

Микровключения и элементы-примеси в деревянистом олове месторождения Хета, Магаданская область

Петроченков Д. А.¹, Фомина М. И.², Чижова И. А.³

¹ МГРИ, г. Москва, Россия; ² ЦНИГРИ, г. Москва, Россия; ³ ИГЕМ РАН, г. Москва, Россия

Аннотация. Изучены микровключения и элементы-примеси в деревянистом олове месторождения Хета Магаданской области. Месторождение расположено в Хетинской вулкано-тектонической депрессии на пересечении крупных зон региональных глубинных разломов и относится к олово-сульфидному промышленному типу железисто-полиметалльно-оловянной формации. Электронно-микроскопическими исследованиями (РЭМ) в деревянистом олове установлены, предположительно, микровключения рутила, ильменита, кварца, алюмосиликатов, вольфрамит. Методом ЛА-ИСП-МС в деревянистом олове установлено 25 элементов-примесей с содержанием выше 1 мг/кг. Большинство элементов фиксируются в отдельных измерениях с содержанием меньше 10 мг/кг. В интервале 10–100 мг/кг установлены средние содержания К, Sc, Mn, Cu, Zn, Ga, Zr, Pb, Bi; в интервале 100–1000 мг/кг – Ti, Y, Sb; > 1000 мг/кг – Al, Fe, W. Математическими методами выявлены особенности распределения содержаний, корреляционные связи элементов-примесей; сделаны предположения о вхождении их в структуру касситерита и возможных микровключениях.

Ключевые слова: месторождения олова, деревянистое олово, касситерит, элементы-примеси, микровключения, Магаданская область.

Для цитирования: Петроченков Д. А., Фомина М. И., Чижова И. А. Микровключения и элементы-примеси в деревянистом олове месторождения Хета, Магаданская область. Руды и металлы. 2026. № 1. С. 71–85. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10005.

Microinclusions and impurity elements in woody tin from the Kheta deposit, Magadan Oblast

Petrochenkov D. A.¹, Fomina M. I.², Chizhova I. A.³

¹ Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia;

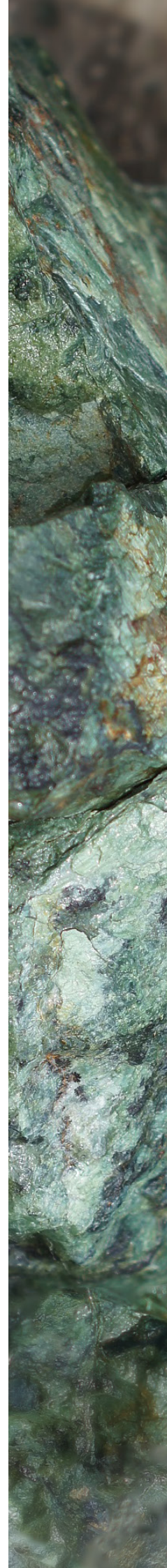
² Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, Russia;

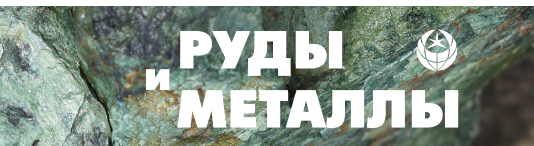
³ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Annotation. Microinclusions and impurity elements were studied in woody tin from the Kheta deposit in the Magadan Region. The ore deposit is situated within the Kheta volcanic-tectonic depression at an intersection of large zones of regional deep-seated faults and belongs to the tin-sulfide industrial type of the ferruginous-polymetallic-tin ore formation. Electron microscopic studies (SEM) of the woody tin revealed microinclusions of rutile, ilmenite, quartz, aluminosilicates, and wolframite. By the LA-ICP-MS technique, 25 impurity elements with the contents above 1 mg/kg were found in the woody tin. Most of the elements were recorded in rare measurements with the contents less than 10 mg/kg. In the range of 10–100 mg/kg, the average concentrations of K, Sc, Mn, Cu, Zn, Ga, Zr, Pb, and Bi were established; in the range of 100–1000 mg/kg, the Ti, Y, and Sb concentrations; and above 1000 mg/kg, the Al, Fe, and W ones. The concentration distribution features and correlations of the impurity elements were determined mathematically. Assumptions are made on the entry of these impurities into the cassiterite structure and on possible mineral microinclusions.

Keywords: tin deposits, woody tin, cassiterite, impurity elements, microinclusions, Magadan Region.

For citation: Petrochenkov D. A., Fomina M. I., Chizhova I. A. Microinclusions and impurity elements in woody tin from the Kheta deposit, Magadan Oblast. Rudy i metally (Ores and metals). 2026. No. 1. pp. 71–85. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10005.





Общие сведения

К деревянистому олову относятся кристаллические, скрытокристаллические радиально-лучистые, почковидные агрегаты касситерита. Месторождения с деревянистым оловом связаны с риолитовым типом редкометалльно-вольфрам-оловянной формации, силикатным и сульфидным типами железисто-полиметалльно-оловянной формации. Деревянистое олово достаточно широко представлено на месторождениях этих типов, а на ряде из них является основным источником олова. Ранее было изучено деревянистое олово месторождений Джалиндинское (Хабаровский край), Тыноокен (Чукотский АО), Доминион-Крик (Канада), относящихся к риолитовому типу [10]. На месторождении Хета также установлено значительное количество деревянистого олова. Месторождения образованы в жерловых фациях вулканов при низком давлении, высоких температурах рудных флюидов, насыщенных газами.

Месторождение Хета открыто Т. А. Боровским в 1939 г. (рис. 1, а). Оно расположено в Хетинской вулcano-тектонической депрессии, выполненной преимущественно кислыми вулканитами, прорванными крупными телами субвулканических гранитоидов верхнемелового возраста, на пересечении крупных зон региональных глубинных разломов СВ и СЗ направлений. Породы интенсивно каолинизированы, гидрослюдизированы, серицитизированы, метасоматически окварцованы и участками хлоритизированы. Хетинское месторождение представляет собой трубообразные залежи типа вулканических некков, сложенных взрывными брекчиями. Горизонтальное сечение месторождения 60×120 м, по вертикали оно прослежено на 150–200 м. Выделяются руды вкрапленные, прожилково-вкрапленные, прожилково-жилные, в виде коротких жилок и бананцы – касситеритовые столбы до 36×12 м с содержанием олова до 60 %, добывавшиеся штучами. Богатое оруднение приурочено к верхним горизонтам и с глубиной затухает [3].

Руды сложены несколькими минеральными ассоциациями, сформированными в три стадии: кварц-касситеритовую с хлоритом, суль-

фидную и карбонатно-флюоритовую. Минеральный состав руд следующий: главные – хлорит, кварц, пирит, сфалерит, станнин, касситерит, халькопирит, пирротин, карбонаты; второстепенные – галенит, арсенипирит, вольфрамит, серицит, марказит, шамозит, флюорит; редкие – фаматинит, самородные висмут и серебро, пираргирит, аргентит, полибазит, алуниит. На горизонте 874 м (в расщелке 46) отмечено необычное скопление самородной меди. Основная масса олова связана с касситеритом, в том числе и в виде деревянистого олова (рис. 2). С глубиной увеличивается количество станнина. Предполагается, что значительная часть касситерита образовалась в результате гидротермального разложения станнина. Месторождение относится к олово-сульфидному промышленному типу железисто-полиметалльно-оловянной формации. Аналогом ему может быть месторождение Ллаллагуа в Боливии [3, 8, 10].

Месторождение Хета отрабатывалось до 1953 г., в настоящее время законсервировано. Содержание Sn в добытых рудах составляло 0,82 %. В качестве попутных компонентов в рудах присутствуют: Zn 0,1–0,7 %; Cu 0,1–10 %; Pb 0,1–3,4 %; Bi до 0,5 %; Ag 33–134 г/т; In, Cd – 0,02–0,17 %; единичные пробы содержат W до 0,26 % и Au 0,2–1,4 г/т. С кислыми вулканитами месторождения Хета связаны сферолитовые образования халцедонов и агатов, которые используются в качестве декоративных образцов и ювелирно-поделочного материала (рис. 3).

На базе месторождения Хета и рудопроявлений Ирэганджа, Обзорное, Разведочное сформировались россыпи р. Правая Хета, протянувшейся с перерывами на 9 км, и её притоков – руч. Правого, Эташа, Белокаменного, Развилочного. Россыпи отработаны до 1952 г. (рис. 1, б–д), из них добыто 522 т олова. При отработке россыпей встречались самородки серебра до 30 г и висмута до 1560 г.

