

УДК 553.4

DOI: 10.24930/2500-302X-2025-25-3-572-594

Бакайское проявление золота (Южный Урал): минералогия руд и условия образования

К. А. Новоселов, Е. В. Белогуб, М. А. Рассомахин, Н. К. Никандрова

Институт минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН,
456317, Челябинская обл., г. Миасс, Ильменский заповедник, e-mail: const31@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.04.2024 г., принята к печати 10.09.2024 г.

Объект исследования. Бакайское проявление золота в морфологическом отношении представляет собой зону разлома и дробления субширотного простирания в гранитоидах Тургойского массива (C_{1-2}), которая вмещает кварцевые жилы, минерализованные сульфидами. Протяженность жильной зоны около 1.5 км. Тургойский массив находится на границе Магнитогорской и Центрально-Уральской зон и является сателлитом Сыростанского массива. **Материал и методы.** Опробование осуществлялось из старых выработок и “рудных складов”. Базовые методы изучения проб – оптическая и электронная микроскопия. Для жильного кварца выполнен анализ флюидных включений методом термоксиометрии. **Результаты.** Преобладающими рудными минералами являются пирит и галенит; редко в рудах встречаются халькопирит, тетраэдрит, сфалерит, сульфосоли и сульфотеллуриды висмута. Золото в изученных пробах присутствует как самородное (первичное и гипергенное), так и в форме теллуридов и сульфидов. Руды частично окислены. Средние арифметические и медианные значения температуры гомогенизации T_g первичных и первично-вторичных включений из “рудного” кварца составляют около 242–247°C. Средняя и медианная T_g кварца из сланцев немного ниже (222 и 215°C соответственно) при значительном разбросе значений. Концентрация солей в NaCl-эквиваленте, определенная по температуре плавления последнего кристаллика льда, варьируется от 1.4 до 13.0 мас. % во флюидных включениях из вмещающих сланцев и составляет 0.2–5.6 мас. % в “рудном” кварце. Такие широкие вариации солёности во всех изученных случаях могут свидетельствовать об изменениях флюидных включений вторичными процессами.

Ключевые слова: Южный Урал, Тургойский массив, Бакайское, ютенбогаардтит

Источник финансирования

Исследования выполнены в рамках государственного задания (тема 075-00622-24-00)

Bakayskoe gold occurrence (Southern Urals): Ore mineralogy and formation conditions

K. A. Novoselov, E. V. Belogub, M. A. Rassomakhin, N. K. Nikandrova

Institute of Mineralogy, South Ural Federal Scientific Center for Mineralogy and Geoecology, UB RAS, Ilmeny Reserve Area,
Miass, Chelyabinsk region 456317, Russia, e-mail: const31@yandex.ru

Received 22.04.2024, accepted 10.09.2024

Research subject. In morphological terms, the Bakayskoe gold occurrence comprises an area of fracture and crushing of sublatitudinal strike in the granitoids of the Turgoyak massif (C_{1-2}), which contains quartz veins with sulfide mineralization. The vein zone is about 1.5 km in length. The Turgoyak massif is located on the border of the Magnitogorsk and Central Ural areas, being a satellite of the Syrostan massif. **Materials and methods.** Samples collected in old workings and ore stockpiles were studied by optical and SEM microscopy. Fluid inclusions in vein quartz were studied by thermoscopy. **Results.** The predominant ore minerals were found to be pyrite and galena; rarely, the ores contain chalcopyrite, tetrahedrite, sphalerite, sulfosalts, and bismuth sulfotellurides. In the studied samples, gold is present as both native gold (primary and supergene), and tellurides and sulfides. Ores are partly oxidized. The average and median values of the homogenization temperature (T_g) of primary and primary-secondary inclusions from ore quartz are about 242–247°C. The average and median T_g of quartz from shale is slightly lower (222 and 215°C, respectively), with a significant scatter of values. The concentration of salts in NaCl equivalent, determined by the melting point of the last ice

Для цитирования: Новоселов К.А., Белогуб Е.В., Рассомахин М.А., Никандрова Н.К. (2025) Бакайское проявление золота (Южный Урал): минералогия руд и условия образования. *Литосфера*, 25(3), 572–594. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-572-594>. EDN: FAKPMJ

For citation: Novoselov K.A., Belogub E.V., Rassomakhin M.A., Nikandrova N.K. (2025) Bakayskoe gold occurrence (Southern Urals): Ore mineralogy and formation conditions. *Lithosphere (Russia)*, 25(3), 572–594. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-572-594>. EDN: FAKPMJ

© К.А. Новоселов, Е.В. Белогуб, М.А. Рассомахин, Н.К. Никандрова, 2025

crystal, varies from 1.4 to 13.0 wt % in FI from the host shales and 0.2–5.6 wt % in ore quartz. Such wide variations in salinity in all the studied cases may indicate changes in FI by secondary processes.

Keywords: *South Urals, massif Turgoyak, Bakayskoe, uytenbogaardtite*

Funding information

The research was carried out within the framework of the state assignment, project No. 075-00622-24-00)

Acknowledgements

The authors are grateful to the reviewers for their valuable comments.

ВВЕДЕНИЕ

Золотое оруденение, ассоциирующее с метаморфическими комплексами, формируется на разных стадиях становления орогенов и разных глубинах (2–20 км) и считается связанным с региональным флюидопотоком вдоль главных разломных зон (Goldfarb et al., 2005). Часто эволюционирующие метаморфические комплексы вмещают различные типы месторождений золота, которые могут претерпевать ремобилизацию и накладываться друг на друга (Sillitoe, Thompson, 1998; Groves et al., 2003). Этим отчасти объясняются дискуссии о происхождении некоторых типов месторождений золота, особенно образованных или ремобилизованных во время крупного компрессионного орогенеза, сформировавшего окончательный облик вмещающих метаморфических поясов. К таким типам относятся орогенные и связанные с интрузиями (intrusive-related) месторождения с преобладанием золота, а также месторождения с нетипичными ассоциациями золота и металлов (Groves et al., 2003). Источник флюида и золота в орогенных месторождениях остается спорным (Ridley, Diamond, 2000). Общим для обоих типов является низкая соленость флюида и его состав H_2O-CO_2 .

Коллизионная стадия развития на Южном Урале продолжалась с позднего девона до триаса. С ней связан гранитный магматизм, который сначала происходил в надсубдукционной (коллизия дуга–континент), а начиная со среднего карбона – во внутриконтинентальной (коллизия континент–континент) обстановке (Bea et al., 2002). Следствием интенсивных деформаций пород при коллизии был возросший флюидопоток и, как результат, интенсивная гидротермальная активность (Puchkov, 2017). С этой стадией развития региона связа-

но множество золоторудных проявлений, которые контролируются сутурными зонами и массивами гранитоидов (Kisters et al., 1999; Сазонов и др., 2001; Знаменский и др., 2015; Puchkov, 2017). При этом рудообразующий флюид может иметь как метаморфогенное, так и магматогенное и смешанное происхождение (Знаменский и др., 2015; Belogub et al., 2017).

Месторождения золота в зоне Главного Уральского разлома (ГУР) характеризуются сложной тектонической историей, включающей надвиги, складчатость и взбросы, а затем сдвиговые деформации. Собственно золотое оруденение связано с хрупко-пластичными сдвигами второго и третьего порядков, которые развивались на поздних стадиях кинематической истории Главного Уральского разлома (Kisters et al., 1999). Минерализация формировалась на относительно небольших глубинах (2–6 км) и в основном после пика метаморфизма вмещающих пород.

В Восточно-Уральской зоне месторождения золота локализованы в верхнепалеозойских гранитных массивах (Kisters et al., 1999). По времени оруденение связано с основной фазой регионального сжатия и гранитного плутонизма в верхнем карбоне и нижней перми. Золотоносные жильные системы связаны со сдвиговыми зонами в гранитоидах. Именно данный тип месторождений – традиционный для Урала источник золота. Собственно, открытие этого типа руд на Среднем Урале и положило начало золотой промышленности России (Сазонов и др., 2001).

В статье рассматривается Бакайское рудопроявление золота в Миасском районе Южного Урала. Рудный район является одним из старейших в России, первое коренное золото здесь было выявлено в 1797 г. (Попова, 2002). Он вмещает в себя множе-

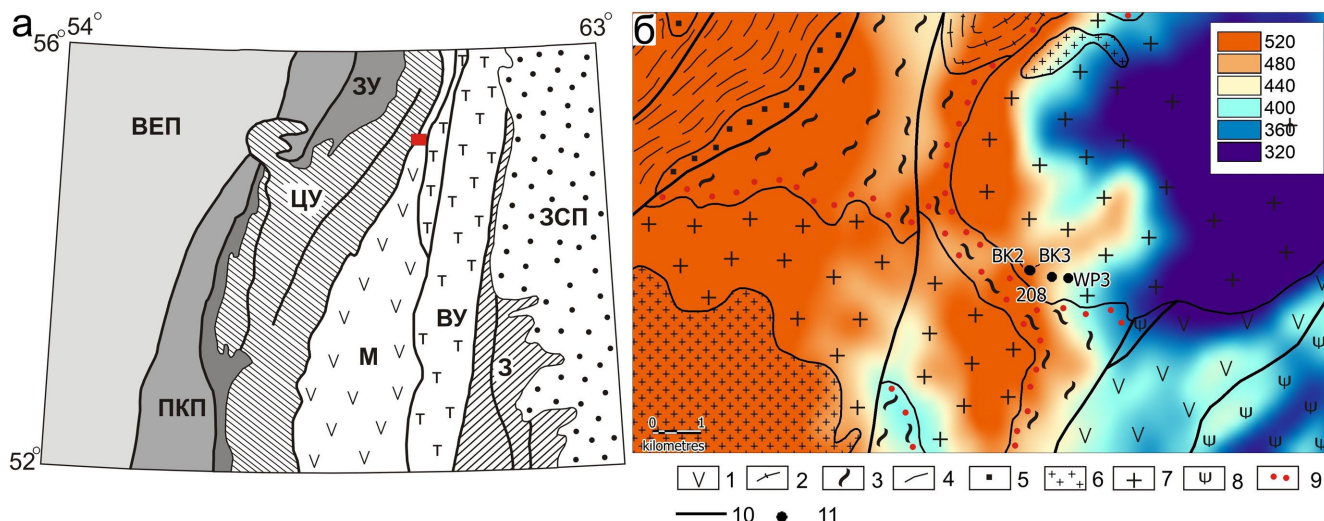


Рис. 1. Упрощенная тектоническая схема Южного Урала (а) (Козлов и др., 2001) и геологическая карта участка (б; по (Аулов и др., 2015; Петров и др., 2015)) на цифровой модели рельефа.

ВЕП – Восточно-Европейская платформа, ПКП – Предуральский краевой прогиб, ЗУ – Западно-Уральская зона, ЦУ – Центрально-Уральская зона, М – Магнитогорская зона, ВУ – Восточно-Уральская зона, 3 – Зауралье, ЗСП – Западно-Сибирская платформа. Красный прямоугольник – положение участка. 1 – базальты, кремнистые сланцы $O_{1-2}pl$; 2 – кварциты, сланцы слюдисто-хлоритовые RF_3ut ; 3 – сланцы слюдисто-хлоритовые, слюдисто-хлорит-кварцевые RF_2ur ; 4 – сланцы слюдисто-хлоритовые, слюдисто-кварцевые с гранатом, силлиманитом RF_2ur ; 5 – кварциты RF_2tg ; 6 – граниты C_{1-2} ; 7 – гранодиориты C_{1-2} ; 8 – серпентиниты O_{1-2} ; 9 – ороговикование; 10 – тектонические нарушения; 11 – точки наблюдения.

Fig. 1. Simplified tectonic scheme of the Southern Urals (a) (Kozlov et al., 2001) and geological map of the site (б; according to (Aulov et al., 2015; Petrov et al., 2015)) on a digital elevation model.

ВЕП – East European Platform; ПКП – Pre-Ural Foredeep; ЗУ – Western Ural zone; ЦУ – Central Ural zone; М – Magnitogorsk zone; ВУ – East Ural zone; 3 – Trasuralian zone; ЗСП – West Siberian Platform. Red rectangle – site position. 1 – basalts, siliceous shales $O_{1-2}pl$; 2 – quartzites, mica-chlorite schists RF_3ut ; 3 – mica-chlorite, mica-chlorite-quartz schists RF_2ur ; 4 – mica-chlorite, mica-quartz schists with garnet, sillimanite RF_2ur ; 5 – quartzites RF_2tg ; 6 – granites C_{1-2} ; 7 – granodiorites C_{1-2} ; 8 – serpentinites O_{1-2} ; 9 – hornfels alteration; 10 – tectonic disturbances; 11 – observation points.

ство месторождений и проявлений золота, приуроченных к зоне ГУРа и ассоциирующихся с метасоматитами березит-лиственитовой формации, включая Тыелгинское, Наилинское, Васильевское, Мечниковское, Мурашкина гора и др. (Сазонов и др., 2001; Попова, 2002). Золоторудные тела различной морфологии и состава локализованы среди серпентинитов, габброидов, диоритов, вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород. Типичные связанные с интрузиями проявления золота для Миасского района не характерны. Бакайское рудопроявление локализовано непосредственно в зоне ГУРа в коллизионных гранитоидах Тургорского массива, т.е. совмещает в себе признаки обоих рассмотренных выше типов золоторудных месторождений. Задачи исследования состояли в изучении вещественного состава руд с акцентом на минеральные формы благородных металлов, оценке параметров рудообразующего флюида для определения возможной формационной принадлежности. Нужно отметить, что четких критериев разделения золоторудных месторождений, связанных с интрузиями,

и орогенных, связанных с аккрецией, не существует (Sillitoe, Thompson, 1998). Многие характеристики этих месторождений, включая геологическую позицию, отсутствие четкой зональности, минералогии жильных ассоциаций, термобарогеохимические параметры, применимы как к одному, так и другому типу. Тем не менее правильный выбор генетической модели может помочь в планировании геолого-разведочных работ.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

В южном сегменте уральского складчатого пояса выделяется шесть субмеридиональных зон: Предуральский прогиб, Западно-Уральская, Центрально-Уральская, Магнитогорская, Восточно-Уральская зоны и Зауралье (рис. 1а) (Puchkov, 2017; Herrington et al., 2005). Первые три представляют собой пассивную окраину Русской платформы, сформированную в позднем кембрии – раннем ордовике, эволюционировавшую с ордовика по девон, а в карбоне–перми – деформированную

и ставшую частью Уральского складчатого пояса (Puchkov, 2017). Породные комплексы Магнитогорской и Восточно-Уральской зоны сопоставляются с породами океанических бассейнов (офиолитами), островных дуг, поясов Андийского типа, флишевых прогибов и внутридуговых бассейнов. Они отделены от комплексов Русской платформы Главным Уральским разломом, который является одной из крупнейших сутур Евразии. Он возник в раннем палеозое и обновлялся в позднем палеозое и мезозое (Puchkov, 2017; Herrington et al., 2005). Главные золотые месторождения Южного Урала присутствуют в структурах ГУРа, Магнитогорской и Восточно-Уральской зон.

