

УДК 553.08:553.4:553.086

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4620

Шифр научной специальности: 1.6.4

Тонко вкрапленные акцессорные и рудные минералы месторождения Верхнее-Золотое

В.В. Сластников✉

ООО «Теллур Северо-Восток», Россия, г. Санкт-Петербург

✉ v_slastnikov@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Определяется важностью расширения ресурсной базы меди и полиметаллов РФ: Верхнее-Золотое серебряно-медное месторождение локализовано в пределах рудного узла, специфическими полезными ископаемыми которого являются олово и свинец. Изучение акцессориев позволит лучше понять процессы рудообразования для месторождений, чуждых окружающим его по металлогенической специализации. **Цель.** Установить характер распределения тонковкрапленных акцессорных и рудных минералов и их приуроченность к определённым ассоциациям сульфидов и метасоматическим изменениям. **Методы.** Микроскопия электронная растровая и оптическая в отражённом и проходящем поляризованном свете. **Результаты и выводы.** Проведено исследование акцессорной и, для серебра, рудной, минерализации пород центральной части месторождения Верхнее-Золотое (серебро и медь). Генезис месторождения является дискуссионным: его рудная специализация не соответствует таковой рудного района, на территории которого более ожидаема вольфрамовая или оловянная, а не медная минерализация. Олово и вольфрам были диагностированы в керновых пробах, отобранных на Верхнем-Золотом, методом ICP-MS при отсутствии их фаз размером более 0,1 мм. Исследование с использованием сканирующей электронной микроскопии было проведено с целью доказательства гипотезы о том, что касситерит и вольфрамит встречаются в виде тонких включений микронного размера в породе и прожилках. В коллекции из 38 аншлифов были обнаружены не только касситерит и вольфрамит, но и самородное золото, серебро, уранинит и монацит. На Верхнем-Золотом олово, вольфрам и цирконий образуют свои собственные минералы, а не входят в состав сульфидов в качестве примесей. Таким образом, их ассоциация с сульфидными прожилково-вкрапленными рудами, вероятно, краевой части порфировой или, по другим данным, колчеданной системы носит пространственный, а не синхронный характер. Образование мелких включений золота, серебра, монацита и настурана шло вместе с образованием вкрапленных и прожилково-вкрапленных сульфидных руд – продукта циркуляции растворов или флюидов в трещиноватой толще эффузивных пород вулканической постройки. Генезис рассеянного касситерита и шеелита, судя по особенностям его размещения, вероятно, синхронен с процессами пропилитизации во вмещающих вулканитах, содержащих сульфидные включения, и обусловлен близостью объектов, специализирующихся на олове и вольфраме.

Ключевые слова: Верхнее-Золотое, Приморье, касситерит, шеелит, монацит, настуран, флюорит, золото, серебро, тонкая вкрапленность

Благодарности: Автор статьи благодарит компанию N-Mining LLC за предоставление возможности отбора коллекции образцов в 2014 г. Автор выражает глубокую благодарность коллективам кафедры геологии месторождений полезных ископаемых Горного Университета, г. Санкт-Петербург, и Ресурсного центра микроскопии и микроанализа Научного парка СПбГУ, где проводились исследования, профессору кафедры геохимии Института наук о Земле СПбГУ, доктору геолого-минералогических наук Елене Геннадьевне Пановой за ценные консультации во время подготовки текста настоящей статьи.

Для цитирования: Сластников В.В. Состав тонко вкрапленных акцессорных рудных минералов месторождения Верхнее-Золотое // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 26–41. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4620

UDC 553.08:553.4:553.086

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4620

Finely interspersed accessory and ore minerals of the Verkhnee-Zolotoe deposit

V.V. Slastnikov✉

Tellur S-V LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

✉v_slastnikov@mail.ru

Abstract. Relevance. The importance of expanding the resource base of copper and polymetals of the Russian Federation: Verkhnee-Zolotoe silver-copper deposit is localized within an ore node specialized in tin and lead – the study of accessories will allow a better understanding of ore formation for deposits that are alien to its surrounding metallogenic specialization. **Aim.** To establish the nature of the distribution of finely interspersed accessory ore minerals and their conjunction with certain sulfide associations and metasomatic changes. **Methods.** Electron scanning and optical microscopy in reflected and transmitted polarized light. **Results and conclusions.** The author has studied the accessory mineralization of rocks in the central part of the Verkhnee-Zolotoe deposit (silver and copper). The genesis of the deposit is debatable: its ore specialization does not correspond to that of the ore region, in which tungsten or tin mineralization is more expected, rather than copper one. Tin and tungsten were diagnosed in core samples taken on the Verkhnee-Zolotoe by ICP-MS method in the absence of their phases with a size of more than 0.1 mm. The study using scanning electron microscopy was carried out to prove the hypothesis that cassiterite and wolframite occur as micron-sized thin inclusions in host rock and veins. Not only cassiterite and wolframite, but native gold, silver, uraninite and monazite as well were found in the collection of 38 polished sections. On the Verkhnee-Zolotoe, gold, tin, tungsten and zirconium form their own minerals, and are not included in the composition of sulfides as impurities. Thus, their association with sulfide veined-interspersed ores probably in the marginal part of the porphyry or, according to other data, HMS system is spatial, not temporal. The formation of small inclusions of gold, silver, monazite and nasturane went along with the formation of interspersed and veined-interspersed sulfide ores – a product of circulation of solutions or fluids in the fractured massif of effusive rocks of volcanic construction. The genesis of scattered cassiterite and scheelite, judging by the peculiarities of its placement, is probably synchronous with propylitization in host volcanites containing sulfide inclusions, and is due to the proximity of objects specializing in tin and tungsten.

Keywords: Verkhnee-Zolotoe, Primorye, cassiterite, scheelite, monazite, nasturane, fluorite, gold, silver, fine inclusions

Acknowledgements: The author appreciates the N-Mining LLC for providing the opportunity to select a collection of samples in 2014 and expresses deep gratitude to the staff of the Department of Geology of Mineral Deposits of the Mining University, St. Petersburg, and the Resource Center for Microscopy and Microanalysis of the Scientific Park of St. Petersburg State University, where the research was conducted, to Elena G. Panova, Dr. Sc., Professor of the Department of Geochemistry of the Institute of Earth Sciences of St. Petersburg State University, for valuable consultations during the preparation of the text of this article.

For citation: Slastnikov V.V. Finely interspersed accessory and ore minerals of the Verkhnee-Zolotoe deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 26–41. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4620

Введение

Медь является важным металлом для растущей обрабатывающей промышленности нашего государства. Потенциал Дальнего Востока России по добыче меди и сопутствующих полиметаллов высок, однако специализация региона на олове, вольфраме, золоте и серебре во многом обусловили малую изученность проявлений меди [1, 2]. Исследуемое месторождение медное, хотя для данной территории более типичны рудопоявления олова и вольфрама. Цель исследования – установить характер распределения тонковкрапленных акцессорных рудных минералов и их приуроченность к определённым ассоциациям сульфидов и метасоматическим изменениям.

Настоящая статья посвящена месторождению, чье геологическое строение было крайне слабо освещено в литературе: подавляющая часть информации о геологическом строении как месторождения Верхнее-Золотое, так и прилегающей территории, содержится в информационных отчетах геологических организаций. В [3] были описаны особенности взаимоотношений систем рудных прожилков и крупных разрывных нарушений; состав и взаимоотношения генераций минералов в прожилках, петрографический состав пород, вскрытых разведочным бурением в 2014 г.

Олово и вольфрам были отмечены в следовых количествах при химическом анализе керна в значимой доле проб. Однако описание керна и позже

исследование шлифов и аншлифов из рудных зон дало лишь несколько зёрен касситерита, много меньше, чем можно было ожидать по результатам валового химического анализа [3]. Данное расхождение могло быть объяснено либо нахождением олова и вольфрама в виде примесей в каких-либо минералах, либо выделением их фаз в виде тонкой вкрапленности, не фиксируемой невооружённым глазом. Настоящая работа посвящена тонко вкрапленным рудным и аксессуарным минералам центральной части Верхнего-Золотого. Исследование тонкой вкрапленности рудных минералов позволит специалистам-геологам, работающим на этом многообещающем объекте, иметь в руках инструмент для лучшего понимания результатов валовых химических анализов руд и увязки их с результатами документации керна; точнее и экономичнее вести разведку на флангах месторождения; упростить задачу поиска сходных с Верхним-Золотым объектов на территории как Звездного рудного узла, так и Приморья.

Объект и методика исследования

Объект исследования локализован в Главном синклинии Сихотэ-Алиня и является составной частью Арму-Именской структурно-фациальной подзоны [2, 4] (рис. 1). Площадь месторождения принадлежит Журавлевско-Амурскому террейну [2], терригенные породы которого слагают нижний структурный этаж. Верхний, рудовмещающий, структурный этаж – вулканический конус, сложенный туфами, туффитами, лавами преимущественно среднего состава, относимым к Синанчинскому комплексу сеноманского возраста (по [5–8] – верхнедальнинская толща альбского возраста, рис. 2). Особенностью пород данного комплекса является высокое содержание лантаноидов, по геохимическим характеристикам они соответствуют комплексам активных континентальных окраин и островных дуг: надсубдукционным вулканитам известково-щелочного ряда, сформированным на континентальной окраине андийского типа [2]. Это позволяет отдать предпочтение гипотезе накопления пород верхнедальнинской толщи в надсубдукционной обстановке, близкой к таковой в Андах [5, 6], нежели рифтовой сдвигово-раздвигового типа [2].

По итогам работ 1990–1994 гг. месторождение Верхнее-Золотое было отнесено к типу комплексных олово-меднопорфировых месторождений, позже оно было отнесено к медно-колчеданному типу. В рамках проводимого исследования мы принимаем во внимание эволюцию представлений о промышленном типе объекта изучения – она маркирует сложность геологического строения месторождения, указывает на наличие в его структуре черт, присущих обоим предложенным промышленным типам.

