



<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-12-1-0>

УДК 549.371

Сульфостаннаты в рудах текущей добычи Правоурмийского Cu-Sn месторождения (Дальний Восток России)

М.В. Заботина¹, Е.В. Белогуб¹, К.А. Новоселов¹, Е.А. Аширбаева^{2,1},
К.Н. Евстихеев², М.А. Рассомахин¹, И.А. Блинов¹

¹Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; mary_7-88@mail.ru

²ПАО «Русолово» (ООО «Правоурмийский»), ул. Ленина 26А, пос. Горный,
Хабаровский край, 682707 Россия

Статья поступила в редакцию 00.00.2025 г., после доработки 00.00.2026 г., принята к печати 00.00.2026 г

Аннотация. В работе отражено влияние сульфостаннатов Cu и Fe на обогащение руд текущей добычи Правоурмийского месторождения (Дальний Восток России). В результате изучения образцов руды из штолен разных горизонтов и технологических продуктов выявлено увеличение доли сульфостаннатов Cu и Fe от верхнего горизонта 1600 м к более глубоким горизонтам 1580, 1569 и 1560 м. Глубже такая вертикальная зональность не выдерживается. Преобладающие моусонит и станнин на глубоких горизонтах сменяются станноидитом. Сульфостаннаты Cu и Fe тесно ассоциируют с касситеритом, сульфидами Cu и сульфоарсенидами, образуют сложные сростки и взаимные включения. Размеры их зерен колеблются преимущественно в пределах от 10 мкм до 1 мм. Для разделения сульфостаннатов Cu и Fe, сульфидов и касситерита применяется сложная технологическая схема обогащения руды: от предварительной рентген-радиометрической сепарации (PPC) к гравитационным и флотационным концентратам с получением хвостов. Сульфостаннаты Cu и Fe концентрируются в тонких фракциях уже на начальном этапе PPC. Дальнейшее разделение путем применения гравитационных и флотационных методов приводит к концентрированию сульфостаннатов Cu и Fe в тонких фракциях совместно с сульфидами Cu, арсенопиритом и леллингитом. Поскольку сульфостаннаты Cu и Fe находятся во включениях в касситерите, они также попадают в «касситеритовый» концентрат. При пирометаллургическом воздействии на черновые гравиконцентраты включения сульфостаннатов Cu и Fe в касситерите сохраняются. При флотации хвостов сульфостаннаты Cu и Fe концентрируются в медном сульфидном концентрате. Сохраняется проблема недоизвлечения Sn из руд горизонтов 1600, 1580, 1569 и 1560 м, связанная с увеличением доли сульфостаннатов Cu и Fe, их тесной ассоциацией с сульфоарсенидами, сульфидами и мелкими естественными размерами их зерен.

Ключевые слова: моусонит, станнин, станноидит, Правоурмийское месторождение, Дальний Восток России, технологические продукты, концентраты, хвосты.

Финансирование. Работа частично финансирована государственной бюджетной темой № 122 031600292-6.

Благодарности. Авторы благодарны руководству и специалистам ООО «Правоурмийское» за возможность изучения каменного материала и технологических продуктов.

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

Вклад авторов. М.В. Заботина, Е.В. Белогуб, К.А. Новоселов – разработка концепции, исследование, написание рукописи; Е.А. Аширбаева, К.Н. Евстихеев – предоставление каменного материала и технологических продуктов, редактирование описания технологической цепочки получения промпродуктов; М.А. Рассомахин, И.А. Блинов – аналитические работы. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

¹Текущее место работы ООО «Белое Золото»

Для цитирования: Заботина М.В., Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Аширбаева Е.А., Евстихеев К.Н., Рассомахин М.А., Блинов И.А. Сульфостаннаты в рудах текущей добычи Правурмийского Cu-Sn месторождения (Дальний Восток России). *Минералогия*, 2026, 12(1), 0–00. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-12-1-0>

Sulfostannates in exploited ores of the Pravy Urmiy Cu-Sn deposit (Far East Russia)

M.V. Zabolina¹, E.V. Belogub¹, K.A. Novoselov¹, E.A. Ashirbaeva^{1,2}, K.N. Evstikheev²,
M.A. Rassomakhin¹, I.A. Blinov¹

¹South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia; mary_7-88@mail.ru

²PJSC Rusolovo (JSC Pravourmiysky), ul. Lenina 26A, settlement of Gorny, Khabarovsk krai, 682707 Russia

Received 00.00.2025, revised 00.00.2025 accepted 00.00.2026

Abstract. The work describes the influence of Cu and Fe sulfostannates on ore processing at the Pravy Urmiy deposit (Far East Russia). An increase in the amount of Cu and Fe sulfostannates from the upper horizon of 1600 m to deeper horizons of 1580, 1569 and 1560 is revealed as a result of study of ores from adits of different horizons and ore technological products. No zonation is typical of the deeper horizons. Mawsonite and stannite, which are dominant at deep horizons, are replaced by stannoidite. The Cu and Fe sulfostannates are associated with cassiterite, Cu sulfides and sulfoarsenides forming complex intergrowths and inclusion in each other. The size of Cu and Fe sulfostannates grains and aggregates varies from 10 µm to 1 mm. The Cu and Fe sulfostannates, Cu sulfides and cassiterite are separated using a complex ore processing scheme: from preliminary X-ray radiometric separation (XRS) to gravity and flotation concentrates and tails. The Cu and Fe sulfostannates are found in fine fractions already at the first RRS stage. Further separation using gravity and flotation methods leads to the concentration of Cu and Fe sulfostannates in fine fractions together with Cu sulfides, arsenopyrite and löllingite. Because Cu and Fe sulfostannates form inclusions in cassiterite, they also found in its concentrate. The inclusions of Cu and Fe sulfostannates in cassiterite are preserved after pyrometallurgical treatment of gravity concentrates. During flotation of technological tails, the Cu and Fe sulfostannates remain in Cu sulfide concentrate. There is a problem of Sn under-extraction from ores of horizons of 1600, 1580, 1569 and 1560 m, which is relate to the increase in amount of Cu and Fe sulfostannates, their close assemblage with sulfoarsenides and sulfides and small natural sizes of their grains.

Keywords: mawsonite, stannite, stannoidite, Pravy Urmiy deposit, Far East of Russia, technological products, concentrates, technological tails.

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. We are grateful to the management and specialists of JSC Pravourmiysky for the possibility of study ores and technological products.

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

Author contribution. M.V. Zabolina, E.V. Belogub, K.A. Novoselov – concept development, research, manuscript writing; E.A. Ashirbaeva, K.N. Evstikheev – provision of stone material and technological products, editing the description of the technological chain for obtaining industrial products; M.A. Rassomakhin, I.A. Blinov – analytical works. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Zabolina M.V., Belogub E.V., Novoselov K.A., Ashirbaeva E.A., Evstikheev K.N., Rassomakhin M.A., Blinov I.A. Sulfostannates in exploited ores of the Pravy Urmiy Cu-Sn deposit (Far East Russia). *Mineralogy*, 2026, 12(1), 0–00. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-12-1-0>

¹ Current position at the JSC Beloe Zoloto.

ВВЕДЕНИЕ

Технологические свойства руд оловянных месторождений зависят от их минерального состава, размера зерен рудообразующих минералов или их агрегатных скоплений, текстурно-структурных особенностей, а также от содержания и минеральной формы Sn в руде (Методические ..., 2007, Изойтко, 1989). Минералогический анализ руд и продуктов их переработки необходим для совершенствования и оптимизации схем обогащения, что особенно важно для комплексных объектов, к которым относятся многие оловянные месторождения. Олово образует промышленные концентрации в оксидной (касситерит) и сульфидной (сульфостаннаты) формах. Сульфостаннаты объединяют в себя обширный спектр минералов, включая группу станнина с общей формулой A_2DEX_4 ($A = Cu, Ag, Zn$; $D = Fe, Cu, Zn, Cd, Hg, Ag$; $E = As, Ge, In, Sb, Sn, Ga$; $X = S, Se$), а также другие соединения, в которых Sn химически связан с S. В основе структуры минералов группы станнина лежит сфалеритоподобная ячейка, в которой атомы различных металлов упорядочены по позициям Zn в структуре сфалерита (Чвилева и др., 1988). Группа станнина включает в себя станнин Cu_2FeSnS_4 , кестерит $Cu_2(Zn,Fe)SnS_4$, курамит Cu_3SnS_4 , окартит Ag_2FeSnS_4 , пиркитасит Ag_2ZnSnS_4 , станноидит $Cu_8(Fe,Zn)_3Sn_2S_{12}$, моусонит $Cu_6Fe_2SnS_8$ и др. Присутствие сульфостаннатов Cu и Fe в рудах в целом ухудшает их качество, т. к. приводит к «заражению» касситеритовых концентратов «вредными» компонентами (S, Fe, Cu). Сульфостаннаты Cu и Fe встречаются на месторождениях различных формационных типов, включая колчеданные, эпитермальные, золото-сульфидные орогенные и связанные с гранитоидами месторождения грейзеновой формации (табл. 1). Наиболее широко они распространены на объектах грейзеновой формации, но здесь они не являются основной формой Sn.

Правоурмийское месторождение на Дальнем Востоке России – одно из перспективных месторождений Sn, W и Cu, а также попутных In, Bi, Ag, Sb. Ввиду комплексности руд месторождения – тесной ассоциации касситерита с сульфостаннатами Cu и Fe, сульфоарсенидами и жильными минералами и изменением их соотношения в объеме месторождения по мере вовлечения в эксплуатацию руд с более глубоких горизонтов (1580, 1569 и 1560 м) – их разделение сталкивается со сложностями. Целью данной работы является детальная характе-

ристика сульфостаннатов Cu и Fe в рудах текущей добычи и выявление их влияния на обогащение руд Правоурмийского месторождения.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Правоурмийское месторождение находится в Верхнебуреинском районе Хабаровского края, в 117 км от ж/д станции Сулук (БАМ) (рис. 1а). Оно было открыто в результате поисковых работ 1974–1977 гг., а его разработка ведется с 1990 г. С 2011 г. недропользователем месторождения является ООО «Правоурмийское». Месторождение расположено в восточном экзоконтакте Верхнеурмийского массива биотитовых гранитов и приурочено к центральной части крупной Урмийской кальдеры, заполненной покровными и экструзивными породами кислого состава. Месторождение контролируется субширотной рудоносной структурой, которая трассируется на поверхности дайкой гранит-порфиров (Семеняк, 1983, 1987; Гоневчук и др., 2000; Митрофанов, Руднев, 2014).

Рудное поле при ширине 1.0–1.5 км протягивается в субширотном направлении на 6 км, его продолжение намечается к востоку-северо-востоку еще на 3–4 км. Оно сложено породами позднемелового баджальского вулканоплутонического комплекса, включающего вулканы, субинтрузивные (экструзивные) и интрузивные образования (Семеняк и др., 1997, 2014; Огнянов, 1986) (рис. 1б). Вулканы представлены, в основном, игнимбритами, туфами риолитов и, меньше, туфами риодацитов и дацитов (рис. 2). Большую часть рудного поля занимают экструзивные фации риолитов, которые выполняют центральную часть кальдерообразной структуры. Рудоконтролирующая дайка гранит-порфиров имеет протяженность более 9 км и мощность от 40–50 до 250–300 м. В лежачем боку дайки локализована зона трещиноватости разлома Контактный, а в висячем – Правоурмийская рудовмещающая зона смятия (рис. 3) (Семеняк и др., 1997).

Верхнеурмийский гранитный массив представляет собой крупный (350 км²) выход батолита, распространенного под всем баджальским вулканогенным комплексом (Лишневицкий, Гершаник, 1992; Алексеев, 1987; Ханчук и др., 2006; Семеняк и др., 2006;). В его формировании выделяется, по мнению разных авторов, три (Болотников и др., 1975; Гоневчук, 2002) или четыре (Брусницын и др., 1993) фазы. Первая фаза развита в краевых ча-

Таблица 1. Распространенность сульфостаннатов Cu и Fe в месторождениях различных формационных типов
 Table 1. Occurrence of Cu and Fe sulfostannates in deposits of various types

Формация	Месторождения	Сульфостаннаты Cu и Fe	Ассоциация	Ссылка
Колчеданная	Гайское, Молодежное, Учалинское, Подольское, Карабашское (Южный Урал), Сафьяновское (Средний Урал)	Моусонит, станноидит	Vn, Cc, Tn, Ccp, Py	Пшеничный, 1975; Прокин и др., 1988; Колотов, Гмыра, 1990; Зайков, Херрингтон, 1998; Молошаг и др., 2005; Масленников и др., 2014
	им. III Интернационала, Дегтярское (Средний Урал)	Моусонит, станноидит	Vn, Cc, Tn	Зайков, Херрингтон, 1998; Antony et al., 1990; Barriga, Cravalho, 1997
	Белоусовское (Рудный Алтай)	Моусонит	Vn, Vn, Tn, Ccp, Py	
	Маунт-Лайелл (Тасмания)			
	Нью-Брансуик (Канада)			
	Невеш-Корво, Азналкольяр, Согисель (Иберийский пояс)			
	Провинция Куроко (Япония)			
	Поле Рейнбоу (САХ)	Станнин	Dg, Vn, Ccp	Масленников и др., 2014
	Березняковское (Южный Урал)	Станноидит, моусонит	Tn, Td, Sph, Py, Ccp	Плотинская и др., 2009
	Кайгарач (Узбекистан)			Коваленкер и др., 1986
Золото-кварц-сульфидная	Николаевское (Енисейский кряж)	Станнин	Py, Po, Ccp, Apy, Sph, Tn	Сафина и др, 2015
	Этыкинское (Приамурье)	Станнин, моусонит, станноидит	Cst, Po, Ccp	Алексеев и др., 2019
Грейзеновая	Букуинское (Забайкалье)		Cst, Wt, Sph, Py, Ccp, Bis	Юргенсон, 2021
	Смирновское		Cst, Ccp, Sph, Po, Apy, Gn	Назарова и др., 1981
	Хетинское (Дальний Восток)		Cst, Wt, Vn, Ccp	Попов и др., 1992; Попова и др., 2013
	Тигриное (Дальний Восток)		Cst, Py, Po, Ccp	Коростелев и др., 2016
	Солнечное (Хабаровский край)		Cst, Wt, Ccp, Apy, Vn	Алексеев и др., 2020
	Кёстер (Якутия)		Cst,	Чистякова и др., 1982
	Невское (Магаданская область)	Моусонит, станноидит		
	Центральное (Дальний Восток)	Станноидит, станнин	Vn, Ccp, Sph, Apy, Cst, Tn	Шувалов и др., 1990
Кварц-касситерит-сульфидная	Пыркакай (Чукотка)	Станнин	Cst, Po, Apy, Sph, Py, Ccp, Gus, Fbg, Bi	Цветков, 1981; Белогуб, Новоселов, 2022ф

Примечание к табл. 1. Q – кварц, Mu – мусковит, Trz – топаз, Tur – турмалин, Bt – биотит, Flu – флюорит, Cst – касситерит, Wt – вольфрамит, Fbr – ферберит, Apy – арсенопирит, Lo – лёллингит, Py – пирит, Ccp – халькопирит, Bn – борнит, Po – пирротин, Tn – теннантит, Td – тетраэдрит, Sph – сфалерит, Gn – галенит, Cc – халькозин, Dg – дигенит, Stn – станнин, Sta – станноидит, Mou – моусонит, Ro – рокезит, Wtt – виттихенит, Smy – штромейерит, Gus – густавит, Bis – висмутин, Bi – висмут самородный, Ag – серебро самородное, Ore – рудный минерал (в проходящем свете). Аббревиатуры применимы к таблице 3 и рисункам.

