011–2012 гг. (лицензия № ИРК 2804 БР). Бодайбо, 85 с.
- Будяк А.Е., Тарасова Ю.И., Чугаев А.В., Горячев Н.А., Веливецкая Т.А., Игнатьев А.В. (2024) Особенности формирования золоторудной минерализации в условиях амфиболитовой фации метаморфизма: месторождение Ыкан (Байкало-Патомский пояс). *Тихоокеанская геология*, 43(2), 64–87. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2024-43-3-64-87>
- Буряк В.А. (1982) *Метаморфизм и рудообразование*. М., Недра, 256 с.
- Буряк В.А., Хмелевская Н.М. (1997) Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). Владивосток, Дальнаука, 156 с.
- Бухаров А.А., Халилов В.А., Страхова Т.М., Черников В.В. (1992) Геология Байкало-Патомского нагорья по новым данным U-Pb датирования акцессорного циркона. *Геология и геофизика*, 33(12), 29–39.
- Вагина Е.А. (2011) Изотопный состав серы сульфидов руд золотого месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье). *Вестник Томского государственного университета*, 353, 195–198.
- Вагина Е.А. (2012) Изотопный состав углерода и кислорода в рудах золотого месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье). *Вестник Томского государственного университета*, 360, 168–171.
- Вамбольдт А.Я., Божко Е.Н., Синюков Ю.Д. (2012ф) Отчет о результатах геологоразведочных работ на лицензионной площади «Кавказ», выполненных в 2011 году (О-50-ХІІІ, Бодайбинский район). Бодайбо, 46 с.
- Вамбольдт А.Я., Краснощеков А.Н., Власова Н.А. (2011ф) Отчет по результатам геологоразведочных работ, выполненных в 2010 году. Бодайбо, 94 с.
- Верхоzin А.В., Мартыненко В.Г., Бенедюк В.Ф., Бураков В.В., Лесков В.В., Колмаков Ю.В., Кучеренко И.В. (2007) Месторождение золота Чертово Корыто. Отчет о результатах разведочных работ 1996–2007 гг. и технико-экономическое обоснование. Бодайбо, АО Тонода.
- Виноградов В.И., Пичугин Л.П., Быховер В.Н. и др. (1996) Изотопные признаки и время эпигенетических преобразований верхнедокембрийских отложений Уринского поднятия. *Литология и полезные ископаемые*, 1, 68–78.
- Гаврилов А.М., Кряжев С.Г. (2008) Минералогическо-геохимические особенности руд месторождения Сухой Лог. *Разведка и охрана недр*, 8, 3–16.
- Гладкочуб Д.П., Станевич А.М., Мазукабзов А.М., Донская Т.В., Писаревский С.А., Николь Г., Мотова З.Л., Корнилова Т.А. (2013) Ранние этапы развития палеоазиатского океана: данные по LA-ICP-MS датированию детритовых цирконов из позднедокембрийских толщ южного фланга Сибирского кратона. *Геология и геофизика*, 54(10), 1472–1490.
- Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Будяк А.Е., Тарасова И.Ю. (2017) Об изотопном составе серы сульфидов руд Бодайбинского синклиория. *Основные проблемы в учении об эндогенных рудных месторождениях: Новые горизонты*. М., ИГЕМ РАН, 406–408.

- Дистлер В.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К., Коваленкер В.А., Мохов А.В., Семейкина Л.К., Юдовская М.А. (1996) Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия). *Геология рудных месторождений*, 38(6), 467–484.
- Дубинина Е.О., Чугаев А.В., Иконникова Т.А., Авдеев А.С., Якушев А.И. (2014) Источники вещества и флюидный режим формирования кварц-карбонатных жил на месторождении золота Сухой Лог, Байкало-Патомское нагорье. *Петрология*, 22(4), 347–379. <https://doi.org/10.7868/S0869590314040037>
- Зорин Ю.А., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Пресняков С.Л., Сергеев С.А. (2008) Силурийский возраст главных складчатых деформаций рифейских отложений Байкало-Патомской зоны. *Доклады академии наук*, 423(2), 228–233.
- Зорин Ю.А., Скляр Е.В., Беличенко В.Г., Мазукабзов А.М. (2009) Механизм развития системы островная дуга – задуговый бассейн и геодинамика Саяно-Байкальской складчатой области в позднем рифее – раннем палеозое. *Геология и геофизика*, 50(3), 209–226.
- Иванов А.И. (2014) Золото Байкало-Патомы (геология, оруденение, перспективы). М., ФГУП ЦНИГРИ, 215 с.
- Иванов А.И., Лифшиц В.И., Перевалов О.В. и др. (1995) Докембрий Патомского нагорья. М., Недра, 352 с.
- Иконникова Т.А., Дубинина Е.О., Сароян М.Р., Чугаев А.В. (2009) Изотопный состав кислорода жильного кварца и вмещающих пород на месторождении Сухой Лог (Россия). *Геология рудных месторождений*, 51(6), 560–567.
- Иконникова Т.А. (2010) Поведение стабильных изотопов (О, С, S) в гидротермально-метасоматическом рудообразовании на месторождении Сухой Лог. Автореферат дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М., ИГЕМ РАН, 23 с.
- Информационный отчет по участку Копыловский (Иркутская область, Бодайбинский район). 2011ф. ООО «Копыловский», 19 с.
- Казакевич Ю.П., Шер С.Д., Жаднова Т.П., Стороженко А.А., Кондратенко А.К., Николаева Л.А., Аминев В.Б. (1971) Ленский золотоносный район. Т. 1. Стратиграфия, тектоника, магматизм и проявления коренной золотоносности. *Труды ЦНИГРИ*, вып. 85. М., Недра, 164 с.
- Кориковский С.П., Федоровский В.С. (1980) Ранний докембрий Патомского нагорья. М., Наука, 468 с.
- Кряжев С.Г. (2017) Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах. Дисс на соиск. степ. док. геол.-мин. наук. Москва, 288 с.
- Кряжев С.Г., Устинов В.И., Гриненко В.А. (2009) Особенности флюидного режима формирования золоторудного месторождения Сухой Лог по изотопно-геохимическим данным. *Геохимия*, 10, 1108–1118.
- Кузьменко А.А. (2013) Золотое оруденение в пределах Артемовского рудного узла на примере месторождения «Красное» (Бодайбинский район, Восточная Сибирь). *Материалы Третьей Российской молодежной Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования»*. М., ИГЕМ РАН, 146–150.
- Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., Мартыненко В.Г., Верховин А.В. (2011) Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч. 1. Обзор петролого-геохимических исследований рудовмещающего субстрата. *Известия Томского политехнического университета*, 319(1), 35–41.
- Лаверов Н.П., Чернышев И.В., Чугаев А.В., Байрова Э.Д., Гольцман Ю.В., Дистлер В.В., Юдовская М.А. (2007) Этапы формирования крупномасштабной благороднометалльной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь): результаты изотопно-геохронологического изучения. *Доклады академии наук*, 415(2), 236–241.
- Неймарк Л.А., Рыцк Е.Ю., Гороховский Б.М., Амелин Ю.В., Овчинникова Г.В., Смирнов М.Ю., Грачева Т.В. (1993) Геохронологическое и изотопно-геохимическое изучение золоторудных месторождений Байкальской складчатой области / Изотопное датирование эндогенных формаций М., Наука, 124–146.
- Немеров В.К. (1989) Геохимическая специализация позднедокембрийских черных сланцев Байкало-Патомского нагорья. Дисс на соиск. степ. канд. геол.-мин. наук. Иркутск, ИГГ СО РАН, 144 с.
- Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Корнилова Т.А. (2010) Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона. *Геология и геофизика*, 51(5), 729–747.
- Онищенко С.А., Сокерина Н.В. (2021) Особенности формирования золоторудного черносланцевого месторождения Голец Высочайший (Бодайбинский рудный район). *Геология рудных месторождений*, 63(2), 154–173. <https://doi.org/10.1134/S1075701521020045>
- Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Заботина М.В. (2013) Минералого-геохимическая характеристика углеродистых толщ золоторудных объектов Артемовского узла (Бодайбинский район). *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*, 2(43), 29–36.
- Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Плотинская О.Ю., Новоселов К.А., Масленников В.В., Котляров В.А., Блинов И.А., Кузьменко А.А., Грибоедова И.Г. (2015а) Эволюция состава пирита на золоторудных месторождениях в черносланцевых толщах Копыловское и Кавказ (Бодайбинский район, Россия) по данным РСМА и ЛА-ИСП-МС. *Геология рудных месторождений*, 57(1), 71–92. <https://doi.org/10.7868/S0016777015010025>
- Паленова Е.Е., Блинов И.А., Заботина М.В. (2015б) Минералы серебра в кварцевых жилах рудопроявления золота Красное (Бодайбинский район). *Минералогия*, 2, 9–17.

- Покровский Б.Г., Буякайте М.И. (2015) Геохимия изотопов С, О и Sr в неопротерозойских карбонатах юго-западной части Патомского палеобассейна, юг Средней Сибири. *Литология и полезные ископаемые*, 2, 159–186. <https://doi.org/10.7868/S0024497X15010048>
- Рёддер Э. (1987) Флюидные включения в минералах. М., Мир, 632 с.
- Рундквист И.К., Бобров В.А., Смирнова Т.Н., Смирнов М.Ю., Данилова М.Ю., Ащеулов А.А. (1992) Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района. *Геология рудных месторождений*, 34(6), 3–15.
- Рыцк Е.Ю., Ковач В.П., Ярмолук В.В., Коваленко В.И., Богомоллов Е.С., Котов А.Б. (2011) Изотопная структура и эволюция континентальной коры Восточно-Забайкальского сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса. *Геотектоника*, 5, 17–51.
- Рыцк Е.Ю., Толмачева Е.В., Великославинский С.Д., Кузнецов А.Б., Родионов Н.В., Андреев А.А., Федосеев А.М. (2021) Результаты исследования циркона (SIMS) из гранитоидов Константиновского штока (район золоторудного месторождения Сухой Лог): возраст, источники и геологические следствия. *Доклады академии наук*, 496(2), 169–175. <https://doi.org/10.31857/S2686739721020171>
- Салоп Л.И. (1964) Геология Байкальской горной области. Т. 1. М., Недра, 586 с.
- Суслов Н.А., Мартыненко В.Г., Бобров В.А. (1981ф) Отчет о результатах поисковых работ на золото в пределах Васильевского рудного узла за 1978–1981 гг. Иркутск, Фонды Бодайбинской экспедиции, 67 с.
- Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Блинов А.В., Горячева Е.М. (2022) Типоморфизм сульфидов золоторудного месторождения Угахан (Байкало-Патомское Нагорье). *Доклады академии наук*, 50(1), 12–17. <https://doi.org/10.31857/S2686739722030136>
- Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Иванов А.В., Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Радомская Т.А., Блинов А.В., Бабяк В.Н. (2021) Типоморфизм, типохимизм и изотопно-геохимические характеристики сульфидов железа месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь). *Записки Российского минералогического общества*, 1, 1–14. <https://doi.org/10.31857/S0869605521010123>
- Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н., Хубанов В.Б., Буянтуев М.Д. (2017) Геодинамика позднепалеозойского батолитообразования в западном Забайкалье. *Петрология*, 25(4), 395–418. <https://doi.org/10.7868/S0869590317030049>
- Цыганков А.А., Литвиновский Б.А., Джань Б.М., Рейков М., Лю Д.И., Ларионов А.Н., Пресняков С.Л., Лепехина Е.Н., Сергеев С.А. (2010) Последовательность магматических событий на позднепалеозойском этапе магматизма Забайкалья (результаты U-Pb изотопного датирования). *Геология и геофизика*, 51(9), 1249–1276.
- Чернышев И.В., Чугаев А.В., Сафонов Ю.Г., Са-роян М.Р., Юдовская М.А., Еремина А.В. (2009) Изотопный состав свинца по данным высокоточного MC-ICP-MS-метода и источники вещества крупномасштабного благороднометалльного месторождения Сухой Лог (Россия). *Геология рудных месторождений*, 51(6), 550–559.
- Чугаев А.В. (2024) Золоторудные месторождения оротенного типа Северного Забайкалья (Россия): геологическое строение, возраст, источники вещества и генезис. *Геохимия*, 69(9), 752–830. <https://doi.org/10.31857/S0016752524090015>
- Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В., Дубинина Е.О., Гареев Б.И., Шатагин К.Н., Тарасова Ю.И., Горячев Н.А., Скузоватов С.Ю. (2018) Изотопные (Sm-Nd, Pb-Pb и $\delta^{34}\text{S}$) и геохимические характеристики метасадочных пород Байкало-Патомского пояса (Северное Забайкалье) и эволюция осадочного бассейна в неопротерозойское время. *Петрология*, 26(3), 213–244. <https://doi.org/10.7868/S0869590318030019>
- Чумаков Н.М., Капитонов И.Н., Семихатов М.А., Леонов М.В., Рудько С.В. (2011) Вендский возраст верхней части патомского комплекса Средней Сибири: U/Pb LA-ICPMS датировки обломочных цирконов никольской и жербинской свит. *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 19(2), 115–119.
- Чумаков Н.М., Семихатов М.А., Сергеев В.Н. (2013) Опорный разрез вендских отложений юга Средней Сибири. *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 21(4), 26–52.
- Шер С.Д. (1972) Металлогения золота. М., Недра, 296 с.
- Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов Н.В., Мохов А.В., Антонов А.В., Сергеев С.А. (2011) Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов. *Геология рудных месторождений*, 53(1), 32–64.
- Ярмолук В.В., Будников С.В., Коваленко В.И., Антипин В.С., Горегляд А.В., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Козаков И.А., Ковач В.П., Яковлева З.С., Бережная Н.Г. (1997) Геохронология и геодинамическая позиция Ангаро-Витимского батолита. *Петрология*, 5(5), 451–466.
- Ярмолук В.В., Ковач В.П., Козаков И.К., Козловский А.М., Котов А.Б., Рыцк Е.Ю. (2012) Механизмы формирования континентальной коры Центрально-Азиатского складчатого пояса. *Геотектоника*, 4, 3–27.
- Ankusheva N.N., Palenova E.E., Shanina S.N. (2020) Fluid inclusion evidences for the P-T conditions of quartz veins formation in the black shale-hosted gold deposits, Bodaybo ore region, Russia. *Journal of Earth Science*, 31(3), 514–522. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1024-5>
- Chang Z., Large R.R., Maslennikov V. (2008) Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: Evidence for an early timing and a seawater sulfur source. *Geology*, 38(12), 971–974. <https://doi.org/10.1130/G25001A.1>

- Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Y.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Y.I., Gareev B.I., Batalin G.A., Rassokhina I.V., Oleinikova T.I. (2022) ^{40}Ar - ^{39}Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia). *Ore Geology Reviews*, 144, 104855. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>
- Clayton R.N., O'Neil J.R., Mayeda T. (1972) Oxygen isotope exchange between quartz and water. *Journal of Geophysical Research*, 77(17), 3057–3067. <https://doi.org/10.1029/JB077i017p03057>
- Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.Y., Lishnevskiy E.N. (2004) Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geology Reviews*, 24, 7–44. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.007>
- Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Stanevich A.M., Pisarevsky S.A., Zhang S., Motova Z.L., Mazukabzov A.M., Li H. (2019) U-Pb detrital zircon geochronology and provenance of Neoproterozoic sedimentary rocks in southern Siberia: New insights into breakup of Rodinia and opening of Paleo-Asian Ocean. *Gondwana Research*, 65, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.07.007>
- Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S. (2001) Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18, 1–75. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(01\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(01)00016-6)
- Hoefs J. (2009) Stable isotope geochemistry. Sixth Edition. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 285 p.
- Kuznetsov A.B., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Letnikova E.F., Kaurova O.K., Konstantinova G.V. (2013) Age constraints on the Neoproterozoic Baikal Group from combined Sr isotopes and Pb–Pb dating of carbonates from the Baikal type section, southeastern Siberia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.06.003>
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang Z. (2007) Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log Deposit, Lena gold province, Russia. *Economic Geology*, 102, 1233–1267. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233>
- Meffre S., Large R.R., Scott R., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Woodhead J., Hergt J.M., Maslennikov V. (2008) Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(9), 2377–2391. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.03.005>
- Melezhik V.A., Pokrovsky B.G., Fallick A.E., Kuznetsov A.B., Bujakaite M.I. (2009) Constraints on $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of Late Ediacaran seawater: insight from Siberian high-Sr limestones. *Journal of the Geological Society*, 166(1), 183–191. <https://doi.org/10.1144/0016-76492007-171>
- Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N., Kapitonov I., Hourigan J. (2015) Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia. *Precambrian Research*, 267(1), 39–71. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.015>
- Scott R.J., Large R.R., Meffre S., Masslenikov V.V. (2007) Structural controls on the development of the giant Sukhoi Log gold deposit, Siberia: Deformation in the Desert. *Geological Society of Australia Specialist Group in Tectonics and Structural Geology Alice Springs*, 55.
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., Reutsky V.N., Abramova V.D., Gareev B.I., Bryukhanova N.N., Parshin A.V. (2020) Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasnyi gold mine (Baikal-Patom Highlands): Constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits. *Ore Geology Reviews*, 119, 103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>
- Valley J.W., Kitchen N., Kohn M., Niendorf C.R., Spicuzza M.J. (1995) UWG-2, a garnet standard for oxygen isotope ratios: Strategies for high precision and accuracy with laser heating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 5223–5231. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00386-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00386-X)
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiyev N.N. (2016) Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*, 7(3), 453–481. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010>

REFERENCES

- Aksenov I.M., Kangarov I.Yu., Vilor N.V. (2004) *Unpublished report on results of geological exploration works in 2000–2004 with calculation of reserves within the Kopylovskoe gold deposit as of 01.09.2004 (license IRK 01466 BR)*. T. 1. Bodaibo-Irkutsk, OOO Ugryum-reka, 92 p. (in Russian).
- Ankusheva N.N., Palenova E.E., Shanina S.N. (2020) Fluid inclusion evidences for the P-T conditions of quartz veins formation in the black shale-hosted gold deposits, Bodaybo ore region, Russia. *Journal of Earth Science*, 31(3), 514–522. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1024-5>
- Benedyuk V.F., Zhukovich M.A., Suslov N.A. (1984) *Unpublished report on results of prospecting and evaluation work for primary gold within the Caucasus area for 1982–84*. Irkutsk, Funds of the Bodaibo Expedition, 78 p. (in Russian).
- Bozhko E.N., Kuznetsov A.Yu. (2012) *Unpublished information report on results of prospecting and evaluation work at the Krasnoe ore deposit in 2011–2012 (license No. IRK 2804 BR)*. Bodaibo, 85 p. (in Russian).
- Budyak A.E., Tarasova Yu.I., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V. (2024) Formation of gold mineralization under amphibolite facies metamorphism: Ykan deposit (Baikal-Patom Belt). *Russian*

Journal of Pacific Geology, 18(3), 288–309. <https://doi.org/10.1134/S1819714024700052>

Bukharov A.A., Khalilov V.A., Strakhova T.M., Chernikov V.V. (1992) Geology of the Baikal-Patom Highland based on new data of U-Pb dating of accessory zircons. *Geologiya i geofizika (Geology and Geophysics)*, 12, 29–39. (in Russian).

Buryak V.A. (1982) *Metamorphism and ore formation*. Moscow, Nauka, 256 p. (in Russian).

Buryak V.A., Khmelevskaya N.M. (1997) *Sukhoi Log – one of the world's largest gold deposit: genesis, localization of ore, and forecasting criteria*. Vladivostok, Dal'nauka, 156 p. (in Russian).

Chang Z., Large R.R., Maslennikov V. (2008) Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: Evidence for an early timing and a seawater sulfur source. *Geology*, 38(12), 971–974. <https://doi.org/10.1130/G25001A.1>

Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Safonov Y.G., Saroyan M.R., Yudovskaya M.A., Eremina A.V. (2009) Lead isotopic composition from data of high-precision MC-ICP-MS and sources of matter in the large-scale Sukhoi Log noble metal deposit, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 51(6), 496–504. <https://doi.org/10.1134/S1075701509060063>

Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Y.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Y.I., Gareev B.I., Batalin G.A., Rassokhina I.V., Oleinikova T.I. (2022) ⁴⁰Ar-³⁹Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia). *Ore Geology Reviews*, 144, 104855. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>

Chugaev A.V. (2024) Orogenic gold deposits of Northern Transbaikalia, Russia: geology, age, sources, and genesis. *Geochemistry International*, 62(9), 909–978. <https://doi.org/10.1134/S0016702924700484>

Chugaev A.V., Budyak A.E., Chernyshev I.V., Dubinina E.O., Gareev B.I., Shatagin K.N., Tarasova Y.I., Goryachev N.A., Skuzovatov S.Y. (2018) Isotopic (Sm–Nd, Pb–Pb, and $\delta^{34}\text{S}$) and geochemical characteristics of the metasedimentary rocks of the Baikal-Patom Belt (Northern Transbaikalia) and evolution of the sedimentary basin in the Neoproterozoic. *Petrology*, 26(3), 213–244. <https://doi.org/10.1134/S0869591118030025>

Chumakov N.M., Kapitonov I.N., Semikhatov M.A., Leonov M.V., Rudko S.V. (2011) Vendian age of the upper part of the Patom complex in Middle Siberia: U/Pb LA-ICPMS dates of detrital zircons from the Nikolskoe and Zherba formations. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 19(2), 233–237. <https://doi.org/10.1134/S0869593811020043>

Chumakov N.M., Semikhatov M.A., Sergeev V.N. (2013) Vendian reference section of southern middle Siberia. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 21(4), 359–382. <https://doi.org/10.1134/S0869593813040023>

Clayton R.N., O'Neil J.R., Mayeda T. (1972) Oxygen isotope exchange between quartz and water. *Journal of Geophysical Research*, 77(17), 3057–3067. <https://doi.org/10.1029/JB077i017p03057>

Distler V.V., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K., Kovalenker V.A., Mokhov A.V., Semeikina L.K., Yudovskaya M.A. (1996) Modes of occurrence of the platinum group elements and their origin in the Sukhoi Log gold deposit (Russia). *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy (Geology of Ore Deposits)*, 38(6), 413–428. (in Russian).

Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.Y., Lishnevskiy E.N. (2004) Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geology Reviews*, 24, 7–44. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.007>

Dubinina E.O., Chugaev A.V., Ikonnikova T.A., Avdeenko A.S., Yakushev A.I. (2014) Sources and fluid regime of quartz-carbonate veins at the Sukhoi Log gold deposit, Baikal-Patom Highland. *Petrology*, 22(4), 329–358. <https://doi.org/10.1134/S0869591114040031>

Gavrilov A.M., Kryazhev S.G. (2008) Mineralogy and geochemistry of ore of the Sukhoi Log deposit. *Razvedka i okhrana nedr (Exploration and Protection of Mineral Resources)*, 8, 3–16 (in Russian).

Gladkochub D.P., Stanevich A.M., Mazukabzov A.M., Donskaya T.V., Motova Z.L., Kornilova T.A., Pisarevsky S.A., Nicoll G. (2013) Early evolution of the Paleoasian Ocean: LA-ICP-MS dating of detrital zircon from Late Precambrian sequences of the southern margin of the Siberian Craton. *Russian Geology and Geophysics*, 54(10), 1150–1163. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.09.002>

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Stanevich A.M., Pisarevsky S.A., Zhang S., Motova Z.L., Mazukabzov A.M., Li H. (2019) U-Pb detrital zircon geochronology and provenance of Neoproterozoic sedimentary rocks in southern Siberia: New insights into breakup of Rodinia and opening of Paleo-Asian Ocean. *Gondwana Research*, 65, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.07.007>

Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S. (2001) Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18, 1–75. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(01\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(01)00016-6)

Goryachev N.A., Ignatyev A.V., Velivetskaya T.A., Budyak A.E., Tarasova I.Yu. (2017) About S isotopic composition of sulfides from ores of the Bodaibo Synclorium. *Osnovnye problemy v uchenii ob endogennykh rudnykh mestorozhdeniyakh: novyye gorizonty (Main Problems in the Doctrine of Endogenic Ore Deposits: New Horizons)*. Moscow, IGM RAN, 406–408 (in Russian).

Hoefs J. (2009) Stable isotope geochemistry. Sixth Edition. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 285 p.

Ikonnikova T.A., Dubinina E.O., Saroyan M.R., Chugaev A.V. (2009) Oxygen isotopic composition of quartz veins and host rocks at the Sukhoi Log deposit, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 51(6), 505–512. <https://doi.org/10.1134/S1075701509060075>

Ikonnikova T.A. (2010) Behavior of stable isotopes (O, C, S) in hydrothermal-metasomatic ore formation at the Sukhoi Log deposit. (Abstract of candidate dissertation). M., IGM RAS, 23 p. (in Russian).

- Ivanov A.I. (2014) *Gold of Baikal-Patom: geology, mineralization, prospects*. Moscow, FGUP TsNIGRI, 215 p. (in Russian).
- Ivanov A.I., Lifshits V.I., Perevalov T.M. et al. (1995) *Precambrian of the Patom Highlands*. Moscow, Nedra, 262 p. (in Russian).
- Kazakevich Yu.P., Sher S.D., Zdanova T.P., Storozhenko A.A., Kondratenko A.K., Nikolaeva L.A., Aminev V.B. (1971) Lena gold-bearing region. Vol. 1. Stratigraphy, tectonics, magmatism, and primary gold deposits. *Trudy TsNIGRI. Proceedings of TsNIGRI*, is. 85. Moscow, Nedra, 161 p. (in Russian).
- Korikovskiy S.P., Fedorovskiy V.S. (1980) *Early Precambrian of the Patom Highland*. Moscow, Nauka, 468 p. (in Russian).
- Kryazhev S.G. (2017) *Genetic models and criteria for the forecasting gold deposits in carbonaceous-terrigenous complexes. (Doctor dissertation)*. Moscow, 288 p. (in Russian).
- Kryazhev S.G., Ustinov V.I., Grinenko V.A. (2009) Fluid regime at the Sukhoi Log gold deposit: Isotopic evidence. *Geochemistry International*, 47(10), 1041–1049. <https://doi.org/10.1134/S0016702909100085>
- Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martunenkov V.G., Verkhozin A.V. (2011) Petrological-geochemical features of wall-rock metasomatism in the Sukhoi Log gold deposit (Lena region). Part 1. Review of petrological and geochemical studies of the ore-bearing substrate. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta (Proceedings of the Tomsk Polytechnical University)*, 319(1), 35–41 (in Russian).
- Kuzmenko A.A. (2013) Gold mineralization within the Artemovskiy ore cluster on example of the Krasnoe deposit (Bodaibo district, Eastern Siberia). *Materialy tret'ey Rossiyskoy molodezhnoy shkoly «Novoye v poznanii protsessov rudoobrazovaniya» (Proceedings of the Third Russian Youth School "New in the Understanding of Ore Formation Processes")*. Moscow, IGEM RAN, 146–150. (in Russian).
- Kuznetsov A.B., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Letnikova E.F., Kaurova O.K., Konstantinova G.V. (2013) Age constraints on the Neoproterozoic Baikal Group from combined Sr isotopes and Pb–Pb dating of carbonates from the Baikal type section, southeastern Siberia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.06.003>
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevskiy L.V., Chang Z. (2007) Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log Deposit, Lena gold province, Russia. *Economic Geology*, 102, 1233–1267. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233>
- Laverov N.P., Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Bairova E.D., Gol'tsman Y.V., Distler V.V., Yudovskaya M.A. (2007) Formation stages of the large-scale noble metal mineralization in the Sukhoi Log deposit, East Siberia: results of isotope-geochronological study. *Doklady Earth Sciences*, 415(1), 810–814. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07050339>
- Meffre S., Large R.R., Scott R., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevskiy L.V., Woodhead J., Hergt J.M., Maslennikov V. (2008) Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(9), 2377–2391. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.03.005>
- Melezhik V.A., Pokrovskiy B.G., Fallick A.E., Kuznetsov A.B., Bujakaite M.I. (2009) Constraints on $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of Late Ediacaran seawater: insight from Siberian high-Sr limestones. *Journal of the Geological Society*, 166(1), 183–191. <https://doi.org/10.1144/0016-76492007-171>
- Neimark L.A., Ryt'sk E.Yu., Gorokhovskiy B.M. (1993). Geochronology and isotope geochemistry of gold deposits in the Baikal fold region. In: *Isotopic Dating of Endogenic Rocks*. Moscow, Nauka, 124–146 (in Russian).
- Nemerov V.K. (1989) *Geochemical specialization of the Late Precambrian black shales of the Baikal-Patom Highland. (Candidate dissertation)*. Irkutsk, 144 p. (in Russian).
- Nemerov V.K., Razvozhayeva E.A., Budyak A.E., Stanevich A.M., Kornilova T.A. (2010) Biogenic sedimentation factors of mineralization in the Neoproterozoic strata of the Baikal-Patom region. *Russian Geology and Geophysics*, 51(5), 572–586. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.04.012>
- Onishchenko S.A., Sokerina N.V. (2021) Features of the formation of the Golets Vysoschaishii gold-ore black-shale deposit (Bodaibo ore district). *Geology of Ore Deposits*, 63(2), 138–155. <https://doi.org/10.1134/S1075701521020045>
- Palenova E.E., Belogub E.V., Novoselov K.A., Maslennikov V.V., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Plotinskaya O.Y., Griboedova I.G., Kuzmenko A.A. (2015a) Chemical evolution of pyrite at the Kopylovskiy and Kavkaz black shale-hosted gold deposits, Bodaybo district, Russia: Evidence from EPMA and LA-ICP-MS data. *Geology of Ore Deposits*, 57(1), 64–84. <https://doi.org/10.1134/S107570151501002X>
- Palenova E.E., Belogub E.V., Novoselov K.A., Zabolotina M.V. (2013) Mineralogical and geochemical characteristics of carbonaceous strata of gold objects of the Artemovskiy cluster (Bodaibo district). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiyskoy akademii yestestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdeniy (News of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits)*, 2(43), 29–36. (in Russian).
- Palenova E.E., Blinov I.A., Zabolotina M.V. (2015b) Silver minerals from quartz veins of the Krasnoe deposit (Bodaibo ore region). *Mineralogiya (Mineralogy)*, 2, 9–17. (in Russian).
- Pokrovskiy B.G., Bujakaite M.I. (2015) Geochemistry of C, O, and Sr isotopes in the Neoproterozoic carbonates

from the southwestern Patom paleobasin, southern Middle Siberia. *Lithology and Mineral Resources*, 50(2), 144–169. <https://doi.org/10.1134/S0024490215010046>

Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N., Kapitonov I., Hourigan J. (2015) Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia. *Precambrian Research*, 267(1), 39–71. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.015>

Roedder E. (1984) Fluid inclusions. In: Ribbe, P.H. (Ed.), *Review in Mineralogy*, vol. 12. Mineralogical Society of America, p. 644.

