

Условия образования золоторудного проявления Билян-Тау (Худолазовская мульда, Южный Урал)

©2024 И. Р. Рахимов¹✉, А. М. Васильев², А. А. Самигуллин¹

¹Институт геологии УФИЦ РАН,
ул. Карла Маркса, 16/2, 450077, Уфа, Российская Федерация
²Уфимский университет науки и технологий,
ул. Заки Валиди, 32, 450076, Уфа, Российская Федерация

Аннотация

Введение: кварцево-жильные месторождения золота имеют большое практическое значение. В пределах Худолазовской мульды Южного Урала развито множество мелких месторождений и проявлений золота кварцево-жильного типа, являющиеся коренными источниками разрабатываемых ныне россыпных месторождений. Генезис этих месторождений изучен слабо, в связи с чем источники рудообразующих флюидов неясны.

Методика: минеральный состав рудоносных жил изучен при помощи сканирующего электронного микроскопа. Для выяснения источников рудообразующих флюидов выполнено определение изотопного состава серы в сульфидах и арсенопирите, изотопного состава кислорода в кварце, а также газового состава флюидных включений. РТ-параметры системы изучены при помощи микротермометрии флюидных включений и минеральных геотермометров.

Результаты и выводы: формирование золоторудного проявления Билян-Тау связано с внедрением габбровой интрузии худолазовского комплекса (325–329 млн лет) в туфогенные породы биягодинской свиты (D_{3f}). Рудоносные кварцевые жилы образовались из магматогенного флюида (отделённого от габбровой интрузии) при участии вмещающих туфогенных пород по системе разрывных нарушений СВ простирания, типичной для всей Худолазовской мульды. Диапазон температур рудообразования, согласно температурам гомогенизации флюидных включений и термометрии арсенопирита и хлорита, составлял 200–450°C, давление в районе 10–50 бар. Выделены три стадии рудного минералообразования: 1) ранняя полисульфидная с арсенопиритом, 2) силикатно-оксидная, 3) поздняя гидроксидная. Отложение золота в руде связывается с первой наиболее высокотемпературной стадией. Совокупность данных позволяет отнести Билян-Тау к орогенному типу месторождений золота.

Ключевые слова: золоторудное проявление, генезис, минералогия, изотопия, флюидные включения.

Источник финансирования: Работы выполнены при финансовой поддержке Госзадания ИГ УФИЦ РАН № FMRS-2022-0012 и гранта РНФ № 22-77-10049.

Для цитирования: Рахимов И. Р., Васильев А. М., Самигуллин А. А. Условия образования золоторудного проявления Билян-тау (Худолазовская мульда, Южный Урал) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2024. № 3. С. 21–31. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/21-31>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Худолазовская мульда, локализованная в западной части Магнитогорской мегазоны (рис. 1а), вмещает более 50 мелких золото кварцевых месторождений и проявлений с суммарными запасами золота до 1 т, приуроченных к мелким интрузиям перидотит-габбро-диоритового состава [1–3]. Условия их образования до недавнего времени практически не изучались [4]. Кроме того, в Худолазовской мульде находятся россыпные месторождения золота неоген-четвертичного возраста с суммарными запасами около 2 т, часть из которых отрабатывается в настоящее время. Именно здесь в конце XX в. был обнаружен знаменитый золотой самородок «Ирендык-

кий медведь» весом 4788 г, признанный национальным достоянием России и республики Башкортостан. В качестве коренных источников россыпей Худолазовской площади рассматриваются указанные выше многочисленные кварцево-жильные золотые месторождения. В настоящей статье представлены результаты детального изучения геологического строения, минералогии золотоносных кварцевых жил, а также состава и термобарогеохимии флюидных включений в кварце из одного из типичных рудопоявлений Худолазовской мульды – Билян-Тау. Обсуждается генетическая связь этого проявления с габброидными интрузиями и вмещающими вулканогенно-осадочными породами.

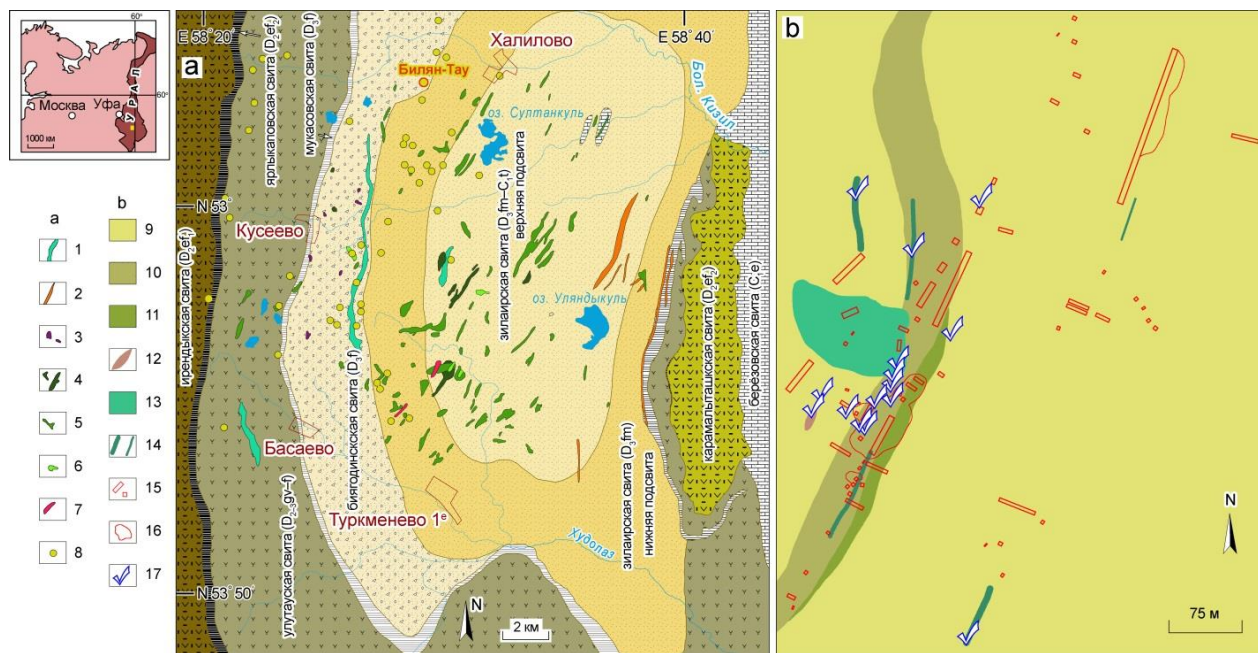


Рис. 1. Геологическая схема Худолазовской мульды (а) и участка золоторудного проявления Билян-Тау (б) на Южном Урале: 1–7 – раннекаменноугольные интрузии, 1 – силлы роговообманковых долеритов, 2 – силлы и дайки плагиогранитов, 3 – штоки перидотитов, 4 – хонолиты оливиновых габбро, 5 – безоливиновые габбро, 6 – пегматоидные габбро, 7 – плагиограниты; 8 – золоторудные месторождения и проявления; 9–12 – породы биягодинской свиты (D₃f), 9 – туфопесчаники, 10 – туфоалевролиты, 11 – базальтовые туфы, 12 – риолит-порфиры; 13 – габбровая интрузия; 14 – силлы и дайки роговообманковых долеритов; 15 – горные выработки; 16 – отвалы безрудных пород; 17 – точки пробоотбора.