Несмотря на то, что на месторождении Хета деревянистое олово составляет существенный процент оловянных руд, а в россыпях является определяющим, оно остаётся практически не изученным. С помощью проведённых авторами исследований были определены ми-

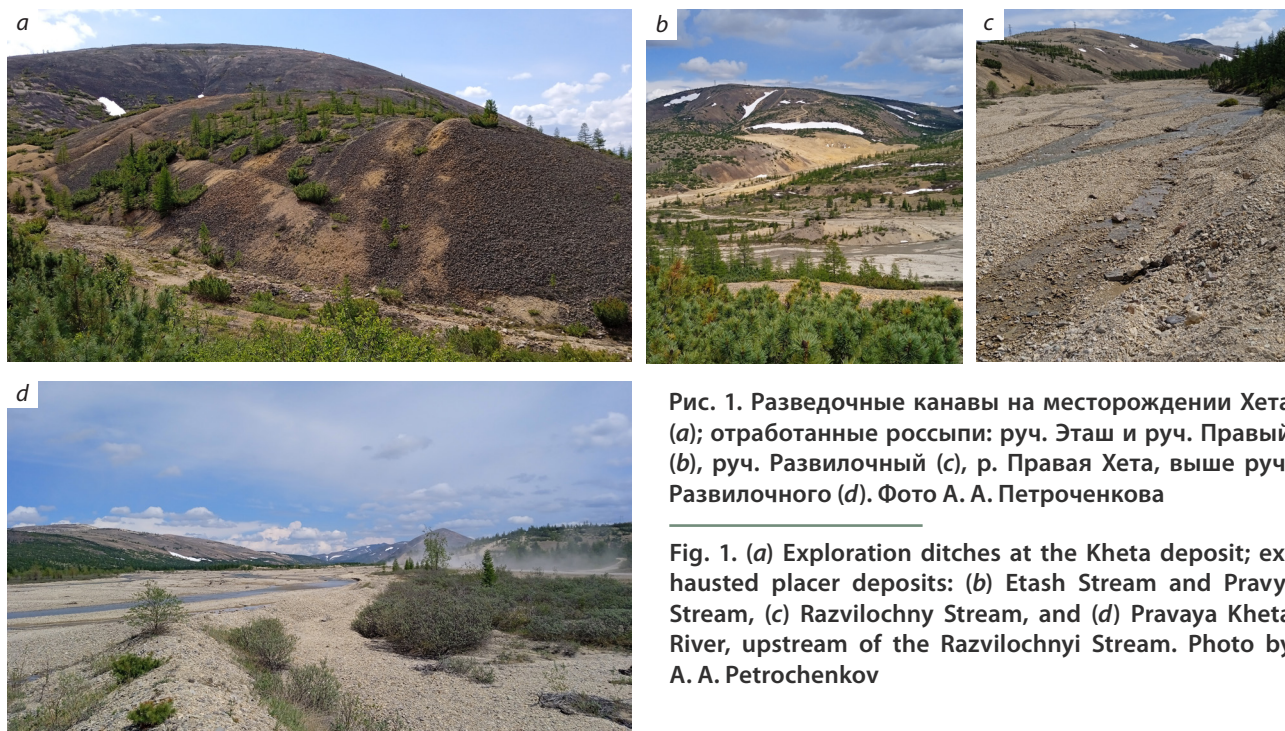


Рис. 1. Разведочные канавы на месторождении Хета (а); отработанные россыпи: руч. Эташ и руч. Правый (b), руч. Развилочный (c), р. Правая Хета, выше руч. Развилочного (d). Фото А. А. Петроченкова

Fig. 1. (a) Exploration ditches at the Kheta deposit; exhausted placer deposits: (b) Etash Stream and Pravyy Stream, (c) Razvilochny Stream, and (d) Pravaya Kheta River, upstream of the Razvilochny Stream. Photo by A. A. Petrochenkov

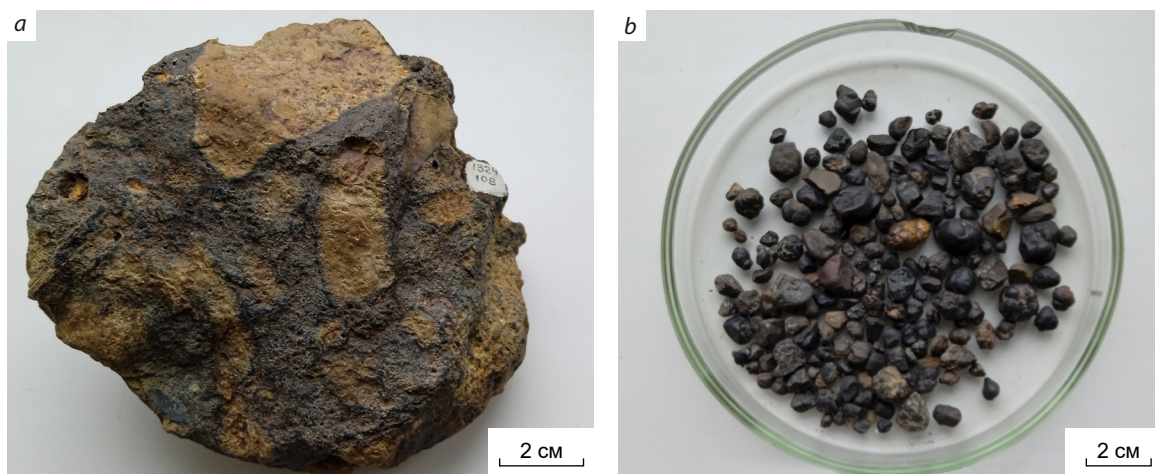


Рис. 2. Кварцевая брекчия с касситеритовым цементом (а), деревянистое олово (b). Месторождение Хета. Геологический музей Магаданского филиала ФГУ ТФГИ по ДВФО. Фото А. А. Петроченкова

Fig. 2. (a) Quartz breccia with cassiterite cement, (b) woody tin. Kheta deposit. Geological Museum of the Magadan Branch of the FSU TFGI in the Far Eastern Federal District. Photo by A. A. Petrochenkov

неральные микровключения, элементы-примеси в деревянистом олове месторождения, его структурные особенности. Полученные данные способствуют установлению типоморфных признаков, условий образования деревянистого олова оловорудных месторождений.

Методы исследования

Изучены девять небольших (8–10 мм) образцов деревянистого олова, найденные в россыпи р. Правая Хета. Комплекс исследований, проведённый в лабораториях МГРИ, ВИМС, ИРЕА НИЦ «Курчатовский институт»,