Вопрос о минеральном составе руд месторождения не относится к теме настоящей статьи, однако его освещение поможет понять причины эволюции представлений о его генезисе. К сожалению, информация о месторождении на всём протяжении истории его открытия и разведки аккумулировалась в производственных отчётах и вследствие этого крайне слабо вовлечена в научный оборот. Приведём информацию о составе руд месторождения по состоянию на 2014 г., когда автор работал на тогда рудопроявлении на позиции ведущего геолога с уточнениями по результатам исследования коллекции аншлифов.

Всего в рудах центральной части месторождения было установлено более 20 рудных минералов. Основными являются халькопирит и самородное серебро, второстепенные – пирит, сфалерит, арсениопирит, галенит, марказит. Крайне редки находки минералов вольфрама, олова и висмута – вольфрамит, касситерита, станнина, висмутит. Ассоциация зоны окисления рудных тел включает, соответственно, фазы с большей степенью окисления металлов и содержащие воду: лимонит, скородит, реже малахит, англезит, смитсонит и каолин.

Большая часть руд представлена ассоциацией халькопирита и подчинённых количеств сфалерита и пирита. Для руд типичны прожилковые, гнездовые, вкрапленные, прожилково-вкрапленные текстуры. Ассоциации сфалерита, пирита и галенита формируют схожие текстуры, однако менее распространены. Рудные содержания арсениопирита связаны с зонами метасоматического окварцевания и центральными частями зон повышенной трещиноватости.

Пирит является составной частью как ранних ассоциаций, к которым относятся халькопиритовые руды, так и более поздних, наложенных на них, представленных преимущественно кварц-карбонатными прожилками с пиритом и марказитом.

Выделено шесть крупных рудовмещающих структур северо-западного простираения, подразделяемых на отдельные малые рудные зоны, соответствующие отдельным зонам прожилкования или развития вкрапленного оруденения.

Таким образом, на стадиях поиска, оценки и разведки Верхнее-Золотое за счёт его локализации в пределах древнего вулканического конуса и состава, а также структурно-текстурных особенностей руд можно было интерпретировать либо как краевую часть порфировой системы, либо как колчеданную с весьма диссипированными рудами. Основной проблемой попыток отнесения рудопроявления к порфировому типу стала безуспешность поиска собственно штока с сульфидным оруденением.

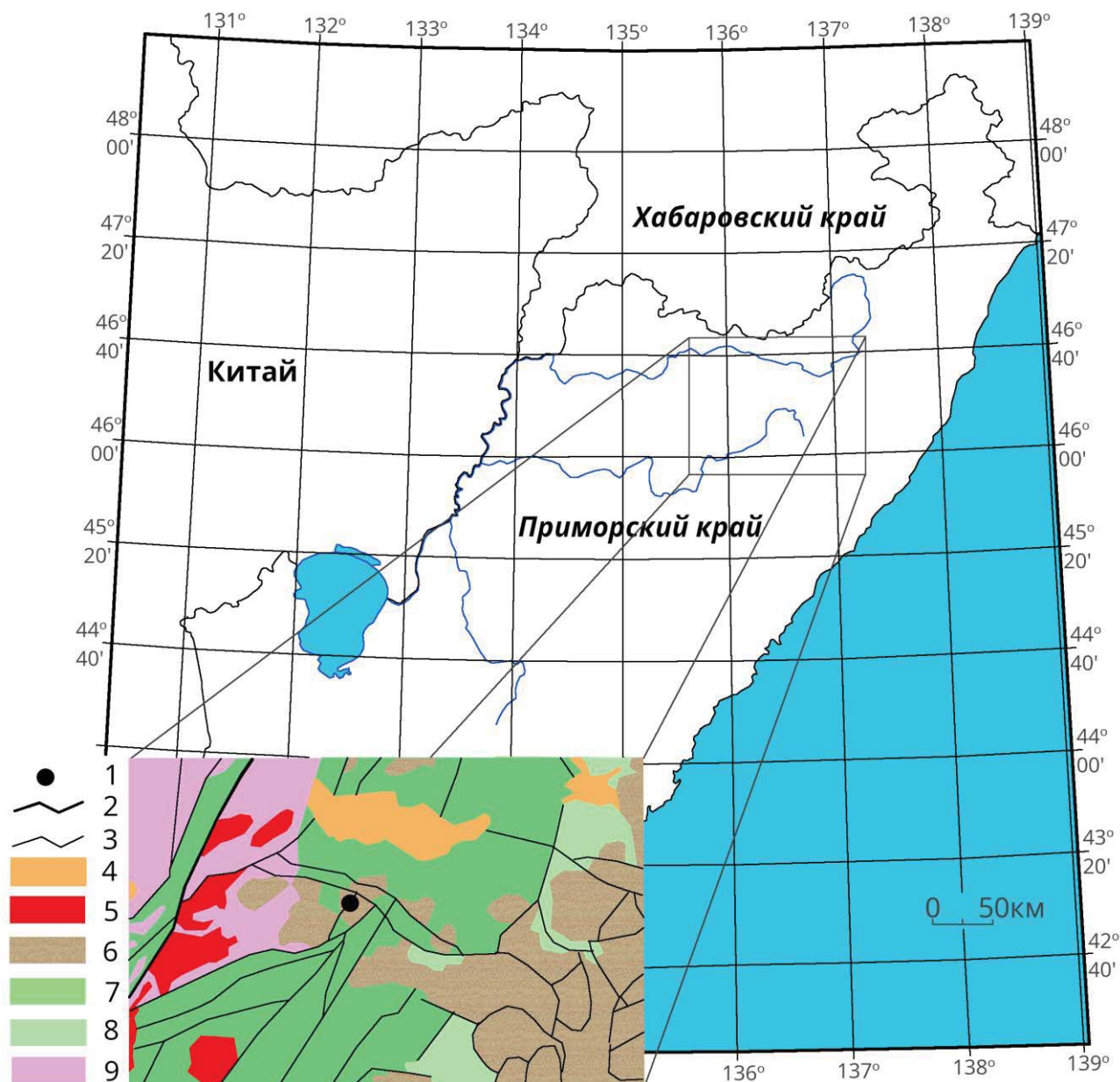


Рис. 1. Региональная позиция месторождения. Тектоническая схема региона в радиусе около 150 км от месторождения Верхнее-Золотое, масштаб 1:2500000: фрагмент [2, 7]. Условные обозначения: 1 – Звёздный рудный узел; разрывные нарушения: 2 – региональные, 3 – крупные; 4 – кайнозойские песчано-алевролитовый угленосный, молассовый и платобазальтовый структурно-вещественные комплексы; 5 – гранитовый и гранодиорит-гранитовый структурно-вещественные комплексы раннемелового возраста; 6 – позднемеловые, палеогеновые и неогеновые вулканогенные и интрузивные структурно-вещественные комплексы Восточно-Сихотэ-Алинского окраинно-континентального вулканического пояса; геодинамические комплексы зрелых островных дуг: 7 – берриас-валанжинские и готерив-альбские песчано-алевролитовые структурно-вещественные комплексы задугового бассейна; 8 – апт-альбские вулканогенные, вулканогенно-терригенные и флишоподобные структурно-вещественные комплексы островной дуги; 9 – олистостромовый и алеврит-песчаниковый структурно-вещественные комплексы юрского возраста

Fig. 1. Regional position of the deposit. Tectonic scheme of the region within a radius of about 150 km from the Verkhnee-Zolotoe deposit, scale 1:2500000: fragment [2, 7]. Symbols: 1 – Zvezdny ore node; faults: 2 – regional, 3 – large; 4 – Cenozoic sand-siltstone coal-bearing, molasse and platobasalt structural-material complexes; 5 – granite and granodiorite-granite structural-material complexes of Early Cretaceous age; 6 – Late Cretaceous, Paleogene and Neogene volcanogenic and intrusive structural-material complexes of the East Sikhote-Alin marginal continental volcanic belt; geodynamic complexes of mature island arcs: 7 – Berriasian-Valanginian and Goteriv-Albian sand-siltstone structural-material complexes of the back arc basin; 8 – Apt-Albian volcanogenic, volcanic-terrigenous and flyschoid structural-material complexes of the island arc; 9 – olistostromic and siltstone-sandstone structural-material complexes of Jurassic age

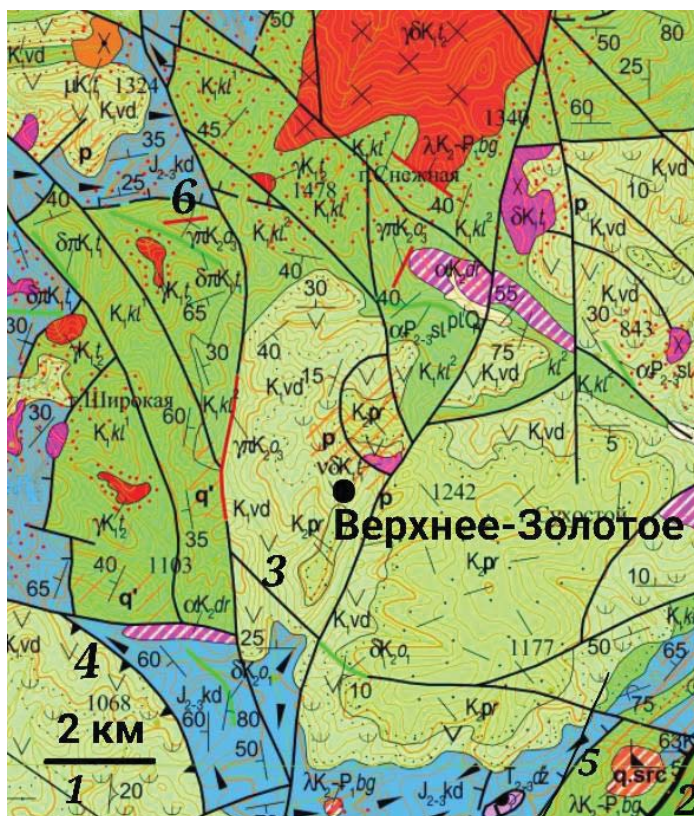


Рис. 2. Геологическая карта окрестностей месторождения Верхнее-Золотое масштаба 1:200000 [8]. Условные обозначения: Юра средняя-поздняя: J2-zkd – кададинская толща, терригенные отложения, аллоолистоостромы. Мел ранний: K1kl1 – ключевская свита первая толща, терригенные отложения; K1kl2 – ключевская свита вторая толща, терригенные отложения; K1vd – верхнедальненская толща, вулканиты среднего и кислого состава; комагматы: $\beta K1vd$ – субвулканические массивы андезитов, дацитов; $\zeta K1vd$ – субвулканические массивы риолитов; татинский гранит-диоритовый плутонический комплекс, первая фаза: $\delta pK1t1$ – дайки диорит-порфиринов, вторая фаза: $\gamma K1t2$ – интрузии гранитов, $\delta K1t2$ – интрузии диоритов. Мел поздний: $\gamma pK2o3$ – олгинский гранитный плутонический комплекс, третья фаза, дайковые тела гранит-порфиров. Эоцен: P2-3sl – салибесский комплекс базальтовый вулканический, дайковые тела базальтов. Границы: 1 – геологическая достоверная; разрывные нарушения: 2 – надвиги достоверные главные, 3 – неустановленной кинематики, 4 – разломные границы вулcano-тектонических структур достоверные, 5 – надвиги достоверные, 6 – надвиги достоверные, не выходящие на картографируемую поверхность. Метасоматические изменения: q' – окварцеванные породы; p' – пропилитизированные породы; q.src – кварц-серцитовые изменения