Rundqvist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N., Cmirnov M.Y., Danilova M.Y., Ascheulov A.A. (1992) Stages of formation of the Bodaibo ore district. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy (Geology of Ore Deposits)*, 34, 3–15 (in Russian).

Rytsk E.Y., Kovach V.P., Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Bogomolov E.S., Kotov A.B. (2011) Isotopic structure and evolution of the continental crust in the East Transbaikalian segment of the Central Asian Foldbelt. *Geotectonics*, 45(5), 349–377. <https://doi.org/10.1134/S0016852111050037>

Rytsk E.Y., Tolmacheva E.V., Velikoslavinsky S.D., Kuznetsov A.B., Rodionov N.V., Andreev A.A., Fedoseenko A.M. (2021) Results of the study of zircon (SIMS) from granitoids of the Konstantinovskii Stock (area of the Sukhoi Log gold deposit): Age, sources, and geological consequences. *Doklady Earth Sciences*, 496(2), 146–150. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21020173>

Salop L.I. (1964) *Geology of the Baikal mountain region*. Vol. 1. Moscow, Nedra, 586 p. (in Russian).

Scott R.J., Large R.R., Meffre S., Masslenikov V.V. (2007) Structural controls on the development of the giant Sukhoi Log gold deposit, Siberia: Deformation in the Desert. *Geological Society of Australia Specialist Group in Tectonics and Structural Geology Alice Springs*, 55.

Sher S.D. (1972) *Metallogeny of gold*. Moscow, Nedra, 256 p. (in Russian).

Suslov N.A., Martynenko V.G., Bobrov V.A. (1981) *Unpublished report on results of prospecting for gold within the Vasilievsky ore cluster for 1978–1981*. Irkutsk, Funds of the Bodaibo Expedition, 67 p. (in Russian).

Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., Reutsky V.N., Abramova V.D., Gareev B.I., Bryukhanova N.N., Parshin A.V. (2020) Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): Constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits. *Ore Geology Reviews*, 119, 103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>

Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Blinov A.V., Goryacheva E.M. (2022a) Typomorphism of Pyrite from the Ugakhan Gold Deposit (Baikal–Patom Highlands). *Doklady*

Earth Sciences, 503(1), 81–85. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22030138>

Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Radomskaya T.A., Blinov A.V., Babyak V.N. (2022b) Indicator and Isotope Geochemical Characteristics of Iron Sulfides from the Golets Vysochaishy Deposit, East Siberia. *Geology of Ore Deposits*, 64(7), 503–512. <https://doi.org/10.1134/S1075701522070108>

Tsygankov A.A., Burmakina G.N., Khubanov V.B., Buyantuev M.D. (2017) Geodynamics of Late Paleozoic batholith-forming processes in Western Transbaikalia. *Petrology*, 25(4), 396–418. <https://doi.org/10.1134/S0869591117030043>

Tsygankov A.A., Litvinovsky B.A., Jahn B.M., Reichow M.K., Liu D.Y., Larionov A.N., Presnyakov S.L., Lepekhina Y.N., Sergeev S.A. (2010) Sequence of magmatic events in the Late Paleozoic of Trans-Baikal region, Russia (U-Pb isotope dating). *Russian Geology and Geophysics*, 51(9), 972–994. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.08.007>

Unpublished information report on the Kopylovsky area (Irkutsk region, Bodaybo district). LLC “Kopylovsky”, 2011ф. 19 p.

Vagina E.A. (2011) S isotopic composition of sulfides of ores from the Chertovo Koryto gold deposit (Patom Highland). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta (Bulletin of the Tomsk State University)*, 353, 195–198 (in Russian).

Vagina E.A. (2012) C and O isotopic composition of ores of the Chertovo Koryto gold deposit (Patom Highland). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta (Bulletin of the Tomsk State University)*, 360, 168–171 (in Russian).

Valley J.W., Kitchen N., Kohn M., Niendorf C.R., Spicuzza M.J. (1995) UWG-2, a garnet standard for oxygen isotope ratios: Strategies for high precision and accuracy with laser heating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 5223–5231. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00386-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00386-X)

Vamboldt A.Ya., Bozhko E.N., Sinyukov Yu.D. (2012) *Unpublished report on results of geological exploration work on the licensed area “Kavkaz” carried out in 2011 (O-50-XIII, Bodaibo district)*. Bodaibo, 46 p. (in Russian).

Vamboldt A.Ya., Krasnoshchekov A.N., Vlasova N.A. (2011) *Unpublished report on results of geological exploration work carried out in 2010*. Bodaibo, 94 p. (in Russian).

Verkhovozin A.V., Martynenko V.G., Benedyuk V.F., Burakov V.V., Leskov V.V., Kolmakov Yu.V., Kucherenko I.V. (2007) *Chertovo Koryto gold deposit. Unpublished report on exploration results and feasibility study of 1996–2007*. ZAO Tonoda Gold, Bodaibo (in Russian).

Vinogradov V.I., Pichugin L.P., Bykhover V.N. (1996) Isotopic features and dating of epigenetic alterations of the Upper Precambrian deposits of the Ura Uplift. *Litologiya i poleznye iskopaemye (Lithology and Mineral Resources)*, 31, 60–69 (in Russian).

Yarmolyuk V.V., Budnikov S.V., Kovalenko V.I., Antipin V.S., Goreglyad A.V., Sal'nikova E.B., Kotov

A.B., Kozakov I.K., Kovach V.P., Yakovleva S.Z., Berezhnaya N.G. (1997) Geochronology and geodynamic setting of the Angara-Vitim batholith. *Petrologiya (Petrology)*, 5(5), 401–414. (in Russian).

Yarmolyuk V.V., Kozlovsky A.M., Kovach V.P., Kozakov I.K., Kotov A.B., Rytsk E.Y. (2012) Mechanisms of continental crust formation in the Central Asian Foldbelt. *Geotectonics*, 46(4), 251–272. <https://doi.org/10.1134/S001685211204005X>

Yudovskaya M.A., Distler V.V., Mokhov A.V., Rodionov N.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. (2011) Relationship between metamorphism and ore formation at the Sukhoi Log gold deposit hosted in black slates from the data of U-Th-Pb isotopic SHRIMP-dating of accessory minerals. *Geology of Ore Deposits*, 53(1), 27–57. <https://doi.org/10.1134/S1075701511010077>

Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiyev N.N. (2016) Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*, 7(3), 453–481. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010>

Zorin Yu.A., Mazukabzov A.M., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Presnyakov S.L., Sergeev S.A. (2008) Silurian age of major folding in Riphean deposits of the Baikal-Patom zone. *Doklady Earth Sciences*, 423(1), 1235–1239. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08080114>

Zorin Yu.A., Sklyarov E.V., Belichenko V.G., Mazukabzov A.M. (2009) Island arc-back-arc basin evolution: implications for Late Riphean-Early Paleozoic geodynamic history of the Sayan-Baikal folded area. *Russian Geology and Geophysics*, 50(3), 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.06.022>

Информация об авторах

Паленова Екатерина Евгеньевна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; palenova@mineralogy.ru

Садыков Сергей Ахматович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; sadykov@mineralogy.ru

Information about the authors

Ekaterina E. Palenova – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia; palenova@mineralogy.ru

Sergey A. Sadykov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia; sadykov@mineralogy.ru



УДК 553.411.071

<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-2-4>

ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ В ГРАНИТАХ ЮЖНО-СУХТЕЛИНСКОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ЗОЛОТА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

С.И. Брюхов, Д.А. Артемьев,
И.А. Блинов, Н.Р. Аюпова, А.С. Целуйко

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; simeon.bryukhov@mineralogy.ru

Статья поступила в редакцию 18.04.2025 г., после доработки 03.06.2025 г., принята к печати 24.06.2025 г.

Аннотация. В работе рассмотрены минералого-геохимические особенности золото-сульфидной минерализации кварцевых жил в гранитах Кацбахского комплекса на Южно-Сухтелинском проявлении золота (Южный Урал). Концентрация сульфидов в жилах варьирует от 1 до 3 об. %, редко до 10 об. %, содержание Au составляет 5–10 г/т. Выделены три разновидности самородного золота: 1) в ассоциации с оксигидроксидами железа по сульфидным минералам и в кварце (пробность 649–830 ‰), 2) в ассоциации с турмалином (пробность 870–888 ‰) и оксигидроксидами железа и 3) высокопробное золото в оксигидроксидах железа в ассоциации с фишессеритом и во вторичных минералах меди. Сульфиды представлены пиритом, халькопиритом, сфалеритом и галенитом. Установлено, что пирит обогащен Ni, халькопирит – Ag, Sn и Sb, галенит – Se, Ag, Te, Bi и Sb и сфалерит – Cd, In и Hg. Содержание Au в пирите, халькопирите и сфалерите составляет менее 0.1 г/т, во вторичных сульфидах меди возрастает до 5 г/т и резко увеличивается в оксигидроксидах железа (до 168 г/т). Рудообразование предположительно происходило при постепенном понижении температуры в интервале от 400 до 200 °C, что соответствует последовательности минералообразования пирит → халькопирит → сфалерит → галенит. Окисление сульфидов в зоне гипергенеза привело к выделению высокопробного самородного золота и формированию фишессерита.

Ключевые слова: самородное золото, сульфиды, ЛА-ИСП-МС, Арамилско-Сухтелинская зона, Южный Урал.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госбюджетной темы ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № 122031600292-6.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность В.В. Масленникову за руководство исследованиями, а также Е.В. Белогуб и И.Ю. Мелекесцевой за редактирование статьи.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. С.И. Брюхов – разработка концепции, исследование, визуализация, написание рукописи; Д.А. Артемьев, И.А. Блинов – аналитические работы; Н.Р. Аюпова – разработка концепции, редактирование рукописи; А.С. Целуйко – помощь в обработке фактического материала.

Для цитирования: Брюхов С.И., Артемьев Д.А., Блинов И.А., Аюпова Н.Р., Целуйко А.С. Золото-сульфидная минерализация кварцевых жил в гранитах Южно-Сухтелинского проявления золота (Южный Урал). Минералогия, 2025, 11(2), 70–87. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-2-4.

GOLD-SULFIDE MINERALIZATION OF QUARTZ VEINS IN GRANITES OF THE SOUTH SUKHTELYA GOLD OCCURRENCE (SOUTH URALS)

S.I. Bryukhov, D.A. Artem'yev, I.A. Blinov, N.R. Ayupova, A.S. Tseluyko

South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,
Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia; simeon.bryukhov@mineralogy.ru

Received 18.04.2025, revised 03.06.2025, accepted 24.06.2025

Abstract. The paper considers mineralogical and geochemical features of gold-sulfide mineralization of quartz veins in granites of the Katsbakh complex in the South Sukhtelya gold occurrence (South Urals). The sulfide content of quartz veins varies from 1 to 3 vol. %, rarely reaching 10 vol. %, and the average Au content is 5–10 g/t. Three types of native gold are identified: 1) in assemblage with Fe oxyhydroxides and in quartz (the fineness of 649–830 ‰), 2) in assemblage with tourmaline (the fineness of 870–888 ‰) and 3) in Fe oxyhydroxides in assemblage with fischesserite and in secondary Cu minerals. The sulfides include pyrite, chalcopyrite, sphalerite and galena. Pyrite is enriched in Ni, chalcopyrite contains Ag, Sn, and Sb, galena is rich in Se, Ag, Te, Bi, and Sb, and sphalerite has a higher amount of Cd, In, and Hg. The Au content of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite is less than 0.1 ppm increasing up to 5 ppm in chalcocite and up to 168 ppm in Fe hydroxides. The ores formed during a gradual temperature decrease in a range from 400 to 200 °C, which corresponds to a sequence of mineral formation: pyrite → chalcopyrite → sphalerite → galena. The oxidation of sulfides resulted in the formation of the high-fineness native gold in assemblage with fishesserite.

Keywords: native gold, sulfides, LA-ICP-MS, Aramil-Sukhtelya zone, South Urals.

Funding. This work was supported by state contract of the South Ural Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS no. 122031600292-6.

Acknowledgements. The authors are sincerely grateful to V.V. Maslennikov for supervision of studies and E.V. Belogub and I.Yu. Melekestseva for editing the manuscript.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Authors contribution. S.I. Bryukhov – conceptualization, research, vizualization, writing the manuscript; D.A. Artemyev and I.A. Blinov – analytical works; N.R. Ayupova – conceptualization, editing the manuscript; A.S. Tseluyko – processing of factual material.

For citation: Bryukhov S.I., Artem'yev D.A., Blinov I.A., Ayupova N.R., Tseluyko A.S. Gold-sulfide mineralization of quartz veins in granites of the South Sukhtelya gold occurrence (South Urals). *Mineralogy*, 2025, 11(2), 70–87. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-2-4.

ВВЕДЕНИЕ

Южно-Сухтелинское проявление золота находится в Арамильско-Сухтелинской тектонической мегазоне Урала (рис. 1а). Как и близлежащие участки (Эльдорадо, Змеиное, Астафьевское), оно относится к золото-сульфидно-кварцевой формации. Самородное золото связано с кварцевыми жилами, локализованными в пермских гранитоидах. Вмещающими породами для гранитной интрузии служат каменноугольные тефрогенно-кремнистые углеродистые отложения (Сазонов и др., 2001; Тевелев и др., 2018). Данные о присутствии золотого оруденения в коренном залегании описаны в работах (Бабкин и др., 1971; Тевелев и др., 1998; Сначев и др., 2006), однако состав самородного золота и минералого-геохимические особенности сульфидной минерализации кварцевых жил в гранитоидах Южно-Сухтелинского участка до сих пор не освещены в литературе.

С целью выяснения условий образования золото-сульфидной минерализации в кварцевых жилах проведены минералого-геохимические исследования, результат которых важен для развития существующих представлений о рудообразовании, связанном с внедрением гранитов.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ

Южно-Сухтелинское проявление золота входит в состав Арамильско-Сухтелинской зоны, представляющей собой узкую, вытянутую в северо-восточном направлении полосу шириной около 20–30 км, расположенную между Магнитогорским мега-синклинием и Восточно-Уральским поднятием (рис. 1б). Считается, что Арамильско-Сухтелинская зона в раннепалеозойское время являлась восточным флангом Магнитогорской островной дуги и характеризовалась накоплением пород вулканогенного происхождения.