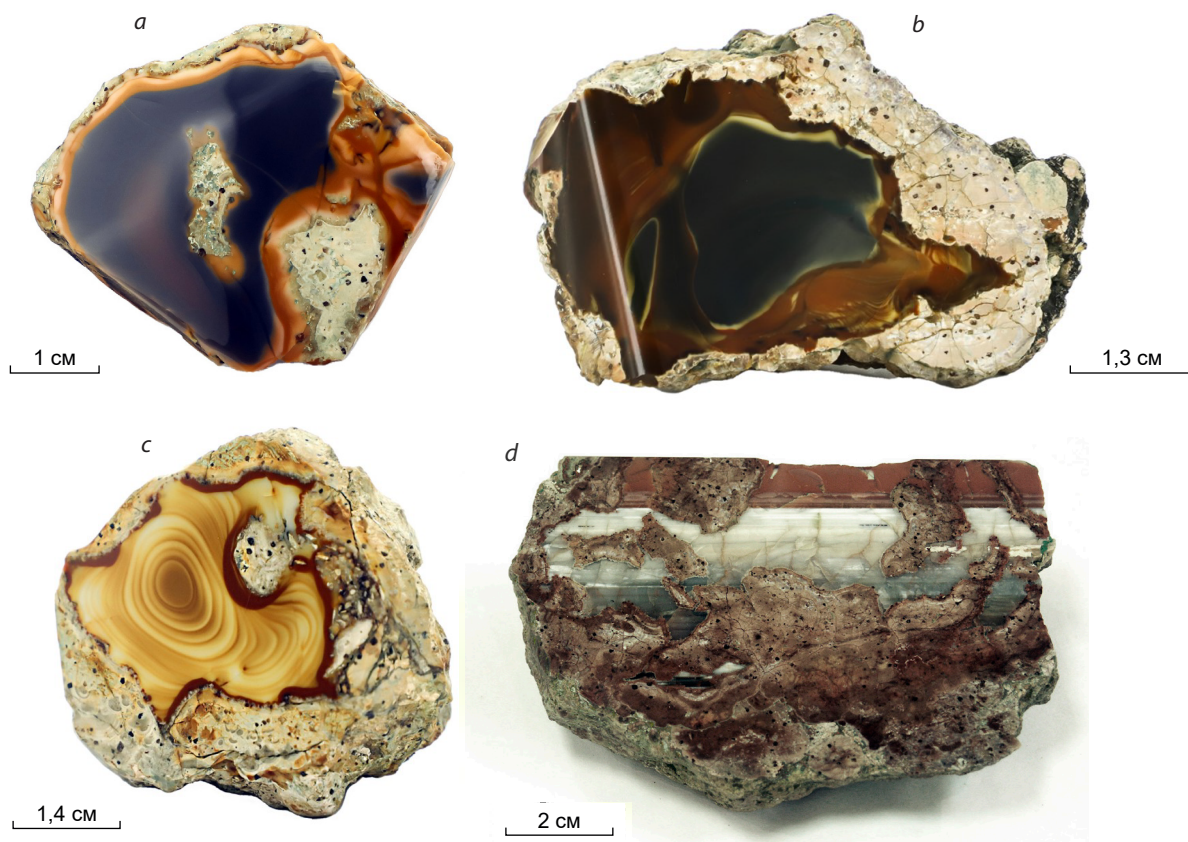


Рис. 3. Агаты, халцедоны (а–d). Месторождение Хета, Магаданский областной краеведческий музей

Fig. 3. (a–d) Agates, chalcedony. The Kheta deposit. Magadan Regional Local Natural and Historical Museum

включал определение микротвёрдости, плотности, люминесценции (по 6 определений), оптико-минераграфический анализ (2 прозрачных шлифа), количественное определение элементов-примесей в касситерите (15 измерений), электронно-микроскопические исследования (2 образца).

Оптико-минераграфический анализ выполнен с использованием микроскопа Leica DMRX. Микротвёрдость определялась на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой массой 200 г и экспозицией 15 секунд с использованием методики С. И. Лебедевой (1977 г.). Плотность образцов установлена гидростатическим методом на электронных весах Sartorius Gem G-150D. Люминесценция изучалась под ультрафиолетовой лампой Multispec System Eickhorst с длиной волны 254 и 365 нм. Исследование микровключений в касситерите проведено на

растровом электронном микроскопе SM-32 с вольфрамовым катодом (Китай), детектор ЭДС Ultim Max 65, диаметр зонда 3–5 мкм. Программное обеспечение Aztec ЭДС компании Oxford Instruments Nano Analysis (Великобритания). Анализ образцов проведён в обратно-рассеянных электронах (ОРЭ), вторичных электронах, в характеристическом рентгеновском излучении, химический состав получен по данным рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), содержание кислорода рассчитывалось по стехиометрии (аналитик Н. Н. Кривощёков).

Определение содержания элементов-примесей осуществлялось методом масс-спектрометрии с приставкой лазерной абляции (ЛА-ИСП-МС). Измерения проводились на приборах: квадрупольный масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой ELAN DCR-e



(Perkin Elmer, США). Для лазерного пробоотбора применялась приставка NWR 213 (New Wave Research). Диаметр пятна лазерного луча составил 80 мкм. В каждой намеченной точке наблюдения (~ 500 мкм) проводилось три измерения. Градуировку проводили по твёрдому стандартному образцу NIST SRM 610.

Чувствительность метода на элементы-примеси в касситерите, мг/кг: Si, Ca – 1000; S, Cl – 500; P – 60; Na – 50; Be, Se – 20; B, Al, Fe – 10; K, Sc, Ti, V, Cr, Ge, As – 5; Li, Mg, Mn – 2; Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Sb, Cs – 1; Ba, Hf, Ta, W, Pb, Bi, Th, U – 0,1. По большинству примесных компонентов среднеквадратичное отклонение определяемых концентраций находится в пределах 2–6 % в зависимости от элемента. Ошибка анализа для большинства элементов составляет до 10 % и зависит от содержания. Содержания Co, Ni, In и редкоземельных элементов измерить с удовлетворительным пределом обнаружения невозможно. Из-за наличия микровключений касситерит неоднороден, поэтому внутри некоторых определений отмечается изменение содержаний ряда элементов на величину одного-двух порядков.

Значения содержаний элементов-примесей в кристаллах касситерита обработаны математическими методами, используемыми в геологии [6, 11]. Были определены следующие математические показатели, характеризующие геохимическую выборку: среднее – $C_{\text{ср.}}$, минимальное – $C_{\text{мин.}}$, максимальное – $C_{\text{мак.}}$, содержания элемента; среднеквадратичное отклонение – СКО; коэффициент вариации – КВ; коэффициент асимметрии, отнесённый к его ошибке, – А/ош; коэффициент эксцесса, отнесённый к его ошибке, – Э/ош; установлено соответствие распределения значений содержаний нормальному закону – Норм. $C_{\text{ср.}}$, $C_{\text{мин.}}$, $C_{\text{мак.}}$, СКО – измерялись в мг/кг, КВ – в %, А/ош и Э/ош – безразмерные показатели. Параметр Норм принимал два значения: соответствует нормальному закону (да) и не соответствует (нет).

Значения $C_{\text{ср.}}$ условно разделены, мг/кг: очень низкие – n , низкие – $n0$, невысокие – $n00$, высокие – $n000$, очень высокие – $n0000$. Еди-

ничные значения содержаний, превышающие $3 \cdot \text{СКО}$, отнесены к «ураганным», но из математической обработки они не исключались. «Ураганные» значения указывают на минеральные микровключения. В соответствии со значениями КВ выборка разделяется: КВ < 100 % – однородная; 101–200 % – неоднородная; > 201 % – очень неоднородная.

Значения А/ош и Э/ош характеризуют степень отклонения распределения содержаний элементов выборки от нормального закона. При значениях < 3 (критическое значение согласно критерию нормальности по асимметрии и эксцессу [11]) выборка подчиняется нормальному закону распределения, при значениях ≥ 3 – не подчиняется. При положительном значении А/ош в выборке преобладают содержания ниже среднего; при отрицательном – выше среднего. При положительном значении А/ош содержания выше среднего отличаются от него более значительно, чем содержания ниже среднего; при отрицательном значении А/ош большее отличие характерно для содержаний ниже среднего. При положительном значении Э/ош содержания концентрируются около среднего; при отрицательном значении Э/ош распределение значений более равномерное. Чем выше значения А/ош, Э/ош, тем больше отклоняется распределение выборки от нормального закона. Установлены корреляционные связи элементов (парная корреляция) положительные и отрицательные при значениях выше критического или равных ему. При значениях 0,7 и выше корреляционные связи считались сильными, при значениях ниже 0,7 – слабыми.

С учётом значений содержаний элементов-примесей, однородности распределения их в пределах кристалла, близости строения атомов с атомом Sn сделаны предположения о форме нахождения элемента в касситерите (вхождение в структуру или в состав микровключений). Также сделаны предположения о минеральном составе микровключений, исходя из значений содержаний, корреляционных связей элементов, минерального состава руд и данных ранее опубликованных работ по этой тематике.

