

УДК 553.411.071
DOI: 10.18799/24131830/2025/11/5296
Шифр специальности ВАК: 1.6.10
Научная статья



Условия формирования Au-Ag эпитермального месторождения Левобережное (Хабаровский край): минеральные маркеры, термомикрометрия и 3D-анализ распределения минералов в рудах

Т.Ю. Якич¹✉, Д.В. Левочская², Е.А. Синкина¹, М.В. Шалдыбин^{1,3},
П.Н. Максимов¹, Д.А. Ярославцев¹, С.Г. Чистяков¹, А.С. Рубан¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Хабаровский филиал АО «Полиметалл УК», Россия, г. Хабаровск

³ ООО «РН-Проектирование Добыча», Россия, г. Томск

✉ yakichtu@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования эпитермальных Au-Ag месторождений северо-востока России имеет как фундаментальное, так и прикладное экономическое значение. В условиях истощения запасов богатых коренных и россыпных традиционных месторождений золота интерес к ранее недооценённым объектам эпитермального типа, распространённым в труднодоступных регионах Дальнего Востока и Камчатки, резко возрос. Несмотря на низкие содержания металлов в рудах и сложные логистические условия, в настоящее время эти месторождения формируют значительный резерв минерально-сырьевой базы золота РФ, требующий комплексного изучения. Настоящее исследование позволяет установить минеральную форму нахождения золота, его парагенетические ассоциации, минералы-спутники, возможные механизмы транспорта и осаждения, геохимические параметры рудообразующей системы (температура, фугитивность серы и pH среды). **Цель:** реконструировать условия рудообразования в эпитермальной системе Левобережного месторождения на основе комплексного изучения минеральных ассоциаций и сосуществующих парагенезисов, температурного режима и параметров флюидов. **Методы:** микротермометрии, минералогической геотермометрии, СЭМ-ЭДС, РФА, РДА-анализа и рентгеновской микротомографии. **Результаты и выводы.** Комплексное исследование позволило установить прогрессивное охлаждение рудообразующей системы м. Левобережной от 380 до <200 °С, что подтверждается данными микротермометрии и минералогической геотермометрии. Расчеты фугитивности серы ($\log \alpha_{S_2} = -7...-16,5$) свидетельствуют о том, что в начале формирования рудной минерализации м. Левобережное кристаллизовался пирит; при изменении параметров системы (встреча с метеорными водами, охлаждение) при восстановлении рудообразующих флюидов на фоне падения серной активности начал кристаллизоваться марказит и осаждался электрум. Выявление поздней стадии минералообразования ($\log \alpha_{S_2} \approx -16,5$ при $T < 200$ °С), маркируемой появлением Se-содержащего акантита, указывает на эволюцию флюидного режима в сторону понижения активности серы, увеличения кислотности pH и повышения роли мышьяка и сурьмы. Тесная ассоциация золота с мышьяковистым пиритом и арсенопиритом может объясняться процессом растворения FeAsS, который локально создаёт более восстановительные условия по сравнению с основным флюидом, что способствует восстановлению и осаждению золота. Полученные данные существенно дополняют современные представления о генезисе золотосеребряного типа оруденения в эпитермальных системах и могут быть использованы для разработки поисковых критериев для аналогичных объектов.

Ключевые слова: электрум, марказит, мышьяковистый пирит, флюидные включения, фугитивность серы, арсенопиритовая геотермометрия, эпитермальное месторождение золота

Благодарности: Исследование выполнено частично при поддержке ГЗ Наука FSWW-2023-0010 «Комплексные исследования на базе природных геологических лабораторий». Особая благодарность выражается УК «Полиметалл» за представление материала и всестороннюю поддержку. Авторы также признательны Антону Рудольфовичу Ракитину за помощь в обработке, интерпретации и расшифровке данных, полученных с рентгеновского микротомографа.

Для цитирования: Условия формирования Au-Ag эпитермального месторождения Левобережное (Хабаровский край): минеральные маркеры, термомикрометрия и 3D-анализ распределения минералов в рудах / Т.Ю. Якич, Д.В. Левочская, Е.А. Синкина, М.В. Шалдыбин, П.Н. Максимов, Д.А. Ярославцев, С.Г. Чистяков, А.С. Рубан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 11. – С. 173–190. DOI: 10.18799/24131830/2025/11/5296



Ore-forming conditions of the Au-Ag Levoberezhnoe epithermal deposit (Khabarovsk territory): evidence from mineral proxies, thermomicrometry and 3D analysis of mineral distribution in ores

T.Yu. Yakich¹✉, D.V. Levochskaia², E.A. Sinkina¹, M.V. Shaldybin^{1,3},
P.N. Maksimov¹, D.A. Yaroslavtsev¹, S.G. Chistyakov¹, A.S. Ruban¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Khabarovsk Branch of Polymetal Management JSC, Khabarovsk, Russian Federation

³ LLC "RN-Proektirovanie Dobycha", Tomsk, Russian Federation

✉ yakichtu@tpu.ru

Abstract. Relevance of studying epithermal Au-Ag deposits in northeastern Russia lies in both fundamental scientific and applied economic significance. With the depletion of rich conventional primary and placer gold deposits, interest in previously underestimated epithermal-type deposits in remote regions of the Far East and Kamchatka has sharply increased. Despite low metal grades and complex logistical conditions, these deposits currently form a significant reserve for Russian gold mineral resource base, requiring comprehensive study. This research aims to determine the mineral form of gold occurrence, its paragenetic associations, indicator minerals, possible transport and deposition mechanisms, and geochemical parameters of the ore-forming system (such as temperature, sulfur fugacity, and pH). **Aim.** To reconstruct the ore-forming conditions of the Levoberezhnoe epithermal deposit through integrated analysis of mineral associations, temperature regime, and fluid parameters. **Methods.** Microthermometry, mineralogical geothermometry, SEM-EDS, XRF, XRD analysis, and X-ray microtomography. **Results and conclusions:** The comprehensive study revealed progressive cooling of the Levoberezhnoe ore-forming system from 380 to <200°C, confirmed by microthermometry and mineralogical geothermometry data. Sulfur fugacity calculations ($\log a_{S_2} = -7...-16,5$) show that pyrite crystallized initially during system evolution, while subsequent changes (interaction with meteoric waters, cooling) led to fluid neutralization and reduction, causing marcasite crystallization and electrum deposition under decreasing sulfur activity. The identification of a late mineralization stage ($\log a_{S_2} \approx -16,5$ at $T < 200^\circ\text{C}$), marked by Se-bearing acanthite, indicates fluid regime evolution toward lower sulfur activity, increased acidity (pH), and greater arsenic and antimony involvement. Gold precipitation in association with arsenian pyrite and arsenopyrite is facilitated by FeAs dissolution, which produces localized redox gradients favoring Au reduction. These results significantly enhance current understanding of gold-silver mineralization genesis in epithermal systems and can be used to develop exploration criteria for similar deposits.

Keywords: electrum, marcasite, arsenian pyrite, fluid inclusions, sulfur fugacity, arsenopyrite geothermometry, epithermal gold deposit

Acknowledgements: This study was partially supported by the State Assignment of Science project no. FSWW-2023-0010 "Integrated Studies Based on Natural Geological Laboratories". The authors express special gratitude to Polymetal Management JSC for providing geological materials and comprehensive support. The authors also acknowledge Anton R. Rakitin for his assistance in processing, interpreting, and deciphering X-ray microtomography data.

For citation: Yakich T.Yu., Levochskaia D.V., Sinkina E.A., Shaldybin M.V., Maksimov P.N., Yaroslavtsev D.A., Chistyakov S.G., Ruban A.S. Ore-forming conditions of the Au-Ag Levoberezhnoe epithermal deposit (Khabarovsk region): evidence from mineral proxies, thermomicrometry and 3D analysis of mineral distribution in ores. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 11, pp. 173–190. DOI: 10.18799/24131830/2025/11/5296

Введение

Эпитермальные Au-Ag месторождения представляют особый класс рудных объектов, формирующихся в условиях низких температур (<300 °C) и малых глубин (<1 км) в зонах активных континентальных окраин [1–6]. Эпитермальные месторождения подразделяются на три основных типа по составу флюида, температурному режиму и минеральным ассоциациям, что определяет их поисковые критерии и промышленную ценность: 1) low sulfidation

(LS) (низкосульфидизированные) – формируются в восстановительных условиях (150...300 °C) щелочными флюидами с продуктивной минерализацией в виде электрума, Ag-сульфосолей и селенидов [7, 8]; 2) high sulfidation (HS) (высокосульфидизированные) – образуются при воздействии кислых флюидов (200...350 °C) с формированием ассоциации энаргита-люционита-фаматинита [9]; 3) intermediate sulfidation (IS) (среднесульфидизированные) – промежуточный тип (200...300 °C) с галенит-

тетраэдритовой минерализацией [10]. Отдельно выделяют теллурид- [11–13] и селенид-обогащенные системы [14], имеющие важное значение для добычи критических металлов.

Изучение минерального состава эпитермальных систем позволяет реконструировать физико-химические параметры (Т, Р, рН, fS) гидротермальных флюидов, что критически важно для понимания процессов формирования Au-Ag оруденения. Выявление типоморфных минералов (например, Аспирита) и их химических особенностей служит ключевым инструментом для прогнозирования локализации высокопродуктивных рудных зон. Изучение минералов-носителей токсичных элементов (As, Sb) необходимо для оценки потенциального воздействия разработки месторождений на окружающую среду, а также определяет выбор оптимальных методов обогащения руд и извлечения драгоценных металлов.

Ниже рассмотрены результаты комплексного исследования состава рудных и жильных минералов нового малоизученного перспективного для освоения объекта – месторождения Левобережное, выполненного с целью реконструкции условий формирования, определения пробы золота и минералов-спутников с выделением поисковых критериев и признаков золотого оруденения для уточнения возможных схем переработки и вовлечения объекта в эксплуатацию.

Геолого-структурная позиция месторождения Левобережное

Месторождение Левобережное расположено в 225 км юго-западнее пос. Охотск, в 25 км севернее

от месторождения Светлое [11] в верховьях р. Уенма в Охотском районе Хабаровского края. В геолого-структурном отношении месторождение расположено в пределах Ульинской вулканической зоны Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса. В пределах месторождения распространены покровные, субвулканические интрузивные и дайковые образования разнообразного состава, принадлежащие еманринскому, ульинскому и хакаринскому вулканическим комплексам мелового возраста. Интрузивные образования относятся к этанджинскому комплексу (рис. 1). Крутопадающие разрывные нарушения имеют преимущественно северо-западное и северо-восточное направления. Площадь месторождения расположена в зоне сочленения крупных структур – Ульинского наложенного прогиба, входящего в состав Охотско-Чукотского вулканогенного пояса, и Аллах-Юньского синклиория Яно-Колымской складчатой системы. Границей между этими структурами служит Билякчанский горст, приуроченный к зоне Билякчанского глубинного долгоживущего разлома север-северо-западного направления. В минерагеническом отношении месторождение принадлежит Уенминскому рудно-россыпному узлу Средне-Ульинского рудно-россыпного района, входящего в состав Ульинской минерагенической зоны Охотско-Чукотской минерагенической провинции. Ульинская минерагеническая зона характеризуется преимущественным развитием близповерхностного золотосеребряного оруденения [12, 13].