Fig. 2. Geological map of Verkhnee-Zolotoe deposit and adjacent areas. Scale 1:200000 [8]. Signed on the map: Jurassic, medium and later: J2-zkd – kadadinskaya rock mass, terrygenic rocks in alloolystostromes. Cretaceous, early: K1kl1 – kluchevskaya series, first rock mass, terrygenic; K1kl2 – kluchevskaya series, second rock mass, terrygenic; K1vd – verkhnedalninskaya rock mass, volcanic rocks of andesitic to rhyolitic composition; comagmates: $\beta K1vd$ – subvolcanic andesite and dacite bodies; $\zeta K1vd$ – subvolcanic rhyolitic bodies; tatibinsky granite-diorite plutonic complex, first phase: $\delta pK1t1$ – porphyry diorite dykes, second phase: $\gamma K1t2$ – granite intrusive bodies, $\delta K1t2$ – diorite intrusive bodies. Cretaceous, elder: $\gamma pK2o3$ – olginsky granite plutonic complex, third phase, granite-porphyrus dykes. Eocene: P2-3sl – slybese basaltic volcanic complex, basaltic dykes. Borders: 1 – geological proven; faults: 2 – reverse fault main and proven, 3 – fault of unknown kinematics, 4 – fault borders of volcano-tectonic structures, proven; 5 – reverse fault proven, 6 – reverse fault proven, not reaching mapped surface. Metasomatic alterations: q' – quartz altered rocks; p' – propylitized rocks; q.src – quartz-sericite metasomatic rock

В настоящее время гипотеза о колчеданной природе оруденения принята при защите запасов месторождения (реестровый номер протокола в Едином фонде геологической информации 43778524). Всего на баланс поставлено меди более 300 тыс. т и серебра более 600 т.

Компанией N-Mining LLC в 2014 г. были предоставлены для изучения коллекция из 32 готовых про-

зрачных шлифов и дана возможность отбора каменного материала из архивных половинок керна. Всего исследовано 70 шлифов (полный охват всех 11 скважин, 1–15 шлифов на скважину) и 38 аншлифов (четыре наиболее интересных скважины, 1–5 аншлифов на скважину). Изучение тонко вкрапленных минералов методом сканирующей электронной микроскопии было выполнено для всех аншлифов.

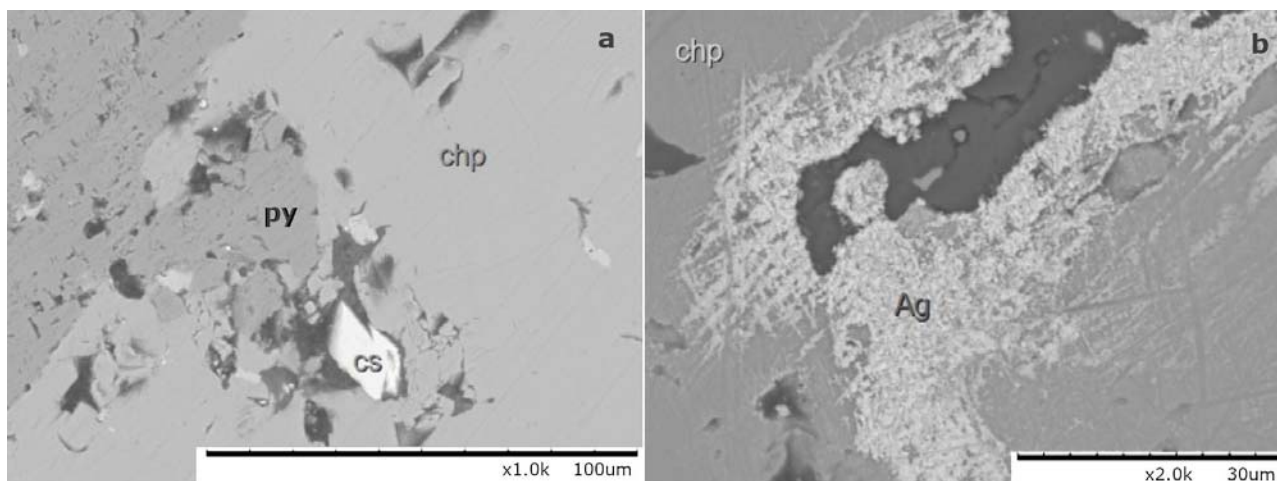


Рис. 3. а) идиоморфный касситерит (cs) в ксеноморфном халькопирите (chp), образующем тесное срастание с ксеноморфными пиритом (py); б) дендриты серебра (Ag) в ксеноморфном халькопирите (chp)
Fig. 3. а) idiomorphic cassiterite (cs) in xenomorphic chalcopyrite (chp), forming a close fusion with xenomorphic pyrite (py); б) silver dendrites (Ag) in xenomorphic chalcopyrite (chp)

Исследование проведено с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM3000 с приставкой энергодисперсионного анализа OXFORD (далее – микрозонд). Основной решаемой с использованием данного оборудования задачей было диагностирование минерального состава тонкой рудной вкрапленности. Проведена съёмка 797 микрозондовых точечных спектров с последующим расчётом химических формул минеральных фаз. Изученные пары шлиф/аншлиф были сгруппированы по глубине отбора керновой пробы, пересчитанной в абсолютную высотную отметку по глубине отбора керна и инклинометрии.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование коллекции аншлифов на сканирующем электронном микроскопе позволило выделить ряд акцессорных тонко вкрапленных минералов: касситерит, шеелит, самородное серебро и самородное золото, циркон, настуран и флюорит с примесью редких земель. *Касситерит* образует дисперсную вкрапленность в прожилках и породе на абсолютных отметках около 800 м в западной части площади бурения 2014 г. Кристаллы ксеноморфные, размер – первые десятки микрометров (рис. 3, а). Касситерит-содержащими являются кварцевые прожилки с пирит-халькопиритовой рудной минерализацией, кальцит-кварцевые прожилки с пирит-халькопирит-арсенопиритовой рудной минерализацией. В последних кроме касситерита были описаны единичные гипидиоморфные зерна *шеелита* в кальците и отдельные кристаллы содержащего редкие земли *флюорита*. В метасоматите кварц-серицитового состава по туфу псаммитовому андезитового состава касситерит вместе с

самородным серебром представлен единичными идиоморфными вкраплениями в халькопирите.

Самородное серебро описано в метасоматитах кислого состава по туфам с наложенной сульфидной минерализацией в центре месторождения на абсолютных отметках от 800 до 1000 м в ассоциации с халькопиритом и сфалеритом – дендриты серебра образуют структуры вставания в раздробленном кристалле халькопирита (рис. 3, б), тонкую вкрапленность ксеноморфных кристаллов диаметром до 10 мкм в породе с пиритом, халькопиритом, галенитом и монацитом, в виде примеси в галените (рис. 4, а). *Самородное золото* описано в зальбанде кварцевого прожилка в единичном ксеноморфном вкраплении в пирите, центральная часть месторождения, абс. отм. 1136,6 м. Размер включения составляет первые микрометры. Сульфидная минерализация в данном аншлифе отлична от типичной для месторождения пирит-халькопиритовой, представлена пиритом, реальгаром и пирротинном. *Монацит* представлен редкими гипидиоморфными вкраплениями в метасоматитах кислого состава в образце с запада центральной части месторождения. Ассоциирует с пирит-халькопиритовой сульфидной минерализацией и настураном. В состав минерала входят церий и неодим в соотношении 2 к 1, или один атом церия заменен на лантан, и расчётная формула соответствует $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd})(\text{PO}_4)_3$. Размер вкрапленников измеряется десятками долями миллиметра, степень идиоморфизма весьма высокая. *Циркон* представлен единичными кристаллами микронного размера в метасоматитах кислого состава. Степень идиоморфизма зёрен колеблется от высокой до низкой. Ассоциирует с пиритом.