[Fig. 1. Geological diagram of the Khudolaz trough (a) and the site of the Bilyan-Tau gold ore occurrence (b) in the Southern Urals: (1–7) – Early Carboniferous intrusions, (1) – sills of hornblende dolerites, (2) – sills and dikes of plagiogranites, (3) – stocks of peridotites, (4) – olivine gabbro chonoliths, (5) – olivine-free gabbro, (6) – pegmatoid gabbro, (7) – plagiogranites; (8) – gold deposits and occurrences; (9–12) – rocks of the Biyagoda formation (D₃f), (9) – tuff sandstones, (10) – tuff siltstones, (11) – basaltic tufts, (12) – rhyolite porphyries; (13) – gabbro intrusion; (14) – sills and dikes of hornblende dolerites; (15) – mine workings; (16) – dumps of barren rocks; (17) – sampling points.]

Методика

Минералогическое изучение проводилось с помощью оптического микроскопа Altami Polar 3 и электронного микроскопа Tescan Vega Compact (Институт геологии УФИЦ РАН, Уфа). Определение состава минералов выполнено при помощи ЭДС-детектора Xplorer 15 Oxford Instruments. При съёмке использованы следующие установки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда в диапазоне 3–4 нА.

Определение элементного состава жильного кварца проводилось на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7500cx, Agilent Technologies (ТРЦКП, Томск, Россия). Пробы (~0.1 г) растворялись

в смеси фтороводородной и азотной кислот в микроволновой печи Millistone Start D с предварительной стадией выдерживания реакционной смеси при температуре ~70 °С. Разложение проводили при температуре 200 °С и мощности 700 Вт. Далее пробы охлаждались до комнатной температуры и обмывались 5 %-ным раствором азотной кислоты, после чего пробы последовательно переводились в хлориды и нитраты. Для контроля изменения чувствительности прибора использовались внутренний (раствор индия) и внешний стандарт (аттестованный образец горной породы близкого к анализируемой пробе состава). Для определения Au использовался 5-ч обжиг при 550 °С, а при

подготовке проб использовалась фтористоводородная кислота, растворы царской водки и обратной царской водки. В качестве фонового раствора выступал раствор 10 %-ной соляной кислоты.

Исследования флюидных включений в кварце проведены Н. Н. Анкушевой в термокамере TMS-600 (Linkam) с программным обеспечением LinkSys V-2.39, производящей измерения температур фазовых переходов в интервале -196 до $+600$ °С, с микроскопом для проходящего и отраженного света Olympus BX-51 (Южно-Уральский государственный университет, Миасс, Россия). Солевой состав флюида оценён по температурам эвтектики раствора во включениях [5, 6]. Температуры гомогенизации фиксировались в момент исчезновения газового пузырька при нагревании препарата в термокамере и приняты за минимальные температуры минералообразования [7]. Концентрации солей в растворах рассчитывались по температурам плавления последних кристаллических фаз [8]. Обработка результатов измерений выполнена в программе Statistica.

Валовый состав газов флюидных включений проанализирован на газовом хроматографе «Цвет-800» совмещенном с пиролитической приставкой С.Н. Шаниной (Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Россия). Включения вскрывались при температуре 500 °С из навесок кварца массой 0.3–0.5 г. Образцы предварительно обрабатывали разбавленной азотной кислотой (1:1), промывали бидистиллированной водой и вручную под бинокулярным микроскопом отбирали кварцевые зерна. Для обработки хроматографических сигналов использовали программу TWS-MaxiChrom. Вероятная относительная погрешность метода – 16 %. Минимально определяемое содержание газовых компонентов составляет (мкл): для детектора по теплопроводности – 2×10^{-2} для N_2 и CO , 3×10^{-2} – CH_4 и CO_2 , 3×10^{-3} – H_2O , для пламенно-ионизационного детектора – CH_4 – 2×10^{-9} , C_2H_4 – 7×10^{-9} , C_2H_6 , C_3H_6 – 5×10^{-9} , C_3H_8 – 4×10^{-9} .

Измерения изотопного состава кислорода выполнялись в виде O_2 на газовом масс-спектрометре FINNIGAN MAT 253 В.Ф. Посоховым (ГИН СО РАН, Улан-Удэ, Россия) с использованием двойной системы напуска в классическом варианте (стандарт–образец). Подготовка образцов для определения величин $\delta^{18}O$ проводилась с использованием метода лазерного фторирования на опции “лазерная абляция с экстракцией кислорода из силикатов” в присутствии реагента BrF_5 по методу [9]. Для изотопного анализа кислорода использовались только чистые минералы (в виде осколков) общим весом 1.5–2.5 мг. Расчеты $\delta^{18}O$ были выполнены относительно международных стандартов NBS-28 (кварц) и NBS-30 (биотит). Правильность полученных значений контролировалась регулярными измерениями собственного внутреннего стандарта ГИ-1 (кварц) и лабораторного ИГЕМ РАН Polaris (кварц). Погрешность полученных значений величин $\delta^{18}O$ находилась на уровне $(1\sigma) \pm 0.2$ ‰. Изотопный состав серы был получен с помощью газового масс-спектрометра Finnigan MAT Delta с двойным напуском в ЦКП

МИИ СО РАН, Новосибирск (В. Н. Реутский, М. Н. Колбасова, О. П. Изох). Для контроля использовались лабораторные стандарты (IAEA-S-1,-2,-3) с аттестованными значениями.

Результаты исследований

Геологическое строение и петрография вмещающих пород

Рудопоявление Билян-Тау площадью около 100 тыс. м² находится на хребте Улугуртау в 3 км к западу от с. Халилово (рис. 1а, 2а). Сведения о геологическом строении участка этого рудопоявления приводились лишь в работе [1]. Отмечалось, что рудопоявление расположено в тектонической зоне 15 – 20° простирания с элементами кулисного строения, представляющей участок трещиноватых песчаников и гравелитов зилаирской свиты, зажатый между дайками габброидоритов. Ширина участка 30–60 м, азимут падения трещиноватости 285° , угол падения 55 – 60° , азимут простирания меняется от 45 – 50° в южной части до 25 – 30° в северной части участка. Наши наблюдения позволили кардинально усовершенствовать схему геологического строения рудопоявления Билян-Тау (рис. 1б). Судя по размерам и распределению эксплуатационных канав, штолен и шурфов наиболее продуктивная часть была приурочена к экзоконтактовой зоне небольшого габбрового массива и маломощных долеритовых силлов вдоль границы туфоалевролитов и базальтовых туфов биягодинской свиты (D_3f). Часть выработок, в основном разведочных, находится в биягодинских туфопесчаниках (рис. 2б), слагающих большую часть изученной площади, в особенности вдоль границ долеритовых даек и силлов. Угол падения толщ туфоалевролитов 23° , азимут падения меняется с юга на север от 15 до 75° , в туфопесчаниках в северной части участка замеры угла падения 25° , азимут – 80° . Кварцевые жилы локализованы в основном в туфоалевролитах и туфопесчаниках, реже внутри базальтовых туфов, габбро и долеритов. Наиболее мощные кварцевые жилы, имевшие СВ простирание (вдоль канав), толщиной до 15–20 см в обнажениях не были найдены и опробованы нами из отвалов. Они сложены мелко- и среднезернистым кварцем, внутри жил встречаются фрагменты вмещающих пород, кальцит и рудные минеральные ассоциации. Цвет кварцевых жил меняется от водяно-прозрачного до молочно-белого (обр. К₂₃-38б) и чаще всего рыжего (обр. К₂₃-38а). Тонкие кварцевые жилы (1–3 см) опробованы в стенках выработок (обр. Б-12 из штольни, Б-13 из канавы, Б-14 из шурфа). Их залегание различное – от субвертикального до субгоризонтального с разным простиранием (рис. 2б, 2с). Вероятно, они являются тонкими ответвлениями от крупных жил. Все выделенные разновидности пород трещиноваты, но особой интенсивности трещин, как это отмечалось в [1], мы не выделяем. По мнению авторов такой же режим трещиноватости присущ всей территории Худолазовской мульды, а размещение золоторудных проявлений контролируется, прежде всего, базитовыми интрузиями.