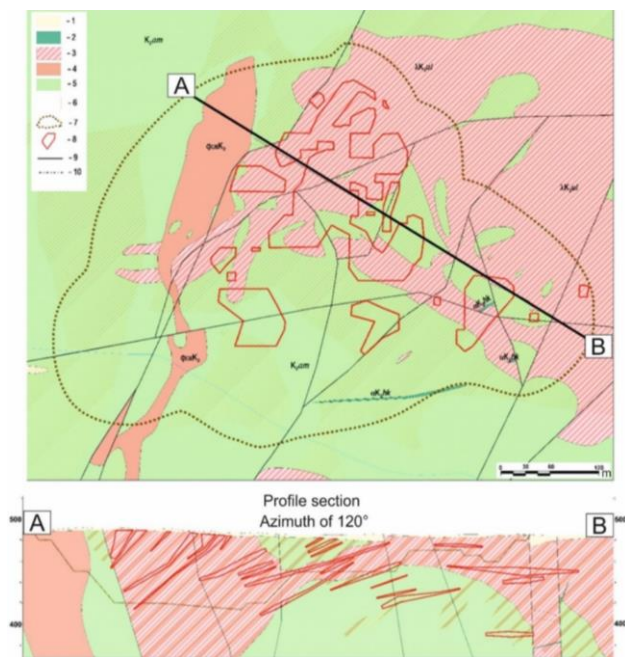


Рис. 1. Схематическая геологическая карта и разрез по профилю А-В [12, 13 с добавлениями АО «Полиметалл УК». Условные обозначения: 1 – четвертичные отложения; меловая система верхний отдел: 2 – хакаринский комплекс, дайки базальтов, андезибазальтов; 3 – ульинский комплекс – субвулканические риолиты; 4 – этанджинский комплекс, третья фаза, кварцевые сиенит-порфиры; 5 – амкинская свита, туфы дацитов, риолитов, туффиты, туффопесчаники, туфоалевролиты; 6 – области развития серицит-кварцевых метасоматитов; 7 – контур проектного карьера; 8 – упрощенные контуры рудных тел, на плане – проекция на дневную поверхность; разрывные нарушения: 9 – достоверные, 10 – перекрытые рыхлыми отложениями

Fig. 1. Schematic geological map and cross-section along profile A-B [12, 13 with additions of Polymetal Management JSC]. Legend: 1 – Quaternary sediments; Cretaceous system upper series: 2 – Khakarinsky complex (basalt and andesibasalt dykes); 3 – Ulininsky complex (subvolcanic rhyolites); 4 – Etandzhinsky complex, 3rd phase (quartz syenite-porphyrates); 5 – Amkinskaya Formation (dacite/rhyolite tuffs, tuffites, tuffaceous sandstones/siltstones); 6 – muscovite-quartz altered zones; 7 – proposed open pit outline; 8 – simplified ore body outlines (surface projections); 9 – verified faults; 10 – concealed by loose deposits

Особенности геологического строения месторождения Левобережное

Стратифицированные образования в пределах месторождения Левобережное представлены риолитами, риодацитами, дацитами и их туфами верхнемеловой амкинской свиты, прорванными штоком кварцевых сиенит-порфиров третьей фазы внедрения этанджинского комплекса, субвулканическими риолитами ульинского комплекса и дайками андезибазальтов, базальтов хакаринского комплекса. Породы в пределах месторождения имеют верхнемеловой возраст (рис. 1). Практически все породы, кроме поздних дайковых образований хакаринского комплекса и кварцевых сиенит-порфиров в пределах месторождения, подвержены окварцеванию, серицит-кварцевому метасоматозу, аргиллизации. Рудные тела месторождения имеют северо-западное падение $A_{3\text{пад}} - C3\ 300$, мощность их варьирует от 0,5 до 37,5 м при среднем 6,8 м. Оруденение прослежено до глубины 135 м.

Методы исследования

Комплексные исследования включали детальное изучение 40 керновых проб рудовмещающих пород и руд с содержанием золота $\geq 0,1$ г/т, отобранных из 10 разведочных скважин месторождения Левобережное. На первом этапе проведен традиционный минералого-петрографический анализ с использованием поляризационного микроскопа Carl Zeiss, позволивший выделить основные рудные и жильные минералы. Для более детального изучения морфологии и состава рудной минерализации использовался сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega 3 SBU, оснащенный энергодисперсионным спектрометром Oxford X-Max 50, что обеспечило возможность точечного микрозондового анализа и элементного картирования. В пробах, где предварительно были идентифицированы электрум и другие рудные минералы, дополнительно выполнен рентгено-дифракционный анализ (РДА) на дифрактометре Bruker D2 Phaser (CuK α -излучение, напряжение 30 кВ, ток 10 мА) для определения фазового состава слоистых силикатов и валового минерального состава пород.

Отдельное внимание уделено изучению флюидных включений в семи двуполированных пластинах с наиболее продуктивной рудной минерализацией. Температурные параметры определены методом микротермометрии с использованием программируемой микротермической камеры Linkam THMSG 600, работающей в диапазоне от -196 до $+600$ °С и синхронизированной с оптическим микроскопом Carl Zeiss Axio A1. Для каждого включения фиксировались температуры гомогенизации. Дополнительно проведена трехмерная реконструкция рудных текстур методом рентгеновской микротомографии на установке uSTom 130.005 (разра-

ботка Томского политехнического университета). Сканирование выполнялось при следующих параметрах: ускоряющее напряжение 130 кВ, ток анода 110 мкА, размер фокального пятна 20 мкм, расстояние от источника до детектора 471,5 мм, эффективное разрешение 9,63 мкм, время экспозиции 1000 мс, угловой шаг 0,45°, полный угол сканирования 360°. Полученные данные обрабатывались с использованием специализированного программного обеспечения для трехмерного моделирования и количественного анализа текстурных характеристик руд. Все измерения проведены с контролем точности и повторяемости результатов, для критических параметров приведена оценка погрешности. Статистическая обработка данных выполнена с применением современных пакетов для геостатистического анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Краткая характеристика вещественного состава рудовмещающих метасоматитов

Для изучения особенностей вещественного состава рудовмещающих метасоматитов, протолитами которых являлись риолиты, туфы и дациты амкинской свиты мелового возраста [15–17], были отобраны пробы с содержаниями золота $\sim 1 \dots 10$ г/т и изучены с помощью петрографического микроанализа, порошковой дифракции и микротомографии. Визуально рудовмещающие породы отличаются обилием кварц-серицит-каолинит-смектитовой наложенной прожилково-вкрапленной ассоциации, отличающейся от серых риолитов более светлой окраской (рис. 2, А, В), с которой ассоциирует пирит-марказитовая минерализация и золотое оруденение, что подтверждается данными сканирующего электронного микроскопа и рентгеновской микротомографии (рис. 2, Е, F). Структура рудовмещающих пород гранолепидобластовая, панидиоморфная, аллотриоморфная, реликтовая аполпорфировая, аповитрокластическая, апостекловатая, апотрахитоидная. Текстура брекчиевая, массивная, полосчатая, пятнистая, реликтовая флюидальная, пористая, апоперлитовая. Минеральный состав: кварц 40...93 об. %, серицит (мусковит, иллит) 0,1...10 об. %, рудные минералы до 5 об. % (пирит, марказит, арсенопирит, галенит, акантит, сфалерит, халькопирит, блеклые руды), среднетемпературный реликтовый полевой шпат 1,5...40 об. %, смектит (каолинит, монтмориллонит) 0...2,5 об. % (рис. 2, G, табл. 1).

Кварц образует ксеноморфные кристаллы размером 0,05...0,4 мм и псевдоморфозы совместно с серицитом (мусковитом/иллитом) и рудными минералами по идиоморфным таблитчатым и призматическим кристаллам (вкрапленникам и микролитами) полевых шпатов и темноцветных минералов – протолита, литокластам кислых вулканических по-

род (рис. 2, С, D). *Серицит* – тонкокристаллический агрегат чешуйчатых бесцветных кристаллов размером до первых мкм в длину, реже образует радиально-лучистые агрегаты диаметром до 0,1 мм. Присутствует в виде псевдоморфоз вместе с кварцем и, иногда, рудными минералами по идиоморфным кристаллам (вкрапленникам) протолита, представленным преимущественно среднетемпературным микроклином. Другой разновидности калиевого полевого шпата в виде низкотемпературного адуляра, ожидаемого в эпитермальных Au-Ag месторождениях LS-типа, нами по данным петрографического анализа и РДА установлено не было. По валовому содержанию кварца (табл. 1) большинство метасоматитов может быть отнесено к монокварцевым, калешпат-кварцевым и кварц-серицитовым метасоматитам.

На примере одного из образцов (№ 15) с содержанием Au ~1,17 и Ag ~9 г/т (по данным ICP-MS анализа, авторами изучено макроскопически (рис. 2, В) и микроскопически с помощью сканирующего микроскопа (рис. 3, А, В) и далее с использованием рентгеновского микротомографа (С, F) количественное и пространственное распределение золота в рудах.

Результаты исследования выявили устойчивую пространственную связь золотосеребряной минерализации с сетью кварцевых прожилков, сопровождающихся сульфидной минерализацией (главным образом пирит-марказит-арсенопиритовой ассоциацией). Анализ данных позволяет заключить, что продукты кварц-серицитового метасоматоза, формирования сульфидов и осаждения золота представляют собой результат единого гидротермального процесса.

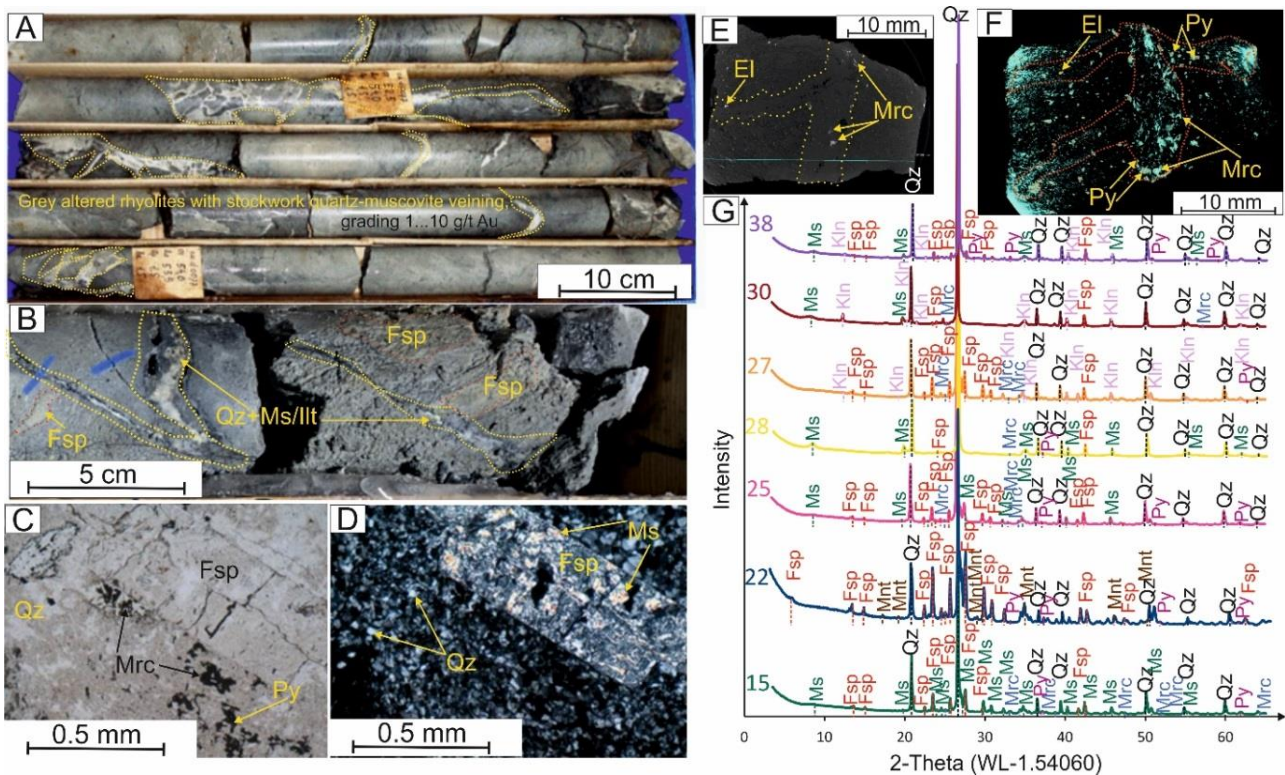


Рис. 2. Внешний вид керна рудовещающих метасоматитов Au-Ag м. Левобережное с прожилково-вкрапленной рудной минерализацией, пронизывающей измененные серые риолиты амкинской свиты (А), и увеличенный фрагмент одного из образцов (№ 15) (В), микрофотографии шлифа в параллельных (С) и скрещенных (D) николях. Микрофотография одного из образцов (№ 16), сделанная на сканирующем электронном микроскопе (Е) и на рентгеновском микротомографе μ CTom 130.005, разработанных в ТПУ [18] с 3D-визуализацией размещения сети рудных прожилков и приуроченной к ним Au-Ag минерализацией (F). Условные обозначения: Qz – кварц, Fsp – микроклин, El – электрум, Py – пирит, Mrc – марказит, Kln – каолинит, Ms – мусковит, Ill – иллит, Mnt – монтмориллонит (сметтит)

Fig. 2. (A) outcrop appearance of ore-bearing altered rocks from the Au-Ag Levoberezhnoe deposit, showing vein-disseminated mineralization cross-cutting altered gray rhyolites of the Amkinskaya Formation; (B) close-up view of a selected sample (no. 15); (C, D) photomicrographs of a thin section under plane-polarized (C) and cross-polarized (D) light; (E) SEM micrograph of sample no. 16; (F) 3D visualization of the ore vein network and associated Au-Ag mineralization, obtained by X-ray microtomography (μ CTom 130.005 system developed at TPU: [18]). Legend: Qz – quartz, Fsp – microcline, El – electrum, Py – pyrite, Mrc – marcasite, Kln – kaolinite, Ms – muscovite, Ill – illite, Mnt – montmorillonite (smectite)

Таблица 1. Валовый минеральный состав рудовмещающих метасоматитов Au-Ag м. Левобережное по данным рентгеновской порошковой дифракции

Table 1. Mineral composition of ore altered rocks from the Au-Ag Levoberezhnoe deposit according to X-ray powder diffraction bulk samples data

Образец Sample	Количественный состав/Quantitative composition, %							Итого Total
	Кварц Quartz	КФШ Feldspar	Мусковит Muscovite	Каолинит Kaolinite	Марказит Marcasite	Пирит Pyrite	Смектит Smectite	
15	81,1	15,2	2,1	0,0	0,7	0,9	0,0	100,0
22	58,6	38,5	0,0	0,0	0,0	0,7	2,2	100,0
25	78,6	18,1	1,9	0,0	1,0	0,4	0,0	100,0
27	82,7	16,3	0,0	0,5	0,2	0,3	0,0	100,0
28	88,7	2,1	8,7	0,0	0,0	0,5	0,0	100,0
30	93,0	1,8	3,5	1,2	0,5	0,0	0,0	100,0
38	91,9	3,6	2,8	1,0	0,0	0,7	0,0	100,0

Главные минералы-спутники золотого оруденения

Исследование рудных минералов-спутников золота имеет ключевое значение для понимания условий формирования месторождений [19]. *Пирит*, *марказит* и *арсенопирит* являются наиболее распространёнными минералами-спутниками золотого оруденения в гидротермальных системах, тогда как *сфалерит* и *блеклые руды* могут служить эффективными геотермометрами и геобарометрами [20, 21].