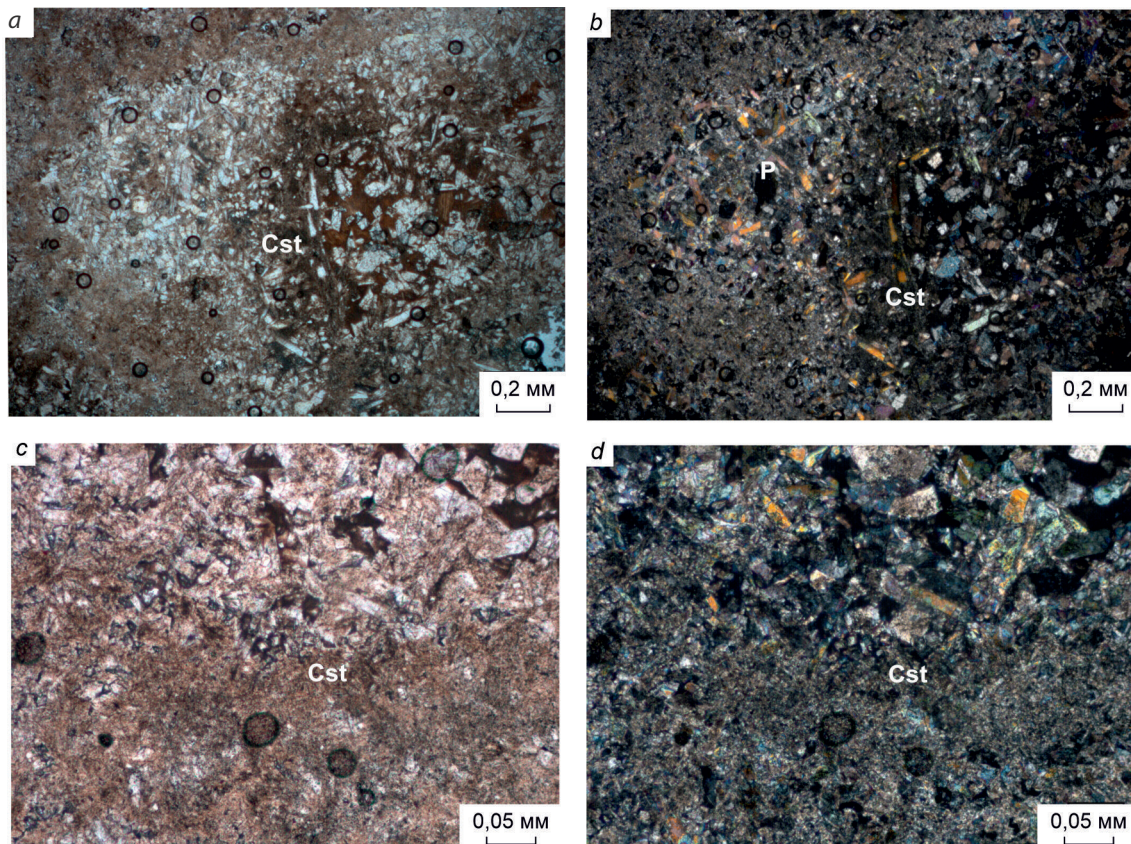


Рис. 4. Прозрачные шлифы фрагментов деревянистого олова месторождения Хета в центральной (*a, b*) и краевой (*c, d*) зонах:

николи || – *a, c*; николи X – *b, d*. Cst – касситерит, P – поры

Fig. 4. Transparent thin sections of woody tin fragments from the Kheta deposit in the central (*a, b*) and marginal (*c, d*) zones:

a, c – Nicols ||; *b, d* – Nicols X. Cst – cassiterite, P – pores

Результаты исследований

Деревянистое олово – плотное, непрозрачное, раскалывается с трудом, имеет раковистый излом. Цвет – чёрный, тёмно-серый, с небольшими зонами светло-серого цвета, иногда присутствует коричневая вкрапленность. Сферолитовая текстура, характерная для деревянистого олова, в большинстве образцов проявлена слабо, что, возможно, связано с их небольшими размерами. Встречаются образцы, образованные мелкими почками, в которых наблюдается чередование концентрических тонких слоёв серого, тёмно-серого и коричневого цвета. Плотность деревянистого олова от 6,26 до 6,80 г/см³, что ниже, чем для кристаллов (от 6,7 до 7,1 г/см³). Более низкая плотность связана

с большим числом пор. Блеск естественной поверхности деревянистого олова стеклянный, матовый, обусловленный неровностью и шероховатостью, блеск хорошо полированной поверхности – алмазный. Люминесценция не наблюдается. Микротвёрдость различных образцов и зон существенно различается и колеблется от 1050 до 1450 кг/мм², в среднем составляя 1120 кг/мм².

В прозрачных шлифах (рис. 4) деревянистое олово при параллельных николях серого, тёмно-серого цвета; слабо проявлена радиально-концентрическая структура; центральная и краевые части имеют близкий размер и форму кристаллов. Распределение окраски пятнистое. Кристаллы касситерита плотно срос-



шиеся, разноориентированные, изометрической, удлинённо-призматической, копьевидной формы. Их размеры от 0,005 до 0,2 мм. Кристаллы изометрической формы наиболее мелкие. Присутствуют полисинтетические двойники, размер которых возрастает до 0,4 мм. Между более крупными кристаллами часто расположены агрегаты мелких. Форма кристаллов может быть обусловлена их различной ориентировкой к плоскости шлифа. В одних случаях наблюдаются поперечные срезы, в других – косые и продольные.

Можно выделить фрагменты с различной морфологической разновидностью касситерита: мелкокристаллические, тонкокристаллические, скрытокристаллические. Тёмноокрашенные зоны образованы тонкокристаллическим и скрытокристаллическим касситеритом. Минеральные включения в прозрачном шлифе деревянистого олова не установлены.

В деревянистом олове присутствуют трещинки, пустотки, мелкие поры. Трещинки шириной 0,01–0,1 мм занимают радиальное положение. Пустотки часто имеют вытянутую форму, размеры их 0,01–0,2 мм. Поры размером ~ 0,01 мм и менее распределены неравномерно. В результате обработки поверхности деревянистого олова происходит скалывание краёв трещин, пустоток и пор, что приводит к увеличению их размера.

Микровключения в деревянистом олове

В касситерите разными исследователями с помощью различных методов установлено около 60 минеральных микровключений, а в деревянистом олове менее 20 [1–5, 7, 9, 10, 12, 13]. Существенно меньшее число установленных минеральных включений в деревянистом олове связано, в первую очередь, с его меньшей изученностью.

В одном из образцов деревянистого олова месторождения Хета (рис. 5, а) присутствуют многочисленные минерализованные микропоры размером до 100 мкм преимущественно изометрической формы. В касситерите (3 спектра) элементы-примеси не фиксируются. В двух микровключениях размером ~ 100

и 50 мкм изометрической формы с чёткими контурами определены содержания, мас. %: О – 32,75 и 41,58 соответственно; Al – 0,45 и 0,59; Si – 0,55 и 0,65; Ti – 13,52 и 4,39; Sn – 52,72 и 52,79. Содержания элементов могут соответствовать микровключениям алюмосиликата и рутила (TiO₂). Ещё в одном микровключении размером 30 × 120 мкм удлинённой призматической формы с чёткими контурами выявлены содержания, мас. %: О – 18,81; Al – 0,34; Si – 0,41; Ti – 3,59; Fe – 3,22; Sn – 73,63, что указывает на ильменит (FeTiO₂) и алюмосиликат. В микровключении размером 30 × 100 мкм удлинённой конусообразной формы с чёткими контурами, чёрного цвета в ОРЭ определены содержания, мас. %: О – 52,07; Al – 21,30; Si – 25,07; K – 1,56, что может указывать на алюмосиликат (серицит).

Во втором образце (рис. 5, б) присутствует большое число минерализованных микропор различных размеров и форм. В микровключении размером 100 × 300 мкм призматической формы с чётко выраженным контуром, чёрного цвета в ОРЭ фиксируются содержания (два спектра), мас. %: О – 63,50, 59,93; Al – 11,58, 5,37; Si – 9,55, 4,80; Sn – 15,37, 29,89, что позволяет предположить алюмосиликат. В других мелких (до 50 мкм) микровключениях встречены содержания (три спектра), мас. %: О – 33,72, 26,37, 32,46; Al – 0,62, 0,48, 0,93; Si – 1,04, 0,65, 1,37; Ti – 12,55, 8,78, 9,52; Sn – 52,06, 63,72, 55,71. По содержаниям элементов можно предположить, что это микровключения алюмосиликатов, рутила. В микровключении размером 50 × 100 мкм призматической формы установлены содержания, мас. %: О – 36,54; Al – 1,12; Si – 1,18; Ti – 5,28; Fe – 9,25; Sn – 46,63. Можно предположить, что это микровключения ильменита, алюмосиликата. Высокие содержания Fe, превышающие содержания Ti почти в два раза, могут свидетельствовать о присутствии железосодержащего минерала. Как показали исследования [1, 2, 4, 5], лишь небольшая часть железа (< 0,5 мас. %) в виде Fe³⁺ входит в касситерит изоморфно и в виде нерегулярных гематитовых структурных встроек. Характерны магнетит (Fe²⁺Fe₂³⁺O₄), гематит (Fe₂O₃),