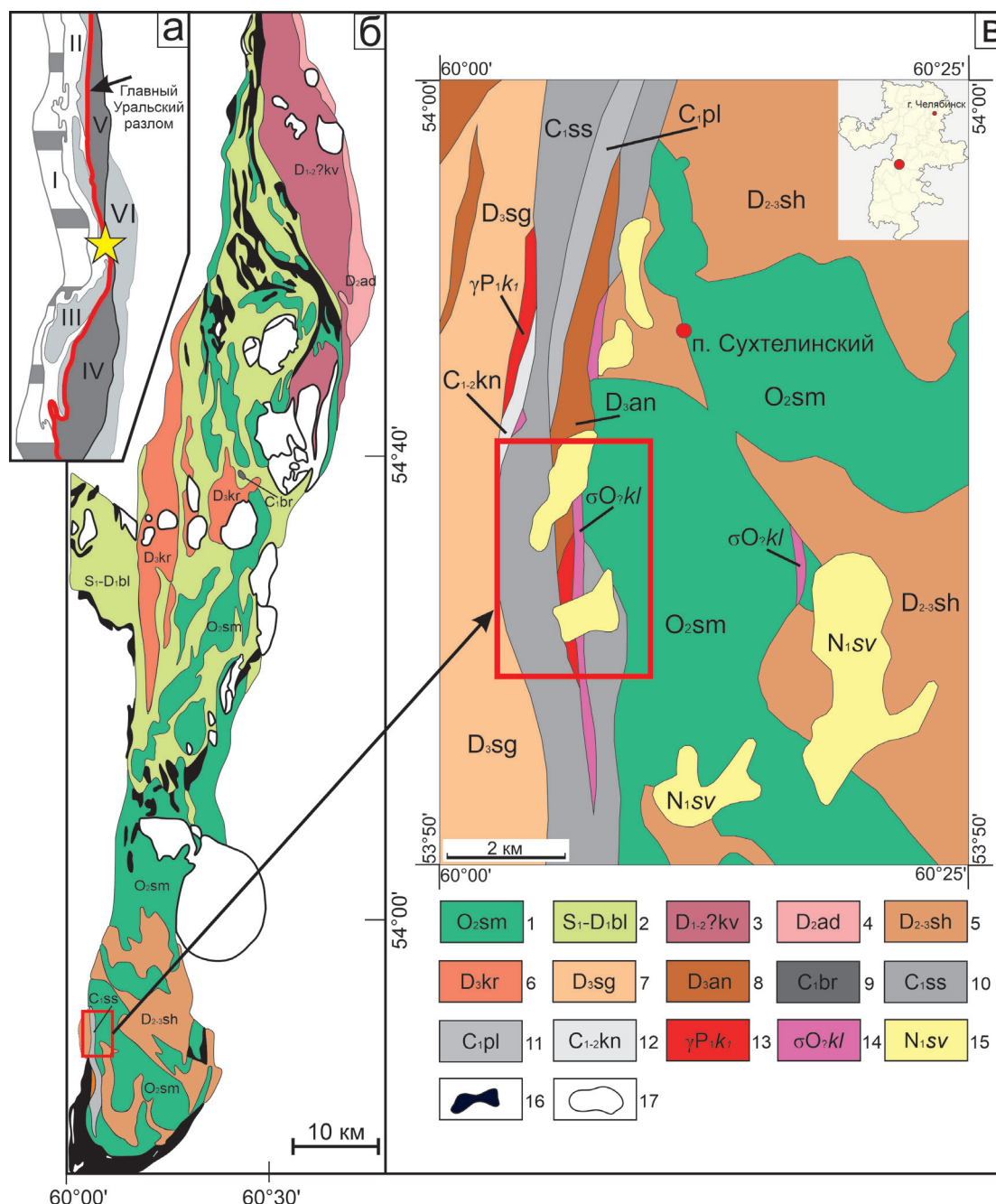


Рис. 1. Позиция Арамильско-Сухтелинской зоны на тектонической карте Урала (а) (Пучков, 2010), схематическая геологическая карта Арамильско-Сухтелинской зоны (б) (Сначев и др., 2006; Петров и др., 2003; Пужаков и др., 2018) и Южно-Сухтелинского участка (в) (Тевелев и др., 2018).

Металлогенические зоны: I – Предуральская прогиб; II – Западно-Уральская; III – Центрально-Уральская; IV – Магнитогорская; V – Тагильская; VI – Восточно-Уральская.

1–11 – Толщи: 1 – шеметовская: базальты, гиаокластитовые брекчии, алевролиты, прослои кремнистых алевролитов; 2 – булатовская; 3 – кулуевская; 4 – аджатаровская; 5 – сухтелинская: алевропесчаники с прослоями углеродистых сланцев, конгломераты, туфы андезитов, базальтов; 6 – краснокаменная; 7 – шелудивогорская: базальты, туфы, алевролиты; 8 – арсинская; 9 – биргильдинская; 10 – сосновская: глинистые, кремнистые, углистые сланцы, конгломераты, алевролиты; 11 – полоцкая; 12 – каморзинская; 13 – кацбахский комплекс граносиенит-умеренно-щелочных гранитов ($\gamma P_1 k_1$); 14 – куликовский комплекс: серпентиниты ($\sigma O?kl$); 15 – светлинская свита: глины зеленовато-серые с железо-марганцевыми бобовинами, включениями гипса, карбонатными стяжениями, бокситы; 16 – гипербазитовые массивы; 17 – контуры интрузивных массивов.

Fig. 1. Position of the Aramil-Sukhtelya Zone on tectonic map of the Urals (a) (Puchkov, 2010), schematic geological map of the Aramil-Sukhtelya Zone (б) (Snachev et al., 2006; Petrov et al., 2013; Puzhakov et al., 2018) and South Sukhtelya area (в) (Tevelev et al., 2018).

Metallogenic zones: I – Preuralian Foredeep; II – West Uralian; III – Central Uralian; IV – Magnitogorsk; V – Tagil; VI – East Uralian.

1–11 – Sequences: 1 – Shemetovskaya: basalt, hyaloclastite breccia, siltstone, interlayers of siliceous siltstone; 2 – Bulatovo; 3 – Kuluevo; 4 – Adzhitar; 5 – Sukhtelya: siltstone with interlayers of carbonaceous shale, conglomerate, andesitic tuff, basalt; 6 – Krasnokamenskaya; 7 – Sheludivogorskaya: basalt, tuff, siltstone; 8 – Arsinskaya; 9 – Birgilda; 10 – Sosnovka: clay, siliceous and coaliferous shale, conglomerate, siltstone; 11 – Polotskaya; 12 – Kamorza; 13 – Katsbakh complex of granosyenite-moderately alkali granite ($\gamma P I k I$); 14 – Kulikovsky complex: serpentinite ($\sigma O ? k I$); 15 – Svetlinskaya Formation: greenish gray clay with Fe-Mn nodules, gypsum inclusions, carbonate concretions, bauxites; 16 – ultramafic rocks; 17 – contours of intrusives.

ногенных и вулканогенно-осадочных формаций, а на коллизионном этапе она была шарьирована в восточном направлении на западный край Восточно-Уральского микроконтинента (Пучков, 2000).

В пределах Южно-Сухтелинского участка распространены 1) субщелочные базальтоиды и их вулканокластиты с прослоями кремнистых туффи-тов, алевролитов и яшмоидов шеметовской толщи (O_2sm), 2) алевролиты и песчаники арсинской толщи (D_{3an}), 3) базальты, туфы и алевролиты шелудивогорской толщи (D_{3sg}), 4) алевропесчаники с прослоями углеродистых сланцев, конгломераты, туфы андезитов и базальтов сухтелинской толщи (D_{2-3sh}), 4) глинистые, кремнистые и углистые сланцы, конгломераты и алевролиты сосновской толщи (C_{1ss}) и 5) неогеновые озерно-аллювиальные, делювиальные и пролювиальные отложения светлинской толщи (N_{1sv}) (Тевелев и др., 1998, рис. 1в).

Через Южно-Сухтелинский участок в суб-меридиональном направлении простирается мало-мощное субвертикальное плитообразное тело сер-пентинитов куликовского комплекса ($\sigma O ? k I$), рас-полагающееся вдоль контакта углеродисто-крем-нистой сосновской толщи и гранитов кацбахского комплекса ($\gamma P I k I$). Граниты внедрены в карбоно-вые тефрогенно-кремнистые углеродистые отложе-ния (Мосейчук и др., 2017). На контакте с углеро-дистыми сланцами граниты гидротермально изме-нены и пронизаны разноориентированными квар-цевыми жилами, в которых отмечаются сульфид-ная минерализация и видимое золото. Рудная зона охватывает как экзо- так и эндоконтакт гранитов и сланцевой толщи, имеет длину ~50 м и мощность ~7 м, вскрыта канавами. Кроме того, кварцевые жилы обнаружены в контурах отработанной золо-тоносной россыпи.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Штуфные образцы кварцевых жил разме-ром, в среднем, 15×15×15 см с сульфидной мине-рализацией и видимым золотом отобраны во время картирования участка 3×6 км для выявления ко-ренных источников золоторудной минерализации. Для изучения минерального состава изготовлено 27 аншлифов. Все исследования выполнены в Юж-но-Уральском федеральном научном центре мине-ралогии и геоэкологии УрО РАН (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН), г. Миасс.

Оптико-микроскопическое изучение аншли-фов проводилось в отраженном свете на микроско-пе Olympus BX51 с цифровой приставкой и каме-рой DP12. Химический состав самородного золота и ассоциирующих с ними сульфидных минералов проанализирован на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Vega 3 sbu с энерготи-сперсионным анализатором Oxford Instruments X-act (ускоряющее напряжение 20 кВ, время набора спектра 120 с) (аналитик И.А. Блинов). Пределы обнаружения содержаний химических элементов не превышают 0.2 мас. %.

Метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС) применялся для изучения микроэлементного состава сульфидных минералов и оксигидроксидов железа. Анализы выполнялись на приборе New Wave Research UP213 YAG Laser Ablation System (аналитик Д.А. Артемьев). Обработка полученных результатов проводилась в программе Iolite. Были проанализированы: кристаллически-зернистый пи-рит (15 ан.), халькопирит (15 ан.), сфалерит (15 ан.), галенит (12 ан.) и тонкозернистая смесь халькози-на, гидроксидов железа, халькопирита, сфалерита и галенита (15 ан.), а также гетит (12 ан.) и кварц (12 ан.). Статистическая обработка результатов проводилась с построением матрицы коэффициен-тов парной корреляции и иерархическим кластер-ным анализом в программе «Statistica».

Для расчета температуры минералообразования по данным анализов ЛА-ИСП-МС, использованы Fe-Ga-Ge-Mn-In геотермометр для сфалерита: $T(^{\circ}\text{C}) = (54.4 \pm 7.3) \text{ PC1} + (208 \pm 10)$, где $\text{PC1} = \ln\left(\frac{C_{\text{Ga}}^{0.22} \cdot C_{\text{Ge}}^{0.22}}{C_{\text{Fe}}^{0.37} \cdot C_{\text{Mn}}^{0.20} \cdot C_{\text{In}}^{0.11}}\right)$ (Frenzel et al., 2016) и Se геотермометр для пирита: $\text{Se(pyrite)} = 5 \cdot 10^{13} \cdot T^{-4.82}$ (Keith et al., 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Кварцевые жилы

Граниты вдоль контакта с углеродистыми сланцами осветлены, серицитизированы и аргиллизированы. В зоне контакта с углеродистыми сланцами присутствуют многочисленные разноориентированные кварцевые жилы с золото-сульфидной и золото-сульфидно-турмалиновой минерализацией. Жилы длиной до 10 м имеют линзовидную форму, резкие контакты, мощность их колеблется от нескольких сантиметров до 1 м. Содержание Au в участках развития кварцевых жил составляет 5–10 г/т. Распределение самородного золота крайне неравномерное.

Жильный кварц средне- и крупнозернистый, молочно-белый, местами с прозрачными участками. Золото-сульфидная минерализация распространена неравномерно, преимущественно, в крупных жилах в виде скоплений размером 0.5–1.5 см, выполняя интерстиции между зернами кварца. Содержание сульфидов в жилах варьирует от 1 до 3 об. %, реже до 10 об. % (рис. 2а, б). Преобладающим сульфидным минералом является пирит, в подчиненном количестве присутствуют халькопирит, сфалерит, галенит, пирротин и вторичные сульфиды меди. В турмалин-кварцевых жилах агрегаты самородного золота размером до 2 см заполняют полости в кварце и цементируют кристаллы турмалина. Процессы окисления проявлены в широком развитии бурых, красновато-бурых и охристых пленок и агрегатов оксигидроксидов железа.

Сульфидная минерализация

Для пирита характерны агрегаты эвгедральных и субгедральных, нередко трещиноватых кристаллов, размер которых варьирует от 0.1 до 0.5 мм. В пирите присутствуют редкие включения галенита, сфалерита и халькопирита. Трещиноватые агрегаты пирита цементируются халькопиритом, сфалеритом и галенитом (рис. 2в, г). Границы между

сульфидами ровные, редко корродированы. Пирит в значительной степени замещен оксигидроксидами железа, на отдельных участках – практически полностью (рис. 2д).

Халькопирит образует прожилковые и гнездовидные агрегаты размером 0.03–0.60 мм (рис. 2е–з). Границы халькопирита с кварцем и пиритом ровные, со сфалеритом и галенитом – сложные, извилистые. Халькопирит часто наблюдается в виде сростков с галенитом и сфалеритом, а также присутствует в виде эмульсиевидной вкрапленности размером 0.001–0.100 мм и включений размером до 0.03 мм в сфалерите, залечивает трещины в кристаллах пирита. В халькопирите присутствуют редкие тонкие пластинки пирротина размером до 0.3 мм. Значительная часть зерен халькопирита замещается по границам вторичными сульфидами меди.

Сфалерит в большинстве случаев представлен ангедральными, реже субгедральными гнездовидными агрегатами размером 0.05–0.50 мм (рис. 2з–к). Для сфалерита характерны светлые внутренние рефлексы. Чаще всего он встречается совместно с халькопиритом и галенитом, редко – с пиритом. С галенитом сфалерит имеет четкие границы.

Галенит чаще всего ассоциирует с халькопиритом и сфалеритом и реже встречается в виде обособленных мономинеральных агрегатов (рис. 2к–м). Образует субгедральные и ангедральные агрегаты размером 0.01–0.30 мм, встречается в виде прожилков в агрегатах халькопирита, сфалерита и пирита, реже образует тесные срастания с вторичными минералами меди. Границы с халькопиритом сложные и извилистые, а со сфалеритом и пиритом – ровные, иногда галенит корродирует кристаллы пирита. На отдельных участках, часто в ассоциации с оксигидроксидами железа, галенит почти полностью замещается вторичными минералами меди.