Пирит является самым распространённым сульфидом в золоторудных месторождениях различной природы [22–26], не является исключением и м. Левобережное [27, 28], в котором *пирит* является преобладающим сульфидом. Изучение распределения элементов-примесей в его составе представляет не только фундаментальный, но и практический интерес, поскольку отдельные зоны пирита могут содержать наноразмерное золото [29, 30]. В эпитермальных месторождениях это явление может объясняться неравновесными процессами, такими как смешение гидротермальных флюидов различного состава или растворение и перетложение золота в изменённых кинетических условиях [29]. Например, исследования современных геотермальных систем (Чили) показали, что обогащение пирита мышьяком коррелирует с изменениями состава рудообразующего флюида [31]. Совместное нахождение As-пирита и марказита в месторождении Левобережное (рис. 4) может быть следствием смены условий минералообразования, которая, в свою очередь, вызывает осаждение золота. Согласно экспериментальным и природным данным, *марказит* чаще образуется в кислых и слабоокислительных условиях при низких температурах (<200...250 °C) и высоких концентрациях сероводорода (H₂S) [31]. В отличие от него, *пирит* стабилен в более широком диапазоне pH и Eh, включая нейтральные и слабощелочные гидротермальные системы. Совместное нахождение этих минералов может свидетельствовать об изменении кислотности и окислительно-восстановительных условий в течение процесса рудообразования [32]; фазовых переходах при эволюции гидротермального флюида (например, при смешении с метеорными водами или взаимодействием с вмещающими породами); локальных микросредах, где градиенты pH и Eh способствуют образованию разных полиморфов.

Золотая минерализация в виде электрума в м. Левобережное установлена в образцах, содержащих одновременно *пирит* и *марказит*, и приурочена к центральным частям As-пирита (рис. 4, D–L). Проба золота в электруме варьирует в пределах от 490 до 680 ‰ при среднем значении 580 ‰. Местами помимо электрума отмечается кюстелит (рис. 4, H).

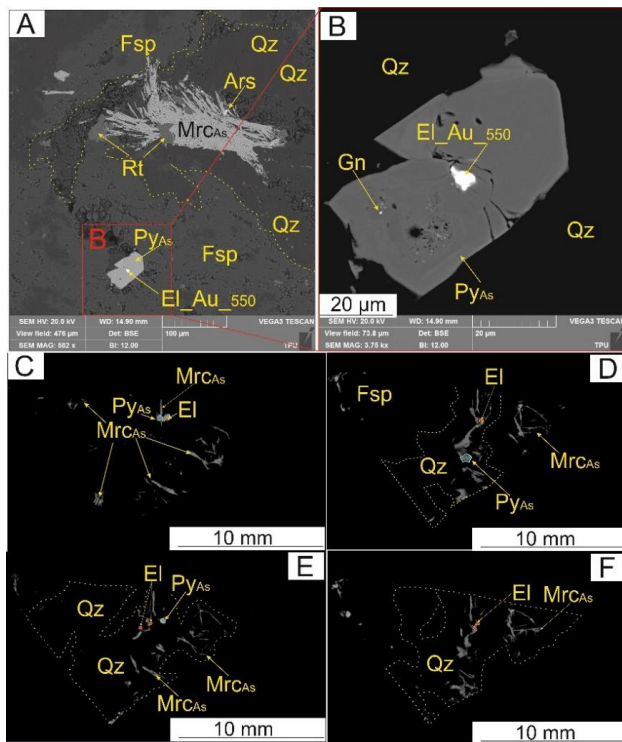


Рис. 3. Микрофотографии руд, представленных вкрапленностью Au-Ag минерализации (обр. № 15) в обратно-отраженных электронах сканирующего электронного микроскопа (A, B) и отдельные срезы (C–F) по данным рентгеновского микротомографа. El_Au_550 – электрум (цифра означает содержание золота); Gn – галенит; Qz – кварц; Fsp – калиевый полево шпат, MrcAs – мышьяковистый марказит, PyAs – мышьяковистый пирит

Fig. 3. Microphotographs of ores showing disseminated Au-Ag mineralization (sample no. 15) in backscattered electron images from scanning electron microscopy (A, B) and selected sections (C–F) obtained by X-ray microtomography. El_Au_550 – electrum, Au₅₅₀; Gn – galena; Qz – quartz; Fsp – K-feldspar; MrcAs – As-marcasite; PyAs – As-pyrite

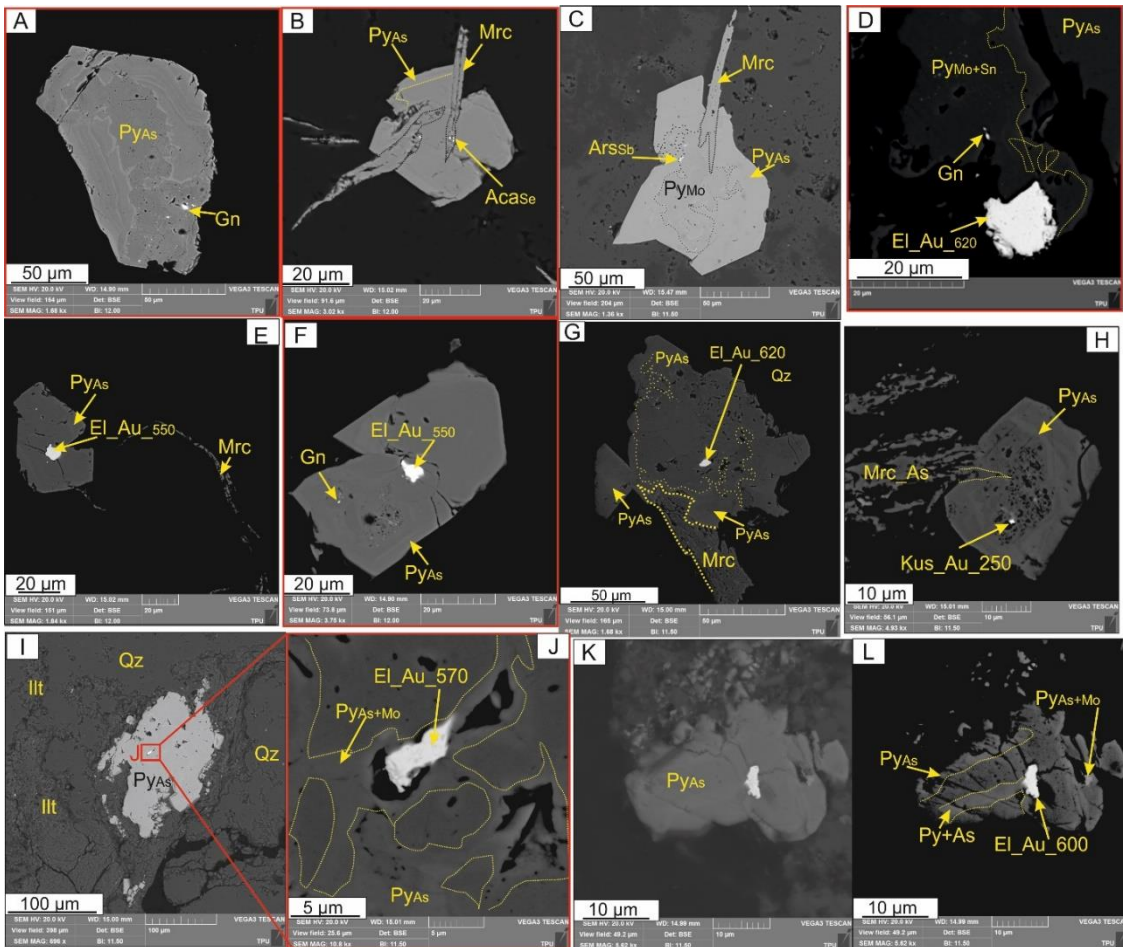


Рис. 4. Микрофотографии полированных шлифов, рудовещающих золотую минерализацию м. Левобережное и демонстрирующие взаимоотношения As-пирита ($PyAs$) и марказита (Mrc) в обратно-отраженных электронных сканирующего электронного микроскопа. $Acase$ – Se-акантит; $Arssb$ – Sb-арсенопирит; EL_{Au}_{570} – электрум (цифра означает содержание золота); Kus_{Au}_{250} – кюстелит (цифра означает содержание золота); Gn – галенит; Qz – кварц; $Illt$ – иллит (мусковит)

Fig. 4. Microphotographs of polished thin sections hosting gold mineralization, showing the relationships between As-pyrite ($PyAs$) and marcasite (Mrc) in backscattered electron images from scanning electron microscopy. $Acase$ – Se-acanthite; $Arssb$ – Sb-arsenopyrite; EL_{Au}_{570} – electrum (the number indicates gold content); Kus_{Au}_{250} – kustelite (the number indicates gold content); Gn – galena; Qz – quartz; $Illt$ – illite (muscovite)

Предположительно, появление в системе марказита обусловлено изменением рН-Eh условий рудообразующего флюида на фоне уменьшения активности серы при переходе к более восстановленным или нейтральным условиям [32–34]. Обычно термодинамическая нестабильность марказита приводит при повышении температуры и изменении рН к замещению на более устойчивый пирит [35], однако присутствие As, Sb, органики может стабилизировать марказит даже в условиях, близких к пиритовым. В гидротермальных системах их совместное нахождение может отражать колебания значений фугитивности S или температуры флюидов. Существование марказита возможно при $\log fS_2 \approx -10 \dots -12$ и $T \approx 150 \dots 250$ °C.

As-пирит ($Fe_{0.85-0.98}As_{0.09-0.18}S_{1.94-2.0}$) м. Левобережное демонстрирует значительное обогащение

мышьяком (до 10,5 мас. % при среднем содержании ~2,5 мас. %), представлен несколькими морфологическими разновидностями: (i) изометричными кристаллами и (ii) агрегатами со сложным неоднородным зональным строением. В отдельных наиболее обогащенных зонах устанавливаются микровключения (~10–100 мкм) арсенопирита, которые, вероятно, ответственны за локальные аномалии содержания As. Согласно экспериментальным данным [28], предельная растворимость As в структуре пирита и марказита не должна превышать 5 мас. %. Превышение этого порога приводит к образованию метастабильных доменов кубического $FeAsS$ с последующей фазовой сепарацией в ассоциацию пирит+арсенопирит. Выявленные повышенные концентрации мышьяка (до 10,5 мас. %) отражают специфику геохимической эволюции гидротер-

мальных систем эпитермальных Au-Ag месторождений Дальнего Востока и Камчатки. Эти значения сопоставимы с максимальными содержаниями As на месторождениях Кумроч (6,8 мас. %) и Бараньевское (10,2 мас. %) [7, 36], превышая показатели Асачинского (4,3 мас. %), Мутновского (4,6 мас. %) и Вилючинского месторождений [37], что, возможно, объясняется погрешностью ЭДС-анализа. Полученные значения (до 10,5 мас. %) существенно расширяют известные пределы вариаций содержания As в подобных системах, что требует пересмотра существующих моделей поведения мышьяка в рудообразующих процессах эпитермальных месторождений.