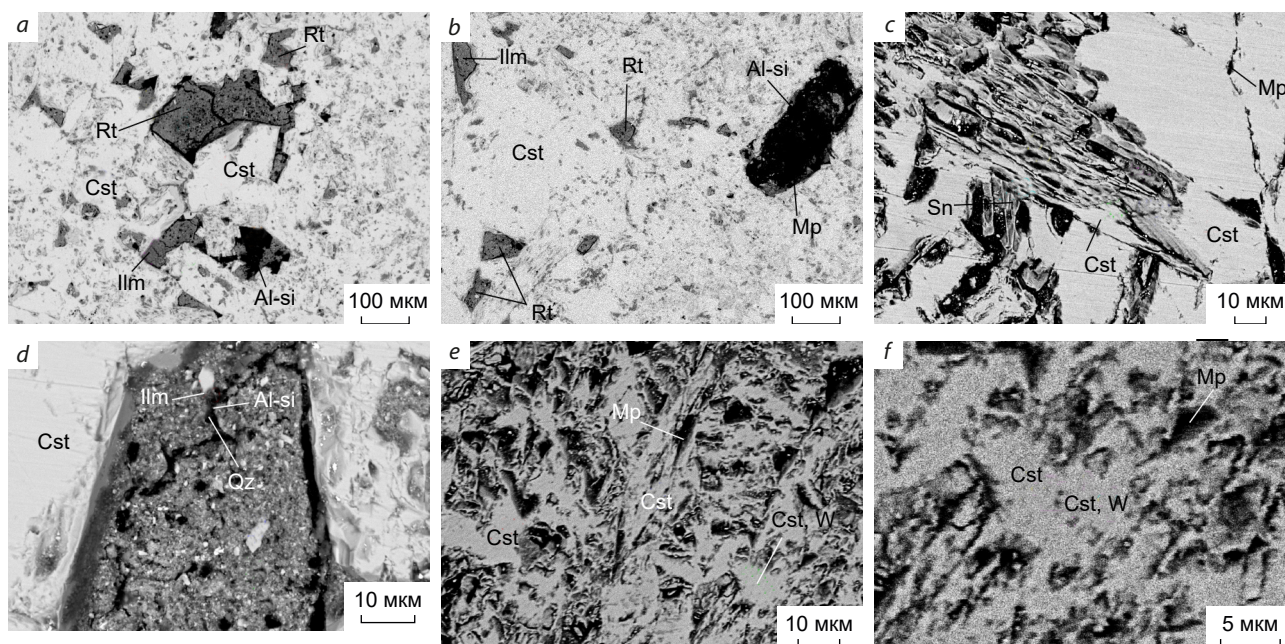


Рис. 5. Образцы деревянистого олова месторождения Хета в ОРЭ с микровключениями рутила (Rt), ильменита (Ilm), алюмосиликата (Al-si), кварца (Qz), самородного олова (Sn), вольфрамита (W). РЭМ. Cst – касситерит, Mp – микропоры

Fig. 5. Specimens of woody tin from the Kheta deposit with microinclusions of rutile (Rt), ilmenite (Ilm), aluminosilicate (Al-si), quartz (Qz), native tin (Sn), and wolframite (W). BSE image, REM. Cst – cassiterite, Mp – microvoids

гётит ($\text{FeO} \cdot \text{OH}$), станнаты (FeSnO_3 , FeSn_2O_4), гидростаннаты ($\text{FeSn}(\text{OH})_6$). Преобладают более поздние эпигенетические микровключения, отлагающиеся в микротрещинах кристаллов.

Третий образец деревянистого олова (рис. 5, c) насыщен микропорами, ориентированными в двух направлениях, также присутствуют микротрещины. Для микропор характерны овальная удлиненная форма, размер до 25 мкм. В касситерите элементы-примеси не фиксируются. В одном микровключении размером ~ 3 мкм определены содержания, мас. %: O – 5,75; Al – 0,11; Si – 0,19; Fe – 0,77; Sn – 93,17. Очень высокое содержание Sn может указывать на присутствие самородного олова, Al и Si – на алюмосиликат, Fe – на минералы железа. В настоящее время самородное олово как минеральный вид установлено в россыпях золота, в гранитах и кварцевых жилах [2], встречается крайне редко, и его присутствие

в деревянистом олове требует дальнейшего детального изучения.

В четвертом образце (рис. 5, d) присутствует минерализованная микропора, в которой установлены микровключения. В одном микровключении размером ~ 3 мкм, светло-серого цвета в ОРЭ, удлиненно-призматической формы с четкими контурами фиксируются содержания, мас. %: O – 6,74; Si – 0,21; Ti – 1,98; Fe – 2,03; Sn – 88,94. Исходя из содержаний элементов можно предположить, что это микровключения ильменита, кварца. В другом микровключении выявлены содержания, мас. %: O – 20,04; Si – 0,26; Sn – 79,59, что указывает на присутствие в касситерите кварца. В третьем микровключении обнаружены содержания, мас. %: O – 34,30; Al – 0,50; Si – 0,56; Ti – 5,27; Sn – 59,35, что может свидетельствовать о микровключениях алюмосиликата и рутила.

В пятом образце (рис. 5, e, f) выявлено большое число микропор, часть из которых ми-

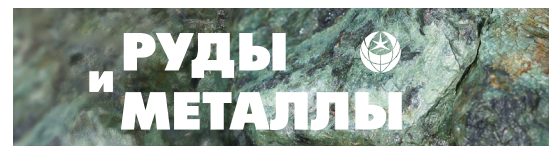


Таблица 1. Характеристики распределения содержаний элементов-примесей в деревянистом олове месторождения Хета

Table 1. Characteristics of distribution of the impurity elements contents in woody tin from the Kheta deposit

Элемент	Характеристики							
	С _{ср.}	С _{мин.}	С _{мак.}	СКО	КВ	А/ош	Э/ош	Норм
Al	1127	479	1950	445	40	0,3	-0,9	да
K	16	0	96	24	153	3,7	4,0	нет
Sc	18	0	50	17	90	1,6	-0,5	да
Ti	391	39	1570	522	133	1,8	-0,3	да
Mn	97	0	294	112	116	1,1	-1,1	да
Fe	5267	1450	9840	3013	57	0,4	-1,3	да
Cu	24	0	208	54	224	4,0	4,5	нет
Zn	29	5	179	48	167	3,4	3,0	нет
Ga	12	8	16	3	24	0,0	-1,5	да
Zr	10	0	42	13	134	1,9	0,0	да
Sb	521	40	1490	594	114	0,9	-1,3	да
W	1757	688	3610	850	48	1,4	-0,3	да
Pb	24	3	106	26	108	3,1	2,9	нет
Bi	14	0	151	39	271	4,5	5,6	нет

Примечание. Число измерений – 15.

нерализована. В одной из них установлены, мас. %: O – 25,04; Sn – 72,80; W – 1,86. При детализации фрагмента (рис. 5, f) содержания элементов составили (три спектра), мас. %: O – 25,64, 24,88, 25,68; Sn – 72,87, 72,97, 74,17; W – 1,49, 2,16, 0,14. Повышенные содержания W позволяют предположить присутствие минералов вольфрама, из которых вероятен вольфрамит (Fe, MnWO₄). Вольфрамит присутствует в рудах месторождения и часто встречается в кристаллах касситерита в виде микровключений.

Таким образом, в деревянистом олове месторождения Хета по данным РСМА встречено восемь элементов: O, Al, Si, K, Ti, Fe, Sn, W. В касситерите элементы-примеси не фиксируются. Исходя из содержаний элементов можно предположить микровключения рутила, ильменита, алюмосиликата, минералов железа, вольфрамита, кварца. Минералы, предположительно представленные микровключениями в деревянистом олове, входят в состав руд, ассоциируя с касситеритом. Они могли образоваться в рудную стадию и в последующий этап в микротрещинах деревянистого олова благодаря циркуляции гидротермальных растворов.