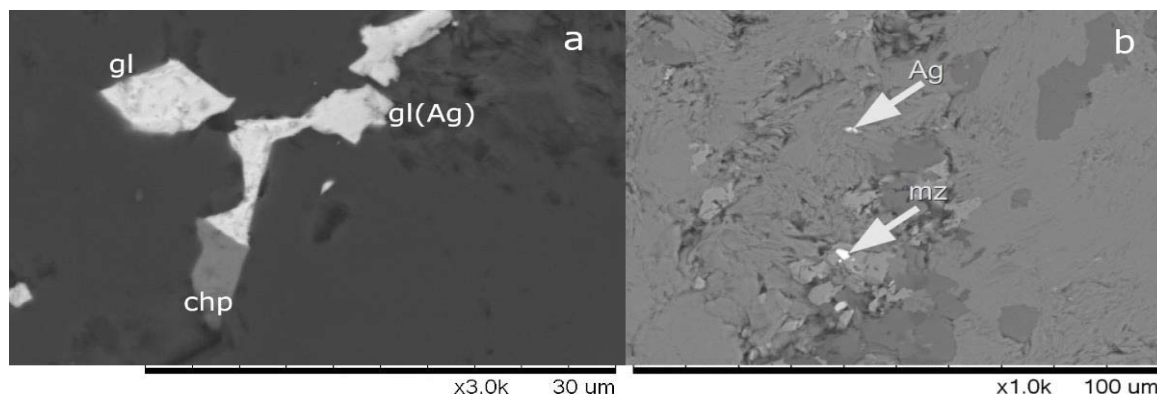


Рис. 4. а) гипидиоморфный галенит (gl) с примесью серебра (gl(Ag)) с ксеноморфным халькопиритом (chp) в метасоматическом кварце; б) самородное серебро (Ag) с ксеноморфным монацитом (mz) в агрегате метасоматического серицита и кварца

Fig. 4. a) hypidiomorphic galena (gl) with an admixture of silver (gl(Ag)) with xenomorphic chalcopyrite (chp) in metasomatic quartz; b) native silver (Ag) with xenomorphic monazite (mz) in an aggregate of metasomatic sericite and quartz

Настуран представлен редкой вкрапленностью гипидиоморфных и ксеноморфных зёрен микронного размера в интерстициях в метасоматическом кварце в центральной части месторождения. Настуран ассоциирует с кальцитом в составе прожилков – с монацитом, флюоритом и пиритом. Флюорит с примесью редких земель – церия, ниобия, лантана ассоциирует с монацитом и пирит-халькопиритовой минерализацией в кислых метасоматитах. Однако меньший размер вкрапленников

(до первых микрометров), меньшая степень идиоморфизма, вместе с локализацией его кристаллов в интерстициях метасоматического матрикса указывает на более позднее его образование по сравнению с монацитом.

Особенности сульфидной минерализации были описаны в [3]. Ассоциации сульфидов и приуроченность их к определённым фациям метасоматоза и мотиву размещения в породе или прожилке показаны в табл. 1.

Таблица 1. Ассоциации сульфидов с акцессорными тонковкрапленными минералами

Table 1. Sulfide associations with fine disseminated accessory minerals

Сульфид Sulfide	Сульфидная ассоциация Sulfide association										Акцессорный минерал Accessory mineral	Приуроченность к ассоциации сульфидов Confinedness to a sulfide association	Метасоматические изменения Metasomatic alterations	Вкрапленность Dissemination
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
Пирит Pyrite	+	+	+	+	+	+	+	+			Серебро самородное Native silver	1, 7, 8, 10	Хлорит-серицит-кварцевые, серицит-кварцевые Chlorite-sericite-quartz, sericite-quartz	В породе In host rock
Халькопирит Chalcopyrite				+	+	+	+	+	+		Золото самородное Native gold	3	Серицит-кварцевые Sericite-quartz	
Сфалерит Sphalerite							+	+	+	+	Настуран Nasturan	3, 7		
Арсенопирит Arsenopyrite						+			+	+	Флюорит Fluorite	4, 6, 9		
Галенит Galena		+			+			+	+		Касситерит Cassiterite	4, 6, 10		
Пирротин Pyrrrotite			+							+	Шеелит Scheelite	6		В породе In host rock
Реальгар Realgar			+								Монацит Monazite	3, 4, 7		
Кубанит Cubanite					+						Циркон Zircon	1, 2, 4, 5	Хлорит-серицит-кварцевые Chlorite-sericite-quartz	

Полиметаллическое сульфидное оруденение в изученной части месторождения размещено в собственно толще стратифицированной вулканической постройки, что маргинально для модели порфировой системы по [9], но хорошо соотносится с более широкой моделью порфировой системы, предложенной в [10], по которой исследованная нами часть месторождения является краевой частью медно-порфировой системы с вкрапленным и прожилково-вкрапленным оруденением. Отметим, что вопрос типичности территории юга Хабаровского края и Приморья для образования порфировых месторождений является дискуссионным [11, 12], в условиях вулканической активности структура месторождения и его тип, соответственно, могут быть обусловлены только циркуляцией рудогенерирующего флюида. Последнее определило существенно большее соответствие исследуемого объекта колчеданному типу, чем части порфировой системы, пусть и краевой.

Исследованные рудовмещающие вулканы нанчинского комплекса практически нацело затронуты метасоматическими изменениями фаций пропилитов и вторичных кварцитов – региональной и локальной соответственно. Пропилитизация проявлена во всех исследованных образцах вулкаников в виде развития тонкозернистого хлорита или агрегата тонкозернистого эпидота и серицита, реже скрытокристаллических хлорита, серицита и кварца по всей массе породы. Степень пропилитизации преимущественно средняя (20–80 % об.), реже малая или полная. Кислотный метасоматоз предположительно фации вторичных кварцитов, проявленный в развитии агрегатов тонкозернистого кварца и серицита, наложен на пропилитизированные участки пород. Последним по времени, о чём позволяет судить степень идиоморфности кристаллов, на рудовмещающие породы наложено образование мелко-среднекристаллических агрегатов идиоморфного кальцита, связанного с поздним пострудным карбонатным и карбонат-кварцевым прожилкованием. Очередность проявлений различных стадий метасоматоза – от начальной стадии к продвинутой: пропилитизация (эпидот, хлорит, серицит), окварцевание и серицитизация (серицит, кварц-1), окварцевание прожилковое (кварц-2), карбонатизация (кальцит).

Приуроченность образования рудных и жильных минералов к стадиям метасоматических изменений была получена по результатам исследования идиоморфности отдельных кристаллов рудных фаз и их взаимоотношений с агрегатами вмещающих фаз и базируется на результатах предыдущих исследований, изложенных в [3]. Последовательность метасоматических процессов и приуроченность к ним сульфидной минерализации по результатам проведённого исследования методами оптической

и электронной сканирующей микроскопии следующая: пропилитизация (стадия 1): пирит метасоматический, касситерит, шеелит; серицитизация и окварцевание (стадия 2): пирит метасоматический, пирит прожилковый, халькопирит, галенит, сфалерит, арсенопирит, реальгар, пирротин, пентландит, кубанит, киноварь, серебро и золото самородные, настуран, флюорит, монацит; карбонатизация (стадия 3): пирит метасоматический; циркон, по всей видимости, образован в дометасоматический этап.

Ассоциация рудных минералов, связываемая нами с процессами пропилитизации, т. н. стадия 1, вкраплена во вмещающих оруденение прочих стадий пропилитах по вулканикам среднего и, реже, кислого состава. Вкрапленная и прожилково-вкрапленная рудная и акцессорная минерализация (стадия 2) фиксируется в кварцевых, кварц-карбонатных прожилках, их зальбандах, зонах кварц-серицитовых изменений по вмещающим породам. Очередность образования агрегатов хорошо фиксируется по замещениям ассоциации ткани, сложенной плотной массой минералов группы хлорита на серицит и кварц метасоматического (бластез) или жильного генезиса. Выделить часть вкрапленного, преимущественно в прожилках, пирита в третью стадию позволил его существенно больший идиоморфизм, по сравнению с входящим в сульфидную ассоциацию, и размещение преимущественно в осевой части прожилков, что позволяет предполагать его рост в полости в условиях повторного открытия трещин/жил.

Температурные и барические условия для выделенных стадий приводятся по литературным данным. Проведение их лабораторного исследования планируется в будущем.

Ассоциация эпидота и хлорита по [13–16] низкотемпературная, от 200 до 350 °С, приповерхностная, до 2 км. Близкие глубинные условия по [14, 15] показаны для серицит-кварцевой ассоциации вторичных кварцитов – 1,5–2 км, температуры средние, от 250 до 500 °С.

Повсеместная пропилитизация с наложенными, пространственно приуроченными к кварцевому и сульфид-кварцевому прожилкованию окварцеванием и серицитизацией согласуется с развитием метасоматической проработки пород вулканической постройки трещинными растворами с вертикальным размахом глубин от первых десятков до первых тысяч метров [17, 18] в субаквальных условиях [19], надсубдукционных или надрифтовых вулканотектонических структурах [20], в которых, вероятно, сложное распределение малых интрузий [21]. Это привело к наложению процессов кислотного метасоматоза на пропилитизированный протолит и к отложению прожилково-вкрапленных и вкрапленных руд и субмикроскопических акцессориев (табл. 2).

Таблица 2. Парагенетическая схема. Составлена с использованием данных [3]

Table 2. Paragenetic scheme. Made with data from [3]

Метасоматический процесс Metasomatic process	Исходная порода Primary rock	Пропилитизация Propylitisation	Кварц-серицитовые изменения Quartz-sericitic alterations	
Прожилки Veinlets	Нет Absent	Биотитовые Biotite	Кварцевые с сульфидами Quartz with sulphides	Кварц-кальцитовые с сульфидами Quartz-calcite with sulphides
Стадия Stage	Дорудная Pre-ore	Дорудная Pre-ore	Рудная Ore	Пострудная Post-ore
Циркон Zircon				
Настуран Nasturane				
Пирит Pyrite				
Золото самородное Native gold				
Серебро самородное Native silver				
Флюорит Fluorite				
Монацит Monazite				
Касситерит Cassiterite				
Шеелит Sheelite				
Пирротин Pyrrhotite				
Кубанит Cubanite				
Халькопирит Chalcopyrite				
Сфалерит Sphalerite				
Арсенопирит Arsenopyrite				
Галенит Galena				
Реальгар Realgar				

Исследование тонкозернистых агрегатов рудных сульфидов показало, что они являются частью более крупной рудной вкрапленности в прожилках и вмещающей породе. Тонкая вкрапленность была нами описана для всех макроскопически определяемых сульфидов: пирита, халькопирита, сфалерита, галенита, арсенопирита. Отметим особо, что для халькопирита характерно образование в виде тонкой микронной вкрапленности в сфалерите. Наиболее редкие, встреченные в единичных образцах в редких зёрнах реальгар, пирротин, пентландит, кубанит и киноварь описаны только в виде тонкой рассеянной вкрапленности. Также отметим, что как для практически «сквозного» для всех стадий развития рудной системы пирита, так и основных рудных сульфидов – халькопирита, галенита, сфалерита, арсенопирита – весьма вероятно частичное переотложение в пострудный этап (табл. 2).