Тургорякский гранитный массив

Тургорякский массив находится на границе Магнитогорской и Центрально-Уральской зон и считается сателлитом Сыростанского массива (Ферштатер, 2013). Массив вмещает породы уреньгинской RF_2ut и уйташской RF_3ut свит с запада, поляковской толщи $O_{1-2}pl$ – с востока, имея с ними интрузивные контакты (см. рис. 1). Вдоль восточного контакта массива протягиваются ультрабазиты, маркирующие ГУР. В плане массив имеет округлую форму, в разрезе представляет собой шток диаметром 8 км с вертикальной мощностью около 7–10 км (Аулов и др., 2015; Петров и др., 2015). Значительная его часть находится под оз. Тургоряк.

Массив относится к тургорякско-сыростанскому комплексу монцодиорит-гранитной формации и сложен преимущественно гранодиоритами, реже кварцевыми диоритами и гранитами (Шагалов, 2002; Ферштатер, 2013). Дайковая серия представлена мелкозернистыми гранитами, аплитовидными гранитами, пегматитами, двуслюдяными гранодиоритами, диорит- и гранит-порфирами. Петрографические и петрохимические особенности пород Тургорякского массива детально рассмотрены в диссертационной работе Е.С. Шагалова (2002). Гранодиориты главной фазы представлены амфибол-биотитовыми разностями. В состав пород входят плагиоклаз (60–70%), КППШ (5–15%), кварц (15–20%), биотит (5–10%), роговая обманка (до 3%); акцессорные минералы представлены апатитом, титанитом, эпидотом, алланитом, цирконом, рудными минералами (магнетитом, титаномагнетитом). Породы принадлежат магнетитовой серии (Ishihara, 1977).

Петрохимические особенности пород указывают на принадлежность к известково-щелочной серии (рис. 2) с преобладанием натрия над калием. Индекс глиноземистости $ASI = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO)$ (Zen, 1986) пород варьируется от 0.58 до 0.89, что соответствует метаглиноземистым разностям. На дискриминационных диаграммах Дж. Пирса (Pearce et al., 1984) фигуративные

точки гранитоидов тяготеют к полю гранитов вулканических дуг (см. рис. 2). На основании петрохимических характеристик породы массива отнесены к I-типу. Геохимический спектр пород характеризуется повышенными по отношению к кларку содержаниями V, Ba, Sr, Pb и пониженными Sc, Cu, Mo, Co, Ni, Cr.

Возраст пород определен как ранне- и среднекаменноугольный. Субстрат является гетерогенным с существенным преобладанием мантийной составляющей (Шагалов, 2002). Кристаллизация пород массива происходила при температурах 770–810 °C и давлении 2.1–2.5 кбар (Сначев и др., 2020).

Бакайское рудопроявление

Рудопроявление было открыто случайно в 1922 г. жителем пос. Тургоряк Василием Ершовым (Кураев, 1941). В том же году Н. Кураев взял образцы безрезитизированных гранитов с кубиками пирита и прожилками кварца, где оказалось (по данным Кочкарской и Миасской химических лабораторий) до 16 г/т золота. В верхних горизонтах содержание золота доходило до 100 г/т. Руда направлялась как флюсовая на Карабашский медеплавильный завод. В 1937 г. рудопроявление фрагментарно было отработано старателями до глубины 3–4 м, богатые участки – до глубины 20–25 м. Весной 1941 г. эксплуатация прекращена в связи с нерентабельностью (Кураев, 1941).

Сейчас Бакайское рудопроявление – это серия заброшенных добычных и разведочных выработок глубиной до нескольких метров (рис. 3). Возле выработок сохранились “рудные склады” – кучи раздробленного кварца. В рельефе зона маркируется пологим логом (см. рис. 1).

В морфологическом отношении рудопроявление представляет собой зону разлома и дробления субширокого простираения в гранитах, которая вмещает кварцевые жилы минерализованные галенитом, пиритом, халькопиритом, молибденитом. В зоне окисления присутствуют лимонит, церуссит, малахит. Околожилные изменения пород проявлены в серицитизации, альбитизации, хлоритизации, карбонатизации (Михайлов и др., 2021). Протяженность жильной зоны около 1.5 км при крайне неравномерной мощности, достигающей 3.5 м. Средние содержания золота в руде на участках отработки составили 28 г/т, серебра – 421 г/т (Кураев, 1941). Запасы с баланса сняты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Представительные пробы массой около 1 кг каждая отобраны из разных участков рудопроявления: как из забоев старых горных выработок, так и “рудных складов” (табл. 1).

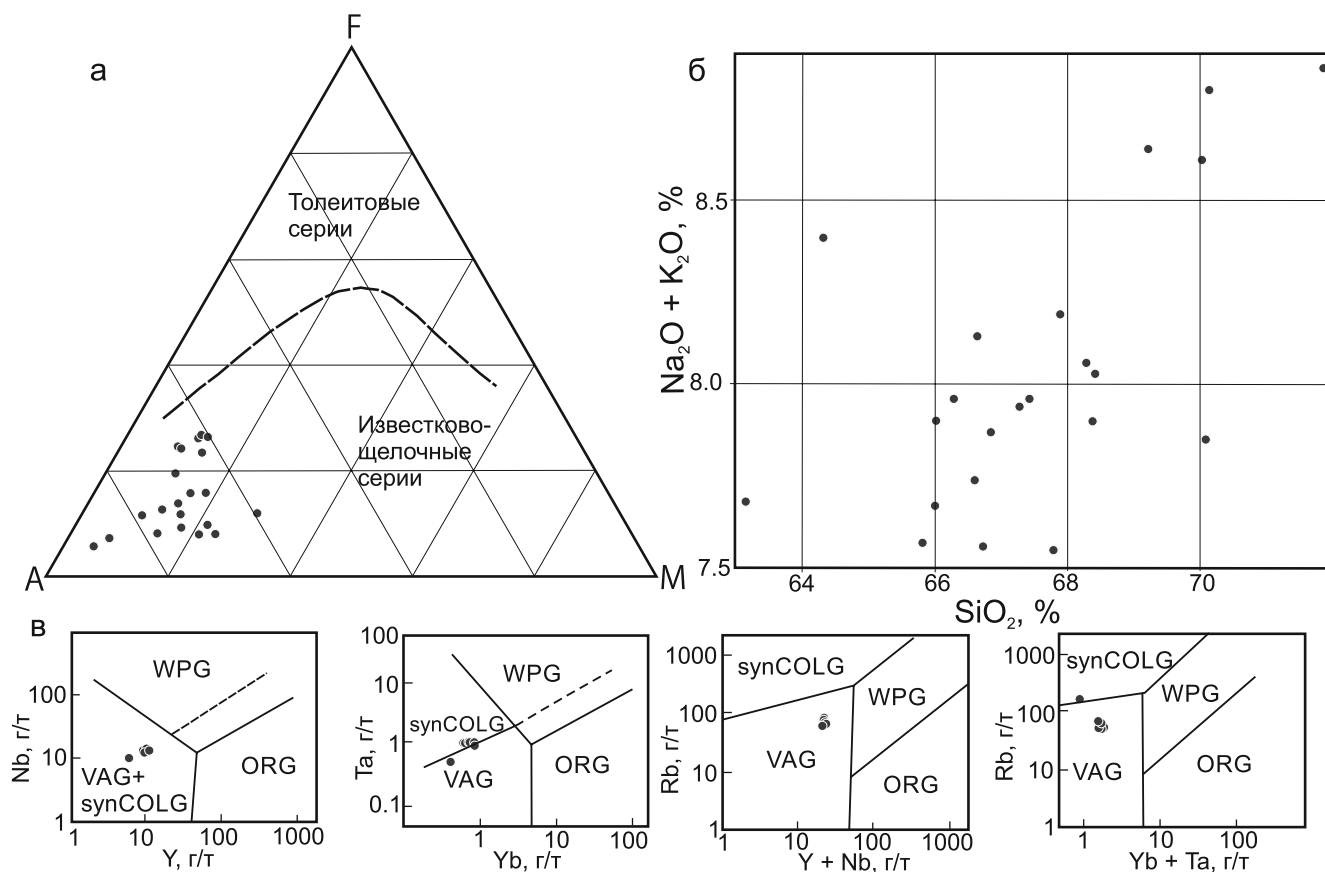


Рис. 2. Петрохимические особенности гранитоидов Тургойского массива (составлено по данным (Шагалов, 2002; Сначев и др., 2020)).

а – диаграмма AFM ($(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{--SumFe--MgO}$); б – классификационная диаграмма $\text{SiO}_2\text{--}(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$; в – дискриминационные диаграммы Пирса (WPG – внутриплитные граниты, VAG – граниты вулканических дуг, synCOLG – коллизийные граниты, ORG граниты океанических хребтов; пунктирная линия – граница ORG для аномальных рифтов) (Pearce et al., 1984).

Fig. 2. Petrochemical features of granitoids of the Turgoyak massif (data compilation (Shagalov, 2002; Snachev et al., 2020)).

а – AFM diagram ($(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{--SumFe--MgO}$); б – classification diagram $\text{SiO}_2\text{--}(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$; в – pearce discriminative diagrams (WPG – intraplate granites, VAG – volcanic arc granites, synCOLG – collision granites, ORG granites of oceanic ridges; dotted line – ORG boundary for anomalous rifts) (Pearce et al., 1984).

Из штуфных проб изготовлены петрографические шлифы для характеристики околорудных пород. Жильный материал отбирался точечным способом. Из измельченной пробы получен тяжелый концентрат, использованный для минералого-петрографического изучения. Авторами применены методы оптической (Axioscope A.1) и электронной микроскопии (Tescan Vega3 SBU с ЭДА Oxford Instruments X-act (ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 0.3 нА), для количественного анализа применялись эталоны MINM-25-53 фирм ASTI-MEX Scientific Limited (стандарт № 01-044) и Microanalysis Consultants Ltd. (стандарт № 1362), аналитик М.А. Рассомахин (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс).

Микротермометрические исследования флюидных включений (ФВ) в кварце проведены на термостатике THMSG-600 (Linkam), позволяющем производить измерения температур фазовых переходов в интервале от -196 до $+600^\circ\text{C}$, с микроскопом Olympus, объектив $\times 50$, аналитик Н.К. Никандрова (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН). Управляющее программное обеспечение LinkSys V-2.39. Точность измерений $\pm 0.1^\circ\text{C}$ в интервале температур от -20 до $+80^\circ\text{C}$ и $\pm 1^\circ\text{C}$ за пределами этого интервала. К первичным отнесены включения, расположенные изолированно или по зонам роста кварца, к первично-вторичным – расположенные в виде цепочек вдоль залеченных трещин, не выходящих за границы изученных зерен и не имеющих признаков расшнуровывания.



Рис. 3. Старые выработки на Бакайском рудопоявлении (а), “рудный склад” – куча раздробленного жильного кварца, ВК3 (б), кварц-полевошпатовые жилы в зоне рассланцевания в забое выработки, ВК2а (в) и розовый крупнозернистый КПШ в зальбандах кварцевой жилы (г).

Fig. 3. Old mining workings at the Bakayskoe ore occurrence (a), “ore warehouse” – a pile of crushed vein quartz, BK3 (б), quartz-feldspathic veins in the shear zone in the working face, BK2a (в), pink coarse-grained potassic feldspar is developed in the quartz vein selvages (г).

Изучены ФВ размером более 4–5 мкм, всего 183 включения (82 из “рудного кварца”, 49 из кварца зоны рассланцевания в граните и 52 из кварца сланцев), из которых 15 при нагреве декрепитировало. Температуры гомогенизации T_h в ФВ фиксировались в момент исчезновения газового пузырька при нагревании препарата в термокамере и интерпретировались как температуры захвата включения (Ермаков, Долгов, 1979). Из-за мелкого размера включений криометрические измерения удалось провести для 12 включений в кварце из “рудных складов”, 15 – из жил в метаморфических породах и 9 – из кварц-полевошпатовых прожилков в зоне рассланцевания в гранитах. Температура эвтектики T_e фиксировалась по появлению первых капель жидкости при нагреве включений, предва-

рительно замороженных до температуры, близкой к температуре жидкого азота. Солевой состав растворов во включениях оценивался по измеренным температурам эвтектик (Борисенко, 1977). Концентрации солей в растворах рассчитывались по температурам плавления последних кристаллических фаз (Bodnar, Vityk, 1994). Для определения концентрации солей использовались только двухфазные включения, так как наличие растворенных газов во флюиде может приводить к образованию газогидратов с более высокой температурой плавления, не соответствующей концентрации солей (Мельников и др., 2008). На образование газогидратов указывает положительная температура исчезновения последнего кристаллика, зафиксированная для некоторых включений (Мельни-

Таблица 1. Характеристика проб

Table 1. Samples description

№ пробы	Характеристика	Вмещающая порода, место отбора	Кол-во изученных ФВ
ВК1b	Жильный кварц из согласных прожилков мощностью первые см	Кристаллические сланцы уреньгинской свиты в экзоконтакте массива	49
ВК2a	Жильный кварц из кварц-полевошпатовых прожилков мощностью первые см	Зона рассланцевания с кварц-полевошпатовым прожилкованием в гранитах (см. рис. 3в)	52
ВК3	Жильный кварц с редкими гнездами и вкрапленностью галенита, слаболимонитизированный	“Рудный склад” (см. рис. 3б)	82
208	Жильный кварц с массивной текстурой и редкой вкрапленностью пирита и единичных зерен галенита, в трещинах и кавернах слабо развит лимонит	“Рудный склад”	

ков и др., 2008). Температуры частичной и полной гомогенизации в трехфазных ФВ фиксировались в момент объединения газового пузырька с жидкой углекислотной фазой и до полного исчезновения фазовых границ соответственно. Предпринята попытка зафиксировать температуру тройной точки углекислоты, ввиду мелких размеров включений однозначно зафиксировать эту температуру не удалось. Давление рассчитано по плотности CO_2 и температуре гомогенизации в трехфазных включениях (Brown, Lamb, 1989). Плотность углекислоты оценена по температуре частичной гомогенизации жидкой углекислоты и CO_2 , и соотношению объемов газа и жидкости (Вукалович, Алтуни, 1965).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Минералогия руд

Кварц-полевошпатовая жильная масса является основой руд Бакайского проявления, содержание рудных минералов в изученных пробах не превышало 1 об.%. Преобладающие рудные минералы –

пирит и галенит. Пирит представлен кубическими кристаллами размером до 2 мм. Он часто содержит включения галенита. Пирит замещается лимонитом с образованием полных или частичных псевдоморфоз. В химическом составе пирита на уровне чувствительности EDS-анализа примеси не выявлены. Галенит в тяжелом концентрате представлен свободными частицами, а также включениями в пирите. В свою очередь, с галенитом связана висмутовая минерализация. Часто галенит замещен гипергенными минералами свинца (англезитом и церусситом) и сохраняется в них только как реликт. В химическом составе галенита отмечена примесь серебра до 0.9 мас. %.

