

Минералогические и геохимические особенности Восточно-Акташского рудопоявления золота на Южном Урале

©2021 А. А. Шарипова[✉], С. В. Мичурин, А. М. Карамова, Г. М. Казбулатова

*Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
ул. К. Маркса, 16/2, 450077, Уфа, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: В последнее время возрос интерес к минералогическим исследованиям на месторождениях золота, поскольку корово-мантийное взаимодействие часто находит отражение в минеральном составе руд. В статье приводятся результаты минералогических, микротермометрических и изотопно-геохимических исследований Восточно-Акташского золото-кварцевого рудопоявления, расположенного на юге Башкирского мегантиклинория (БМА) в Авзянском рудном районе (АРР).

Методы: Минералогическое изучение проведено с помощью рентгенофазового анализа. Химический состав образцов определяли рентгенофлуоресцентным (РФА), атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой (ИСП АЭС) и фотометрическим анализами. Содержания Au и Ag определяли атомно-абсорбционным анализом. Изотопный состав серы определяли на масс-спектрометре МИ-1201 (Россия), изотопный состав углерода и кислорода – на масс-спектрометре DELTA V Advantage (Германия). Микротермометрия флюидных включений кварца выполнена на термокриостатике Linkam THM5C-600.

Результаты и обсуждения: Рудоносные пирит-анкерит-кварцевые и кварцевые жилы по микротермометрическим характеристикам ($T_{\text{эвт}} = -34.8 \dots -28.4^\circ\text{C}$; $T_{\text{гом}} = 228-382^\circ\text{C}$) сходны с жильным кварцем из месторождений золота АРР и отличаются от метаморфогенного кварца, образованного в результате региональных постдиагенетических преобразований рифейских отложений региона. Сера в рудопоявлении обнаруживает наибольшие коэффициенты корреляции с Rb, Ba, K_2O , V, F, Fe_2O_3 , Ni, Sc, а из минералов – с хлоритом и слюдой. С золотом сера обнаруживает слабую отрицательную связь. Значения $\delta^{34}\text{S}$ пиритов находятся в интервале от 11.3 до 14.0‰. Изотопные составы углерода и кислорода анкеритов равны соответственно $-5.0 \dots -3.7\%$ и $19.2 \dots 20.9\%$, а вмещающих известняков катавской свиты – 1.4 и 20.0‰.

Выводы: Формирование Восточно-Акташского рудопоявления было обусловлено глубинной миграцией флюидов, которые согласно изотопным данным по анкериту, сингенетичному жильному кварцу, были связаны с магматическим источником. Расчеты давления флюидов по температуре гомогенизации CO_2 в ФВ кварца Восточно-Акташского рудопоявления дают значения в 1280–1420 бар, что предполагает образование жильного кварца на глубине около 4 км. Температуры флюидов составляли 250–400°C. Пириты в рудопоявлении образовались с участием корового источника серы. Отсутствие корреляции между содержаниями золота в породах и концентрацией в них серы, а также следовые содержания Au в пиритовых концентратах свидетельствуют о том, что золото в рудопоявлении не связано с сульфидами.

Ключевые слова: золото, кварц, микротермометрические характеристики, Авзянский рудный район, Южный Урал.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Шарипова Айсылу Азатовна, e-mail: ausselsuazatovna@mail.ru

Источник финансирования: исследования выполнены в рамках темы № 0246-2019-0085 государственного задания ИГ УФИЦ РАН.

Для цитирования: Шарипова А. А., Мичурин С. В., Карамова А. М., Казбулатова Г. М. Минералогические и геохимические особенности Восточно-Акташского рудопроявления золота на Южном Урале // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2021. №3. С. 38–49. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.3/3649>

Введение

В последнее время возрос интерес к минералогическим исследованиям в месторождениях золота. Помимо изотопных и геохимических методов начали использоваться минералогические индикаторы, поскольку корово-мантийное взаимодействие часто находит отражение в минеральном составе руд [1, 2]. Для золоторудных объектов в отложениях рифея АРР БМА к таким информативным минералам относятся золото, жильные кварц и карбонатные минералы, а также сульфиды и сульфоарсениды. В статье приводятся результаты изучения Восточно-Акташского рудопроявления золота. Рудопроявление расположено в южном окончании АРР, для которого в настоящее время не решена проблема генезиса месторождений и рудопроявлений золота, и отсутствует единая точка зрения относительно источников рудного вещества и времени проявления золоторудного процесса. Это диктует необходимость проведения в месторождениях золота АРР детальных минералогических и изотопно-геохимических исследований, обуславливает их актуальность. Решение проблемы образования рудных концентраций металлов во многом определяет перспективы не только конкретного месторождения, но и рудных полей и районов, а разработка достоверной модели рудообразования дает наиболее важную информацию для выявления перспективных рудоносных участков.

Геологическое положение

Восточно-Акташского рудопроявления

Западно- и Восточно-Акташская рудные зоны (рис. 1), граничащие по Караташскому региональному разлому, входят в состав Акташского рудного поля, расположенного в отложениях среднего и верхнего рифея на юге Башкирского мегантиклинория в 15–20 км юго-западнее пос. Верхний Авзян [3, 4, 5]. Западно-Акташская рудная зона объединяет Западно-Акташское рудопроявление золота и Куртмалинское месторождение бурых железняков. В центральной части Западно-Акташской рудной зоны известны выходы баритовых жил и точки медной минерализации в песчаниках с содержанием Cu до 6.17 мас. % [6]. В южной части Акташского рудного поля расположено отработанное Кальтивское месторождение россыпного золота.

Восточно-Акташская рудная зона включает Восточно-Акташское рудопроявление малосульфидного золотокварцевого типа и месторождение россып-

ного золота Акташское, расположенное по ручьям Скотский и Акташский (см. рис. 1), отработанное в конце XIX–начале XX века (добыто около 65 кг золота). Восточно-Акташское рудопроявление (см. рис. 2) приурочено к дайке габбродиоритов(?), прорывающей верхнерифейские известняки катавской свиты (элементы залегания дайки – аз. пад. $75\text{--}90^\circ \angle 50\text{--}80^\circ$, известняков – аз. пад. $80\text{--}100^\circ \angle 60\text{--}70^\circ$). Рудопроявление представлено золотосодержащими кварцевыми, кварц-альбит-кальцитовыми, альбит-кальцитовыми, пирит-анкерит-кварцевыми жилами, локализующимися в дайке габбродиоритов, в ее экзо- и эндоконтактах [10, 11]. Дайка прослеживается в субмеридиональном направлении на расстояние свыше 3 км (см. рис. 1), ее мощность по простиранию изменчива и варьирует от 2.1 до 10.2 м, в среднем составляя около 6 м [9]. Интрузивные породы сильно изменены, их условно относят к габбродиоритам [4], поскольку в них существенно нарушен первичный баланс петрогенных оксидов и широко развиты вторичные гидротермально-метасоматические минералы. Rb-Sr возраст габбродиоритов составляет 1065 ± 31 млн лет [12].

Вмещающие известняки на контакте с дайкой мраморизованы и окварцованы, изредка скарнированы. В одном случае в них обнаружены зерна розоватобурого граната и прожилки бледно-фиолетового флюорита [9]. По данным указанных исследователей, для известняков характерна альбитизация, наличие жил, гнезд и будин кварц-карбонатного, кварц-альбитового составов, иногда с вкрапленниками халькопирита.

В рудопроявлении отмечаются три генерации кварца. Кварц первой генерации (кварц-1) образует маломощные жилы (2–5 см), располагающиеся параллельно контакту в эндо- и экзоконтактной зоне габбродиоритов с вмещающими известняками [11, 12]. Жилы первой генерации по минералогическому составу изменчивы. Как отмечалось ранее [9] и согласно нашим исследованиям [10], они представлены не только кварцевыми, но также кварц-альбит-кальцитовыми и альбит-кальцитовыми жилами. Разрозненные кварцевые жилы второй генерации (кварц-2) мощностью 5–15 см развиваются в габбродиоритах. В жилах этой генерации в зальбандах почти всегда присутствует анкерит и вкрапленность пирита. Третья генерация (кварц-3) образует в габбродиоритах жилы мощностью до 1.5 м, которые не прослеживаются во вмещающих известняках. Согласно результатам опробования [9], рудоносность кварца-3 резко увеличивается в эндоконтактах дайки.