Рис. 2. Фотографии золоторудного проявления Билян-Тау: *a* – вид на хребет Улугуртау с отвалами пустых пород, *b* – эксплуатационная штольня с опробованной кварцевой жиллой, *c* – субгоризонтальная кварцевая жила в выветрелом габбро.

[Fig. 2. Photographs of the Bilyan-Tau gold ore occurrence: (a) – view of the Ulugurtau ridge with barren rock dumps, (b) – production adit with a sampled quartz vein, (c) – subhorizontal quartz vein in weathered gabbro.]

Небольшая габбровая интрузия, вероятно представляющая собой хонолит, сложена такситовыми хлоритизированными роговообманковыми габбро с пойкилодолеритовой структурой. На линии залегания интрузии находится силл роговообманковых долеритов субмеридионального простирания с видимой мощностью 1.5 м, вероятно являющийся подводящим каналом для хонолита. Породы силла фрагментарно обнажены на участке рудопроявления, но прямых контактов с габбро не обнаружено. Эти габброиды отнесены к худолазовскому дифференцированному комплексу (U-Pb возраст по циркону и бадделеиту 325–329 млн лет), широко развитому в Худолазовской мульде [10]. Также на участке развиты несколько даек роговообманковых долеритов улугуртауского комплекса (Sm-Nd изохронный возраст 321 ± 15 млн лет). Вмещающие их вулканогенно-осадочные породы неравномерно метасоматизированы в экзоконтактовой зоне габбровой интрузии вплоть до образования карбонатно-полевошпатовых метасоматитов с нематогранобластовой структурой. Мелкозернистые туфопесчаники сложены обломками клинопироксена, амфибола, полевых шпатов, реже кварца, сцементированных глинисто-хлоритовой массой, предположительно заместившей пепловый материал. Минеральный состав туфоалевролитов аналогичен. В толще туфопесчаников обнаружены линзовидные тела риолит-порфиров и базальтовых

туфов. В последних, сложенных обломками афировых и порфировых андезибазальтов (автомагматическая брекчия?), встречаются обильные ксенолиты аргиллитов и алевролитов.

Минералогия кварцевых жил

Кварцевые жилы содержат небольшое количество кальцита в центральной части, хлорита и рудных минералов. По данным [11] золото в рудах находилось как в свободной форме, так и в виде примеси в сульфидах. Морфологической характеристики золотин нет. Нам не удалось обнаружить самородного золота в кварцевых жилах – как в крупных обломках из отвалов, так и в коренных обнажениях из тонких жил, несмотря на попытки шлихования. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что наиболее богатые золото-кварцевые руды отработаны. Среди всех месторождений и проявлений Худолазовской мульды кварцевые жилы Билян-Тау, вероятно, имеют наиболее разнообразный минеральный состав. Здесь были установлены более 10 рудных минералов, главными из которых являются арсенопирит, халькопирит, сфалерит и галенит, второстепенные – титанит, рутил, пирит (+оксипирит), гётит (+Cu-гётит), фаза Fe_2SO_5 , ковеллин, пирротин, малахит. Основное количество рудных минералов находится в рыжевато-кварцевых жилах и на контактах белого и рыжего кварца, или на границе кварца с

вмещающими породами. По составу мы выделяем три типа минеральных ассоциаций: 1) сульфидная полиминеральная с арсенопиритом, 2) силикатно-оксидная, 3) гидроксидная.

1) Первая ассоциация. Арсенопирит, самый распространённый рудный минерал жил, образует вкрапленность из идиоморфных зёрен размером 0.1–1 мм и их сростков в кварцевой матрице (рис. 3а). Также арсенопирит присутствует в виде ксеноморфных выделений, часто в сростании с сульфидами. В арсенопирите отмечаются примеси Co до 2 мас. % и Ni до 0.8 %. Галенит, халькопирит, сфалерит и пирит чаще всего заполняют трещины толщиной до 1.3 мм и встречаются в сростаниях (рис. 3б). Также эти минералы встречаются в виде мелких округлых включений в кристаллах арсенопирита. Пирит в изученных образцах чаще всего окислен, содержит в составе кислород (до 6 мас. %) и имеет пористую структуру. Ковеллин обнаружен в виде тонких кайм вокруг арсенопирита и халькопирита.

2) Вторая ассоциация. Титанит присутствует обыч-

но на границе кварцевых жил с вмещающей породой в виде двух морфологических типов – мелких огранённых зёрен (до 0.3 мм) (рис. 3с) и крупных метакристаллов (>0.5 мм) в сростании с хлоритом. Рутил ассоциирует с титанитом, образуя мелкие идиоморфные кристаллы (до 0.1 мм в длину) в виде включений в титаните или в карбонатно-силикатной матрице.

3) Третья, наиболее поздняя ассоциация представлена гётитом и фазами Fe-S-O состава с переменным содержанием S и O, часть анализов рассчитывается на стехиометричную формулу Fe_2SO_5 . Эти минералы образуют частичные или полные псевдоморфозы по сульфидам и арсенопириту. Встречен Cu-Zn-гётит, обогащённый медью до 11.4 мас. %, цинком до 7.8 мас. %. Cu-гётит обрастает выделения халькопирита по контуру (рис. 3д). Fe-S-O фаза морфологически сходна с гётитом, образуя тонкодисперсную смесь и перистые выделения, замещающая сульфиды (в основном пирит?). В этой фазе определены примеси As до 4 мас. %, Si до 0.8 %, Cu до 0.7 %, Co до 0.3 %.