Редко в рудах присутствуют халькопирит, тетраэдрит, сфалерит. Халькопирит наблюдается в сростаниях с пиритом, а также в виде свободных частиц в тонких классах тяжелого концентрата. Тетраэдрит в концентрате представлен свободными частицами, сростками с пиритом, сфалеритом. Тетраэдрит безжелезистый, цинкистый, содержит примеси серебра (до 0.73 мас. %) и висмута (до 4.24 мас. %) (табл. 2). Соотношение Sb:As близко к 3.

Таблица 2. Химический состав тетраэдрита-(Zn), мас. %

Table 2. Chemical composition of tetrahedrite-(Zn), wt %

Проба/анализ	S	Cu	Zn	As	Ag	Sb	Bi	Сумма
ВК3/21634с'	25.74	38.04	6.59	4.65	0.48	20.74	3.71	99.95
ВК3/21634а'	25.25	38.4	6.91	4.52	0.73	21.3	2.66	99.77
ВК3/21634v	25.37	39.63	6.71	4.33	–	20.29	4.24	100.57

Примечание. Кристаллохимические формулы ($S = 13$): 21634с' – $\text{Cu}_{9.69}(\text{Zn}_{1.63}\text{Bi}_{0.29}\text{Ag}_{0.07})_{1.99}(\text{Sb}_{2.76}\text{As}_{1.00})_{3.76}\text{S}_{13}$; 21634а' – $\text{Cu}_{9.97}(\text{Zn}_{1.74}\text{Bi}_{0.21}\text{Ag}_{0.11})_{2.07}(\text{Sb}_{2.89}\text{As}_{1.00})_{3.89}\text{S}_{13}$; 21634v – $\text{Cu}_{10.25}(\text{Zn}_{1.69}\text{Bi}_{0.33})_{2.02}(\text{Sb}_{2.74}\text{As}_{0.95})_{3.69}\text{S}_{13}$. Прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. Crystal chemical formulas ($S = 13$): 21634с' – $\text{Cu}_{9.69}(\text{Zn}_{1.63}\text{Bi}_{0.29}\text{Ag}_{0.07})_{1.99}(\text{Sb}_{2.76}\text{As}_{1.00})_{3.76}\text{S}_{13}$; 21634а' – $\text{Cu}_{9.97}(\text{Zn}_{1.74}\text{Bi}_{0.21}\text{Ag}_{0.11})_{2.07}(\text{Sb}_{2.89}\text{As}_{1.00})_{3.89}\text{S}_{13}$; 21634v – $\text{Cu}_{10.25}(\text{Zn}_{1.69}\text{Bi}_{0.33})_{2.02}(\text{Sb}_{2.74}\text{As}_{0.95})_{3.69}\text{S}_{13}$. Dash – below detection limit.

Таблица 3. Химический состав минералов висмута, мас. %

Table 3. Chemical composition of Bi minerals, wt %

Проба/анализ	S	Ag	Cu	Sb	Pb	Te	Bi	Сумма	Формула	Минерал
ВК3/21634b	15.66	—	10.56	0.54	41.21	—	31.91	99.88	$Pb_{1.22}Cu_{1.02}Bi_{0.94}Sb_{0.03}S_3$	Айкинит
ВК3/21634u	15.4	—	11.31	—	40.36	—	33.75	100.82	$Pb_{1.22}Cu_{1.11}Bi_{1.01}S_3$	Айкинит
ВК3/21634i	15.66	30.29	—	—	—	—	53.61	99.56	$Ag_{1.15}Bi_{1.05}S_2$	Матильдит
ВК3/21634k	4.59	—	—	—	—	36.39	59.05	100.03	Bi_2Te_2S	Тетрадимит

Состав, согласно современной классификации, отвечает тетраэдриту-(Zn) (Biagioni et al., 2020).

Сульфосоли и сульфотеллуриды висмута в рудах встречаются крайне редко и обычно ассоциируют с галенитом. Айкинит и матильдит сохраняются только как реликты в агрегатах гипергенных минералов свинца. В тяжелом концентрате диагностированы единичные зерна тетрадимита, представленного тонкими ламеллярными включениями в галените. Диагностика минералов Bi подтверждена EDS-анализом, эмпирические кристаллохимические формулы близки к стехиометрическим (табл. 3).

Золото в изученных пробах представлено первичными и явно гипергенными формами. К перво-

му типу относятся включения в пирите, в том числе окисленном, а также, возможно, свободные частицы в тяжелом концентрате. Включения в пирите достигают размера 30 мкм. С золотом во включениях ассоциируют галенит и петцит (рис. 4). Размер свободных частиц достигает 100 мкм.

Гипергенное золото присутствует в сложных смесях с лимонитом, англезитом, церусситом, ютенбогаардитом (?) (рис. 5, 6). Для него характерна сложная форма выделений, шагреневая поверхность, пористая структура, характеризующая эти выделения как “горчичное” золото.

Основная примесь в самородном золоте – серебро, содержания которого колеблются от 2.88 до 14.23 мас. % (табл. 4) вне отчетливой зависимо-

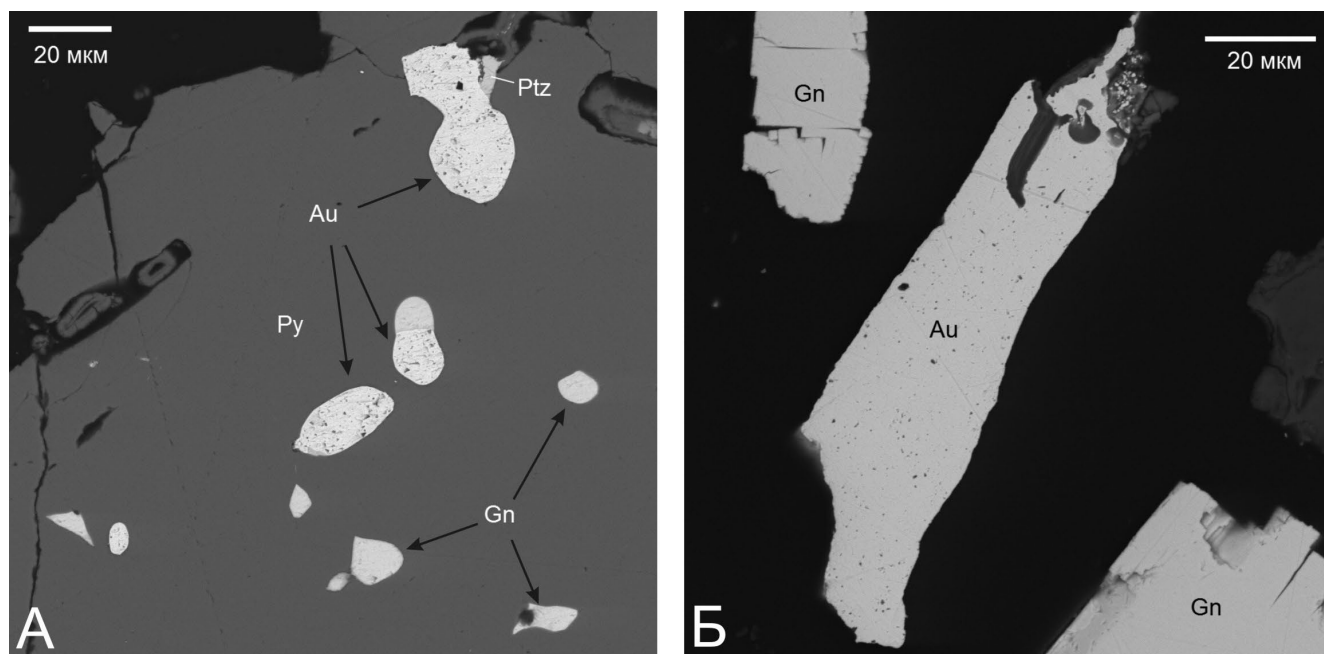


Рис. 4. Первичное золото. Изображение BSE.

а – включения в пирите, б – свободная частица в концентрате. Py – пирит, Ptz – петцит, Gn – галенит.

Fig. 4. Primary gold. BSE image.

а – inclusions in pyrite, б – free particle in concentrate. Py – pyrite, Ptz – petzite, Gn – galena.

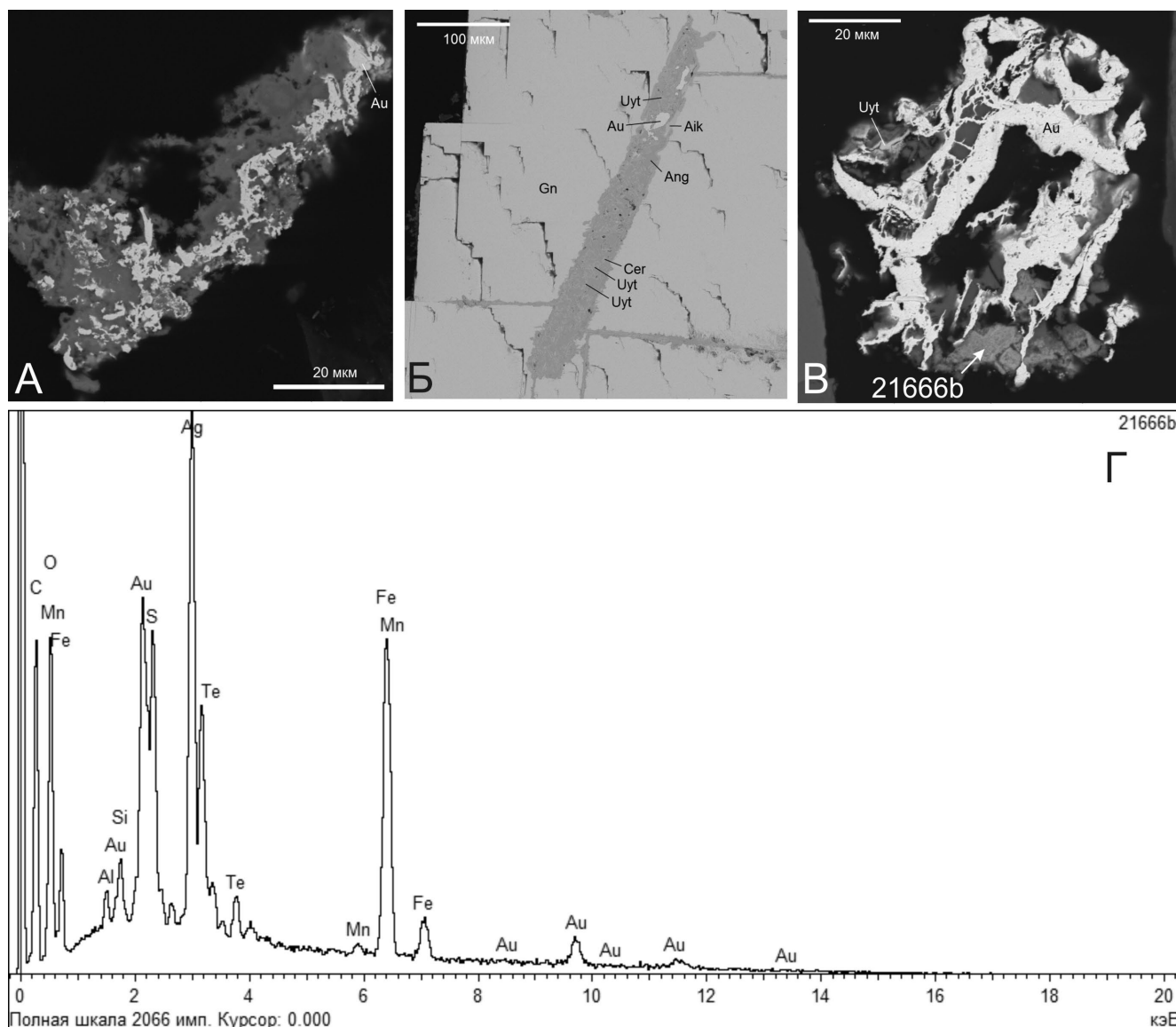


Рис. 5. Вторичное золото.

а – дендритовидный агрегат в лимоните, б – сложный агрегат вторичных минералов в галените, в – золото в сростании с кислородными соединениями, состав которых (точка 21666b) характеризует ЭДС-спектр (г). *Py* – пирит, *Gn* – галенит, *Uyt* – ютенбогаардит, *Cer* – церуссит, *Ang* – англезит, *Aik* – айкинит.

Fig. 5. Secondary gold.

а – dendrite-like aggregate in limonite, б – complex formation of secondary minerals in galena, в – gold intergrown with oxygen compounds, the composition of which (point 21666b) characterizes the EDS spectrum (г). *Py* – pyrite, *Gn* – galena, *Uyt* – uytenbogaardite, *Cer* – cerussite, *Ang* – anglesite, *Aik* – aikinite.

сти от минеральной ассоциации. Состав первичного золота из включений в пирите отвечает формуле $\text{Au}_{0.87}\text{Ag}_{0.13}$. Золото свободных частиц из концентрата более низкопробное ($\text{Au}_{0.77}\text{Ag}_{0.23}$). Состав золота из гипергенных ассоциаций значительно варьируется.