Золото в рудопроявлении распределено неравномерно. В экзо- и эндоконтактных зонах среднее содержание золота составляет 1.1 г/т ($n=49$) при максимальных концентрациях соответственно 5.5 и 16 г/т [9]. В диоритах содержание золота обычно не превышает 0.2–0.4 г/т, достигая в отдельных пробах 6.5 г/т. Мощность экзо- и эндоконтактных золотосодержащих зон составляет около 0.5–1.5 м, их рудоносность подтверждена опробованием по простиранию дайки на расстояние около 1.1 км [9].

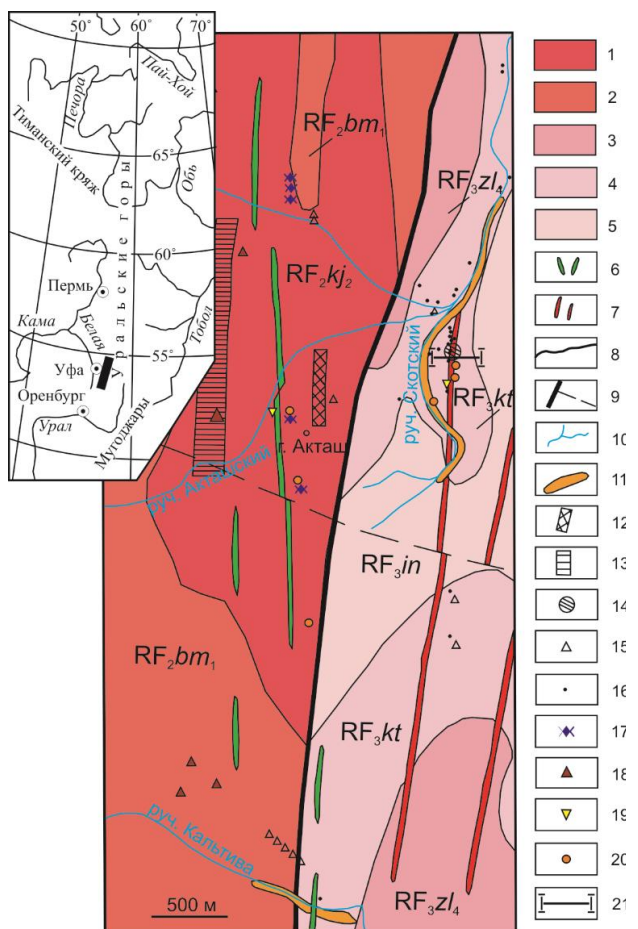


Рис. 1. Геологическая схема Акташского рудного поля (по [7] с дополнениями из материалов [4, 6, 8, 9]). Условные обозначения: 1–2 – отложения среднего рифея, свиты: 1 – кужинская, верхняя подсвита (RF₂kj₂), 2 – биктимирская, нижняя подсвита (RF₂bm₁); 3–5 – отложения верхнего рифея, свиты: 3 – зильмердакская (RF₃zl₄); 4 – катавская (RF₃kt), 5 – инзерская (RF₃in); 6–7 – дайки магматических пород: 6 – габбро-долериты; 7 – кварцевые диориты (по [8]); 8 – границы свит; 9 – тектонические нарушения разного порядка; 10 – ручьи; 11 – месторождения россыпного золота; 12 – зона Западно-Акташского рудопрооявления золота; 13 – зона Куртмалинского месторождения бурых железняков; 14 – Восточно-Акташское рудопрооявление золота; 15 – выходы жильного кварца; 16 – точки отбора проб; 17 – выходы баритовых жил и баритизация в песчаниках; 18 – выходы бурых железняков, 19 – точки флюоритовой минерализации, 20 – точки медной минерализации, 21 – линия геологического разреза (рис. 2).

[Fig. 1. Geological scheme of the Aktash ore field (according to [7] with additions from [4, 6, 8, 9]). Legend: (1–2) — deposits of the Middle Riphean, formations: (1) — Kuzhinsky, upper subformations (RF₂kj₂), (2) — Biktimir, lower subformations (RF₂bm₁); (3–5) — deposits of the Upper Riphean, formations: (3) — Zilmerdak (RF₃zl₄), (4) — Katav (RF₃kt), (5) — Inzerskaya (RF₃in); (6–7) — dykes of igneous rocks: (6) — gabbrodolerites, (7) — quartz diorites (according to [8]); (8) — the boundaries of the formations; (9) — tectonic disturbances of various orders; (10) — streams; (11) — placer gold deposits; (12) — zone of the West Aktash gold ore deposits; (13) — zone of the Kurtmalinsky brown iron ore deposit; (14) — East Aktash gold ore deposits; (15) — outcrops of quartz veins; (16) — sampling points; (17) — outcrops of barite veins and barite in sandstones; (18) — outcrops of brown iron ore; (19) — points of fluorite mineralisation; (20) — points of copper mineralisation, (21) — geological section line (fig. 2).

Translation symbols from the map: Пермь – Perm, Кама – Kama, Уфа – Ufa, Печора – Pechora, Тиманский кряж – Timan Ridge, Акташ – Aktash, Руч. Кальтивва – Kaltiva creek, Руч. Акташский – Aktash creek, Руч. Скотский – Skotskiy creek.]

Уральские горы – Ural Mountains, Урал – Ural, Мугоджары – Mugodzhjar Hills, Тобол – Tobol, Обь – Ob, Пай-Хой – Pay-Khoi, Акташ – Aktash, Руч. Кальтивва – Kaltiva creek, Руч. Акташский – Aktash creek, Руч. Скотский – Skotskiy creek.]

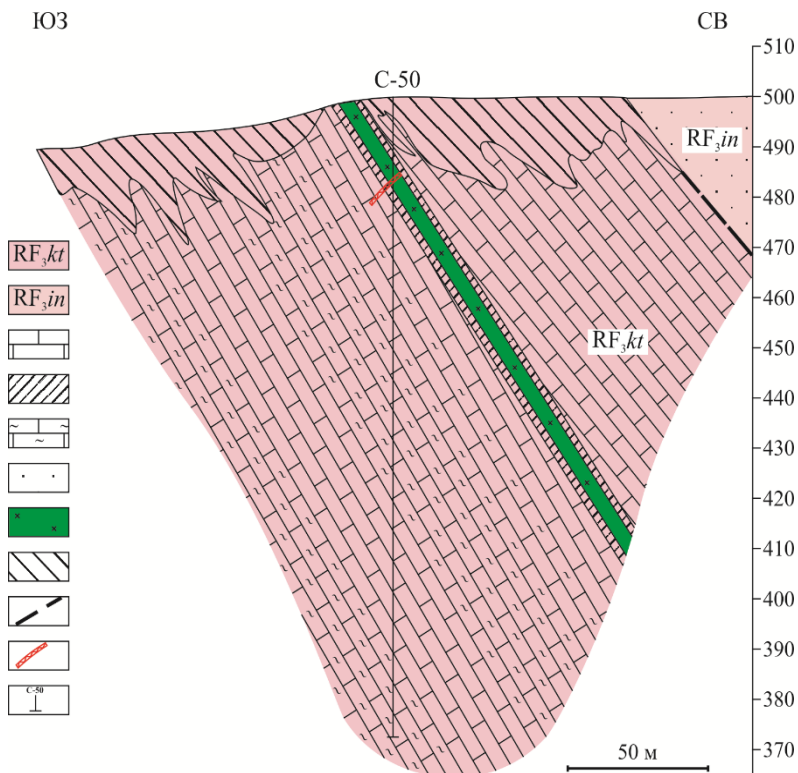


Рис. 2. Геологический разрез Восточно-Акташского рудопрооявления (по материалам В.В. Радченко [9]). Условные обозначения: 1–2 – отложения верхнего рифея, свиты: 1 – катавская (RF₃kt), 2 – инзерская (RF₃in); 3 – известняки; 4 – контактово-измененные известняки; 5 – карбонатно-глинистые сланцы; 6 – песчаники; 7 – габбродиориты; 8 – кора выветривания; 9 – разломы, 10 – кварцевая жила, 11 – скважина.