Элементы-примеси в деревянистом олове

Изучены четыре аншлифа деревянистого олова размером 8–10 мм, в которых методом ЛА-ИСП-МС проведено 15 измерений в пяти точках наблюдения, расположенных в зонах серого и тёмно-серого цвета. В деревянистом олове установлено 25 элементов-примесей с содержанием выше 1 мг/кг. Содержания Sn находятся в диапазоне от 770 000 до 783 000 мг/кг. Элементы Mg, Si, V, As, Nb, Mo, Ag, Ba, Hf, U фиксируются в отдельных измерениях с содержаниями, близкими к порогу чувствительности метода. Высокое содержание иттрия (2150 мг/кг) установлено в одном измерении, содержание от 2 до 9 мг/кг – в четырёх. Одиннадцать перечисленных элементов преимущественно входят в состав единичных микровключений, а V, Nb, Hf, U – могут входить и в структуру касситерита [2]. Математическими методами, с учётом результатов изучения элементов-примесей в деревянистом олове других месторождений [10], были обработаны содержания Al, K, Sc, Ti, Mn, Fe, Cu, Zn, Ga, Zr, Sb, W, Pb, Bi.

Содержания алюминия высокие, в среднем 1127 мг/кг, находятся в диапазоне от 479

Таблица 2. Корреляционные связи элементов-примесей в древеснистом олове месторождения Хета

Table 2. Correlations of impurity elements in woody tin from the Kheta deposit

Элемент	Al	K	Sc	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn	Ga	Zr	Sb	W	Pb	Bi
Al	1	0,56	-0,15	-0,26	0,19	-0,23	-0,47	-0,43	-0,05	-0,11	0,15	-0,27	-0,15	-0,45
K	0,56	1	0,06	0,05	-0,10	-0,34	-0,07	-0,14	-0,07	0,21	-0,15	-0,17	0,11	-0,12
Sc	-0,15	-0,06	1	0,80	-0,11	-0,11	-0,14	0,03	0,46	0,82	-0,15	0,19	-0,32	-0,23
Ti	-0,26	0,05	0,80	1	-0,48	-0,37	0,10	0,12	0,08	0,88	-0,51	-0,07	-0,37	-0,07
Mn	0,19	-0,10	-0,11	-0,48	1	0,82	-0,36	-0,23	0,74	-0,58	0,99	0,48	0,19	-0,30
Fe	-0,23	-0,34	-0,11	-0,37	0,82	1	-0,26	0,23	0,60	-0,54	0,86	0,40	0,16	-0,21
Cu	-0,47	-0,07	-0,14	0,10	-0,36	-0,26	1	0,23	-0,30	0,13	-0,36	0,41	0,76	0,97
Zn	-0,43	-0,14	0,03	0,12	-0,23	0,23	0,23	1	-0,18	0,05	-0,17	-0,06	0,13	0,18
Ga	-0,05	-0,07	0,46	0,08	0,74	0,60	-0,30	-0,18	1	-0,04	0,72	0,37	0,04	-0,33
Zr	-0,11	0,21	0,82	0,88	-0,58	-0,54	0,13	0,05	-0,04	1	-0,61	-0,02	-0,24	0,05
Sb	0,15	-0,15	-0,15	-0,51	0,99	0,86	-0,38	-0,17	0,72	-0,61	1	0,42	0,17	-0,32
W	-0,27	-0,17	0,19	-0,07	0,48	0,40	0,41	-0,06	0,37	-0,02	0,42	1	0,59	0,46
Pb	-0,15	0,11	-0,32	-0,37	0,19	0,16	0,76	0,13	0,04	-0,24	0,18	0,59	1	0,81
Bi	-0,45	-0,12	-0,23	-0,07	-0,30	-0,21	0,97	0,18	-0,33	0,05	-0,32	0,46	0,81	1

Примечание. Критическое значение коэффициента парной корреляции 0,51.

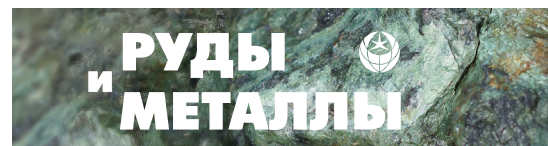
до 1950 мг/кг, распределение однородное (КВ – 40 %). Значения содержаний в пределах точек наблюдения могут отличаться в 1,1 раза или более существенно – в 2 раза. Значение А/ош (0,3) очень низкое положительное, Э/ош (-0,9) очень низкое отрицательное, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Число значений выше и ниже среднего совпадают, и они отличаются от него на близкую величину. Корреляционные связи Al положительные слабые с K (0,56) (табл. 2). Алюминий входит в состав микровключений (алюмосиликатов) и ассоциирует с K.

Содержания калия низкие, находятся в диапазоне от 0 до 96 мг/кг (среднее 16 мг/кг). Распределение содержаний неоднородное (КВ – 153 %). В пределах точек наблюдения значения содержаний также существенно различаются. В пяти измерениях калий не фиксируется. Можно выделить одно «ураганное» содержание – 96 мг/кг. Значения А/ош (3,7) и Э/ош (4,0) высокие положительные, распределение содержаний не подчиняется нормальному закону (табл. 1). Резко преобладают значения ниже среднего, значения выше среднего существенно от него отличаются в большую сторону. Корреляционные связи K слабые с Al (0,56) (табл. 2). Калий входит в состав

микровключений (алюмосиликаты), ассоциирует с Al.

Содержания скандия также низкие, в среднем 18 мг/кг, находятся в диапазоне от 0 до 50 мг/кг. Распределение содержаний однородное (КВ – 90 %). В пределах точек наблюдения значения могут быть близкими, отличаться в 1,1 раза или в 2 раза. В одном измерении содержание Sc не фиксировалось. Значение А/ош (1,6) низкое положительное, Э/ош (-0,5) очень низкое отрицательное, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Преобладают значения ниже среднего, и они отличаются от него незначительно, в отличие от содержаний выше среднего. Корреляционные связи Sc положительные сильные с Ti (0,80), Zr (0,82), слабые с Ga (0,46) (табл. 2). Скандий может входить в состав микровключений и в структуру касситерита, ассоциирует с Ti, Zr.

Содержания титана невысокие, в среднем 391 мг/кг, находятся в диапазоне от 39 до 1570 мг/кг, распределение неоднородное (КВ – 133 %). В пределах точек наблюдения значения содержаний также значительно различаются от 1,5 до 15,7 раза. Значение А/ош (1,8) низкое положительное, Э/ош (-0,3) очень низкое отрицательное, распределение содержа-



ний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Преобладают значения ниже среднего, и они близки к нему по величине, в отличие от значений выше среднего. Корреляционные связи Ti положительные сильные с Sc (0,80), Zr (0,88), отрицательные слабые с Sb (-0,51) (табл. 2). Титан, вероятно, преимущественно входит в состав микровключений (рутил), частично в структуру касситерита, ассоциирует с Sc, Zr.

Содержания *марганца* низкие, в среднем 97 мг/кг, находятся в диапазоне от 0 до 294 мг/кг. Распределение содержаний неоднородное (КВ – 116 %). В пределах точек наблюдения значения содержаний различаются от 1,2 до 3,3 раза. В одном измерении содержание марганца не установлено. Значение А/ош (1,1) очень низкое положительное, Э/ош (-1,1) очень низкое отрицательное, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Преобладают значения ниже среднего, и они близки к нему по величине, в отличие от значений выше среднего. Корреляционные связи Mn положительные сильные с Fe (0,82), Ga (0,74), Sb (0,99), отрицательные слабые с Zr (-0,58) (табл. 2). Марганец входит в состав микровключений, ассоциирует с Fe, Ga, Sb.

Содержания *железа* высокие, в среднем 5267 мг/кг, находятся в диапазоне от 1450 до 9840 мг/кг. Распределение содержаний однородное (КВ – 57 %). В пределах точек наблюдения содержания отличаются максимум в 1,3 раза. А/ош (0,4) очень низкий положительный, Э/ош (-1,3) очень низкий отрицательный, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Незначительно преобладают значения ниже среднего, значения выше среднего отличаются на большую величину. Корреляционные связи Fe положительные сильные с Mn (0,82), Sb (0,86), слабые с Ga (0,60), отрицательные слабые с Zr (-0,54) (табл. 2). Железо входит в состав микровключений (минералы железа) и в структуру касситерита, ассоциирует с Mn, Ga, Sb.

Содержания *меди* низкие, находятся в диапазоне от 0 до 208 мг/кг (в среднем 24 мг/кг). Распределение содержаний очень неоднород-

ное (КВ – 224 %). В двух точках наблюдения содержания меди не фиксируются. В одной точке содержания достигают «ураганного» значения, которое отличается от среднего в 13 раз. Значения А/ош (4,0) и Э/ош (4,5) высокие положительные, распределение содержаний не подчиняется нормальному закону (табл. 1). Только три значения выше среднего, и они существенно от него отличаются. Корреляционные связи Cu положительные сильные с Pb (0,76), Bi (0,97) (табл. 2). Медь входит в состав микровключений (сульфиды, станнин), ассоциирует с Pb и Bi. Возможны микровключения самородной меди, станната меди.