Note. Q – quartz, Mu – muscovite, Trz – topaz, Tur – tourmaline, Bt – biotite, Flu – fluorite, Cst – cassiterite, Wt – wolframite, Fbr – ferberite, Apy – arsenopyrite, Lo – loellingite, Py – pyrite, Ccp – chalcopyrite, Bn – bornite, Po – pyrrhotite, Tn – tennantite, Td – tetrahedrite, Sph – sphalerite, Gn – galena, Cc – chalcocite, Dg – digenite, Stn – stannite, Sta – stannoidite, Mou – mawsonite, Ro – roquesite, Wtt – wittichenite, Smy – stromeyerite, Gus – gustavite, Bis – bismuthinite, Bi – native bismuth, Ag – native silver, Ore – ore mineral (in transmitted light). Abbreviations apply to Table 3 and figures.

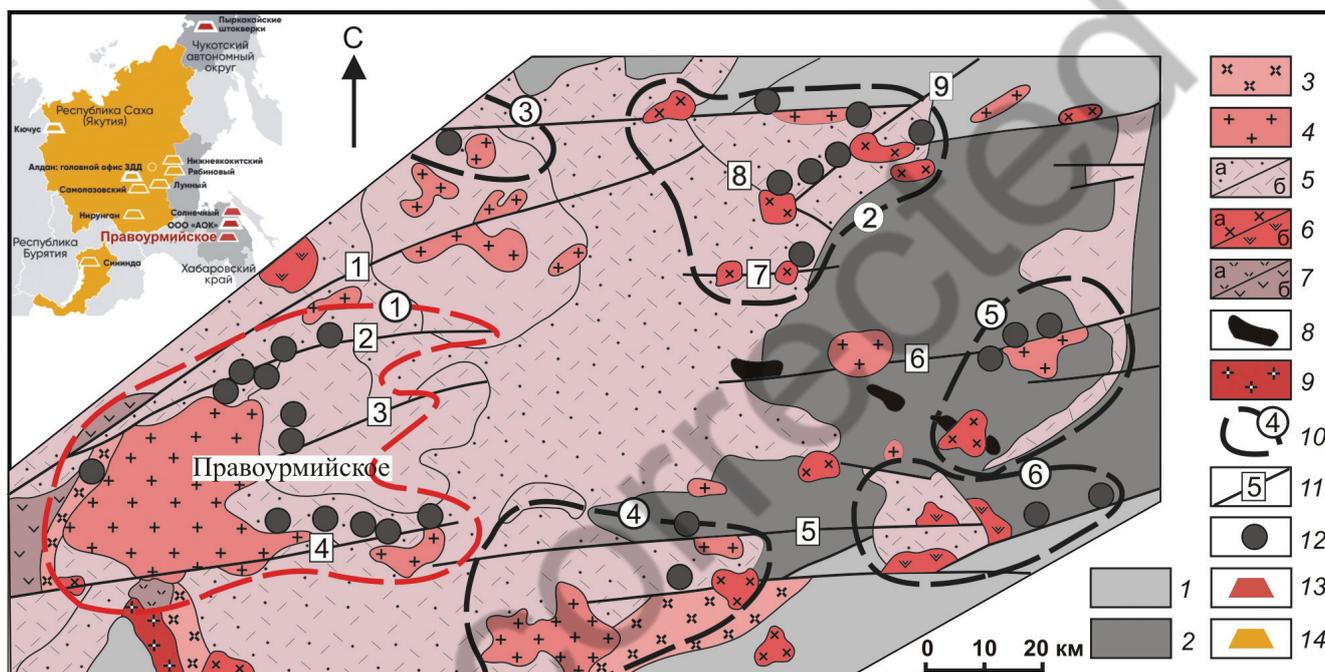


Рис. 1. Геологическая схема Баджалского рудного района, по (Огнянов, 1986) с изменениями по (Семеняк, 2014).

1 – мезозойские терригенные отложения; 2 – палеозойские терригенно-кремнистые отложения; 3 – метаморфизованные породы Буреинского массива; 4–8 – магматические комплексы: 4, 5 – ранне-поздне меловой баджалский (105–90 млн лет): 4 – лейкократовые биотитовые граниты; 5 – риолиты, риодациты: а – покровные; б – экструзивные; 6 – поздне-меловой силинский (92–89 млн лет): а – трахиандезиты; б – габбро-монзонит-диориты, граниты; 7 – раннемеловой лакский (~115 млн лет): а – андезиты; б – преимущественно, гранодиориты; 8 – раннемеловой даянский (~125 млн лет): щелочные базальты и пикриты; 9 – палеозойские гранитоиды; 10 – рудные узлы: 1 – Верхнеурмийский; 2 – Верхнебаджальский; 3 – Талиджакский; 4 – Ярапский; 5 – Сютюингский; 6 – Якуньский; 11 – разломы: 1 – Баджалский; 2 – Ось Баджала; 3 – Праворурийский; 4 – Верхнесынчугинский; 5 – Колбаканский; 6 – Сютюингский; 7 – Холодный; 8 – Азуритовый; 9 – Гранитовый; 12 – месторождения и рудопроявления; 13, 14 – промышленные объекты: 13 – оловорудные; 14 – золоторудные.

Fig. 1. Geological map of the Badzhal ore region, modified by (Semenyak, 2014) after (Ognyanov, 1986).

1 – Mesozoic terrigenous deposits; 2 – Paleozoic terrigenous-siliceous deposits; 3 – metamorphosed rocks of the Bureya Block; 4–8 – igneous complexes: 4, 5 – Early-Late Cretaceous Badzhal (105–90 Ma): 4 – leucocratic biotite granite; 5 – rhyolite and rhyodacite: a – cover; б – extrusive; 6 – Late Cretaceous Silin (92–89 Ma): a – trachyandesite; б – gabbro-monzonite-diorite, granite; 7 – Early Cretaceous Lak (~115 Ma): а – andesite; б – mostly granodiorite; 8 – Early Cretaceous Dayan (~125 Ma): alkali basalt and picrite; 9 – Paleozoic granitoid; 10 – ore clusters: 1 – Upper Urma; 2 – Upper Badzhal; 3 – Talidzhak; 4 – Yarap; 5 – Syutyuinga; 6 – Yakun; 11 – faults: 1 – Badzhal; 2 – Os' Badzhala; 3 – Pravaya Urma; 4 – Upper Synchugin; 5 – Kolbakan; 6 – Syutyuinga; 7 – Kholodny; 8 – Azuritovy; 9 – Granitovy; 12 – deposits and occurrences; 13, 14 – economic objects: 13 – Sn; 14 – Au.

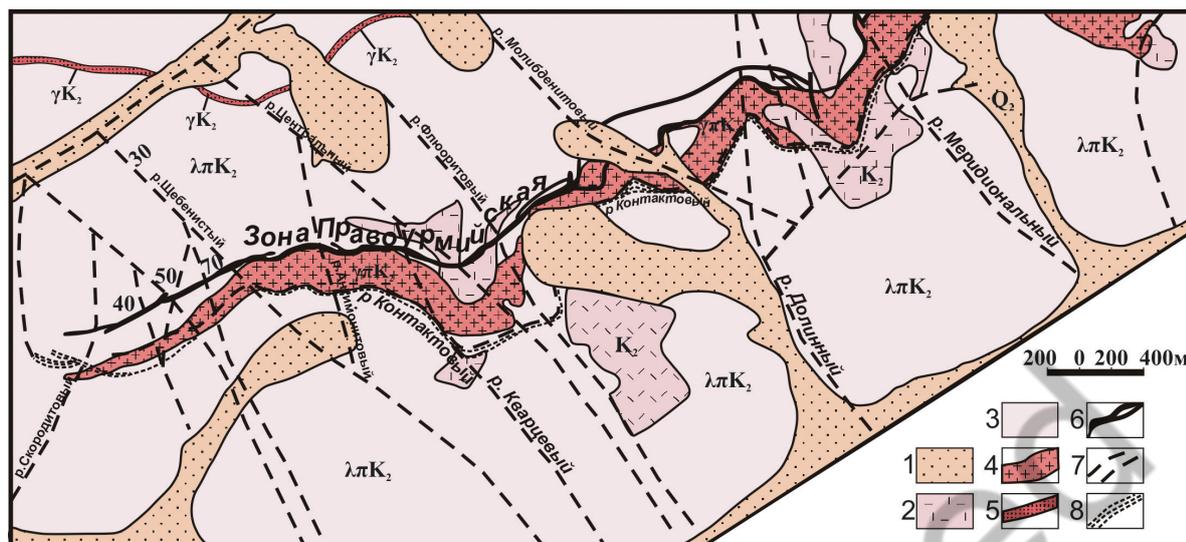


Рис. 2. Схема геологического строения Правоурмийского месторождения, по материалам Комсомольской ГРЭ ДВГГО с дополнениями (Семеняк и др., 1997).

1 – аллювиальные, пролювиальные, ледниковые рыхлые отложения; 2 – покровные риолиты, риодациты и их туфы; 3 – экструзивные кристаллоигнимбриды риолитов; 4 – дайки гранит-порфиров; 5 – дайка мелкозернистых гранитов; 6 – рудная зона; 7 – разрывные нарушения: а – основные, б – скрытые под рыхлыми отложениями; 8 – зоны интенсивной трещиноватости.

Fig. 2. Scheme of geological structure of the Pravaya Urma deposit, modified by (Semenyak et al., 1997) after materials of the Komsomolsky Geological Exploration Expedition of the Far East Industrial-Geological Union.

1 – alluvial, proluvial and glacial loose deposits; 2 – cover rhyolite, rhyodacite and their tuff; 3 – extrusive rhyolitic crystalloignimbrites; 4 – granite porphyry dikes; 5 – fine-grained granitic dike; 6 – ore zone; 7 – faults: а – main; б – hidden under loose deposits; 8 – zones of intense fracturing.

стях массива и представлена биотитовыми (редко с роговой обманкой и пироксеном) гранит-порфирами и порфиroidными гранитами. Основной объем массива слагают мелко-среднезернистые, редко порфиroidные, биотитовые граниты главной фазы. Они прорваны дайками и мелкими штоками мелкозернистых или аплитовидных лейкократовых с биотитом гранитов третьей фазы. Акцессорные минералы в гранитах всех фаз представлены цирконом, ильменитом, ортитом, апатитом, флюоритом, турмалином, арсенопиритом, реже – касситеритом. Возраст вулканитов и интрузивных образований соответствует верхнему мелу (Крымский и др., 1997; Кривовичев и др., 1996). Породы, вероятно, являются комагматичными.

На Правоурмийском месторождении выделяется три этапа минерализации: дорудный молибденовый безоловянный, продуктивный оловорудный грейзеновый и пострудный антимонитовый (Гульбин, Евангулова, 1987; Семеняк и др., 1988, 1997; Ханчук и др., 2006). Продуктивный оловорудный грейзеновый этап включает в себя четыре стадии минерализации, из которых первые две (касситерит-

кварц-топазовая и кварц-турмалин-сульфидная) представляют промышленную ценность (Семеняк, 1987; Семеняк и др., 1988, 1997; Чикишева, 2021). Завершающие эпидот-хлоритовая и карбонатная стадии – безрудные. В касситерит-кварц-топазовую стадию отложилась основная масса касситерита и вольфрамита вместе с топазом, сидерофиллитом, флюоритом и арсенопиритом. В кварц-турмалин-сульфидную стадию происходило отложение халькопирита, борнита, сульфостаннатов Cu и Fe, а также минералов In. Минерализованные зоны сложены кварц-мусковитовыми, кварц-биотитовыми, кварц-топазовыми и кварц-турмалиновыми грейзенами и хлорит-серицитовыми метасоматитами (Гавриленко и др., 1992; Гоневчук, Семеняк и др., 1998).

Руды Правоурмийского месторождения вкрапленные, прожилково-вкрапленные, гнездовые, имеют массивную, пятнистую, брекчевидную текстуру, тонкозернистую до крупнозернистой структуру. Руды характеризуются многообразием породобразующих и акцессорных минералов, а также основных, второстепенных и редких рудных минералов (табл. 2). По состоянию на 1 января 2022 г.

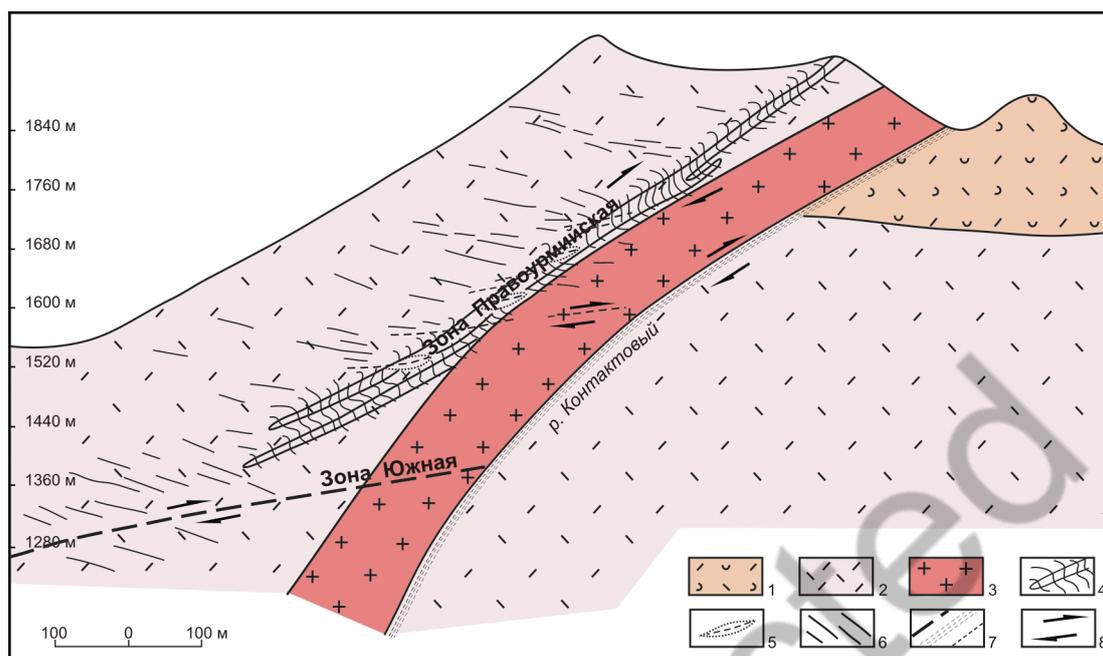


Рис. 3. Обобщенный геологический разрез Правоурмийского месторождения, по материалам Комсомольской ГРЭ ДВПГО с дополнениями (Семеняк и др., 1997).

1 – туфы риолитов и риодацитов; 2 – риолиты; 3 – гранит-порфиры; 4 – зона развития флексуобразных трещин отдельности, концентрирующих оруденение; 5 – относительно крупные линзовидные тела кварц-топазовых метасоматитов с их продольными осями; 6 – области развития пологозалегающих трещин; 7 – тектонические нарушения: а – зона Южная; б – разлом Контактный; в – мелкие трещины отрыва; 8 – направление перемещений.

Fig. 3. Generalized geological cross-section of the Pravaya Urma deposit, modified by (Semenyak et al., 1997) after materials of the Komsomolsky Geological Exploration Expedition of the Far East Industrial-Geological Union.