[Fig. 2. Geological section of the East Aktash ore deposits (based on the materials of V. V. Radchenko [9]). Legend: (1–2) – Upper Riphean deposits, formations: (1) – Katavian (RF₃kt), (2) – Inzerskaya (RF₃in); (3) – limestones; (4) – contact-altered limestones; (5) – carbonate-clay shale; (6) – sandstones; (7) – gabbrodiorites; (8) – weathering crust; (9) – faults, (10) – quartz vein, (11) – well.]

Методы исследований

Химический состав проб ($n=35$) и содержание в них редких элементов определяли рентгенофлуоресцентным анализом в ИГ УФИЦ РАН (аналитик В. Ф. Юлдашбаева), который проводился на спектрометре VRA-30 (Германия). Кроме того, в пробах ($n=14$) габбродиоритов, известняков, кварцевых, кварц-альбит-кальцитовых и альбит-кальцитовых жилах петрогенные (Na, Mg, Al, P, Ca, Ti, Mn, Fe) и редкие (Li, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Y, Zr, Pb) элементы определяли также атомно-эмиссионным анализом с индуктивно связанной плазмой (ИСП АЭС) в АО «ИНХП» (Уфа) на спектрометре ICPE-9000 (Shimadzu, Япония), аналитик А. М. Карамова. Предел обнаружения составлял 0.1–1 г/т. Навеска пробы составляла 0.1 г.

Определение Au и Ag ($n=13$), а также Co, Ni, Zn, Pb, Cr проводилось атомно-абсорбционным анализом на спектрофотометре Спектр-5 в ИГ УФИЦ РАН (аналитик Н. Г. Христофорова). Золото и серебро в пробах (навеска 10 г) концентрировали дифинилтиомочевинной. Предел обнаружения при измерении Au составлял 0.01 мкг/мл, Ag – 0,001 мкг/мл, Co, Ni, Zn, Pb, Cr – 1.0 мкг/мл.

Минералогический состав карбонатных пород ($n=18$) определяли рентгенофазовым анализом, который проводился в ИГ УФИЦ РАН на дифрактометре ДРОН-4 (аналитик Г. С. Ситдикова).

Во всех пробах определяли содержание фтора фотометрическим методом посредством образования ализаринкомплексоната фторида лантана (аналитик Г. М. Казбулатова). Предел обнаружения составлял 0.01 мас. %.

Определения изотопного состава серы пирита ($n=6$) выполнены на масс-спектрометре МИ-1201 в ИГ УФИЦ РАН (аналитик С. В. Мичурин). Использовался лабораторный стандарт (пирит Гайского колчеданного месторождения Южного Урала), изотопный состав серы которого определен относительно троилита меторита Сихотэ-Алинь. Воспроизводимость изотопных определений составляла ± 0.3 %.

Определение изотопного состава углерода и кислорода в карбонатах ($n=4$) выполнялось на масс-спектрометре DELTA V Advantage (Германия) в ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН (руководитель группы В. Л. Андреичев). При калибровке использовались международные стандарты NBS18 и NBS19. Значения $\delta^{13}\text{C}$ приведены относительно PDB, $\delta^{18}\text{O}$ – SMOW. Воспроизводимость определения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ составляла ± 0.2 ‰.

Микротермометрия флюидных включений кварца выполнялась в ИГГ УрО РАН (аналитик А. А. Гараева) на термокриостолке LinkamTHMSC-600. Во включениях с неоднородным солевым составом проводился перерасчет солёности в мас. % экв. NaCl по данным [13, 14].

Результаты исследований

Минералогия. Средний минералогический состав вмещающих карбонатных пород Восточно-Акташ-

кого рудопроявления, а также кварц-альбит-кальцитовых жил из экзо- и эндоконтакта габбродиоритов приводится в таблице 1. Изученные породы представлены кальцитом с примесью кварца и слюдястых минералов, а также с незначительным количеством альбита и хлорита. Отмечаются следовые содержания доломита и микроклина.

Для сравнительного анализа в таблице приводится также средний минералогический состав известняков катавской свиты в юго-западной части Башкирского мегантиклинория, в районе д. Толпарово. Как видно из приводимых данных, наименее измененные катавские известняки в районе Восточно-Акташского рудопроявления сходны по минералогическому составу с известняками катавской свиты из района д. Толпарово. Вместе с тем, в первых по сравнению со вторыми, примерно в 1.5 раза увеличиваются средние содержания всех примесных минералов: кварца, слюды, альбита и хлорита.

Геохимия. Средний химический состав габбродиоритов, вмещающих их известняков и рудоносных кварцевых, пирит-анкерит-кальцит-кварцевых, кальцит-кварцевых и кварц-альбит-кальцитовых прожилков приводится в таблице 2. Габбродиориты отличаются большими вариациями химического состава (в мас. %): $\text{SiO}_2=36.25\text{--}44.58$; $\text{TiO}_2=1.70\text{--}3.67$; $\text{Al}_2\text{O}_3=8.00\text{--}14.85$; $\text{Fe}_2\text{O}_3=10.65\text{--}16.55$; $\text{MnO}=0.10\text{--}0.20$; $\text{MgO}=1.13\text{--}4.77$; $\text{CaO}=7.17\text{--}12.33$; $\text{Na}_2\text{O}=1.35\text{--}3.75$; $\text{K}_2\text{O}=0.28\text{--}2.92$; $\text{P}_2\text{O}_5=0.48\text{--}1.05$; $\text{SO}_2=0.03\text{--}1.66$. В химическом составе рудоносных жил Восточно-Акташского рудопроявления отмечается увеличение содержания CaO в ряду от ранней (CaO=0.35 мас. % в кварце-1) к поздней генерации (CaO=16.19 мас. % в кварце-3). Довольно значительное содержание серы (до 2.3 мас. % SO_2) фиксируется в пирит-анкерит-кварцевых и кварцевых жилах второй генерации, а также в габбродиоритах (до 1.65 мас. % SO_2).

Микротермометрия. В ранней (кварц-1, обр. Б-9264) и поздней (кварц-3, обр. Б-9262) генерациях кварца (табл. 3) выделяются первичные и мнимовторичные флюидные включения (ФВ). В первичных ФВ объем газовой фазы колеблется от 10 до 40 об. %, в мнимовторичных – обычно менее или равен 10 об. %. В кварце-1 температура гомогенизации ($T_{\text{гом}}$) в первичных ФВ кварца-1 равна 228–382°C, кварца-3 – 162–298°C, в мнимовторичных соответственно – 105–137°C и 126–147°C. В ранней и поздней генерациях кварца в первичных и мнимовторичных ФВ температуры эвтектики ($T_{\text{эвт}}$) варьируют в небольшом интервале от –34,8 до –28,4°C. В первичных ФВ кварца-1 солёность (в мас. % экв. NaCl) составляет 5.4–10.7 ($T_{\text{пл. льда}} = -7.2\text{...}-3.7^\circ\text{C}$), кварца-3 – 4.2–7.5 ($T_{\text{пл. льда}} = -4.7\text{...}-2.5^\circ\text{C}$). В мнимовторичных ФВ солёность увеличивается. В кварце-1 она равна (в мас. % экв. NaCl) 12.1–15.4 ($T_{\text{пл. льда}} = -11.4\text{...}-9.3^\circ\text{C}$), в кварце-3 – 9.7–12.3 ($T_{\text{пл. льда}} = -8.5\text{...}-6.4^\circ\text{C}$). В изученных ФВ часто фиксируется наличие CO_2 , который в кварце-3 гомогенизируется при температуре 16.8–20.7°C и имеет $T_{\text{пл}} -62.8\text{...}-56.6^\circ\text{C}$.