Содержания *цинка* также низкие, в среднем 29 мг/кг и находятся в диапазоне от 5 до 179 мг/кг. Распределение содержаний неоднородное (КВ – 167 %). В пределах точек наблюдения содержания могут быть близкими и существенно различаться. Обнаруженное «ураганное» значение (179 мг/кг) отличается от соседнего измерения в 35,8 раза. Значения А/ош (3,4) и Э/ош (3,0) высокие положительные, распределение содержаний не подчиняется нормальному закону (табл. 1). Только три значения выше среднего, и они существенно от него отличаются. Корреляционные связи Zn с другими элементами не установлены (табл. 2). Цинк может входить в состав микровключений, возможно, в сфалерит.

Содержания *галлия* низкие, в среднем 12 мг/кг, находятся в диапазоне от 8 до 16 мг/кг. Распределение содержаний однородное (КВ – 24 %). Значения содержаний в пределах точек наблюдения близкие и отличаются менее чем в 1,4 раза. Значение А/ош (0,0) близко к нулю, Э/ош (-1,5) очень низкое отрицательное, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Значения выше и ниже среднего и их отличие от него близки. Корреляционные связи Ga положительные сильные с Mn (0,74), Sb (0,72), слабые с Fe (0,60) (табл. 2). Галлий, вероятно, входит в структуру касситерита и в состав микровключений, ассоциирует с Mn, Fe, Sb.

Содержания *циркония* низкие, в среднем 10 мг/кг и колеблются в диапазоне от 0 до

Таблица 3. Средние содержания элементов-примесей в деревянистом олове различных месторождений, мг/кг

Table 3. Average concentrations of impurity elements in woody tin from various deposits, mg/kg

Элемент	Среднее содержание элемента			
	Хета	Джалиндинское	Тыноокен	Доминион-Крик
Be	н/о	н/о	40	209
B	н/о	81	193	94
Na	н/о	422	155	104
Al	1127	96	2398	3834
Si	н/о	5157	4088	3852
K	16	318	336	303
Sc	18	н/о	н/о	н/о
Ti	391	204	18	7
Mn	97	39	318	131
Fe	5267	1803	21 488	24 591
Cu	24	47	н/о	н/о
Zn	29	10 843	3858	140
Ga	12	н/о	н/о	н/о
As	н/о	14 112	14 215	126
Y	144	н/о	н/о	н/о
Zr	10	15	н/о	н/о
Sb	521	212	467	206
Ba	4	н/о	н/о	229
W	1757	250	684	624
Pb	24	552	61	658
Bi	14	220	79	н/о
U	1	2	1	23

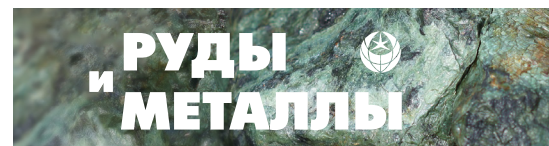
Примечание. н/о – содержание ниже чувствительности метода.

42 мг/кг. Распределение содержаний неоднородное (КВ – 134 %). В двух точках наблюдения Zr не фиксируется, в остальных значения содержаний отличаются от 1,5 до 2,5 раз. Значение A/ош (1,9) низкое положительное, Э/ош (0,0) близко к нулю, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Преобладают значения ниже среднего, они отличаются от него на меньшую величину. Корреляционные связи Zr положительные сильные с Sc (0,82), Ti (0,88), отрицательные слабые с Mn (-0,58), Fe (-0,54), Sb (-0,61) (табл. 2). Цирконий может входить в структуру касситерита и в состав микровключений, ассоциирует с Sc, Ti.

Содержания сурьмы невысокие, в среднем 521 мг/кг, колеблются от 40 до 1490 мг/кг. Распределение содержаний неоднородное (КВ –

114 %). Значения содержаний в пределах точек наблюдения отличаются максимум в 2,3 раза. Значение A/ош (0,9) очень низкое положительное, Э/ош (-1,3) очень низкое отрицательное, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Преобладают значения ниже среднего, они отличаются от него на меньшую величину по сравнению со значениями выше среднего. Корреляционные связи Sb положительные сильные с Mn (0,99), Fe (0,86), Ga (0,72), отрицательные слабые с Ti (-0,51), Zr (-0,61) (табл. 2). Сурьма может входить в структуру касситерита и в состав микровключений, ассоциирует с Mn, Fe, Ga.

Содержания вольфрама высокие, в среднем 1757 мг/кг, находятся в диапазоне от 688 до 3610 мг/кг. Распределение содержаний однородное (КВ – 48 %). В пределах точек на-



блюдения значения содержаний различаются от 1,6 до 2,3 раза. Значение $A/ош$ (1,4) очень низкое положительное, $\mathcal{E}/ош$ (-0,3) очень низкое отрицательное, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Незначительно преобладают значения ниже среднего, они отличаются от него на большую величину. Корреляционные связи W положительные слабые с Pb (0,59) (табл. 2). Вольфрам преимущественно входит в состав микровключений (вольфрамит) и частично в структуру касситерита.

Содержания *свинца* низкие, в среднем 24 мг/кг и находятся в диапазоне от 3 до 106 мг/кг. Распределение содержаний неоднородное ($KB - 108\%$). В пределах точек наблюдения содержания могут быть близкими, отличаться в 1,3 раза или даже в 35,3 раза. Значение $A/ош$ (3,1) высокое положительное, $\mathcal{E}/ош$ (2,9) низкое положительное, распределение содержаний не подчиняется нормальному закону (табл. 1). По сравнению со значениями выше среднего преобладают значения ниже среднего, и они близки к нему по величине. Можно выделить одно «ураганное» значение – 106 мг/кг. Корреляционные связи Pb положительные сильные с Cu (0,76), Bi (0,81), слабые с W (0,59) (табл. 4). Свинец входит в состав микровключений (галенит) и ассоциирует с Cu , Bi , W .

Содержания *висмута* низкие, в среднем 14 мг/кг и находятся в диапазоне от 0 до 151 мг/кг. Распределение содержаний очень неоднородное ($KB - 271\%$). Висмут не фиксируется в двух точках наблюдения. Значение 151 мг/кг является «ураганным». Значения $A/ош$ (4,5) и $\mathcal{E}/ош$ (5,6) высокие положительные, распределение содержаний не подчиняется нормальному закону (табл. 1). Корреляционные связи Bi положительные сильные с Cu (0,97), Pb (0,81) (табл. 2). Висмут входит в состав микровключений – сульфидов, ассоциирует с Cu , Pb .

В деревянистом олове изученных месторождений в целом установлено 25 элементов-примесей, средние содержания которых находятся в широком диапазоне (табл. 3). Во всех образцах деревянистого олова фиксируются

содержания Al , Si , K , Ti , Mn , Fe , Zn , Sb , W , Pb , U . Наиболее высокие содержания характерны для Al , Si , K , Fe , Sb и W , а наиболее низкие для U . Деревянистое олово месторождения Хета отличается присутствием Sc , Ga , Y , более высокими содержаниями W , отсутствием B , Na , As , более низкими содержаниями Si , K , Zn , Pb .

Выводы

В деревянистом олове месторождения Хета электронно-микроскопическими исследованиями предположительно установлены микровключения рутила, ильменита, алюмосиликатов, кварца, вольфрамита. Микровключения расположены в микропорах, микротрещинах и образованы как сингенетично с образованием деревянистого олова в рудный этап минералообразования, так и в результате привноса химических элементов растворами в пострудный период.

Методом ЛА-ИСП-МС в деревянистом олове выявлены 25 элементов-примесей с содержанием выше 1 мг/кг. Из них Mg , Si , V , As , Mo , Ag , Ba , Hf фиксировались в отдельных измерениях с очень низкими содержаниями. Средние значения Nb и U менее 5 мг/кг. В интервале 10–100 мг/кг находятся средние содержания K , Sc , Mn , Cu , Zn , Ga , Zr , Pb , Bi , в интервале 100–1000 мг/кг – Ti , Y , Sb , а в интервале выше 1000 мг/кг – Al , Fe , W . Для большинства элементов характерен нормальный закон распределения содержаний, для K , Cu , Zn , Pb , Bi распределение содержаний не подчиняется нормальному закону.