Вторичные сульфиды меди образуют каемки замещения и сеть прожилков по трещинам в халькопирите и галените (рис. 2м–о). Совместно с оксигидроксидами железа часто полностью замещают агрегаты халькопирита и галенита. Вторичные сульфиды меди имеют неоднородную, пятнистую структуру, окрашены в серовато-синеватые, светло-голубоватые и ярко-синие цвета. Агрегаты галенита, замещенные вторичными медными минералами, характеризуются реликтовыми включениями, каймами и прожилками первичного сульфида.

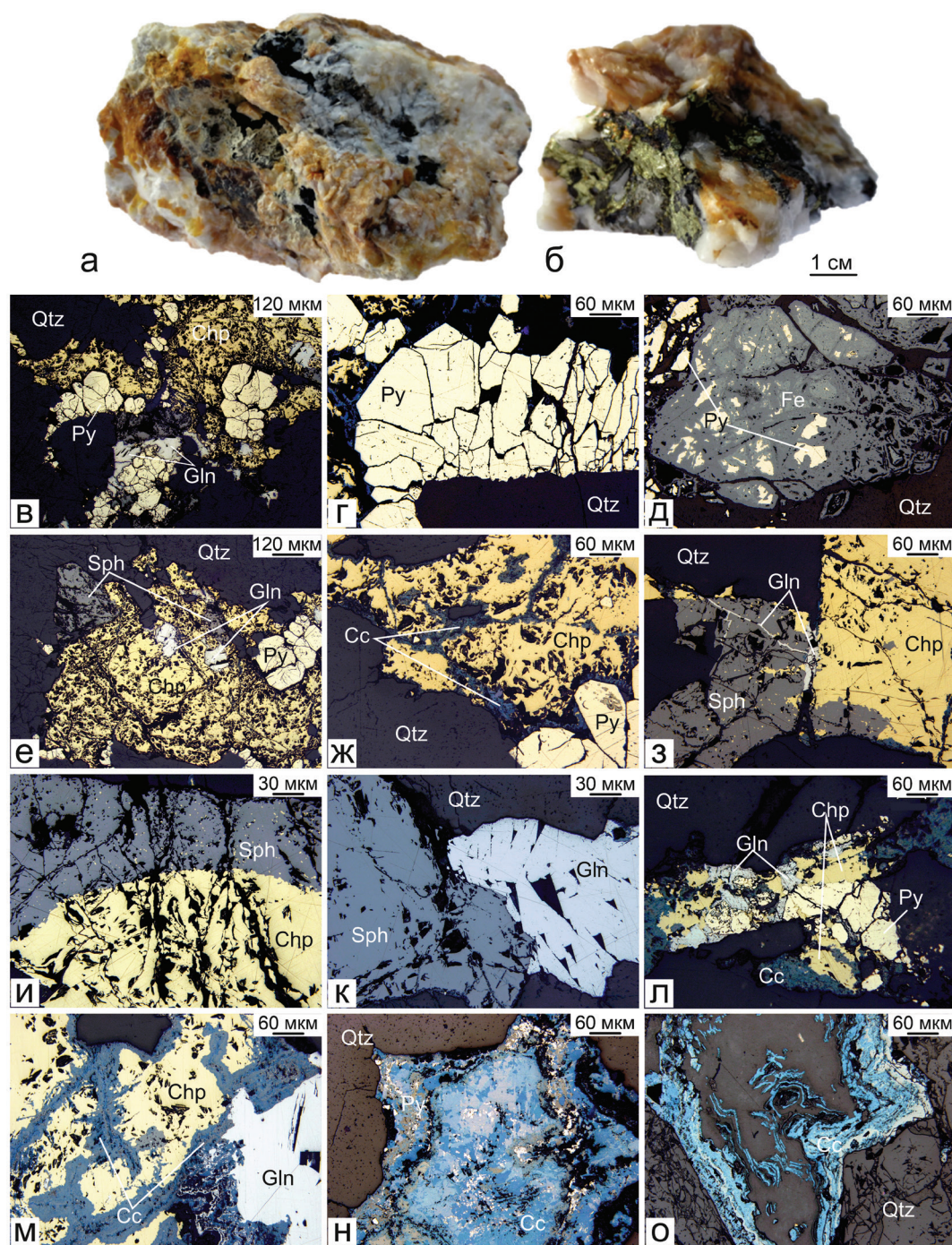


Рис. 2. Сульфидная минерализация в кварцевых жилах: а, б – прожилковые и гнездовидные скопления сульфидов в крупнозернистом кварце; в – пиритовые агрегаты в ассоциации с халькопиритом и галенитом; г – трещиноватые эв- и субгедральные кристаллы пирита; д – реликты пирита в оксигидроксидах железа; е – обособленные агрегаты эвгедральных кристаллов пирита в халькопирите; ж – развитие вторичных сульфидов меди по краям халькопирита; з – халькопирит с включениями сфалерита в тесном срастании со сфалеритом с халькопиритовой вкрапленностью и прожилками галенита; и – срастание халькопирита со сфалеритом с эмульсиевидными включениями халькопирита; к – сфалерит-галенитовая ассоциация; л – пирит с халькопиритом и галенитом, развитие вторичной медной минерализации по халькопириту; м – замещение халькопирита и галенита вторичными сульфидами меди; н – реликты пирита и галенита во вторичной медной минерализации; о – реликтовые включения, каймы и прожилки вторичной медной минерализации по галениту.

а, б – фото образцов; в–о – отраженный свет. Qtz – кварц, Py – пирит, Chp – халькопирит, Sph – сфалерит, Gln – галенит, Fe – оксигидроксиды железа, Сс – вторичные сульфиды меди.

Fig. 2. Sulfide mineralization in quartz veins: а, б – veins and pockets of sulfides in coarse-grained quartz; в – pyrite aggregates in assemblage with chalcopyrite and galena; г – fractured euhedral and subhedral pyrite; д – pyrite relics in Fe oxyhydroxides, е – euhedral pyrite crystals in chalcopyrite; ж – replacement of chalcopyrite by secondary copper sulfides along the edges; з – chalcopyrite with sphalerite inclusions closely intergrown with sphalerite with chalcopyrite dissemination; и – intergrowth of chalcopyrite and sphalerite; к – sphalerite-galena assemblage; л – pyrite with chalcopyrite and galena; м – replacement of chalcopyrite and galena by secondary copper minerals; н – relics of pyrite and galena in secondary copper sulfides; о – relict inclusions, rims and veinlets of secondary copper mineralization after galena.

а, б – sample photos; в–о – reflected light. Qtz – quartz, Py – pyrite, Chp – chalcopyrite, Sph – sphalerite, Gln – galena, Fe – iron oxyhydroxide, Cc – secondary copper sulphides.

Температуры образования пирита и сфалерита из кварцевых жил, рассчитанные с использованием Se и Fe-Ga-Ge-Mn-In геотермометров, составляют 357–420 °С (среднее 401 °С) и 226–263 °С (среднее 247 °С) соответственно (табл. 1).

Самородное золото

По химическому составу, морфологии и минеральной ассоциации выделены три разновидности самородного золота. Первая разновидность встречается в сульфидно-кварцевых жилах, где самородное золото ассоциирует с оксигидроксидами железа, развивающимися по пириту, и в кварцевой массе (рис. 3а–г). Самородное золото образует мелкие, прожилковидные выделения размером от 0.01 до 0.05 мм. Пробность золота варьирует от 649 до 830 ‰ при среднем значении 738 ‰ (мас. %: Au 64.89–83.02, Ag 16.95–35.11, табл. 2).

Вторая разновидность установлена в кварц-сульфидно-турмалиновых жилах, где самородное золото образует более крупные (до 0.9 мм) агрегаты (рис. 3д, е). Пробность золота в жилах с турмалином колеблется от 870 до 888 ‰ (мас. %: Au 87.06–88.77, Ag 11.44–12.38, табл. 2).

Третья разновидность присутствует в оксигидроксидах железа и во вторичной медной минерализации и образует тонкие, губчатые агрегаты (размер 0.001–0.005 мм, рис. 3ж, з). Золото характеризуется высокой пробностью 999 ‰ (Au 99.3–100 мас. %, табл. 2). Редко в оксигидроксидах железа наблюдаются тонкие прожилки (размер менее 0.01 мм) самородного золота в сростании с фишессеритом (мас. %): Se 22.42, Ag 51.84, Au 26.75 (рис. 3и, к).

Элементы-примеси в сульфидных минералах

Содержание элементов-примесей в сульфидах по результатам ЛА-ИСП-МС анализов приведено в табл. 3 и на рис. 4. Пирит обогащен Ni (684–7950 г/т), а также характеризуется варьирующими содержаниями (г/т) Se (11.3–24.7), Co (0.53–9.82),

Таблица 1

Расчетные температуры образования минералов (Т °С) на Южно-Сухтелинском рудопоявлении

Table 1

Calculated temperatures of mineral formation (Т °С) for the South Sukhtelya occurrence

№	Пирит	Сфалерит
1	412	263
2	415	248
3	408	226
4	378	229
5	406	230
6	389	237
7	406	259
8	393	251
9	415	256
10	357	239
11	408	260
12	420	262
13	412	256
Минимум	357	226
Максимум	420	263
Среднее	401	247
Медиана	408	251

Sb (0.04–7.20), Bi (0.01–60.50) и крайне низкими (<0.1 г/т) содержаниями других элементов. В халькопирите установлены повышенные (здесь и далее: по отношению к другим изученным сульфидам) содержания (г/т) Ag (7.44–92.30), Sn (42.6–64.7) и Hg (12.2–22.8), также по сравнению с пиритом отмечается незначительное возрастание содержания Cd, In, Sb и Pb. Высокие содержания (г/т) Se (1300–1546), Ag (1905–2377), Te (376–443), Bi (5207–5752) и Sb (132–187) – характерная черта галенита. Сфалерит отличается высокими содержаниями (г/т): Cd (1218–1682), повышенными In (14.4–30.9), Hg (99.3–141), иногда аномальными (до

Таблица 2

Химический состав (мас. %) самородного золота Южно-Сухтелинского участка

Table 2

Chemical composition (wt. %) of native gold from the South Sukhtelya area

№ п/п	Ag	Au	Сумма	Формула
Золото в ассоциации с сульфидными минералами и оксигидроксидами железа				
1	19.44	80.56	100.00	Au _{0.69} Ag _{0.31}
2	29.42	70.16	99.58	Au _{0.57} Ag _{0.43}
3	30.41	69.59	100.00	Au _{0.56} Ag _{0.44}
4	29.97	69.29	99.26	Au _{0.56} Ag _{0.44}
5	32.71	67.79	100.50	Au _{0.53} Ag _{0.47}
6	35.11	64.89	100.00	Au _{0.50} Ag _{0.50}
7	20.84	79.37	100.22	Au _{0.68} Ag _{0.32}
8	16.95	83.02	99.98	Au _{0.73} Ag _{0.27}
9	27.73	72.27	100.00	Au _{0.59} Ag _{0.41}
10	25.22	74.88	99.55	Au _{0.62} Ag _{0.38}
11	24.05	75.50	100.10	Au _{0.63} Ag _{0.37}
12	24.23	75.55	99.78	Au _{0.63} Ag _{0.37}
13	24.27	76.60	100.87	Au _{0.63} Ag _{0.37}
Среднее:	26.18	73.81		
Медиана:	25.22	74.88		
Золото в ассоциации с турмалином				
14	11.98	87.26	99.24	Au _{0.80} Ag _{0.20}
15	11.68	88.17	99.84	Au _{0.81} Ag _{0.19}
16	11.64	88.31	99.95	Au _{0.81} Ag _{0.19}
17	11.90	88.77	100.67	Au _{0.80} Ag _{0.20}
18	12.21	87.06	99.27	Au _{0.82} Ag _{0.18}
19	12.27	88.21	100.48	Au _{0.80} Ag _{0.20}
20	11.44	87.90	99.34	Au _{0.81} Ag _{0.19}
21	12.38	87.92	100.29	Au _{0.80} Ag _{0.20}
22	11.45	88.73	100.18	Au _{0.81} Ag _{0.19}
Среднее:	11.88	88.04		
Медиана:	11.90	88.17		
Тонкодисперсное золото в оксигидроксидах железа и во вторичной медной минерализации				
23	–	100	100	Au _{1.00}
24	–	100	100	Au _{1.00}
25	–	100	100	Au _{1.00}

4340) содержаниями Pb. В нем также зафиксированы (г/т): Co (1.7–11.2), Se (5.3–11.3), Ag (2.2–29.2), Mn (2.5–12.2) и Ga (2.3–27.6). Содержание Au в пирите, халькопирите и сфалерите составляет менее 0.1 г/т, во вторичных сульфидах меди возрастает до 5 г/т (среднее 0.58 г/т) и резко увеличивается в оксигидроксидах железа (2.3–168.0 г/т) (табл. 2). Содержания Ag возрастает в ряду (среднее, г/т): пирит (0.1) – сфалерит (4.9) – халькопирит (48.8) – вторичные сульфиды меди (80.7) – галенит (2248). В оксигидроксидах железа его содержание уменьшается до 11.4 г/т.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Формирование золоторудной минерализации

В результате проведенного исследования можно выделить две генерации самородного золота. Первая генерация умеренно высокопробного самородного золота связана с сульфидно-кварцевыми и сульфидно-кварц-турмалиновыми жилами (1 и 2 ассоциация). Вторая генерация весьма высокопробного самородного золота формирует тончайшие включения и прожилки в оксигидроксидах Fe,

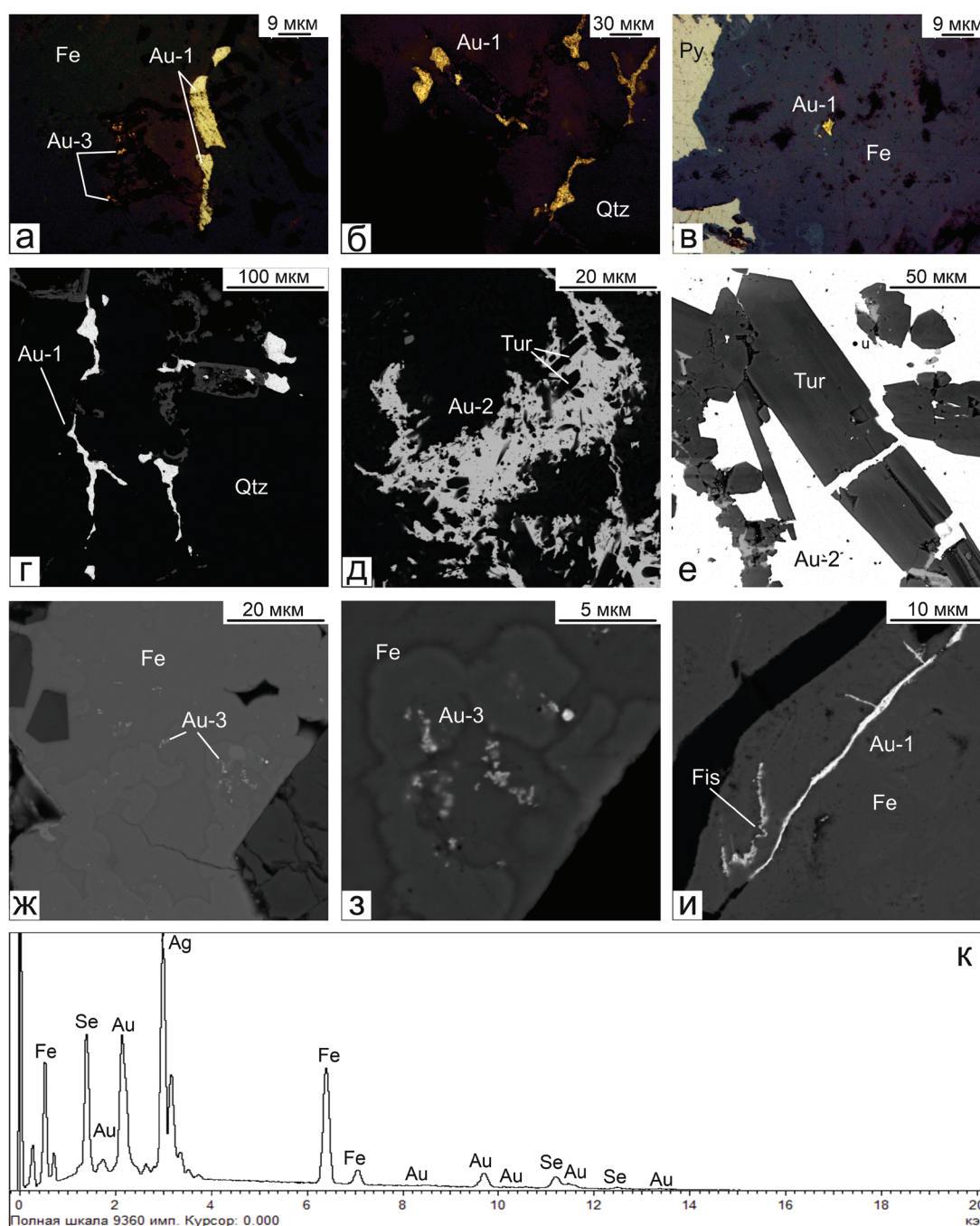


Рис. 3. Самородное золото в кварцевых жилах: а, б – прожилки золота в оксигидроксидах железа (а) и кварце (б); в – включение золота в оксигидроксидах железа, замещающих пирит; г – прожилки золота в кварце, деталь рис. б; д, е – золото в турмалин-кварцевой ассоциации; ж, з – тонкие включения новообразованного золота в оксигидроксидах железа; и – тонкие прожилки золота и фишессерита в оксигидроксидах железа; к – спектр фишессерита.

а–в – отраженный свет; г–и – СЭМ фото. Самородное золото в кварцевых жилах и в оксигидроксидах железа (Au-1), в ассоциации с турмалином (Au-2), в оксигидроксидах железа (Au-3); Fe – оксигидроксиды железа, Fis – фишессерит.

Fig. 3. Native gold in quartz veins: а, б – gold veinlets in Fe oxyhydroxides (а) and quartz (б); в – gold inclusion in Fe oxyhydroxides after pyrite; г – gold veinlets in quartz, detail of fig. б; д, е – gold in tourmaline-quartz assemblage; ж, з – newly formed gold inclusions in Fe oxyhydroxides; и – gold and fischesserite veinlets in Fe oxyhydroxides к – ED-spectrum of fischesserite.

а–в – reflected light; г–и – SEM images. Native gold in quartz veins and Fe oxyhydroxides (Au-1), in assemblage with tourmaline (Au-2), and newly formed high-fineness gold in Fe oxyhydroxides (Au-3); Fe – iron oxyhydroxides, Fis – fischesserite.

Таблица 3

Элементы-примеси (г/т) в сульфидных минералах кварцевых жил Южно-Сухтелинского участка (данные ЛА-ИСП-МС анализов)

Table 3

Trace elements (ppm) in sulfide minerals from quartz veins of the South Sukhtelya occurrence (LA-ICP-MS data)

Минерал	Mn	Co	Ni	Se	Au	Ag	Cd	In	Sn	Sb
Пирит	0.15 0.02–2.33	3.25 0.53–9.82	2300 684–7950	13.40 11.30–24.70	0.010 0.001–0.100	0.100 0.001–23.100	0.22 0.001–7.900	0.010 0.001–0.230	0.08 0.01–4.40	1.68 0.04–7.23
Халькопирит	0.68 0.05–0.93	0.04 0.001–0.100	0.96 0.26–69.10	5.60 2.50–9.20	0.03 0.01–0.09	48.80 7.44–92.30	3.70 1.89–5.80	4.70 4.04–7.03	58.20 42.60–64.70	4.41 2.00–16.61
Галенит	0.25 0.001–0.580	0.03 0.01–0.05	0.08 0.01–0.22	1423 1300–1546	0.01 0.001–0.040	2248 1905–2377	15.80 7.70–39.90	0.020 0.001–0.030	5.12 1.42–6.73	166.85 132.10–186.90
Сфалерит	9.93 2.55–12.16	10.26 1.69–11.24	0.36 0.04–0.76	8.00 5.30–11.30	0.05 0.02–0.12	4.93 2.16–29.20	1299 1218–1682	17.02 14.43–30.99	0.54 0.31–2.65	2.85 0.44–22.64
Вторичные сульфиды меди	1.04 0.30–3.70	3.25 1.58–39.40	17.00 11.90–144.50	29.5 18.20–51.00	0.58 0.18–5.00	80.7 43.00–507.00	230 80–5190	9.90 5.40–23.70	48.70 23.50–102.00	15.50 8.80–54.70
Оксигидроксиды железа	0.32 0.27–1.40	0.05 0.02–0.18	225.90 59.60–1597.00	5.70 2.89–20.90	7.59 2.25–168.00	11.41 1.24–213.00	9.71 1.77–36.10	1.38 0.01–6.38	0.46 0.27–14.62	22.70 0.54–349.20
	Te	Hg	Pb	Bi	Ga	Ge	Zn	Cr	As	Mo
Пирит	0.49 0.08–13.20	0.62 0.39–2.76	9.80 0.08–11940.00	0.21 0.01–60.50	0.07 0.01–1.52	–	6.60 3.25–2700.00	0.22 0.05–0.35	0.48 0.18–4.81	0.010 0.001–0.110
Халькопирит	0.001 0.001–0.740	16.90 12.20–22.80	6.06 3.00–780.00	0.72 0.46–2.62	2.20 1.16–2.61	–	487 398–901	0.38 0.02–0.84	1.28 0.54–2.50	0.001 0.001–0.03
Галенит	413.50 376.00–443.00	0.85 0.16–2.30	85.9–86.1*	5541 5207–5752	0.020 0.001–0.030	0.100 0.001–0.220	1.41 0.04–40.10	0.22 0.16–0.56	4.35 3.79–4.88	0.01 0.001–0.07
Сфалерит	0.42 0.001–3.200	122.70 99.30–141.40	13.10 5.87–4340	0.69 0.14–24.80	4.49 2.26–27.60	0.86 0.51–1.09	67.5* 66.7–68.5	0.37 0.04–0.98	3.59 2.74–4.21	0.02 0.001–0.05
Вторичные сульфиды меди	0.001 0.001–0.200	12.3 1.80–127.00	7460.0 3608.0–2.5**	0.55 0.14–7.60	3.00 1.00–7.50	–	14190 2660–2.2**	0.37 0.04–0.98	36.00 0.30–178	1.40 0.21–7.10
Оксигидроксиды железа	–	–	1764.50 83.20–1.50**	77.55 0.19–1857.00	0.27 0.02–1.45	–	3715.00 24.70–4920.00	5.34 0.07–113.00	8745 480–15070	24.25 0.72–70.40

Примечание. Числитель – медиана, знаменатель – минимальные и максимальные содержания; * – мас. %; ** – г/т – мас. %.
Note. Nominator – median, denominator – minimum and maximum contents; * – wt. %; ** – ppm – wt. %.

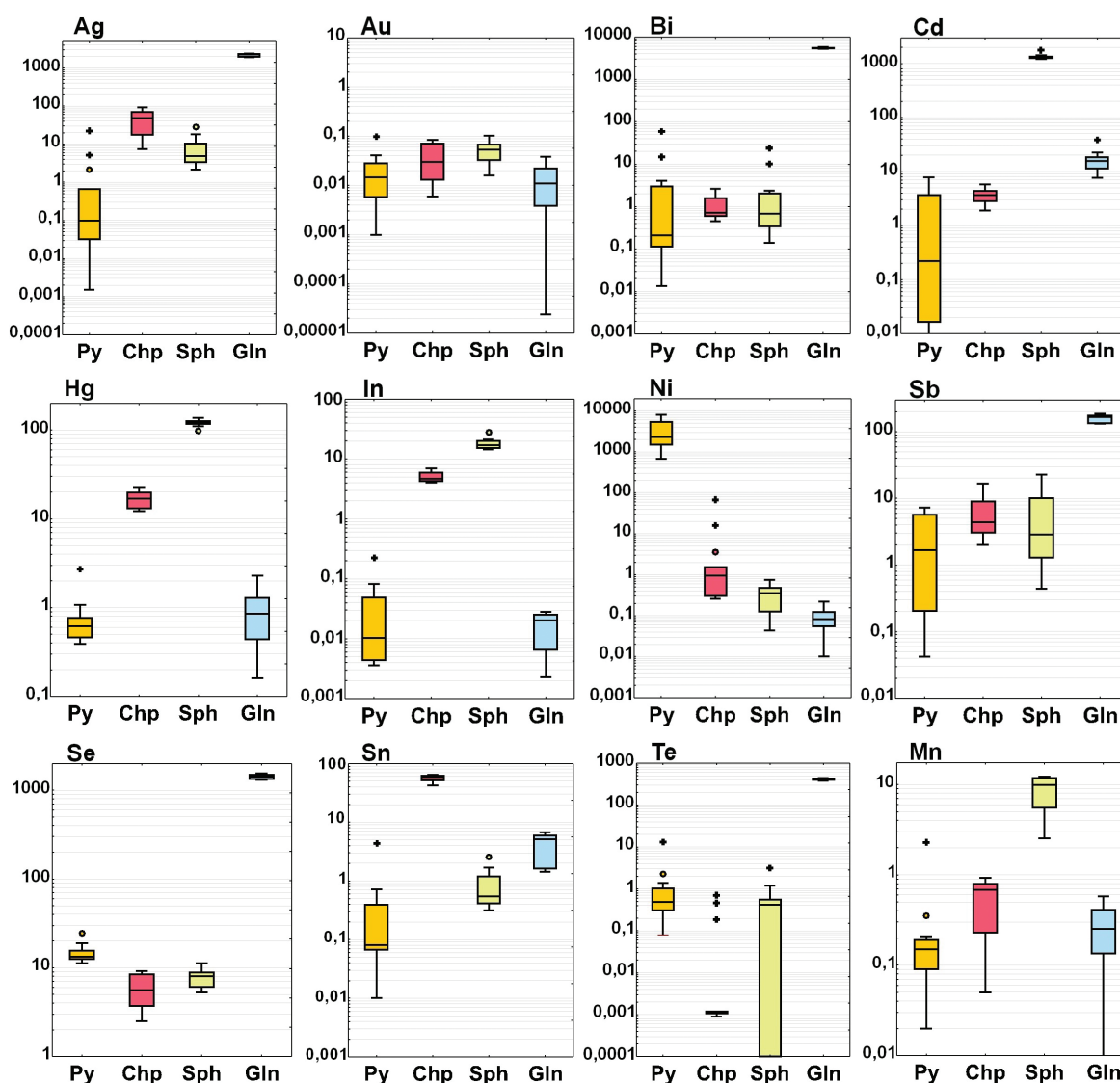


Рис. 4. Распределение элементов-примесей в сульфидах Южно-Сухтелинского участка по результатам ЛА-ИСП-МС анализов.

Окрашенные прямоугольники ограничены по вертикали 25 и 75 % квартилями, горизонтальная линия в прямоугольниках – значения медианы. Вертикальные линии характеризуют минимальные и максимальные значения. Круглые точки за пределами вертикальных линий – аномальные выбросы.

Fig. 4. Distribution of trace elements in sulfides of the South Sukhtelya occurrence according to LA-ICP-MS analyses.

Colored rectangles are vertically limited by 25 and 75 % quartiles, horizontal line in rectangles is median. Vertical lines characterize minimum and maximum values. Round points outside the vertical lines are anomalous values.

псевдоморфно заместивших первичные сульфиды (3 ассоциация). Появление тонких межзерновых прожилков и периферических кайм высокопробного золота на более низкопробном (Петровская, 1973) свидетельствует о его переотложении в результате разложения сульфидов и, возможно, неустойчивых минералов золота. При этом Ag, как более подвижный элемент в зоне гипергенеза, по сравнению с золотом, проявляет тенденцию к рассеиванию (Крейтер и др., 1958).

Температуры образования сульфидов

Учитывая наблюдаемые в аншлифах взаимоотношения минералов и расчетные температуры их образования, первым из сульфидов отлагался пирит, затем халькопирит, сфалерит и галенит. Отложение пирита происходило при снижении температуры флюидов от 420 до 357 °С. Вариации содержаний Se в пирите объясняются действием различных факторов. Среди них – изменение тем-

пературы флюида (Belousov et al., 2016; Keith et al., 2018), однако мнение различных исследователей по этому вопросу противоречиво. Ряд исследователей считает, что содержание Se в пирите с повышением температуры флюида увеличивается (Auclair et al., 1987; Maslennikov et al., 2009; Revan et al., 2014) или уменьшается (Huston et al., 1995; Keith et al., 2018). Также содержание Se в пирите может изменяться в зависимости от pH и редокс-условий, а также зависеть от соотношения Se к S ($\Sigma \text{Se/S}$) в рудоформирующем флюиде (Huston et al., 1995). По-видимому, содержания Se в пирите зависят от комбинации нескольких факторов, но полученные нами температуры вполне реалистичны для гидротермальных процессов.

Температуры отложения сфалерита, рассчитанные по Ga–Ge геотермометру (Frenzel et al., 2016), составляют 280–214 °C, что соответствует средне-низкотемпературному диапазону гидротермального рудообразования и наблюдаемой последовательности формирования минералов.

Ассоциация фишессерита (Ag_3AuSe_2) с высокопробным самородным золотом в виде тонких прожилков в оксигидроксидах железа однозначно свидетельствует о ее гипергенном происхождении. Ранее было показано, что образование такой ассоциации возможно при температурах ниже 100 °C, фугитивности Se $\lg f_{\text{Se}_2}$ от –14 до –24 и низкой фугитивности S (Пальянова и др., 2016).

Геохимические особенности минералов

По результатам статистической обработки результатов ЛА-ИСП-МС анализа можно выделить ассоциации элементов и предположить форму их нахождения в конкретных сульфидных минералах (рис. 5).

В пирите обособляются ассоциации, вероятно связанные с микровключениями галенита или сульфосолей ($\text{Pb} + \text{Bi} + \text{Ag} + \text{Te}$, в меньшей степени, $\text{Sb} + \text{Se}$) и сфалерита ($\text{Hg} + \text{Zn}$) и ($\text{Cd} + \text{Co}$). Золото и Ag характеризуются сильной положительной корреляцией (0.92) (электронное приложение – ЭП), что указывает на присутствие микровключений самородного золота, которые в других первичных сульфидах не наблюдаются (рис. 6). Никель, скорее всего, изоморфно входит в пирит (Мозгова, 1975).

В халькопирите элементы-примеси не образуют значимых корреляционных связей, за исключением $\text{Bi} + \text{Sb}$, что, вероятно, указывает на микровключения Bi и Bi-Sb сульфосолей (Cook, 1997). Высокие содержания Zn (398–901 г/т) и Hg (12.2–22.8 г/т) отражают наличие микровключений сфалерита. Повышенные содержания Sn (42.6–64.7 г/т) могут указывать на более высокие температуры образования халькопирита относительно сфалерита и галенита (George et al., 2016).

В сфалерите отчетливо проявлена ассоциация ($\text{Bi} + \text{Pb}$) + ($\text{Sb} + \text{Ag}$) указывающая на микровключения обогащенного этими элементами галенита.

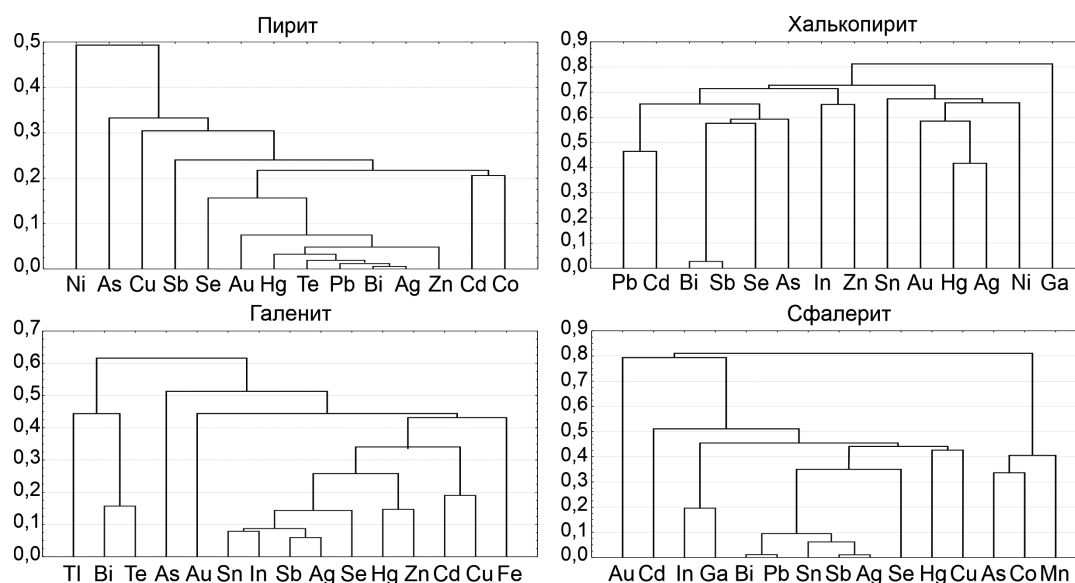


Рис. 5. Иерархическая кластеризация элементов-примесей сульфидов Южно-Сухтелинского участка (объединены методом одиночной связи, расстояние между кластерами 1–r Пирсона).

Fig. 5. Hierarchical clustering of trace elements of sulfides of the South Sukhtelya occurrence (combined by single linkage method, distance between clusters Pearson's 1-r).

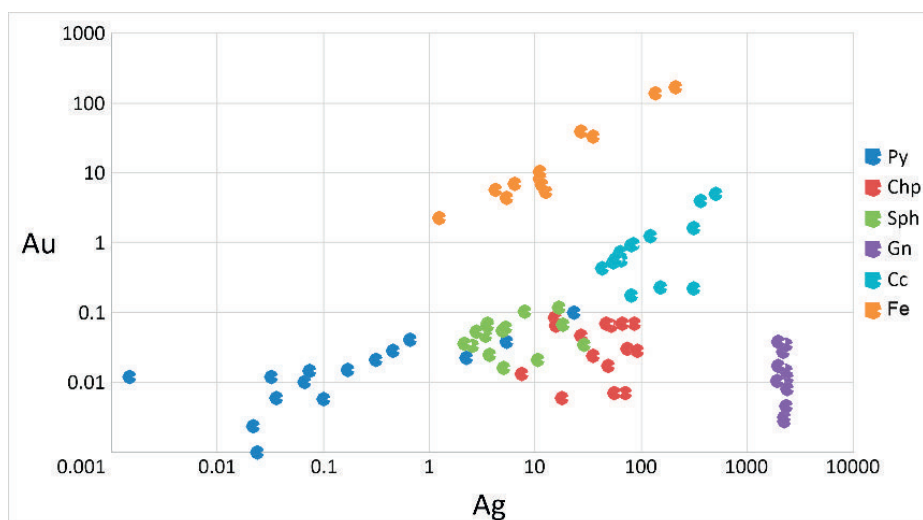


Рис. 6. Зависимость содержаний Au от Ag в сульфидах по данным ЛА-ИСП-МС анализов.

Fig. 6. Correlation between Au and Ag contents of sulfides according to LA-ICP-MS analysis data.

нита либо соответствующих сульфосолей. Повышенные содержания Cd (1218–1682 г/т), Hg (99.3–141.4 г/т), Mn (2.55–12.16 г/т), In (14.43–30.99 г/т) объясняются их изоморфным вхождением в структуру сфалерита (Cook et al., 2009).

Галенит по сравнению с другими сульфидами наиболее обогащен элементами-примесями. Высокие содержания Ag (1905–2377 г/т), Bi (5207–5752 г/т), Sb (132–186 г/т) и сильная корреляция Ag и Sb (0.94, ЭП) могут указывать на их вхождение в структуру галенита по схеме гетеровалентного замещения $\text{Ag}^+ + (\text{Bi}, \text{Sb})^{3+} \leftrightarrow 2\text{Pb}^{2+}$ (Chutas et al., 2008; Renock, Becker 2011; George et al., 2015). Отсутствие корреляции Ag и Sb с Cu, Zn и As косвенно подтверждает изоморфизм, а не присутствие микровключений блеклых руд (Плотинская и др., 2019). Сильная корреляция между Bi и Te (0.84, ЭП) может указывать на микровключения тетрадимита (Плотинская и др., 2019). Высокие содержания Se могут быть обусловлены изоморфным вхождением этого элемента в структуру галенита, что подтверждается существованием непрерывной изоморфной серии галенит-клаусталит (PbSe). Повышенные концентрации Te можно связать с микровключениями алтаита (PbTe) (Liu, Chang, 1994), но нельзя исключить и изоморфного вхождения Te (George et al., 2015). Ассоциация Sn + In вероятно связана с микровключениями халькопирита. Высокие концентрации Cd, и ассоциация Hg и Zn с сильной корреляцией (0.85, ЭП) – сфалерита.

Сильная положительная корреляция между Au и Ag (0.99 для оксигидроксидов железа и 0.82

для вторичных сульфидов меди, ЭП) указывает на то, что самородное золото здесь находится в виде микровключений. Обогащение другими элементами связано с наследованием химического состава первичных сульфидов при окислении. Высокое содержание As (480–15070 г/т) в оксигидроксидах железа, вероятно, вызвано наличием микровключений мышьяковистых минералов либо с сорбционными свойствами оксигидроксидов Fe^{3+} , т. к. в первичных сульфидах концентрации As незначительны. Только вторичные сульфиды меди характеризуются единичными анализами с концентрацией As до 178 г/т.

Источник золота

В качестве источника золота в изученном участке можно рассматривать сами граниты и вмещающие их породы: углеродистые сланцы, вулканогенно-осадочные толщи и ультрамафиты.

Кларк золота в гранитах низкий (2.7 мг/т, Овчинников, 1990), но при отделении флюида при становлении гранитных интрузивов флюид обогащается золотом минимум на два порядка (Коробейников, Черняева, 1987). Вклад магматогенного флюида в формирование золотого оруденения рассматриваемого проявления может косвенно подтверждаться присутствием в жилах турмалина, хотя наличие бора вполне вероятно и в углеродистых осадочных толщах (например, Пантелеева и др., 2023).

При внедрении гранитов прогрев вмещающих пород с мобилизацией поровых растворов и

их смешение с магматогенными флюидами может привести к экстракции золота из вмещающих пород. Обогащение галенита селеном может указывать на вовлечение в гидротермальный процесс селена из углеродистых сланцев, обогащенных этим элементом (Юдович, Кетрис, 1988). При гипергенезе селен из окисленного галенита вошел в состав новообразованного фишессерита. На вклад серпентинитов в гидротермальные флюиды косвенно указывают повышенные концентрации Ni в пирите.

Считается, что на начальных стадиях метаморфизма золото, связанное с органическим веществом и син- и диагенетическим пиритом, содержащимся в углеродистых толщах, может высвобождаться и отлагаться в самородном виде (Коробейников, 1985; Сазонов и др., 2011; Snachev, Rassomakhin, 2024). Однако кларки золота во вмещающих породах, которые наблюдаются на изученном участке, на три и более порядков ниже, чем в описанных рудах и составляют 10 мг/т в углеродистых сланцах (Ketris M.P., Yudovich Ya.E., 2009), 5–11 мг/т в ультрамафитах (Boyle, 1979) и 15 мг/т в вулканических породах (Moss, Scott, 2001). Таким образом, для извлечения количества золота, необходимого для формирования месторождения, требуется гидротермальная переработка очень значительного объема пород при достаточном количестве флюида.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коренные руды Южно-Сухтелинского участка на Южном Урале представлены существенно кварцевыми жилами, отвечают золото-сульфидно-турмалин-кварцевому минеральному типу и парагенетически связаны с гранитной интрузией. В коренном залегании в кварцевых жилах установлено самородное золото двух генераций, отличающихся размером, морфологией, сульфидной ассоциацией и пробностью. Первая генерация умеренно высокопробного самородного золота характеризуется крупными размерами, прожилковидной морфологией и ассоциирует с агрегатами сульфидов и турмалина, неравномерно распределенными в объеме кварцевых жил. Вторая генерация весьма высокопробного самородного золота формирует тончайшие включения и прожилки в оксигидроксидах Fe и вторичных сульфидах меди, псевдоморфно заместивших первичные сульфиды под воздействием экзогенных факторов. По данным онтогенетических наблюдений и применения минеральных термоме-

тров, основанных на содержании Se в пирите и Ga, Ge в сфалерите, продуктивная минеральная ассоциация жил образовалась в температурном интервале 420–226 °С.

ЛИТЕРАТУРА

- Бабкин В.В., Шалагинов Э.В., Малолетко И.Г. и др. (1971) Отчет о результатах геолого-съёмочных работ на площади планшето № 40-84-Б; № 41-61-В, № 73-А, проведенных Сухтелинским геолого-съёмочным отрядом в Верхне-Уральском и Уйском р-нах Челябинской обл. в 1966–71 гг. м-б 1:50 000. Челябинск, УГУ, 467 с.
- Коробейников А.Ф. (1985) Особенности распределения золота в породах черносланцевых формаций. *Геохимия*, 12, 1747–1757.
- Коробейников А.Ф., Черняева Е.И. (1987) Поведение золота при формировании зональных дайковых тел габбро-диабазов. *Доклады АН СССР*, 292(3), 680–684.
- Крейтер В.М., Аристов В.В., Волынский И.С. (1958) Поведение золота в зоне окисления золото-сульфидных месторождений. М., Госгеотехиздат, 268 с.
- Мозгова Н.Н. (1975) Об изоморфизме в сульфидах и их аналогах / Изоморфизм минералов. М., Наука, 86–113.
- Мосейчук В.М., Яркова А.В., Михайлов И.Г., Кашина Л.В., Сурин Т.Н., Плохих Н.А., Цин Д.Ф. (2017) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Южно-Уральская. Лист N-40-XXIV. Объяснительная записка. М., ВСЕГЕИ, 127 с.
- Овчинников Л.Н. (1990). Прикладная геохимия. М., Недра, 1990, 246 с.
- Пантелеева А.В., Сначёв А.В., Панкратьев П.В., Тюрин А.М., Рассомахин М.А., Пантелеев В.С., Кисиль Р.С. (2023) Черные сланцы Кумакского рудного поля (геология, петрохимия, рудоносность). Оренбург, ООО «Типография «Агентство Пресса», 112 с. https://doi.org/10.31084/978-5-6051011-2-3_Kumak_2023
- Пальянова Г.А., Савва Н.Е., Журавкова Т.В. Колосова Е.Е. (2016) Минералы золота и серебра в пиритах малосульфидных руд месторождения Джульетта (северо-восток России). *Геология и геофизика*, 57(8), 1488–1510. <https://doi.org/10.15372/GiG20160805>
- Петров В.И., Шалагинов А.Э., Пунегов Б.Н., Горлова Л.И., Забелкина Л.Г., Григорова Т.Б., Нокольский В.Ю., Шалагинова Т.И., Петрова А.С., Середа В.В. (2003) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Южноуральская. Лист N-41-VII (Миасс). Объяснительная записка. М., ВСЕГЕИ, 167 с.
- Петровская Н.В. (1973) Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). М., Наука, 349 с.