Табл. 1. Средний минералогический состав (в %) карбонатных пород Восточно-Акташской рудной зоны
 [Table 1. Average mineralogical composition (in %) of carbonate rocks of the East Aktash ore zone]

Минерал [Mineral]	Q-Alb-Cal	Cal (0–1 м)	Cal (5–100 м)	Cal (Tolparovo)
	(2)	(7)	(9)	(14)
Кварц [Quartz]	12	13	14	10
Кальцит [Calcite]	55	64	75	81
Доломит [Dolomite]	<1	2	<1	1
Альбит [Albite]	31	12	3	2
Микроклин [Microcline]	<1	<1	<1	<1
Хлорит [Chlorite]	<1	2	2	1
Слюда [Mica]	2	6	6	4

Примечание: Q-Alb-Cal – кварц-альбит-кальцитовые жилы, субпараллельные контакту в эндо- и экзоконтактной зоне габбродиоритов. Cal (0–1 м) – известняки экзоконтактной зоны не далее 1 м от контакта с габбродиоритами. Cal (5–100 м) – известняки катавской свиты в 5–100 м от дайки габбродиоритов. Cal (Tolparovo) – известняки катавской свиты в юго-западной части Башкирского мегантиклинория в районе д. Толпарово. В скобках указано количество проанализированных образцов.
 [Note: Q-Alb-Cal – quartz-albite-calcite veins, subparallel to the contact in the endo- and exocontact zone of gabbrodiorites. Cal (0–1 m) – limestones of the exocontact zone no further than 1 m from contact with gabbrodiorites. Cal (5–100 m) – limestones of the Katav Formation 5–100 m from the gabbrodiorite dyke. Cal (Tolparovo) – limestones of the Katav Formation in the south-western part of the Bashkir meganticlinorium in the area of the village of Tolparovo. The number of samples analysed is shown in brackets.]

Табл. 2. Средние содержания петрогенных оксидов (мас. %) и редких элементов (г/т) в породах Восточно-Акташского рудопроявления
 [Table 2. Average contents of petrogenic oxides (wt. %) and rare elements (g/t) in the rocks of the East Aktash ore deposits]

Элемент [Element]	G	Q-1	Q-2	Q-3	Q-Alb-Cal	Cal (0–1 м)	Cal (5–100 м)
1	2	3	4	5	6	7	8
	(7)	(1)	(3)	(1)	(2)	(6)	(9)
SiO ₂	41.292	96.100	71.152	65.46	28.307	18.376	10.643
TiO ₂	3.244	0.018	0.335	0.060	0.258	0.204	0.115
Al ₂ O ₃	13.665	0.243	2.754	2.737	7.091	5.295	3.419
Fe ₂ O ₃	13.782	2.068	6.098	0.895	1.796	2.763	1.497
MnO	0.144	0.012	0.137	0.038	0.075	0.067	0.076
MgO	3.181	0.044	1.060	0.315	0.407	1.858	1.460
CaO	9.247	0.351	8.177	16.193	31.818	37.292	44.624
Na ₂ O	2.235	0.110	0.730	0.375	4.070	0.831	0.564
K ₂ O	1.875	0.010	0.496	0.040	0.241	1.313	0.813
P ₂ O ₅	0.764	<0.010	0.233	0.017	0.113	0.037	0.025
SO ₂	0.457	0.010	0.851	0.010	<0.010	0.013	0.016
ППП [Loss on ignition]	10.999	0.320	8.027	12.950	25.566	30.303	35.762
Сумма [Total]	100.885	99.293	100.051	99.050	99.744	98.334	99.015
Li	33	5	3	—	2	4	—
F	1264	35	225	172	79	499	176
Cl	209	—	102	—	85	94	69
Sc	19	<1	5	<1	6	4	—
V	313	2	58	12	57	16	14
Cr	17	68	20	7	28	17	3

Продолжение Табл. 2
[Continued Table 2]

1	2	3	4	5	6	7	8
Co	35	5	10	<2	5	5	4
Ni	23	4	8	<2	6	19	13
Cu	38	21	18	9	<2	14	8
Zn	140	14	25	11	17	39	30
As	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Rb	41	—	27	—	17	38	14
Sr	105	9	86	115	264	207	122
Y	24	<2	14	7	19	15	—
Zr	143	2	44	26	98	52	29
Ba	609	5	378	53	43	198	194
La	33	<2	7	<2	16	4	—
Ce	57	<2	9	<2	11	9	—
Pb	9	3	11	3	14	8	—
Au	<0.1	<0.1	0.4	<0.1	0.4	0.2	—
Ag	<0.1	<0.1	0.3	<0.1	0.1	0.1	—

Примечание: G – габбродиориты. Q-1–Q-3 – кварцевые жилы первой, второй и третьей генераций. Q-Alb-Cal – кварц-альбит-кальцитовые жилы, субпараллельные контакту в эндо- и экзоконтактной зоне габбродиоритов. Cal (0–1 м) – известняки экзоконтактной зоны не далее 1 м от контакта с габбродиоритами. Cal (5–100 м) – известняки катавской свиты в 5–100 м от дайки габбродиоритов. В скобках указано количество проанализированных образцов. Прочерк – нет данных.

[Note: G – gabbrodiorites. Q-1 – Q-3 – quartz veins of the first, second, and third generations. Q-Alb-Cal – quartz-albite-calcite veins, subparallel to the contact in the endo- and exocontact zone of gabbrodiorites. Cal (0–1 m) – limestones of the exocontact zone no further than 1 m from contact with gabbrodiorites. Cal (5–100 m) – limestones of the Katav Formation 5–100 m from the gabbrodiorite dike. The number of samples analysed is shown in parentheses. Dash means no data.]

Табл. 3. Микротермометрические характеристики флюидных включений в жильном кварце Восточно-Акташского рудопроявления
[Table 3. Microthermometric characteristics of fluid inclusions in quartz veins of the East Aktash ore deposits]

№	T _{гом} [T _{gom}]	T _{эвт} [T _{eut}]	T _{пл} [T _{melt}]	C	Состав солей [Salt composition]	S	V	T _{CO2}	T _{mCO2}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
кварц-1, обр. Б-9264, главный шурф [quartz-1, arr. B-9264, main pit]									
1	382	-34.2	-3.7	5.4	MgCl ₂ , KCl, NaCl	7.3	40	-62.8	–
2	329	-34.3	-5.6	8.7	–«–	9.2	30	-58.7	–
3	354	-34.7	-7.2	10.7	–«–	14.6	15	–	–
4	248	-28.4	-6.8	10.2	MgCl ₂ , KCl, NaCl, FeCl ₂ ?	12.3	30	-59.2	–
5	228	-32.7	-5.3	8.3	–«–	8.4	25	-58.7	–
6	119	-33.6	-11.4	15.4	MgCl ₂ , KCl, NaCl	15.2	≤10	–	–
7	124	-35.6	-9.6	12.4	–«–	11.5	≤10	–	–
8	115	-32.3	-9.3	12.1	MgCl ₂ , KCl, NaCl, FeCl ₂ ?	6.7	≤10	–	–
9	105	-31.5	-11.2	15.2	–«–	11.7	10	–	–
10	137	-33.8	-11.3	15.3	MgCl ₂ , KCl, NaCl	18.3	≤10	–	–
11	118	-28.6	-10.2	14.2	MgCl ₂ , KCl, NaCl, FeCl ₂ ?	10.8	≤10	–	–
12	114	-34.5	-10.6	14.6	MgCl ₂ , KCl, NaCl	9.3	≤10	–	–
кварц-3, обр. Б-9262, главный шурф [quartz-3, arr. B-9262, main pit]									
1	298	-34.8	-3.1	4.9	–«–	7.9	25	-58.7	–
2	254	-34.2	-2.9	4.8	–«–	7.2	30	–	–
3	267	-29.7	-3.6	5.9	MgCl ₂ , KCl, NaCl, FeCl ₂ ?	12.6	20	-58.6	–
4	252	-33.5	-4.2	6.7	–«–	11.8	20	-56.6	16.8
5	287	-31.8	-4.6	7.3	–«–	7.6	20	-57.8	19.8
6	268	-32.3	-4.7	7.5	–«–	12.4	20	-58.2	20.7
7	162	-29.2	-2.5	4.2	–«–	8.6	≤10	–	–
8	193	-33.7	-3.5	5.7	MgCl ₂ , KCl, NaCl	9.2	10	–	–

Продолжение Табл. 3
[Continued Table 3]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	162	-33.9	-3.6	5.9	-«-	21.3	10	-	-
10	126		-6.4	9.7	-«-	10.7	10	-	-
11	136	-29.5	-8.5	12.3	MgCl ₂ , KCl, NaCl, FeCl ₂ ?	12.3	≤10	-	-
12	147	-33.6	-7.8	11.5	MgCl ₂ , KCl, NaCl	12.9	10	-	-
13	139	-33.8	-8.2	11.9	-«-	24.6	10	-	-

Примечание: T_{гом}, T_{эвт}, T_{пл}, T_{CO₂}, T_{mCO₂} – температуры в °С гомогенизации, эвтектики, плавления льда, частичной гомогенизации CO₂, тройной точки. С – концентрации солей в пересчете на мас. % экв. NaCl. S – размер флюидных включений (мкм). V – объем газовой фазы (об. %).