Петцит Ag_3AuTe_2 встречен в виде единичных включений в пирите (см. рис. 4). Образует сроста-

ния с золотом, размер выделений около 10 мкм. Химический состав удовлетворительно рассчитывается на формулу петцита (табл. 5). Также в составе руд диагностированы сylvанит и гессит (Михайлов и др., 2021). Сульфид золота и серебра выявлен при электронномикроскопическом изучении тяжелого концентрата руд. Для него типична устойчивая ассоциация с продуктами гиперген-

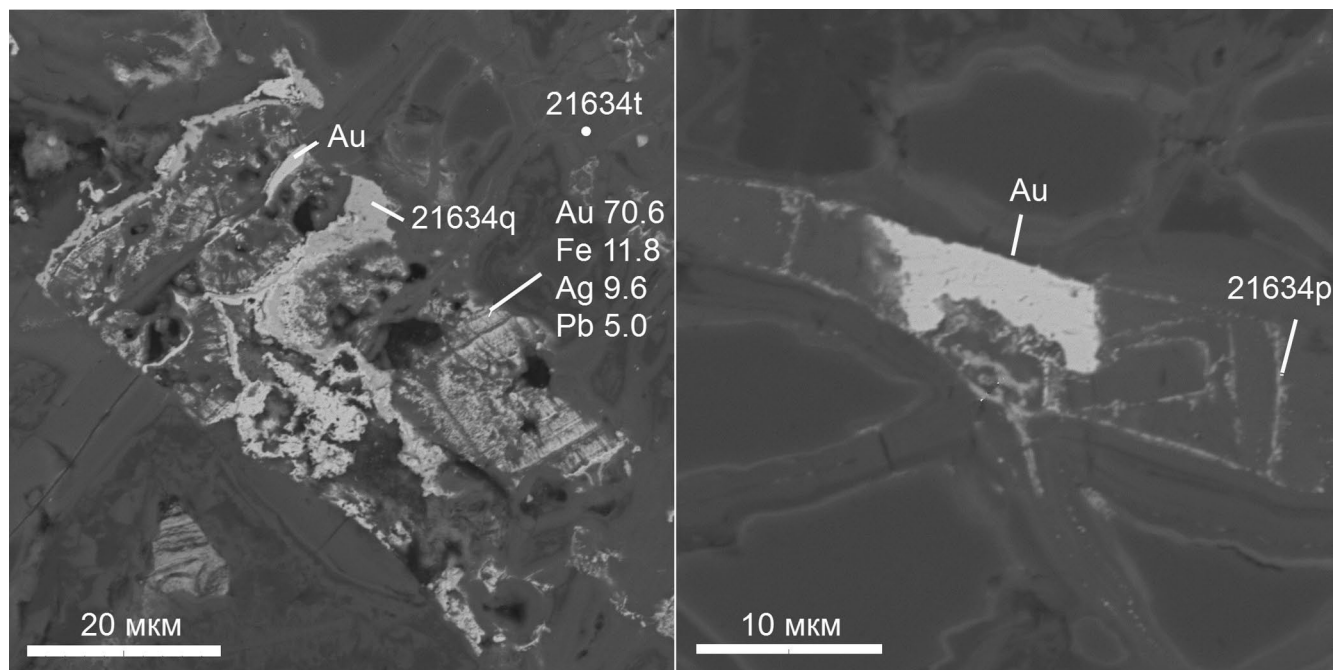


Рис. 6. Тонкие золотосодержащие минеральные смеси в лимоните.

Изображения BSE, анализы в точках 21634q, 21634p, 21634t в табл. 4, 5.

Fig. 6. Fine gold-bearing mineral mixtures in limonite.

BSE images, analyzes at points 21634q, 21634p, 21634t are in the Tables 4, 5.

ного изменения сульфидов. Размер выделений не превышает первых мкм. В составе присутствуют Au, Ag, S, иногда примеси Cu, Pb, Bi, Te (см. табл. 5, рис. 7). На основании этих данных и сопоставления с опубликованными анализами сульфид золота можно условно диагностировать как ютенбогаардит Ag_3AuS_2 .

Гипергенные кислородные соединения, выявленные в рудах, включают в себя лимонит, церуссит, англезит, пироморфит, брошантит, висмутовые охры. Лимонит образует как псевдоморфозы по пириту, так и землистые агрегаты. Химический состав таких землистых масс сохраняет геохимические черты исходных рудных минералов. В со-

Таблица 4. Химический состав золота, мас. %

Table 4. Chemical composition of native gold, wt %

Проба/анализ	Ag	Au	Сумма	Формула	Характеристика
ВК3/21634z	2.88	96.88	99.76	$\text{Au}_{0.95}\text{Ag}_{0.05}$	Свободная частица(?) на поверхности пироморфита
ВК3/21634x	14.02	85.64	99.66	$\text{Au}_{0.77}\text{Ag}_{0.23}$	Свободная частица в концентрате
ВК3/21634w	3.92	95.66	99.58	$\text{Au}_{0.93}\text{Ag}_{0.07}$	Гипергенное в лимоните
ВК3/21634r	7.88	91.93	99.81	$\text{Au}_{0.86}\text{Ag}_{0.14}$	То же
ВК3/21634n	14.01	86	100.01	$\text{Au}_{0.77}\text{Ag}_{0.23}$	В лимоните реликтовое(?)
ВК3/21634l	5.93	93.84	99.77	$\text{Au}_{0.90}\text{Ag}_{0.10}$	То же
ВК3/21634a	13.84	85.52	99.36	$\text{Au}_{0.77}\text{Ag}_{0.23}$	В галените среди вторичных минералов
208/21666e	7.54	92.39	99.93	$\text{Au}_{0.87}\text{Ag}_{0.13}$	Включения в пирите
208/21666a	14.23	85.55	99.78	$\text{Au}_{0.77}\text{Ag}_{0.23}$	Гипергенное с ютенбогаардитом

Таблица 5. Химический состав теллурида (1) и сульфидов (2–8) Au-Ag, мас. %**Table 5.** Chemical composition of telluride (1) and sulphides (2–8) of gold, wt %

№ п.п.	Проба/анализ	S	Cu	Ag	Au	Pb	Bi	Te	Сумма	Формула
1	208/21666f	–	–	40.79	26.28	–	–	32.77	99.84	$\text{Ag}_{2.91}\text{Au}_{1.04}\text{Te}_2$
2	208/21666k	13.98	0.49	54.41	30.72	–	–	–	99.60	$\text{Ag}_{2.31}\text{Au}_{0.72}\text{Cu}_{0.04}\text{S}_2$
3	208/21666d	13.02	–	55.11	31.98	–	–	–	100.11	$\text{Ag}_{2.52}\text{Au}_{0.80}\text{S}_2$
4	ВК3/21634m	12.85	–	37.67	48.98	–	–	–	99.5	$\text{Ag}_{1.74}\text{Au}_{1.24}\text{S}_2$
5	ВК3/21634e	13.21	0.66	49.79	26.72	6.05	3.61	–	100.04	*
6	ВК3/21634f	13.95	0.51	49.91	26.91	1.83	5.7	–	98.81	*
7	ВК3/21634j	15.61	0.65	47.65	33.99	1.76	–	–	99.66	*
8	ВК3/ 21634q	11.85	–	34.5	52.38	–	–	1.05	99.78	*

Примечание. Прочерк – ниже предела обнаружения. *Анализы 5–8 не пересчитываются на кристаллохимические формулы определенных минеральных видов.

Note. Bash – below detection limit. *Analyses 5–8 are not converted to crystal chemical formulas of certain mineral species.

ставе лимонита обычно присутствует примесь Pb, а также иногда Bi, Ag, Te (табл. 6).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

В изученных образцах кварца установлены первичные, первично-вторичные и вторичные ФВ, из которых детально изучены первые два типа. По фазовому составу различаются двухфазные (газовый пузырек + солевой раствор) и трехфазные (газовый пузырек + жидкая углекислота + солевой раствор) ФВ. В образцах кварца с “рудного склада” (208 и ВК3) встречены двухфазные ФВ, состоящие из жидкой углекислоты и газового пузырька, лишённые водно-солевого раствора (углекислотные).

Для первичных и первично-вторичных ФВ, как в “рудном” кварце, так и в кварце прожилков из вмещающей толщи (ВК1b) характерны обособленное положение и вытянутая форма, иногда с элементами “отрицательной” кристаллографической огранки. Вторичные ФВ трассируют залеченные трещины. Размер ФВ по максимальному измерению колеблется от 5 до 20 мкм, чаще всего 5–10 мкм. Доля газового пузырька составляет 5–40 об. %, в редких случаях – 60–80 об. %.

Гомогенизация двухфазных и трехфазных ФВ происходила преимущественно в жидкую фазу. Единичное трехфазное включение с преобладанием газового пузырька гомогенизировалось в газовую фазу. В части трехфазных включений наблюдалась частичная гомогенизация.

Средние арифметические и медианные значения температуры гомогенизации T_g первичных и первично-вторичных включений из “рудного” квар-

ца (208 и ВК3) и кварца из жил зоны расщелачивания в гранитоидах (ВК2a) весьма близки и составляют около 242–247°C. Разброс измеренных значений для “рудного” кварца несколько шире. Возможно, это связано с разным количеством измерений. Средняя и медианная T_g кварца из сланцев (ВК1b) немного ниже (222 и 215°C соответственно) при значительном разбросе значений (табл. 7, рис. 8).

По температурам частичной гомогенизации (гомогенизация углекислоты) трехфазных включений в интервале 23–27°C с преобладанием значений 26–27°C и удельному объёму углекислоты (1.38–1.40 м³/кг) в трехфазных углекислотных включениях значение исходного давления оценивается в ≈1–1.1 кбар (Brown, Lamb, 1989). С учетом “поправки на давление” (80–100°C) средние истинные температуры образования “рудного” кварца составляют 320–340 °C.

Углекислотные включения зафиксированы только в “рудном” кварце, они гомогенизировались в газовую фазу при температуре 25°C, в соответствии с этим плотность углекислоты составляла ≈1.4, что согласуется с данными, полученными при оценке плотности углекислоты в трехфазных включениях.

Состав водно-солевого раствора в образцах “рудного кварца” (образцы 208, ВК3), согласно замеренным температурам эвтектики в диапазоне –23.1...–27.7°C, соответствует системе NaCl–KCl–H₂O. Наиболее низкая температура эвтектики (до –38.3°C) установлена для первично-вторичных ФВ из жильного кварца сланцев уреньгинской свиты (ВК1b). Пониженная температура может быть обусловлена присутствием в системе MgCl (Борисенко и др., 1977; Мельников и др., 2008).

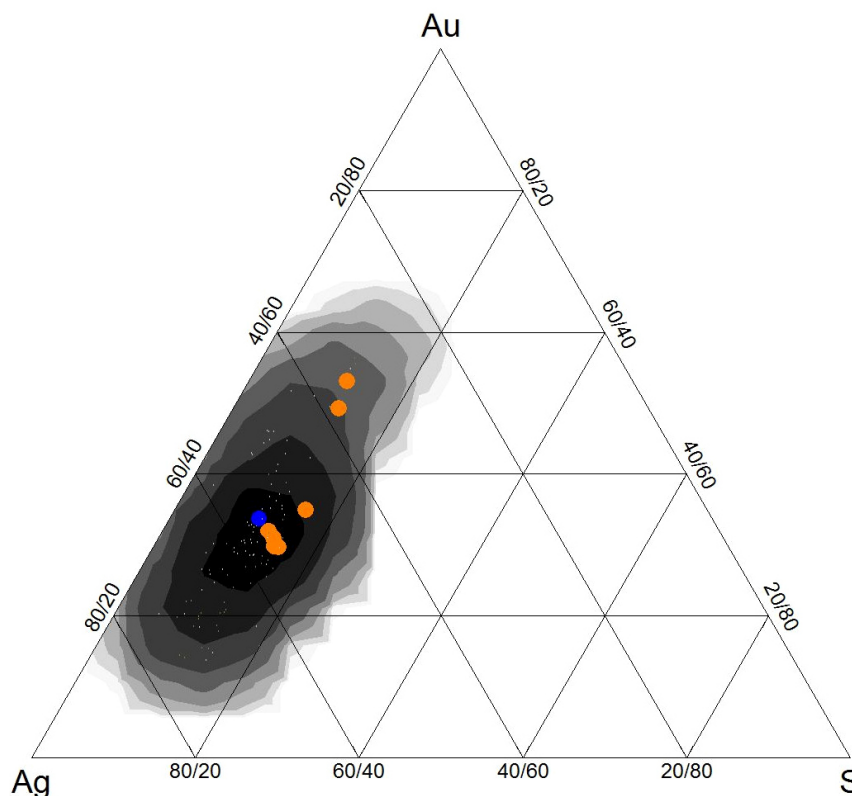


Рис. 7. Состав сульфидов Au–Ag, мас. %, Бакайского проявления (оранжевые символы) в сопоставлении со стехиометрическим составом ютенбогардита (синий).

Ореолы – компиляция данных 130 анализов ютенбогардита из разных месторождений (Barton et al., 1978; Castor, Sjöberg, 1993; Greffié et al., 2002; Warmada et al., 2003; Калинин и др., 2006; Савва, Пальянова, 2007; Анисимова и др., 2008; Пальянова и др., 2016). Густота заливки соответствует частоте встречаемости составов.

Fig. 7. Composition of Au–Ag sulphides, wt %, from the Bakayskoe occurrence (orange symbols) compared with the stoichiometric composition of uytenbogaardite (blue).

Halos – a compilation of data from 130 analyzes of uytenbogaardite from various deposits (Barton et al., 1978; Castor, Sjöberg, 1993; Greffié et al., 2002; Warmada et al., 2003; Kalinin et al., 2006; Savva, Pal'anova, 2007; Anisimova et al., 2008; Pal'anova et al., 2016). The density of the fill shows the conditional frequency of occurrence of the compositions.

Концентрация солей в NaCl-эквиваленте, определенная по температуре плавления последнего кристаллика льда, варьируется от 1.4 до 13.0 мас. % во ФВ в кварце из кристаллических сланцев и состав-

ляет 0.2–5.6 мас. % в “рудном” кварце (см. табл. 6). Такие широкие вариации солёности могут свидетельствовать об изменениях ФВ вторичными процессами. В некоторых ФВ последние кристалли-

Таблица 6. Химический состав лимонита по данным EDS-анализа, мас. %

Table 6. EDS analyses of limonite, wt %

Проба/анализ	SiO ₂	FeO	CuO	Ag ₂ O	PbO	Bi ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	As ₂ O ₅	TeO ₂	Au ₂ O ₃	Сумма
208/21666n	9.01	49.5	0.7	1.11	9.99	4.34	–	–	–	–	–	74.65
208/21666l	6.77	54.42	–	9.42	6.65	1.13	0.62	3.59	0.31	–	–	82.91
208/21666m	3.06	16.54	–	–	–	54.98	–	–	–	0.77	–	85.13
208/21666i	4.43	36.04	–	–	8.95	29.21	–	–	–	–	–	78.63
ВК3/21634t	4.29	50.15	–	–	16.84	–	–	–	–	8.33	–	79.61
ВК3/21634p	2.63	42.07	–	8.46	14.26	–	–	7.3	–	6.75	17.58	99.05

Таблица 7. Результаты термо- и криометрических исследований первичных и первично-вторичных ФВ из кварца
Table 7. Results of thermo- and cryometric studies of primary and primary-secondary FI from quartz

№ обр.	$T_r, ^\circ\text{C}$, Min–max ср.	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$, Min–max	$T_{\text{пл льда}}, ^\circ\text{C}$, min–max	$T_{\text{пл газогидратов}}, ^\circ\text{C}$, min–max	Концентрация, мас.% экв.-NaCl, max–min
208, ВКЗ (кварц из “рудных” складов)	$\frac{111-363}{244}$	–21.9...–27.7	–6.8...–3.4	+0.9...+1.8	5.6...0.2
ВК2а (кварц из зоны рассланцевания в гранитоидах)	$\frac{176-323}{247}$	–21.8...–27	–5.2...–3.0	+7.5	6.8...<0.2
ВК1б (кварц из жил в сланцах)	$\frac{161-396}{222}$	–26.1...–38.3	–9...–0.8	Не обн.	12.9...1.4

ки плавилась при положительных температурах. Учитывая низкие концентрации растворов, значительное содержание газа в ФВ, это явление можно интерпретировать как присутствие газогидратов (Мельников и др., 2008). Температура плавления газогидратов варьируется от 0.9 до 1.8 °C в ФВ из рудного кварца и достигает 7.5 °C в ФВ кварца из зоны рассланцевания в гранитах. Сложный состав раствора, мелкие размеры включений и невозможность точно определить тип газогидрата препятствуют использованию этих температур для оценки солёности (Darling, 1991; Мельников и др., 2008). Тем не менее, если предположить, что состав ФВ соответствовал Na–Cl–H₂O–CO₂, то согласно уравнению, предложенному (Chen, 1972), солёность флюида в кварце из зоны рассланцевания составляет 4.9 мас.% NaCl. Значения, полученные по температуре плавления газогидратов из ФВ рудного кварца, мало реалистичны (до 14.5 мас. %), не согласуются с результатами оценки солёности по температуре таяния последнего кристаллика льда.