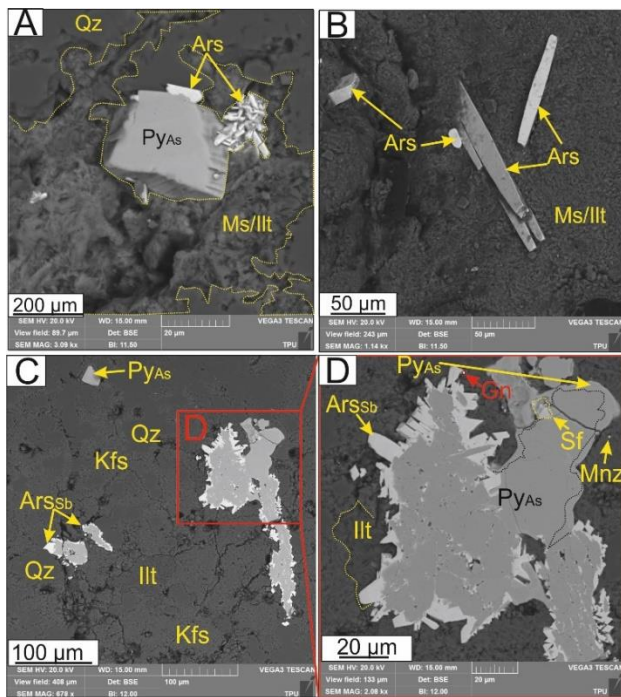


Рис. 5. Микрофотографии полированных шлифов, рудовмещающих золотую минерализацию м. Левобережное, демонстрирующие взаимоотношения Ас-пирита (Py_{As}) и арсенопирита (Ars), в том числе обнаруживающего примесь сурьмы Sb ($ArSsb$), в обратно-отраженных электронах сканирующего электронного микроскопа. Kfs – калиевый полевой шпат, Qz – кварц, Ms/Ilt – иллит (мусковит)

Fig. 5. BSE (backscattered electron) microphotographs of polished sections from ore-hosting rocks of the Au-Ag Levoberezhnoe deposit, illustrating textural relationships between As-bearing pyrite (Py_{As}) and arsenopyrite (Ars), the latter occasionally containing antimony impurities ($ArSsb$). Kfs – K-feldspar, Qz – quartz, Ms/Ilt – illite (muscovite)

В ассоциации минералов-спутников золотого оруденения м. Левобережное арсенопирит ($Fe_{0.94-1.02}As_{0.71-0.96}Sb_{0.01-0.02}S_{1.08-1.2}$) является второсте-

пенным по распространенности сульфидом после *пирита* и *марказита*. Наблюдаются три основные формы его проявления: (i) обрастание пиритовых зерен по периферии (рис. 5 А, С, D) – наиболее распространенный вариант его проявлений, (ii) образование микронных кристаллов в As-обогащенных зонах пирита и (iii) самостоятельные призматические идиоморфные кристаллы, не превышающие по размерам 0,2 мм (рис. 5, В, рис. 6, А).

В изученных зёрнах арсенопирита наблюдается вариативность локального химического состава, мас. %: Fe – 33,76...35,83 (в среднем ~34,67), As – 36,82...43,74 (в среднем ~41,31), S – 21,29...25,88 (в среднем ~23,05), при стехиометрическом составе Fe – 34,3; As – 46,0; S – 19,7 мас. %. Содержание железа в большинстве зёрен изменяется незначительно и в среднем составляет ~32,71 ат. %. Наибольший разброс значений характерен для As, концентрация которого значительно варьирует даже в пределах одного зерна, тогда как содержание S остаётся стабильно высоким (табл. 2), что характерно для низкотемпературных ассоциаций.

Расчёты концентраций As в природных гидротермальных флюидах, выполненные с учётом термодинамических свойств $FeAsS$ и в предположении химического равновесия между арсенопиритом и As-содержащим пиритом, показывают, что температурный диапазон данной минеральной ассоциации варьирует в пределах от 150 до 350 °С, где доминирующей формой переноса As является нейтральный комплекс $As(OH)_3^0(aq)$ [38]. Тесная ассоциация золота с мышьяковистым пиритом и арсенопиритом в эпитермальных месторождениях может объясняться процессом растворения $FeAsS$, который локально создаёт более восстановительные условия по сравнению с основным флюидом, что способствует восстановлению и осаждению золота [38]. Кроме того, атомные соотношения As/S в арсенопирите чувствительны к температуре и увеличиваются с её ростом [39]. Аналогично другим подобным эпитермальным объектам [40], в исследованных образцах арсенопирита атомные соотношения As/S варьируют от 0,55...0,88 (табл. 2), что указывает на обогащение серой и деплетирование As и Fe, характерное для низких температур образования [39] аналогично другим месторождениям подобного типа [40]. Учитывая, что арсенопирит является относительно тугоплавким сульфидом в контексте его поведения в гидротермальных системах, а его твёрдый раствор сильно зависит от температуры кристаллизации, Кречмар и Скотт [41] впервые предложили определять температуру образования и фугитивность серы в растворе на основе химического состава арсенопирита и парагенетических соотношений системы Fe–As–S.

Таблица 2. Содержание основных элементов в арсенопирите (мас. %, ат. %) Au-Ag м. Левобережное по данным энергодисперсионной спектроскопии

Table 2. Chemical composition of arsenopyrite (wt%, at.%) from the Au-Ag Levoberezhnoe deposit based on EDS analysis

Fe	As	Sb	S	Fe	As	S	Sb	As/S	Формула/Formula
мас. % / wt%				ат. % / at. %					
34,29	41,19	1,21	23,32	32,30	28,92	38,26	0,52	0,76	Fe _{0.97} As _{0.87} Sb _{0.02} S _{1.15}
34,77	40,71	1,26	23,26	32,74	28,57	38,15	0,54	0,75	Fe _{0.98} As _{0.86} Sb _{0.02} S _{1.14}
34,29	43,42	0,76	21,54	32,80	30,97	35,90	0,33	0,86	Fe _{0.98} As _{0.93} Sb _{0.01} S _{1.08}
34,65	42,32	1,73	21,29	33,29	30,31	35,63	0,76	0,85	Fe _{1.00} As _{0.91} Sb _{0.02} S _{1.07}
35,83	35,59	1,12	27,46	32,36	23,96	43,21	0,46	0,55	Fe _{0.97} As _{0.72} Sb _{0.01} S _{1.30}
34,94	40,91	0,69	23,46	32,77	28,60	38,33	0,30	0,75	Fe _{0.98} As _{0.86} Sb _{0.01} S _{1.15}
34,79	40,95	1,00	23,27	32,72	28,71	38,13	0,43	0,75	Fe _{0.99} As _{0.86} Sb _{0.01} S _{1.14}
32,96	43,74	0,99	21,65	31,77	31,43	36,36	0,44	0,86	Fe _{0.95} As _{0.94} Sb _{0.01} S _{1.09}
37,18	37,28	0,83	25,11	34,08	25,47	40,10	0,35	0,64	Fe _{1.02} As _{0.76} Sb _{0.01} S _{1.20}
35,62	38,40	1,13	24,84	32,97	26,50	40,05	0,48	0,66	Fe _{0.99} As _{0.79} Sb _{0.01} S _{1.20}
33,76	43,70	0,54	22,01	32,17	31,05	36,54	0,24	0,85	Fe _{0.97} As _{0.93} Sb _{0.01} S _{1.10}
33,93	43,37	0,61	22,10	32,30	30,78	36,65	0,27	0,84	Fe _{0.97} As _{0.92} Sb _{0.01} S _{1.10}
35,30	40,01	0,71	23,07	33,42	28,23	38,04	0,31	0,74	Fe _{1.00} As _{0.85} Sb _{0.01} S _{1.14}
33,66	43,39	0,00	22,43	32,03	30,78	37,19	0,00	0,83	Fe _{0.96} As _{0.92} S _{1.12}
34,23	41,19	1,21	23,32	32,26	28,94	38,28	0,52	0,76	Fe _{0.97} As _{0.87} Sb _{0.02} S _{1.15}
34,09	41,22	0,74	23,03	32,38	29,19	38,11	0,32	0,77	Fe _{0.97} As _{0.88} Sb _{0.01} S _{1.14}
35,19	43,48	0,00	21,83	33,31	30,68	36,00	0,00	0,85	Fe _{1.00} As _{0.92} S _{1.08}
35,74	41,33	0,71	22,76	33,55	28,92	37,22	0,31	0,78	Fe _{1.01} As _{0.87} Sb _{0.01} S _{1.12}
36,53	39,78	0,58	23,90	33,80	27,44	38,52	0,25	0,71	Fe _{1.01} As _{0.82} Sb _{0.01} S _{1.16}
33,76	36,82	0,77	25,88	31,66	25,74	42,27	0,33	0,61	Fe _{0.95} As _{0.77} Sb _{0.01} S _{1.27}
34,29	41,59	1,42	23,23	32,22	29,14	38,03	0,61	0,77	Fe _{0.97} As _{0.87} Sb _{0.02} S _{1.14}
35,11	42,36	0,00	22,53	33,14	29,81	37,05	0,00	0,80	Fe _{0.99} As _{0.89} S _{1.11}
33,66	44,69	0,00	21,64	32,16	31,83	36,02	0,00	0,88	Fe _{0.96} As _{0.95} S _{1.08}

После дополнительной проверки Шарпом и др. [39] арсенопиритовый геотермометр стал активно применяться в исследованиях гидротермальных месторождений золота и не теряет актуальности до сих пор [40]. Физико-химические параметры образования арсенопирита м. Левобережное определялись путем нанесения содержаний As (ат. %) в арсенопирите на диаграмму состояния Fe–As–S (рис. 7, А). Атомный процент As в арсенопирите м. Левобережное варьирует от 23,96 до 31,83 %, что соответствует предполагаемой температуре образования арсенопирита <380 °С и фугитивности серы log f(S₂) менее 7 (рис. 7, А). Таким образом, в начале кристаллизации пирита значения фугитивности серы могли быть относительно высокими – 7, а затем, по мере снижения температуры, условия становились более восстановленными, на что указывают весьма низкие содержания As – до 23,96 ат. %. Именно появление *марказита* как чувствительного маркера уменьшения фугитивности серы и увеличение кислотности pH среды в системе подчеркивают смену условий кристаллизации и осаждение электрума и других Au-Ag минералов. Таким образом, активность серы в гидротермальном растворе, сформировавшем м. Левобережное, оценённая по разработанному геотермометрам [41] на основе содержания As ат. % (23,96...31,82) в арсенопирите и мол. % FeS (0,6...8,5) в *сфалерите* [42] варьирует в диапазоне log aS₂ = –7...–12,5 при температурах

(<380 °С). При этом наличие Se-акантита (рис. 4, В) расширяет диапазон значений фугитивности серы до –16,5 на фоне снижающейся температуры (<200 °С). По данным экспериментального моделирования Н.В. Вилора с соавторами [43] широко распространенная ассоциация *арсенопирита* с *мышьяковистым пиритом* способна формироваться в кислотном интервале pH от 4 и менее, что подтверждается полями устойчивости Se-акантита [8]. Установлено, что образование Au–Ag–S–Se минерализации происходит на низкотемпературных стадиях на фоне снижения температуры и фугитивности серы в системе [8].

Сфалерит (Zn_{0.83-0.99}Fe_{0.01}Cu_{0.01-0.06}S_{0.96-1.03}) м. Левобережное относится к маложелезистой разновидности (FeS мол. % ~0,6...8,5) и отмечается в тесных сростаниях с As-пиритом, характеризуясь при этом обогащением примесью Cu (рис. 6). По изучению характера взаимоотношений сфалерита с мышьяковистым пиритом, рудовмещающим золотую минерализацию, есть основания полагать, что условия, при которых кристаллизовался сфалерит, близки к тем, при которых происходило осаждение электрума (рис. 6, В). Активность серы в гидротермальном растворе, оценённая по геотермометру на основе мол. % FeS (0,6...8,5) в сфалерите [42], варьирует в диапазоне log aS₂ = –7...–12,0 при температурах (<380 °С) (рис. 7, В).