[Note: T_{gom}, T_{eut}, T_{melt}, T_{CO₂}, T_{mCO₂} – temperatures in °C of homogenisation, eutectic, ice melting, partial homogenisation of CO₂, and triple point. C is the concentration of salts in terms of wt. % eq. NaCl. S is the size of fluid inclusions (µm). V is the volume of the gas phase (vol.%).]

Данные по изотопному составу серы в пирите и изотопным составам углерода и кислорода в анкерите и кальците из рудопроявления Восточно-Акташское приводятся в таблице 4. Значения δ³⁴S пиритов рудопроявления находятся в интервале от 11.3 до 14.0‰.

Изотопные составы углерода и кислорода анкеритов рудопроявления равны соответственно -5.0...-3.7‰ и 19.2...20.9‰, а вмещающих известняков катавской свиты – 1.4 и 20.0‰.

Табл. 4. Изотопный состав серы в пирите и изотопные составы углерода и кислорода в анкерите и кальците из рудопроявления Восточно-Акташское
[Table 4. Sulphur isotopic composition in pyrite and carbon and oxygen isotopic compositions in ankerite and calcite from the East Aktash ore deposits]

№ обр.	Характеристика образца [Sample characteristic]	δ ³⁴ S, ‰ (CD)	δ ¹³ C, ‰ (PDB)	δ ¹⁸ O, ‰ (SMOW)
Ак-5	известняк в 20 см от контакта с габбродиоритом [limestone 20 cm from contact with gabbrodiorite]	-	1.4	19.4
Ак-7	габбродиорит с вкрапленностью пирита [gabbro-diorite impregnated with pyrite]	13.2	-	-
Ак-9	габбродиорит с вкрапленностью пирита [gabbrodiorite impregnated with pyrite]	12.5	-	-
Ак-10	анкерит из кварц-альбит-кальцитовый жилы I генерации в известняке в 10-20 см от контакта с габбродиоритом [ankerite from quartz-albite-calcite vein of generation I in limestone 10-20 cm from contact with gabbrodiorite]	-	-4.2	19.2
Ак-11	габбродиорит с вкрапленностью пирита [gabbrodiorite impregnated with pyrite]	11.3	-	-
Ак-12	анкерит-кварцевая жила II генерации в габбродиорите с вкрапленностью пирита [ankerite-quartz vein of generation II in gabbrodiorite with disseminated pyrite]	12.9	-3.7	19.2
Ак-13	анкерит-кварцевая жила II генерации в габбродиорите с вкрапленностью пирита [ankerite-quartz vein of the II generation in gabbrodiorite with disseminated pyrite]	14.0	-5.0	20.9
Б-9261	габбродиорит с вкрапленностью пирита [gabbrodiorite impregnated with pyrite]	13.4	-	-

Обсуждение результатов

По изотопному составу серы пириты рудопроявления характеризуются устойчивым обогащением тяжелого ³⁴S изотопа относительно метеоритного стандарта (δ³⁴S=11.3–14.0‰, табл. 4). Такой изотопный состав серы характерен для пиритов, которые образовались с участием корового источника серы. Вместе с тем, они отличаются очень большими концентрациями Ti (до 4796 г/т), Co (до 574 г/т) и V (до 45.1 г/т) [15], что, вероятно, указывает на заимствование железа из магматических пород при эпигенетическом (по отно-

шению к интрузивным породам) формировании пиритов. Сера в рудопроявлении обнаруживает наибольшие коэффициенты корреляции со следующими элементами: Rb (K_{корр}=0.70), Ba (K=0.70), K₂O (0.67), V (0.60), F (0.55), Fe₂O₃ (0.54), Ni (0.52), Sc (0.52), Co (0.49), TiO₂ (0.48), Ce (0.48), La (0.48). Связь с этими элементами показывает, что увеличение содержания пирита в габбродиоритах и пирит-анкерит-кварцевых жилах симбатно увеличению концентрации в них слюдястых минералов. Из минералов сера наиболее сильно коррелирует с хлоритом и слюдой с коэффици-

ентами 0.95–0.97. При этом с золотом сера обнаруживает слабую отрицательную связь с коэффициентом – 0.32. В пиритах фиксируются лишь следовые содержания Au от 0.2 до 0.7 г/т и несколько более высокие концентрации Ag (2.3–2.8 г/т) (данные спектрохимического анализа [9] и метода ИСП МС [12, 19]). Согласно данным опробования [9] и результатам нашего изучения, только в одной пробе из 13 проанализированных проб пиритизированных диоритов содержание золота составило 6.5 г/т, в остальных варьировало от 0.02 до 0.28 г/т (среднее 0.08 г/т). Таким образом, отсутствие корреляции между содержаниями золота в породах и концентрацией в них серы, а также следовые содержания Au в пиритовых концентратах свидетельствуют о том, что золото в рудопроявлении не связано с сульфидами.

Проведенный нами корреляционный анализ по пробам, в которых совместно определялись концентрации петрогенных и редких элементов, Au и Ag, а также минералогический состав показывает, что золото связано только с Ag ($K_{\text{корр}}=0.80$), Pb (0.61) и MnO (0.58), а из минералов только с кварцем ($K_{\text{корр}}=0.95$).

Ранее проведенными исследованиями [4, 5], в составе золота рудопроявления выявлены содержания Ag (13.78–17.40 мас. %) и ряд характерных примесных элементов (в мас. %): Bi (0.07–0.3), Te (0.06–0.1), Cu (0.02–0.1). В одной из проб установлено содержание ртути (0.23 мас. %) и мышьяка (0.03 мас. %). По нашему мнению, присутствие в составе золота примесей Bi, Te и Hg указывает на его привнос металлоносными флюидами мантийного генезиса, как это, например, показано для золоторудных месторождений Северо-Востока Азии [16, 17, 18].

Анализ результатов изучения флюидных включений жильного кварца Восточно-Акташского рудопроявления показывает, что он по микротермометрическим характеристикам обладает значительным сходством с жильным кварцем из месторождений золота АРР. Его температуры эвтектики ФВ (–35.6...–28.4°C) близки к $T_{\text{эвт}}$ золото-кварцевого месторождения Улюк-Бар (–37.8...–34.2°C) и золото-сульфидно-кварцевого месторождения Горный Прииск (–36.4...–32.6°C). Такими значениями $T_{\text{эвт}}$ характеризуются водные растворы хлоридов Mg и K (–37.5...–33.6°C) или Fe (–36.5...–35.6°C) [19]. Температуры эвтектики ФВ жильного кварца Восточно-Акташского рудопроявления в большей степени соответствуют температурам водных растворов хлоридов Mg и K. Важно отметить, что присутствие хлоридов магния в ФВ может свидетельствовать об участии в рудном процессе флюидов магматического происхождения [20]. Расчеты давления флюидов по температуре гомогенизации CO₂ в ФВ кварца-3 Восточно-Акташского рудопроявления дают значения в 1280–1420 бар, что предполагает образование жильного кварца на глубине около 4 км.

Кроме того, кварц из рудопроявления Восточно-Акташское сходен по температурам гомогенизации первичных ФВ (228–382°C) и по солености (5.4–15.8 мас. % NaCl экв.) с жильным кварцем в других

месторождениях АРР. Характерны практически одинаковые максимальные $T_{\text{гом}}$, которые составляют 382°C (Улюк-Бар и Восточно-Акташское) и 349°C (Горный Прииск), указывающих на начальные температуры рудоносных флюидов ~400°C (без учета поправок на давление). При этом характеризующийся одинаковыми микротермометрическими характеристиками золоторудный жильный кварц из месторождений АРР встречается и литологически разных породах (сланцы, известняки, песчаники) и, что особенно важно подчеркнуть, в разновозрастных отложениях (RF₁–RF₃).