ОБСУЖДЕНИЕ

Геологическая позиция

Бакайское рудопроявление характеризуется отчетливой пространственной связью с гранитоидами Тургойского массива, которые представлены амфибол-биотитовыми разностями и принадлежат к известково-щелочной серии. Массив относится к тургойско-сыростанскому комплексу, датированному C₁₋₂, что соответствует границе поздне-субдукционной стадии и коллизии континент–континент (Puchkov, 2017). Помимо Бакайского рудопроявления, массив вмещает Тютевское и Крестовское рудопроявления золота (Кураев, 1941), которые имеют сходные геологические черты.

Пожалуй, наиболее примечательной чертой Тургойского массива является его позиция на границе Магнитогорской и Центрально-Уральской зон, он находится непосредственно в сутурной зоне ГУРа. Логично было бы предположить влияние

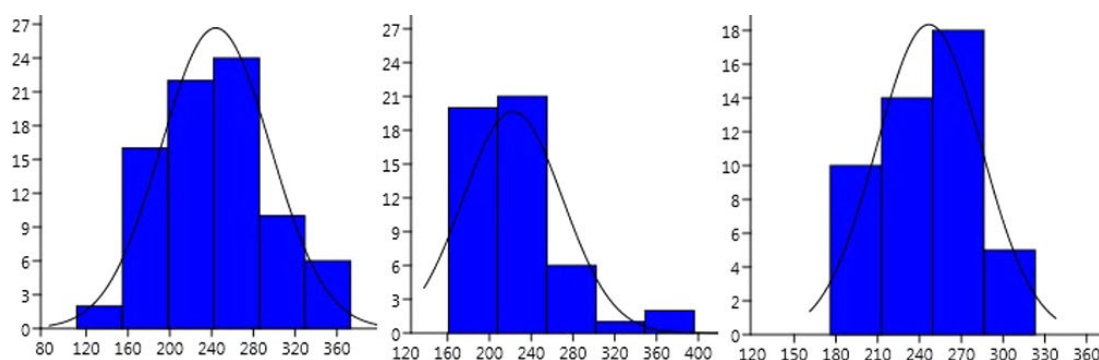


Рис. 8. Гистограммы температур гомогенизации включений в кварце из “рудных складов” (а), кварцевых жилах в кристаллических сланцах экзоконтакта массива (б) и кварце из кварц-полевошпатовых жил из зоны рассланцевания в гранитоидах (в).

Fig. 8. Histograms of homogenization temperatures of inclusions in “ore” quartz (a), quartz veins in shists (б) and quartz-feldspathic veins from the shear zone in granitoids (в).

столь масштабной структуры, как ГУР, на геологию массива. Собственно Тургорский массив не несет черт пластических деформаций на существующем уровне эрозионного среза, но для расположенного западнее Сыростанского массива они отмечены для ранних фаз внедрения (Иванов, Пучков, 2022). Возраст пластических деформаций определен на основании Ag-Ag датирования биотита как поздне-карбонный. Таким образом, становление массивов тургорско-сыростанского комплекса происходило в активную фазу деформаций. При этом орогенез на Южном Урале продолжался до триаса, и очевидно, что движения вдоль зоны ГУРа могли приводить к хрупким и хрупко-пластическим деформациям, которые служили проводниками флюида. Жильная зона Бакайского проявления является опирающей к ГУР и за пределы Тургорского массива не выходит. Хрупкий характер рудо-контролирующего разлома свидетельствует о том, что он возник после остывания массива, соответственно, рудообразующий флюид не связан непосредственно с магматической стадией формирования массива.

Минералогия руд

Первичная рудная минерализация Бакайского месторождения связана преимущественно с жилами и прожилками кварцевого и кварц-полевошпатового состава в рассланцованных гранитоидах. Изменения боковых пород незначительны, в общем за пределы зоны расланцевания не выходят.

Для руд характерно в целом низкое содержание сульфидов при относительном обогащении галенитом. Свинцовая специализация согласуется с повышенными содержаниями Pb в гранитоидах Тургорского массива. По данным Е.С. Шагалова (2002), концентрация Pb в гранодиоритах составляет в среднем 25 г/т, что в два раза превышает кларк.

В типичных разностях гранитоидов свыше 80% свинца связано с полевыми шпатами. Как было показано в (Тauson, 1961), изоморфизм калия и свинца в полевых шпатах ограничен, что приводит к обогащению свинцом и другими халькофильными металлами остаточной части расплава, а в дальнейшем – пневматолитовой фазы.

Наблюдаемые в рудах минеральные ассоциации позволяют уточнить условия минерализации в полях фугитивностей серы и теллура (рис. 9). С одной стороны, они определяются полями устойчивости галенита, пирита и халькопирита. С другой, в рудах присутствует как самородное золото, так и его теллуриды. Таким образом, для первичных руд можно предположить формирование вблизи линии равновесия золото–калаверит. Фугитивность теллура $\log f_{\text{Te}_2}$ при этом меняется от –8 для 300 °C до –12 для 200 °C; фугитивность серы $\log f_{\text{S}_2}$ – от –7 до –12 соответственно.

Изученные руды Бакайского рудопроявления в целом можно классифицировать как частично окисленные. Наряду с “первичными” рудными ассоциациями в них присутствуют явно гипергенные минералы.

Особенностью изученных проб является присутствие в них гипергенного (горчичного?) золота и ютенбогаардитита, который, вероятно, также является продуктом гипергенного преобразования руд. О гипергенной природе золота свидетельствует форма выделений, а также тесная связь с лимонитом и кислородными соединениями свинца. При этом следует учесть, что частично здесь могут сохраняться реликты первичного золота. В зоне окисления рудных месторождений золото может растворяться и перетлагаться в виде новообразованных форм (Смирнов, 1951; Cloke, Kelly, 1964; Петровская, 1973; Росляков, 1981; Krupp, Weiser, 1992; Butt, 1998; Калинин и др., 2006; Reith et al., 2012; Никифорова и др., 2020; и др.). Применительно к Уралу вопрос о гипергенной минералогии и геохимии золота разрабатывали в разные годы М.Н. Альбов (1952, 1960), В.М. Крейтер с соавторами (1958), В.В. Мурзин и А.А. Малюгин (1987), Н.Б. Сергеев с соавторами (1996). Вторичное золото очень чистое, тонкокристаллическое (до 5 мкм) и представлено бактериоморфными (Амосов, Васин, 1993; Куимова, Моисеенко, 2006), листоватыми или проволочными агрегатами, а также кристаллами (Reith et al., 2007). Наиболее типичной морфологической разновидностью гипергенного золота является так называемое “горчичное” золото. Под этим понимаются землистые, порошковатые агрегаты, которые чаще всего образуются при окислении теллуридов Au-Ag. При этом, как правило, фиксируется сложный химический состав и недостаток суммы, обусловленный пористостью и гетерогенностью материала (Petersen et al., 1999; Li, Makovicky, 2001; Tolstykh et al., 2019; Калинин et al., 2019). В нашем случае, EDS-анализы, полученные с частиц золота, интерпретированного как “горчичное”, отвечают высокопробному золоту. Состав лимонита, ассоциирующего с таким золотом, демонстрирует присутствие существенных количеств Bi, Te, Ag, Pb, Au. Нами не было зафиксировано непосредственно замещения теллуридов “горчичным” золотом, но, во-первых, теллуриды Au-Ag в первичных ассоциациях руд присутствуют (включения петцита в пирите, а также сильвинит и гессит (Михайлов и др., 2021)), а, во-вторых, в составе окружающего лимонита сохраняются следы теллура. Таким образом, можно предположить, что, по крайней мере, часть гипергенного золота сформирована при окислении теллуридов, а первичные руды были ими обогащены.

Ютенбогаардит Ag_3AuS_2 является относительно малораспространенным сульфидом, который диагностирован в низкотемпературных ассоциа-

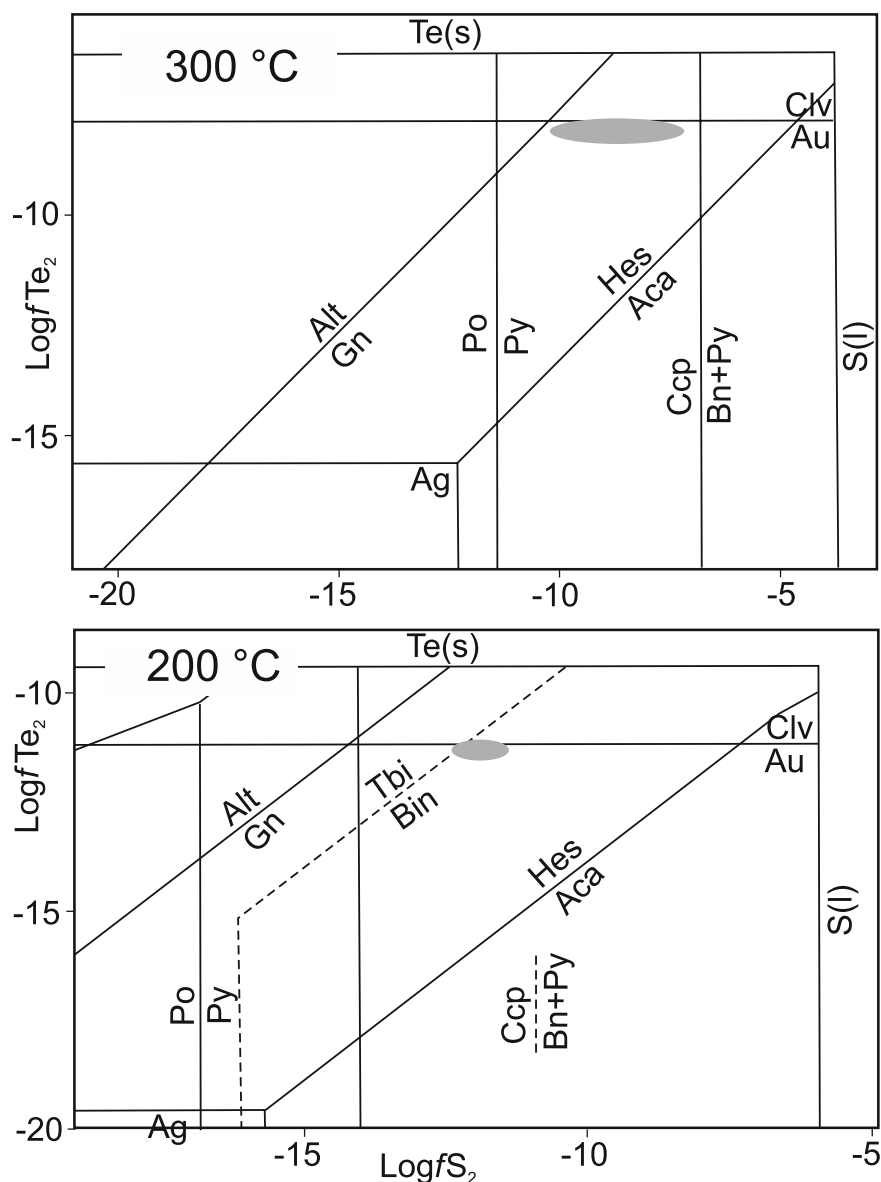


Рис. 9. Поля устойчивости минералов Бакайского рудопоявления (серая заливка) в координатах $\log fS_2$ – $\log fTe_2$ для температур 200 и 300 °C (диаграммы заимствованы из (Afifi et al., 1988)).

Alt – алтаит, *Gn* – галенит, *Po* – пирротин, *Py* – пирит, *Ccp* – халькопирит, *Bn* – борнит, *Hes* – гессит, *Aca* – акантит, *Clv* – калаверит, *Tbi* – теллуробисмутит, *Bin* – висмутин.

Fig. 9. Stability fields of minerals of the Bakayskoe ore occurrence (shaded area) in $\log fS_2$ – $\log fTe_2$ coordinates for temperatures of 200 and 300 °C (diagrams are borrowed from (Afifi et al., 1988)).

Alt – altaite, *Gn* – galena, *Po* – pyrrhotite, *Py* – pyrite, *Ccp* – chalcopyrite, *Bn* – bornite, *Hes* – hessite, *Aca* – acanthite, *Clv* – calaverite, *Tbi* – tellurobismuthite, *Bin* – bismuthine.

циях руд Au-Ag месторождений (Barton et al., 1978; Castor, Sjöberg, 1993; Greffié et al., 2002; Warmada et al., 2003; Анисимова и др., 2008; Савва, Пальянова, 2007; Пальянова, Савва, 2009; Пальянова и др., 2016; и др.). Возможность образования минерала в гипергенных условиях обоснована на базе мине-

ралогических наблюдений и термодинамических расчетов для Улаханского месторождения (Савва, Пальянова, 2007). Предполагается, что минерал является продуктом сульфидизации природных сплавов золота и серебра. Источником серы являются окисляющиеся сульфиды.