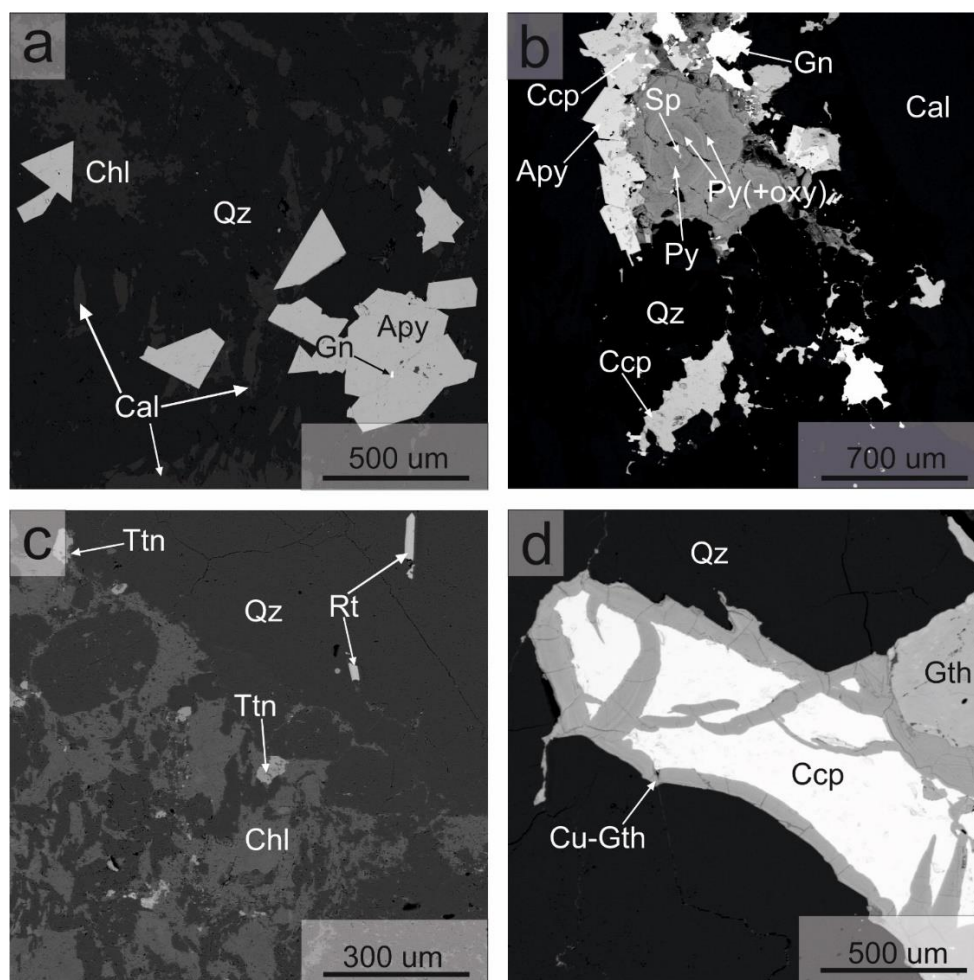


Рис. 3. BSE-изображения сульфидно-кварцевых руд золоторудного проявления Билян-Тау: *a* – вкрапления идиоморфных кристаллов арсенопирита, *b* – полиминеральные сростания, *c* – вкрапления титанита и рутила, *d* – краевое замещение сульфидов гётитом. *Apy* – арсенопирит, *Cal* – кальцит, *Ccp* – халькопирит, *Chl* – хлорит, *Gn* – галенит, *Gth* – гётит, *Py* – пирит, *Qz* – кварц, *Rt* – рутил, *Sp* – сфалерит, *Ttn* – титанит.

[**Fig. 3.** BSE images of sulfide-quartz ores of the Bilyan-Tau gold ore occurrence: (*a*) – euhedral arsenopyrite crystals, (*b*) – polymetallic intergrowths, (*c*) – titanite and rutile inclusions, (*d*) – marginal replacement of sulfides by goethite. *Apy* – arsenopyrite, *Cal* – calcite, *Ccp* – chalcopyrite, *Chl* – chlorite, *Gn* – galena, *Gth* – goethite, *Py* – pyrite, *Qz* – quartz, *Rt* – rutile, *Sp* – sphalerite, *Ttn* – titanite.]

Геохимическая характеристика
кварцевых жил и вмещающих пород

По данным [11] среднее содержание золота в рудах проявления Билян-Тау составляло 11.9 г/т. В изученных нами пробах кварцевых жил из отвалов и коренных обнажений концентрация золота не превышает 0.1 г/т (табл. 1). Во вмещающих породах золото не определялось. Изучались пробы жильного кварца, визуально не имеющие включений посторонних минеральных фаз (оксидов, сульфидов, арсенопирита и др. минералов). Они характеризуются высокими содержаниями Fe, Ti, Cr, Cu и халькогенидных элементов. Определены концентрации Pd 0.001–0.07 г/т, Ag 0.07–0.28 г/т. Сумма редкоземельных элементов (РЗЭ) варьирует от 2.3 до 11.6 г/т.

Табл. 1. Химический состав жильного кварца золоторудного проявления Билян-Тау
[Table 1. Chemical composition of vein quartz from the Bilyan-Tau gold ore occurrence]

Element	Б-12	Б-13	Б-14	K _{22-38a}
1	2	3	4	5
Fe	9974	11997	5394	4067
Ge	0.34	0.37	0.31	0.21
Se	12.5	12.3	11.6	0.084
Ru	0.017	0.023	0.0037	<0.001
Pd	0.0013	0.0013	0.0022	0.071
Ag	0.16	0.072	0.15	0.28
Cd	<0.1	0.16	<0.1	0.067
Sn	0.82	0.33	0.91	2
Sb	0.56	0.52	3.4	0.62
Te	0.26	0.011	0.021	0.59
W	0.56	0.78	0.23	0.42
Pt	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au	0.026	0.014	0.032	0.11
Bi	0.04	0.013	<0.01	0.81
Ti	288	208	678	165
Cr	239	262	118	37
Cu	57	2.6	3.9	13.7
Zn	14.1	3.6	4.8	7.2
Y	1.7	0.92	2.9	0.59
Nb	0.61	0.43	0.36	0.43
La	2.5	2	1.6	0.41

Продолжение Табл. 1
[Continued Table 1]

1	2	3	4	5
Ce	5.9	4.5	3.1	0.84
Pr	0.36	0.21	0.16	0.103
Nd	1.4	0.8	0.78	0.43
Sm	0.25	0.16	0.26	0.099
Eu	0.106	0.114	0.091	0.032
Gd	0.31	0.14	0.32	0.092
Tb	0.033	0.02	0.056	0.016
Dy	0.23	0.111	0.36	0.098
Ho	0.059	0.022	0.083	0.019
Er	0.16	0.065	0.22	0.05
Tm	0.03	0.019	0.054	0.0086
Yb	0.28	0.09	0.29	0.057
Lu	0.027	0.014	0.031	0.0093
Pb	7.9	2	1.3	10.2
Th	0.46	0.28	0.13	0.039
U	0.23	0.059	0.066	0.012

Спектры нормированного распределения разнообразны (рис. 4). Пробы из тонких кварцевых жил (Б-12, 13 и 14) имеют своеобразные спектры РЗЭ с высокими концентрациями La и Ce, умеренными – тяжёлых РЗЭ и низкими – средних РЗЭ. При этом, в пробе Б-12 наблюдается европиевый максимум ($Eu/Eu^*=2.3$), тогда как в других пробах европиевая аномалия отсутствует. Наличие такой аномалии может быть связано с присутствием в пробе кальцита. В них величина $(La/Yb)_N$ варьирует от 3.76 до 15.13, $(La/Gd)_N$ от 4.26 до 12.16. В пробе K_{23-38a} из крупной рудоносной жилы распределение РЗЭ более равномерное с плавным отрицательным уклоном, где $(La/Yb)_N=4.90$ и $(La/Gd)_N=3.79$. Для сравнения на графике рис. 3 показаны спектры распределения РЗЭ во вмещающих породах рудопоявления – габброидах худолазовского комплекса (включая долерит из силла), долеритовой дайке и вулканогенно-осадочных породах бягодинской свиты. Распределение РЗЭ в них довольно однотипно и в целом сходно с кварцевой пробой K_{23-38a}. Индикаторные отношения $U/Th=0.21-0.51$, $Y/No=28.8-41.8$, $Nb/Y=1.37-8.06$ в кварцевых пробах во многом перекрываются с таковыми во вмещающих породах: $U/Th=0.20-0.38$, $Y/No=25.1-29.6$, $Nb/Y=2.00-8.06$.