1 – rhyolite and dacitic rhyolite tuff; 2 – rhyolite; 3 – granite porphyry; 4 – zone with flexure-like jointing fractures hosting mineralization; 5 – relatively large lenticular bodies of quartz-topaz metasomatites with their longitudinal axes; 6 – areas with gently dipping fractures; 7 – faults: а – South zone; б – Kontaktovy Fault; в – small tension cracks; 8 – direction of displacements.

Таблица 2. Минералы рудной зоны Правоурмийского месторождения
Table 2. Minerals of ore zone of the Pravy Urmiy deposit

Породообразующие		Рудообразующие	
Главные и второстепенные	Акцессорные	Главные и второстепенные	Редкие
Топаз, кварц, турмалин, слюды (флогопит, биотит, мусковит, серицит, сидерофиллит, циннвальдит), флюорит, хлорит, полевой шпат (микроклин, альбит, адуляр), каолинит, эпидот, карбонат (кальцит?), гранат, актинолит, кордиерит	Циркон, рутил, анатаз, цеолиты, апатит, фергусонит, алланит	Касситерит, арсенопирит, леллингит, станнин, станноидит, моусонит, халькопирит, борнит, вольфрамит	Халькозин, ковеллин, сфалерит, галенит, пирит, марказит, кубанит, молибденит, тунгстенит, рокезит, акантит, висмутин, антимонит, теннантит, тетраэдрит, штрмейрит, виттихенит, скиннерит, скородит, бисмит, заварицкит, интерметаллид BiAg, самородные висмут и серебро, медь, ильменит, шеелит, феррикестерит

Примечание. Таблица составлены по данным (Семеняк и др, 1983, 1997; Баншикова, Крюкова, 1988; Alekseev, Marin, 2021; Чикишева, 2021) и результатам настоящих исследований.

Note. Table is composed after (Semenyak et al., 1983, 1997; Banshchikova, Kryukova, 1988; Alekseev, Marin, 2021; Chikisheva, 2021) and results of present studies.

балансовые запасы (категория В+С₁) по месторождению составили: Sn – 48702 т (при среднем содержании 1.17 %), Cu – 4.4 тыс. т (при среднем содержании 0.56 %), WO₃ – 202 т (при среднем содержании 0.026 %) и Ag – 7.2 т (при среднем содержании 9.1024 г/т) (nedradv.ru/nedradv/ru/find). В настоящее время обогащение руд Правоурмийского месторождения проводится на производственном комплексе «Правоурмийский» (дочернее предприятие ПАО «Русолово»). Руды месторождения относятся к труднообогатимым. Для их обогащения применяются сложные гравитационно-флотационные схемы, основанные на разделении зерен касситерита, сульфостаннатов Cu и Fe, арсенопирита и сульфидов Cu по крупности, плотности и поверхностным свойствам. Основной производственный цикл состоит из нескольких этапов: 1) дробильно-сортировочного; 2) стадийного измельчения, флотации, гравитации и флотогравитации; 3) магнитной сепарации. Технологическая схема включает несколько циклов, в которых перерабатываются продукты различной крупности и состава, в результате чего получают черновые концентраты, поступающие на доводку. В производственный комплекс входит флотация не только для удаления сульфидных минералов, содержащих вредные примеси, но и для получения медного концентрата. В связи со сложностью состава руд на обогатительной фабрике проводились эксперименты с применением рентген-радиометрической сепарации (PPC), которая в настоящий момент успешно внедрена в промышленном масштабе.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Нами исследованы 19 штучных образцов, отобранных из разных горизонтов (Электронное приложение, табл. 1, 2) и 38 технологических продуктов переработки руды текущей добычи с 2020 по 2022 гг. Технологические продукты представляли собой концентраты и хвосты обогащения:

- продукты предварительной PPC с использованием характеристического излучения Sn и As. Разделение проведено по классам крупности на фракциях –100+60, –60+30 и –30+20 мм с получением концентрата и промпродукта, который подвергался повторной PPC. Полученные концентраты и хвосты были объединены (Электронное приложение, табл. 3);

- продукты гравитационного разделения на концентрационном столе СКО-22.5 с получением касситеритового концентрата;

- продукты различных циклов гравитационного разделения с применением предварительного концентрирования на винтовом сепараторе (1-й цикл) и винтового шлюза СВМ-2-1000 (2-й цикл), предназначенных для обогащения шламов руд редких металлов (Электронное приложение, табл. 4);

- продукты пирометаллургического передела касситеритового гравиоконцентрата, примененного для удаления вредной примеси As (Электронное приложение, табл. 5).

Оптическими методами изучено 28 аншлифов, 38 полированных брикетов и 24 шлифа. Использованы стереомикроскоп STEMI 2000 CZ, поляризационные микроскопы (AxioScope A.1, Axiolab (CZ) и ПОЛАМ-312) и сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Vega 3 Tescan SBU с энергодисперсионным анализатором (ЭДА) Oxford Instruments X-act. Анализ состава минералов проводился в режиме ускоряющего напряжения 20 кВ, время набора спектра составляло 120 с, использовались сертифицированные стандарты № 1362 (Microanalysis Consultants Ltd), MINM25-53 (Astimes Scientific Limited, серийный номер 01-044). Количественный минералогический анализ выполнен при помощи рентгенофазового анализа (дифрактометр Shimadzu XRD-6000, CuK- α , Cu-K α излучение с графитовым монохроматором, скорость съемки 2°/мин, предел обнаружения 0.3 мас. %) методом Ритвельда, ПО SIROQUANT V.4 (Sietronics, 40 Hoskins St, Mitchell, ACT 2911, Australia, лицензия № 11-10419406) (аналитики П.В. Хворов, Е.Д. Зенович). При расчетах использованы стандарты внутренней базы данных, вводились поправки текстурирование минералов с хорошей спайностью, несовершенство структуры и вариации параметров элементарной ячейки, связанные с изоморфными замещениями.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Минералогия руд текущей добычи

Руды текущей добычи Правоурмийского месторождения представляют собой кварц-топазовые, кварц-флюорит-топазовые, кварц-турмалиновые и биотит-топаз-кварцевые метасоматиты грейзеновой формации, развитые по лавам и вулканогенно-обломочным породам кислого состава с неравно-

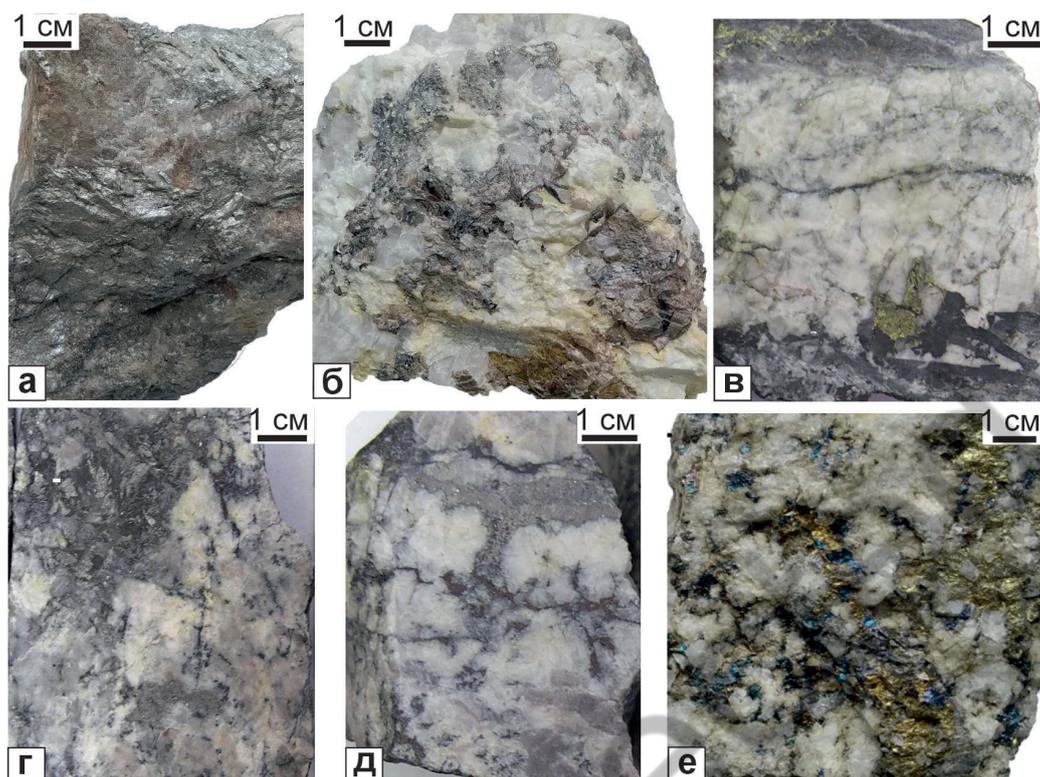


Рис. 4. Рудовмещающие метасоматиты Правояурмийского месторождения: а – кварц-турмалин-топазовый с арсенопиритом (горизонт 1480 м); б – кварц-топазовый с касситеритом (горизонт 1520 м); в – турмалин-топаз-кварцевый с призматическим вольфрамитом и гнездами халькопирита (горизонт 1534 м); г – кварц-турмалин-топазовый с арсенопирит-леллингитовыми прожилками и гнездами (горизонт 1560 м); д – топаз-флюорит-кварцевый с арсенопирит-леллингитовыми прожилками (горизонт 1560 м); е – топаз-кварцевый с прожилково-вкрапленной борнит-халькопиритовой минерализацией (горизонт 1600 м).

Fig. 4. Ore-hosting metasomatites of the Pravaya Urma deposit: а – quartz-tourmaline-topaz with arsenopyrite (horizon of 1480 m); б – quartz-topaz with cassiterite (horizon of 1520 m); в – tourmaline-topaz-quartz with prismatic wolframite and chalcopyrite pockets (horizon of 1534 m); г – quartz-tourmaline-topaz with arsenopyrite-löllingite veinlets and pockets (horizon of 1560 m); д – topaz-fluorite-quartz with arsenopyrite-löllingite veinlets (horizon of 1560 m); е – topaz-quartz with disseminated bornite-chalcopyrite mineralization (horizon of 1600 m).

мерно распределенной продуктивной минерализацией (рис. 4, 5). Руды вкрапленные, прожилково-вкрапленные, гнездовые, имеют массивную, пятнистую, брекчевидную текстуру. По размеру выделений промышленных минералов разделяются на (мм): тонкозернистые (до 0.1), мелкозернистые (до 0.2), среднезернистые (до 1) и крупнозернистые (>1) согласно (Методические ..., 2007).

Основные формы нахождения Sn – касситерит и сульфостаннаты Cu и Fe (станнин, моусонит, станноидит); в рудах также присутствует вольфрамит. Минеральный состав руды меняется с глубиной. В рудах горизонтов 1600, 1580, 1569 и 1560 м наблюдается постепенное возрастание количества сульфостаннатов Cu и Fe. Глубже такая вертикальная зональность не прослеживается. На более глубоких горизонтах 1540, 1534, 1520, 1516 и 1509 м

постепенно уменьшается количество касситерита, а сульфостаннаты Cu и Fe становятся редкими. На горизонтах 1540 и 1534 м резко увеличивается содержание средне- и крупнозернистого вольфрамита (табл. 3). Вольфрамит во всех изученных пробах представлен ферберитом с содержанием MnO около 10 мас. % (табл. 4).

Касситерит представлен короткостолбчатыми и призматическими кристаллами, слагает прожилки и выполняет интерстиции нерудных минералов в кварц-топазовом и кварц-флюорит-топазовом метасоматитах с турмалином. Структура мелко-, среднезернистая, гипидиоморфнозернистая. Касситерит сростается с арсенопиритом, леллингитом, сульфидами и сульфостаннатами Cu и Fe. Границы зерен искривленные, с незначительным проникновением зерен друг в друга. Касситерит образует

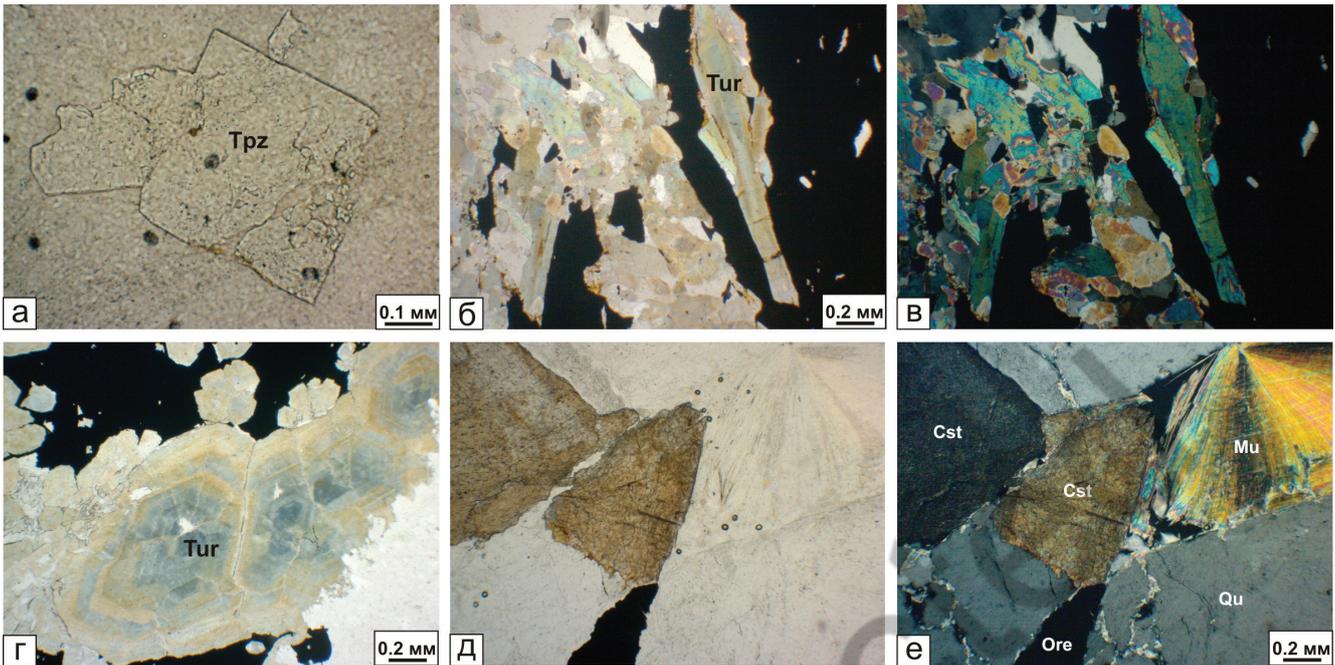


Рис. 5. Минералогические особенности рудовмещающих метасоматитов Правояурмийского месторождения: а – корродированный кристалл топаза с флюидными включениями; б, в – агрегат турмалина на контакте с сульфидами; г – зональный турмалин в сульфидном прожилке; д, е – сросток касситерита, сульфида и мусковита среди зерен кварца.

Проходящий свет, а, б, г, д – с поляризатором, в, е – с анализатором.

Fig. 5. Mineralogical peculiarities of ore-hosting metasomatites of the Pravaya Urma deposit: а – corroded topaz crystal with fluid inclusions; б, в – tourmaline aggregate at contact with sulfides; г – zoned tourmaline in a sulfide veinlet; д, е – cassiterite, sulfide and muscovite intergrowth in quartz.

Transmitted light, а, б, г, д – with polarizer, в, е – with analyzer.

включения в сульфостаннатах Cu и Fe (либо окаймляется ими) и в арсенопирите. В касситерите присутствуют включения сульфостаннатов Cu и Fe, арсенопирита, халькопирита, борнита, халькозина, иногда вольфрамита и самородного висмута. Размер включений сульфидов в касситерите варьирует от 5 мкм до 0.5 мм. Размер зерен касситерита составляет 0.1–7.0 мм в метасоматитах и 0.1–0.4 мм во включениях.