- Плотинская О.Ю., Чугаев А.В., Бондарь Д.Б., Абрамова В.Д. (2019) Минералого-геохимические особенности руд Кедровско-Ирокиндинского рудного поля (Северное Забайкалье). *Геология и геофизика*, 60(10), 1407–1432. <https://doi.org/10.15372/GiG2019064>
- Пужаков Б.А., Шох В.Д., Шулькина Н.Е. и др. (2018) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-41-XIII (Пласт). Объяснительная записка. М., ВСЕГЕИ, 205 с.
- Пучков В.Н. (2000) Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа, ГИЛЕМ, 146 с.
- Пучков В.Н. (2010) Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа, ДизайнПолиграфСервис, 280 с.
- Сазонов В.Н., Коротеев В.А., Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Великанов А.Я. (2011) Золото в «черных сланцах» Урала. *Литосфера*, (4), 70–92.
- Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А. (2001) Месторождения золота Урала. Екатеринбург, УГГА, 622 с.
- Сначев А.В., Пучков В.Н., Савельев Д.Е., Сначев В.И. (2006) Геология Арамилско-Сухтелинской зоны Урала. Уфа, ДизайнПолиграфСервис, 176 с.
- Тевелев А.В., Артюшкова О.В., Борисенко В.И. (1998) Новые данные о возрасте и структуре палеозойских комплексов Сухтелинской зоны на восточном склоне Южного Урала. *Бюллетень Московского общества испытателей природы*, 73(5), 63–65.
- Тевелев А.В., Кошелева И.А., Бурштейн Е.Ф. и др. (2018) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-41-XIX (Варна). Объяснительная записка. М., Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 236 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (1988) Геохимия черных сланцев. Л., Наука, 272 с.
- Auclair G., Fouquet Y., Bohn M. (1987) Distribution of selenium in high-temperature 651 hydrothermal sulfide deposits at 13°N, East Pacific Rise. *The Canadian Mineralogist*, 25, 577–588.
- Belousov I., Large R.R., Meffre S., Danyushevsky L.V., Steadman J., Beardmore T. (2016) Pyrite compositions from VHMS and orogenic Au deposits in the Yilgarn Craton, Western Australia: Implications for gold and copper exploration. *Ore Geology Reviews*, 79, 474–499. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.04.020>
- Boyle R.W. (1979) The geochemistry of gold and its deposits. Geological Survey of Canada Bulletin, 280, 584 p
- Chutas N.I., Kress V.C., Ghiorso M.S., Sack R.O. (2008) A solution model for high-temperature PbS-AgSbS₂-AgBiS₂ galena. *American Mineralogist*, 93, 1630–1640. <https://doi.org/10.2138/am.2008.2695>
- Cook N. (1997) Bismuth and bismuth – antimony sulphosalts from neogene vein mineralisation, Baia Borşa Area, Maramureş, Romania. *Mineralogical Magazine*, 61, 387–409. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.406.06>
- Cook N., Ciobanu C., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., Saini-Eidukat B., Melcher F. (2009) Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICPMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(16), 4761–4791. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.045>
- Frenzel M., Hirsch T., Gutzmer J. (2016) Gallium, germanium, indium, and other minor and trace elements in sphalerite as a function of deposit type – A meta-analysis. *Ore Geology Reviews*, 76, 52–78. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.12.017>
- George L., Cook N., Ciobanu C. (2016) Partitioning of trace elements in co-crystallized sphalerite–galena–chalcopyrite hydrothermal ores. *Ore Geology Reviews*, 77, 97–116. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.02.009>
- George L., Cook N., Ciobanu C., Wade B. (2015) Trace and minor elements in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study. *American Mineralogist*, 100, 548–569. <https://doi.org/10.2138/am-2015-4862>
- Huston D.L., Sie S.H., Suter G.F., Cooke D.R., Both R.A. (1995) Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits; Part I: Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and Part II, Selenium levels in pyrite; comparison with delta 34 S values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems. *Economic Geology*, 90(5), 1167–1196. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.5.1167>
- Keith M., Smith D., Jenkin G., Holwell D., Dye M. (2018) A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: Insights into ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*, 96, 269–282. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.07.023>
- Ketris M.P., Yudovich Ya.E. (2009) Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 78(2), 135–148. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.01.002>
- Liu H., Chang L.L.Y. (1994) Phase relations in the system PbS–PbSe–PbTe. *Mineralogical Magazine*, 58(393), 567–578. doi:10.1180/minmag.1994.058.393.04
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V., (2009) Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic-hosted massive sulfide deposit (Southern Urals, Russia) using Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS). *Economic Geology*, 104(8), 1111–1141. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.8.1111>
- Moss R., Scott S.D. (2001). Gold content of Eastern Manus basin volcanic rocks: implications for enrichment in associated hydrothermal precipitates. *Economic Geology*, 96, 91–107. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.1.91>
- Renock D., Becker U. (2011) A first principles study of coupled substitution in galena. *Ore Geology Reviews*, 42, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.04.001>

Revan M.K., Genc Y., Maslennikov, V.V., Maslennikova, S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V. (2014) Mineralogy and trace-element geochemistry of sulfide minerals in hydrothermal chimneys from the Upper-Cretaceous VMS deposits of the Eastern Pontide orogenic belt (NE Turkey). *Ore Geology Reviews*, 63, 129–149. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.006>

Snachev A.V., Rassomakhin M.A. (2024) Gold and platinum group element occurrence related to black shale formations in the Southern Urals (Russian Federation): a review. *Minerals*, 14, 1283. <https://doi.org/10.3390/min14121283>

REFERENCES

Auclair G., Fouquet Y., Bohn M. (1987) Distribution of selenium in high-temperature 651 hydrothermal sulfide deposits at 13°N, East Pacific Rise. *The Canadian Mineralogist*, 25, 577–588.

Babkin V.V., Shalaginov E.V., Maloletko I.G. et al. (1971) Report on results of geologic survey on a scale of 1 : 50 000 within sheets nos. 40-84-B, 41-61-B, and -73-A carried out by the Sukhtelya geological survey team in the Verkhneural'sk and Uy districts of the Chelyabinsk region in 1966–1971. Chelyabinsk, UGU, 467 p. (in Russian)

Belousov I., Large R.R., Meffre S., Danyushevsky L.V., Steadman J., Beardmore T. (2016) Pyrite compositions from VHMS and orogenic Au deposits in the Yilgarn Craton, Western Australia: Implications for gold and copper exploration. *Ore Geology Reviews*, 79, 474–499. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.04.020>

Boyle R.W. (1979) The geochemistry of gold and its deposits. Geological Survey of Canada Bulletin, 280, 584 p

Chutas N.I., Kress V.C., Ghiorso M.S., Sack R.O. (2008) A solution model for high-temperature PbS-AgSbS₂-AgBiS₂ galena. *American Mineralogist*, 93, 1630–1640. <https://doi.org/10.2138/am.2008.2695>

Cook N. (1997) Bismuth and bismuth – antimony sulphosalts from neogene vein mineralisation, Baia Borșa Area, Maramureș, Romania. *Mineralogical Magazine*, 61, 387–409. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.406.06>

Cook N., Ciobanu C., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., Saini-Eidukat B., Melcher F. (2009) Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICPMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(16), 4761–4791. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.045>

Frenzel M., Hirsch T., Gutzmer J. (2016) Gallium, germanium, indium, and other minor and trace elements in sphalerite as a function of deposit type – A meta-analysis. *Ore Geology Reviews*, 76, 52–78. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.12.017>

George L., Cook N., Ciobanu C. (2016) Partitioning of trace elements in co-crystallized sphalerite–galena–chalcopyrite hydrothermal ores. *Ore Geology Reviews*, 77, 97–116. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.02.009>

George L., Cook N., Ciobanu C., Wade B. (2015) Trace and minor elements in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study. *American Mineralogist*, 100, 548–569. <https://doi.org/10.2138/am-2015-4862>

Huston D.L., Sie S.H., Suter G.F., Cooke D.R. Both R.A. (1995) Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits; Part I: Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and Part II, Selenium levels in pyrite; comparison with delta 34 S values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems. *Economic Geology*, 90(5), 1167–1196 <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.5.1167>

Keith M., Smith D., Jenkin G., Holwell D., Dye M. (2018) A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: Insights into ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*, 96, 269–282. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.07.023>

Ketris M.P., Yudovich Ya.E. (2009) Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 78(2), 135–148. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.01.002>

Korobeinikov A.F. (1985) Features of gold distribution in rocks of black shale formations. *Geokhimiya (Geochemistry)*, 12, 1747–1757 (in Russian)

Korobeinikov A.F., Chernyaeva E.I. (1987) Behavior of gold during the formation of zonal gabbrodiabase dike bodies. *Doklady AN SSSR (Doklady of the Academy of Sciences of the USSR)*, 1987, 292(3), 680–684 (in Russian).

Kreyter V.M., Aristov V.V., Volynsky I.S. (1958) Behavior of gold in oxidation zone of gold-sulfide deposits. Moscow, Gosgeoltekhizdat, 268 p. (in Russian)

Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V., (2009) Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic-hosted massive sulfide deposit (Southern Urals, Russia) using Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS). *Economic Geology*, 104(8), 1111–1141. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.8.1111>

Moseychuk V.M., Yarkova A.V., Mikhailov I.G., Kashina L.V., Surin T.N., Plokhikh N.A., Tsin D.F. (2017) State geologic map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. South Urals series. Sheet N-40-XXIV. Explanatory note. Moscow, VSEGEI, 127 p. (in Russian)

Moss R., Scott S.D. (2001). Gold content of Eastern Manus basin volcanic rocks: implications for enrichment in associated hydrothermal precipitates. *Economic Geology*, 96, 91–107. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.1.91>

Mozgova N.N. (1975) About isomorphism in sulfides and their analogs. In: *Isomorphism of minerals (Izomorfizm mineralov)*. Moscow, Nauka, 86–113 (in Russian)

Ovchinnikov L.N. (1990). Applied geochemistry. Moscow, Nedra, 1990. 246 p. (in Russian)

Panteleeva A.V., Snachev A.V., Pankratiev P.V., Tyurin A.M., Rassomakhin M.A., Panteleev V.S., Ki-

sil R.S. (2023) *Black shales of the Kumak ore field (geology, petrochemistry, ore bearing capacity)*. Orenburg, OOO "Tipografiya "Agentstvo Pressa", 112 p. (In Russian).

Palyanova G.A., Savva, N.E., Zhuravkova T.V., Kolova E.E. (2016) Gold and silver minerals in low-sulfidation ores of the Julietta deposit (northeastern Russia). *Russian Geology and Geophysics*, 57(8), 1171–1190. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.08.005>

Petrov V.I., Shalaginov A.E., Punegov B.N., Gorlova L.I., Zabelkina L.G., Grigorova T.B., Nokolsky V.Yu., Shalaginova T.I., Petrova A.S., Sereda V.V. (2003) State geological map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. Second edition. South Urals series. Sheet N-41-VII (Miass). Explanatory note. Moscow, VSEGEI, 167 p. (in Russian)

Petrovskaya N.V. (1973) *Native gold: general characteristic, typomorphism, problems of genesis*. Moscow, Nauka, 349 p. (in Russian)

Plotinskaya O.Y., Chugaev A.V., Bondar D.B., Abramova V.D. (2019) Mineralogy and geochemistry of ores of the Kedrovskoe-Irokinda ore field (Northern Transbaikalia). *Russian Geology and Geophysics*, 60(10), 1119–1140. <https://doi.org/10.15372/RGG2019064>

Puchkov V.N. (2000) *Palaeogeodynamics of the South and Central Urals*. Ufa. Gilem, 146 p. (in Russian)

Puchkov V.N. (2010) Geology of the Urals and Cis-Urals (topical problems of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny). Ufa, DizainPoligrafService, 280 p. (in Russian)

Puzhakov B.A., Shokh V.D., Shchul'kina N.E. et al. (2018) State geological map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. Second edition. The South Urals series. Sheet N-41-XIII (Layer). Explanatory note. Moscow, VSEGEI, 205 p. (in Russian)

Renock D., Becker U. (2011) A first principles study of coupled substitution in galena. *Ore Geology Reviews*, 42, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.04.001>

Revan M.K., Genc Y., Maslennikov, V.V., Maslennikova, S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V. (2014) Mineralogy and trace-element geochemistry of sulfide minerals in hydrothermal chimneys from the Upper-Cretaceous VMS deposits of the Eastern Pontide orogenic belt (NE Turkey). *Ore Geology Reviews*, 63, 129–149. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.006>

Sazonov V.N., Koroteev V.A., Ogorodnikov V.N., Polenov Y.A., Velikanov A.Ya. (2011) Gold in «black shales» of the Urals. *Litosfera (Lithosphere)*, (4), 70–92 (in Russian)

Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Polenov Y.A. (2001) Gold deposits of the Urals. Yekaterinburg, UGGA, 622 p. (in Russian)

Snachev A.V., Puchkov V.N., Savelyev D.E., Snachev V.I. (2006) *Geology of the Aramil-Sukhtelya zone of the Urals*. Ufa, DizainPoligrafService, 176 p. (in Russian)

Snachev A.V., Rassomakhin M.A. (2024) Gold and platinum group element occurrence related to black shale formations in the Southern Urals (Russian Federation): a review. *Minerals*, 14, 1283. <https://doi.org/10.3390/min14121283>

Tevelev A.V., Artyushkova O.V., Borisenok V.I. (1998) New data on the age and structure of the Paleozoic complexes of the Sukhtelya zone in the eastern slope of the South Urals. *Byulleten Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody (Bulletin of Moscow Society of Naturalists)*, 73(5), 63–65. (in Russian)

Tevelev A.V., Kosheleva I.A., Burshtein E.F. et al. (2018) State geological map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. Second edition. South Urals series. Sheet N-41-XIX (Varna). Explanatory note. Moscow, VSEGEI, 236 p. (in Russian)

Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (1988) *Geochemistry of black shales*. Leningrad, Nauka, 272 p. (in Russian)

Информация об авторах

Брюхов Симеон Игоревич – инженер-исследователь, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; simeon.bryukhov@mineralogy.ru

Артемьев Дмитрий Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; artemyev@mineralogy.ru

Блинов Иван Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; ivan_a_blinov@mail.ru

Аюпова Нурия Радитовна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; ayupova@mineralogy.ru

Целуйко Александр Сергеевич – младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; tseluyko@mineralogy.ru

Information about the authors

Simeon I. Bryukhov – Engineer, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia; simeon.bryukhov@mineralogy.ru

Dmitriy A. Artem'yev – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia; artemyev@mineralogy.ru

Ivan A. Blinov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology, Urals Branch, Russian Academy of Sciences, ivan_a_blinov@mail.ru

Nuria R. Ayupova – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia; aupova@mineralogy.ru

Aleksandr S. Tseluyko – Junior Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia; tseluyko@mineralogy.ru

МИНЕРАЛОГИЯ

Том 11 № 2 2025

ISSN 2313-545X (print)

ISSN 2782-2044 (online)

ISSN 2313-545X



Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере
связи информационных технологий и массовых коммуникаций
ПИ № ФС77-78696 от 30 июля 2020 г.

Технический редактор:

И.Ю. Мелекесцева

Оригинал-макет:

О.Л. Бусловская

Корректор:

И.А. Спирина

Подписано в печать 30.06.2025. Дата выхода в свет: 03.06.2025
Формат 60 × 80¹/₈. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11.1. Уч.-изд. л. 11.6. Тираж 200 экз. Заказ №
ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН: 456317, г. Миасс Челябинской обл., Ильменский заповедник
Отпечатано с оригинал-макета заказчика в ООО «ПРИНТ»
426035, г. Ижевск, ул. Тимирязева, 5.
Возрастное ограничение 16+. Распространяется бесплатно.

MINERALOGY

2025. Vol. 11. No. 2

ISSN 2313-545X (print)

ISSN 2782-2044 (online)



Founder: Federal State Budgetary Institution South Urals Federal Research Center
of Mineralogy and Geoecology, Urals Branch, Russian Academy of Sciences

Registration certificate PI no. FS77-78696 from July 30, 2020
Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation

Technical editor:

Irina Melekestseva

Layout:

Olga Buslovskaya

Corrector:

Irina Spirina

Signed in print 26.03.2025.

Format 60 × 80%. Offset printing. Printed sheets 4.7. Circulation of 200. Order no.
SU FRC MiG UB RAS: territory of the Ilmeny State Reserve, Miass, Chelyabinsk district, 456137 Russia

Printed from a layout in Printing in OOO «Print»
Timiryazeva Str., 5, Izhevsk Sity, 426035 Russia
Free of charge