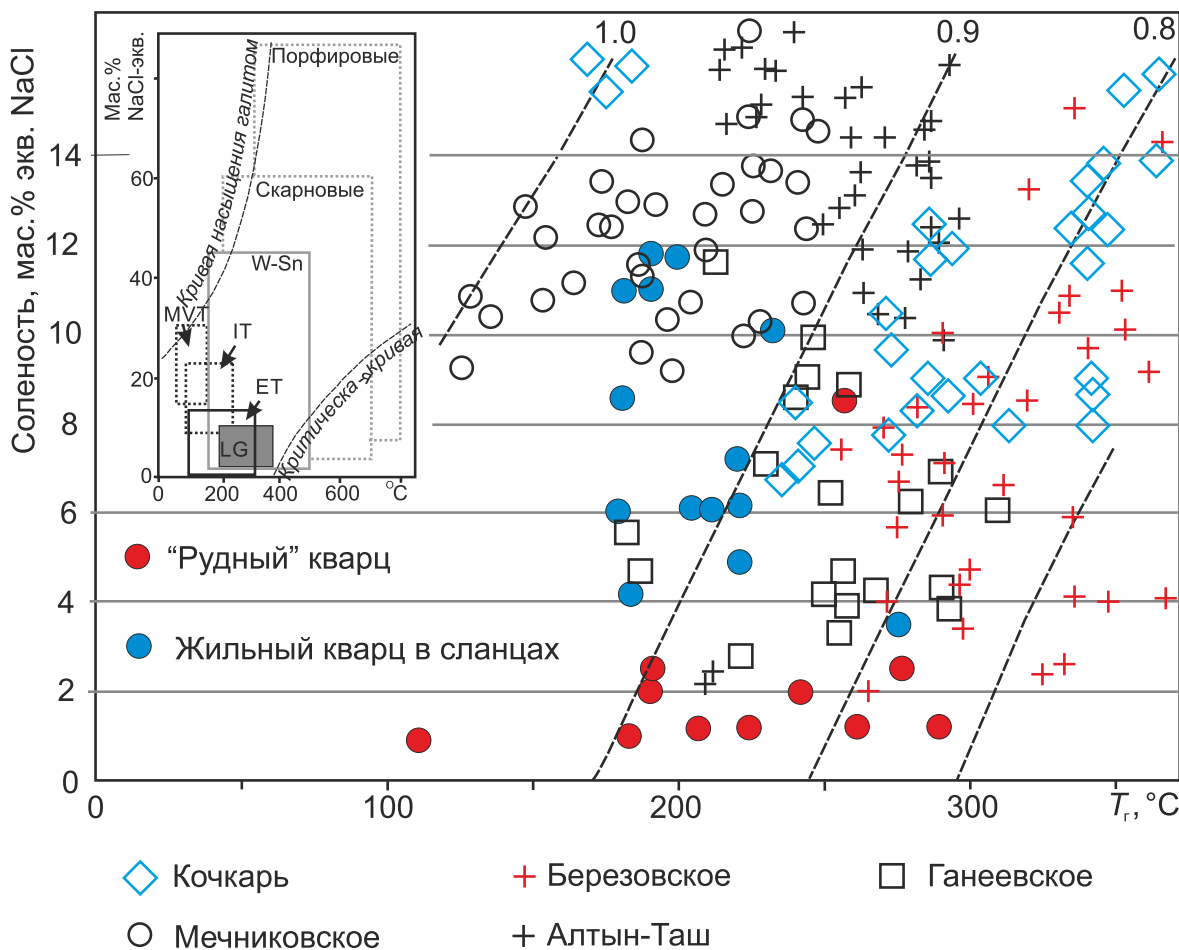


Рис. 10. Температуры гомогенизации и солёность флюида во ФВ в кварце Бакайского рудопоявления в сопоставлении с некоторыми другими золоторудными объектами района (Бортников, 2006; Мелекесцева, Юминов, 2015; Belogub et al., 2017; Заботина и др., 2018; Знаменский и др., 2020а, б).

Пунктирными линиями показана плотность флюида (Wilkinson, 2001). На врезке суммированы данные для гидротермальных месторождений в целом (Wilkinson, 2001): MVT – миссурийский тип Pb-Zn месторождений, IT – ирландский тип Pb-Zn месторождений, ET – эпитеермальные месторождения, LG – золото кварцевые месторождения.

Fig. 10. Homogenization temperatures and fluid salinity in the FI in the quartz of the Bakayskoe deposit in comparison with some other gold objects in the region (Bortnikov, 2006; Melekestseva, Yuminov, 2015; Belogub et al., 2017; Zabotina et al., 2018; Znamensky et al., 2020; Znamenskii et al., 2020a, b).

Dashed lines indicate fluid density (Wilkinson, 2001). The inset summarizes data for hydrothermal deposits in general (Wilkinson, 2001): MVT – Missouri type Pb-Zn deposits, IT – Irish type Pb-Zn deposits, ET – epithermal deposits, LG – gold-quartz deposits.

Физико-химические условия

Данные криотермобарометрии из-за мелкого размера включений следует считать только оценочными, однако можно констатировать, что рудные жилы и кварцевые жилы во вмещающих сланцах образовались в близких P - T условиях. При этом жилы во вмещающих метаморфических породах образовались из более минерализованных флюидов, вероятно, вследствие ассимиляции по-

ровых вод с более высокой минерализацией и, по-видимому, несколько отличным солевым составом. Рудоносные кварцевые жилы в гранитоидах образовались из углекислотных флюидов с высоким содержанием газовой составляющей, при этом в газовой фазе преобладает углекислый газ. Существование углекислотный состав газовой фазы подтверждается также температурами плавления газогидратов ($\leq +7.5$ °C) при давлении, оцененном как 1.1 кбар (Diamond, 2003).

Параметры, полученные для ФВ в кварце, скорее всего, соответствуют начальной стадии образования жил. Свободные частицы золота в тяжелом концентрате, судя по их форме, имеют интерстициальную природу и являются более поздним по отношению к жильной массе. Время формирования сульфидов неясно, однако вряд ли они образовались раньше кварца.

Полученные параметры образования кварца типичны в целом для жильных месторождений золота (рис. 10). Температура гомогенизации первичных и первично-вторичных ФВ из кварца из жильной зоны Бакайского рудопроявления сопоставима с некоторыми другими золоторудными объектами Южного Урала (Мелекесцева, Юминов, 2015; Belogub et al., 2017; Заботина и др., 2018; Знаменский и др., 2020а, б). Кварц золотистовенитовых месторождений из крупных тектонических швов (Ганевское, Алтын-Таш, Мечниковское) характеризуется более высокой концентрацией солей во ФВ (Мелекесцева, Юминов, 2015; Belogub et al., 2017; Заботина и др., 2018). Аналогичные показатели солености и температуры демонстрируют анализы для жильного кварца из кристаллических сланцев (проба ВК1б). Максимальные T_g и соленость ФВ из кварца Бакайского рудопроявления близки к таковым для ФВ кварца из рудных прожилков месторождений, определенно связанных с интрузивами Березовское, Кочкарь (Бортников и др., 2006), золото-порфирового месторождения Большой Каран (Знаменский и др., 2020б). Оцененное давление попадает в диапазон мезотермальных образований.

ВЫВОДЫ

Жильная минерализация Бакайского рудопроявления могла формироваться как продукт пневматолитовой стадии магматизма или являться орогенной – связанной с метаморфизмом пород. Поскольку в нашем случае магматизм и орогенез связаны, скорее всего, следует говорить о комплексном характере минерализации. Рудопроявление пространственно ассоциирует с гранитоидами. Минерализация контролируется тектонической зоной, которая, вероятно, является опережающей к структуре ГУРа. Нет свидетельств, что она затрагивает вмещающие массив породы. Хрупкий характер деформаций свидетельствует о том, что породы массива были уже консолидированы при образовании тектонической зоны.

Золоторудные месторождения, ассоциирующие с интрузивами, представлены широким спектром объектов с различной геохимической спецификой. Жильные месторождения связаны с сильноокисленными известково-щелочными и щелочными интрузивами, а также с относительно восстановленными известково-щелочными интрузивами I-типа (Sillitoe, Thompson, 1998). Считается, что различные жильные ассоциации отражают состав род-

ственных интрузий, которые сами по себе характеризуют различные тектонические обстановки (Sillitoe, Thompson, 1998). Au-Pb-Te($\pm$ Cu, Zn) специализация руд Бакайского рудопроявления характерна для сильноокисленных интрузивов, сформированных в задуговых обстановках (Sillitoe, Thompson, 1998). Примером таких объектов является месторождение Донгпинг (Хэбэй, КНР), которое приурочено к сиенит-монцитовому батолиту Шуйцунаньгоу (Zhang, Mao, 1995). Золотоносные жилы секут сиениты и прослежены по простираанию на несколько километров, по падению – на 600 м и имеют среднюю ширину 3 м (Zhang, Mao, 1995). Жилы состоят из кварца и калиевого полевого шпата и связаны с широким ореолом калишпатизации. Содержание рудных минералов не превышает 5 об. %, в основном это пирит, гематит, калаверит и других теллуриды, галенит, сфалерит и халькопирит (Zhang, Mao, 1995). Включения в жильном кварце характеризуются низкой соленостью (среднее значение 5.3 мас. % NaCl-экв.) и температурами гомогенизации ФВ в кварце продуктивной стадии, варьирующими в диапазоне 240–285°C. Состав руд и параметры флюида сходны с наблюдаемым для Бакайского рудопроявления. Отличительной чертой является более щелочной состав магм батолита Шуйцунаньгоу.

Как было показано выше, геохимический спектр гранитоидов Тургорского массива повлиял на свинцовую специфику руд Бакайского рудопроявления. Нужно отметить, что обогащение галенитом характерно и для руд Тютевского рудопроявления золота, которое также локализовано в гранитоидах Тургорского массива (Кураев, 1941). Учитывая то обстоятельство, что субстрат Тургорского массива является адиагностичным (Bea et al., 2002), трудно сказать, с чем связана свинцовая специализация массива. Отметим только, что в Миасском рудном районе известны колчеданно-полиметаллические объекты девонского возраста, например Мелентьевское месторождение (Зайков, 1988).

Таким образом, историю геологического развития рудопроявления можно схематически представить следующим образом. Формирование тургорско-сыростанского комплекса, к которому принадлежит Тургорский массив, происходило при смене режимов мягкой (дуга–континент) и жесткой (континент–континент) коллизии (Bea et al., 2002). На геохимию гранитоидов массива могли оказать влияние, помимо прочего, вулканогенно-осадочные породы девона, обогащенные цветными металлами. Рудоносный флюид связан в основном с пневматолитовой фазой остывающего массива, но также не исключено влияние метаморфогенного флюида, который генерировался при орогенезе. Рудолокализирующая структура является опережающей тектонической зоной, связанной с ГУРом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бакайское рудопоявление золота представляет собой жильную зону субширотного простиражения в южной части Тургорякского массива монцодиорит-гранитной формации ранне- и среднекаменноугольного возраста. Ее формирование происходило при хрупких или хрупко-пластических деформациях в зоне, опережающей к Главному Уральскому разлому, после консолидации массива. Основой руд является кварц-полевошпатовая жильная масса, содержание рудных минералов в которой не превышает 1 об. %. Преобладающими рудными минералами выступают пирит и галенит. Редко в рудах присутствуют халькопирит, тетраэдрит, сфалерит; крайне редко сульфосоли и сульфотеллуриды висмута, теллуриды Ag, Au. В пробах руд, отобранных с поверхности, установлено как первичное, так и гипергенное (горчичное) золото. К первому типу относятся включения в пирите, в частности, окисленном, а также, возможно, свободные частицы в тяжелом концентрате. Гипергенное золото присутствует в сложных смесях с лимонитом, англезитом, церусситом. С гипергенными продуктами изменения сульфидов ассоциирует также сульфид золота и серебра, условно диагностированный как ютенбогаардтит Ag_3AuS_2 .

Температурный диапазон формирования рудного кварца Бакайского проявления, по данным изучения ФВ, составляет примерно 180–285°C, в среднем 242–247°C, с поправкой на давление (≈ 1 –1.1 кбар) – 320–340°C, что сходно с температурой формирования золотоносных минеральных ассоциаций на многих других жильных месторождениях золота. При этом ФВ в жильном кварце Бакайского проявления характеризуются слабой минерализацией, существенно углекислотным составом и значительным содержанием газовой фазы по сравнению с золоторудными объектами золото кварцевой и золотолиственитовой формаций. Совокупно температура и солёность растворов, из которых образовались рудоносные жилы Бакайского месторождения, сопоставляются с наименее минерализованными флюидами, изученными на жильных золото кварцевых месторождениях.

Жильная минерализация Бакайского рудопоявления является продуктом пневматолитовой фазы кристаллизации Тургорякского массива. При этом рудоконтролирующая структура сформирована в результате тектонической активности в зоне Главного Уральского разлома. Отчетливая свинцовая специализация руд может быть использована при поисковых работах.

Благодарности

Авторы благодарны рецензентам за ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альбов М.Н. (1952) О формах миграции золота в зоне окисления рудных месторождений. *Изв. АН СССР (сер. геол.)*, (4), 41–53.
- Альбов М.Н. (1960) Вторичная зональность золоторудных месторождений Урала. М.: Госгеолтехиздат, 216 с.
- Амосов Р.А., Васин С.Л. (1993) Микрофоссилии золота. *Руды и металлы*, (3–6). 101–107
- Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А., Лескова Н.В. (2008) Сульфидные соединения золота и серебра в золоторудных месторождениях Восточной Сибири. *Отчет. геол.*, (5), 24–32.
- Аулов Б.Н., Владимирцева Ю.А., Гвоздик Н.И., Королькова З.Г., Левин Ф.Д., Липаева А.В., Поташова М.Н., Самозванцев В.А. (2015) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 200 000. Изд-е второе. Сер. Южно-Уральская. Л. N-40-XII (Златоуст). Объяснит. записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 365 с.
- Борисенко А.С. (1977) Изучение солевого состава растворов газово-жидких включений в минералах методом криометрии. *Геология и геофизика*, (8), 16–28.
- Бортников Н.С. (2006) Геохимия и происхождение рудообразующих флюидов в гидротермально-магматических системах в тектонически активных зонах. *Геол. руд. месторожд.*, **48**(1), 3–28.
- Вукалович М.П., Алтунин В.В. (1965) Теплофизические свойства двуокиси углерода. М.: Атомиздат, 455 с.
- Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. (1979) Термобарогеохимия. М.: Недра, 272 с.
- Заботина М.В., Анкушева Н.Н., Шанина С.Н., Котляров В.А. (2018) Условия образования Ганеевского золоторудного месторождения, Учалинский рудный район: минералогическая термометрия и изучение флюидных включений. *Минералогия*, (4), 55–67.
- Зайков В.В. (1988) Мелентьевское полиметаллическое месторождение Миасского района. *Материалы к минералогии рудных районов Урала*. (Ред. Б.В. Чесноков, Е.П. Макагонов). С. 74–79.
- Знаменский С.Е., Анкушева Н.Н., Артемьев Д.А. (2020а) Вознесенское Си-порфировое месторождение (Южный Урал): условия образования, элементы-примеси, изотопы серы и источники флюидов. *Георесурсы*, **22**(3), 48–54. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.48-54>
- Знаменский С.Е., Анкушева Н.Н., Артемьев Д.А. (2020б) Условия образования, состав и источники рудообразующих флюидов золотопорфирового месторождения Большой Каран (Южный Урал). *Литосфера*, **20**(3), 397–410. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-3-397-410>
- Знаменский С.Е., Пучков В.Н., Мичурин С.В. (2015) Источники рудообразующих флюидов и условия формирования орогенных месторождений золота зоны Главного Уральского разлома на Южном Урале. *Докл. АН*, **464**(3), 313–316. <https://doi.org/10.7868/S0869565215270237>
- Иванов К.С., Пучков В.Н. (2022) Структурно-формационные зоны Уральского складчатого пояса: обзор данных и развитие новых идей. *Геотектоника*, (6), 78–113. <https://doi.org/10.31857/S0016853X22060030>
- Калинин Ю.А., Прудников С.Г., Росляков Н.А. (2006) Золотоносные коры выветривания юга Сибири. Новосибирск: Академическое издание Гео, 339 с.