Станнин, моусонит и станноидит тесно ассоциируют, часто срстаются между собой и с сульфидами Cu (халькопиритом, борнитом, халькозином), сульфоарсенидами (арсенопиритом, лёллингитом), виттихенитом, касситеритом и вольфрамитом. Границы прямолинейные и слабоискривленные. Сульфостаннаты Cu и Fe находятся в интерстициях и трещинах кварца, топаза, турмалина, флюорита и сульфоарсенидах (рис. 6а-г). Мощность прожилков сульфостаннатов Cu и Fe колеблется в пределах 5–50 мкм, участками достигая 0.2 мм.

Станнин отмечался, преимущественно, предшественниками, в настоящей работе обнаружен только в одном случае в гравитационном концен-

трате, полученном из смешанных руд. Минерал срстается с касситеритом и содержит включения касситерита размером до 30 мкм. Станноидит и моусонит образуют включения в жильных минералах, арсенопирите, лёллингите, сульфидах Cu, касситерите и вольфрамите (рис. 7). Станноидит также образует включения в сульфоарсенидах, касситерите, вольфрамите, тетраэдрите и редко в сфалерите. В арсенопирите, касситерите и вольфрамите он срстается с борнитом, халькозином, халькопиритом и минералами Bi (рис. 6д), в халькопирите – с рокезитом (рис. 6е) и сфалеритом. Станноидит образует каймы мощностью до 50 мкм вокруг халькопирита и содержит включения халькозина, борнита, лёллингита и виттихенита размером до 0.1 мм, ламелли халькопирита до 20 мкм, пластинчатые и изометричные включения сульфида Ag до 20 мкм. В моусоните и станноидите зафиксированы варьирующие примеси Zn (1.19–2.67 мас. %), максимальные значения которого установлены в станноидите (табл. 5). Лёллингит и виттихенит иногда срстаются во включениях. Размер зерен станноидита варьирует от 10 мкм до 5 мм в жильных минералах

Таблица 3. Характеристика руды по горизонтам в период отработки 2020–2022 гг.
Table 3. Ore characteristics by horizons in the period 2020–2022 years mining

Горизонт	Вещающий метасоматит	Минеральная ассоциация	Характеристика касситерита	Характеристика сульфостаннатов
1600	Топаз-кварцевый, турмалин-топаз-кварцевый, биотит-флюорит-топаз-кварцевый	Срр, Вп, Ару, Ло, Sph, Wt, Sta, Mou, Td, Tп, Ro	Густая вкрапленность, мелко-, средне-, крупнозернистый, размер 0.1–7.0 мм, в интерстициях Q, Trz, Vt и Flu, сростки с Ару, Вп, Mou, Sta, прожилки до 2 мм, содержит включения Срр, Sta	Неравномерное распределение, редкая до густой вкрапленность, размер 0.2–0.3 мм, сростки с Срр, Вп и Td в интерстициях Q и Trz, сростки с Ro в Срр, включения в Ару, Срр, Td, Sph, каймы по Срр, Sta содержит включения Срр
1580	Топаз-кварцевый, топаз-биотит-кварцевый	Ару, Ло, Вп, Cst, Wt, Sta, Mou, Cc, Срр, Wtt, Bi, Ag	Густая до редкой вкрапленность, мелко-, среднезернистый, размер 0.1–4.0 мм, сростки с Вп, в интерстициях Q и Trz, включения в Ару, содержит многочисленные включения Sta, Вп, Cc, Wt	Многочисленны, размер 0.1–1.0 мм, сростки с Ару, Вп, Cc, Wt в интерстициях Q и Trz, включения размером 10 мкм–0.2 мм в Cst, Ару, Вп, Cc
1569	Кварц-флюорит-топазовый, кварц-топазовый	Вп, Срр, Sta, Mou, Cc, Cst, Ару, Wtt, Bi	Густая до редкой вкрапленность, среднезернистый, размер 2–5 мм, сростки с Mou, Stп, Вп, содержит включения Bi	Многочисленны, размер 0.1–0.5 мм, сложные сростки с Вп, Cst, включения в Cst, Mou образует каймы по Cst
1560	Кварц-топазовый, кварц-турмалин-топазовый, топаз-флюорит-кварцевый	Ару, Ло, Sta, Mou, Вп, Cc, Срр, Cst, Wtt, Bi	Редкий, мелко-, среднезернистый, размер 1–2 мм, сростки с Вп, Sta, Mou в интерстициях Qc, Trz и Tur, содержит включения Вп	Многочисленны, Sta преобладает над Mou. Sta (размер от 50 до 5 мм) и Mou (размер 0.1–1.0 мм) образуют взаимные сростки, сложные сростки с Вп, Cc, Cst в интерстициях Q, Trz и Tur. Sta находится в трещинах Ару и Ло, содержит включения Wtt, Cc, Срр, Ло
1540	Турмалин-топазовый, турмалин-кварц-топазовый	Wt, Срр, Sta, Cst, Ару, Cc, Td, Ro	Редкий, средне-, мелкозернистый, сростки с Wt и Sta, содержит включения Sta и Срр	Редкий Sta, сростки Wt, Cst, Срр, Cc, Ару в интерстициях Q и Trz, включения в Ару, Wt и Срр. Сростки с Ro (в Срр)
1534	Кварц-турмалин-топазовый, топаз-флюорит-кварцевый, биотит-топаз-кварцевый	Wt, Срр, Вп, Ло, Ару, Sta, Cst, Cc, Wtt, Ro, Td	Редкий, тонко-, мелкозернистый, размер от 10–70 мкм до 0.1–0.4 мм, сростки с Wt в интерстициях Q, Trz и Vt	Редкий Sta, размер от 10 мкм до 1 мм, сростки с Срр, Вп в интерстициях Q, Trz, Tur и Vt, включения размером 5 мкм–0.2 мм в Срр, Wt, Ару, Ло, Cc, Td. Sta образует сростки с Ro в Срр, сростки с Cc и Вп в Ло.
1520	Кварц-топазовый	Ару, Cst, Bi	Среднезернистый, размер до 5 мм, образует гнезда в Q-Trz метасоматите (рис. 4б), зональный, сростки с Ару, включения в Ару	Не обнаружены
1516	Кварц-мусковитовый	Ару, Cst	Средне-мелкозернистый, размер 0.1–1.5 мм, сростки с Ару в интерстициях Qu и Mu (рис. 5д-е), образует включения в кварце	Не обнаружены
1509	Окварцованный риолит	Вп, Mou, Срр, Cc, Td	Не обнаружен	Редкий Mou размером до 0.2 мм образует сростки с Вп
1480	Кварц-турмалин-топазовый, кварц-турмалиновый	Ару, Вп, Срр, Cst, Wtt	Не обнаружен	Не обнаружены

Таблица 4. Химический состав вольфрамита (мас. %)
Table 4. Chemical composition of wolframite (wt. %)

№ п/п	№ лаб.	WO ₃	FeO	MnO	Сумма	Формула
1	22807с	76.89	13.36	9.75	100.00*	(Fe _{0.56} Mn _{0.42}) _{0.98} W _{1.01} O ₄
2	22807h	76.93	12.82	10.46	100.21	(Fe _{0.53} Mn _{0.43}) _{0.96} W _{1.02} O ₄

Примечание. * – анализ приведен к 100 мас. %. Формулы рассчитаны на четыре атома кислорода.
Note. * – analysis is normalized to 100 wt. %. Formulas are calculated on the basis of 4 O atoms.

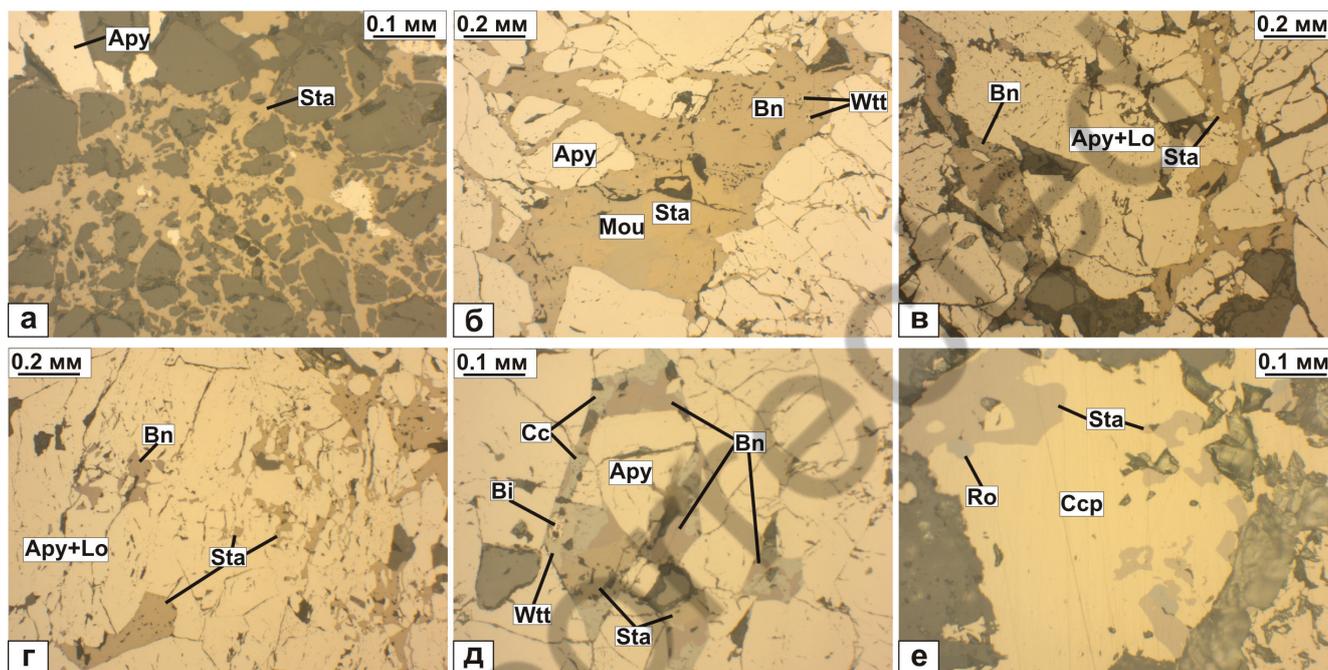


Рис. 6. Ассоциация сульфостаннатов Cu и Fe с сульфидами и сульфоарсенидами в рудах Правоурмийского месторождения: а – станноидит и арсенопирит, цементирующие брекчированный топаз (темное); б – прожилки станноидита, моусонита и борнита с включениями виттехинита в кристаллах арсенопирита; в, г – прожилки станноидита и борнита в брекчированном арсенопирит-леллингитовом агрегате; д – сросток станноидита, борнита, халькозина и виттихенита с включениями в самородного висмута в трещинах кристаллов арсенопирита; е – сросток станноидита и рокезита в халькопирите.

Здесь и на рис. 7 – отраженный свет.

Fig. 6. Assemblage of Cu and Fe sulfostannates with Cu sulfides and sulfoarsenides in ores of the Pravaya Urma deposit: а – stannoidite and arsenopyrite among brecciated topaz; б – veinlets of stannoidite, mawsonite and bornite with wittichenite inclusions in arsenopyrite crystals; в, г – veinlets of stannoidite and bornite in brecciated arsenopyrite-löllingite aggregate; д – intergrowth of stannoidite, bornite, chalcocite and wittichenite with native bismuth inclusions in fractures of arsenopyrite crystals; е – intergrowth of stannoidite and roquesite in chalcopyrite.

Here and in Fig. 7 – reflected light.

и от 5 мкм до 0.2 мм в других рудных минералах. Моусонит развивается на границе зерен касситерита, вероятно, замещая его. В моусоните присутствуют субграфические включения сульфида Ag и Cu (штроейрита) (рис. 8а), ламеллы халькопирита и самородного Bi. Размер зерен моусонита составляет 0.1–1.0 мм в метасоматитах – и от 5 мкм до 0.2 мм

во включениях. Рокезит, упоминающийся в работах предшественников (Семяк и др., 1994), часто сростается с сульфостаннатами Cu и Fe (рис. 6е) и виттихенитом (рис. 8б). Самородное серебро найдено нами в виде включения в виттихените (рис. 8в).

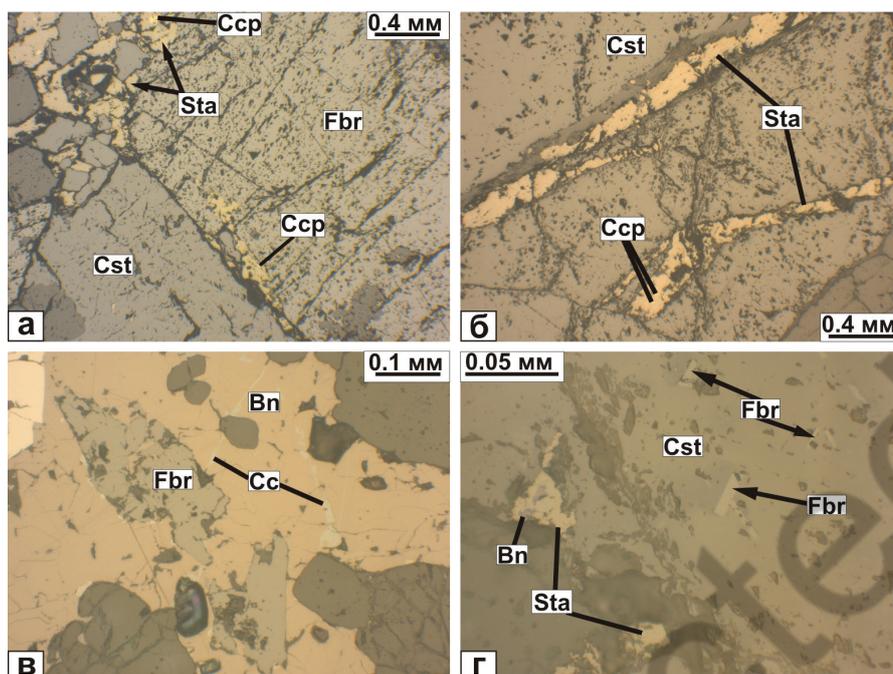


Рис. 7. Ассоциация станноидита с касситеритом, ферберитом, сульфидами Cu и сульфидами Cu и Fe в рудах Правоярмского месторождения: а – станноидит в сростках с халькопиритом в интерстициях, трещинах и на границе касситерита и ферберита; б – трещины в касситерите, выполненные станноидитом с включениями халькопирита; в – кристалл ферберита с включениями станноидита в борните с ламеллями халькозина; г – включения станноидита с борнитом и призматического вольфрамита в касситерите.

Fig. 7. Assemblage of stannoidite with cassiterite, ferberite, Cu sulfides and Cu and Fe sulfides in ores of the Pravaya Urma deposit: а – stannoidite intergrown with chalcopyrite in interstices, fractures and at the boundary of cassiterite and ferberite; б – fractures in cassiterite filled by stannoidite with chalcopyrite inclusions; в – ferberite crystal with stannoidite inclusions in bornite with chalcocite lamellae; г – inclusions of stannoidite with bornite and prismatic wolframite in cassiterite.