Оценки температур метаморфизма погружения, проведенные Л. В. Анфимовым [21], показывают, что в нижнерифейских отложениях БМА они достигали 280–290°C (начальный метагенез), а в верхнерифейских породах составляли 80–90°C (начало глубинного катагенеза). Ранее нами показано [11], что жильный кварц в отложениях нижнего и среднего рифея АРР, образование которого мы связываем с региональными постдиагенетическими преобразованиями, характеризуется сравнительно низкими $T_{\text{гом}}$ (128–238°C), значительными вариациями солености (5–20 мас. % NaCl экв.) и явным преобладанием в солевом составе ФВ хлоридов железа. Эти результаты хорошо укладываются в представления [21] о том, что катагенетические растворы в породах БМА имели температуры ниже 250–280°C, верхний предел которых был ограничен глубиной погружения нижнерифейских отложений. Нами в месторождениях АРР установлены более высокие температуры для золотосодержащего кварца, образование которого вряд ли могло быть связано с постдиагенетическими преобразованиями пород. Более вероятно, что миграция золотосодержащих флюидов была обусловлена их связью с глубинным магматическим источником.

По изотопному составу углерода ($\delta^{13}\text{C}=-5.0...-3.7$ ‰) анкериты из пирит-анкерит-кварцевых жил рудопроявления в значительной степени отличаются от вмещающих карбонатных пород ($\delta^{13}\text{C}=1.4$). Это может указывать на участие в рудном процессе глубинной CO₂, однако, вместе с тем не исключает частичное вовлечение углекислоты из вмещающих пород. С учетом установленной нами средней температуры гомогенизации первичных ФВ кварца-1 и кварца-3 (290°C) и используя уравнения фракционирования для систем доломит–CO₂ [22] и анкерит–H₂O [23], проведены расчеты изотопных составов С и О рудоносного флюида, согласно которым $\delta^{13}\text{C}_{\text{флюид}}=-3.8...-2.3$ ‰ (PDB) и $\delta^{18}\text{O}_{\text{флюид}}=13.0...14.7$ ‰ (SMOW). Такие значения занимают промежуточное положение между значениями изотопного состава С и О карбонатов осадочного генезиса ($\delta^{13}\text{C}=0\pm 2$ ‰ (PDB), $\delta^{18}\text{O}=25\pm 2$ ‰ (SMOW)) и изотопного состава С и О карбонатных минералов магматического происхождения, варьирующего приблизительно от –10 до –5 ‰ (PDB) и от 5 до 10 ‰ (SMOW) соответственно [24, 25, 26]. Следовательно, образование золотосодержащего кварца и сингенетичного с ним анкерита происходило из флюидов с CO₂ не только из вмещающих пород, но

и в значительной степени из магматогенного источника. Следует отметить, что из золоторудных объектов АРР, Восточно-Акташское рудопроявление является единственным, в ФВ жильного кварца для которого зафиксировано присутствие CO_2 [11]. Это можно объяснить тем, что только это рудопроявление в АРР локализовано в известняках. В различных генерациях кварца CO_2 здесь установлена и в первичных и в мнимовторичных ФВ, имеющих высокие и низкие температуры. Нами не установлено, что количество ФВ с CO_2 , увеличивается на каком-либо этапе золоторудного процесса. Поэтому можно сделать вывод, что присутствие CO_2 в ФВ жильного кварца связано с контаминацией флюидов углеродом из вмещающих Восточно-Акташское рудопроявление известняков.

Выводы

1. По изотопному составу серы пириты Восточно-Акташского рудопроявления характеризуются обогащением тяжелого ^{34}S изотопа относительно метеоритного стандарта, что указывает на их образование с участием корового источника серы. Отсутствие корреляции между содержаниями золота в породах и концентрацией в них серы, а также следовые содержания Au в пиритовых концентратах свидетельствуют о том, что золото в рудопроявлении не связано с сульфидами.

2. Рудоносные пирит-анкерит-кварцевые и кварцевые жилы рудопроявления по микротермометрическим характеристикам сходны с жильным кварцем из месторождений и рудопроявлений золота Авзянского рудного района и отличаются от метаморфогенного кварца из ниже и среднерифейских отложений региона, образованного в результате региональных постдиagenетических преобразований. Температуры золотоносных флюидов без учета поправок на давление составляли 250–400°C.

3. Формирование Восточно-Акташского рудопроявления обусловлено глубинной миграцией флюидов, которые согласно микротермометрическим характеристикам золоторудного кварца, геохимическим особенностям золота, а также изотопным данным по анкериту, сингенетичному жильному кварцу, были связаны с магматическим источником. Расчеты давления флюидов по температуре гомогенизации CO_2 в ФВ кварца-3 Восточно-Акташского рудопроявления дают значения в 1280–1420 бар, что предполагает образование жильного кварца на глубине около 4 км.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Викентьев И. В., Сидорова Н. В., Викентьева О. В., ШанГуо Су Теллуриды на золоторудном месторождении Лаовань (Восточный Китай) – новые свидетельства магматического источника гидротермальных флюидов // *Доклады Академии*

наук. 2015. Т. 462. № 4. С. 456–460. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869565215160239>

2. Горячев Н. А. благороднометалльный рудогенез и мантийно-коровое взаимодействие // *Геология и геофизика.* 2014. Т. 55. № 2. С. 323–332.

3. Мичурин С. В., Калистратова Е. О., Султанова А. Г., Казбулатова Г. М. Фтор в породах Западно-Акташской рудной зоны (Южный Урал) // *Геологический вестник.* 2020. № 2. С. 54–71. <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2020-2>

4. Рыкус М. В., Сначев И. В. Геология и золотоносность Акташского рудного поля // *Нефтегазовое дело.* 2014. Т. 12. № 2. С. 21–27.

5. Сначев А. В., Сначев В. И. Коренное и россыпное золото Акташского рудного поля // *Геология. Известия отделения наук о Земле и природных ресурсов АН РБ.* 2019. № 26. С. 48–55.

6. Радченко В. В., Пацков А. А., Петренко А. Г., Швецов П. Н. Геологическое строение южной части Башкирского мегантиклинория (верховья рек М. Нугуш, Алакуян, планшеты N-40-91-Г и N-40-103-Б). Отчет о геологической съемке масштаба 1:50 000 за 1970–1972 гг. Уфа. Фонды Башкор. фил-ла ФБУ «ТФГИ по ПФО», 1973.

7. Ларионов Н. Н., Цветкова А. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М 1:200 000. Южно-Уральская серия. N-40-XXII (Тукай). СПб.: МПР РФ, 2003.

8. Куширова Л. Г. Оценка перспектив южной части Башкирского мегантиклинория и зоны его сочленения с Зилаирским мегасинклиномием. Отчет за 1986–1994 гг. Уфа. Фонды Башкор. фил-ла ФБУ «ТФГИ по ПФО», 1994.

9. Филонов В. П., Быкова Л. С. Комплексные поисково-картировочные работы по объекту: «Акташская площадь». Отчет о работах за 1990–2003 гг. Уфа. Фонды Башкор. фил-ла ФБУ «ТФГИ по ПФО», 2003.

10. Шарипова А. А., Мичурин С. В. Геохимические особенности и условия образования Восточно-Акташского рудопроявления золота (Южный Урал) // Сборник статей Всероссийской молодежной конференции «Геологические исследования Урала и Поволжья-2020». М.: Издательство «Перо», 2020. С. 70–73.

11. Шарипова А. А., Мичурин С. В., Крупенин М. Т., Гараева А. А., Канипова З. А. Жильный кварц из рудопроявлений золота в рифейских отложениях Авзянского рудного района (Южный Урал): минералогические и термометрические особенности // *Вестник Пермского университета. Геология.* 2017. Т.16. №3. С. 216–232. DOI: <https://doi.org/10.17072/psu.geol.16.3.216>

12. Бобохов А. С., Бобохова Р. Б., Горожанин В. М., Мичурин С. В. Термогазогеохимические и изотопные поисковые критерии колчеданного и золото-сульфидного оруденения (На примере месторождений Башкортостана). Препринт. Уфа, 1993. 23 с.

13. Bodnar R. J. Revised equation and table for determinins the freezing point depression of $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ solutions // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 1993. V.57. P. 683–684.

14. Bodnar R. J., Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ fluid inclusions // *Fluid inclusions in minerals and application.* 1994. P. 281–283.