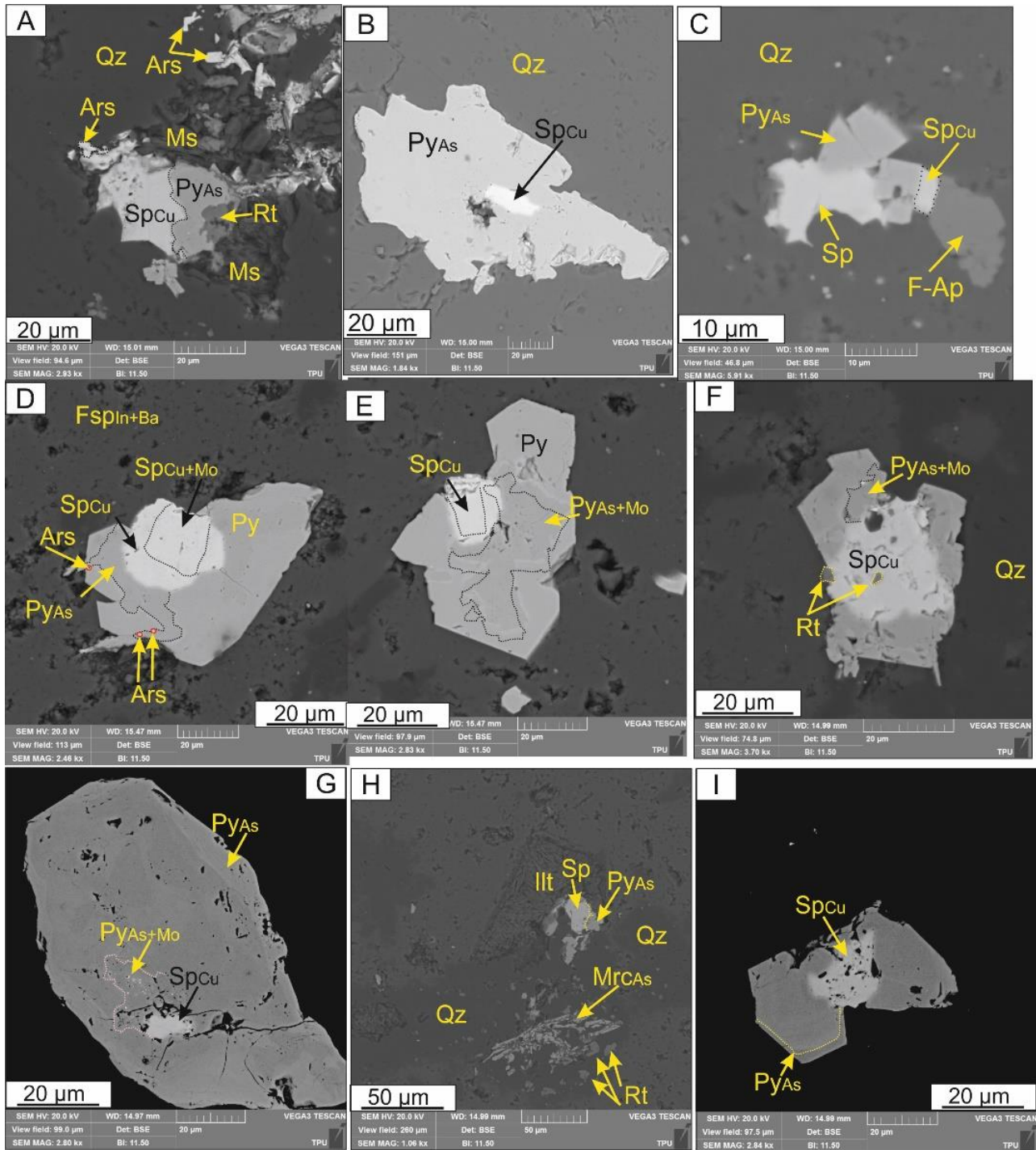


Рис. 6. Микрофотографии полированных шлифов, демонстрирующие взаимоотношения сфалерита (SpCu) и Ас-пирита (PyAs) в обратно-отраженных электронах сканирующего электронного микроскопа. Совместные сростания с извилистыми границами соразмерных зерен Ас-пирита (PyAs) и сфалерита (SpCu) (A, C, H); включения зерен сфалерита (SpCu), захваченные в зернах Ас-пирита (PyAs) (B, D–G, I); FspIn+Ba – калиевый полевой шпат, обогащенный примесью индия и бария, Qz – кварц, Ms/Ilt – иллит (мусковит), F-Ap – фтористый апатит, Rt – рутил, Ars – арсенопирит.

Fig. 6. BSE-SEM (backscattered electron scanning electron microscopy) microphotographs of polished sections showing textural relationships between sphalerite (SpCu) and As-bearing pyrite (PyAs). Intergrowths with irregular boundaries between grains of As-pyrite (PyAs) and Cu-sphalerite (SpCu) of comparable size (A, C, H); inclusions of Cu-sphalerite (SpCu) grains trapped within As-pyrite (PyAs) grains (B, D–G, I). Mineral abbreviations: FspIn+Ba – In-and Ba-enriched potassium feldspar, Qz – quartz, Ms/Ilt – illite (muscovite), F-Ap – fluorapatite, Rt – rutile, Ars – arsenopyrite

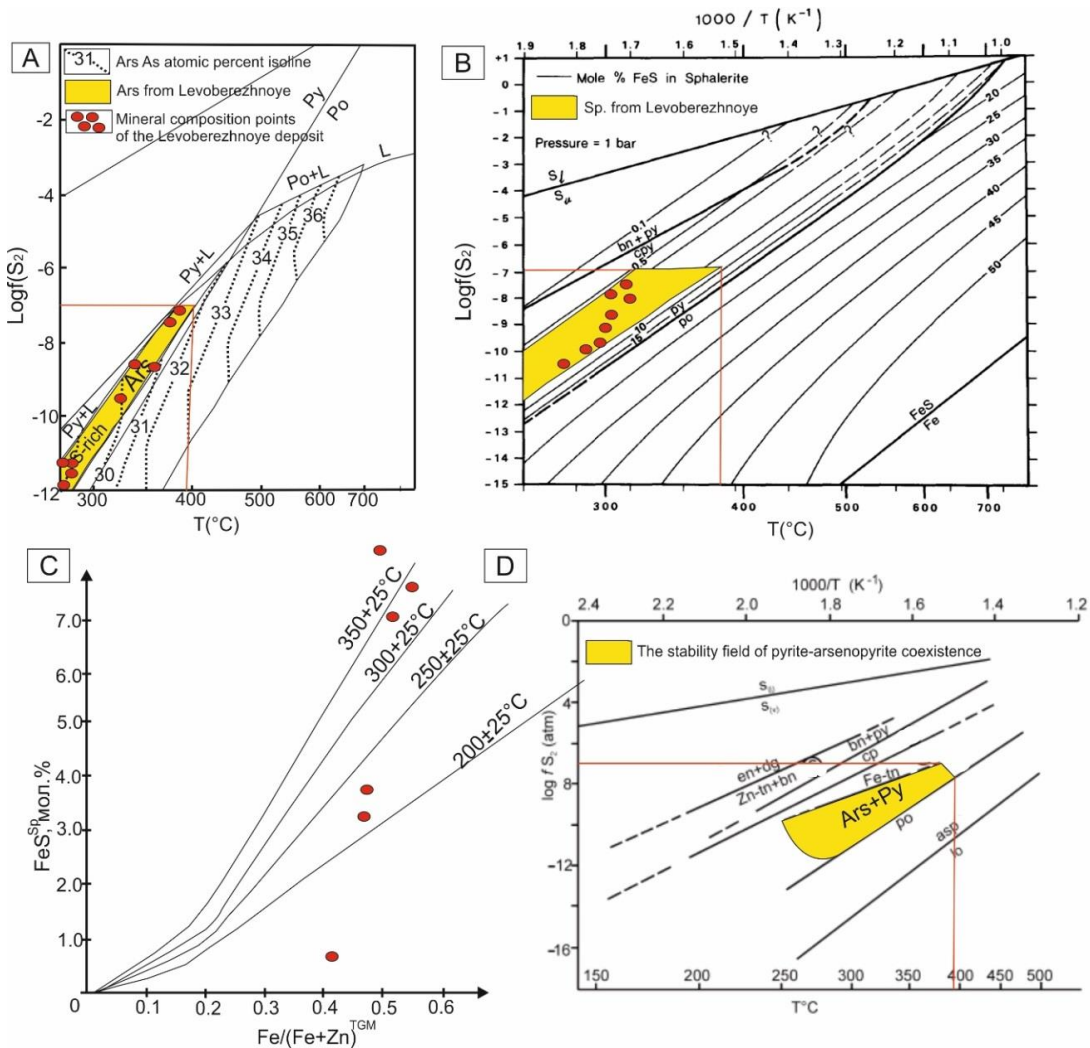


Рис. 7. Диаграмма равновесий $\log f(S_2)$ (фугитивность серы) от $T^{\circ}C$ (температура) для арсенипиритового геотермометра в системе Fe-As-S в равновесии с паром S_2 по данным [38, 40] (A); фазовые соотношения в системе Fe-Zn-S при давлении 1 бар, составленные по данным [48]. Изоплеты показывают содержание FeS в сфалерите (в мол. %) в равновесии с пиритом (B); график зависимости мольного содержания железа (FeS, мол. %) в сфалерите и мольных количеств $Fe/(Fe+Zn)$ в блеклой руде ТТР по [49] (C); диаграмма летучести серы – температура реакций сульфидизации минералов, определяющих границы субфаций (парагенетических ассоциаций). Ассоциации (субфации): 1 – леллингит-пирротиновая (lo), 2 – арсенипирит-пирротиновая (po asp), 3 – арсенипирит-пирит-халькопиритовая (Ars+Py), 4 – халькопирит-блеклорудная (Fe-th), 5 – энэргит-халькопиритовая (cp), 6 – борнит-блеклорудная (bn+py), 7 – энэргит-дигенитовая (en+dg); S(l) – жидкая сера, S(v) – газообразная сера по данным [50] (D)

Fig. 7. Equilibrium diagram of $\log f(S_2)$ (sulfur fugacity) vs. $T^{\circ}C$ (temperature) for the arsenopyrite geothermometer in the Fe-As-S system in equilibrium with S_2 vapor according to [38, 40] (A); phase relations in the Fe-Zn-S system at 1 bar pressure, based on data from [47]. Isopleths show FeS content in sphalerite (mol.%) in equilibrium with pyrite (B); plot of iron molar content (FeS, mol.%) in sphalerite versus molar ratios $Fe/(Fe+Zn)$ in tennantite-tetrahedrite series minerals (TGM) after [49] (C); sulfur fugacity-temperature diagram of mineral sulfidation reactions defining subfacies boundaries (paragenetic associations). Associations (subfacies): 1 – löllingite-pyrrhotite (lo), 2 – arsenopyrite-pyrrhotite (po asp), 3 – arsenopyrite-pyrite-chalcopyrite (Ars+Py), 4 – chalcopyrite-fahlore (Fe-th), 5 – enargite-chalcopyrite (cp), 6 – bornite-pyrite (bn+py), 7 – enargite-digenite (en+dg); S(l) – liquid sulfur, S(v) – sulfur vapor according to [50] (D)

Минераграфическое изучение минералов-спутников золотого оруденения под электронным микроскопом позволило установить единичные находки блеклых руд теннантит-тетраэдритовой серии, размером, как правило, не превышающим 50 мкм, по химическому составу соответствующие Ag-

тетраэдриту $(Cu_{7.75-8.57}Ag_{0.47-0.68})(Fe_{1.28-1.90}Zn_{1.56-1.66})(Sb_{3.27-3.53}As_{0.0-0.51})S_{12.93-13.80}$. Блеклые руды теннантит-тетраэдритового ряда (ТТР) [44] представляют собой широко распространённую группу сульфоселей, формирующихся в гидротермальных золоторудных месторождениях, которые могут служить чув-

ствительными индикаторами состава исходных растворов, участвовавших в формировании месторождений [45]. Они образуются из гидротермальных растворов при температурах выше 100 °С и ниже 400 °С (обычно 200–300 °С) и давлении не более 4 кбар. Благодаря своей способности образовывать твёрдые растворы, блеклые руды являются эффективным петрогенетическим инструментом для определения условий минералообразования [46, 47]. Состав блеклых руд напрямую зависит от состава металлоносных растворов, участвующих в рудообразовании, поэтому химический состав этой группы минералов пригоден для использования в качестве индикатора физико-химических условий минерализации.

Микрометрия кварца м. Левобережное

В кварце м. Левобережное отмечается небольшое количество включений. Они располагаются в зонах роста отдельных кварцевых зерен и в тонких кварцевых агрегатах. Чаще всего включения одиночные, реже собраны в группы по 2–3 включения. Преобладающий размер 2...5 мкм, что характерно для эпитеpмальной группы Au-Ag месторождений [26]. Крайне редко отмечены включения размером 7...8 мкм (единичные наблюдения). По форме включения разнообразны. Чаще отмечаются амебообразные (рис. 8, А–С, F), округлые и изометричные (рис. 8, E, G, H), иногда отмечаются в форме отрицательных кристаллов (рис. 8, D).