Таблица 5. Химический состав сульфостаннатов Cu и Fe (мас. %)

Table 5. Chemical composition of Cu and Fe sulfostannates (wt. %)

№ п/п	№ лаб.	S	Fe	Cu	Zn	Sn	Сумма	Формула
Моусонит								
1	20525g	28.72	12.78	44.17	0.00	13.47	99.14	$\text{Cu}_{6.21}\text{Fe}_{2.04}\text{Sn}_{1.01}\text{S}_8$
2	20525f	28.65	12.18	39.87	0.85	17.76	99.31	$\text{Cu}_{5.62}(\text{Fe}_{1.95}\text{Zn}_{0.12})_{2.07}\text{Sn}_{1.34}\text{S}_8$
3	20525p	27.60	12.20	41.50	1.19	18.34	100.83	$\text{Cu}_{6.07}(\text{Fe}_{2.03}\text{Zn}_{0.17})_{2.20}\text{Sn}_{1.44}\text{S}_8$
4	21156e	29.00	15.10	37.38	0.00	19.21	100.69	$\text{Cu}_{5.20}\text{Fe}_{2.39}\text{Sn}_{1.43}\text{S}_8$
5	22808a	29.29	12.72	43.66	0.00	14.25	99.92	$\text{Cu}_{6.02}\text{Fe}_{1.99}\text{Sn}_{1.05}\text{S}_8$
	Среднее	28.65	13.00	41.32	0.41	16.61	99.98	
	Стандартное отклонение	0.64	1.21	2.80	0.57	2.57	0.77	
Станнин								
6	21157g	27.27	9.01	43.6	0.00	19.55	99.43	$\text{Cu}_{3.23}\text{Fe}_{0.76}\text{Sn}_{0.77}\text{S}_4$
Станноидит								
7	22808d	29.21	11.46	39.24	1.48	18.32	99.72	$\text{Cu}_{8.13}(\text{Fe}_{2.70}\text{Zn}_{0.30})_{3.00}\text{Sn}_{2.03}\text{S}_{12}$
8	22807b	29.37	10.93	39.08	2.04	18.74	100.17	$\text{Cu}_{8.06}(\text{Fe}_{2.56}\text{Zn}_{0.41})_{2.97}\text{Sn}_{2.07}\text{S}_{12}$
9	22807i	29.49	11.25	38.87	1.66	18.59	99.86	$\text{Cu}_{7.98}(\text{Fe}_{2.63}\text{Zn}_{0.33})_{2.96}\text{Sn}_{2.04}\text{S}_{12}$
10	22881b	28.81	11.02	39.05	2.67	18.44	100	$\text{Cu}_{8.21}(\text{Fe}_{2.64}\text{Zn}_{0.55})_{3.19}\text{Sn}_{2.07}\text{S}_{12}$
	Среднее	29.22	11.17	39.06	1.96	18.52	99.94	
	Стандартное отклонение	0.30	0.24	0.15	0.53	0.18	0.19	

Примечание. Формулы рассчитаны на 8, 4 и 12 атомов S для моусонита, станнина и станноидита, соответственно.

Note. Formulas are calculated for 8, 4 and 12 S atoms for mawsonite, stannite and stannoidite, respectively.

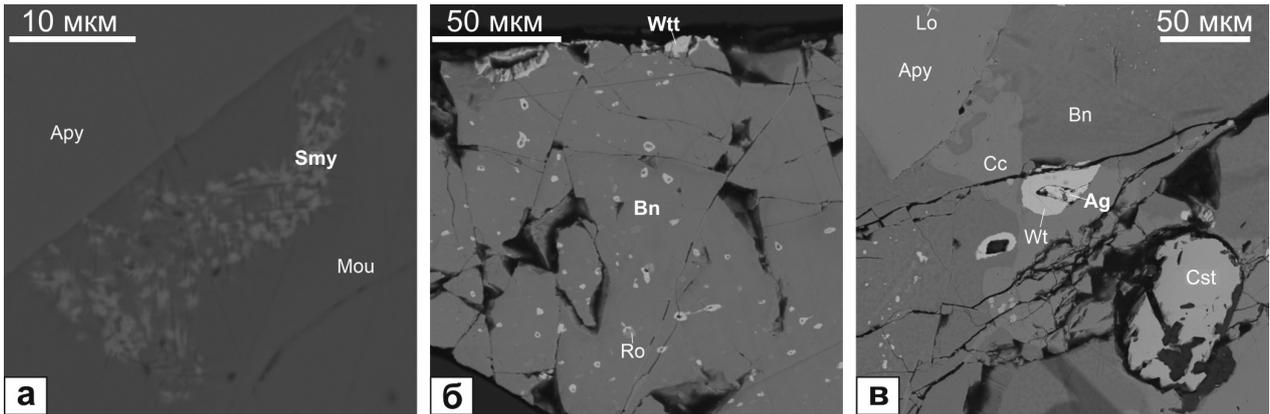
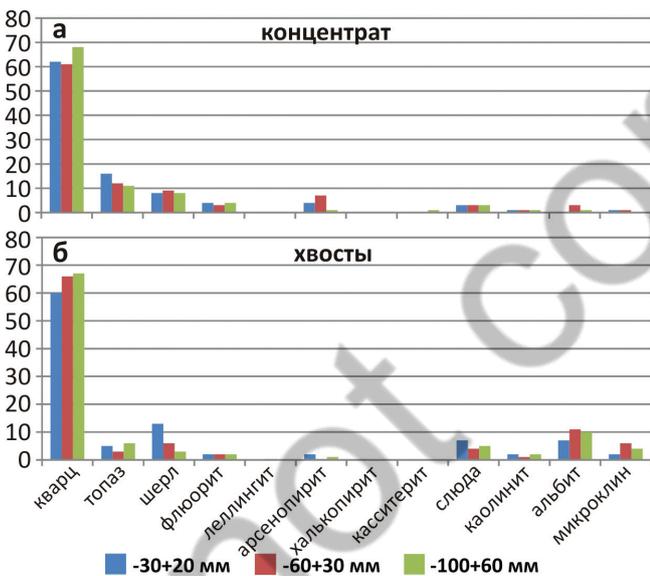


Рис. 8. Ассоциации редких минералов в рудах Правоурмийского месторождения: а – графическая структура штромейерита в моусоните на контакте с арсенопиритом; б – включения виттихенита и рокезита в борните; в – включение самородного серебра в виттихените, который срастается с халькозином и находится в борните, содержащем кристаллы арсенопирита и леллингита. BSE фото.

Fig. 8. Rare mineral assemblage in ores of the Pravaya Urma deposit: а – graphic structure of stromeyerite in mawsonite at the contact with arsenopyrite; б – wittichenite and roquesite inclusions in bornite; в – native silver inclusion in wittichenite, which is intergrown with chalcocite and occurs bornite with arsenopyrite and loellingite crystals. BSE images.



Особенности минерального состава технологических продуктов

Метод PPC не позволил полностью отделить руды от рудовмещающих метасоматитов. В результате в концентрат попали жильные минералы (кварц, топаз, флюорит, турмалин), образующие сростки и содержащие включения рудных минералов (арсенопирит, леллингит, халькопирит, касситерит) (рис. 9а). По сравнению с концентратами в хвостах увеличивается содержание кварца, полевых шпатов и слоистых силикатов (слюда, каолинита) и

Рис. 9. Распределение минералов в концентратах и хвостах рентген-радиометрической сепарации в зависимости от фракции.

Fig. 9. Distribution of minerals in concentrates and technological tails of X-ray radiometric separation depending on the fraction.

уменьшается количество рудных минералов и ассоциирующих с ними топаза и турмалина (рис. 9б). Рудной ассоциацией, включающей арсенопирит и лёллингит, обогащаются более тонкие гранулометрические классы. Содержание сульфостаннатов Cu и Fe в продуктах ниже предела обнаружения рентгенофазового анализа, но они установлены оптическими методами и подтверждены СЭМ с ЭДА.

В минеральном составе концентратов, полученных как на концентрационном столе (рис. 10а), так и методом флотогравитации (1 цикл) (рис. 10б), значительную долю занимают арсенопирит и лёл-

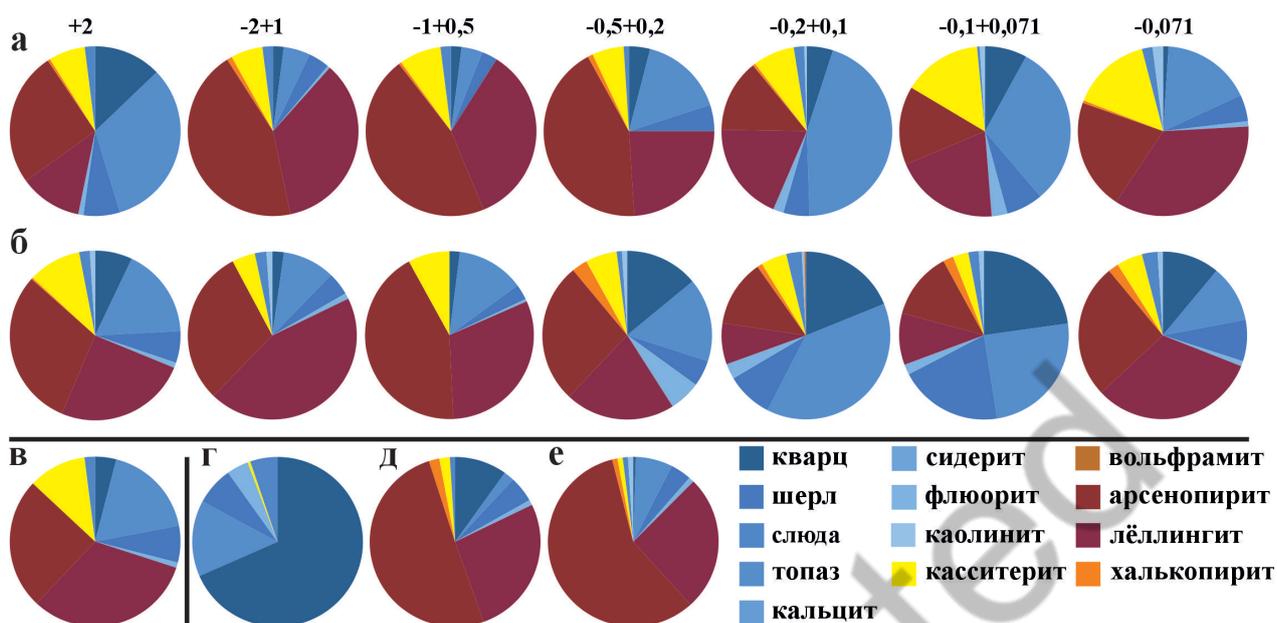


Рис. 10. Распределение минералов по фракциям в концентратах (а–в) и хвостах (а–в) руды Правоурмийского месторождения: а – гравикоцентрат; б – концентрат флотогравитации первого цикла; в – концентрат флотогравитации после шлюзов; г – отвальные хвосты чернового гравикоцентрата; д – сульфидные хвосты отвальные первого цикла флотогравитации; е – сульфидные суммарные отвальные хвосты.

По результатам количественного рентгенофазового анализа, содержание сульфостаннатов Cu и Fe ниже предела обнаружения метода, они диагностированы оптическими методами и подтверждены СЭМ с ЭДА. Вертикальная черта между «в» и «г» – разделение концентратов и хвостов.

Fig. 10. Distribution of minerals by fractions in concentrates (a–v) and technological tails (a–v) of ore from the Pravaya Urma deposit. а – gravity concentrate; б – first cycle flotation gravity concentrate; в – flotation gravity concentrate after sluices; г – waste technological tails of rough gravity concentrate; д – sulfide technological tails from the first cycle gravity flotation; е – total sulfide technological tails.

According to results of quantitative X-ray phase analysis, the amount of Cu and Fe sulfostannates is below detection limit, they were identified by optical microscopy and SEM-EDA. The vertical line between «в» and «г» is the separation of concentrates and technological tails.

лингит, максимальные содержания которых достигаются во фракциях (мм) от -2 до $+0.2$ и -0.071 (гравикоцентрат) и $+0.2$ и -0.071 (флотогравикоцентрат). Количество нерудной составляющей (кварц, полевые шпаты, слюда, турмалин, топаз, флюорит и карбонаты) в концентратах высокое, особенно, во фракциях $+2$ мм и диапазона от -0.2 до $+0.071$ (гравикоцентрат, рис. 10а) и $+2$ и диапазона от -0.5 до $+0.071$ (флотогравикоцентрат, рис. 10б). Концентраты флотогравитации от -0.5 до -0.071 мм содержат халькопирит (рис. 10б).

В гравикоконцентратах наименьшее содержание касситерита установлено в самой крупной ($+1$ мм) и самой мелкой (-0.071 мм) фракции. Относительное обогащение касситеритом и сульфостаннатами Cu и Fe наблюдается во фракциях $-0.1+0.071$ и -0.071 мм (рис. 10а). В грубых фракциях $+0.5$ мм до 10 % касситерита находится в сростках с арсе-

нопиритом. Границы сростаний искривленные, с проникновением зерен арсенопирита в касситерит и касситерита в арсенопирит. Во фракции -0.5 мм касситерит представлен, преимущественно, свободными частицами, содержащими тонкие ангедральные включения сульфостаннатов Cu и Fe, халькопирита, и присутствует в сростках с арсенопиритом и лёллингитом. В хвосты уходит часть касситерита в сростках с жильными минералами (рис. 10г) и в свободной форме.

В концентрате флотогравитации наиболее высокие концентрации касситерита выявлены во фракции $+2$ мм, наиболее низкие – во фракции $-0.1+0.071$ мм (рис. 10б). Здесь касситерит представлен как свободными частицами, так и сростками с арсенопиритом и лёллингитом и жильными минералами со сложными границами между минералами. Начиная с фракции -0.2 мм, частицы

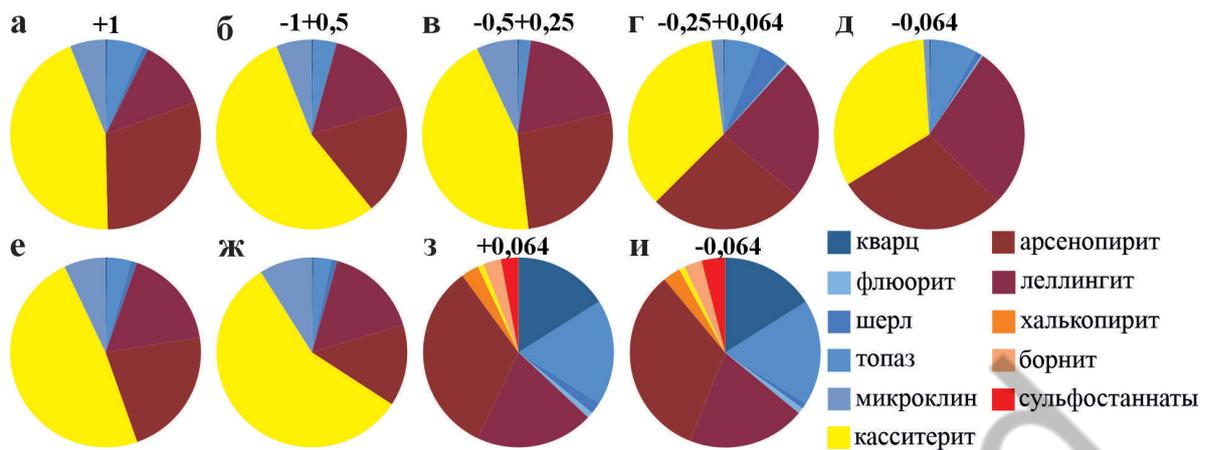


Рис. 11. Распределение минералов в черновых концентратах: исходном гравитационном по фракциям (а–д), продуктов обжига чернового концентрата (е, ж) и концентрата основной флотации общих хвостов -0.2 мм разных фракций (з, и).