Образование касситерита месторождения Верхнее-Золотое отнесено нами к первой стадии метасоматических изменений – площадной пропилитизации толщи вулканитов. Однако прямо утвер-

ждать это не позволяет высокая степень наложенных кварц-серицитовых изменений второй стадии (табл. 1), отмеченных во всех образцах с касситеритом. В пользу предлагаемой гипотезы генезиса последнего говорит то, что, условия образования касситерита касситерит-силикатной формации, к которой наиболее близко Верхнее-Золотое, более окислительные, чем касситерит-кварцевой [22], что хорошо согласуется с общим кислотным характером вторичных изменений.

Синхронная с хлоритизацией кристаллизация касситерита и наличие зон касситеритовых руд с низкими содержаниями сульфидов на оловорудных объектах Приморья были отмечены в [22–24]. Следующей, принятой во внимание, особенностью является высокая устойчивость касситерита к внешним воздействиям [25, 26], что позволяет предполагать возможность сохранения касситерита после прохождения кислотного метасоматоза. Единичные находки срастаний касситерита и галенита в кварцевом прожилке (рис. 4) указывают на возможность переотложения имеющегося или отложения

нового касситерита во второй, рудный, этап. Ассоциация минералов олова и вольфрама типична для Арминского рудного района Приморья (олово), в который входит Звёздный рудный узел. Для рудного района характерно расположение месторождений вольфрама (Восток-2, около 40 км к востоку от месторождения Верхнее-Золотое), олова и вольфрама, к примеру, Тигриное (около 50 км к юго-востоку от исследуемого месторождения) в восточной части рудного района, олова – в центральной и западной частях рудного района, олова и меди – на севере рудного района, где расположено месторождение Верхнее-Золотое. Общим между изучаемым месторождением и оловорудными объектами является наличие на последних медной сульфидной минерализации, сопутствующей оловянной. К примеру, на месторождениях Арсеньевское и Искра (Кавалеровский рудный район). Близки и вмещающие рудные жилы, переработанные в ходе кислотного метасоматоза вулканиты. Временной интервал формирования месторождений олова Приморья оценивается в промежутке от 92 до 45 млн лет и соответствует возможному времени становления месторождения Верхнее-Золотое [10, 24, 27].

Генезис рудогенерирующего флюида для оловорудных объектов Приморья может быть связан с расположенными в непосредственной близости от них интрузиями кислого состава, в то время как вмещающие оруденение вулcano-плутонические структуры в большой степени изолированы друг от друга [27, 28]. Это приводит к дискусионности вопроса об источнике вольфрама и олова на исследуемом месторождении: в радиусе первых километров отмечены несколько малых интрузий кислого состава, а субширотная зона развития контактовых роговиков к северу от месторождения указывает на наличие «слепого» батолита. Разрешить поставленный вопрос можно в рамках будущего исследования, установив состав рудогенерирующего флюида и связав его с определённым магматическим телом методами исследования состава флюидных и расплавных включений, как было выполнено для грейзенов месторождения Тигриное [29], методом LA-ICP-MS после детального петрографического изучения олово-сульфидных руд с выходом на влияние вторичных изменений на состав рудных минералов [30] или комбинацией более доступных ICP-MS / ICP-OS / MC-ICP-MS и U-Pb датирования по цирконам, как было сделано для практически синхронных гранитов Центрального Китая [31].

Сходно с касситеритом и шеелитом размещение циркона: он в крайне близких количествах встречен нами как в пропилитизированной породе, так и во вторичных кварцитах (табл. 2), однако, как было указано выше, вероятно, сингенетичен протолиту,

ассоциирует с пиритом, по всей видимости, метасоматического генезиса. Единичный его кристалл, найденный в кварцевом прожилке, вероятно, был захвачен с ксенолитом породы, полностью растворённым в процессе кристаллизации минерального агрегата прожилка. Отметим, что вопрос о времени образования описанного циркона требует проведения дальнейшего исследования: вариативность идиоморфизма его кристаллов позволяет предполагать дометасоматический возраст для наиболее идиоморфных пылеватых кристаллов, по всей видимости, не затронутых при метасоматической переработке породы, и частичное растворение с перетолжением вещества для менее идиоморфных, образующих тесные срастания с породообразующими силикатами.

Самородные серебро и золото ассоциируют с сульфидами: серебро с пиритом, халькопиритом, сфалеритом и арсенопиритом, золото с пиритом и арсенопиритом. Примечательна форма выделения серебра: скелетные кристаллы. Вростки их в арсенопирите хорошо маркируют одновременность их образования. Следует отметить, что ассоциация «пустого», вероятно, метасоматического пирита во вмещающей ассоциацию вкрапленных халькопирита, сфалерита, галенита и, в некоторых образцах, арсенопирита породе указывает на то, что исследованные образцы отобраны в субэпитермальной зоне прожилкования [9, 32–34], которая может соответствовать как краевой части порфировой системы, так и зоны развития прожилкововкрапленного колчеданного оруденения. Последним может быть объяснено крайне малое для порфировой системы количество благородных металлов. Нахождение самородного золота и серебра в виде вкрапленности во вмещающей породе, но не в прожилках, позволяет заключить, что воздействие содержащего их флюида или раствора на вмещающие кислые метасоматиты по туфам среднего состава было длительным и глубоким. На то же указывают «смазанные» границы прожилков [34].

Примечательно выделение золота в самородном виде, а не в составе сульфидов, как можно было ожидать по [12, 35, 36]: микрозондовые анализы химического состава сульфидов (72 % от общего количества) не показали вхождения золота в их состав. Это указывает на его транспортирование флюидом [37] и отложение отдельно от сульфидной минерализации.

Минералы редких земель – флюорит и монацит, равно как и касситерит, отмечены в метасоматитах с вкрапленной медной минерализацией. Размещение пылеватых кристаллов перечисленных выше минералов в интерстициях преимущественно ксеноморфных зёрен ткани метасоматита указывает на образование флюорита, монацита, касситерита на

заклучительной стадии кислотного метасоматического процесса рудной и, возможно, начала пострудной стадии (табл. 2).

Порфиновые системы, относящиеся к различным регионам и обстановкам [38], к примеру, медно-молибденовая месторождения Los Sulfatos (Чили) [18], провинция Morococha (Перу) [39] медно-золоторудная с молибденом месторождения Vahti (Греция) [40], медно-золоторудная месторождения Малмыж (РФ, Хабаровский край) [41], демонстрируют наличие редкоземельных элементов как в составе сульфидной и оксидной рудной минерализации, так и собственно минералов редких земель, как и Верхнее-Золотое.

Флюорит является одним из типичных поздних нерудных минералов эпитермальных систем на периферии порфировой системы. Обогащение флюорита редкоземельными элементами в данном случае указывает лишь на наличие редких земель в материнском флюиде [38, 42–44].

Вопрос об источнике редкоземельных элементов в пылеватом флюорите требует проведения дополнительного исследования ввиду недостаточности данных в изученной выборке, однако мы предполагаем, что таким источником стал монацит: флюорит является наиболее низкотемпературным и наименее стойким в описанной ассоциации [42, 43, 45]. Вероятно его образование при позднейшей гидротермальной проработке вмещающей породы с инкорпорированием продуктов растворения монацита.

Урановая же минерализация, представленная настураном, в свою очередь, отмечена как в кварцевых прожилках, так и во вмещающих медно-полиметаллическое оруденение метасоматитах, что согласуется с литературными данными [46, 47]. Ассоциированность настурана с монацитом и благородными металлами позволяет сделать вывод об участии весьма кислого рудогенерирующего флюида в формировании порфировой системы на одном из этапов. Редкость находок и сугубо аксессуарный характер этой ассоциации указывают на её обособленность от собственно рудной сульфидной.

Заключение

Для олова, вольфрама и циркония на изучаемом месторождении характерно наличие собственных фаз при полном «игнорировании» вхождения в состав сульфидов в качестве примесей. Ассоциация с рудными сульфидами, характерными для эпитермального краевого штокверка, вероятно, порфировой системы, – халькопиритом, галенитом, сфалеритом [9, 32–34], является для вышеупомянутых фаз пространственной, но не временной. На основании результатов проведённого исследования предлагаем следующую гипотезу очередности кри-

сталлизации тонко вкрапленных аксессуарных минералов.

Циркон – наиболее древний аксессуар, вероятно, образовавшийся ещё на стадии формирования эффузивно-осадочной вмещающей породы, чему не противоречат микронный размер кристаллов и их слабо выраженная огранка, трактуемые нами как результат быстрой кристаллизации при эффузивном процессе. Касситерит и шеелит, являющиеся «сквозными» минералами для всего Звёздного рудного узла, приурочены к площадным процессам эпидотизации и хлоритизации первой стадии метасоматических изменений. Следовые их количества указывают на то, что оловянная и вольфрамовая минерализация на изученной части месторождения Верхнее-Золотое обусловлена общими для Звёздного рудного узла и содержащей месторождение вулканотектонической структуры в частности процессами, локальная интенсификация которых сформировала территориально близкие месторождения Звёздное и Янтарное. Образование тонкой вкрапленности аксессуарного золота, серебра, монацита и настурана, флюорита, вероятно, обусловлено процессом циркуляции кислого флюида на второй стадии метасоматических изменений, маркируемой локальной околожилковой и околотрепчинной серицитизацией, окварцеванием. Приуроченность полиметаллической сульфидной минерализации также к данной стадии и наличие взаимных вростаний исследованных аксессуаров и рудных сульфидов, что трактуется как признак синхронности их кристаллизации, позволяет отнести образование золота, серебра, монацита и настурана, возможно, флюорита к рудной стадии становления собственно системы рудных прожилков, порфировой или субаквальной [19, 48]. Образование пылеватой вкрапленности флюорита могло проходить и на более поздней, эпитермальной стадии карбонатизации (стадия 3). Последнее может объяснить захват им примеси редкоземельных металлов: они могли быть высвобождены при разрушении части образованного на предыдущей стадии монацита. Вкрапленность же касситерита и шеелита, судя по особенностям её размещения, вероятно, синхронна площадным метасоматическим изменениям в толще вмещающих сульфидную вкрапленность вулканитов среднего состава и обусловлена близостью месторождений и рудопроявлений с олово-вольфрамовым оруденением.

Самородные благородные металлы ассоциируют с пиритом, пирротинном (серебро и золото), арсенопиритом и халькопиритом, сфалеритом (серебро) – такая ассоциация известна по среднетемпературным полиметаллическим золотоносным жилам, диапазон глубин и температур образования которых пересекается с таковыми для вторичных квар-

цитов [14, 15]. Ассоциация арсенопирита и пирротина представляет редкость для изученной части месторождения (менее 1 % из описанных интервалов по керну), что указывает на локальность и, возможно, одноактность её появления. Приуроченность рудной сульфидной минерализации к участкам пород, в той или иной степени серицитизированных и окварцованных, пронизанных кварцевыми, сульфид-кварцевыми прожилками, указывает на её вероятную приуроченность к процессам кислотного выщелачивания. Можно выделить минимум две ассоциации: благороднометалльную – пирит-пирротиную с арсенопиритом и полиметаллическую — пирит-сфалерит-халькопиритовую. Более дробное выделение ассоциаций возможно на основе исследования массива данных документа-

ции керновых проб и результатов их химического анализа, что возможно в будущем.

Результаты проведённого исследования позволяют с достаточной степенью уверенности выдвинуть гипотезу образования сульфидных руд на исследованной части месторождения Верхнее-Золотое в ходе многоактной прокачки рудогенерирующего флюида по нескольким системам трещин с образованием прожилково-вкрапленного оруденения в породах вулканического конуса вулканотектонической структуры, вероятно, в островодужной обстановке [19]. Подтверждение предложенной гипотезы требует продолжения исследований рудных и акцессорных минералов месторождения Верхнее-Золотое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов Г.Н. Экономическое значение рудных минеральных ресурсов в Дальневосточном регионе // ГИАБ. – 2013. – № 1. – С. 270–276. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskoe-znachenie-rudnyh-mineralnyh-resursov-v-dalnevostochnom-regione> (дата обращения: 22.02.2024).
2. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. / под ред. А.И. Ханчука. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – Кн. 1, 2. – 981 с.
3. Сластников В.В. Минерагенический тип рудопоявления Верхнее-Золотое: результаты петрографического исследования // ГИАБ. – 2016. – № 10. – С. 283–303.
4. Кемкин И.В. Геодинамическая эволюция Сихотэ-Алиня и Япономорского региона в мезозое. – М.: Наука, 2006. – 258 с.
5. Давыдова М.Ю., Мартынов Ю.А., Перепелов А.Б. Эволюция изотопно-геохимического состава пород вулкана Уксичан (Срединный хребет, Камчатка) и ее связь с неогеновой тектонической перестройкой Камчатки // Петрология. – 2019. – Т. 27. – № 3. – С. 282–307. DOI: 10.31857/S0869-5903273282-307.
6. Magnetotelluric study in the Los Lagos Region (Chile) to investigate volcano-tectonic processes in the Southern Andes / M.J. Segovia, D. Diaz, K. Slezak, F. Zuniga // Earth, Planets and Space. – 2021. – Vol. 73:5. – 14 p. DOI: 10.1186/s40623-020-01332-w.
7. Ханчук А.И., Иванов В.В. Мезо-кайнозойские геодинамические обстановки и золотое оруденение Дальнего Востока России // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 11. – С. 1635–1645.
8. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Лист L-53-XVII. Масштаб 1:200000. Геологическая карта / под ред. А.В. Лызганова. – СПб: Изд-во ФГБУ "ВСЕГЕИ", 2019. – 2 л.
9. Sillitoe R.H. Porphyry copper systems // Economic geology. – 2010. – Vol. 105. – P. 3–41. DOI: 10.2113/gsecongeo.105.1.3.
10. Lee C.-T. A., Tang M. How to make porphyry copper deposits // Earth and Planetary Science Letters. – 2020. – Vol. 529. – Iss. 115868. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.epsl.2019.115868.
11. Amphibole control on copper systematics in arcs: insights from the analysis of global datasets / N.D. Barber, M. Edmonds, F. Jenner, A. Audétat, H. Williams // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2021. – V. 307. – P. 192–211. DOI: 10.1016/j.gca.2021.05.034.
12. Zhao Y., Liu H., Qin K. Discussion on Au transportation mechanism in melt-magma-fluid in porphyry Cu deposit – a case study from Jinchang porphyry Au (Cu) deposit, Heilongjiang province, China // Ore Geology Reviews. – 2019. – Vol. 111. – Iss. 102968. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.102968. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169136818305948?via%3Dihub> (дата обращения 27.02.2024).
13. Геохимия и петрография гидротермально измененных пород Рябинового рудного поля (южная Якутия) как основа прогноза золото-медно-порфирового оруденения / Н.В. Шатова, В.В. Шатов, А.В. Молчанов, О.В. Петров, А.В. Терехов, В.Н. Белова, В.И. Леонтьев // РГМ. – 2020. – № 84. – С. 71–96.
14. Дворник Г.П. Виды метасоматических пород: температурные условия образования, особенности состава, минерогения // Известия УГГУ. – 2020. – Вып. 1 (57). – С. 63–72. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-1-63-72.
15. Трушин С.И., В Кириллов.Е., Лапенко А.С. Благороднометалльные рудные формации зон активизации востока Яно-Колымской складчатой системы (Магаданская область, Россия) // РГМ. Металлогения. – 2021. – № 85. – С. 67–78.
16. Ishikawa T. Some petrological considerations on the Miocene volcanic activities in green-tuff regions in Japan // Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Geology and mineralogy. – 1960. – Ser. 4. – Vol. 10. – № 3. – P. 471–480.
17. Rapid alteration of fractured volcanic conduits beneath Mt Unzen / T.I. Yilmaz, F.B. Wadsworth, H. Al. Gilg, K.-U. Hess, J.E. Kendrick, P.A. Wallace, Y. Lavallée, J. Utley, J. Vasseur, S. Nakada, D.B. Dingwell // Bulletin of Volcanology. – 2021. – Vol. 83. – 14 p. DOI: 10.1007/s00445-021-01450-7.
18. Tracking cobalt, REE and gold from a porphyry-type deposit by LA-ICP-MS: a geological approach towards metal-selective mining in tailings / G. Velásquez, D. Carrizo, S. Salvi, I. Vela, M. Pablo, A. Pérez // Minerals. – 2020. – Vol. 10. – Iss. 109. – 17 p. DOI: 10.3390/min10020109.
19. Trace element signatures in pyrite and marcasite from Shallow Marine Island arc-related hydrothermal Vents, Calypso Vents, New Zealand, and Paleochori Bay, Greece / M. Nestmeyer, M. Keith, K.M. Haase, R. Klemd, P. Voudouris, U. Schwarz-