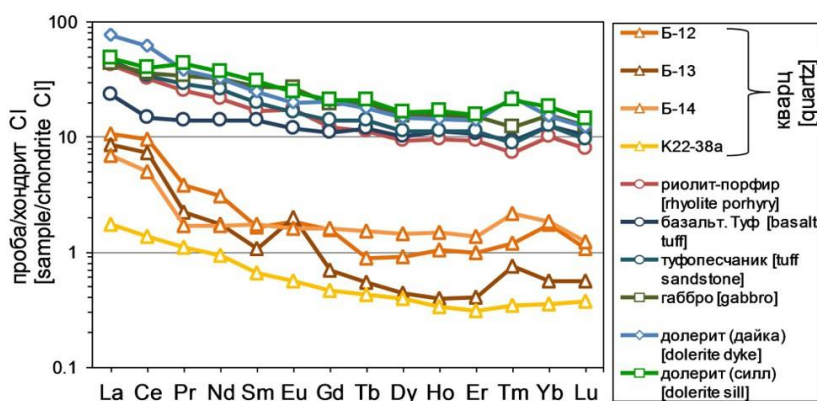


Рис. 4. Спектры нормированного распределения на хондрит по [12] редкоземельных элементов в породах золоторудного проявления Билян-Тау.

[Fig. 4. Chondrite-normalized after [12] patterns of rare earth elements in rocks of the Bilyan-Tau gold ore occurrence.]

Флюидные включения в кварце

Для исследования флюидных включений в кварце использованы образцы из рудоносной рыжевато-кварцевой жилы (обр. К₂₃-38а) и безрудной белой жилы (обр. К₂₃-38b). Проанализированы двухфазные (газово-жидкие, VL) флюидные включения. На основе оптических наблюдений по критериям [7] были выделены первичные и первично-вторичные флюидные включения, встречающиеся в виде одиночных включений и малочисленных групп в центральных частях зёрен размером 10–15 мкм, и вторичные включения размером до 5 мкм, которые маркируют проходящие через несколько зёрен кварца трещины. Кроме того, с двухфазными включениями в кварце ассоциируют округлые однофазные существенно жидкие и газовые включения размером до 5 мкм. Флюидные включения обладают температурами плавления льда от -3.2 до -7.0 °C и, соответственно, солёности флюида в них составила 5.3–10.0 мас. % NaCl-экв. Включения в рыжевато-кварцевом кварце гомогенизировались в жидкую фазу при 194–285 °C. Включения в белом кварце имеют более низкие температуры гомогенизации – 164–206 °C. На диаграмме температур гомогенизации и солёности большинство точек лежат между изобарами 10 и 50 кбар (рис. 5). Рыжевато-кварц, соответственно, имеет более высокие РТ-параметры кристаллизации.

По результатам газовой хроматографии (табл. 2) определено, что содержание воды составляет 924 моль/кг в рудоносном кварце и вдвое выше в

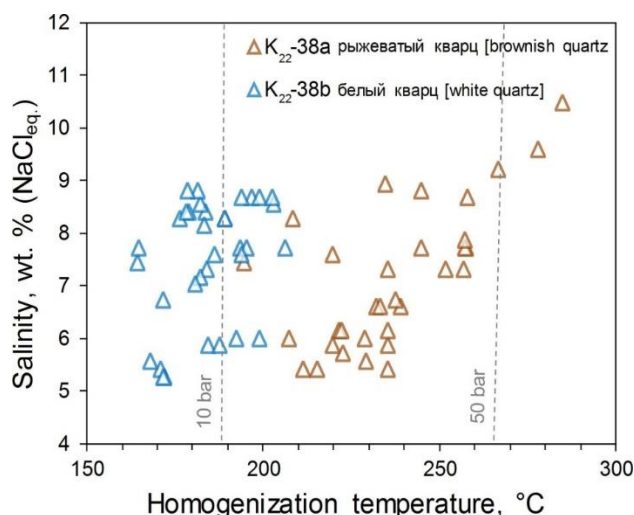


Рис. 5. Диаграмма с температурами гомогенизации и солёностью флюидных включений в кварце из золоторудного проявления Билян-Тау. Изобары показаны по [13, 14].

[Fig. 5. Homogenization temperature vs. salinity plot for fluid inclusions in vein quartz from the Bilyan-Tau gold occurrence. Iso-bars taken from [13, 14].]

безрудном – 1780 моль/кг. Главным летучим компонентом во флюиде является CO₂ с содержанием 27.2–29.4 мкг/г, содержание углеводородов умеренно низкое, причём в рудоносном кварце меньше метана и больше тяжёлых углеводородов, чем в безрудном. Количество азота меньше предела обнаружения.

Табл. 2. Газовый состав флюидных включений в кварце из рудопроявления Билян-Тау
[Table 2. Gas composition of fluid inclusions in quartz from the Bilyan-Tau ore occurrence]

Образцы [Samples]	Тип жилы [Vein quartz type]	N ₂	CO ₂	H ₂ O	CH ₄	HG	CO ₂ /CH ₄
K ₂₂ -38a	рыжевато-кварцевый рудоносный [brownish ore-bearing]	b.d.l.	29.4	924	3.8	1.3	7.7
K ₂₂ -38b	белый безрудный [white barren]	b.d.l.	27.2	1780	6.2	0.6	4.4

*HG – тяжёлые углеводороды (C₂H₄, C₃H₆, and C₃H₈), b.d.l. – ниже предела обнаружения.
[HG – heavy hydrocarbons (C₂H₄, C₃H₆, and C₃H₈) – below the detection limit]

Изотопия кислорода и серы

Для изучения изотопного состава кислорода анализировались те же пробы рыжевато-кварцевой и белой кварцевых жил. Значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ в них составили соответственно 17.4 и 18.2 ‰. Изотопный состав кислорода во флюиде был рассчитан по уравнению $\delta^{18}\text{O}_{\text{quartz}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}} = 3.38 \times 10^6 / T^2 - 3.40$ [15]. В расчётах использовались средние значения температур гомогенизации по каждой пробе, пересчитанные в °K. Рассчитанные значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$ составляют 7.8 ‰ в рыжевато-кварцевом кварце и 5.5 ‰ в белом кварце. Эти значения полностью отвечают магматическому флюиду (рис. 6а).

Изотопный состав серы измерялся по пяти минеральным монофракциям (табл. 3). Значения $\delta^{34}\text{S}$ укладываются в узкий диапазон -2.7...-1.8 ‰, причём в обр. К₂₃-38b минералы имеют более утяжелённый изотопный состав серы, нежели в обр. К₂₃-38а, характеризу-

ющемся более высокой температурой образования. Такие величины отвечают магматическому источнику серы (рис. 6б).

Обсуждение результатов

Кварцево-жильные месторождения золота генетически подразделяются на 1) орогенные (orogenic) и 2) связанные с интрузиями (intrusion-related) [18, 19]. В обоих случаях основным механизмом является внедрение интрузии, либо являющейся термохимическим агентом (для 1 типа), либо непосредственным источником рудоносных флюидов (для 2 типа). Согласно [20] размеры минерализованных кварцевых жил зависят от размеров интрузивного тела-источника. Чаще всего главным агентом является гранитоидная интрузия, тогда как роль габброидного магматизма обычно игнорируется. Считается, что такие породы как габбро не

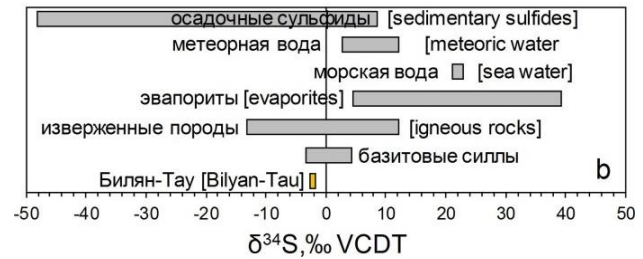
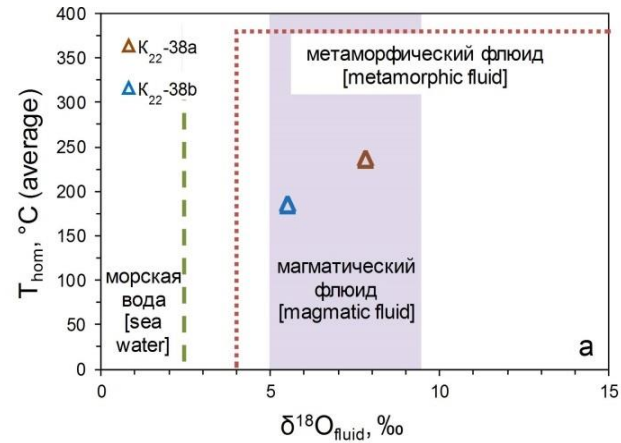


Рис. 6. Изотопный состав кислорода в кварце (a) и серы в сульфидах и оксидах (b) рудопроявления Билиан-Тау. Значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ в разных эталонах взяты из [16], $\delta^{34}\text{S}, \text{‰ VCDT}$ – из [17].
[Fig. 6. Isotopic composition of oxygen in quartz (a) and sulfur in sulfides and oxides (b) of the Bilyan-Tau ore occurrence. The values of $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ in different standards are taken from [16], $\delta^{34}\text{S}, \text{‰ VCDT}$ – from [17].]

Табл. 3. Изотопный состав серы в минералах из кварцевых жил рудопроявления Билиан-Тау
[Table 3. Isotopic composition of sulfur in minerals from quartz veins of the Bilyan-Tau ore occurrence]

Образцы [Samples]	K _{23-38a}			K _{23-38b}	
Минерал [Mineral]	фаза Fe ₂ SO ₅ [phase Fe ₂ SO ₅]	Арсенопирит [Arsenopyrite]	Халькопирит [Chalcopyrite]	сернистый гётит [sulfur goethite]	Арсенопирит [arsenopyrite]
Величина [Value]	-2.4	-2.3	-2.7	-1.9	-1.8
$\delta^{34}\text{S}, \text{‰ VCDT}$					

могут являться источником кварцевых жил. Результаты, представленные в этой работе, а также в предыдущих наших исследованиях [4], показали, что габброидный магматизм также является важным для образования кварцево-жильных месторождений золота. Действительно, «прямое» получение кварцевых жил из флюидов, отделённых от габбрового массива проблематично, в связи с чем мы предполагаем участие в рудообразовании и вмещающих интрузии пород. Таким образом, рудопроявление Билиан-Тау вероятно отвечает орогенному типу месторождений золота.

На рудопроявлении Билиан-Тау главным агентом является габбровая интрузия худолазовского комплекса, в экзоконтактовой зоне которой возникла золото-сульфидная минерализация. Сами кварцевые жилы и наличие углеводородов во флюидных включениях свидетельствуют об участии в рудообразовании вмещающих вулканогенно-осадочных пород. Этому не противоречат геохимические индикаторы (величины U/Th, Y/Ho, Y/Nb, использующиеся при интерпретации источников [21–23], но стоит отметить, геохимия и интрузивных, и вмещающих их пород, не контрастна. Изотопный состав кислорода в кварце и серы в разных S-содержащих минералах свидетельствует о доминирующей роли магматогенного источника вещества руд, в особенности Au, Cu, Zn, Fe и др. металлов. Малый размер габбровой интрузии по всей видимости обусловил и малый масштаб золотого оруденения. Такая модель формирования позволяет постановить, что возраст рудопроявления близок к возрасту габбровой интрузии (т.е. в районе 325–329 млн лет).

Диапазон температур гомогенизации и солёности

флюидных включений из рыжевато-оруденосного кварца вполне типичны для кварцево-жильных месторождений золота [24]. Рыжеватый кварц образовался при более высокой температуре чем белый при той же солёности флюида, т.е. можно констатировать резкое снижение продуктивности флюидов при падении температуры ниже 210°C и соответственно – давления примерно ниже 20 бар (рис. 5).

Согласно проведённым исследованиям, мы выделяем три стадии рудной минерализации. Самая ранняя, представленная арсенопиритом и полисульфидной ассоциацией, является главной. В нашем представлении, именно в эту стадию отлагалось также и золото. По арсенопиритовому термометру [25, 26] рассчитан температурный диапазон 358–450°C (As 30.05–33.16 ат. %). Вторая стадия (промежуточная) отвечает образованию незначительного количества титанита и рутила. Согласно термометрии хлорита [27], образующего сростания с титанитом, температура формирования этой стадии составляет 260–300°C. Наличие кальцита внутри кварцевых жил свидетельствует о смене более окислительных условий на более восстановительные в процессе роста жил. Поздняя стадия, связанная с замещением ранних сульфидов гётитом и фазой Fe-S-O состава, вероятно, отвечает переходу от низкотемпературных гидротермальных условий к окислительным гипергенным.

Выводы

- Кварцево-жильное проявление Билиан-Тау является одним из типичных коренных источников золота в Худолазовской мульде Южного Урала, внутри

которой разрабатываются неоген-четвертичные россыпные месторождения золота;

- Формирование золоторудного проявления Билян-Тау связано с внедрением габбровой интрузии худолазовского комплекса (325–329 млн лет) в туфогенные породы биягодинской свиты (D_3f);

- Рудоносные кварцевые жилы образовались из магматогенного флюида (отделённого от габбровой интрузии) при участии вмещающих туфогенных пород по системе разрывных нарушений СВ простирания, типичной для всей Худолазовской мульды;

- Диапазон температур рудообразования, согласно температурам гомогенизации флюидных включений и термометрии арсенопирита и хлорита, составлял 200–450°C, давление – 10–50 бар;

- Выделены три стадии рудного минералообразования: 1) ранняя полисульфидная с арсенопиритом, 2) силикатно-оксидная, 3) гидроксидная.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серавкин И. Б., Знаменский С. Е., Косарев А. М. Разрывная тектоника и рудоносность Башкирского Зауралья. Уфа: Уфимский полиграфкомбинат, 2001. 318 с.
2. Салихов Д. Н., Ковалев С. Г., Беликова Г. И., Бердников П. Г. Полезные ископаемые Республики Башкортостан (золото). Уфа: Экология, 2003. 222 с.
3. Rakhimov I. R., Saveliev D. E., Shagalov E. S., Ankusheva N. N., Pankrushina E. A. Geology, Mineralogy, Geochemistry, and Formation Conditions of the Tukan Gold Deposit, Khudolaz Trough, South Urals // *Geol. Ore Depos.* 2022. Vol. 64 (Suppl. 2). P. 141–155. DOI: 10.1134/S1075701522100063
4. Rakhimov I. R., Ankusheva N. N., Samigullin A. A., Shanina S. N. Origin and Evolution of Ore-Forming Fluids at the Small-Sized Gold Deposits in the Khudolaz Area, Southern Urals // *Minerals*. 2023. Vol. 13. 781. DOI: 10.3390/min13060781.
5. Davis D. W., Lowenstein T. K., Spenser R. J. Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O and CaCl₂-NaCl-H₂O // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990. Vol. 54. P. 591–601. DOI: 10.1016/0016-7037(90)90355-O
6. Spenser R. J., Moller N., Weare J. N. The prediction of mineral solubilities in mineral waters: A chemical equilibrium model for the Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄ system at temperatures below 25°C // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990. Vol. 54. P. 575–590. DOI: 10.1016/0016-7037(90)90354-N
7. Roedder E. Fluid Inclusions // *Mineral. Soc. Am.* 1984. Vol. 12. P. 644.
8. Bodnar R. J., Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions. In *Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications* // *Virginia Polytechnic Institute and State University Press*. Blacksburg, VA, USA. 1994. Vol. 32. P. 117–130.
9. Sharp Z. D. A laser-based microanalytical method for the in situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990. Vol. 54. P. 1353–1357. DOI: 10.1016/0016-7037(90)90160-M
10. Салихов Д. Н., Холоднов В. В., Пучков В. Н., Рахимов И. Р. Магнитогорская зона Южного Урала в позднем палеозое: магматизм, флюидный режим, металлогения, геодинамика. М: Наука, 2019. 392 с.
11. Варганов С. Г. Отчёт по теме: Обобщение результатов геологоразведочных и поисковых работ по россыпям Баймакского и Зилаирского золотоносных районов БАССР. Уфа: ТФГИ, 1970.
12. Lyubetskaya T., Korenaga J. Chemical composition of earth's primitive mantle and its variance // *Journal of geophysical research*. 2007. Vol. 112. P. 1–21. DOI:10.1029/2005JB004224
13. Driesner T., Heinrich C. A. The system H₂O–NaCl. Part I: Correlation formulae for phase relations in temperature–pressure–composition space from 0 to 1000 C, 0 to 5000 bar, and 0 to 1 XNaCl // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2007. Vol. 71. P. 4880–4901. DOI: 10.1016/j.gca.2006.01.033
14. Gatsé Ebotehouna C., Xie Y., Adomako-Ansah K., Pei L. Fluid Inclusion and Oxygen Isotope Characteristics of Vein Quartz Associated with the Nabebe Iron Deposit, Republic of Congo: Implications for the Enrichment of Hypogene Ores // *Minerals*. 2019. Vol. 9. P. 677. DOI: 10.3390/min9110677
15. Clayton R. N., O'Neil J. R., Mayeda T. K. Oxygen isotope exchange between quartz and water // *J. Geophys. Res.* 1972. Vol. 77. P. 3057–3067.
16. Sheppard S. M. F. Characterization and isotopic variations in natural water // *Rev. Mineral.* 1986. Vol. 16. P. 165–183.
17. Krouse H. R., Grinenko V. A. Stable isotopes in the assessment of natural and anthropogenic sulfur in the environment // *SCOPE. John Wiley & Sons Ltd*. 1991.
18. Groves D. I., Goldfarb R. J., Gebre-Mariam M., Hagemann S. G., Robert F. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types // *Ore Geol. Rev.* 1998. Vol. 13. P. 7–27. DOI: 10.1016/S0169-1368(97)00012-7
19. Hart C. J. R., Goldfarb R. J. Distinguishing intrusion-related from orogenic gold systems // *In Proceedings of the Australian Institute of Mining and Metallurgy, New Zealand Minerals Conference*. 2005. P. 125–133.
20. Ridley J. R., Diamond L. W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models // *Gold in 2000. SEG Reviews*. 2000. Vol. 13. P. 141–162.
21. Cao Y., Li S., Yao M., Zhang H. Significance of quartz REE geochemistry, Shihu gold deposit, western Hebei Province, North China, using LA-ICP-MS // *Front. Earth Sci. in China*. 2010. Vol. 4. P. 337–344. DOI: 10.1007/s11707-010-0136-z
22. Abedini A., Calagari A. A., Naseri H. Mineralization and REE geochemistry of hydrothermal quartz and calcite of the Helmesi vein-type copper deposit, NW Iran // *Neues Jahrb. Geol. Paläontologie Abh.* 2016, Vol. 281. P. 123–134. DOI: 10.1127/njgpa/2016/0591
23. Абрамов Б. Н., Калинин Ю. А., Боровиков А. А. Итакинское золоторудное месторождение: изотопный состав, вероятные источники рудного вещества (Восточное Забайкалье) // *Геосферные исследования*. 2022. № 2. С. 6–22. DOI: 10.17223/25421379/23/1
24. Wilkinson J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // *Lithos*. 2001. Vol. 55. P. 229–272. DOI: 10.1016/S0024-4937(00)00047-5
25. Kretschmar U., Scott S. D. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe–As–S and their application // *Can. Mineral.* 1976. Vol. 14. P. 364–386.
26. Sharp Z. D., Essene E. J., Kelly W. C. A reexamination of the arsenopyrite geothermometer: Pressure considerations and applications to natural assemblages // *Can. Mineral.* 1985. Vol. 23. P. 517–534.
27. Jowett E. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer // *In Proceedings of the GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting*. 1991.

Formation of the Bilyan-Tau gold ore occurrence (Khudolaz trough, Southern Urals)

©2024 I. R. Rakhimov¹✉, A. M. Vasiliev², A. A. Samigullin¹

¹*Institute of Geology, 16/2 Karl Marx st.,
450077, Ufa, Russian Federation*

²*Ufa University of Science and Technology,
32 Zaki Validi st., 450076, Ufa, Russian Federation*

Abstract

Introduction: lode gold deposits are of great economic importance. Within the Khudolaz trough in the Southern Urals, many small gold deposits and occurrences are distributed. They are the primary sources of placer gold deposits currently being developed. The genesis of these deposits has been poorly studied, and therefore the sources of ore-forming fluids are unclear.

Methodology: the mineral composition of ore-bearing veins was studied using a scanning electron microscope. To determine the sources of ore-forming fluids, the isotopic composition of sulfur in sulfides and arsenopyrite, the isotopic composition of oxygen in quartz, and the gas composition of fluid inclusions were determined. The PT parameters of the system were studied using microthermometry of fluid inclusions and mineral geothermometers.

Results and conclusions: the formation of the Bilyan-Tau gold ore occurrence is associated with the Khudolaz complex gabbro intrusion (325–329 Ma) into the tuffaceous rocks of the Biyagoda Formation (D₃f). Ore-bearing quartz veins were formed from magmatic fluid (separated from the gabbro intrusion) with the participation of host tuffaceous rocks along a system of NE-trending faults, typical of the entire Khudolaz trough. The temperature range of ore formation, according to the homogenization temperatures of fluid inclusions and thermometry of arsenopyrite and chlorite, was 200–450°C, the pressure range of 10–50 bar. Three stages of ore formation have been identified: 1) early polysulfide including arsenopyrite, 2) silicate-oxide, 3) late hydroxide. The deposition of gold in the ore is associated with the first highest temperature stage. The totality of data allows us to classify Bilyan-Tau as an orogenic-type gold deposit.

Key words: gold occurrence, genesis, mineralogy, isotopy, fluid inclusions.

Funding: The research was supported by State Budget Theme no. FMRS-2022-0012 the Russian Science Foundation grant no. 22–77–10049.

For citation: Rakhimov I. R., Vasiliev A. M., Samigullin. A. A. Conditions for the formation of the Bilyan-Tau gold ore occurrence (Khudolazovskaya trough, Southern Urals) // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya –Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 3, pp. 21–31. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/21-31>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

REFERENCES

1. Seravkin I. B., Znamenskii S. E., Kosarev A. M. *Razryvnaya tektonika i rudnost' Bashkirskogo Zaural'ya* [Fracture Tectonics and Ore Content of the Bashkir Trans-Urals]. Ufa, Ufimskiy poligrafkombinat publ., 2001. 318 p. (In Russ.)
2. Salikhov D. N., Kovalev S. G., Belikova G. I., Berdnikov P. G. *Poleznye ickopaemys Respubliki Bahkortostan (zoloto)* [Minerals of the Republic of Bashkortostan (Gold)]. Ufa, Ecology publ., 2003. 222 p. (In Russ.)
3. Rakhimov I. R., Saveliev D. E., Shagalov E. S., Ankusheva N. N., Pankrushina E. A. Geology, Mineralogy, Geochemistry, and Formation Conditions of the Tukan Gold Deposit, Khudolaz Trough, South Urals. *Geol. Ore Depos.*, 2022, vol. 64 (Suppl. 2), pp. 141–155. DOI: 10.1134/S1075701522100063
4. Rakhimov I. R., Ankusheva N. N., Samigullin A. A., Shanina S. N. Origin and Evolution of Ore-Forming Fluids at the Small-Sized Gold Deposits in the Khudolaz Area, Southern Urals. *Minerals*, 2023, vol. 13, 781. DOI: 10.3390/min13060781.
5. Davis D. W., Lowenstein T. K., Spenser R. J. Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O and CaCl₂-NaCl-H₂O. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1990, vol. 54, pp. 591–601. DOI: 10.1016/0016-7037(90)90355-O
6. Spenser R. J., Moller N., Weare J. N. The prediction of mineral solubilities in mineral waters: A chemical equilibrium model for the Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄ system at temperatures below 25°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1990, vol. 54, pp. 575–590. DOI: 10.1016/0016-7037(90)90354-N
7. Roedder E. Fluid Inclusions. *Mineral. Soc. Am.*, 1984, vol. 12, 644 p.
8. Bodnar R. J., Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions. In *Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications*; Virginia Polytechnic Institute and State University Press: Blacksburg, VA, USA, 1994, vol. 32, pp. 117–130.
9. Sharp Z. D. A laser-based microanalytical method for the in situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1990, vol. 54, pp. 1353–1357.
10. Salikhov D. N., Kholodnov V. V., Puchkov V. N., Rakhimov I. R. *Magnitogorskaya zona Yuzhogo Urala v pozdnem paleozoe: magmatizm, flyuidnyi rezhim, geodinamika*. [Magnitogorsk zone of the Southern Urals in the Late Paleozoic: magmatism, fluid regime, metallogeny, geodynamics]. Moscow, Nauka publ., 2019, 392 p. (In Russ.)
11. Varganov S. G. *Otchyot po teme: Obobschenie rezul'tatov geologorazvedochnykh i poiskovykh rabot po rossyptom Baimakskogo i Zilairskogo zolotonosnykh raionov BASSR* [Report on the Topic: Generalization of the Results of Geological Exploration and Prospecting Work on the Placers of the Baimak and Zilair Gold-Bearing Districts of the BASSR]. Ufa, BGF publ., 1970. (In Russ.)
12. Lyubetskaya T., Korenaga J. Chemical composition of earth's primitive mantle and its variance. *Journal of geophysical research*, 2007, vol. 112, pp. 1–21. DOI: 10.1029/2005JB004224
13. Driesner T., Heinrich C. A. The system H₂O–NaCl. Part I: Correlation formulae for phase relations in temperature–pressure–composition space from 0 to 1000 °C, 0 to 5000 bar, and 0 to 1 XNaCl. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2007, vol. 71, pp. 4880–4901. DOI: 10.1016/j.gca.2006.01.033
14. Gatsé Ebotehoua C., Xie, Y., Adomako-Ansah K., Pei L. Fluid Inclusion and Oxygen Isotope Characteristics of Vein Quartz Associated with the Nabeba Iron Deposit, Republic of Congo: Implications for the Enrichment of Hypogene Ores. *Mineral*, 2019, vol. 9, 677 p. DOI: 10.3390/min9110677
15. Clayton R. N., O'Neil J. R., Mayeda T. K. Oxygen isotope exchange between quartz and water. *J. Geophys. Res.*, 1972, vol. 77, pp. 3057–3067.
16. Sheppard S. M. F. Characterization and isotopic variations in natural water. *Rev. Mineral.*, 1986, vol. 16, pp. 165–183.
17. Krouse H. R., Grinenko V. A. Stable isotopes in the assessment of natural and anthropogenic sulfur in the environment, SCOPE. John Wiley & Sons Ltd., London, 1991.
18. Groves D. I., Goldfarb R. J., Gebre-Mariam M., Hagemann S. G., Robert, F. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geol. Rev.*, 1998, vol. 13, pp. 7–27. DOI: 10.1016/S0169-1368(97)00012-7
19. Hart C. J. R., Goldfarb R. J. Distinguishing intrusion-related from orogenic gold systems. In *Proceedings of the Australian Institute of Mining and Metallurgy, New Zealand Minerals Conference*, 2005, pp. 125–133.
20. Ridley J. R., Diamond L. W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models. *Gold in 2000. SEG Reviews.*, 2000, vol. 13, pp. 141–162.
21. Cao Y., Li S., Yao M., Zhang H. Significance of quartz REE geochemistry, Shihu gold deposit, western Hebei Province, North China, using LA-ICP-MS. *Front. Earth Sci. in Chin*, 2010, vol. 4, pp. 337–344. DOI: 10.1007/s11707-010-0136-z
22. Abedini A., Calagari A. A., Naseri H. Mineralization and REE geochemistry of hydrothermal quartz and calcite of the Helmesi vein-type copper deposit, NW Iran. *Neues Jahrb. Geol. Paläontologie Abh.*, 2016, vol. 281, pp. 123–134. DOI: 10.1127/njgpa/2016/0591
23. Abramov B. N., Kalinin Y. A., Borovikov A. A. Itakinskoe zolotorudnoe mestorozhdenie: izotopnyi sostav, veroyatnye istochniki rudnogo veshchestva (Vostochnoe Zabaikalie) [Itakin gold deposit: isotopic composition, probable sources of ore matter (Eastern Transbaikalia)]. *Geosph. Res.*, 2022, vol. 2, pp. 6–22. DOI: 10.17223/25421379/23/1
24. Wilkinson J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos.*, 2001, vol. 55, pp. 229–72. DOI: 10.1016/S0024-4937(00)00047-5
25. Kretschmar U., Scott S. D. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe–As–S and their application. *Can. Mineral.*, 1976, vol. 14, pp. 364–386.
26. Sharp Z. D., Essene E. J., Kelly W. C. A reexamination of the arsenopyrite geothermometer: Pressure considerations and applications to natural assemblages. *Can. Mineral.*, 1985, vol. 23, pp. 517–534.
27. Jowett E. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer. In *Proceedings of the GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting.*, 1991.

Рахимов Ильдар Рашитович, к.г.-м.н. с.н.с., ИГ УФИЦ РАН, Уфа, Российская Федерация; e-mail: rigel92@mail.ru; ORCID 0000-0002-2808-2402

Васильев Андрей Максимович, студент, УУНИТ, Уфа, Российская Федерация; e-mail: andvas02@gmail.com, ORCID 0009-0003-9632-7605

Самигуллин Айдар Альфредович, аспирант, м.н.с. ИГ УФИЦ РАН, Уфа, Российская Федерация; e-mail: samigullinai-dar85@gmail.com; ORCID 0000-0003-3089-0799

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Ildar R. Rakhimov, PhD in Geol.-Min., Senior Researcher: IG UFRS RAS, Ufa, Russian Federation; e-mail: rigel92@mail.ru, ORCID 0000-0002-2808-2402

Andrey M. Vasiliev, Student, Ufa UUNIT, Ufa, Russian Federation; e-mail: andvas02@gmail.com, ORCID 0009-0003-9632-7605

Aidar A. Samigullin, Aspirant, Junior research assistant, IG UFRS RAS, Ufa, Russian Federation; e-mail: samigullinai-dar85@gmail.com; ORCID 0000-0003-3089-0799

All authors have read and approved the final manuscript.