Fig. 11. Distribution of minerals in rough concentrates: initial gravity concentrate by fraction (a–d), roasting products of rough concentrate (e, ж) and concentrate of main flotation of all technological tails of -0.2 mm of different fractions (з, и).

касситерита, преимущественно, свободные. В касситерите наблюдаются тонкие включения сульфидов Cu. Относительное обогащение сульфидами и сульфостаннатами Cu и Fe отмечено в тонких классах. В сульфидных отвальных хвостах находится до 2 мас. % касситерита в сростках с арсенопиритом, лёллингитом и жильными минералами (рис. 10д).

В продукте, поступающем на винтовой шлюз (хвостах обогащения на концентрационном столе) и в концентрате винтового шлюза содержится меньше 0.5 мас. % касситерита. Концентрат после шлюзов обогащается касситеритом до 11 мас. % (рис. 10в). Частицы касситерита в концентрате, преимущественно, свободные, а также образуют сростки с жильными минералами, арсенопиритом и лёллингитом. В касситерите наблюдаются включения сульфостаннатов Cu и Fe.

В суммарных сульфидных отвальных хвостах остается до 1 мас. % касситерита (рис. 10е), который представлен свободными частицами и сростками с жильными минералами, арсенопиритом, сульфидами и сульфостаннатами Cu и Fe. Размер частиц варьирует от 1 мм до шламовой фракции (-0.1 мм).

В черновом гравитационном концентрате (рис. 11а–д) и продуктах его обжига (рис. 11е, ж) преобладает касситерит, арсенопирит и лёллингит имеют подчиненное значение. В тонких классах уменьшается содержание касситерита, а суммарное количество лёллингита и арсенопирита увеличивается. Содержание лёллингита увеличивается относительно арсенопирита. Халькопирит, борнит, сульфостаннаты Cu и Fe имеют подчиненное зна-

чение. Суммарное содержание нерудных минералов составляет около 10 мас. %. Среди них преобладают микроклин, топаз и турмалин; флюорит и кварц находятся в следовых (от >0.3 до <0.5 мас. %) количествах.

В концентрате основной флотации общих хвостов фракций от -0.2 до $+0.064$ и -0.064 мм (рис. 11з, и) преобладают арсенопирит и лёллингит (суммарно 53 мас. % при соотношении $\sim 3 : 2$). Халькопирит, борнит и сульфостаннаты Cu и Fe находятся примерно в равных соотношениях, их суммарное содержание около 10 мас. %. Среди жильных минералов преобладают кварц и топаз, в незначительном количестве присутствуют турмалин и флюорит. Состав фракций от -0.2 до $+0.064$ и -0.064 мм практически идентичен с небольшим накоплением сульфостаннатов Cu и Fe в самой тонкой фракции (рис. 11и).

Таким образом, анализ продуктов технологического передела показывает, что сульфостаннаты Cu и Fe незначительно концентрируются в тонких классах уже на начальном этапе РРС из-за ассоциации с сульфоарсенидами и мелких размеров зерен. На горизонтах 1580, 1569 и 1560 м значительная доля сульфостаннатов Cu и Fe присутствует в виде включений в касситерите, соответственно, в гравитационный концентрат они попадают как совместно с касситеритом, так и в ассоциации с арсенопиритом, лёллингитом и сульфидами. РРС и гравитационное обогащение не позволяют эффективно разделить «касситеритовые» и «сульфостаннатные» ассоциации. Дальнейшее разделение путем применения гравитационных и флотационных методов

приводит к концентрированию сульфостаннатов Cu и Fe в тонких фракциях совместно с сульфидами Cu, арсенипиритом и лёллингитом. Касситеритовые концентраты содержат сульфостаннаты Cu и Fe в основном, в виде включений в касситерите. При пирометаллургическом воздействии на черновые гравиконцентраты включения сульфостаннатов Cu и Fe в касситерите сохраняются. Флотация продукта после винтового шлюза позволяет получить сульфидный концентрат, обогащенный сульфостаннатами Cu и Fe.

ОБСУЖДЕНИЕ

Объекты-аналоги

Ближайшими аналогами изученного месторождения по присутствию в рудах парагенезиса касситерита со станнин-моусонит-станноидит-борнит-халькопиритовой минерализацией и висмутовыми сульфосолями являются месторождения Хингано-Олонойского района на Дальнем Востоке (Хинганское, Верхнее, Каменистое). Хинганское оловорудное месторождение разрабатывалось с 1946 по 2005 гг., в 2006 г. добыча была прекращена. Верхнее месторождение было открыто в 1956 г., а его отработка прекращена в 1990-е гг. Каменистое месторождение было открыто в 1978 г., геологические работы по его изучению проведены в 1979–1990 гг. наземными и подземными выработками. Эксплуатационные работы на месторождении Каменистое не проводились. Эти месторождения локализованы в области постколлизийной тектоно-магматической активизации и генетически связаны с субаэральными излияниями и экструзиями риолитов. Хинганское месторождение приурочено к центральной части вулканотектонической структуры, продуктивный парагенезис относится к топаз-слюдистым грейzenам. Верхнее и Каменистое месторождения расположены вблизи контакта вмещающих вулканитов и пород фундамента, прорванных интрузиями гранитоидов. Здесь развиты топаз-слюдистые грейzenы с оторочками кварц-турмалиновых и хлоритовых метасоматитов (Коростелев и др., 2000). Вещественный состав руд и метасоматитов этих месторождений отличается высокими концентрациями F, который входит в состав флюорита и топаза, а также повышенным содержанием In и редких металлов (Коростелев и др., 2000).

Подобно месторождениям Хингано-Олонойского района Правоурмийское месторождение так-

же локализовано в нижнемеловой вулканотектонической постройке, сложенной, преимущественно, риолитами, прорванными кислыми интрузиями. Считается, что эти постройки являются частями одной крупной Сунхуацян-Баджальской (Хингано-Охотской) вулканоплутаногенной системы (Забродин, 2018). Рудная минерализация перечисленных объектов приурочена к кварц-мусковитовым, кварц-биотитовым, кварц-топазовым, кварц-турмалиновым грейzenами и хлорит-серицитовым метасоматитам (табл. 1). Рудные ассоциации имеют черты сходства, в том числе повышенные концентрации Zn в сульфостаннатах. С описанными геологическими структурами в Баджальском рудном районе связан ряд рудопроявлений и точек оловянной минерализации (Олимпийское и др.), часть из которых недоразведаны. Вероятно, в них следует ожидать сходную минералогическую руд.

Химические особенности сульфостаннатов

Химический состав станнина, моусонита и станноидита в рудах Правоурмийского месторождения непостоянен. Формулы отличаются от стехиометрических. Состав изученных нами сульфостаннатов Cu и Fe сходен с составом станнина и моусонита, опубликованным ранее (Chikisheva et al., 2019). На диаграмме (рис. 12) показано, что станнин, моусонит, станноидит и халькопирит формируют область составов с переменными содержаниями Cu, Fe и Sn. Переменный состав сульфидов указывает на их образование в результате распада твердого раствора (Добровольская и др., 2008).

Помимо основных компонентов, станноидит, станнин и моусонит могут содержать некоторое количество Zn. Количество Zn в станноидите Правоурмийского месторождения варьирует (мас. %) от 1.48 (Курков и др., 2022ф; Chikisheva et al., 2019) до 2.67 мас. % (табл. 5), в моусоните – от 0.85 до 1.19 мас. % (табл. 5). Станноидит с примесью Zn 3.51–3.90 мас. % описан на Хинганском месторождении (Коростелев и др., 2000). Более низкие содержания Zn (0.39–0.55 мас. %) зафиксированы в станноидите Верхнего месторождения (Коростелев и др., 2000). В составе станнина из месторождения Пыр-какай (Чукотка) примесь Zn достигает 3.74 мас. % (Белогуб и др., 2022ф).

Ранее было экспериментально показано, что станноидит, содержащий 3 мас. % Zn, разлагается на борнит, станнин и халькопирит примерно при температуре 500 °C, а станноидит без Zn стабилен

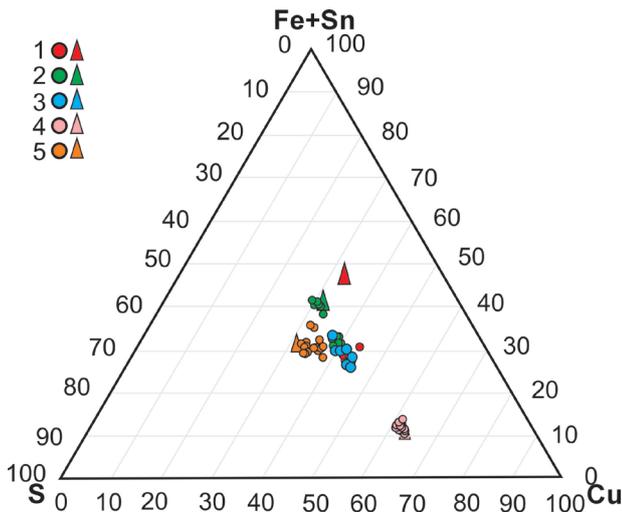


Рис. 12. Сравнительный состав минералов их руд Правоурмийского месторождения (треугольники – идеальный состав, круги – реальные минералы): 1 – моусонит; 2 – станнин (Chikisheva et al., 2019); 3 – сульфостаннаты Cu и Fe – станноидит, станнин, моусонит (наши данные); 4 – борнит; 5 – халькопирит (Chikisheva et al., 2019).

Fig. 12. Comparative composition of some minerals from the Pravaya Urma deposit (triangles – ideal composition, circles – real minerals): 1 – mawsonite; 2 – stannite (Chikisheva et al., 2019); 3 – Cu and Fe sulfostannates – stannoidite, stannite, mawsonite (our data); 4 – bornite; 5 – chalcopyrite (Chikisheva et al., 2019).

до 800 °C (Lee et al., 1975). Температурный диапазон стабильности цинксодержащего станноидита может сильно варьировать в зависимости от содержания Zn (Lee et al., 1975). Экспериментальными данными также доказано, что температура 462 ± 5 °C является критической существования твердого раствора халькопирита со станнином, выше которой халькопирит может содержать в твердом растворе станин до 39 мас. %, в то время как ниже этой температуры – менее 3 мас. % (Мох, 1975). Станноидит устойчив при температуре ниже 410 °C, а в ассоциации с борнитом – выше 385 °C (Чвилева и др., 1988) Установлено также, что образование ассоциации моусонит, станноидит, борнит и халькопирит происходит в условиях более высокой фугитивности S, нежели ассоциации станнин, станноидит, борнит и халькопирит (Lee et al., 1975).

Наличие моусонита и станноидита в ассоциации с халькопиритом и борнитом в рудах, повышенные концентрации Zn в станноидите Правоурмийского месторождения можно трактовать в пользу средних температур (ниже 500 °C, но выше 385 °C) формирования ассоциации станноидит-моусонит-

халькопирит-борнит. Отсутствие станнина на более глубоких горизонтах (1580, 1569 и 1560 м) указывает на возрастание фугитивности S с глубиной.

Вертикальная минералогическая зональность

Вертикальная зональность на Правоурмийском месторождении, проявленная в уменьшении содержания касситерита и увеличении доли сульфостаннатов Cu и Fe с глубиной на горизонтах 1600, 1580, 1569 и 1560 м, может быть связана с разной интенсивностью тектонического напряжения. Периоды сжатия неоднократно сменялись периодами относительного покоя или слабого растяжения, сопровождавшимися поступлением новых порций рудоносных растворов. На глубоких и самых верхних горизонтах стрессовый процесс был проявлен менее значительно (Семеняк и др., 2013).

Станнин, найденный предшественниками (Чикишева, 2021; Семеняк, Недашковский, 1991) и изученный нами в технологических продуктах, полученных из смешанных руд, замещается моусонитом и станноидитом. Касситерит с глубиной встречается реже, становится зональным. На горизонтах 1600, 1580, 1569 и 1560 м он образует более сложные сростки с жильными минералами, сульфидными, сульфидными Cu, сульфостаннатами Cu и Fe, содержит включения арсенопирита, халькопирита, борнита, станноидита. Увеличивается количество вольфрамит (ферберита) на горизонтах 1532 м и ниже. Подобная минералогическая зональность описана на вольфрам-оловянном месторождении Тигриное (Дальний Восток), где с глубиной наблюдалось уменьшение доли касситерита и увеличение – станнина от горизонта 770 м к горизонту 850 м с последующим ростом доли касситерита от горизонта 850 м к горизонту 930 м. Состав вольфрамит с глубиной менялся от более марганцовистого к более железистому (Попов, Попова, 1992). Возрастание количества станнина с глубиной отмечалось и на Хетинском месторождении олова (Назарова и др., 1981).

Таким образом, некоторые объекты грейзеновой формации Дальнего Востока характеризуются увеличением роли сульфостаннатов Cu и Fe с глубиной и уменьшением роли касситерита, что может свидетельствовать о росте окислительного потенциала среды и сопряженном уменьшении активности сульфидной серы в объектах, генетически связанных с субэвральным и малоглубинным гранитоидным магматизмом.

Основные сложности при переработке руд

Ранее в рудах Правоурмийского месторождения установлено преобладание касситерита над сульфостаннатами Cu и Fe и вольфрамитом (Семеняк, Недашковский, 1991; Chikisheva et al., 2019, Курков и др., 2022ф), что подтверждается и нашими исследованиями. Среди сульфостаннатов Cu и Fe станнин и моусонит чаще встречались, чем станноидит (Чикишева, 2018). В рудах от горизонта 1600 м к горизонту 1560 м количество станноидита возрастает, и он преобладает над моусонитом. Станнин определен только в одном случае в гравитационном концентрате, полученном из смешанных руд.

Форма, размер зерен, состав минералов Sn и результаты минералогического анализа технологических продуктов указывают на необходимость применения многостадийного дробления с выделением промежуточных продуктов, гравитационного обогащения и последующей селективной флотации промпродуктов для разделения касситерита и сульфостаннатов Cu и Fe и наиболее полного извлечения Sn из руд. При этом следует учитывать возможность переизмельчения и ошламования касситерита (Курков и др., 2022ф). С другой стороны, при недостаточном дроблении касситерит может уходить в хвосты в сростках с нерудными минералами и в виде включений в них, а при использовании флотационных методов – с арсенопиритом и лёллингитом (Чикишева, Прокопьев и др., 2018). Сульфостаннаты Cu и Fe ввиду тесных сростаний с сульфидами Cu и минералами As при проведении флотации будут извлекаться в сульфидный концентрат с высоким содержанием As (Чикишева и др., 2018). В опытах по прокаливанию черновых гравиконоцентратов в атмосфере воздуха сульфостаннаты Cu и Fe сохранялись во включениях в касситерите.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные формы нахождения Sn на Правоурмийском месторождении – касситерит и сульфостаннаты Cu и Fe (станноидит, моусонит, станнин). Медь концентрируется в сульфостаннатах, халькопирите, борните, халькозине, штрмейерите, виттихените и блеклых рудах. Серебро, которое также входит в состав сульфидов (штрмейерит), образует изоморфную примесь в халькозине, борните, виттихените и блеклых рудах, также обнаружено в самородной форме. Индий присутствует в форме рокезита. Сурьма – в форме тетраэдрита. Широ-

ко распространены самородный Bi и виттихенит. Вольфрам заключен в вольфрамите, в том числе ферберите.

Вертикальная минералогическая зональность на Правоурмийском месторождении проявлена в уменьшении доли касситерита и увеличении доли сульфостаннатов Cu и Fe с глубиной на горизонтах 1600, 1580, 1569 и 1560 м, ниже такая зональность не прослеживается. В пределах этих горизонтов установлены только моусонит и станноидит с преобладанием последнего с глубиной. Касситерит на горизонтах 1600, 1580, 1569 и 1560 м находится в сложных сростаниях и содержит многочисленные включения сульфидов Cu, сульфидов Cu и Fe, сульфостаннатов Cu и Fe. Глубже количество касситерита уменьшается. Вертикальная зональность связана с увеличением окислительного потенциала и уменьшением фугитивности серы в рудообразующих флюидах в верхних горизонтах месторождения относительно нижних.

Основные потери Sn в хвостах обогащения связаны с переизмельчением касситерита и сростков сульфостаннатов Cu и Fe с халькопиритом, борнитом, халькозином, арсенопиритом и лёллингитом. При флотации хвостов сульфостаннаты Cu и Fe концентрируются в медном сульфидном концентрате. По мере продвижения отработки горизонтальными выработками в пределах горизонтов 1600, 1580, 1569 и 1560 м и соответственного увеличения доли сульфостаннатов Cu и Fe среди форм Sn, проблема недоизвлечения Sn в форме сульфостаннатов Cu и Fe будет возрастать как из-за их склонности образовывать тесные ассоциации с арсенопиритом, лёллингитом и сульфидами, так и в связи с мелкими размерами их зерен.

ЛИТЕРАТУРА

Алексеев В.И. (1987) Структурные условия локализации оловоносных метасоматитов на одном из месторождений Баджалского рудного района (Приамурье). *Записки ЛГИ им. Г.В. Плеханова*, 112, 51–56.

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 / Минералогия месторождений Дальнего Востока. Владивосток, ДВО АН СССР, 50–57.

- Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Рожкова Е.А., Блинов И.А., Рассомахин М.А. (2022ф) Вещественный состав руд месторождения Пыркакай. Информационный отчет. Миасс, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 73 с.
- Болотников А.Ф., Кравченко Н.С., Крутов Н.К. (1975) Магматизм и рудоносность Баджальского района. Хабаровск, ДВИМС, 319 с.
- Бондаренко Е.И. (1979) Радиологический возраст вулканоплутонических ассоциаций и оруденения Баджальской зоны / Закономерности формирования эндогенной минерализации Дальнего Востока. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 101–150.
- Брусницын А.И., Панова Е.Г., Смоленский В.В. (1993) Находка гранитов литий-фтористого геохимического типа в пределах Верхнеурмийского рудного узла. *Известия вузов. Геология и разведка*, (6), 150–151.
- Гавриленко В.В., Ефименко С.А., Ткаченко Г.А., Панова Е.Г., Погребс Н.А. (1992) Геолого-структурные и минералого-геохимические особенности Правоурмийского оловорудного месторождения. *Геология рудных месторождений*, (6), 34–47.
- Гавриленко В.В., Панова Е.Г. (2001) Геохимия, генезис и типоморфизм минералов месторождений олова и вольфрама. СПб, Невский курьер, 256 с.
- Гоневчук В.Г. (2002) Оловоносные системы Дальнего Востока: магматизм и рудогенез. Владивосток, Дальнаука, 297 с.
- Гоневчук В.Г., Семеняк Б.И., Ишихара С. и др. (1998) Возраст оловоносных грейзенов Приамурья и некоторые вопросы генезиса оловянной минерализации (России). *Геология рудных месторождений*, 40(4), 326–335.
- Гоневчук В.Г., Семеняк Б.И., Коростелев П.Г. (2000) Хингано-Охотский металлогенический пояс в концепции террейнов. Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток, Дальнаука, 1, 35–54.
- Гульбин Ю.Л., Евангулова Е.Б. (1987) Гидротермально-метасоматические образования Правоурмийского месторождения. *Записки ЛГИ им. Г.В. Плеханова*, 112, 39–50.
- Забродин В.Ю. (2018) Структура и эволюция Баджальского вулканоплутонического ареала (Дальний Восток). *Региональная геология и металлогения*, (75), 49–59.
- Зайков В.В., Херрингтон Р. (1998) Моусонит из продуктов субмарийного окисления Молодежного медноколчеданного месторождения (Южный Урал). *Уральский минералогический сборник*, (8), 26–30.
- Изоитко В.М. (1989) Технологическая минералогия вольфрамовых руд. Л., Наука, 232 с.
- Коваленкер В.А., Некрасов И.Я., Малов В.С. (1986) Минералогия и парагенезисы сульфостаннатов Си и Fe в золото-серебряных месторождениях. *Геология рудных месторождений*, (3), 67–84.
- Колотов С.В., Гмыра В.Г. (1990) Редкие минералы Молодежного медноколчеданного месторождения. Ежегодник-1989. Свердловск, ИГТ УрО АН СССР, 80–82.
- Коростелев В.Ю., Семеняк Б.И., Демашов С.Б., Кокорин А.М., Кокорина Д.К., Недашковский А.П., Синяков Е.Я. (2000) Некоторые особенности состава руд оловянных месторождений Хингано-Олонойского района / Рудные месторождения континентальной окраины. Владивосток, Дальнаука, 2(1), 202–225.
- Коростелев П.Г., Гоневчук В.Г., Гореликова Н.В., Екимова Н.И., Кононов В.В., Орехов А.А., Семеняк Б.И., Сучков В.И. (2016) Оловянно-редкоземельные грейзены Солнечного касситерит-силикатного месторождения (Дальний Восток, Россия). *Тихоокеанская геология*, 35(1), 66–80.
- Кривовичев В.Г., Брусницын А.И., Зайцев А.Н. (1996) Абсолютный возраст и геохимические особенности гранитов Верхнеурмийского массива (Приамурье, Дальний Восток). *Геохимия*, (2), 106–111.
- Крымский Р.Ш., Гавриленко В.В., Беляцкий Б.В., Смоленский В.В., Левский Л.К. (1997) Возраст и генезис W-Sn минерализации Верхнеурмийского рудного поля (Приамурье) по Sm-Nd и Rb-Sr изотопным данным. *Петрология*, 5(5), 552–560.
- Курков А.В., Ожогина Е.Г., Аввакумова Д.С., Жукова В.Е., Кривошеков Н.Н., Рассулов В.А., Шувалова Ю.Н., Каплин А.И., Кыджды М.В., Гришаев Г.С., Фокин М.А. (2022ф) Отчет I периода «Проведение технологических исследований на представительной пробе руды Правоурмийского месторождения». М., ВИМС, 54 с.
- Лишневский Э.Н., Гершаник С.Ю. (1992) Объемное строение Баджальского оловорудного района в Приамурье. *Геология рудных месторождений*, 34(1), 80–94.
- Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П., Третьяков Г.А., Мелекесцева И.Ю., Сафина Н.П., Белогуб Е.В., Ларж Р.Р., Данюшевский Л.В., Целуйко А.С., Gladkov A.G., Крайнев Ю.Д. (2014) Токсичные элементы в колчеданообразующих системах. Екатеринбург, РИО УрО РАН, 340 с.
- Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых (оловянные руды) (2007). М., ФГУ ГКЗ, МПР России, 42 с.
- Митрофанов Н.П., Руднев В.В. (2014) Состояние и использование минерально-сырьевой базы вольфрама Российской Федерации. *Отечественная геология*, (4), 3–10.
- Молошаг В.П., Викентьев И.В., Гуляева Т.Я., Тесалина С.Г. (2005) Борнитовые руды колчеданных месторождений Урала. *Литосфера*, (3), 99–116.
- Назарова А.С., Рябева Е.Г., Юркина К.В., Зенкина Н.И. (1981) Исследование станнина из месторождений касситерит-силикатной и касситерит-сульфидной формаций. *Новые данные о минералах СССР*, 29, 86–93.
- Огнянов Н.В. (1986) Геология оловорудных районов и месторождений Хингано-Охотской оловоносной области / Геология оловорудных месторождений СССР. М., Недра, т. 2, кн. 1, 340–399.

- Плотинская О.Ю., Грознова Е.О., Коваленкер В.А., Новоселов К.А., Зелтманн Р. (2009) Минералогия и условия образования руд Березняковского рудного поля (Южный Урал, Россия). *Геология рудных месторождений*, 51(5), 414–443.
- Попов В.А., Попова В.И. (1992) Методика и результаты минералогического картирования вольфрамо-оловянного месторождения Тигриное (Приморье). Екатеринбург, Наука, 92 с.
- Попова В.И., Попов В.А., Коростелев 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.
- Прокин В.А., Нечеухин В.М., Буслаев Ф.П. и др. (1988) Медноколчеданные месторождения Урала. Геологическое строение. Свердловск, УрО АН СССР, 240 с.
- Пшеничный Г.Н. (1975) Гайское медноколчеданное месторождение Южного Урала. М., Наука, 187 с.
- Родионов С.М. (2005) Металлогения олова Востока России. М., Наука, 327 с.
- Сафина Н.П., Обухов А.А., Блинов И.А. (2015) Минералы олова и серебра из Николаевского золоторудного месторождения (Енисейский край, Красноярский край, Россия). *Минералогия*, (2), 3–8.
- Семяк Б.И. (1983) О «цвитерах» Верхнеурмийского рудного узла / Рудные месторождения Дальнего Востока. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 20–25.
- Семяк Б.И. (1987) Зональность Верхнеурмийского рудного узла / Глубинность распространения и элементы зональности эндогенной минерализации Дальнего Востока. Владивосток, ДВО АН СССР, 155–163.
- Семяк Б.И. (2014) Текстурно-структурные особенности руд Правоурмийского месторождения как отражение условий его генезиса (Хабаровский край, Россия). *Тихоокеанская геология*, 33(4), 28–41.
- Семяк Б.И., Ефименко С.А., Коростелев П.Г., Ткаченко Г.А. (1988) Металлогения Баджальского рудного района / Металлогения главных оловорудных районов Дальнего Востока. Владивосток, ДВО АН СССР, 57–84.
- Семяк Б.И., Недашковский А.П. (1991) Сульфостаннаты Си и Fe и железа в рудах Правоурмийского месторождения. *Тезисы конференции «Рудные месторождения Дальнего Востока – минералогические критерии прогноза, поисков и оценки»*. Владивосток, ДВГИ ДВО АН СССР, 11–12.
- Семяк Б.И., Недашковский А.П., Никулин Н.Н. (1994) Минералы индия в рудах Правоурмийского месторождения (Дальний Восток России). *Геология рудных месторождений*, 36(3), 230–236.
- Семяк Б.И., Пахомова В.А., Залищак Б.Л., Коростелев П.Г. (1997) Некоторые особенности молибденовой минерализации Правоурмийского месторождения (Приамурье). *Тихоокеанская геология*, 16(4), 102–113.
- Семяк Б.И., Родионов С.М., Гоневчук В.Г., Коростелев П.Г., Кокорин А.М. (2006) Правоурмийское месторождение / Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Владивосток, Дальнаука, кн. 2, с. 604–611.
- Ханчук А.И., Голозубов В.В., Бялобжецкий С.Г., Попеко Л.И., Родионов С.М. (2006) Кратоны и орогенные пояса Востока России / Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Владивосток, Дальнаука, кн. 1, с. 93–225.
- Цветков Л.П. (1981) Особенности кристалло-морфологической зональности Пыркакайских и Пытлянских оловорудных штокверков на Чукотке. *Записки ВМО*, 110(5), 559–569.
- Чвилева Т.Н., Безсмертная М.С., Спиридонов Э.М., Агроскин А.С., Папаян Г.В., Виноградова Р.А., Лебедева С.И., Завьялов Е.Н., Филимонова А.А., Петров В.К., Раутиан Л.П., Смешникова О.Л. (1988) Справочник-определитель рудных минералов в отраженном свете. М., Недра, 504 с.
- Чижишева Т.А., Прокопьев С.А., Прокопьев Е.С., Карпова А.Г. (2018) Минералого-технологические особенности оловянной руды Правоурмийского месторождения (Хабаровский край). *Разведка и охрана недр*, (10), 55–59.
- Чижишева Т.А., Прокопьев С.А., Карпова А.Г., Прокопьев Е.С., Демин И.А. (2018) Минералого-технологические особенности касситерита и вольфрамита Правоурмийского месторождения и возможность их комплексного извлечения из руды / Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии. Благовещенск, ИГиП ДВО РАН, 103–106.
- Чижишева Т.А. (2021) Минералого-технологические характеристики руды Правоурмийского месторождения олова (Хабаровский край). Дисс. на соиск. степ. канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 139 с.
- Чистякова Н.И., Нечелюстнов Г.Н., Завьялов Е.Н. (1982) Станноидит из Невского оловорудного месторождения. *Минералогический журнал*, 4(4), 58–66.
- Шувалов В.Б., Азина Г.Х., Сапин В.И. (1990) Станноидит из оловянных руд Центрального, Хинганского и Карадубского месторождений / Минеральные ассоциации месторождений олова и вольфрама на Дальнем Востоке. Владивосток, ДВГИ ДВО АН СССР, 116–120.
- Юргенсон Г.А. (2021) Редкие земли в руде Букуинского месторождения вольфрама (Восточное Забайкалье). *Литосфера*. 21(1), 90–102. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-1-90-102>
- Alekseev V.I., Marin Yu.B. (2021) Ferrokösterite and kösterite in greisens associated with lithium–fluorine granites of the Russian Far East. *Geology of Ore Deposits*, (8), 850–856. <https://doi.org/10.1134/S107570152108002X>
- Antony J.W. et al. (1990) Handbook of mineralogy. Vol. V. Tucson, Mineral Date Publishing, 600 p.
- Barriga F.J.A.S., Carvalho D. (eds.) (1997) Geology and VMS deposits of the Iberian Pyrite Belt. Guidbook series. Vol. 27. Lisbon, 192 p.
- Chikisheva T., Prokopyev S., Kolesov E., Kilin V., Karpova A., Prokopyev E., Tukuser V. (2019) Mineralogical

and technological features of tin minerals at Pravourmiysky deposit (Khabarovsk region). *14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2019)*. Belgorod, Belgorod State Technological University, 49–52.

Lee M.S., Takenouchi S., Imai H. (1975) Syntheses of stannoidite and mawsonite and their genesis in ore deposits. *Economic Geology*, 70(4), 834–843. <https://doi.org/10.2113/econgeo.70.4.834>

Moh G. (1975) Tin-containing mineral systems. Part II: Phase relations and mineral assemblages in the Cu-Fe-Zn-Sn-S system. *Chemie der Erde*, 34, 1–61.

REFERENCES

Alekseev V.I. (1987) Structural localization conditions of Sn-bearing metasomatites at a deposit of the Badzhal ore region (Amur region). *Zapiski LGI im. G.V. Plekhanova (Proceedings of Plekhanov Leningrad State University)*, 112, 51–56. (in Russian)

Alekseev V.I., Marin Yu.B., Gavrilenko V.V. (2019) Rare-metal mineralization of Sn occurrences in the area of Li–F granites (Verkhneurmitsky ore cluster, Amur region). *Russian Journal of Pacific Geology*, 38(2), 120–131. <https://doi.org/10.1134/S1819714019020027>

Alekseev V.I., Marin Yu.B. (2021) Ferrokösterite and kösterite in greisens associated with lithium–fluorine granites of the Russian Far East. *Geology of Ore Deposits*, (8), 850–856. <https://doi.org/10.1134/S107570152108002X>

Antony J.W. et al. (1990) Handbook of mineralogy. Vol. V. Tucson, Mineral Date Publishing, 600 p.