- Schampera, H. Strauss, M. Kati, A. Magganis // *Front. Earth Sci.* – 2021. – Vol. 9. – 18 p. DOI: 10.3389/feart.2021.641654. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2021.641654/full> (дата обращения: 27.02.2024).
20. Tamanyu S., Wood C.P. Characterization of geothermal systems in volcano-tectonic depressions: Japan and New Zealand // *Bulletin of the Geological Survey of Japan.* – 2003. – Vol. 54. – № 3/4. – P. 117–129. DOI: 10.9795/bullgsj.54.117.
21. Inside the volcano: three-dimensional magmatic architecture of a buried shield volcano / F. Walker, N. Schofield, J. Millett, D. Jolley, S. Holford, S. Planke, D.A. Jerram, R. Myklebust // *Geology.* – 2020. – Vol. 49. – P. 243–247. DOI: 10.1130/G47941.1.
22. Алексеев В.И., Марин Ю.Б. Турмалин как индикатор оловородных проявлений касситерит-кварцевой и касситерит-силикатной формаций (на примере Верхнеурмийского рудного узла, Дальний Восток) // *Записки Горного института.* – 2019. – Т. 235. – С. 3–9. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.3.
23. Гореликова Н.В., Таскаев В.И., Рассулов В.А. Структурно-химическая неоднородность колломорфного касситерита и минералы In, Pb, As в оловянных рудах месторождения Верхнее (Приморье, Россия) // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* – 2019. – № 4. – С. 11–18. DOI: 10.32454/0016-7762-2019-4-18-25.
24. Орехов А.А., Гоневчук В.Г., Семеняк Б.И. Олово Приморья. Кавалеровский рудный район // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле.* – 2019. – № 4. – Вып. 44. – С. 5–18. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-3-43-5-18.
25. Ивашов П.В. Химическое выветривание касситерита как основа формирования биогеохимических ореолов рассеяния олова в растениях // *Региональные проблемы.* – 2019. – № 1. – С. 26–30. DOI: 10.31433/2618-9593-2019-22-1-26-30.
26. Петроченков Д.А. Коллекционные и ювелирные касситериты; перспективы добычи // *Отечественная геология.* – 2018. – № 3. – С. 68–77.
27. Гоневчук В.Г., Семеняк Б.И., Коростелев П.Г. Хингано-Охотский металлогенический пояс в концепции террейнов // *Рудные месторождения континентальных окраин.* – 2000. – № 1. – С. 35–54.
28. Ханчук А.И. Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России // *Рудные месторождения континентальных окраин.* – 2000. – № 1. – С. 5–34.
29. Составы расплавов и флюидный режим кристаллизации редкометалльных гранитов и пегматитов Тигриного Sn–W месторождения (Приморье) / С.З. Смирнов, Н.С. Бортников, В.Г. Гоневчук, Н.В. Гореликова // *Доклады Академии наук.* – 2014. – Т. 456. – № 1. – С. 95–100. DOI: 10.7868/S0869565214130246.
30. Indium in polymetallic mineralisation at the Gierczyn mine, Karkonosze-Izera Massif, Poland: results of EPMA and LA-ICP-MS investigations / K. Foltyn, V. Bertrandsson Erlandsson, G.A. Kozub-Budzyń, F. Melcher, A. Piastrzyński // *Geological Quarterly.* – 2020. – V. 64. – № 1. – P. 74–85. DOI: 10.7306/gq.1516.
31. Origin of the Jurassic-Cretaceous intraplate granitoids in Eastern China as a consequence of paleo-Pacific plate subduction / D. Hong, Y. Niu, Y. Xiao, P. Sun, J. Kong, P. Guo, F. Shao, X. Wang, M. Duan, Q. Xue, H. Gong, S. Chen // *Lithos.* – 2018. – Vol. 322. – P. 405–419. DOI: 10.1016/j.lithos.2018.10.027.
32. Jambor J.L., Owens d'Alton R. Vincennite in the Maggie porphyry copper deposit, British Columbia // *Canadian Mineralogist.* – 1987. – Vol. 25. – P. 227–228.
33. Hedenquist J.W., Richards J. The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits // *Reviews in Economic Geology.* – 1998. – Vol. 10. – P. 235–256. DOI: 10.5382/Rev.10.10.
34. Preliminary model of porphyry copper deposits: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008–1321 / B.R. Berger, R.A. Ayuso, J.C. Wynn, R.R. Seal // *USGS.* – 2008. – 55 p.
35. Imai A. Mineral paragenesis, fluid inclusions and sulfur isotope systematics of the Lepanto Far Southeast porphyry Cu–Au deposit, Mankayan, Philippines // *Resource geology.* – 2000. – Vol. 50. – № 3. – P. 151–168. DOI: 10.1111/j.1751-3928.2000.tb00065.x.
36. Mechanisms for Pd–Au enrichment in porphyry-epithermal ores of the Elatsite deposit, Bulgaria / J. M. González-Jiménez, R. Piña, T. N. Kerestedjian, F. Gervilla, I. Borrajo, J. Farré-de Pablo, J. A. Proenza, F. Tornos, J. Roqué, F. Nieto // *Journal of Geochemical Exploration.* – 2021. – Vol. 220. – Iss. 106664. – 20 p. DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106664.
37. Orlandea E., Șerban-Nicolae V. A novel conceptual model of intrusion related gold bearing systems and exploration tools // *Studia UBB Geologia.* – 2020. – Vol. 63. – № 1. – P. 1–12. DOI: 10.5038/19-8602.63.1.1304.
38. Zhou L., Fan H., Ulrich T. Editorial for special issue “Critical metals in hydrothermal ores: resources, recovery, and challenges” // *Minerals.* – 2021. – Vol. 11. – 5 p. DOI: 10.3390/min11030299.
39. Distribution of indium, germanium, gallium and other minor and trace elements in polymetallic ores from a porphyry system: the Morococha district, Peru / D. Benites, L. Torró, J. Vallance, O. Laurent, P.E. Valverde, K. Kouzmanov, C. Chelle-Michou, L. Fontboté // *Ore Geology Reviews.* – 2021. – Vol. 136. – Iss. 104236. – 31 p. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104236.
40. Rare and critical metals in pyrite, chalcopyrite, magnetite, and titanite from the Vathi porphyry Cu–Au±Mo deposit, Northern Greece / C.L. Stergiou, V. Melfos, P. Voudouris, L. Papadopoulou, P.G. Spry, I. Peytcheva, D. Dimitrova, E. Stefanova, K. Giouri // *Minerals.* – 2021. – Vol. 11. – № 6. – Iss. 630. – 28 p. DOI: 10.3390/min11060630.
41. Буханова Д.С., Чубаров В.М. Редкоземельные минералы в рудах Малмыжского золото-меднопорфирового месторождения (Хабаровский край) // *Записки РМО.* – 2019. – № 1. – С. 54–64. DOI: 10.30695/zrmo/2019.1481.05.
42. Fractionation of rare earth elements in greisen and hydrothermal veins related to A-type magmatism / M. Tillberg, O.M. Maskenskaya, H. Drake, J.K. Hogmalm, C. Broman, A.E. Fallick, M.E. Åström // *Geofluids.* – 2019. – P. 1–20. DOI: 10.1155/2019/4523214.
43. Rare earth element-bearing fluorite deposits of Turkey: an overview / H.S. Öztürk, S. Altuncu, N. Hanilçi, C. Kasapçı, K.M. Goodenough // *Ore Geology Reviews.* – 2019. – Vol. 105. – P. 423–444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.021>
44. Alkaline-type epithermal gold deposit model: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–R / K.D. Kelley, P.G. Spry, V.T. McLemore, D.L. Fey, E.D. Anderson // *USGS.* – 2020. – 74 p. DOI: 10.3133/sir20105070R.

45. Azizi M.R., Abedini A., Alipour S. Application of lanthanides tetrad effect as a geochemical indicator to identify fluorite generations: A case study from the Laal-Kan fluorite deposit, NW Iran. *Comptes Rendus // Géoscience – Sciences de la Planète*. – 2020. – Vol. 352. – Iss. 1. – P. 43–58. DOI: 10.5802/crgeos.2.
46. Krupičkaite, Cu₆[AsO₃(OH)]6·8H₂O, a new copper arsenate mineral from Jáchymov (Czech Republic) / G. Steciuk, J. Sejkora, J. Čejka, J. Plášil, J. Hloušek // *Journal of Geosciences*. – 2021. – P. 37–50. DOI: 10.3190/jgeosci.318.
47. The role of continental crust in the formation of uraninite-based ore deposits / S.R. Lewis, A. Simonetti, L. Corcoran, S.S. Simonetti, C. Dorais, P.C. Burns // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. – Iss. 136. – 27p. DOI: 10.3390/min10020136.
48. Origin and evolution of magmas in the porphyry Au-mineralized Javorie Volcano (Central Slovakia): evidence from thermobarometry, melt inclusions and sulfide inclusions / B. Rottier, A. Audétat, P. Koděra, J. Lexa // *Journal of Petrology*. – 2019. – Vol. 60. – Iss. 12. – P. 2449–2482. DOI: 10.1093/petrology/egaa014.

Информация об авторе

Виктор Валентинович Сластников, старший геолог, ООО «Теллур С-В», Россия, 190068, г. Санкт-Петербург, ул. Союза Печатников, 8А; v_slastnikov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8357-7387>

Поступила в редакцию: 20.03.2024

Поступила после рецензирования: 04.06.2024

Принята к публикации: 28.11.2024

REFERENCES

1. Arkhipov G.N. Economic importance of ore mineral resources in the Far Eastern region. *GIAB*, 2013, no. 1, pp. 270–276. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskoe-znachenie-rudnyh-mineralnyh-resursov-v-dalnevostochnom-regione> (accessed 22 February 2024).
2. *Geodynamics, magmatism and metallogeny of the East of Russia*. Ed. by A.I. Khanchuk. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2006. B. 1, 2. 981 p. (In Russ.)
3. Slastnikov V.V. Mineragenic type of ore occurrence Verkhnee-Zolotoe: results of petrographic research. *GIAB*, 2016, no. 10, pp. 283–303. (In Russ.)
4. Kemkin I.V. *Geodynamic evolution of Sikhote-Alin and the Japonomor region in the Mesozoic*. Moscow, Nauka Publ., 2006. 258 p. (In Russ.)
5. Davydova M.Yu., Martynov Yu.A., Perepelov A.B. Evolution of isotope-geochemical composition of rocks of the Uksichan volcano (Sredinny Ridge, Kamchatka) and its connection with the Neogene tectonic restructuring of Kamchatka. *Petrologiya*, 2019, vol. 27, no. 3, pp. 282–307. DOI: 10.31857/S0869-5903273282-307.
6. Segovia M.J., Diaz D., Slezak K., Zuniga F. Magnetotelluric study in the Los Lagos Region (Chile) to investigate volcano-tectonic processes in the Southern Andes. *Earth, Planets and Space*, 2021, vol. 73:5, 14 p. DOI: 10.1186/s40623-020-01332-w.
7. Hanchuk A.I., Ivanov V.V. Meso-Cenozoic geodynamic conditions and the gold mineralization of the Russian Far East. *Geology and geophysics*, 1999, vol. 40, no. 11, pp. 1635–1645. (In Russ.)
8. *State geological map of Russian Federation. Sheet L-53-XVII. Scale 1:200000. Geological map*. Ed. by A.V. Lyzganov. St Petersburg, VSEGEI Publ., 2019. 2 p. (In Russ.)
9. Sillitoe R.H. Porphyry copper systems. *Economic geology*, 2010, vol. 105, pp. 3–41. DOI: 10.2113/gsecongeo.105.1.3.
10. Lee C.-T.A., Tang M. How to make porphyry copper deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, vol. 529, Iss. 115868, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.epsl.2019.115868.
11. Barber N.D., Edmonds M., Jenner F., Audétat A., Williams H. Amphibole control on copper systematics in arcs: Insights from the analysis of global datasets. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, vol. 307, pp. 192–211. DOI: 10.1016/j.gca.2021.05.034.
12. Zhao Y., Liu H., Qin K. Discussion on Au transportation mechanism in melt-magma-fluid in porphyry Cu deposit – a case study from Jinchang porphyry Au (Cu) deposit, Heilongjiang province, China. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 111, Iss. 102968. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.102968. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169136818305948?via%3Dihub> (accessed 27 February 2024).
13. Shatova N.V., Shatov V.V., Molchanov A.V., Petrov O.V., Terekhov A.V., Belova V.N., Leontev V.I. Geochemistry and petrography of hydrothermally altered rocks of the Ryabinovoe ore field (South Yakutia) as the basis for prediction of gold-copper-porphyry ore mineralization. *RgiM*, 2020, no. 84, pp. 71–96. (In Russ.)
14. Dvornik G.P. Types of metasomatic rocks: temperature conditions of formation, composition features, minerageny. *Proceedings of the Ural State Mining University*, 2020, Iss. 1 (57), pp. 63–72. (In Russ.) DOI: 10.21440/2307-2091-2020-1-63-72.
15. Trushin S.I., Kirillov V.E., Lapenko A.S. Noble metal ore formations in the activation zones in the eastern Yana-Kolyma Fold System (Magadan Region, Russia). *RgiM. Metallogeny*, 2021, no. 85, pp. 67–78. (In Russ.)
16. Ishikawa T. Some petrological considerations on the Miocene volcanic activities in green-tuff regions in Japan. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Geology and mineralogy*, 1960, Ser. 4, vol. 10, no. 3, pp. 471–480.
17. Yilmaz T.I., Wadsworth F.B., Gilg H.A.I., Hess K.-U., Kendrick J.E., Wallace P.A., Lavallée Y., Utley J., Vasseur J., Nakada S., Dingwell D.B. Rapid alteration of fractured volcanic conduits beneath Mt Unzen. *Bulletin of Volcanology*, 2021, vol. 83, 14 p. DOI: 10.1007/s00445-021-01450-7.
18. Velásquez G., Carrizo D., Salvi S., Vela I., Pablo M., Pérez A. Tracking cobalt, REE and gold from a porphyry-type deposit by LA-ICP-MS: a geological approach towards metal-selective mining in tailings. *Minerals*, 2020, vol. 10, Iss. 109, 17 p. DOI: 10.3390/min10020109.
19. Nestmeyer M., Keith M., Haase K.M., Klemm R., Voudouris P., Schwarz-Schampera U., Strauss H., Kati M., Magganas A. Trace element signatures in pyrite and marcasite from Shallow Marine Island arc-related hydrothermal Vents, Calypso Vents, New