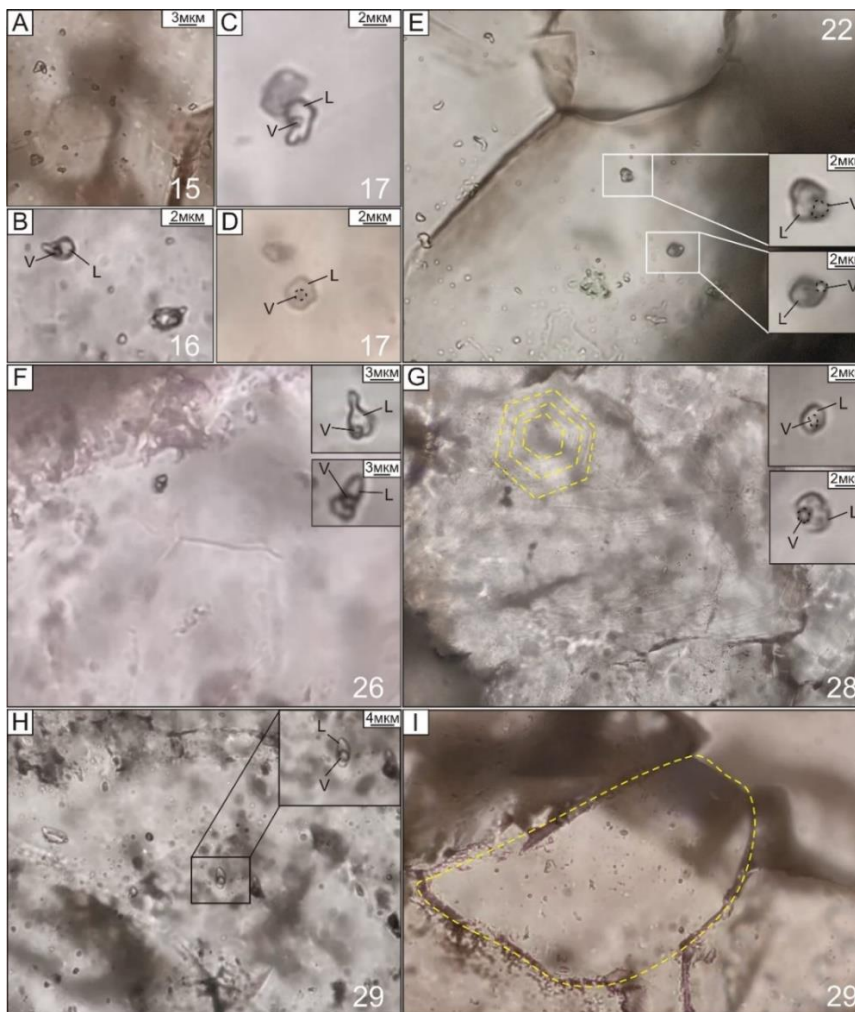


Рис. 8. Микрофотографии флюидных включений в кварце месторождения Левобережное: А–С – двухфазные флюидные включения амебообразной формы; D – включение в форме отрицательного кристалла; E – одиночные округлые включения в кварцевом зерне; F – амебообразные включения в кварцевых зернах; G – одиночные овальные включения, располагающиеся в зонах роста кварцевых зерен (желтым пунктиром отмечены зоны); H – крупное двухфазное включение в крупнозернистом кварце; I – кварцевое зерно, содержащее одно- и двухфазные включения; V – vapor (газ); L – liquid (жидкость)

Fig. 8. Microphotographs of fluid inclusions in quartz from the Levoberezhnoe deposit: (A–C) amoeboid-shaped two-phase (L+V) fluid inclusions; (D) negative crystal-shaped inclusion; (E) isolated rounded inclusions within a quartz grain; (F) amoeboid inclusions in quartz grains; (G) isolated oval inclusions localized in quartz growth zones (dashed yellow lines mark the zones); (H) large two-phase (L+V) inclusion in coarse-grained quartz; (I) quartz grain containing both single and two-phase inclusions; V – vapor, L – liquid

Таблица 3. Сводные данные температур гомогенизации включений в кварце месторождения Левобережное

Table 3. Homogenization temperatures of fluid inclusions in quartz from the Levoberezhnoe deposit

Номер образца Sample number	15	16	17	22	26	28	29
$T_{\text{hom}}, ^\circ\text{C}$	~320–270	280–250	265–200	260–250	240–210	260–240	270–240

По происхождению включения относятся как ко вторичным, так и к первичным образованиям. Вторичные включения располагаются обычно линейно в виде цепочек по тонким трещинам, первичные – в зонах роста кварцевых зерен по одному или несколько включений. Термометрические исследования проводились по двухфазным включениям, относящимся к первичным образованиям. Фиксировалась только температура гомогенизации при переходе газового пузыря в жидкую фазу. Малые размеры флюидных включений не позволили достоверно определить температуры эвтектики и плавления льда. Температура гомогенизации всех изученных включений укладывается в интервал значений 200...280 °C (табл. 3). В единичных замерах зафиксирована температура более 300 °C (около 320 °C).

Заключение

1. Au-Ag оруденение. Левобережное сформировалась в результате эволюции гидротермальной системы от умеренно-высокотемпературных (≤ 380 °C, $\log fS_2 \approx -7$) к низкотемпературным (150...280 °C, $\log fS_2 = -10...-12$) условиям. На ранних стадиях преобладал пирит, устойчивый в нейтрально-щелочной среде, тогда как на поздних стадиях (при охлаждении и снижении fS_2) образовались марказит и электрум (Au_{580} ‰).
2. Главные минералы-спутники Au-Ag оруденения включают: As-пирит (до 10,5 мас. % As) и Sb-арсенопирит ($\text{As/S} = 0,55...0,88$), отражающие восстановительные условия; марказит и Сe-акантит, указывающие на поздние низкотемпературные стадии ($T < 200$ °C, $\log fS_2$ до $-16,5$); Ag-тетраэдрит и маложелезистый сфалерит ($\text{FeS} = 0,6...0,85$ мол. %), подтверждающие участие флюидов с переменным составом.
3. Пространственная связь Au с As-сульфидами обусловлена растворением FeAsS, создающим локально восстановленные зоны, благоприятные для осаждения электрума. Микротермометрия флюидных включений в кварце подтверждает основной диапазон рудоотложения (210...280 °C и ниже).
4. Результаты рентгеновской микротомографии и трехмерного моделирования позволили визуализировать пространственное распределение золотой минерализации, которая демонстрирует приуроченность к системе кварц-серицитовых прожилков, ассоциирующих с сульфидной минерализацией (преимущественно пирит-марказит-арсенопиритового состава). Полученные данные свидетельствуют о тесной генетической связи процессов кварц-серицитового метасоматоза, сульфидообразования и последующего отложения золота в едином гидротермальном процессе.
5. Отсутствие адуляра и присутствие среднетемпературного микроклина свидетельствует о более высокотемпературных условиях по сравнению с типичными LS-системами.
6. Перспективными для поисковых работ являются зоны развития серицит-кварцевых метасоматитов с парагенетическими ассоциациями As-содержащего пирита и марказита. Повышенные концентрации As, Sb и присутствие селенидных фаз в рудах указывают на необходимость разработки специализированных технологий их переработки.

Месторождение отражает эпитеpмальный процесс с участием флюидов переменного состава, где ключевую роль в осаждении золота сыграло локальное изменение окислительно-восстановительных условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. White N.C., Hedenquist J.W. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration // SEG Newsletter. – 1995. – Vol. 23. – P. 1–9.
2. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration / J.W. Hedenquist, E. Izawa, A. Arribas, N.C. White // Resource Geology. – 1996. – Vol. 1. – P. 9–13.
3. Hedenquist J.W., Arribas R.A. Exploration for epithermal gold deposits // Reviews in Economic Geology. – 2000. – Vol. 13. – P. 245–277.
4. Sillitoe R.H. Epithermal models, genetic types, geometrical controls and shallow features // Mineral Deposits Division, Special Paper. – Saint John's: Geological Association of Canada, 1993. – P. 403–417.
5. Бортников Н.С., Толстых Н.Д. Эпитеpмальные месторождения Камчатки (Россия) // Геология рудных месторождений. – 2023. – Т. 65. – № 1. – С. 124–152. DOI: 10.1134/S1075701523070176.
6. Alteration and metallogenic zonation in magmatic-hydrothermal ore systems: scientific understandings and exploration implications / D. Zhai, J. Wu, Q. Zhao, P. Voudouris, S. Tombros, X. Wang, W. Chen, J. Sun, Z. Xu, J. Liu // Journal of Earth Science. – 2025. – P. 1303–1308. DOI: 10.1007/s12583-025-2034-z.

7. Особенности вещественного состава и условия формирования медной минеральной ассоциации Бараньевского эпитеpмального месторождения (Центральная Камчатка) / Т.Ю. Якич, Д.С. Буханова, Е. Синкина, Э.М. Сарсекеева, Д.В. Левочская, А.Н. Николаева, П.Н. Максимов, А.В. Кутырев, П.С. Жегунов, М.А. Рудмин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 12. – С. 74–87. DOI: 10.18799/24131830/2022/11.
8. Беляева Т.В., Пальянова Г.А. Сульфиды и селениды серебра в рудах Au-Ag эпитеpмальных месторождений Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Геология рудных месторождений. – 2023. – Т. 65. – № 1. – С. 74–108.
9. A mineralogical and geochemical assessment of the As-, Cu-, In-, Pb-, Sb-, and Zn-rich mine wastes at the Pefka epithermal deposit, Greece / P. Drahota, A. Chatziantoniou, M. Mihaljevič, A. Culka, M. Melfou, V. Melfos, P. Voudouris // Journal of Geochemical Exploration. – 2024. – Vol. 256. 107336. DOI: 10.1016/j.gexplo.2023.107336.
10. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification / L. Wang, K.Z. Qin, G.X. Song, G.M. Li // Ore Geology Reviews. – 2019. – Vol. 107. – P. 434–456.
11. Mineralogy of the Svetloye epithermal district, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, and its insights for exploration / T.Y. Yakich, Y.S. Ananyev, A.S. Ruban, R.Y. Gavrilov, D.V. Lesnyak, D.V. Levochskaia, O.V. Savinova, and M.A. Rudmin // Ore Geology Reviews. – 2021. – Vol. 136. – 104257. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104257.
12. Ивлев А.Н. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия Прихотская. Лист О-54-VIII (Кадакчан). Объяснительная записка. – М.: Госгеолтехиздат, 1986. – 93 с.
13. Карпузов А.Ф. Отчёт о поисковых работах на золото в Охотском районе Хабаровского края. Лист О-54. – М.: Аэрогеология, 1980. – 116 с.
14. Якич Т.Ю., Ярославцев Д.А., Синкина Е.А. Минералообразующая система эпитеpмального Au-Ag Бараньевского месторождения (Центральная Камчатка) как среда концентрирования элементов группы TABS (Te, As, Bi, Se) // Всероссийская конференция, Минералообразующие системы месторождений высокотехнологичных металлов: достижения и перспективы исследований. – М., 29 ноября – 1 декабря 2023. – М.: ИГЕМ РАН, 2023. – С. 194–196.
15. Гидротермально-метасоматическая зональность, флюидный режим, и типы золотого оруденения участков Эми и Елена эпитеpмального рудного поля Светлое (Хабаровский край) / Д.В. Левочская, Т.Ю. Якич, Д.В. Лесняк, Ю.С. Ананьев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 17–32. DOI: 10.18799/24131830/2021/10/3252.
16. Новый тип золотоносной минерализации на Озерновском Au–Te–Se эпитеpмальном месторождении (Центральная Камчатка, Россия) / Ш.С. Кудаева, В.В. Козлов, Е.Д. Скильская, А.В. Сергеева, Н.Д. Толстых, И.А. Шкилев // Геология рудных месторождений. – 2024. – Т. 66. – С. 547–569. DOI: 10.1134/S1075701523070176.
17. Акинин В.В., Миллер Э.Л. Эволюция известково-щелочных магм Охотско-чукотского вулканогенного пояса // Петрология. – 2011. – Т. 19. – № 3. – С. 249–290.
18. Программное обеспечение микротомографа uCTom 130/005 URL: <https://rsp.tpu.ru/tech/> (дата обращения 15.08.2025).
19. Sources, transport and deposition of metal(loid)s recorded by sulfide and rock geochemistry: constraints from a vertical profile through the epithermal Profites Ilias Au prospect, Milos Island, Greece / A. Grosche, R. Klemm, K. Denk, M. Keith, K.M. Haase, P.C. Voudouris, D. Alfieris, M. Wiedenbeck // Mineralium Deposita. – 2023. – Vol. 58. – P. 1101–1122. DOI: 10.1007/s00126-023-01170-2.
20. Викентьев И.В. Минералогия и геохимия золоторудных месторождений. – М.: ГЕОС, 2015. – 432 с.
21. Cook N.J., Ciobanu C.L., Pring A. Arsenopyrite-pyrite association in orogenic gold deposits // Mineralium Deposita. – 2023. – Vol. 44. – Iss. 8. – P. 857–875.
22. A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: insights into ore-forming processes / M. Keith, D.J. Smith, G.R.T. Jenkin, D.A. Holwell, M.D. Dye // Ore Geology Reviews. – 2018. – Vol. 96. – P. 269–282. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2017.07.023.
23. Global Se and Te systematics in hydrothermal pyrite from different ore deposits. A review / M. Keith, D.J. Smith, G.R.T. Jenkin, D.A. Holwell // Applied Earth Science – 2017. – Vol. 126. – P. 70–71. DOI: 10.1080/03717453.2017.1306265.
24. Cherkasova (Yakich) T., Kucherenko I., Abramova R. Rear polyminal zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – Vol. 27: Problems of Geology and Subsurface Development. – P. 1–5.
25. Estimating gold-ore mineralization potential within Topolninsk ore field (Gorny Altai) / T. Timkin, V. Voroshilov, O. Askanakova, T. Cherkasova, A. Chernyshov, T. Korotchenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – Vol. 27: Problems of Geology and Subsurface Development. – P. 1–6.
26. Trace elements in pyrite from Au[сbnd]Ag epithermal deposits of Kamchatka, Russia: Comparison with geochemical features of mineral systems / N. Tolstykh, N. Bortnikov, I. Zhukova, A. Stepanov, G. Palyanova, M. Shapovalova, K. Zhao // Journal of Geochemical Exploration – 2025. – Vol. 275. 107774. DOI: 10.1016/j.gexplo.2025.107774.
27. Якич Т.Ю., Левочская Д.В. Химический состав рудных минералов эпитеpмального Au-Ag месторождения Левобережное (Хабаровский край) в аспекте анализа условий минералообразования // Металлогения древних и современных океанов. От гипотез рудогенеза к критериям прогнозирования. – Миасс, 21–25 апреля 2025. – Миасс: Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, 2025. – Т. 31. – С. 173–176.
28. Ерофеев А.Е., Левочская Д.В., Якич Т.Ю. Типоморфизм пирита как минералогический критерий оруденения на примере эпитеpмального Au-Ag месторождения Светлое (Хабаровский край) // Проблемы геологии и освоения недр: XXVIII Международный научный симпозиум молодых ученых и студентов имени академика М.А. Усова, посвященный 125-летию со дня рождения академика Академии наук СССР профессора К.И. Сапгаева, 130-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР профессора Ф.Н. Шахова. – Томск, 1–5 апреля 2024. – Томск: Изд-во ТПУ, 2024. – С. 67–68.
29. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits / A.P. Deditius, M. Reich, S.E. Kesler, S. Utsunomiya, S.L. Chryssoulis, J. Walshe, R.C. Ewing // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2014. – Vol. 140. – P. 644–670.