Banshchikova T.S., Kryukova G.V. (1988) Typomorphic features of minerals of the Pravaya Urma deposit. In: Mineralogy of deposits of the Far East. Vladivostok, DVO AN SSSR, 50–57. (in Russian)

Barriga F.J.A.S., Carvalho D. (eds.) (1997) Geology and VMS deposits of the Iberian Pyrite Belt. Guidbook series. Vol. 27. Lisbon, 192 p.

Belogub E.V., Novoselov K.A. (2017) Unpublished report on mineral composition of ores from the Pyrkakai deposit. Miass, IMin UrO RAN, 50 p. (in Russian)

Bolotnikov A.F., Kravchenko N.S., Krutov N.K. (1975) Magmatic and ore potential of the Badzhalsky region. Khabarovsk, DVIMS, 319 p. (in Russian)

Bondarenko E.I. (1979) Radiological age of volcano-plutonic associations and mineralization of the Badzhal zone. In: Principles of formation of endogenic mineralization of the Far East. Vladivostok, DVNTs AN SSSR, 101–150. (in Russian)

Brusnitsyn A.I., Panova E.G., Smolensky V.V. (1993) The finding of Li–F granites within the Upper Urma ore cluster. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka (Bulletin of Universities. Geology and Exploration)*, (6), 150–151. (in Russian)

Chikisheva T.A., Prokopyev S.A., Prokopyev E.S., Karpova A.G. (2018) Mineralogical and technological

features of Sn ore of the Pravaya Urma deposit (Khabarovsk krai). *Razvedka i okhrana nedr (Prospect and Protection of Mineral Resources)*, (10), 55–59. (in Russian)

Chikisheva T.A., Prokopyev S.A., Karpova A.G., Prokopyev E.S., Demin I.A. (2018) Mineralogical and technological features of cassiterite and wolframite of the Pravaya Urma deposit and the possibility of their integrated extraction from ore. In: Problems of Geology and Integrated Development of Natural Resources of East Asia. Blagoveshchensk, IGI DVO RAN, 103–106. (in Russian)

Chikisheva T., Prokopyev S., Kolesov E., Kilin V., Karpova A., Prokopyev E., Tukuser V. (2019) Mineralogical and technological features of tin minerals at the Pravourmiysky deposit (Khabarovsk region). *14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2019)*. Belgorod, Belgorod State Technological University, 49–52.

Chikisheva T.A. (2021) Mineralogical and technological characteristics of ore of the Pravaya Urma Sn deposit (Khabarovsk krai). Dissertation of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences. Irkutsk, 139 p. (in Russian)

Chistyakova N.I., Nechelustnov G.N., Zavyalov E.N. (1982) Stannoidite from the Nevskoe Sn deposit. *Mineralogicheskii zhurnal (Mineralogical Journal)*, 4(4), 58–66. (in Russian)

Chvileva T.N., Bezsmertnaya M.S., Spiridonov E.M. et al. (1988) Handbook of ore minerals in reflected light. Moscow, Nedra, 504 p. (in Russian)

Gavrilenko V.V., Efimenko S.A., Tkachenko G.A., Panova E.G., Pogrebs N.A. (1992) Geological-structural and mineralogical-geochemical features of the Pravaya Urma Sn deposit. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy (Geology of Ore Deposits)*, (6), 34–47. (in Russian)

Gavrilenko V.V., Panova E.G. (2001) Geochemistry, genesis and typomorphism of minerals from Sn and W deposits. St. Petersburg, Nevsky kur'er, 256 p. (in Russian)

Gonevchuk V.G. (2002) Sn-bearing systems of the Far East: magmatism and ore genesis. Vladivostok, Dal'nauka, 297 p. (in Russian)

Gonevchuk V.G., Semenyak B.I., Ishihara S. et al. (1998) Age of Sn-bearing greisens of the Amur region and some issues of genesis of Sn mineralization (Russia). *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy (Geology of Ore Deposits)*, 40(4), 326–335. (in Russian)

Gonevchuk V.G., Semenyak B.I., Korostelev P.G. (2000) Khingan-Okhotsk metallogenic belt in the terrane concept. Ore deposits of continental margins. Vladivostok, Dal'nauka, 1, 35–54. (in Russian)

Gulbin Yu.L., Evangulova E.B. (1987) Hydrothermal-metasomatic complexes of the Pravaya Urma deposit. *Zapiski LGI im. G.V. Plekhanova (Proceedings of Plekhanov Leningrad State University)*, 112, 39–50. (in Russian)

Izoitko V.M. (1989) Technological mineralogy of Sn ores. Leningrad, Nauka, 232 p. (in Russian)

Khanchuk A.I., Golozubov V.V., Byalobzhesky S.G., Popeko L.I., Rodionov S.M. (2006) Cratons and orogenic

- belts of the East Russi. In: Geodynamics, magmatism and metallogeny of East Russia. Vladivostok, Dal'nauka, book 1, p. 93–225. (in Russian)
- Kolotov S.V., Gmyra V.G. (1990) Rare minerals of the Molodezhnoe copper massive sulfide deposit. Yearbook-1989. Sverdlovsk, IGG UrO AN SSSR, 80–82. (in Russian)
- Korostelev V.Yu., Semenyak B.I., Demashov S.B., Kokorin A.M., Kokorina D.K., Nedashkovsky A.P., Sinyakov E.Ya. (2000) Some features of ore composition of Sn deposits of the Khingan-Olonoy region. In: Ore deposits of continental margin. Vladivostok: Dal'nauka, 2(1), 202–225. (in Russian)
- Korostelev P.G., Gonevchuk V.G., Gorelikova N.V., Ekimova N.I., Kononov V.V., Orekhov A.A., Semenyak B.I., Suchkov V.I. (2016) Tin-rare earth element greisens of the Solnechnoe cassiterite-silicate deposit, Russian Far East. *Russian Journal of Pacific Geology*, 35(1), 63–77. <https://doi.org/10.1134/S181971401601005X>
- Kovalenker V.A., Nekrasov I.Ya., Malov V.S. (1986) Mineralogy and parageneses of Cu and Fe sulfostannates in Au-Ag deposits. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy (Geology of Ore Deposits)*, (3), 67–84. (in Russian)
- Krivovichev V.G., Brusnitsyn A.I., Zaitsev A.N. (1996) Age and geochemical features of granites of the Upper Urma pluton (Amur region, Far East). *Geokhimiya (Geochemistry)*, (2), 106–111. (in Russian)
- Krymsky R.Sh., Gavrilenko V.V., Belyatsky B.V., Smolensky V.V., Levskiy L.K. (1997) Age and genesis of W-Sn mineralization of the Upper Urma ore field (Amur region) based on Sm-Nd and Rb-Sr isotopic data. *Petrologiya (Petrology)*, 5(5), 552–560. (in Russian)
- Kurkov A.V., Ozhogina E.G., Avvakumova D.S., Zhukova V.E., Krivoshchekov N.N., Rassulov V.A., Shuvalova Yu.N., Kaplin A.I., Kydzhy M.V., Grishaev G.S., Fokin M.A. (2022) Unpublished report on the first period “Conducting the technological research on a representative ore sample from the Pravaya Urma deposit”. Moscow, VIMS, 54 p. (in Russian)
- Lee M.S., Takenouchi S., Imai H. (1975) Syntheses of stannoidite and mawsonite and their genesis in ore deposits. *Economic Geology*, 70(4), 834–843. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.70.4.834>
- Lishnevsky E.N., Gershanik S.Yu. (1992) Three-dimensional structure of the Badzhal Sn area in the Amur region. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy (Geology of Ore Deposits)*, 34(1), 80–94. (in Russian)
- Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Maslennikova S.P., Tretyakov G.A., Melekestseva I.Yu., Safina N.P., Belogub E.V., Large R.R., Danyushevsky L.V., Tseluiko A.S., Gladkov A.G., Krainev Yu.D. (2014) Toxic elements in massive sulfide systems. Yekaterinburg, RIO UrO RAN, 340 p. (in Russian)
- Methodological recommendations for the application of the Classification of deposit reserves and forecast resources of solid minerals (Sn ores) (2007) Moscow, FGU GKZ, MPR Rossii, 42 p. (in Russian)
- Mitrofanov N.P., Rudnev V.V. (2014) State and use of Sn mineral resource base in the Russian Federation. *Otechestvennaya geologiya (National Geology)*, (4), 3–10. (in Russian)
- Moh G. (1975) Tin-containing mineral systems. Part II: Phase relations and mineral assemblages in the Cu-Fe-Zn-Sn-S system. *Chemie Erde*, 34, 1–61.
- Moloshag V.P., Vikentyev I.V., Gulyaeva T.Ya., Tesalina S.G. (2005) Bornite ores of the Urals volcanic massive sulfide deposits. *Lithosphaera (Lithosphere)*, (3), 99–116. (in Russian)
- Nazarova A.S., Ryabeva E.G., Yurkina K.V., Zenkina N.I. (1981) Study of stannite from cassiterite-silicate and cassiterite-sulfide deposits. *Novye dannye o mineralakh SSSR (New Data on Minerals of the USSR)*, (29), 86–93. (in Russian)
- Ognyanov N.V. (1986) Geology of Sn regions and deposits of the Khingan-Okhotsk Sn-bearing region. In: Geology of Sn deposits of the USSR. Moscow, Nedra, vol. 2, book 1, 340–399. (in Russian)
- Plotinskaya O.Yu., Groznova E.O., Kovalenker V.A., Novoselov K.A., Zeltmann R. (2009) Mineralogy and formation conditions of ores in the Berezhnyakovskoe ore field, the Southern Urals, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 51(5), 414–443. <https://doi.org/10.1134/S1075701509050031>
- Popov V.A., Popova V.I. (1992) Methodology and results of mineralogical mapping of the Tigrinoe W-Sn deposit (Primorye). Yekaterinburg, Nauka, 92 p. (in Russian)
- Popova V.I., Popov V.A., Korostelev P.G., Orlovsky V.V. (2013) Mineralogy of ores of the Tigrinoe W-Sn deposit in Sikhote-Alin and prospects for its exploitation. Yekaterinburg, RIO UrO RAN, 132 p. (in Russian)
- Prokin V.A., Necheukhin V.M., Buslaev F.P. et al. (1988) Copper volcanic massive sulfide deposits of the Urals. Geological structure. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 240 p. (in Russian)
- Pshenichny G.N. (1975) Gai copper massive sulfide deposit in the Southern Urals. Moscow, Nauka, 187 p. (in Russian)
- Rodionov S.M. (2005) Metallogeny of Sn in the Russian East. Moscow, Nauka, 327 p. (in Russian)
- Safina N.P., Obukhov A.A., Blinov I.A. (2015) Tin and silver minerals from the Nikolaevsky gold deposit (Yenisei Ridge, Krasnoyarsk krai, Russia). *Mineralogiya (Mineralogy)*, (2), 3–8. (in Russian)
- Semenyak B.I. (1983) On zwitterites of the Upper Urma ore cluster. In: Ore deposits of the Far East. Vladivostok, DVNTs AN SSSR, 20–25. (in Russian)
- Semenyak B.I. (1987) Zoning of the Upper Urma ore cluster. In: Depth of distribution and elements of zoning of endogenic mineralization of the Far East. Vladivostok, DVO AN SSSR, 155–163. (in Russian)
- Semenyak B.I. (2014) Structure and texture of ores from the Pravourmiisky deposit in the Khabarovsk region of Russia as evidence for its genetic conditions. *Russian*

Journal of Pacific Geology, 33(8), 256–267. <https://doi.org/10.1134/S181971401404006X>

Semenyak B.I., Efimenko S.A., Korostelev P.G., Tkachenko G.A. (1988) Metallogeny of the Badzhal ore region. In: Metallogeny of main Sn regions of the Far East. Vladivostok, DVO AN SSSR, 57–84. (in Russian)

Semenyak B.I., Nedashkovsky A.P. (1991) Cu and Fe sulfostannates in ores of the Pravaya Urma deposit. *Tezisy konferentsii "Rudnye mestorozhdeniya Dal'nego Vostoka – mineralogicheskie kriterii prognoza, poiskov i otsenki" (Abstract of Conference "Ore Deposits of the Far East – Mineralogical Criteria for Forecast, Prospecting and Evaluation")*. Vladivostok, DVGI DVO SSSR, 11–12. (in Russian)

Semenyak B.I., Nedashkovsky A.P., Nikulin N.N. (1994) In minerals in ores of the Pravaya Urma deposit (Russian Far East). *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy (Geology of Ore Deposits)*, 36(3), 230–236. (in Russian)

Semenyak B.I., Pakhomova V.A., Zalishchak B.L., Korostelev P.G. (1997) Some features of Mo mineralization of the Pravaya Urma deposit (Amur region). *Tikhookeanskaya geologiya (Pacific Geology)*, 16(4), 102–113. (in Russian)

Semenyak B.I., Rodionov S.M., Gonevchuk V.G., Korostelev P.G., Kokorin A.M. (2006) Pravaya Urma deposit. In: Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Russian East. Vladivostok, Dal'nauka, 981 p. (in Russian)

Shuvalov V.B., Azina G.Kh., Sapin V.I. (1990) Stannoidite from Sn ores of the Tsentral'noe, Khingan and Karadub deposits. In: Mineral assemblages of Sn and W deposits in the Far East. Vladivostok, DVGI DVO AS USSR, 116–120. (in Russian)

Tsvetkov L.P. (1981) Features of crystal morphological zoning of the Pyrkakay and Pytlyan Sn stockworks in Chukotka. *Zapiski Vserossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva (Proceedings of the All-Union Mineralogical Society)*, 110(5), 559–569. (in Russian)

Yurgenson G.A. (2021) Rare earth elements in ores of the Bukuka Sn deposit (Eastern Transbaikalia). *Lithosfera (Lithosphere)*, 21(1), 90–102. (in Russian) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-1-90-102>

Zabrodin V.Yu. (2018) Structure and evolution of the Badzhal volcano-plutonic area (Far East). *Regional'naya geologiya i metallogeniya (Regional Geology and Metallogeny)*, (75). 49–59. (in Russian)

Zaykov V.V., Herrington R. (1998) Mawsonite from submarine oxidation products of the Molodezhnoe copper massive sulfide deposit (Southern Urals). *Uralskiy mineralogicheskyy sbornik (Uralian Mineralogical Collection)*, (8). 26–30. (in Russian)

Информация об авторах

Заботина Мария Владимировна – кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия; mary_7-88@mail.ru

Белогуб Елена Витальевна – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия; belogub@mineralogy.ru

Новоселов Константин Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия; const31@yandex.ru

Аширбаева Евгения Александровна – главный обогатитель, ООО «Белое Золото», ashirbaeva_ea@seligdar.ru

Евстихеев Константин Николаевич – главный технолог ООО «Правоурмийское», п. Горный, Хабаровский край, Россия

Рассомахин Михаил Анатольевич – младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Россия; miha_rassomahin@mail.ru

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

Information about the authors

Maria V. Zabolina – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Junior Researcher, South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia; mary_7-88@mail.ru

Elena V. Belogub – Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Key Researcher, South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia; belogub@mineralogy.ru

Konstantin A. Novoselov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher, South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia; const31@yandex.ru

Evgenia A. Ashirbaeva – chief enricher, "White Gold" LLC, ashirbaeva_ea@seligdar.ru

Konstantin N. Evstikhev – PJSC “Rusolovo” (LLC “Pravourmiysky”), Gorny settlement, Khabarovsk edge, Russia

Mikhail A. Rassomakhin – Junior Researcher, South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology
UB RAS, Miass, Russia; miha_rassomahin@mail.ru

Ivan A. Blinov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal
Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia, ivan_a_blinov@mail.ru

not corrected