- Козлов В.И. и др. (2001) Геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:1 000 000 (нов. сер.). Лист N-40 (41) – Уфа. Объяснит. записка. 568 с.
- Крейтер В.М., Аристов В.В., Волинский И.С., Крестовников А.Н., Кувичинский В.В. (1958) Поведение золота в зоне окисления золото-сульфидных месторождений. М.: Госгеолтехиздат, 268 с.
- Куимова Н.Г., Моисеенко В.Г. (2006) Биогенная минерализация золота в природе и эксперименте. *Литосфера*, (3), 83-95.
- Кураев Н. (1941) Месторождения золота и других полезных ископаемых за оз. Турояк. 24 с.
- Мелекесцева И.Ю., Юминов А.М. (2015) Условия формирования золото-кварцевых жил Мечниковского и Алтын-Ташского месторождений, Южный Урал: результаты термобарогеохимических и изотопных исследований. *Минералогия*, (2), 58-67.
- Мельников Ф.П., Прокофьев В.Ю., Шатагин Н.Н. (2008) Термобарогеохимия. М.: Академ. проект, 222 с.
- Михайлов В.В., Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С., Чебыкин Н.С. (2021) Золото-серебряное оруденение в гранодиоритах Туроякского массива, Южный Урал. *Металлогения древних и современных океанов – 2021*. (Ред. В.В. Масленников, И.Ю. Мелекесцева). Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 93-97.
- Мурзин В.В., Малюгин А.А. (1987) Типоморфизм золота зоны гипергенеза (на примере Урала). Свердловск: Урал. НЦ АН СССР, 96 с.
- Никифорова З.С., Калинин Ю.А., Макаров В.А. (2020) Эволюция самородного золота в экзогенных условиях. *Геология и геофизика*, **61**(11), 1514-1534.
- Пальянова Г.А., Савва Н.Е. (2009) Особенности генезиса сульфидов золота и серебра месторождения Юное (Магаданская область, Россия). *Геология и геофизика*, **50**(7), 759-777.
- Пальянова Г.А., Савва Н.Е., Журавкова Т.В., Колова Е.Е. (2016) Минералы золота и серебра в пиритах мало-сульфидных руд месторождения Джульетта (северо-восток России). *Геология и геофизика*, **57**(8), 1488-1510. <https://doi.org/10.15372/GiG20160805>
- Петров В.И., Шалагинов А.Э., Пунегов Б.Н., Горлова Л.Г., Забелина Т.Б., Григорова В.Ю., Никольский Т.И., Шалагинова Т.И., Петрова А.С., Середа В.В. (2015) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1 : 200 000. Изд-е второе. Сер. Южно-Уральская. Лист N-41-VII. Объяснит. записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 167 с.
- Петровская Н.В. (1973) Самородное золото. М.: Наука, 348 с.
- Попова В.И. (2002) Месторождения золота Миасской долины. *Металлогения древних и современных океанов – 2002*. (Ред. В.В. Зайков, Е.В. Белогуб). Миасс: ИМин УрО РАН, 98-106.
- Росляков Н.А. (1981) Геохимия золота в зоне гипергенеза. М.: Наука, 240 с.
- Савва Н.Е., Пальянова Г.А. (2007) Генезис сульфидов золота и серебра на месторождении Улахан. *Геология и геофизика*, **48**(10), 1028-1042.
- Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А. (2001) Месторождения золота Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 622 с.
- Сергеев Н.Б., Бугельский Ю.Ю., Кузнецова О.Ю. (1996) Распределение золота в зоне окисления колчеданных месторождений Урала: влияние состава первичных руд и климата. *Геол. руд. месторожд.*, **38**(4), 321-333.
- Смирнов С.С. (1951) Зона окисления сульфидных месторождений. Л.: Изд-во АН СССР, 335 с.
- Сначев А.В., Сначев В.И., Романовская М.А. (2020) Геология, условия образования и рудоносность Туроякского гранитного массива и углеродистых отложений его западного обрамления (Южный Урал). *Вестн. МГУ. Сер. 4. Геол.*, (1), 12-20.
- Тайсон Л.В. (1961) Геохимия редких элементов в гранитоидах. М.: Изд-во АН СССР, 232 с.
- Ферштатер Г.Б. (2013) Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 368 с.
- Шагалов Е.С. (2002) Петрология и геохимия пород Сыростанско-Туроякской группы гранитоидных массивов (Южный Урал). Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 188 с.
- Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. (1988) Phase relations among tellurides, sulfides and oxides: I Thermochemical data and calculated equilibria. *Econ. Geol.*, **83**, 377-394.
- Barton M.D., Kieft C., Burke E.A.J., Oen I.S. (1978) Uyttenbogaardtite, a new silver-gold sulfide. *Canad. Miner.*, **16**(4), 651-657.
- Bea F., Fershtater G.B., Montero P. (2002) Granitoids of the Uralides: Implications for the Evolution of the Orogen. *Mountain Building in the Uralides: Pangea to the Present. Geophysical Monograph*, **132**, 211-232.
- Belogub E., Melekstseva I., Novoselov K., Zabolina M., Tretyakov G., Zaykov V., Yuminov A. (2017) Listvenite-related gold deposits of the South Urals (Russia): a review. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 247-270. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.008>
- Biagioni C., George L.L., Cook N.J., Makovicky E., Moeilo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C.J., Welch M.D., Bosi F. (2020) The tetrahedrite group: Nomenclature and classification. *Amer. Miner.*, **105**(1), 109-122. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7128>
- Bodnar R.J., Vityk M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Pontignana-Siena, 117-130.
- Brown P.E., Lamb W.M. (1989) PVT properties of fluids in the system H₂O ± CO₂ ± NaCl: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **53**(6), 1209-1221.
- Butt C.R.M. (1998) Supergene gold deposits. *AGSO J. Austral. Geol. Geophys.*, **17**(4), 89-96.
- Castor S.B., Sjöberg J.J. (1993) Uyttenbogaardtite, Ag₃AuS₂, in the Bullfrog mining district, Nevada. *Canad. Miner.*, **31**, 89-98.
- Chen H.-S. (1972) The properties of carbon dioxide Hydrate. *Office of saline water, research and development progress report*, **830**, 1-55.
- Ciobanu C., Cook N., Damian G., Damian F. (2006) A review of recent data on occurrences of Bi-sulphosalts and -tellurides in Romania and genetic implications for gold deposition. *Au-Ag-Te-Se deposits. Proceedings of the 2006 Field Workshop*. (Eds N. Cook, I. Ozgenc, T. Oyma). P. 30-41
- Cloke P., Kelly W. (1964) Solubility of gold under inorganic supergene conditions. *Econ. Geol.*, **59**(2), 259-270.
- Cook N., Ciobanu C. (2004) Bismuth tellurides and sul-

- phosalts from the Larga hydrothermal system, Metaliferi Mts., Romania: Paragenesis and genetic significance. *Miner. Mag.*, **68**(2), 301-321. <https://doi.org/10.1180/0026461046820188>
- Darling R. (1991) An extended equation to calculate Na-Cl content from final clathrate melting temperatures in H₂O-CO₂-NaCl fluid inclusions: implication for P-T isochore location. *Geochem. Cosmochem. Acta*, **55**, 3869-3871.
- Darling L. (2003) Introduction to gas-bearing, aqueous fluid inclusions. In: Fluid inclusions: analysis and interpretation. (Eds A. Anderson, D. Marshall). Mineralogical association of Canada short course serie, 32.
- Diamond L. (2003) Introduction to gas-bearing, aqueous fluid inclusions. *Fluid inclusions: analysis and interpretation*. (Eds I. Samson, A. Anderson, D. Marshall). (Mineralogical association of Canada short course serie, **32**, 101-158).
- Goldfarb R.J., Baker T., Dube B., Groves D.I., Hart C., Gosselin P. (2005) Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes / Economic Geology 100th Anniversary Volume. (Eds J. Hedenquist, J. Thompson, R. Goldfarb, J. Richards). P. 407-450.
- Greffé C., Bailly L., Milési J.-P. (2002) Supergene alteration of primary ore assemblages from low-sulfidation Au-Ag epithermal deposits at Pongkor, Indonesia, and Nazareño, Perú. *Econ. Geol.*, **97**(3), 561-571.
- Groves D., Goldfarb R., F. Robert, Hart C. (2003) Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Econ. Geol.*, **98**, 1-29
- Hart C. (2005) Classifying, distinguishing and exploring for intrusion-related gold systems. *Gangue*, **87**, 3-9.
- Herrington R., Zaykov V., Maslennikov V., Brown D., Puchkov V. (2005) Mineral deposits of the Urals and links to geodynamic evolution / Economic Geology 100th Anniversary Volume. (Eds J. Hedenquist, J. Thompson, R. Goldfarb, J. Richards). P. 1069-1095.
- Ishihara Sh. (1977) The Magnetite-series and Ilmenite-series Granitic Rocks. *Min. Geol.*, **27**(145), 293-305.
- Kalinin A., Savchenko Y., Selivanova E. (2019) Mustard Gold in the Oleninskoe Gold Deposit, Kolmozero-Voronya Greenstone Belt, Kola Peninsula, Russia. *Minerals*, **9**(12). <https://doi.org/10.3390/min9120786>
- Kisters A.F.M., Meyer F.M., Seravkin I.B., Znamensky S.E., Kosarev A.M., Ertl R.G.W. (1999) The geological setting of lode-gold deposits in the central southern Urals: a review. *Geologische Rundschau*, **87**, 603-616.
- Krupp R., Weiser T. (1992) On the stability of gold-silver alloys in the weathering environment. *Mineral. Depos.*, **27**, 268-275.
- Lang J., Baker T. (2001) Intrusion-related gold systems: the present level of understanding. *Mineral. Depos.*, **36**, 477-489.
- Li J.L., Makovicky E. (2001) New studies on mustard gold from the Dongping Mines, Hebei Province, China: The tellurian, plumbian, manganoan and mixed varieties. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen*, **176**(3), 269-297. <https://doi.org/10.1127/njma/176/2001/269>
- Pearce J., Harris N., Tindle A. (1984) Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *J. Petrol.*, **25**(4), 956-983.
- Petersen S., Makovicky E., Li J., Rose-Hansen J. (1999) Mustard gold from the Dongping Au-Te deposit, Hebei Province, Peoples Republic of China. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Monatshefte*, **8**(8), 337-357.
- Puchkov V.N. (2017) General features relating to the occurrence of mineral deposits in the Urals: What, where, when and why. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 4-29. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.01.005>
- Reith F., Lengke M.F., Falconer D., Craw D., Southam G. (2007) The geomicrobiology of gold. *ISME J.*, (1), 567-584.
- Reith F., Stewart L., Wakelin S.A. (2012) Supergene gold transformation: Secondary and nano-particulate gold from southern New Zealand. *Chem. Geol.*, **320-321**, 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.021>
- Ridley J., Diamond L. (2000) Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models. *Gold in 2000. Rev. Econ. Geol.*, **13**, 141-162.
- Sillitoe R., Thompson J. (1998) Intrusion-related vein gold deposits: types, tectono-magmatic settings and difficulties of distinction from orogenic gold deposits. *Res. Geol.*, **48**(4), 237-250.
- Tolstykh N.D., Palyanova G.A., Bobrova O.V., Sidorov E.G. (2019) Mustard gold of the Gaching Ore Deposit (Maletoyvayam Ore Field, Kamchatka, Russia). *Minerals*, **9**. <https://doi.org/10.3390/min9080489>
- Voudouris P., Spry P.G., Melfos V., Alfieris D. (2007) Tellurides and bismuth sulfosalts in gold occurrences of Greece: mineralogical and genetic considerations. *Au-Ag telluride-selenide deposits. Field Workshop of IGCP-486, Espoo, Finland 26-31st August 2007. Proceedings volume*. (Eds K. Kojonen, N. Cook, V.J. Ojala). 85-94
- Warmada I.W., Lehmann B., Simandjuntak M. (2003) Polymetallic sulfides and sulfosalts of the Pongkor epithermal gold-silver deposit, West Java, Indonesia. *Canad. Miner.*, **41**, 185-200.
- Wilkinson J.J. (2001) Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, **55**, 229-272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)
- Zen E-an (1986) Aluminum Enrichment in Silicate Melts by Fractional Crystallization: Some Mineralogic and Petrographic Constraints. *J. Petrol.*, **27**, 1095-117.
- Zhang Zh., Mao J. (1995) Geology and Geochemistry of the Dongping Gold Telluride Deposit, Hebei Province, North China. *Int. Geol. Rev.*, **37**, 1094-1108. <https://doi.org/10.1080/00206819509465441>

REFERENCES

- Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. (1988) Phase relations among tellurides, sulfides and oxides: I Thermochemical data and calculated equilibria. *Econ. Geol.*, **83**, 377-394.
- Albov M.N. (1952) On the forms of gold migration in the oxidation zone of ore deposits. *Izvestiya AN SSSR (ser. geol.)*, (4), 41-53. (In Russ.)
- Albov M.N. (1960) Secondary zoning of gold deposits in the Urals. Moscow, Gosgeoltechizdat Publ., 216 p. (In Russ.)
- Amosov R.A., Vasin S.L. (1993) Microfossils of gold. *Rudy i Metally*, (3-6), 101-107. (In Russ.)
- Anisimova G.S., Kondrat'eva L.A., Leskova N.V. (2008) Sulfide compounds of gold and silver in gold deposits of Eastern Siberia. *Otech. Geol.*, (5), 24-32. (In Russ.)
- Aulov B.N., Vladimirtseva Yu.A., Gvozdk N.I., Korol'kova Z.G., Levin F.D., Lipaeva A.V., Potashova M.N., Samozvantsev V.A. (2015) State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 200 000. Second