30. Role of arsenian pyrite in hydrothermal ore deposits: a history and update / S.E. Kesler, R.C. Ewing, A.P. Deditius, M.M. Reich, S. Utsunomiya, S. Chryssoulis // *Great Basin Evolution and Metallogeny. Vol. I, II in Conference: 6th Geological Society of Nevada on Great Basin Evolution and Metallogeny.* – Reno, May 14–15, 2010. – Reno, Nevada: DEStech Publications, 2010. – P. 233–243.
31. Copper–arsenic decoupling in an active geothermal system: a link between pyrite and fluid composition / D. Tardani, M. Reich, A.P. Deditius, S. Chryssoulis, P. Sánchez-Alfaro, Ja. Wrage, M.P. Roberts // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2017. – Vol. 204. – P. 179–204.
32. Murowchick J.B., Barnes H.L. Marcasite precipitation from hydrothermal solution // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1986. – Vol. 50. – P. 2615–2629.
33. Butler I.B., Rickard D. Framboidal pyrite formation via oxidation of iron (II) monosulfide by hydrogen sulfide // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2000. – Vol. 64. – Iss. 15. – P. 2665–2675.
34. Solubility of gold in arsenian pyrite / M. Reich, S.E. Kesler, S. Utsunomiya, C.S. Palenik, S.L. Chryssoulis, R.C. Ewing // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2005. – Vol. 69. – Iss. 15. – P. 2781–2796.
35. Murowchick J.B. Marcasite inversion and the retrographic determination of pyrite ancestry // *Economic Geology.* – 1992. – Vol. 87. – P. 1141–1152.
36. Якич Т.Ю. Особенности состава и строения пирита участка Северный Бараньевского Au-Ag месторождения (Центральная Камчатка) // *Проблемы геологии и освоения недр: труды XXVII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященная 160-летию со дня рождения В.А. Обручева, 140-летию со дня рождения М.А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы.* – Томск, 3–7 апреля 2023. – Томск: Томский политехнический университет, 2023. – С. 112–113.
37. Новые данные о пирите современных и палеогидротермальных систем Камчатского края / В.М. Округин, Д.А. Яблокова, Е.Д. Андреева, К.О. Шишканова, В.М. Чубаров, Т.М. Философова, С.В. Москалёва, И.И. Чернев, М.В. Чубаров // *Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога.* – Петропавловск-Камчатский, 27–28 марта, 2014. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. – С. 324–329.
38. Pokrovski G.S., Kara S., Roux J. Stability and solubility of arsenopyrite, FeAsS, in crustal fluids // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2002. – Vol. 66. – P. 2361–2378.
39. Sharp Z.D., Essene E.J., Kelly W.C. A re-examination of the arsenopyrite geothermometer: Pressure considerations and applications to natural assemblages // *Canadian Mineralogist.* – 1985. – Vol. 23. – P. 517–534.
40. Genesis of Xinjiazui gold deposit: in situ geochemical constraints from arsenopyrite / J. Liu, S. Kou, Z. Wang, Y. Zhang, Y. Pan, D. Ji, Y. Tian, H. Chen, C. Gao // *Minerals.* – 2024. – Vol. 14. – P. 1–19. DOI: 10.3390/min14101031.
41. Kretschmar U., Scott S.D. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe–As–S and their application // *Canadian Mineralogist.* – 1976. – Vol. 14. – P. 364–386.
42. Scott S.D. Chemical behaviour of sphalerite and arsenopyrite in hydrothermal and metamorphic environments // *Mineralogical Magazine.* – 1983. – Vol. 47. – P. 427–435.
43. Вилор Н.В., Казьмин Л.А., Павлова Л.А. Физико-химические условия формирования арсенопирит-пиритовой ассоциации золоторудных месторождений // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН.* – 2010. – Т. 37. – № 2. – С. 8–20.
44. The tetrahedrite group: nomenclature and classification / C. Biagioni, L.L. George, N.J. Cook, E. Makovicky, Y. Mořlo, M. Pasero, J. Sejkora, C.J. Stanley, M.D. Welch, F. Bosi // *American Mineralogist.* – 2020. – Vol. 105. – P. 109–122.
45. Sulfosalts and sulfates in the epithermal Au-Ag-Te Emmy deposit (Khabarovsk Territory, Far East, Russia): implications for the mineralization process / T.Yu. Yakich, P. Voudouris, D.V. Levochskaia, A.K. Mazurov, M.V. Shal'dybin, Y.M. Lopushnyak, A.S. Ruban, P.N. Maximov, E.A. Sinkina, K.V. Bestemianova, M.A. Rudmin // *Geosciences.* – 2025. – Vol. 15. – Iss. 26. DOI: 10.3390/geosciences.
46. Блеклые руды и сфалерит Дарасунского золоторудного месторождения (Восточное Забайкалье, Россия): I. Минеральные ассоциации и сростания, химический состав и его эволюция / Н.Г. Любимцева, Н.С. Бортников, С.Е. Борисовский, В.Ю. Прокофьев, О.В. Викентьева // *Геология рудных месторождений. Петрология.* – 2018. – Т. 60. – № 2. – С. 93–120.
47. Сопряженные реакции растворения-осаждения минералов ряда тетраэдрит-теннантит на Дарасунском золоторудном месторождении (Восточное Забайкалье, Россия) / Н.Г. Любимцева, Н.С. Бортников, С.Е. Борисовский, О.В. Викентьева, В.Ю. Прокофьев // *Геология рудных месторождений.* – 2019. – Т. 61. – № 5. – С. 530–548.
48. Barton P.B., Toulmin P. Phase relations involving sphalerite in the Fe–Zn–S system // *Economic Geology.* – 1966. – Vol. 61. – P. 815–849.
49. Sack R.O., Loucks R.R. Thermodynamic properties of tetrahedrite-tennantites: constraints on the interdependence of the Ag↔Cu, Fe↔Zn, Cu↔Fe, and As↔Sb exchange reactions // *American Mineralogist.* – 1985. – Vol. 70. – P. 1270–1289.
50. Колонин Г.Р., Гаськова О.Л., Пальянова Г.А. Опыт выделения фаций рудообразования на основе буферных парагенезисов сульфидных минералов // *Геология и геофизика.* – 1986. – Т. 7. – С. 133–141.

Информация об авторах

Тамара Юрьевна Якич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. yakichtu@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3382-970X>

Дарья Валентиновна Левочская, кандидат геолого-минералогических наук, начальник отдела поисковых работ Хабаровского филиала АО «Полиметалл УК», Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Муравьева-Амурского, 18. levochskayaDV@polymetal.ru

Екатерина Андреевна Синкина, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. vea@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3224-0298>

Михаил Викторович Шалдыбин, кандидат геолого-минералогических наук, начальник группы седиментологии лаборатории седиментологии ООО «РН-Проектирование Добыча» г. Томск, Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72. ShaldybinMV@tomsknipi.ru

Прокопий Николаевич Максимов, учебный мастер отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. maximov_pn@tpu.ru

Дмитрий Андреевич Ярославцев, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. day13@tpu.ru

Сергей Геннадьевич Чистяков, инженер-программист научно-образовательного центра перспективных исследований Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. csg@tpu.ru

Алексей Сергеевич Рубан, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ruban@tpu.ru

Поступила в редакцию: 03.09.2025

Поступила после рецензирования: 29.09.2025

Принята к публикации: 01.11.2025

REFERENCES

1. White N.C., Hedenquist J.W. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletter*, 1995, vol. 1, pp. 9–13.
2. Hedenquist J.W., Izawa E., Arribas A., White, N.C. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *Resource Geology*, 1996, vol. 1, pp. 9–13.
3. Hedenquist J.W., Arribas R.A. Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 2000, vol. 13, pp. 245–277.
4. Sillitoe R.H. Epithermal models, genetic types, geometrical controls and shallow features. *Special Paper*. Saint John's, Geological Association of Canada, 1993. pp. 403–417.
5. Bortnikov, N.S., Tolstykh, N.D. Epithermal deposits of Kamchatka. *Geology of ore deposits*, 2023, vol. 65, pp. 124–152. (In Russ.) DOI: 10.1134/S1075701523070176
6. Zhai D., Wu J., Zhao Q., Voudouris P., Tombros S., Wang X., Chen W., Sun J., Xu Z., Liu J. Alteration and metallogenic zonation in magmatic-hydrothermal ore systems: scientific understandings and exploration implications. *Journal of Earth Science*, 2025, vol. 36, pp. 1303–1308. DOI: 10.1007/s12583-025-2034-z
7. Yakich T.Yu., Bukhanova D.S., Sinkina E.A., Sarsekeeva E.R., Levochskaya D.V., Nikolaeva A.N., Maximov P.N., Kutyrev A.V., Zhegunov P.S., Rudmin M.A. Mineral features of the copper association of the Baranovskoe epithermal deposit (Central Kamchatka). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 12, pp. 74–87. (In Russ.)
8. Beliaeva T.V., Palyanova G.A. Silver sulfides and selenides from Au-Ag epithermal deposits of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt. *Geology of Ore Deposits*, 2023, vol. 65, pp. 74–108. (In Russ.) DOI: 10.31857/s0016777023010057.
9. Drahota P., Chatziantoniou A., Mihaljevič M., Culka A., Melfou M., Melfos V., Voudouris P. A mineralogical and geochemical assessment of the As-, Cu-, In-, Pb-, Sb-, and Zn-rich mine wastes at the Pefka epithermal deposit, Greece. *Journal of Geochemical Exploration*, 2024, vol. 256, 107336. DOI: 10.1016/j.gexplo.2023.107336.
10. Wang L., Qin K.Z., Song G.X., Li G. M. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 107, pp. 434–456. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.02.023.
11. Yakich T.Y., Ananyev Y.S., Ruban A.S., Gavrilov R.Y., Lesnyak D.V., Levochskaia D.V., Savinova O.V., Rudmin M.A. Mineralogy of the Svetloye epithermal district, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, and its insights for exploration. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 136, DOI: 10425710.1016/j.oregeorev.2021.104257
12. Ivlev A.N. *State geological map of the USSR, scale 1:200000. Priokhotskaya Series. Sheet O-54-VIII (Kadakchan). Explanatory Note*. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1986. 93 p. (In Russ.)
13. Karpuzov A.F. *Report on gold prospecting in the Okhotsk area of Khabarovsk region. Sheet O-54*. Moscow, Aerogeology Publ., 1980. 116 p. (In Russ.)
14. Yakich T.Yu., Yaroslavtsev D.A., Sinkina E.A. The mineral-forming system of the Baranovskoe epithermal Au-Ag deposit (Central Kamchatka) as an environment for concentration of TABS group elements (Te, As, Bi, Se). *All-Russian Conference. Mineral-Forming Systems of High-Tech Metal Deposits: Achievements and Research Prospects*. Moscow, November 29 – December 1, 2023. Moscow, IGEM RAS Publ., 2023. pp. 194–196. (In Russ.)
15. Levochskaya D.V., Yakich T.Y., Lesniak D.V., Ananyev Y.S. Hydrothermal-altered zoning, fluid conditions, and types of gold mineralization within the Elena and Emy deposits of the epithermal Svetloye ore district (Khabarovsk territory). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, pp. 17–32. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/10/3252.
16. Kudaeva S.S., Kozlov V.V., Skilskaya E.D., Sergeeva A.V., Tolstykh N.D., Shkilev A. New type of gold-bearing mineralization the Ozernovskoe Au-Te-Se epithermal deposit (Central Kamchatka, Russia). *Geology of Ore Deposits*, 2024, vol. 66, pp. 547–569. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016777024050056.