15. Мичурин С. В., Шарипова А. А., Крупенин М. Т., Замятин Д. А., Мусина А. М., Попов В. А. Сульфидная минерализация, самородное золото и его геохимические связи в рифейских отложениях Авзянского рудного района (Южный Урал) // *Литосфера.* 2018. Т. 18. № 1. С. 61–81. DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-061-081>

16. Горячев Н. А., Гамянин Г. Н. Висмут в орогенных золоторудных месторождениях Северо-Востока Азии // *Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи приклад-*

ных исследований. Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию Н.И. Петровской (1910–1991 гг). М.: ИГЕМ РАН, 2010. Т. 1. С. 159–161.

17. Кужугет Р. В., Анкушева Н. Н., Прокопьев И. Р., Редина А. А. Минералого-геохимические особенности и условия образования золото-сульфидно-кварцевого месторождения Гардан (Северо-Восточная Тува) // *Геология и геофизика*. 2020. Т. 61. № 2. С. 194–215. DOI: 10.15372/GiG2019111

18. Степанов В. А., Моисеенко В. Г. Геология золота, серебра и ртути. Ч. 1. Золото-ртутные месторождения. Владивосток: Дальнаука, 1993. 227 с.

19. Борисенко А. С. Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // *Геология и геофизика*. 1977. № 8. С. 16–27.

20. Wilkinson J. J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // *Lithos*. 2001. V. 55. P. 229–272. DOI:

[https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)

21. Анфимов Л. В. Литогенез в рифейских осадочных толщах Башкирского мегантиклинория (Ю. Урал). Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1997. 290 с.

22. Ohmoto H., Rye R. O. Isotope of sulfur and carbon // *Geochemistry of Hydrothermal deposits*. 1979. P. 509–567.

23. Zheng Y. F. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals // *Geochemical Journal*. 1999. V. 33. P. 109–126.

24. Бортников Н. С. Геохимия и происхождение рудообразующих флюидов в гидротермально-магматических системах в тектонически активных зонах // *Геология рудных месторождений*. 2006. Т. 48. № 1. С. 3–28.

25. Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.

26. Sheppard S. M. F. Characterization and isotopic variations in natural wates // *Stable isotopes in high temperature geological processes. Reviews in Mineral*. 1986. V. 16. P. 165–183.

GEOLOGY, SEARCH AND INVESTIGATION OF SOLID MINERAL RESOURCES, MINERAGENY

UDC 553.2

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.3/3649>

Received: 16.07.2021

Accepted: 02.09.2021

Published online: 07.10.2021

ISSN 1609-0691

Mineralogical and geochemical features of the East Aktahs gold ore deposits in the South Urals

© 2021 A. A. Sharipova[✉], S. V. Michurin, A. M. Karamova, G. M. Kazbulatova

*Institute of Geology, Ufa Federal Research Center RAS,
16/2 K. Marksa ul., Ufa 450077, Russian Federation*

Abstract

Introduction: Recently, the interest in performing mineralogical studies at gold deposits has increased due to the fact that crust-mantle interactions are reflected in the mineral composition of ores. The article presents the results of mineralogical, microthermometric, and isotope-geochemical studies of the East Aktash gold and quartz ore deposits located in the south of the Bashkir meganticlinorium (BMC) in the Avzyan ore region (AOR).

Methods: The mineralogical study was conducted using X-ray diffraction analysis. The chemical composition of the samples was determined using X-ray fluorescence spectroscopy, inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES), and photometric analysis. The Au and Ag content were determined using atomic absorption spectroscopy. The isotopic composition of sulphur was determined using the MI-1201 mass spectrometer (Russia), and the isotopic compositions of carbon and oxygen were determined using the DELTA V Advantage mass spectrometer (Germany). The microthermometric study of fluid inclusions of quartz was performed using the LinkamTHMSC-600 thermocryogenic table.

Results and discussions: As for microthermometric characteristics ($T_{\text{eut}}=-34.8...-28.4^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{gon}}=228-382^{\circ}\text{C}$), the pyrite-ankerite-quartz and quartz veins are similar to the quartz veins from the gold deposits of the AOR and are different from the metamorphogenic quartz formed as a result of regional postdiagenetic transformations of the Riphean deposits of the region. Sulphur in the ore deposits shows the greatest



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Aisylyu A. Sharipova, e-mail: aisylyuazatovna@mail.ru

correlation coefficients with Rb, Ba, K₂O, V, F, Fe₂O₃, Ni, and Sc, as well as with such minerals as chlorite and shale. As for gold, sulphur shows weak negative correlation. The values of δ³⁴S pyrites are within the range from 1.3 to 14.0‰. The isotopic compositions of carbon and oxygen in ankerites are –5.0...–3.7‰ and 19.2...20.9‰ respectively, while the inclosing limestones of the Katav formation have the values of 1.4 and 20.0‰.

Conclusions. The formation of the East Aktash ore deposits was caused by the deep migration of fluids. According to the isotopic data on ankerite, which is syngenetic to quartz veins, the fluids related to the magmatic source. The calculations of the pressure of fluids by the homogenising temperature of CO₂ to fluid inclusions of quartz of the East Aktash ore deposits give the values of 1280–1420 bar, so the quartz veins are assumed to be formed at a depth of about 4 km. The temperatures of the fluids were 250–400°C. Pyrites in the ore deposits were formed with the participation of sulphur from the crust. The lack of correlation between the gold content in the rocks and the concentration of sulphur in them, as well as the trace presence of Au in the pyrite concentrates, indicate that presence of gold in the ore deposits is not related to sulphides.

Keywords: gold, quartz, microthermometric characteristics, Avzyan ore region, South Ural.

Funding: the research was carried out within the framework of the theme No. 0246-2019-0085 of the state assignment of the IG UFRC RAS.

For citation: Sharipova A. A., Michurin S. V., Karamova A. M., Kazbulatova G. M. Mineralogical and geochemical features of the East Aktash gold ore deposits in the South Urals. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 3, pp. 38–49. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.3/3649>

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

REFERENCES

1. Vikent'ev I. V., Sidorova N. V., Vikent'eva O. V., ShanGuo Su. Telluridy na zolotorudnom mestorozhdenii Laovan' (Vostochnyi Kitai) – novye svidetel'stva magmaticheskogo istochnika gidrotermal'nykh fluidov [Tellurides at the Laowan gold deposit (Eastern China) – new evidence of a magmatic source of hydrothermal fluids]. *Doklady Akademii nauk – Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 462, no 4, pp. 456–460. (in Russ.). DOI: <https://doi.org/7868/S0869565215160239>
2. Goryachev N. A. Blagorodnometal'nyi rudogenez i mantiinokorovee vzaimodeistvie [Noble metal ore genesis and mantle-crustal interaction]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no 2, pp. 323–332. (in Russ.).
3. Michurin S. V., Kalistratova E. O., Sultanova A. G., Kazbulatova G. M. Ftor v porodakh Zapadno-Aktashskoi rudnoi zony (Yuzhnyi Ural) [Fluorine in the rocks of the West Aktash ore zone (South Urals)]. *Geologicheskij vestnik – Geological Bulletin*, 2020, no 2, pp. 54–71. (in Russ.). DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2020-2>
4. Rykus M. V., Snachev I. V. Geologiya i zolotonosnost' Aktashskogo rudnogo polya [Geology and gold content of the Aktash ore field]. *Neftegazovoe delo – Oil and Gas Business*, 2014, vol. 12, no. 2, pp. 21–27. (in Russ.)
5. Snachev A. V., Snachev V. I. Korennoe i rossypnoe zoloto Aktashskogo rudnogo polya [Root and placer gold of the Aktash ore field, Geology] *Geologiya. Izvestiya otdeleniya nauk o Zemle i prirodnykh resursov AN RB – Bulletin of the Department of Earth Sciences and Natural Resources of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*, 2019, no. 26, pp. 48–55. (in Russ.)
6. Radchenko V. V., Packov A. A., Petrenko A. G., Shvecov P. N. Geologicheskoe stroenie yuzhnoi chasti Bashkirskogo megantiklinoriya (verkhov'ya rek M. Nugush, Alakuyan, planshety N-40-91-G i N-40-103-B). Otchet o geologicheskoi s'emke masshtaba 1:50 000 za 1970–1972 gg. [Geological structure of the southern part of the Bashkir meganticlinorium (upper reaches of the M. Nugush and Alakuyan rivers, plates N-40-91-G and N-40-103-B). Report on a geological survey at a scale of 1: 50,000 for 1970–1972.] Ufa. Fondy Bashkor. fil-la FBU «TFGI po PFO», 1973. (in Russ., unpublished).
7. Larionov N. N., Cvetkova A. A. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. M 1:200 000. Yuzhno-Ural'skaya seriya. N-40-XXII (Tukan) [State geological map of the Russian Federation. M 1: 200 000. South Ural series. N-40-XXII (Toucan)]. SPb.: MPR RF, 2003. (in Russ., unpublished).
8. Kushirova L. G. Otsenka perspektiv yuzhnoi chasti Bashkirskogo megantiklinoriya i zony ego sochleneniya s Zilairskim megasinklinoriem.. Otchet za 1986-1994 gg. [Estimation of the prospects of the southern part of the Bashkir meganticlinorium and the zone of its junction with the Zilair megasynclorium. 1986-1994 Report]. Ufa. Fondy Bashkor. fil-la FBU «TFGI po PFO», 1994. (in Russ., unpublished).
9. Filonov V. P., Bykova L. S. Kompleksnye poiskovokartirovochnye raboty po ob'ektu: «Aktashskaya ploshchad». Otchet o robotakh za 1990–2003 gg. [Complex prospecting and mapping works on the object: "Aktash area". Report on works for 1990-2003]. Ufa. Fondy Bashkor. fil-la FBU «TFGI po PFO», 2003. (in Russ., unpublished).
10. Sharipova A. A., Michurin S. V. Geokhimicheskie osobennosti i usloviya obrazovaniya Vostochno-Aktashskogo rudoproyavleniya zolota (Yuzhnyi Ural) [Geochemical features and conditions of formation of the East Aktash ore occurrence of gold (South Urals)]. Sbornik statei Vserossiiskoi molodezhnoi konferentsii «Geologicheskije issledovaniya Urala i Povolzh'ya-2020» [Collection of articles of the All-Russian youth conference "Geological research of the Urals and the Volga region-2020"]. Moscow, «Pero» publ., 2020, pp. 70–73. (in Russ.)
11. Sharipova A. A., Michurin S. V., Krupenin M. T., Garaeva A. A., Kanipova Z. A. Zhil'nyi kvarts iz rudoproyavlenii zolota v rifeiskikh otlozheniyakh Avzyanskogo rudnogo raiona (Yuzhnyi Ural): mineralogicheskie i termokriometricheskie osobennosti [Vein quartz from ore occurrences of gold in the Riphean deposits of the Avzyan ore region (South Urals): mineralogical and thermocryometric features // Bulletin of Perm University]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya – Bulletin of Perm*

- University. *Geology*, 2017, vol.16, no. 3, pp. 216–232. (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17072/psu.geol.16.3.216>
12. Bobohov A. S., Bobohova R. B., Gorozhanin V.M., Michurin S.V. *Termogazogeoхимические и изотопные поисковые критерии колчеданного и золотосульфидного оруденения* (Na primere mestorozhdenij Bashkortostana) [Thermogasogeochemical and isotopic search criteria for pyrite and gold-sulfide mineralization (On the example of deposits in Bashkortostan)]. Ufa, Preprint publ. 1993, 23 p. (in Russ.)
13. Bodnar R. J. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta.*, 1993, vol. 57, pp. 683–684
14. Bodnar R. J., Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals and application*, 1994, pp. 281–283.
15. Michurin S. V., Sharipova A. A., Krupenin M. T., Zamyatin D. A., Musina A. M., Popov V. A. Сульфидная минерализация, самородное золото и его геохимические связи в рифейских отложениях Авзянского рудного района (Южный Урал) [Sulfide mineralization, native gold and its geochemical connections in the Riphean sediments of the Avzyan ore region (South Urals)]. *Литосфера – Lithosphere*, 2018, vol. 18, no 1, pp. 61–81. (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-061-081>
16. Goryachev N. A., Gamyagin G. N. Висмут в орогенных золоторудных месторождениях Северо-Востока Азии [Bismuth in orogenic gold deposits of North-East Asia]. *Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований*. Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию Н.И. Петровской (1910–1991 гг.). [Native gold: typomorphism of mineral associations, conditions for the formation of deposits, problems of applied research. Materials of the All-Russian conference dedicated to the 100th anniversary of N.I. Petrovskaya (1910–1991)]. Moscow, IZEM RAN, 2010, vol. 1, pp. 159–161. (in Russ.)
17. Kuzhuget R. V., Ankusheva N. N., Prokop'ev I. R., Redina A. A. Минеролого-геохимические особенности и условия образования золотосульфидно-кварцевого месторождения Тардан (Северо-Восточная Тува) [Mineralogical and geochemical features and formation conditions of the Tardan gold-sulfide-quartz deposit (North-East Tuva)]. *Геология и геофизика – Geology and Geophysics*, 2020, vol. 61, no 2, pp. 194–215. DOI: <https://doi.org/10.15372/GiG2019111>
18. Stepanov V. A., Moiseenko V. G. Геология золота, серебра и ртути. Ч. 1 [Geology of gold, silver and mercury. Part 1]. *Золоторудные месторождения* [Gold and mercury deposits]. Vladivostok, Dal'nauka publ., 1993, 227 p. (in Russ.)
19. Borisenko A. S. Изучение солевого состава растворов газожидких включений в минералах методом криометрии [Study of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals by the cryometry method]. *Геология и геофизика – Geology and Geophysics*, 1977, no 8, pp. 16–27. (in Russ.)
20. Wilkinson J. J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 2001, vol. 55, pp. 229–272. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)
21. Anfimov L. V. Литогенез в рифейских осадочных толщах Башкирского мегантиклинория (Ю. Урал) [Lithogenesis in the Riphean sedimentary strata of the Bashkirian meganticlinorium (South Urals)]. Ekaterinburg, UrO RAN publ., 1997, 290 p. (in Russ.)
22. Ohmoto H., Rye R. O. Isotope of sulfur and carbon. *Geochemistry of Hydrothermal deposits*, 1979, pp. 509–567.
23. Zheng Y. F. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals. *Geochemical Journal*, 1999, vol. 33, pp. 109–126.
24. Bortnikov N. S. Геохимия и происхождение рудообразующих флюидов в гидротермально-магматических системах в тектонически активных зонах [Geochemistry and the origin of ore-forming fluids in hydrothermal-magmatic systems in tectonically active zones]. *Геология рудных месторождений – Geology of Ore Deposits*, 2006, vol. 48, no 1, pp. 3–28. (in Russ.)
25. For G. *Основы изотопной геологии* [Fundamentals of isotope geology]. Moscow, Mir publ., 1989, 590 p. (in Russ.)
26. Sheppard S. M. F. Characterization and isotopic variations in natural waters. *Stable isotopes in high temperature geological processes. Reviews in Mineral*, 1986, vol. 16, pp. 165–183.

Шарипова Айсылу Азатовна – научный сотрудник, Институт Геологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), Уфа, Российская Федерация; E-mail: aysyluazatovna@mail.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0001-5339-9316>

Мичурин Сергей Васильевич – к. г.-м. н., ведущий научный сотрудник, Институт Геологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), Уфа, Российская Федерация; E-mail: s_michurin@mail.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0002-2776-2190>

Карамова Алсу Мусаевна – к. т. н., старший научный сотрудник, Институт Геологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), доцент, Башкирский государственный университет, Уфа, Российская Федерация; E-mail: alsu.2013@bk.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0002-4828-2540>

Казбулатова Гульфия Мавлетовна – младший научный сотрудник, Институт Геологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), Уфа, Российская Федерация; E-mail: kazbulatova@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-0623-8792>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Aisylu A. Sharipova – researcher, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russian Federation; E-mail: aysyluazatovna@mail.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0001-5339-9316>

Sergey V. Michurin – PhD in Geol.-Min., leading researcher, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russian Federation; E-mail: s_michurin@mail.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0002-2776-2190>

Alsu M. Karamova – PhD in technical sciences, senior researcher, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS); Associate Professor, Bashkir State University, Ufa, Russian Federation; E-mail: alsu.2013@bk.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0002-4828-2540>

Gulfiya M. Kazbulatova – junior researcher, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russian Federation; E-mail: kazbulatova@mail.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0003-0623-8792>

All authors have read and approved the final manuscript.