- Zealand, and Paleochori Bay, Greece. *Front. Earth Sci.*, 2021, vol. 9, 18 p. DOI: 10.3389/feart.2021.641654. Available at <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2021.641654/full> (accessed 27 February 2024).
20. Tamanyu S., Wood C. P. Characterization of geothermal systems in volcano-tectonic depressions: Japan and New Zealand. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 2003, vol. 54, no. 3/4, pp. 117–129. DOI: 10.9795/bullgsj.54.117.
21. Walker F., Schofield N., Millett J., Jolley D., Holford S., Planke S., Jerram D.A., Myklebust R. Inside the volcano: three-dimensional magmatic architecture of a buried shield volcano. *Geology*, 2020, vol. 49, pp. 243–247. DOI: 10.1130/G47941.1.
22. Alekseev V.I., Marin Yu.B. Tourmaline as an indicator of tin occurrences of cassiterite-quartz and cassiterite-silicate formations (a case study of the Verkhneurmitsky ore cluster, Far East). *Journal of Mining institute*, 2019, vol. 235, pp. 3–9. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2019.1.3.
23. Gorelikova N.V., Taskaev V.I., Rassulov V.A. Structural and chemical heterogeneity of colloform cassiterite and In, Pb, As minerals at the tin ores for the Verkhnee deposit (Primorye, Russia). *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology And Exploration*, 2019, no. 4, pp. 11–18. (In Russ.) DOI: 10.32454/0016-7762-2019-4-18-25.
24. Orekhov A.A., Gonevchuk V.G., Semenyak B.I. Tin of Primorye. Kavalersky ore district. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*, 2019, no. 4, Iss. 44, pp. 5–18. (In Russ.) DOI: 10.31431/1816-5524-2019-3-43-5-18.
25. Ivashov P.V. Chemical weathering of cassiterite as the basis for the formation of biogeochemical halos of tin scattering in plants. *Regionalnye problemy*, 2019, no. 1, pp. 26–30. (In Russ.) DOI: 10.31433/2618-9593-2019-22-1-26-30.
26. Petrochenkov D.A. Collection and Jewellery cassiterites; the perspectives of extraction. *Otechestvennaya geologiya*, 2018, no. 3, pp. 68–77. (In Russ.)
27. Gonevchuk V.G., Semenyak B.I., Korostelev P.G. The Khingan-Okhotsk metallogenic belt in the concept of terranes. *Rudnye mestorozhdeniya kontinentalnykh okrain*, 2000, no. 1, pp. 35–54. (In Russ.)
28. Hanchuk A.I. Paleogeodynamic analysis of the formation of ore deposits in the Russian Far East. *Rudnye mestorozhdeniya kontinentalnykh okrain*, 2000, no. 1, pp. 5–34. (In Russ.)
29. Smirnov S.Z., Bortnikov N.S., Gonevchuk V.G., Gorelikova N.V. Melt compositions and fluid crystallization regime of rare-metal granites and pegmatites of the Tigrinoye Sn-W deposit (Primorye). *Doklady Akademii nauk*, 2014, vol. 456, no. 1, pp. 95–100. (In Russ.) DOI: 10.7868/S0869565214130246.
30. Foltyn K., Bertrandsson Erlandsson V., Kozub-Budzyń G.A., Melcher F., Piestrzyński A. Indium in polymetallic mineralisation at the Gierczyn mine, Karkonosze-Izera Massif, Poland: results of EPMA and LA-ICP-MS investigations. *Geological Quarterly*, 2020, vol. 64, no. 1, pp. 74–85. DOI: 10.7306/gq.1516.
31. Hong D., Niu Y., Xiao Y., Sun P., Kong J., Guo P., Shao F., Wang X., Duan M., Xue Q., Gong H., Chen S. Origin of the Jurassic-Cretaceous intraplate granitoids in Eastern China as a consequence of paleo-Pacific plate subduction. *Lithos*, 2018, vol. 322, pp. 405–419. DOI: 10.1016/j.lithos.2018.10.027.
32. Jambor J.L., Owens d'Alton R. Vincennite in the Maggie porphyry copper deposit, British Columbia. *Canadian Mineralogist*, 1987, vol. 25, pp. 227–228.
33. Hedenquist J.W., Richards J. The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits. *Reviews in Economic Geology*, 1998, vol. 10, pp. 235–256. DOI: 10.5382/Rev.10.10.
34. Berger B.R., Ayuso R.A., Wynn J.C., Seal R.R. *Preliminary model of porphyry copper deposits: U.S.* Geological Survey Open-File Report 2008–1321. USGS, 2008, 55 p.
35. Imai A. Mineral paragenesis, fluid inclusions and sulfur isotope systematics of the Lepanto Far Southeast porphyry Cu-Au deposit, Mankayan, Philippines. *Resource geology*, 2000, vol. 50, Iss. 3, pp. 151–168. DOI: 10.1111/j.1751-3928.2000.tb00065.x.
36. González-Jiménez J.M., Piña R., Kerestedjian T.N., Gervilla F., Borrajo I., Farré-de Pablo J., Proenza J.A., Tornos F., Roqué J., Nieto F. Mechanisms for Pd-Au enrichment in porphyry-epithermal ores of the Elatsite deposit, Bulgaria. *Journal of Geochemical Exploration*, 2021, vol. 220, Iss. 106664, 20 p. DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106664.
37. Orlandea E., Șerban-Nicolae V. A novel conceptual model of intrusion related gold bearing systems and exploration tools. *Studia UBB Geologia*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 1–12. DOI: 10.5038/19-8602.63.1.1304.
38. Zhou L., Fan H., Ulrich T. Editorial for special issue “Critical metals in hydrothermal ores: resources, recovery, and challenges”. *Minerals*, 2021, vol. 11, 5 p. DOI: 10.3390/min11030299.
39. Benites D., Torró L., Vallance J., Laurent O., Valverde P.E., Kouzmanov K., Chelle-Michou C., Fontboté L. Distribution of indium, germanium, gallium and other minor and trace elements in polymetallic ores from a porphyry system: the Morococha district, Peru. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 136, Iss. 104236, 31 p. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104236.
40. Stergiou C.L., Melfos V., Voudouris P., Papadopoulou L., Spy P.G., Peytcheva I., Dimitrova D., Stefanova E., Giouri K. Rare and critical metals in pyrite, chalcopyrite, magnetite, and titanite from the Vathi Porphyry Cu-Au±Mo deposit, Northern Greece. *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 6, Iss. 630, 28 p. DOI: 10.3390/min11060630.
41. Buhanova D.S., Chubarov V.M. Rare earth minerals in ores of the Malmyzhskoe gold-copper-porphyry deposit (Khabarovsk krai). *Zapiski RMO*, 2019, no. 1, pp. 54–64. (In Russ.) DOI: 10.30695/zrmo/2019.1481.05.
42. Tillberg M., Maskenskaya O.M., Drake H., Hogmalm J.K., Broman C., Fallick A.E., Åström M.E. *Fractionation of rare earth elements in greisen and hydrothermal veins related to A-type magmatism. Geofluids*, 2019, pp. 1–20. DOI: 10.1155/2019/4523214.
43. Öztürk H.S., Altuncu S., Haniçlı N., Kasapçı C., Goodenough K.M. Rare earth element-bearing fluorite deposits of Turkey: an overview. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 105, pp. 423–444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.021>
44. Kelley K.D., Spy P.G., McLemore V.T., Fey D.L., Anderson E.D. *Alkaline-type epithermal gold deposit model: U.S.* Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–R. USGS, 2020. 74 p. DOI: 10.3133/sir20105070R.
45. Azizi M.R., Abedini A., Alipour S. Application of lanthanides tetrad effect as a geochemical indicator to identify fluorite generations: a case study from the Laal-Kan fluorite deposit, NW Iran. *Comptes Rendus. Géoscience – Sciences de la Planète*, 2020, vol. 352, Iss. 1, pp. 43–58. DOI: 10.5802/crgeos.2.
46. Steciuk G., Sejkora J., Čejka J., Plášil J., Hloušek Krupičkaite J. Cu₆[AsO₃(OH)]₆·8H₂O, a new copper arsenate mineral from Jáchymov (Czech Republic). *Journal of Geosciences*, 2021, pp. 37–50. DOI: 10.3190/jgeosci.318.

47. Lewis S.R., Simonetti A., Corcoran L., Simonetti S.S., Dorais C., Burns P.C. The role of continental crust in the formation of uraninite-based ore deposits. *Minerals*, 2020, vol. 10, Iss. 136, 27 p. DOI:10.3390/min10020136.
48. Rottier B., Audétat A., Koděra P., Lexa J. Origin and evolution of magmas in the porphyry Au-mineralized Javorie Volcano (Central Slovakia): evidence from thermobarometry, melt inclusions and sulfide inclusions. *Journal of Petrology*, 2019, vol. 60, Iss. 12, pp. 2449–2482. DOI: 10.1093/petrology/egaa014.

Information about the author

Viktor V. Slastnikov, Leading Geologist, Tellur S-V LLC, 8, Soyuza Pechatnikov street, St. Petersburg, 190068, Russian Federation; v_slastnikov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8357-7387>

Received: 20.03.2024

Revised: 04.06.2024

Accepted: 28.11.2024