17. Akinin V.V., Miller E.L. Evolution of calc-alkaline magmas of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt. *Petrology*, 2011, vol. 19, no. 3, pp. 249–290. (In Russ.)
18. *Microtomograph uCTom 130/005 software*. Available at: <https://rsp.tpu.ru/tech/> (accessed: 15 August 2025).
19. Grosche A., Klemd R., Denkel K., Keith M., Haase K.M., Voudouris P.C., Alfieris D., Wiedenbeck M. Sources, transport and deposition of metal(loid)s recorded by sulfide and rock geochemistry: constraints from a vertical profile through the epithermal Profites Ilias Au prospect, Milos Island, Greece. *Mineralium Deposita*, 2023, vol. 58, pp. 1101–1122. DOI: 10.1007/s00126-023-01170-2.
20. Vikentiev I.V. *Mineralogy and geochemistry of gold deposits*. Moscow, GEOS Publ., 2015. 432 p. (In Russ.)
21. Cook N.J., Ciobanu C.L., Pring A. Arsenopyrite-pyrite association in orogenic gold deposits. *Mineralium Deposita*, 2009, vol. 44, no. 8, pp. 857–875.
22. Keith M., Smith D.J., Jenkin G.R.T., Holwell D.A., Dye M.D. A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: insights into ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 96, pp. 269–282. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2017.07.023.
23. Keith M., Smith D.J., Jenkin G.R.J., Holwell D.A. Global Se and Te systematics in hydrothermal pyrite from different ore deposits: a review. *Applied Earth Science*, 2017, vol. 126, pp. 70–71. DOI: 10.1080/03717453.2017.1306265.
24. Cherkasova (Yakich) T., Kucherenko I., Abramova R. Rear poly- mineral zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27. Problems of Geology and Subsurface Development, pp. 1–5.
25. Timkin T., Voroshilov V., Askanakova O., Cherkasova (Yakich) T., Chernyshov A., Korotchenko T. Estimating gold-ore mineralization potential within Topolninsk ore field (Gorny Altai). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27. Problems of Geology and Subsurface Development, pp. 1–6.
26. Tolstykh N., Bortnikov N., Zhukova I., Stepanov A., Palyanova G., Shapovalova M., Zhao K. Trace elements in pyrite from Au[сbnd]Ag epithermal deposits of Kamchatka, Russia: comparison with geochemical features of mineral systems. *Journal of Geochemical Exploration*, 2025, vol. 275, 107774. DOI: 10.1016/j.gexplo.2025.107774.
27. Yakich T.Yu., Levochskaya D.V. Chemical composition of ore minerals from the Levoberezhnoye epithermal Au-Ag deposit (Khabarovsk Krai) for analysis of mineralization conditions. *Metallogeny of Ancient and Modern Oceans: From Hypotheses of Ore Genesis to Forecasting Criteria*. Miass, April 21–25, 2025. Miass, South Ural Federal Research Center for Mineralogy and Geocology, UB RAS Publ., 2025. Vol. 31, pp. 173–176. (In Russ.)
28. Erofeev A.E., Levochskaya D.V., Yakich T.Yu. Pyrite typomorphism as a mineralogical criterion for mineralization: case study of the Svetloe epithermal Au-Ag deposit (Khabarovsk Krai). *Problems of Geology and Subsurface Development. Proc. of the XXVIII International Scientific Symposium of Young Scientists and Students named after Academician M.A. Usov. dedicated to the 125th anniversary of Academician K.I. Satpayev and 130th anniversary of Corresponding Member F.N. Shakhov*. Tomsk, April 1–5, 2024. Tomsk, TPU Publ. House, 2024. pp. 67–68. (In Russ.)
29. Deditius A.P., Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S., Chryssoulis S.L., Walshe J., Ewing R.C. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, vol. 140, pp. 644–670.
30. Kesler S.E., Ewing R.C., Deditius A.P., Reich M.M., Utsunomiya S., Chryssoulis S. Role of arsenian pyrite in hydrothermal ore deposits: a history and update. *Great Basin Evolution and Metallogeny, Vols I and II in Conference: 6th Geological Society of Nevada on Great Basin Evolution and Metallogeny*. Reno, May 14–15, 2010. Reno, Nevada, DEStech Publications, 2010. pp. 233–243.
31. Tardani D., Reich M., Deditius A.P., Chryssoulis S., Sánchez-Alfaro P., Wrage Ja., Roberts M.P. Copper–arsenic decoupling in an active geothermal system: a link between pyrite and fluid composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, vol. 204, pp. 179–204.
32. Murowchick J.B., Barnes H.L. Marcasite precipitation from hydrothermal solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, vol. 50, pp. 2615–2629.
33. Butler I.B., Rickard D. Framboidal pyrite formation via oxidation of iron (II) monosulfide by hydrogen sulfide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, vol. 64, no.15, pp. 2665–2675.
34. Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S., Palenik C.S., Chryssoulis S.L., Ewing R.C. Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, vol. 69, no. 15, pp. 2781–2796.
35. Murowchick J.B. Marcasite inversion and the retrographic determination of pyrite ancestry. *Economic Geology*, 1992, vol. 87, pp. 1141–1152.
36. Yakich T.Yu. Composition and structure features of pyrite from the Severny area of Baranyevskoe Au-Ag deposit (Central Kamchatka). *Problems of Geology and Subsurface Development. Proc. of the XXVII International Symposium of Students and Young Scientists named after Academician M.A. Usov, Dedicated to the 160th Anniversary of V.A. Obruchev and 140th Anniversary of M.A. Usov – Founders of the Siberian Mining and Geological School*. Tomsk, April 3–7, 2023. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2023. pp. 112–113. (In Russ.)
37. Okrugin V.M., Yablokova D.A., Andreeva E.D., Shishkanova K.O., Chubarov V.M., Filosofova T.M., Moskaleva S.V., Chernev I.I., Chubarov M.V. New data on pyrite from modern and paleohydrothermal systems of Kamchatka. *Volcanism and Related Processes. Proc. of the XXII Annual Conference Dedicated to Volcanologist's Day*. Petropavlovsk-Kamchatsky, March 27–28, 2014. Petropavlovsk-Kamchatsky, IVS FEB RAS, 2014. pp. 324–329. (In Russ.)
38. Pokrovski G.S., Kara S., Roux J. Stability and solubility of arsenopyrite, FeAsS, in crustal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, vol. 66, pp. 2361–2378.
39. Sharp Z.D., Essene E.J., Kelly W.C. A re-examination of the arsenopyrite geothermometer: Pressure considerations and applications to natural assemblages. *Canadian Mineralogist*, 1985, vol. 23, pp. 517–534.
40. Liu J., Kou S., Wang Z., Zhang Y., Pan Y., Ji D., Tian Y., Chen H., Gao C. Genesis of Xinjiazui gold deposit: in situ geochemical constraints from arsenopyrite. *Minerals*, 2024, vol. 14, pp. 1–19. DOI: 10.3390/min14101031.

41. Kretschmar U., Scott S.D. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe–As–S and their application. *Canadian Mineralogist*, 1976, vol. 14, pp. 364–386.
42. Scott S.D. Chemical behaviour of sphalerite and arsenopyrite in hydrothermal and metamorphic environments. *Mineralogical Magazine*, 1983, vol. 47, pp. 427–435.
43. Vilor N.V., Kazmin L.A., Pavlova L.A. Physicochemical conditions of arsenopyrite-pyrite association formation in gold deposits. *Proc. of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2010, vol. 37, no. 2, pp. 8–20. (In Russ.)
44. Biagioni C., George L.L., Cook N.J., Makovicky E., Moëlo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C.J., Welch M.D., Bosi F. The Tetrahedrite group: nomenclature and classification. *American Mineralogist*, 2020, vol. 105, pp. 109–122.
45. Yakich T.Yu., Voudouris P., Levochskaia D.V., Mazurov A.K., Shaldybin M.V., Lopushnyak Y.M., Ruban A.S., Maximov P.N., Sinkina E.A., Bestemianova K.V., Rudmin M.A. Sulfosalts and sulfates in the epithermal Au-Ag-Te Emmy deposit (Khabarovsk Territory, Far East, Russia): implications for the mineralization process. *Geosciences*, 2025, vol. 15, no. 26. DOI: 10.3390/geosciences.
46. Lyubimtseva N.G., Bortnikov N.S., Borisovsky S.E., Prokofiev V.Y., Vikent'eva O.V. Fahlore and Sphalerite from the Darasun Gold Deposit (Eastern Transbaikalia, Russia): I. Mineral Assemblages and Intergrowths, Chemical Composition, and Its Evolution. *Geology of Ore Deposits*, 2018, vol. 60, no. 2, pp. 93–120. (In Russ.)
47. Lyubimtseva N.G., Bortnikov N.S., Borisovsky S.E., Vikent'eva O.V., Prokofiev V.Y. Coupled dissolution-precipitation reactions of tennantite-tetrahedrite series minerals at the Darasun Gold Deposit (Eastern Transbaikalia, Russia). *Geology of Ore Deposits*, 2019, vol. 61, no. 5, pp. 530–548. (In Russ.)
48. Barton P.B., Toulmin P. Phase relations involving sphalerite in the Fe–Zn–S system. *Economic Geology*, 1966, vol. 61, pp. 815–849.
49. Sack R.O., Loucks R.R. Thermodynamic properties of tetrahedrite-tennantites: constraints on the interdependence of the $\text{Ag} \leftrightarrow \text{Cu}$, $\text{Fe} \leftrightarrow \text{Zn}$, $\text{Cu} \leftrightarrow \text{Fe}$, and $\text{As} \leftrightarrow \text{Sb}$ exchange reactions. *American Mineralogist*, 1985, vol. 70, pp. 1270–1289.
50. Kolonin G.R., Gaskova O.L., Paliyanova G.A. Experience in distinguishing ore formation facies based on buffer parageneses of sulfide minerals. *Russian Geology and Geophysics*, 1986, vol. 27, pp. 133–141. (In Russ.)

Information about the authors

Tamara Yu. Yakich, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. yakichtu@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3382-970X>

Darya V. Levochskaia, Cand. Sc., Head of Exploration Department, Khabarovsk Branch of JSC "Polymetal UK", 18, Muravyov-Amursk street, Khabarovsk, 680000, Russian Federation. levochskayaDV@polymetal.ru

Ekaterina A. Sinkina, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. vea@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3224-0298>

Mikhail V. Shaldybin, Cand. Sc., Head of Sedimentology Group, RN-Proektirovanie Dobycha, LLC, 72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russian Federation. ShaldybinMV@tomsknipi.ru

Prokopy N. Maksimov, Training Master, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. maximov_pn@tpu.ru

Dmitry A. Yaroslavtsev, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. day13@tpu.ru

Sergey G. Chistyakov, Software Engineer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. csg@tpu.ru

Alexey S. Ruban, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ruban@tpu.ru

Received: 03.09.2025

Revised: 29.09.2025

Accepted: 01.11.2025