- ed. South Ural ser. Sheet N-40-XII (Zlatoust). Explanatory letter. Moscow, MF VSEGEI Publ., 365 p. (In Russ.)
- Barton M.D., Kieft C., Burke E.A.J., Oen I.S. (1978) Uytendogaardite, a new silver-gold sulfide. *Canad. Miner.*, **16**(4), 651-657.
- Bea F., Fershtater G.B., Montero P. (2002) Granitoids of the Uralides: Implications for the Evolution of the Orogen. *Mountain Building in the Uralides: Pangea to the Present. Geophysical Monograph*, **132**, 211-232.
- Belogub E., Melekestseva I., Novoselov K., Zabortina M., Tretyakov G., Zaykov V., Yuminov A. (2017) Listvenite-related gold deposits of the South Urals (Russia): a review. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 247-270. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.008>
- Biagioni C., George L.L., Cook N.J., Makovicky E., Moeilo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C.J., Welch M.D., Bosi F. (2020) The tetrahedrite group: Nomenclature and classification. *Amer. Miner.*, **105**(1), 109-122. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7128>
- Bodnar R.J., Vityk M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Pontignana-Siena, 117-130.
- Borisenko A.S. (1977) Study of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals using cryometry. *Geol. Geofiz.*, (8), 16-28. (In Russ.)
- Bortnikov N.S. (2006) Geochemistry and Origin of the Ore-Forming Fluids in Hydrothermal-Magmatic Systems in Tectonically Active Zones. *Geol. Ore Depos.*, **48**(1), 1-22 (translated from *Geol. Rud. Mestorozh.*, **48**(1), 3-28).
- Brown P. E., Lamb W. M. (1989) PVT properties of fluids in the system H₂O ± CO₂ ± NaCl: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **53**(6), 1209-1221.
- Butt C.R.M. (1998) Supergene gold deposits. *AGSO J. Austral. Geol. Geophys.*, **17**(4), 89-96.
- Castor S.B., Sjöberg J.J. (1993) Uytendogaardite, Ag₃AuS₂, in the Bullfrog mining district, Nevada. *Canad. Miner.*, **31**, 89-98.
- Chen H.-S. (1972) The properties of carbon dioxide Hydrate. *Office of saline water, research and development progress report*, **830**, 1-55.
- Ciobanu C., Cook N., Damian G., Damian F. (2006) A review of recent data on occurrences of Bi-sulphosalts and -tellurides in Romania and genetic implications for gold deposition. *Au-Ag-Te-Se deposits. Proceedings of the 2006 Field Workshop*. (Eds N. Cook, I. Ozgenc, T. Oymann), 30-41.
- Cloke P., Kelly W. (1964) Solubility of gold under inorganic supergene conditions. *Econ. Geol.*, **59**(2), 259-270.
- Cook N., Ciobanu C. (2004) Bismuth tellurides and sulphosalts from the Larga hydrothermal system, Metaliferi Mts., Romania: Paragenesis and genetic significance. *Miner. Mag.*, **68**(2), 301-321. <https://doi.org/10.1180/0026461046820188>
- Darling R. (1991) An extended equation to calculate Na-Cl content from final clathrate melting temperatures in H₂O-CO₂-NaCl fluid inclusions: implication for P-T isochore location. *Geochem. Cosmochem. Acta*, **55**, 3869-3871.
- Darling L. (2003) Introduction to gas-bearing, aqueous fluid inclusions. *Fluid inclusions: analysis and interpretation*. (Eds A. Anderson, D. Marshall). Mineralogical association of Canada short course serie, **32**.
- Diamond L. (2003) Introduction to gas-bearing, aqueous fluid inclusions. *Fluid inclusions: analysis and interpretation*. (Eds I. Samson, A. Anderson, D. Marshall). (Mineralogical association of Canada short course serie, **32**, 101-158).
- Ermakov N.P., Dolgov Yu.A. (1979) Termobarometry. Moscow, Nedra Publ., 272 p. (In Russ.)
- Fershtater G.B. (2013) Paleozoic intrusive magmatism of the Middle and Southern Urals. Ekaterinburg, RIO UrO RAN Publ., 368 p. (In Russ.)
- Goldfarb R.J., Baker T., Dube B., Groves D.I., Hart C., Gosselin P. (2005) Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes / Economic Geology 100th Anniversary Volume. (Eds J. Hedenquist, J. Thompson, R. Goldfarb, J. Richards). P. 407-450.
- Greffié C., Bailly L., Milési J.-P. (2002) Supergene alteration of primary ore assemblages from low-sulfidation Au-Ag epithermal deposits at Pongkor, Indonesia, and Nazareño, Perú. *Econ. Geol.*, **97**(3), 561-571.
- Groves D., Goldfarb R., Robert F., Hart C. (2003) Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Econ. Geol.*, **98**, 1-29.
- Hart C. (2005) Classifying, distinguishing and exploring for intrusion-related gold systems. *The Gangue*, **87**, 3-9.
- Herrington R., Zaykov V., Maslennikov V., Brown D., Puchkov V. (2005) Mineral deposits of the Urals and links to geodynamic evolution / Economic Geology 100th Anniversary Volume. (Eds J. Hedenquist, J. Thompson, R. Goldfarb, J. Richards). P. 1069-1095.
- Ishihara Sh. (1977) The Magnetite-series and Ilmenite-series Granitic Rocks. *Min. Geol.*, **27**(145), 293-305.
- Ivanov K.S., Puchkov V.N. (2022) Structural and Formation Zones of the Urals Fold Belt (East of Russia): An Overview. *Geotectonica*, (6), 78-113. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016853X22060030
- Kalinin A., Savchenko Y., Selivanova E. (2019) Mustard Gold in the Oleninskoe Gold Deposit, Kolmozero-Voronya Greenstone Belt, Kola Peninsula, Russia. *Minerals*, **9**(12). <https://doi.org/10.3390/min9120786>
- Kalinin Yu.A., Prudnikov S.G., Roslyakov N.A. (2006) Gold-bearing weathering crusts of southern Siberia. Novosibirsk, Akademicheskoe Izdanie GEO, 339 p. (In Russ.)
- Kisters A.F.M., Meyer F.M., Seravkin I.B., Znamensky S.E., Kosarev A.M., Ertl R.G.W. (1999) The geological setting of lode-gold deposits in the central southern Urals: a review. *Geologische Rundschau*, **87**, 603-616.
- Kozlov V.I. et al. (2001) Geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (new series). Sheet N-40 (41) – Ufa. Explanatory letter. 568 p.
- Kreyter V.M., Aristov V.V., Volynsky I.S., Krestovnikov A.N., Kuvichinsky V.V. (1958) Behavior of gold in the oxidation zone of gold-sulfide deposits. Moscow, Gosgeoltechizdat Publ., 268 p. (In Russ.)
- Krupp R., Weiser T. (1992) On the stability of gold-silver alloys in the weathering environment. *Mineral. Depos.*, **27**, 268-275.
- Kuimova N.G., Moiseenko V.G. (2006) Biogenic gold mineralization in nature and experiment. *Lithosfera*, (3), 83-95. (In Russ.)
- Kuraev N. (1941) Deposits of gold and other minerals beyond the lake Turgoyak, 24 p. (In Russ.)
- Lang J., Baker T. (2001) Intrusion-related gold systems: the

- present level of understanding. *Mineral. Depos.*, **36**, 477-489.
- Li J.L., Makovicky E. (2001) New studies on mustard gold from the Dongping Mines, Hebei Province, China: The tellurian, plumbian, manganian and mixed varieties. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen*, **176**(3), 269-297. <https://doi.org/10.1127/njma/176/2001/269>
- Melekestseva I.Yu., Yuminov A.M. (2015) Formation conditions of gold-quartz veins of the Mechnikovskoe and Al'tyn-Tash deposits, South Urals: fluid inclusion and isotopic study. *Mineralogiya*, (2), 58-67.
- Mel'nikov F.P., Prokofiev V.Yu., Shatagin N.N. (2008) Thermobarogeochemistry. Moscow, Akademicheskii prospect Publ., 222 p. (In Russ.)
- Mikhailov V.V., Stepanov S.Yu., Palamarchuk R.S., Chebykin N.S. (2021) Gold-silver mineralization in granodiorites of the Turgoyak massif, Southern Urals. *Metallogeny of ancient and modern oceans – 2021*. (Eds V.V. Maslennikov, I.Yu. Melekestseva). Miass, YU FNTs MiG UrO RAN Publ., 93-97.
- Murzin V.V., Malugin A.A. (1987) Typomorphism of gold in the hypergenesis zone (using the example of the Urals). Sverdlovsk, UNTs RAN Publ., 96 p.
- Nikiforova Z.S., Kalinin Yu.A., Makarov V.A. (2020) Evolution of native gold under exogenous conditions. *Russ. Geol. Geophys.*, **61**(11), 1244-1534 (translated from *Geol. Geofiz.*, **61**(11), 1514-1534). <https://doi.org/10.15372/RGG2020109>
- Pal'yanova G., Savva N.E. (2009) Specific genesis of gold and silver sulfides at the Yunoe deposit (Magadan Region, Russia). *Russ. Geol. Geophys.*, **50**(7), 587-602 (translated from *Geol. Geofiz.*, **50**(7), 1488-1510). <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.06.001>
- Palyanova G.A., Savva N.E., Zhuravkova T.V., Kolova E.E. (2016) Gold and silver minerals in low-sulfidation ores of the Julietta deposit (northeastern Russia). *Russ. Geol. Geophys.*, **57**(8), 1171-1190 (translated from *Geol. Geofiz.*, **57**(8), 1488-1510).
- Pearce J., Harris N., Tindle A. (1984) Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *J. Petrol.*, **25**(4), 956-983.
- Petersen S., Makovicky E., Li J., Rose-Hansen J. (1999) Mustard gold from the Dongping Au-Te deposit, Hebei Province, Peoples Republic of China. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Monatshefte*, **8**(8), 337-357
- Petrov V.I., Shalaginov A.E., Punegov B.N., Gorlova L.G., Zabelkina T.B., Grigorova V.Yu., Nikolsky T.I., Sereida V.V. (2015) State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 200,000. Second ed. South Ural series. Sheet N-41-VII. Explanatory letter. Moscow, MF VSEGEI Publ., 167 p. (In Russ.)
- Petrovskaya N.V. (1973) Native gold. Moscow, Nauka Publ., 348 p. (In Russ.)
- Puchkov V.N. (2017) General features relating to the occurrence of mineral deposits in the Urals: What, where, when and why. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 4-29. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.01.005>
- Reith F., Lengke M.F., Falconer D., Craw D., Southam G. (2007) The geomicrobiology of gold. *ISME J.*, (1), 567-584.
- Reith F., Stewart L., Wakelin S.A. (2012) Supergene gold transformation: Secondary and nano-particulate gold from southern New Zealand. *Chem. Geol.*, **320-321**, 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.021>
- Ridley J., Diamond L. (2000) Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models. *Gold in 2000. Reviews in economic geology*, **13**, 141-162.
- Roslyakov N.A. (1981) Gold geochemistry in supergene zone. Moscow, Nauka Publ., 240 p. (In Russ.)
- Savva N.E., Pal'yanova G. (2007) Genesis of gold and silver sulfides at the Ulakhan deposit (northeastern Russia). *Russ. Geol. Geophys.*, **48**(10), 799-810. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.09.006> (translated from *Geol. Geofiz.*, **48**(10), 1028-1042).
- Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Polenov Yu.A. (2001) Urals gold deposits. Ekaterinburg, UGGU Publ., 622 p. (In Russ.)
- Sergeev N.B., Bugelsky Yu.Yu., Kuznetsova O.Yu. (1996) Distribution of gold in the oxidation zone of pyrite deposits of the Urals: influence of the composition of primary ores and climate. *Geol. Rud. Mestorozh.*, **38**(4), 321-333. (In Russ.)
- Shagalov E.S. (2002) Petrology and geochemistry of rocks of the Syrostan-Turgoyak group of granitoid massifs (Southern Urals). Cand. geol. and min. sci. diss. Ekaterinburg, IG UrO RAN. 188 p. (In Russ.)
- Sillitoe R., Thompson J. (1998) Intrusion-related vein gold deposits: types, tectono-magmatic settings and difficulties of distinction from orogenic gold deposits. *Resour. Geol.*, **48**(4), 237-250.
- Smirnov S.S. (1951) Oxidation zone of sulphide deposits. Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 335 p.
- Snachev A.V., Snachev V.I., Romanovskaya M.A. (2020) Geology, conditions of formation and ore content of the Turgoyak granite massif and carbonaceous deposits of its western framing (Southern Urals). *Vestnik MGU. Ser. 4. Geol.*, (1), 12-20. (In Russ.)
- Tauson L.V. (1961) Geochemistry of rare elements in granites. Moscow, Izd-vo AN USSR, 232 p. (In Russ.)
- Tolstykh N.D., Palyanova G.A., Bobrova O.V., Sidorov E.G. (2019) Mustard gold of the Gaching Ore Deposit (Maletoyvayam Ore Field, Kamchatka, Russia). *Minerals*, **9**. <https://doi.org/10.3390/min9080489>
- Voudouris P., Spry P.G., Melfos V., Alfieris D. (2007) Tellurides and bismuth sulfosalts in gold occurrences of Greece: mineralogical and genetic considerations. *Au-Ag telluride-selenide deposits. Field Workshop of IGCP-486, Espoo, Finland 26-31st August 2007. Proceedings volume* (Eds K. Kojonen, N. Cook and V.J. Ojala). P. 85-94
- Vukalovich M.P., Altunin V.V. (1965) Thermophysical properties of carbon dioxide. Moscow, Atomizdat Publ., 455 p.
- Warmada I.W., Lehmann B., Simandjuntak M. (2003) Polymetallic sulfides and sulfosalts of the Pongkor epithermal gold-silver deposit, West Java, Indonesia. *Canad. Miner.*, **41**, 185-200.
- Wilkinson J.J. (2001) Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, **55**, 229-272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)
- Zabotina M.V., Ankusheva N.N., Shanina S.N., Kotlyarov V.A. (2018) Formation conditions of the Ganeevskoe gold deposit, Uchaly ore district: mineralogical thermometry and fluid inclusion study. *Mineralogiya*, (4), 55-67. (In Russ.)
- Zen E-an. (1986) Aluminum Enrichment in Silicate Melts by Fractional Crystallization: Some Mineralogic and Petrographic Constraints. *J. Petrol.*, **27**, 1095-117
- Zhang Zh., Mao J. (1995) Geology and Geochemistry of

- the Dongping Gold Telluride Deposit, Heibei Province, North China. *Int. Geol. Rev.*, **37**, 1094-1108. <https://doi.org/10.1080/00206819509465441>
- Znamenskii S.E., Ankusheva N.N., Artem'ev D.A. (2020a) Formation conditions, composition and ore-forming sources of the Bolshoy Karan gold-porphyry deposit (the Southern Urals). *Litosfera*, **20**(3), 397-410. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-3-397-410>
- Znamenskii S.E., Ankusheva N.N., Artem'ev D.A. (2020b) Vosnesensky Cu-porphyry deposit (Southern Urals): formation conditions, trace elements, sulfur isotopes and fluid sources. *Georesursy*, **22**(3), 48-54. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.48-54>
- Znamenskii S.E., Puchkov V.N., Michurin S.V. (2015) Sources of ore-forming fluids and conditions for the formation of orogenic gold deposits of the Main Ural Fault zone in the Southern Urals. *Dokl. Akad. Nauk*, **464**(3), 313-316. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0869565215270237>