Установлены положительные корреляционные связи элементов: Al и K ; Sc с Ti , Zr ; Ti с Sc , Zr ; Mn с Fe , Ga , Sb ; Fe с Mn , Ga , Sb ; Cu с Pb , Bi ; Ga с Mn , Fe , Sb ; Zr с Sc , Ti ; Sb с Mn , Fe , Ga ; W с Pb ; Pb с Cu , W , Bi ; Bi с Cu , Pb . Отрицательные корреляционные связи между элементами немногочисленны: Ti с Sb ; Mn с Zr ; Fe с Zr ; Zr с Fe , Sb ; Sb с Ti , Zr .

Большое количество элементов-примесей, в том числе и с высокими содержаниями, свидетельствует о присутствии в деревянистом олове разнообразных микровключений. Ряд элементов (Sc , Ti , V , Fe , Zr , Nb , W , U) могут

входить и в структуру касситерита. Диагностика минеральных микровключений требует дальнейших исследований.

Месторождение Хета расположено в экономически развитом районе с высокими перспективами наращивания запасов, в том числе и на прилегающих площадях, с комплексным

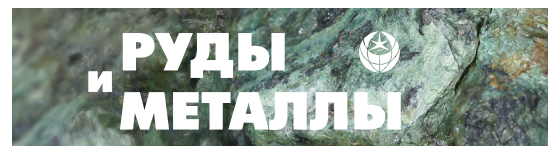
составом руд. Это позволяет считать месторождение перспективным для освоения, а его дальнейшее изучение – актуальным. Отметим, что наряду с рудными минералами агаты и халцедоны, генетически связанные с месторождением, могут использоваться в качестве ювелирно-поделочного материала.

Список литературы

1. Воронина Л. В., Гайдукова В. С., Добровольская Н. В. и др. О формах вхождения железа в состав касситерита // Геохимия. – 1978. – № 10. – С. 1474–1491.
2. Геология оловорудных месторождений СССР / Под. ред. С. Ф. Лугова. – Т. 1. Геологические основы прогноза, поисков и оценки оловорудных месторождений. – М.: Недра, 1986 – 332 с.
3. Геология оловорудных месторождений СССР / Под. ред. С. Ф. Лугова. – Т. 2. Кн. 1. Оловорудные месторождения СССР. – М.: Недра, 1986. – 429 с.
4. Доломанова Е. И., Боярская Р. В., Ракчеева А. Д. и др. Касситерит и типоморфные особенности / Типоморфизм минералов. – М.: Наука, 1969. – С. 128–184.
5. Доломанова Е. И., Подольский А. М., Добровольская Н. В. и др. К вопросу об изоморфизме в касситерите / Изоморфизм в минералах. – М.: Наука, 1974. – С. 61–79.
6. Каждан А. Б., Гуськов О. И., Шиманский А. А. Математические методы в геологии. Учебник для вузов. – М.: Недра, 2010. – 251 с.
7. Кривоконова Г. К., Сирина Т. Н. Рентгенографические признаки формационной принадлежности касситерита // Разведка и охрана недр. – 2005. – № 4. – С. 40–46.
8. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых. Олово. – М.: НП НАЭП, 2002. – 48 с.
9. Микронеоднородность касситерита. Атлас электронно-микроскопических фотографий и микродифракционных картин / Под. ред. А. И. Гинзбурга. – М.: Недра, 1981. – 219 с.
10. Петроченков Д. А. Коллекционные и ювелирные касситериты. – М.: Горная книга, 2019. – 280 с.
11. Руководство по предварительной математической обработке геохимической информации при поисковых работах. – М.: Недра, 1965. – 120 с.
12. Kolin J. H. Cassiterite from Viloko, Bolivia // Gems & Gemology. Summer. – 2002. – pp. 175–176.
13. Wenging H., Jungui Z., Ting Sh. et al. Gemological and Trace Element Characteristics of Cassiterite from Yunling, China // Gems & Gemology. Summer. – 2024. – pp. 168–193.

References

1. Voronina L. V., Gaidukova V. S., Dobrovol'skaya N. V. et al. O formakh vkhozhdeniya zheleza v sostav kassiterita [On the forms of iron in cassiterite], Geokhimiya [Geochemistry], 1978, No 10, pp. 1474–1491. (In Russ.)
2. Geologiya olovorudnykh mestorozhdenii SSSR / Pod. red. S. F. Lugova [Geology of tin ore deposits of the USSR / Ed. S. F. Lugov], T. 1. Geologicheskie osnovy prognoza, poiskov i otsenki olovorudnykh mestorozhdenii [Vol. 1. Geological foundations of forecasting, prospecting and evaluation of tin ore deposits], Moscow, Nedra Publ., 1986, 332 p.
3. Geologiya olovorudnykh mestorozhdenii SSSR / Pod. red. S. F. Lugova [Geology of tin ore deposits of the USSR / Ed. S. F. Lugov], T. 2. Kn. 1. Olovorudnye mestorozhdeniya SSSR [Vol. 2. Book 1. Tin ore deposits of the USSR], Moscow, Nedra Publ., 1986, 429 p.
4. Dolomanova E. I., Boyarskaya R. V., Rakcheeva A. D. et al. Kassiterit i tipomorfnye osobennosti [Cassiterite and typomorphic features]. In: Tipomorfizm mineralov [Typomorphism of minerals], Moscow, Nauka Publ., 1969, pp. 128–184.
5. Dolomanova E. I., Podol'skii A. M., Dobrovol'skaya N. V. et al. K voprosu ob izomorfizme v kassiterite [On the issue of isomorphism in cassiterite]. In: Izomorfizm v mineralakh [Isomorphism in minerals], Moscow, Nauka Publ., 1974, pp. 61–79.



6. Kazhdan A. B., Gus'kov O. I., Shimanskii A. A. Matematicheskie metody v geologii. Uchebnik dlya vuzov [Mathematical methods in geology. Textbook for universities], Moscow, Nedra Publ., 2010, 251 p.
7. Krivokoneva G. K., Sirina T. N. Rentgenograficheskie priznaki formatsionnoi prinadlezhnosti kassiterita [X-ray features of the formational affiliation of cassiterite], Razvedka i okhrana neдр [Exploration and protection of subsoil], 2005, No 4, pp. 40–46. (In Russ.)
8. Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdenii i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Olovo [Methodological recommendations for the application of the Classification of deposit reserves and forecast resources of solid minerals. Tin], Moscow, NP NAEP Publ., 2002, 48 p.
9. Mikroneodnorodnost' kassiterita. Atlas elektronno-mikroskopicheskikh fotografii i mikrodifraktsionnykh kartin / Pod. red. A. I. Ginzburga [Microheterogeneity of cassiterite. Atlas of electron microscopic photographs and microdiffraction patterns / Ed. A. I. Ginzburg], Moscow, Nedra Publ., 1981, 219 p.
10. Petrochenkov D. A. Kollekttsionnye i yuvelirnye kassiterity [Collection and jewelry cassiterites], Moscow, Gornaya Kniga Publ., 2019, 280 p.
11. Rukovodstvo po predvaritel'noi matematicheskoi obrabotke geokhimicheskoi informatsii pri poiskovykh rabotakh [Guide to preliminary mathematical processing of geochemical information in prospecting operations], Moscow, Nedra Publ., 1965, 120 p.
12. Kolin J. H. Cassiterite from Viloko, Bolivia, Gems & Gemology, 2002, Summer, pp. 175–176.
13. Wenging H., Jungui Z., Ting Sh. et al. Gemological and Trace Element Characteristics of Cassiterite from Yunling, China, Gems & Gemology, 2024, Summer, pp. 168–193.

Петроченков Дмитрий Александрович (p-d-a@mail.ru)
кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой¹

Фомина Марина Ивановна
кандидат геолого-минералогических наук, учёный секретарь²

Чижова Ирина Александровна
доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник³

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе» (МГРИ), г. Москва, Россия;

² ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия;

³ ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, г. Москва, Россия

Dmitry Aleksandrovich Petrochenkov
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department¹

Marina Ivanovna Fomina
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Academic Secretary²

Irina Aleksandrovna Chizhova
Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher³

¹ Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia;

² Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, Russia;

³ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia