

УДК 553.08:553.2:550.84.094

## СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ, САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО И ЕГО ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СВЯЗИ В РИФЕЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ АВЗЯНСКОГО РУДНОГО РАЙОНА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2018 г. С. В. Мичурин<sup>1</sup>, А. А. Шарипова<sup>1</sup>, М. Т. Крупенин<sup>2</sup>, Д. А. Замятин<sup>2</sup>,  
А. М. Мусина<sup>1</sup>, В. А. Попов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии УНЦ РАН, 450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2, e-mail: s\_michurin@mail.ru

<sup>2</sup>Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15

<sup>3</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, 450001, г. Уфа, ул. С. Халтурина, 39

Поступила в редакцию 27.03.2017 г.; принята к печати 31.05.2017 г.

В Авзянском рудном районе сульфиды из золото-кварцевых малосульфидных рудопоявлений (Улюк-Бар, Кургашлинское) характеризуются более высокой концентрацией As, Co, Ni, Cu, Pb по сравнению с сульфидами из осадочных отложений вне рудоносных зон. Золото связано с As и иногда с S и Co. Золотоносные сульфиды встречаются преимущественно в песчаниках, в которых они образовались в результате замещения ранних “безрудных” пиритовых генераций арсенопиритом и его ассоциацией с мышьяковистым пиритом при движении флюидов ( $T = 250\text{--}450^\circ\text{C}$ ) по зонам разломов. Этот процесс отражается в зональном распределении мышьяковистого пирита и содержания As в породах. Доля пирита с проводимостью р-типа увеличивается с глубиной, а зоны развития и высокого содержания As в породах контролируются разрывными нарушениями. В золото-сульфидных (Богряшка) и золото-сульфидно-кварцевых (Горный Прииск) рудопоявлениях отмечается сильная положительная корреляция золота с S, Cu, Co, Pb, Ni, Zn. Связь Au с As проявлена не четко. Пириты из рудопоявления Богряшка отличаются высокой концентрацией Sb, из рудопоявления Восточно-Акташское – Co и V. Золото из месторождения Горный Прииск и рудопоявления Богряшка характеризуется повышенным значением отношения Au/Ag ( $>21$ ) и примесью Bi (0.4–1.2 мас. %). В золоте рудопоявлений Улюк-Бар и Восточно-Акташское Au/Ag отношение составляет 5–8. Самородное золото рудопоявлений Улюк-Бар и Богряшка ассоциирует с ураноториевыми минералами.

**Ключевые слова:** Башкирский мегантиклинорий, рифей, золото, мышьяк, сульфиды, мышьяковистый пирит

## SULFIDE MINERALIZATION, NATIVE GOLD AND ITS GEOCHEMICAL CONNECTIONS IN THE RIPHEAN DEPOSITS OF THE AVZYAN ORE-BEARING REGION (THE SOUTHERN URALS)

Sergei V. Michurin<sup>1</sup>, Aisylu A. Sharipova<sup>1</sup>, Mikhail T. Krupenin<sup>2</sup>, Dmitrii A. Zamyatin<sup>2</sup>,  
Alsu M. Musina<sup>1</sup>, Vladimir A. Popov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geology Ufa Science Centre RAS, 16/2 K. Marx st., Ufa, 450077, Russia, e-mail: s\_michurin@mail.ru

<sup>2</sup>A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS, 16 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg, 620016, Russia

<sup>3</sup>Institute of Metal Superplasticity Problems RAS, 39 S. Khalturin st., Ufa, 450001, Russia

Received 27.03.2017; accepted 31.05.2017

In the Avzyan ore-bearing region the sulfides from the low-sulfide gold-quartz deposits (Ulyuk-Bar, Kurgashly) are characterized by higher concentrations of As, Co, Ni, Cu, Pb in comparison with sulfides from sediments outside of ore-bearing zones. The gold is associated with As and sometimes – with S and Co. Gold-bearing sulfides are situated mostly in sandstones, where they were formed as a result of replacement of early formed ore-free pyrites by arsenopyrite and its association with arsenic pyrite during fluid movement ( $T = 250\text{--}450^\circ\text{C}$ ,  $P = 26\text{--}360$  bar) through fault zones. This process is fixed in the zonal distribution of arsenic pyrite and in varying behavior of total As in rocks. The proportion of p-type conduction pyrite increases with the depth, and zones of its development and high content of As in rocks are controlled by faults. The strong positive correlation of Au with S, Cu, Co, Pb, Ni, Zn is marked at the gold-sulfide (Bogryashka) and gold-sulfide-quartz (Gorny Priisk) occurrences. The connection of Au with As is not clear. At the Bogryashka occurrence pyrites are characterized by high concentrations of Sb, at the Vostochno-Aktashskoe occurrence – by Co and V. The gold in the Gorny Priisk ore deposit and in the Bogryashka occurrence is characterized by high ratio Au/Ag ( $>21$ ) and impurity of Bi (0.4–1.2 wt %). The ratio Au/Ag is 5–8 in the gold from the Ulyuk-Bar and the Vostochno-Aktashskoe occurrences. Native gold in the Ulyuk-Bar and the Bogryashka occurrences is associated with uranium-thorium minerals.

**Для цитирования:** Мичурин С.В., Шарипова А.А., Крупенин М.Т., Замятин Д.А., Мусина А.М., Попов В.А. (2018) Сульфидная минерализация, самородное золото и его геохимические связи в рифейских отложениях Авзянского рудного района (Южный Урал). *Литосфера*, **18**(1), 61–81. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-1-061-081

**For citation:** Michurin S.V., Sharipova A.A., Krupenin M.T., Zamyatin D.A., Musina A.M., Popov V.A. (2018) Sulfide mineralization, native gold and its geochemical connections in the Riphean deposits of the Avzyan ore-bearing region (the Southern Urals). *Litosfera*, **18**(1), 61–81. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-1-061-081

**Keywords:** Bashkirian meganticlinorium, Riphean, gold, sulfides, arsenic pyrite

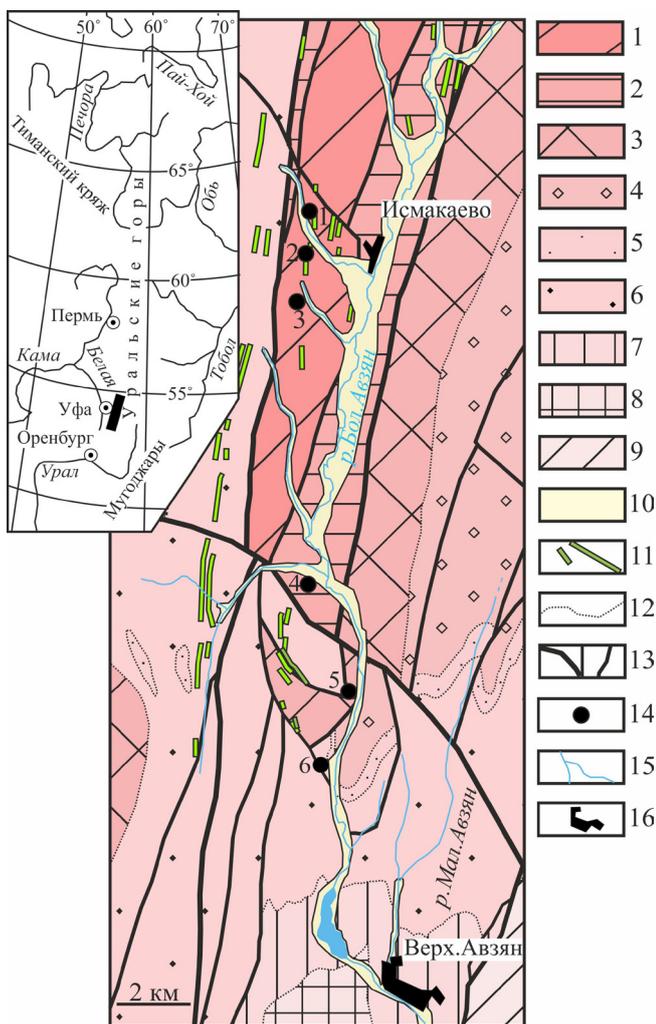
#### Acknowledgements

The authors are sincerely grateful to N.V. Cherednichenko and N.V. Adamovich for the performance of analyzes using the ICP-MS method.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 16-35-00144.

## ВВЕДЕНИЕ

Рудопроявления золота в рифейских отложениях южной части Башкирского мегантиклинория (БМА) относятся к золото-кварцевому малосульфидному, золото-сульфидно-кварцевому и золотосульфидному типам. Здесь выделяют Исмакаевскую, Горноприискскую и Акташскую золоторудные зоны, которые обычно рассматривают в составе Авзянского рудного района (рис. 1). Минералогические и геохимические особенности золота, кварца и сульфидной минерализации из рудопроявлений с разной степенью детальности рассмотрены во многих работах [Нечаев, 1982; Ковалев и др., 1999; Рыкус, Сначев, 1999; Ковалев, Высоцкий, 2001; Кобзарева, 2007; Мичурин и др., 2009; Шарипова, Мичурин, 2011; Шарипова и др., 2017]. В настоящей статье обобщаются результаты предыдущих исследований и приводятся новые данные по морфологии, составу золота и сопутствующих ему сульфидов, а также исследуются его геохимические связи в целях выявления элементов-спутников оруденения. Изучение рудной минерализации может помочь при решении вопросов источников рудного вещества, которые до сих пор дискутируются. Одни авторы предполагают экстракцию золота из вмещающих отложений в процессе метаморфизма [Рыкус, Сначев, 1999; Сазонов и др., 1999; Кобзарева, 2007], другие считают, что изотопно-геохимические особенности золотоносной минерализации указывают на привнос Au металллоносными флюидами мантийного генезиса [Ковалев и др., 1999; Ковалев, Высоцкий, 2001; Мичурин и др., 2009; Шарипова, Мичурин, 2015]. Вместе с тем определение элементов-спутников Au



**Рис. 1.** Геологическая схема южной части Башкирского мегантиклинория [Ларионов, 2003] и положение рудопроявлений золота Исмакаевской и Горноприискской рудных зон.

1–9 – свиты рифея (1 – большеинзерская, 2 – суранская, 3 – юшинская, 4 – машакская, 5 – зигальгинская, 6 – зигазино-комаровская, 7 – авзянская, 8 – зильмердакская, 9 – миньярская); 10 – четвертичные отложения; 11 – дайки интрузивных пород; 12 – стратигра-

фидному, золото-сульфидно-кварцевому и золотосульфидному типам. Здесь выделяют Исмакаевскую, Горноприискскую и Акташскую золоторудные зоны, которые обычно рассматривают в составе Авзянского рудного района (рис. 1). Минералогические и геохимические особенности золота, кварца и сульфидной минерализации из рудопроявлений с разной степенью детальности рассмотрены во многих работах [Нечаев, 1982; Ковалев и др., 1999; Рыкус, Сначев, 1999; Ковалев, Высоцкий, 2001; Кобзарева, 2007; Мичурин и др., 2009; Шарипова, Мичурин, 2011; Шарипова и др., 2017]. В настоящей статье обобщаются результаты предыдущих исследований и приводятся новые данные по морфологии, составу золота и сопутствующих ему сульфидов, а также исследуются его геохимические связи в целях выявления элементов-спутников оруденения. Изучение рудной минерализации может помочь при решении вопросов источников рудного вещества, которые до сих пор дискутируются. Одни авторы предполагают экстракцию золота из вмещающих отложений в процессе метаморфизма [Рыкус, Сначев, 1999; Сазонов и др., 1999; Кобзарева, 2007], другие считают, что изотопно-геохимические особенности золотоносной минерализации указывают на привнос Au металллоносными флюидами мантийного генезиса [Ковалев и др., 1999; Ковалев, Высоцкий, 2001; Мичурин и др., 2009; Шарипова, Мичурин, 2015]. Вместе с тем определение элементов-спутников Au

фические границы; 13 – тектонические нарушения; 14 – рудопроявления золота Исмакаевской (1 – Кургашлинское, 2 – Улюк-Бар, 3 – Рамеева жила) и Горноприискской (4 – Богряшка, 5 – Калашникова жила, 6 – Горный Прииск) рудных зон; 15 – реки; 16 – населенные пункты.

**Fig. 1.** Geological scheme for the southern part of the Bashkir meganticlinorium according [Larionov, 2003] and position of the gold mineralization occurrences in Ismakaevo and Gorny Priisk ore zones.

1–9 – Riphean formations (1 – Bolshoi Inzer, 2 – Suran, 3 – Yusha, 4 – Mashak, 5 – Zigalga, 6 – Zigazino-Komarovo, 7 – Avzyan, 8 – Zilmerdak, 9 – Minyar); 10 – quaternary deposits; 11 – dikes; 12 – stratigraphic boundaries; 13 – faults; 14 – gold mineralization occurrences in the Ismakaevo (1 – Kurgashlya, 2 – Ulyuk-Bar, 3 – Rameev Vein) and Gorny Priisk (4 – Bogryashka, 5 – Kalashnikov Vein, 6 – Gorny Priisk) ore zones; 15 – rivers; 16 – settlements.

имеет практическое значение и дает дополнительную информацию для выявления перспективных золоторудных участков.

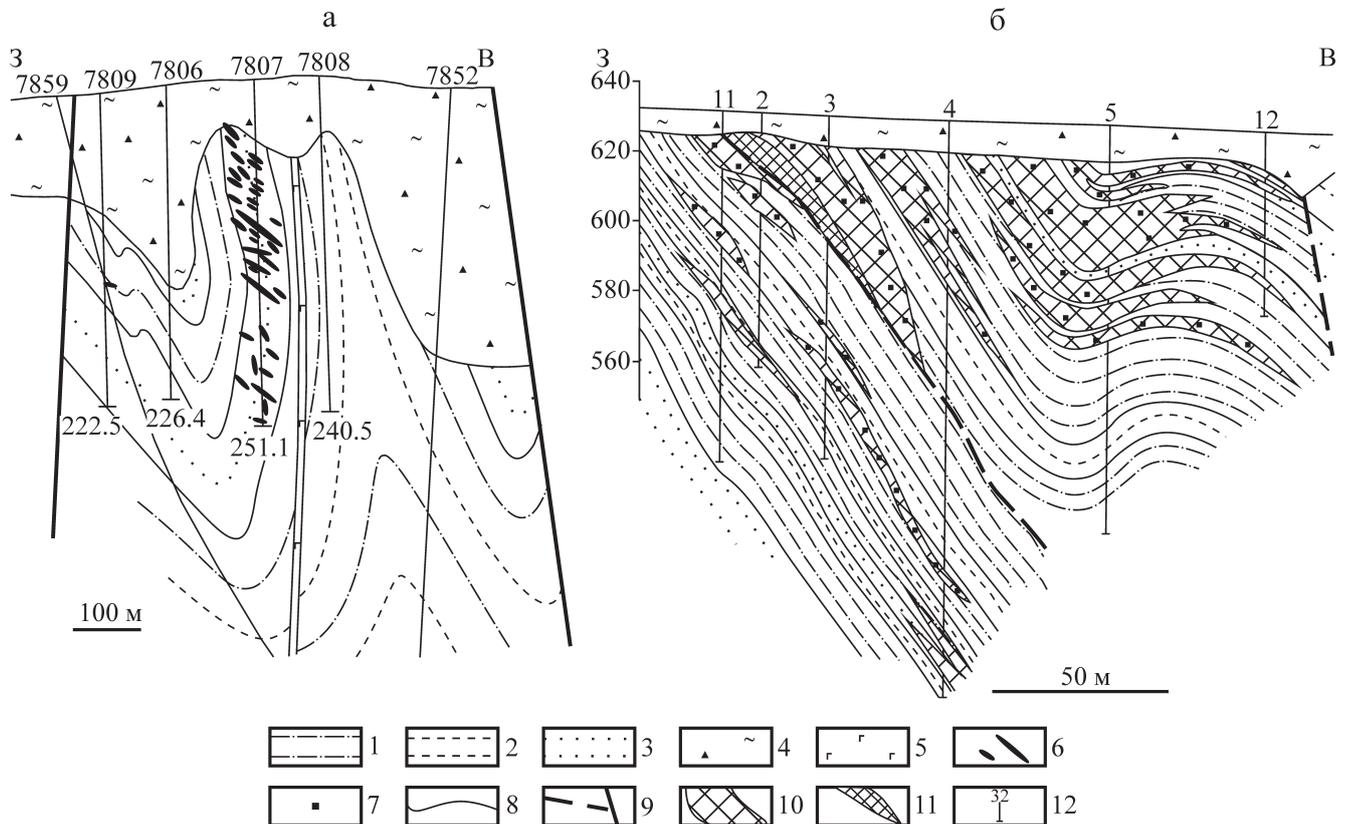
### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Детальные поисковые работы на золото в Авзянском рудном районе проводились в 1970–1980 гг. Западно-Башкирской экспедицией Башкирского геологического управления [Потехин и др., 1977] и Северо-Восточной экспедицией производственного объединения “Башкиргеология” [Чернов, Нечаев, 1980; Чернов и др., 1982]. Геологическое строение рудопроявлений приводится по их материалам.

**Исмакеевская рудная зона** включает три рудопроявления золота малосульфидного золото-кварцевого типа: Рамеева жила, Улюк-Бар и Кургашлинское, расположенные в 1.5 км западнее д. Ис-

макаево и протягивающиеся с юга на север вблизи регионального Караташского разлома (см. рис. 1). По геологическому строению рудопроявления сходны. Наиболее изученным из них является рудопроявление Улюк-Бар, локализованное в присводовой части Айгирской антиклинали и сложенное сильно дислоцированными сланцево-алевролитовыми породами и песчаниками (RF<sub>1</sub>bin). Золото приурочено к пологозалегающим кварцевым жилам лестничного типа мощностью 0.1–2.0 м, сосредоточенным в крутопадающей на восток зоне шириной 30–70 м (рис. 2а), прослеженной на глубину до 250 м и с поверхности в субмеридиональном направлении на 300 м. Содержание золота в кварцевых жилах составляет в среднем 2.9–5.2 г/т.

**Горноприискская рудная зона** включает месторождение Горный Прииск и рудопроявления Калашникова жила и Богряшка, расположенные в 6–10 км севернее пос. В. Авзян между двумя реги-



**Рис. 2.** Геологические разрезы рудопроявления Улюк-Бар (а) и месторождения Горный Прииск (б) (по материалам Западно-Башкирской и Северо-Восточной экспедиций).

1 – сланцы; 2 – алевролиты; 3 – песчаники; 4 – кора выветривания; 5 – долериты; 6 – кварцевые жилы; 7 – вкрапленность пирита; 8 – литологические контакты; 9 – тектонические нарушения; 10, 11 – зоны с различным содержанием золота в породах (10 – от 0.5 до 4.0 г/т, 11 – более 4.0 г/т); 12 – скважины.

**Fig. 2.** Geological sections of the Ulyuk-Bar mineralizations (a) and the Gorny Priisk deposit (b) (on the materials of West Bashkirian and North Eastern expeditions).

1 – shales; 2 – siltstones; 3 – sandstones; 4 – weathering crust; 5 – dolerites; 6 – quartz veins; 7 – impregnation of pyrites; 8 – lithologic boundaries; 9 – faults; 10, 11 – zones with different gold content in the rocks (10 – from 0.5 to 4.0 ppm; 11 – more than 4.0 ppm); 12 – boreholes.

ональными разрывными структурами – Караташским и Большеавзянским разломами (см. рис. 1). В структурном отношении они приурочены к присводовой части Большеавзянской антиклинали. Породы, слагающие рудное поле, интенсивно дислоцированы. Вмещающими породами месторождения Горный Прииск (рис. 2б) являются сланцы и алевролиты с отдельными прослоями песчаников ( $RF_2zk$ ). Рудоносные кварцевые жилы северо-восточного и северо-западного простирания оперяют субширотные разломы. Золото встречается также в сульфидизированных сланцах. Его содержание резко кустовое, от десятых долей до 30 г/т.

Рудопроявление Богряшка (см. рис. 1) представляет собой зону метасоматически преобразованных доломитов ( $RF_1sr$ ) с золотосодержащей сульфидной минерализацией. Штокообразные тела метасоматитов встречаются на пересечении разрывных нарушений субширотного и северо-западного простирания. Рудные метасоматиты представлены железистыми магнезитами (брейнеритами), в которых содержание Au в среднем составляет 0.2–0.8 г/т, достигая в отдельных пробах, по нашим данным [Шарипова и др., 2017], 2.6 г/т. Связано оно с эпигенетичными по отношению к магнезитам сульфидами [Крупенин и др., 2016; Шарипова и др., 2017].

**Акташская рудная зона** расположена в  $\approx 20$  км южнее пос. В. Авзян. Включает рудопроявления Западно- и Восточно-Акташское. Главный структурный элемент рудного поля – крупная антиклинальная складка, восточное крыло которой пересечено Караташским разломом, интродуцированным дайками габбро-долеритов [Рыкус, Сначев, 1999]. Восточно-Акташское рудопроявление локализуется вдоль контактов дайки габбро-диоритов (?), которая приурочена к крутопадающему разрывному нарушению в известняках ( $RF_3kt$ ). В рудопроявлении выявлены три генерации кварца: маломощные кварцевые и анкерит-кварцевые прожилки (кварц-1 и 2) и лестничные жилы молочно-белого кварца мощностью до 1.5 м (кварц-3) [Бобохов и др., 1993]. Содержание золота в кварцевых прожилках обычно составляет не более 1 г/т и лишь в отдельных пробах достигает десятков граммов на тонну [Рыкус, Сначев, 1999].

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Состав золота определяли на сканирующем электронном микроскопе SamScan-4 с энергодисперсионной приставкой AN 10 000 в АО ВНИИХТ (г. Москва, аналитик Д.И. Кринов). Ускоряющее напряжение составляло от 10 до 25 кВ. Спектр измерялся от 1.4 до 20.0 кэВ. Кроме того, определение элементного состава золота и регистрацию изображений в обратно рассеянных электронах (BSE-изображение) выполняли на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX100, оснащенный пятью волно-

выми спектрометрами в ЦКП “Геоаналитик” (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург). Измерения осуществляли при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе 40 нА. Пределы обнаружения элементов принимают значения в диапазоне от 0.03 до 0.60 мас. %.

Атомно-абсорбционный анализ (ААС) выполнен на спектрофотометре Спектр-5 в ИГ УНЦ РАН (г. Уфа, аналитик Н.Г. Христофорова). Au и Ag определяли с экстракционным концентрированием дифинилтиомочевинной в пробах навеской 10 г. Предел обнаружения при измерении Au составлял 0.010 мкг/мл, Ag – 0.001, Co, Ni, Zn, Pb, Cr – 1.000 мкг/мл.

Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) проводили на спектрометре VRA-30 в ИГ УНЦ РАН (г. Уфа) с использованием рентгеновской трубки с Rh-анодом (30–40 кВ, 30 мА). Предел обнаружения при измерении  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  составлял 0.100 мас. %,  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ , MnO, CaO,  $K_2O$ ,  $P_2O_5$ ,  $S_{общ}$  – 0.010, MgO – 0.200, As, Pb – 0.001 мас. %.

Определение петрогенных и редких элементов в породах и сульфидах проводили методами ICP-AES на спектрометре ICP-E-9000 в ЦКД КМТНХ Института нефтехимпереработки (г. Уфа) и ICP-MS на ELAN-9000 в ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург, аналитики Н.В. Чередниченко и Н.В. Адамович). Монофракции сульфидов разлагались по методике, описанной в работе М.Т. Крупенина с соавторами [2013].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### Состав сульфидов и золота

Основная часть сульфидных минералов рудопроявления Улюк-Бар развита в зальбандах кварцевых жил и вблизи них во вмещающих породах. Преобладают пирит и арсенопирит. Галенит и сфалерит иногда образуют мелкие выделения в зернах арсенопирита, реже – пирита. Сфалерит дает сростки с халькопиритом. Отмечается сравнительно широкое развитие герсдорфита [Мичурин и др., 2009]. В микроэлементном составе пирита (монофракции отбирали под бинокулярным микроскопом) отмечается высокая концентрация As, Co, Ni, Pb и некоторых других элементов (табл. 1, 2). Отношение Co/Ni в пирите составляет в среднем 1.2.

Золото выделяется в самородной форме в пирите и арсенопирите, часто на контакте их зерен (рис. 3а, б). Оно образует бесформенные, изометричные, удлиненные и прожилковидные выделения размером до 0.1 мм. Иногда золото в арсенопирите ассоциирует с галенитом. Наблюдаются также его сростания с халькопиритом. В отдельных случаях отмечаются обособления золота в песчаниках, но обязательно в присутствии сульфидов (см. рис. 3а). В составе золота установлены примеси Fe (0.0–2.8 мас. %), As (0.0–1.6), Te (0.00–0.46),

**Таблица 1.** Содержание редких элементов в сульфидах Исмакаевской рудной зоны и сульфидах из осадочных пород вне площади рудопроявлений по данным ICP-MS, г/т

**Table 1.** The content of trace elements in the sulphides of the Ismakayevo ore zone and in sulphides from sedimentary rocks outside the area of ore occurrences according to the ICP-MS, ppm

Элемент	M-210	M-213	A-12385	A-12416	A-12417	A-12687	A-13109
Ti	29.4	102.4	4.6	32.1	29.1	35.5	<ПО
V	0.2	1.8	0.4	3.1	1.5	2.2	0.5
Cr	0.7	6.1	3.5	6.2	2.6	8.2	1.5
Mn	5.7	18.9	1.6	106.8	142.9	9.3	5.5
Co	137.7	274.5	498.6	259.3	372.6	179.2	68.9
Ni	88.0	87.0	408.9	473.9	294.4	81.1	104.8
Cu	241.8	23.4	100.5	57.4	60.1	<ПО	11.4
Zn	4.4	6.2	9.2	78.9	9.7	28.9	1.5
Ga	0.3	0.5	1.0	1.2	0.6	0.8	0.2
Ge	0.7	0.6	1.2	0.6	0.5	0.6	0.7
As	97.5	6.8	701.1	285.2	286.4	166.8	–
Se	5.3	3.8	8.7	4.5	5.6	3.8	5.6
Mo	0.8	0.1	1.5	1.5	0.3	0.4	0.9
Ag	0.7	0.4	0.8	2.7	2.7	0.8	1.5
Cd	<ПО	0.05	0.02	0.17	0.09	0.02	<ПО
Sn	0.04	0.03	<ПО	0.08	0.02	<ПО	0.06
Sb	13.4	0.7	11.8	7.5	5.4	15.5	172.4
Te	0.8	1.6	0.5	1.0	0.8	0.3	0.8
Ta	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
W	0.12	0.16	<ПО	0.21	0.14	0.13	0.09
Tl	0.02	0.03	0.20	0.41	0.08	0.12	<ПО
Pb	161.4	33.6	190.9	281.7	341.9	157.9	166.6
Bi	3.7	2.8	4.2	9.5	7.1	3.0	7.2
Th	1.1	1.8	3.5	9.8	1.8	3.6	1.9
U	0.6	0.5	2.2	4.7	1.0	1.0	<ПО
$\Sigma L_{REE}$	31.7	5.7	186.1	145.9	56.5	73.4	25.1
$\Sigma H_{REE}$	1.4	1.1	7.8	8.3	4.5	3.7	1.3
Co/Ni	1.6	3.2	1.2	0.5	1.3	2.2	0.7
Th/U	1.8	3.7	1.6	2.1	1.8	3.5	4.6
$\Sigma L_{REE}/\Sigma H_{REE}$	23.4	5.3	23.9	17.5	12.4	19.9	19.3
Pb/Ni	1.8	0.4	0.5	0.6	1.2	1.9	1.6
Pb/Bi	43.7	12.0	45.2	29.5	48.3	53.0	23.1
Y/Ho	27.9	26.0	29.4	24.4	25.6	25.1	28.4
$\Sigma_{As+Co+Ni+Cu+Zn+Pb}$	730.8	431.5	1909.2	1436.3	1365.1	614.0	–

Примечание. M-210, M-213 – пириты из терригенно-карбонатных пород стратотипического разреза большеинзерской свиты на правом берегу р. Бол. Инзер в 3 км ниже р. Суран; A-12385–A-12417 – пириты из аргиллитов и алевролитов рудопроявления Улюк-Бар, скв. № 7804 (гл. 80.0, 137.5, 145.0 м); A-12687 – пирит из алевролита рудопроявления Кургашлинское, скв. № 7814 (гл. 128.0 м); A-13109 – арсенопирит из песчаника рудопроявления Улюк-Бар, скв. № 7854 (гл. 479.5 м). Здесь и в остальных таблицах:  $\Sigma L_{REE}/\Sigma H_{REE}$  – отношение суммы легких REE к сумме тяжелых; <ПО – содержание элемента ниже предела обнаружения. Прочерк – нет данных.

Note. M-210, M-213 – pyrites from terrigenous-carbonate rocks of the stratotypic section of the Bolshoi Inzer formation on the right bank of the river. Bol. Inzer at 3 km below the river Suran; A-12385–A-12417 – pyrites from mudstone and siltstone ore occurrences Ulyuk-Bar, borehole no. 7804 (depth 80.0, 137.5, 145.0 m); A-12687 – pyrite from siltstone ore occurrences Kurgashli, borehole no. 7814 (depth 128.0 m); A-13109 – arsenopyrite from the sandstone ore occurrences Ulyuk-Bar, borehole no. 7854 (depth 479.5 m). Here and in the following tables:  $\Sigma L_{REE}/\Sigma H_{REE}$  – the ratio of the sum of light REE to the sum of heavy REE; <ПО – the content of the element below the detection limit. Dash – no data.

S (0.11–1.03 мас. %) (табл. 3). Изредка в нем фиксируется незначительное содержание Ni, Co, Se – до 0.1–0.2 мас. %. Содержание Ag составляет от 11.27 до 16.96 мас. % при отношении Au/Ag от 5 до 8. Cu и Zn не обнаружены.

Среди сульфидов рудопроявления Богряшка преобладает пирит в виде мелкокристаллических сфероидальных агрегатов зонального строения.

Пирит подразделяется на несколько генераций, образованных в несколько стадий. В химическом составе золотоносного пирита, как правило, отмечается значительная примесь As, и он характеризуется близким к метеоритному стандарту значениями  $\delta^{34}S$  [Шарипова и др., 2017]. Он возникал на заключительных этапах и “накладывался” на “безрудные” пириты, присутствовавшие в осадочных по-

**Таблица 2.** Содержание редких элементов в сульфидах рудопроявления Улюк-Бар по данным ICP-AES, г/т**Table 2.** The content of trace elements in the sulfides of the Ulyuk-Bar mineralization according to the ICP-AES, ppm

Элемент	A-12414	A-12972	A-12974	A-13002	A-13054	A-13121
Ti	<ПО	47.8	75.1	<ПО	<ПО	<ПО
Cr	<ПО	7.6	7.6	7.0	16.8	14.0
Mn	5.5	11.4	40.8	19.4	22.2	34.6
Co	415.7	318.3	327.8	409.9	98.0	74.3
Ni	491.1	182.4	262.6	307.4	262.0	115.4
Cu	10.0	116.9	62.8	92.6	823.5	361.0
Zn	19.8	52.8	43.7	60.2	22.0	19.3
Ge	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
As	89.7	<ПО	<ПО	42.3	232.1	31.3
Mo	<ПО	0.1	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Te	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
W	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Pb	155.6	334.1	234.1	76.9	180.3	107.6
Co/Ni	0.8	1.7	1.2	1.3	0.4	0.6
Pb/Ni	0.3	1.8	0.9	0.3	0.7	0.9
$\Sigma^*$	1181.9	1004.4	930.9	989.5	1617.8	708.9

Примечание. А-12414 – пирит из аргиллита, скв. № 7804 (гл. 53.5 м); А-12972, А-12974 – пириты из алевролита и аргиллита, скв. № 7860 (гл. 125.0, 178.0 м); А-13002 – пирит из аргиллита, скв. № 7855 (гл. 372.0 м); А-13054 – сульфидный концентрат (пирит + арсенопирит) из песчаника, скв. № 7852 (гл. 582.1 м); А-13121 – пирротин из алевролита, скв. № 7854 (гл. 702.0 м);  $\Sigma^*$  – сумма As + Co + Ni + Cu + Zn + Pb.

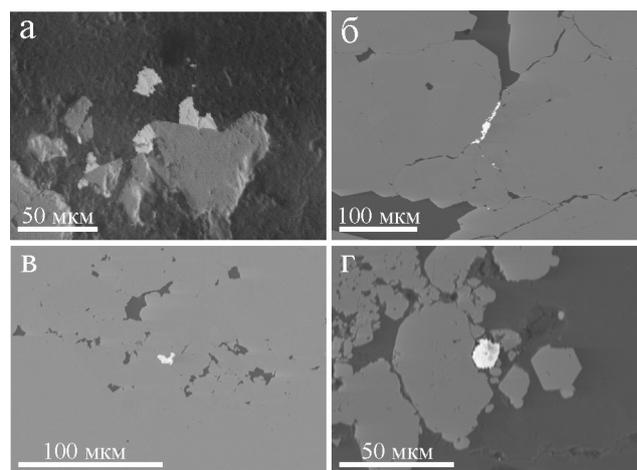
Note. A-12414 – pyrite from argillite, borehole № 7804 (depth 53.5 m); A-12972, A-12974 – pyrites from siltstone and argillite, borehole no. 7860 (depth 125.0, 178.0 m); A-13002 – pyrite from argillite, borehole no. 7855 (depth 372.0 m); A-13054 – sulphide concentrate (pyrite + arsenopyrite) from sandstone, borehole no. 7852 (depth 582.1 m); A-13121 – pyrrhotite from siltstone, borehole no. 7854 (depth 702.0 m);  $\Sigma^*$  – sum As + Co + Ni + Cu + Zn + Pb.

**Таблица 3.** Состав золота рудопроявлений Улюк-Бар и Богряшка, мас. %**Table 3.** The composition of gold from occurrences Ulyuk-Bar and Bogryashka, wt %

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Au	88.26	88.35	86.45	86.23	86.52	86.22	80.19	79.93	76.98	93.81	94.62
Ag	11.31	11.27	12.55	13.02	12.45	12.95	16.96	16.79	14.66	4.10	3.08
S	0.16	0.11	0.25	0.28	0.58	0.41	<ПО	<ПО	1.03	0.13	0.13
Fe	<ПО	0.13	<ПО	<ПО	<ПО	0.19	0.21	0.46	2.80	1.42	2.38
Co	<ПО	<ПО	0.06	<ПО	0.14	0.07	<ПО	<ПО	<ПО	–	–
Ni	<ПО	<ПО	0.23	<ПО	0.06	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	–	–
Cu	<ПО	0.08	0.05								
As	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	0.10	0.18	0.31	1.60	0.07	0.06
Te	0.23	0.12	0.36	0.46	0.22	<ПО	–	–	–	<ПО	0.05
Hg	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.08	0.04
Bi	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.51	0.46

Примечание. Анализы 1–9 выполнены на CamScan-4, 10, 11 – на Cameca SX-100. 1–6 – золото из коры выветривания; 7–9 – золото из песчаника с пирит-арсенопиритовой минерализацией, А-13064, скв. № 7852, гл. 673.0 м (см. рис. 3а); 10, 11 – золото на границе пиритовых зерен в брейнерите, А-12347, скв. № 35, гл. 204.5–204.6 м (см. рис. 3б–в).

Note. Analyzes 1–9 are performed on CamScan-4, 10, 11 – on Cameca SX-100. 1–6 – gold from the weathering crust; 7–9 – gold from sandstone with pyrite-arsenopyrite mineralization, A-13064, borehole no. 7852, depth 673.0 m (see Fig. 3a); 10, 11 – gold on the boundary of pyrite grains in breunnerite, A-12347, borehole no. 35, depth 204.5–204.6 m (see Fig. 3b–v).

**Рис. 3.** Самородное золото, ураноторит и твердый раствор (Sn, Pb, Bi) в пиритах из рудопроявлений Улюк-Бар и Богряшка на BSE-изображениях.

а – Au в песчанике на контакте с арсенопиритом, А-13064, скв. № 7852, гл. 673.0 м; б – Au в пирите, А-12347, скв. № 35, гл. 204.5–204.6 м; в – ураноторит в пирите, А-12347; г – твердый раствор (Sn, Pb, Bi) в пирите, А-12346а, скв. № 35, гл. 189.5 м.

**Fig. 3.** Native gold, uranothorite and (Sn, Pb, Bi) solid solution in pyrites of the Ulyuk-Bar and Bogryashka mineralizations on BSE-images.

а – Au in sandstone in boundary with arsenopyrite, A-13064, borehole no. 7852, depth 673.0 m; б – Au in pyrite, A-12347, borehole no. 35, depth 204.5–204.6 m; в – uranothorite in pyrite, A-12347; г – (Sn, Pb, Bi) solid solution in pyrite, A-12346a, borehole no. 35, depth 189.5 m.

родах. Арсенопирит встречается реже. Халькопирит помимо микровключений в пирите формирует самостоятельные выделения размером до 0.2 мм

**Таблица 4.** Содержание редких элементов в сульфидах Горноприискской рудной зоны и Восточно-Акташского рудопроявления по данным ICP-MS, г/т

**Table 4.** The content of trace elements in the sulphides of the Gorny Priisk ore zone and East Aktash mineralization according to the ICP-MS, g/t

Элемент	A-12452a	23/14	23/30	165/7	A-12346в	A-12351	Ак-7п	Ак-12п
Ti	1.8	17.7	7.7	9.2	0.1	24.3	3837.0	4796.0
V	0.2	0.1	<ПО	1.7	<ПО	0.4	42.5	45.1
Cr	0.2	0.7	0.5	0.6	0.1	3.5	< ПО	< ПО
Mn	3.7	9.6	9.7	3.1	44.8	126.3	80.8	51.0
Co	91.6	26.5	22.7	37.9	48.4	111.2	574.0	502.0
Ni	371.0	89.1	20.8	31.4	211.8	317.4	211.6	176.4
Cu	97.8	–	–	–	161.3	30.7	448.7	175.9
Zn	17.0	11.0	9.0	15.0	13.1	11.8	25.7	84.1
Ga	0.3	0.1	0.1	0.03	0.2	0.2	2.4	2.5
Ge	0.9	<ПО	<ПО	<ПО	0.9	0.6	–	–
As	75.9	58.7	11.4	32.4	140.7	1108.0	2.9	2.7
Se	5.2	6.4	6.6	6.2	2.0	2.1	14.9	14.7
Mo	2.2	0.1	0.1	0.2	0.4	26.4	1.5	1.3
Ag	2.7	7.9	8.0	7.8	1.3	1.2	2.5	2.3
Cd	0.01	0.23	0.21	0.37	0.10	<ПО	< ПО	< ПО
Sn	0.05	0.20	0.28	0.23	0.02	0.01	0.88	0.89
Sb	14.9	2.1	1.4	1.0	57.1	59.1	1.1	1.2
Te	0.5	0.6	0.6	0.6	<ПО	<ПО	1.4	1.5
Ta	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	0.5	0.6
W	0.01	0.13	0.12	0.08	<ПО	0.14	2.06	2.22
Tl	1.98	<ПО	<ПО	<ПО	14.74	41.14	0.18	0.15
Pb	197.0	21.2	17.2	18.5	47.8	60.6	18.9	16.7
Bi	1.3	0.4	0.8	0.4	4.0	5.3	7.0	6.9
Th	1.6	0.4	0.2	0.1	0.02	1.1	1.7	1.8
U	0.2	0.2	0.1	0.2	<ПО	1.1	0.7	0.6
$\Sigma L_{REE}$	47.4	5.7	5.6	0.6	0.1	2.8	57.7	61.2
$\Sigma H_{REE}$	2.4	0.5	0.3	0.0	0.0	1.2	5.8	6.2
Co/Ni	0.2	0.3	1.1	1.2	0.2	0.4	2.7	2.8
Th/U	7.7	1.8	3.7	0.3	–	1.0	2.5	3.0
$\Sigma L_{REE}/\Sigma H_{REE}$	19.8	12.4	17.6	–	–	2.2	9.9	9.9
Pb/Ni	0.5	0.2	0.8	0.6	0.2	0.2	0.1	0.1
Pb/Bi	155.9	59.4	21.4	43.3	11.9	11.5	2.7	2.4
Y/Ho	20.1	27.1	19.7	–	–	29.5	25.8	24.6
$\Sigma_{As+Co+Ni+Cu+Zn+Pb}$	850.3	–	–	–	623.1	1639.7	1281.8	957.8

Примечание. A-12452a – пирит из углеродисто-глинистого сланца месторождения Горный Прииск, скв. № 7612 (гл. 111.0 м); 23/14, 23/30, 165/7 – халькопириты из месторождения Горный Прииск, скв. № 23 (гл. 14.0, 30.0 м); скв. № 165 (гл. 7.0 м); A-12346в, A-12351 – пириты из брейнеритов рудопроявления Богряшка, скв. № 35 (гл. 197.5, 226.2 м); Ак-7п, Ак-12п – пириты из габбро-диоритов, Главный шурф Восточно-Акташского рудопроявления.

Note. A-12452a – pyrite from the carbonaceous-shale slate of the Gorny Priisk deposit, borehole no. 7612 (depth 111.0 m); 23/14, 23/30, 165/7 – chalcopyrites from the Gorny Priisk deposit, borehole no. 23 (depth 14.0, 30.0 m); Borehole no. 165 (depth 7.0 m); A-12346в, A-12351 – pyrites from the breunnerites of the Bogryashka mineralization, borehole no. 35 (depth 197.5, 226.2 m); Ak-7p, Ak-12p – pyrites from gabbro-diorites, Main pit of the East Aktash mineralization.

в матрице породы. В пиритах установлена относительно высокая концентрация Sb до 59.1 г/т и Tl до 41.1 г/т (табл. 4). Золото выделяется на границе зерен пирита в виде мелких бесформенных (см. рис. 3б) и иногда четко ограненных обособлений размером 3–10 мкм. В составе золота (см. табл. 3) установлено относительно небольшое содержание Ag (3.08–4.10 мас. %), Fe (1.42–2.38) и Bi (0.46–0.51 мас. %). Отношение Au/Ag составляет 23–31. Ряд других элементов (S, As, Cu, Te, Hg) отмечается на уровне 0.10 мас. %, а Zn, Pd,

Cd, Sn, Sb, Pt и Pb не обнаружены. При микронном анализе в этих же образцах установлены два микровключения ураноторита размером 15–20 мкм (рис. 3в) с содержанием главных элементов, мас. %: Th – 51.19–57.27, U – 8.77–15.86, Pb – 0.13–1.04, Si – 6.46–8.30, а также включение металлического твердого раствора (Sn, Pb, Bi) такого же размера (рис. 3г).

Слабо золотосодержащий пирит (содержание Au составляет 0.2–0.5 г/т по данным ICP-MS) из габбро-диоритов Восточно-Акташского рудопроявления от-

**Таблица 5.** Содержание золота, редких элементов (г/т) и серы (мас. %) в породах Исмакаевской рудной зоны по данным ААС, РФА и ICP-AES**Table 5.** The content of gold, trace elements (g/t) and sulfur (wt %) in Ismakaev ore zone rocks according to AAS, RFA and ICP-AES

№ обр.	Порода, глубина, м	Au	Ag	S <sub>общ</sub>	As	Cu	Zn	Pb	Co	Ni	Cr
<i>Рудопоявление Улюк-Бар</i>											
M-461	P + qc, 75.65	<ПО	<ПО	–	–	13.00	9.50	1.80	3.50	16.40	37.90
M-462	P + qc, 80.50	<ПО	<ПО	0.04	9.90	8.30	15.40	5.70	3.00	16.20	22.10
M-468	P, 87.50	0.25	0.05	0.28	3302.50	21.90	4.50	4.00	8.50	12.80	30.30
M-491	Q, 105.85	<ПО	<ПО	0.02	327.60	15.00	4.00	3.80	0.00	4.40	46.20
M-489	Q, 106.25	<ПО	<ПО	<ПО	8.40	14.90	5.50	2.70	7.00	11.80	35.90
M-487	P + qc, 111.20	0.10	<ПО	0.02	55.20	10.60	6.40	5.80	6.00	9.90	34.90
M-484	P, 115.30	1.16	0.14	0.95	7461.60	28.40	10.10	5.50	10.10	13.50	39.90
M-480	P + qc, 124.90	0.23	<ПО	0.03	57.00	8.80	5.00	6.10	<ПО	11.00	21.10
M-492	P + qc, 187.50	0.35	0.56	0.04	10.90	284.00	3.30	30.60	0.70	10.20	20.00
A-12417	Ar; 137.50	<ПО	0.29	2.07	30.00	62.30	59.80	42.50	47.00	60.10	41.10
A-12419	Ar; 156.00	<ПО	<ПО	0.41	27.20	56.60	49.90	13.80	16.10	40.80	39.30
A-12421	Al + Ar; 239.70	0.14	0.17	0.01	28.20	8.70	62.60	0.00	16.60	25.50	57.60
A-13031	Al + qc; 236.60	<ПО	<ПО	0.40	10.70	31.70	64.50	23.40	18.40	34.50	42.50
A-13036	Al; 393.00	<ПО	<ПО	0.21	13.20	13.80	57.40	1.30	7.60	19.50	57.60
A-13045	Al + qc; 441.40	<ПО	0.05	0.46	15.90	38.30	36.80	3.40	10.50	20.70	31.40
A-13050	P; 514.00	<ПО	0.28	0.57	573.60	19.10	17.40	65.90	13.60	19.80	39.40
A-13062	P + q; 667.70	<ПО	0.02	0.22	11195.40	18.50	13.30	2.80	6.00	18.90	55.40
A-13064	P + q; 673.00	0.40	0.13	–	–	55.20	10.00	<ПО	17.50	48.40	124.20
A-13102	Al + c; 373.80	<ПО	0.05	0.09	10619.00	18.80	16.40	2.80	7.80	13.00	48.90
A-13109	P; 479.50	<ПО	0.75	0.14	9219.80	21.60	16.30	10.00	15.80	14.30	37.70
A-13119	Ar; 613.00	<ПО	0.13	0.32	24.70	81.00	64.50	16.00	23.30	49.30	68.20
A-12974	Al + Ar; 178.00	<ПО	0.10	0.76	16.80	22.30	65.10	43.00	31.40	56.00	55.20
A-12976	P; 201.00	<ПО	0.02	<ПО	20.80	11.00	20.40	1.20	14.50	8.30	26.70
<i>Рудопоявление Кургашилское</i>											
M-508	S + c, 98.60	<ПО	<ПО	0.21	11.10	18.20	36.70	4.00	3.30	35.40	45.90
M-503	S + c, 167.60	<ПО	<ПО	0.09	10.10	18.00	10.00	3.40	<ПО	12.90	7.10
M-501	S + c, 197.65	<ПО	<ПО	0.25	12.70	13.60	34.70	9.80	9.30	28.20	36.20
M-496	S + c, 201.45	<ПО	0.12	1.26	77.70	133.50	74.30	14.10	24.70	103.40	55.80
M-529	S + c, 37.05	<ПО	0.05	0.64	11.90	127.00	46.90	11.40	25.80	68.60	33.10
M-527	S + c, 43.35	0.17	<ПО	0.40	8.700	44.90	52.80	8.60	6.40	44.90	40.30
<i>Рудопоявление Рамеева жила</i>											
M-521	S + c, 99.55	0.24	0.13	0.41	14.30	43.00	30.50	6.60	3.50	39.50	56.70
M-518	S + c, 122.00	<ПО	0.35	0.16	13.10	26.20	36.70	37.00	6.50	45.30	33.60
M-510	S + c, 166.70	<ПО	0.80	4.79	70.50	194.70	73.70	189.50	106.70	115.70	53.00

Примечание. P – песчаник; Q – жильный кварц; Al – алевролит; Ar – аргиллит; S – сланец; q, c и qc – кварцевые, карбонатные и кварц-карбонатные прожилки в породе. M-461–M-492 – скв. № 18; A-12417–A-12421 – скв. № 7808; A-13031–A-13064 – скв. № 7852; A-13102–A-13119 – скв. № 7854; A-12974, A-12976 – скв. № 7860; M-496–M-508 – скв. № 26; M-527, M-529 – скв. № 31; M-510–M-521 – скв. № 21.

Note. P – sandstone; Q – veined quartz; Al – siltstone; Ar – argillite; S – shale; q, c and qc – quartz, carbonate and quartz-carbonate veins in the rock. M-461–M-492 – borehole no. 18; A-12417–A-12421 – borehole no. 7808; A-13031–A-13064 – borehole no. 7852; A-13102–A-13119 – borehole no. 7854; A-12974, A-12976 – borehole no. 7860; M-496–M-508 – borehole no. 26; M-527, M-529 – borehole no. 31; M-510–M-521 – borehole no. 21.

личается большой концентрацией Ti (до 4796.0 г/т), Co (до 574.0) и V (до 45.1 г/т) (см. табл. 4).

### Геохимические связи золота

В пределах площади рудопоявления Улюк-Бар (скв. № 18, n=9) по результатам РФА (As, Pb, S<sub>общ</sub>) и ААС (Au, Ag, Cu, Co, Ni, Zn, Pb, Cr) самые высокие коэффициенты корреляции Au отмечаются

только с S (0.95) и As (0.90) (табл. 5). Невысокая положительная связь устанавливается с Co (0.49). С остальными элементами (Ag, Cu, Zn, Ni, Pb, Cr) золото не обнаруживает значимой связи. Ag имеет наибольшие коэффициенты корреляции с Cu (0.98) и Pb (0.96).

Анализ корреляционных связей золота с редкими элементами по данным метода ICP-AES для образцов из скв. № 18 показывает его высокую по-

**Таблица 6.** Содержание золота, редких элементов (г/т) и серы (мас. %) в породах Горноприискской и Акташской рудных зон по данным ААС, РФА и ICP-AES

**Table 6.** The content of gold, trace elements (g/t) and sulfur (wt %) in Gorny Priisk and Aktash ore zone rocks according to AAS, RFA and ICP-AES

№ Обр.	Порода, глубина, м	Au	Ag	S <sub>общ</sub>	As	Cu	Zn	Pb	Co	Ni	Cr
<i>Месторождение Горный Прииск</i>											
M-641	Q, карьер	<ПО	<ПО	0.03	754.10	21.00	6.60	4.80	1.00	5.90	39.60
M-643	Q, карьер	<ПО	<ПО	0.03	244.70	19.30	4.40	3.30	6.50	8.20	59.90
A-12446	S, 52.0	<ПО	0.05	0.17	24.80	40.40	19.20	5.40	13.00	23.50	73.70
A-12451	S, 89.6	4.06	1.88	5.11	13.20	144.10	37.90	17.20	113.20	131.80	17.50
A-12452	S, 111.0	<ПО	0.21	–	–	36.00	33.10	–	16.50	48.00	22.60
<i>Рудопроявление Богряшка</i>											
A-12342	B + D, 47.0	<ПО	<ПО	0.69	33.00	<ПО	22.00	8.00	55.00	15.00	–
A-12341	B + q, 68.0	<ПО	<ПО	1.36	14.00	<ПО	14.00	19.00	40.00	14.00	–
A-12344	B + D, 74.0	0.11	0.36	0.27	2153.00	<ПО	23.00	21.00	55.00	21.00	–
A-12345	B + D, 84.5	0.17	0.40	0.68	46.00	<ПО	20.00	16.00	38.00	21.00	–
A-12346а	B + D, 189.5	2.60	1.57	13.01	336.00	43.0	21.00	6.00	91.00	33.00	–
A-12350	B + q, 193.5	<ПО	0.27	0.31	29.00	<ПО	33.00	26.00	17.00	18.00	–
A-12346	B + D, 197.5	1.00	2.02	9.95	21.00	43.0	22.00	3.00	54.00	68.00	10.00
A-12349	B + D, 211.0	0.16	<ПО	0.17	<ПО	<ПО	16.00	6.00	46.00	14.00	–
A-12352	B + D + q, 250.0	<ПО	<ПО	0.13	11.00	<ПО	27.00	126.00	63.00	16.00	–
A-13478	D + q, 88.5	<ПО	0.13	0.17	10.00	<ПО	26.00	60.00	<ПО	10.00	–
A-13479	B, 94.0	<ПО	0.08	0.17	17.00	<ПО	13.00	22.00	4.00	14.00	–
<i>Рудопроявление Восточно-Акташское</i>											
АК-7	G, дайка	<ПО	0.09	0.83	10.90	82.60	61.80	10.70	39.00	29.00	20.40
АК-9	G, дайка	<ПО	0.10	0.39	11.70	30.90	155.40	5.60	38.00	30.60	13.50
АК-12	G + qс, дайка	<ПО	0.07	0.32	13.20	47.20	65.50	6.30	22.80	19.30	10.40
АК-13	Q + с, шурф	<ПО	<ПО	0.08	17.40	9.00	12.50	3.40	2.30	10.50	16.80
АК-21	Q + с, шурф	<ПО	<ПО	<ПО	39.20	45.30	12.80	2.00	2.80	16.20	51.70
Б-9261	G, дайка	0.44	0.34	0.02	34.40	50.70	103.10	6.80	52.40	18.20	12.00
Б-9262	Q, жила	<ПО	0.07	<ПО	34.20	7.90	11.20	6.50	4.50	7.50	6.50
Б-9264	Q, жила	<ПО	<ПО	<ПО	15.60	17.10	2.00	3.80	5.00	13.30	56.80
Б-9265	С, вмещающие	0.15	0.04	<ПО	13.80	2.20	21.40	9.50	3.00	7.00	10.40
Б-9266	С, вмещающие	0.17	0.07	<ПО	15.90	4.40	29.90	10.00	4.00	9.30	19.50

Примечание. В – брейнерит, D – доломит, G – габбро-диорит. Остальные обозначения, как в табл. 5. А-12441–А-12452 – скв. № 7612; А-12341–А-12352 – скв. № 35; А-13478, А-13479 – скв. № 33.

Note. В – breunnerite, D – dolomite, G – gabbro-diorite; the rest of the notation, as in the table 5. А-12441–А-12452 – borehole no. 7612; А-12341–А-12352 – borehole no. 35; А-13478, А-13479 – borehole no. 33.

ложительную связь с Co (0.94), В (0.87), Ва (0.77), V (0.68), Ti (0.67) и низкую – с Zr (0.60), Sc (0.58), U (0.56), Ni (0.54), Fe (0.54), Ce (0.54), P (0.53), Zn (0.49), Mn (0.39).

В то же время по результатам анализа методами РФА, ААС и ICP-AES всей выборки проб (n = 32), с учетом других скважин Исмакаевской рудной зоны, не обнаруживается связь золота ни с одним из элементов, за исключением незначимых коэффициентов корреляции с Mn (0.43), U (0.40), As (0.30) и W (0.24). Отметим, что W обнаружен на уровне 0.2–0.4 г/т в 4 пробах из рудопроявления Улюк-Бар.

Проведенный нами корреляционный анализ результатов спектрального полуколичественного метода (Be, P, Sc, V, Cr, Mn, Co, Cu, Zn, Ge, As, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sn, Sb, Ba, La, W, Tl, Pb, Bi) и пробирного анализа (Au и Ag) по 180 керновым пробам из основной рудоносной скважины № 7807 ру-

допроявления Улюк-Бар показал незначительную связь Au только с As (0.40) и Ag (0.32). С другими элементами, в том числе Cu, Zn, Pb и W, золото имеет почти нулевые коэффициенты корреляции.

При анализе небольшого количества проб кварца и сульфидизированных сланцев месторождения Горный Прииск методами ААС и РФА установлена сильная положительная связь Au с S<sub>общ</sub>, халько- и сидерофильными элементами Ag, Cu, Co, Pb, Ni с коэффициентами корреляции от 0.95 до 1.00 (табл. 6). Слабее выражена его положительная корреляция с Zn (0.65). С As и Cr связь не выявлена. По результатам ICP-AES высокие коэффициенты корреляции Au установлены с некоторыми петрогенными элементами – P (0.99), Ca (0.96), Mg (0.81), Fe (0.70), Mn (0.59) и редкими – Cu (0.99), Co (0.98), Sr (0.96), Ni (0.94), Pb (0.94), Y (0.89), Th (0.87), Li (0.86), Zn (0.75), Yb (0.74), Hf (0.69), Sn (0.65), Ta

(0.58). В двух пробах (сланце и образце кварцевой жилы) обнаружен W в количестве 0.1–0.2 г/т.

Анализ рудных метасоматитов рудопроявления Богряшка методами ААС и РФА (см. табл. 6) показывает сильную положительную связь Au с S (0.94), халькофильными элементами Cu (0.89), Ag (0.80) и в меньшей степени с сидерофильными элементами Co (0.66), Ni (0.56). При этом с As, Zn, Pb и Cr связь не установлена. Данные изучения магнезиально-железистых метасоматитов рудопроявления методом ICP-MS [Крупенин и др., 2016] не обнаруживают в них каких-либо аномальных содержаний, за исключением единичных случаев высокой концентрации As (1508.0 г/т), Sb (15.8) и Pb (до 22.0 г/т). Корреляционный анализ между микроэлементным и минералогическим составами метасоматитов показывает, что с кварцем и мусковитом связаны Li, Be, Ti, V, Ga, Ge, Rb, Zr, Nb, La, Ce, Pr, Hf, U, Cs; с пиритом – Cr, Co, Cu, Ni, Zn, Se, Mo, Ag, Cd, Sn, W, Tl, Pb, Bi, Th, Sb, Ba; с магнезитом и доломитом – Be, Mn, Ga, Ge, As, Rb, Sr, Y и тяжелые лантаноиды [Крупенин и др., 2016]. U и Th ведут себя по-разному, первый связан с кварцем, а второй – с пиритом, с которым ассоциирует ураноторит (см. рис. 3в). При этом содержание Th в изученных пробах относительно низкое (до 2.8 г/т) и устанавливается его существенная корреляция с легкими лантаноидами (0.83–0.86). Изучение проб микрозондовым анализом показало, что помимо ураноторита они содержат акцессорную вкрапленность монацита. Анализ связи содержания Au с содержанием микроэлементов в метасоматитах на основе данных метода ICP-MS подтверждает положительную корреляцию золота практически с теми же элементами, которые связаны с пиритом. Однако наибольшие коэффициенты корреляции золото имеет с Sb (0.90), Bi (0.79), Cu (0.78), Ni (0.78), Pb (0.77), Ag (0.74), Co (0.68), Ba (0.63) и совсем не обнаруживает связи или имеет очень низкие коэффициенты корреляции с As, Mo, Sn, W, Tl, Th, U.

Анализ данных по рудопроявлению Восточно-Акташское методами ААС и РФА (см. табл. 6) показывает наличие сильной положительной связи Au только с Ag (0.82). Из других элементов крайне слабая связь фиксируется с Co (0.42) и As (0.37), отсутствие корреляции Au – с S, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr. Вместе с тем по данным ICP-AES наибольшие корреляционные связи золота устанавливаются с Mn (0.60) и Th (0.58).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### Микроэлементный состав пирита

Согласно исследованиям А.Э. Китаенко [Типоморфизм..., 1989], в пиритах различного генезиса распределение элементов-примесей закономерно изменяется. Осадочно-диагенетический пирит,

как правило, характеризуется очень низким содержанием всех элементов и их минимальным суммарным количеством, которое не превышает 600 г/т; отношение Co/Ni в нем обычно составляет не более 0.7. Пирит гидротермального генезиса имеет высокое содержание халькофильных элементов Cu, Pb, Zn, As (в сумме до 2000 г/т и больше) и среднее – сидерофильных Co, Ni (до 500 г/т и больше) при Co/Ni = 1.5. Невысокое отношение Co/Ni, не превышающее ≈0.1, в пирите осадочно-диагенетического происхождения подтверждается исследованиями современных океанических осадков [Kohn et al., 1998]. Такое же отношение кобальта к никелю характерно и для раннедиагенетических пиритовых конкреций из осадочных отложений мела и девона Русской платформы [Бугельский и др., 2003].

По данным, приведенным в работах [Коробейников и др., 1993; Юргенсон, 2003], пириты из месторождений золоторудных формаций характеризуются высоким содержанием Au (>n г/т), Ag (>5), As (>900) и Zn (>1000 г/т). В мышьяковистом пирите золоторудных месторождений может содержаться до 10 мас. % As [Reich et al., 2005; Замятина и др., 2014; Волков, Сидоров, 2016], для него характерны примеси Sb, Hg, Ni, Co, Cu, Tl, Ag, Zn, Se и Te. Величина отношения Co/Ni в пиритах довольно изменчива, что может проявляться даже в пределах одного месторождения, однако в ряду золотокварцевые–золото-сульфидно-кварцевые–золото-кварцево-сульфидные месторождения в целом данное отношение увеличивается с 0.8 до 2.9 [Юргенсон, 2003].

При выявлении источников рудообразующих флюидов используются данные по распределению редкоземельных элементов (REE) и различным соотношениям редких элементов Hf/Sm, Nb/La, Th/La, Th/U, Y/No в пиритах, арсенопиритах и вмещающих породах [Бугельский и др., 2003; Kun et al., 2014]. Редкоземельные элементы в геологических процессах при низких температурах отличаются невысокой активностью. В пирите они связаны главным образом с флюидными включениями и не могут входить в его кристаллическую структуру, поскольку их ионные радиусы ( $REE^{3+} = 0.0977–0.116$  нм) превышают размер  $Fe^{2+}$  (0.078 нм) [Guangzhou et al., 2009]. Составы REE в сульфидах наследуют в целом состав флюида, в котором устойчивость лантаноидов определяется хлоридными комплексами [Римская-Корсакова, Дубинин, 2003].

Положительная корреляция золота с серой, халько- и сидерофильными элементами в рудопроявлениях золота Исмакаевской и Горноприисковской зон указывает на его связь с сульфидной минерализацией. В этом случае важно проанализировать микроэлементный состав “рудных” и “безрудных” сульфидов с целью определить их отличительные особенности.

Анализ показывает, что в сульфидах из рудопроявлений золота Исмакаевской рудной зоны и в “безрудных” сульфидах за пределами зоны при одинаковом наборе микроэлементов различие фиксируется только в их количестве – в “рудных” сульфидах по сравнению с “безрудными” их содержание в 1.5–2.5 раза больше. Главным образом это происходит за счет увеличения содержания As, Co, Ni, Cu, Pb. В пиритах Исмакаевской зоны сумма содержаний этих элементов в среднем составляет  $\approx 1230$  г/т, что характерно для пирита гидротермального генезиса [Типоморфизм..., 1989], тогда как в пиритах из разновозрастных пород за пределами рудной зоны – в среднем только  $\approx 580$  г/т (см. табл. 1, 2). На диаграмме (рис. 4), хорошо видно, что пирит из рудопроявлений Улюк-Бар и Кургашлинское по сравнению с пиритом из осадочных пород вне площади рудопроявлений в большей степени обогащен элементами, которые могут замещать железо (Co, Ni) или серу (As) в структуре пирита. “Безрудные” пириты характеризуются более низким содержанием этих элементов, и их фигуративные точки на диаграмме занимают обособленное поле, тяготеющее к началу координат.

В то же время анализ отношений Co/Ni, Th/U и Y/No, которые часто используются в качестве генетических геохимических модулей для пирита и арсенопирита, показывает, что они в пиритах из рудопроявлений золота и пиритах из пород стратотипического разреза большеинзерской свиты за пределами рудной зоны практически одинаковы или имеют сравнимые значения (см. табл. 1, 2, 4). Отношения Co/Ni в пиритах из рудопроявлений Улюк-Бар (1.20), Восточно-Акташское (2.75) и “безрудных” пиритах (2.40) сравнимы между собой и характерны для пирита гидротермального происхождения [Типоморфизм..., 1989; Юргенсон, 2003; Kun et al., 2014]. Отношение Th/U, которое отражает окислительно-восстановительные условия [Kun et al., 2014], практически одинаково в пиритах рудопроявлений Улюк-Бар (2.30), Восточно-Акташское (2.75) и “безрудных” пиритах (2.75), характеризую восстановительные условия при их образовании. Отношение Y к No составляет в пиритах рудопроявления Улюк-Бар 26.1, месторождения Горный прииск – 20.1, рудопроявления Богряшка – 29.5, рудопроявления Восточно-Акташское – 25.2. В “безрудных” пиритах отношение Y/No равно 27.0. В целом такие значения свойственны метаморфическим породам [Kun et al., 2014].

Сравнимые отношения Co/Ni, Th/U и Y/No в пиритах из рудопроявлений золота и пиритах из пород безрудных участков, на наш взгляд, обусловлены тем, что пириты из стратотипического разреза большеинзерской свиты в той или иной мере подверглись гидротермальной проработке. Осадочно-диагенетические пириты иногда могут быть обогащены элементами, которые характерны для гидро-

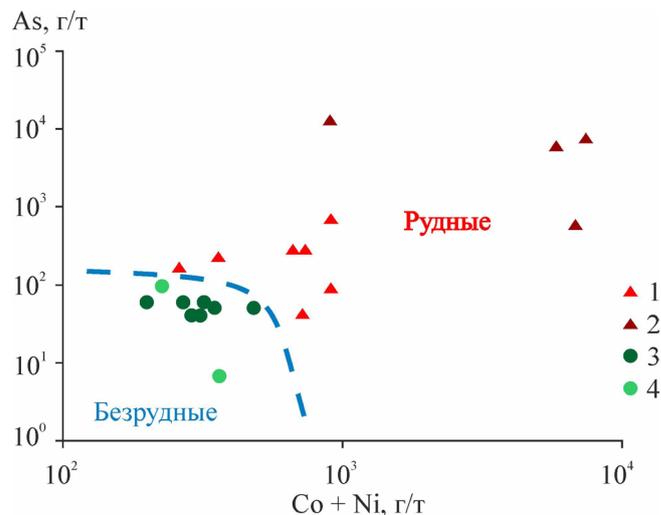


Рис. 4. Содержание Co, Ni и As в пирите Исмакаевской рудной зоны и незолотоносном пирите из осадочных пород вне площади рудопроявлений.

1, 2 – пирит из рудопроявлений Исмакаевской рудной зоны (1 – данные ICP-MS и ICP-AES, см. табл. 1, 2; 2 – данные ICP-MS по материалам И.В. Высоцкого (скв. № 18)); 3, 4 – незолотоносный пирит из пород большеинзерской свиты (3 – данные приближенно-количественного спектрального анализа [Мичурин и др., 2009]; 4 – данные ICP-MS, см. табл. 1).

Fig. 4. The content of Co, Ni and As in the pyrite of the Ismakayevo ore zone and in not gold-bearing pyrite from sedimentary rocks outside the area of ore occurrences.

1, 2 – pyrite from the occurrences of the Ismakayevo ore zone (1 – data of ICP-MS and of ICP-AES, table 1, 2; 2 – data of ICP-MS after I.V. Vysotsky (borehole no. 18)); 3, 4 – not gold-bearing pyrite from rocks Bolshoi Inzer formation (3 – data of approximate-quantitative spectral analysis [Michurin et al., 2009]; 4 – data of ICP-MS, table 1).

термального пирита (например, Co и Ni), из-за проявлений вулканизма и (или) циркуляции флюидов в осадочных толщах [Gregory et al., 2015].

В самом деле, с одной стороны, на основании анализа изотопного состава серы ( $\delta^{34}\text{S} = 23.4\text{--}39.0\text{‰}$ ,  $n = 7$ ) и ряда геохимических характеристик образование пиритов этого разреза мы связываем с эпигенетической низкотемпературной бактериальной сульфат-редукцией с источником серы из сульфатов эвапоритов, присутствовавших в нижнерифейских отложениях [Мичурин и др., 2009]. С другой стороны, по данным минералогического изучения, в породах этого обнажения обнаружены две тонкие пластинки золота размером  $0.2 \times 0.4$  и  $0.6 \times 0.6$  мм [Сергеева, 1982]. Согласно последней работе, среднее содержание пирита здесь составляет менее 0.1 мас. %, увеличиваясь в отдельных интервалах, по нашим данным, до 0.6–1.8 мас. %. Изучение показало, что в породах связь между содержанием сульфидов и золотом не устанавливается и сульфид-

ды здесь не являются концентратором золота [Мичурин и др., 2009]. Вместе с тем в них наблюдаются высокие значения отношения  $\text{Co/Ni}$ , характерные для пирита гидротермального происхождения, и отмечается относительно высокое содержание Pb (33.6–161.4 г/т, см. табл. 1). Экспериментальные исследования показывают, что Pb выступает “несовместимым” элементом для пирита, однако он хорошо адсорбируется на его поверхности [Таусон и др., 2010]. Наиболее вероятно, что Pb в пирите этого обнажения связан с включениями галенита. В 3 км северо-восточнее описываемого обнажения в суранской свите нижнего рифея БМА энергодисперсионным микроанализом мы установили включения галенита в пирите, где галенит имеет более позднее по отношению к пириту образование, которое связано с гидротермальной деятельностью в зоне разлома [Мичурин и др., 2014]. Описываемый стратотипический разрез большеинзерской свиты находится в этом же районе в зоне регионального Караташского разлома.

В связи с этим важно проанализировать поведение редкоземельных элементов в пиритах, поскольку они относительно инертны и в большей степени, чем другие микроэлементы, могут отражать условия образования и (или) преобразования пород и минералов. По общему содержанию REE “безрудные” пириты уступают пиритам из рудопроявлений золота Авзянского рудного района, за исключением рудопроявления Богряшка, где в пирите установлена самая низкая концентрация лантаноидов – 4 г/т (см. табл. 4). В пиритах из рудопроявления Улюк-Бар их содержание в среднем составляет 121.5 г/т, из месторождения Горный Прииск – 49.8, из рудопроявления Восточно-Акташское – 65.5 г/т. В пиритах из пород стратотипического разреза большеинзерской свиты содержание лантаноидов в среднем равно 20 г/т (см. табл. 1). Отметим, что такая концентрация REE характерна для пирита осадочно-диагенетического происхождения, в котором они обычно не превышают 15–20 г/т [Бугельский и др., 2003]. Вместе с тем отношение суммы легких лантаноидов к сумме тяжелых в “безрудных” пиритах составляет 14.4 и сравнимо с отношением  $\Sigma L_{\text{REE}}/\Sigma H_{\text{REE}}$  в пиритах из рудопроявлений золота, в которых оно также аномально высокое: Улюк-Бар – 18.4, Горный прииск – 19.8, Восточно-Акташское – 9.9. Исключение представляет рудопроявление Богряшка, в пирите которого это отношение равно 2.2. Следует отметить, что пирит осадочно-диагенетического происхождения не характеризуется высокими значениями отношения суммы легких лантаноидов к сумме тяжелых, которые обычно не превышают 2–3 и редко достигают 5 [Бугельский и др., 2003].

Пириты, генетически связанные с определенными литологическими типами пород, как правило, схожи с ними в распределении микроэлементов.

Например, в пиритах из магнетитов Саткинского месторождения БМА отношение  $\Sigma L_{\text{REE}}/\Sigma H_{\text{REE}}$  составляет 3.0, тогда как в пиритах из диабазов оно увеличивается до 6.1, отражая симбатное изменение  $\Sigma L_{\text{REE}}/\Sigma H_{\text{REE}}$  во вмещающих породах [Крупенин и др., 2013]. Высокие значения отношения  $\Sigma L_{\text{REE}}/\Sigma H_{\text{REE}}$  характерны для магматических пород. В интрузивных породах, развитых в пределах площади рудопроявлений Авзянского района, по нашим данным, эти отношения колеблются от 3.1 до 10.3, в среднем составляя 7.4 ( $n = 13$ ), что гораздо ниже значений в проанализированных монофракциях пирита.

Наиболее вероятная причина аномальных отношений  $\Sigma L_{\text{REE}}/\Sigma H_{\text{REE}}$  в пиритах из рудопроявлений золота Авзянского района и “безрудных” пиритах, по всей видимости, кроется в присутствии в изученных монофракциях пирита примеси минералов-концентраторов легких лантаноидов, например монацита или флоренсита, которые широко распространены в нижнерифейских породах большеинзерской и суранской свит и часто ассоциируют с сульфидами и рудными минералами [Алексеев, Тимофеева, 2008; Ковалев и др., 2009]. По данным ICP-AES в монофракциях пирита Исмакаевской рудной зоны помимо относительно высокого содержания La и Ce мы установили высокую концентрацию P до  $\approx 200$  г/т, который имеет самые высокие коэффициенты корреляции с Pb (0.92), Mg (0.89), Al (0.87), Ce (0.81), La (0.78), Nd (0.75), Ba (0.71). P наряду с Al, Ce, La и Nd является основным элементом в составе флоренсита из горных пород и аллювиальных отложений западного склона Южного Урала, в котором также отмечаются примеси Fe, Ca, Th, Ba, Sr, Pb и S [Алексеев, Тимофеева, 2008]. Таким образом, вполне вероятно, что редкоземельные фосфаты вносят дополнительный вклад в сумму легких лантаноидов при анализе монофракций пирита. В данном случае анализ различных соотношений редкоземельных и редких элементов (Eu- и Ce-аномалии, Nb/La, Th/La, Hf/Sm и др.), обычно используемых для диагностики особенностей условий образования минералов, в том числе сульфидов [Kun et al., 2014], теряет генетический смысл.

Из других особенностей “рудных” сульфидов следует отметить высокую концентрацию Sb и Tl в пиритах рудопроявления Богряшка (см. табл. 4), которая в 5–10 раз выше, чем в пиритах из других рудопроявлений. При этом Sb имеет самый высокий коэффициент корреляции (0.9) с Au, в то время как Tl не обнаруживает связи с золотом. Высокая концентрация этих элементов в монофракциях сульфидов рудопроявления обусловлена, по видимому, разными причинами. Tl указывает на первично осадочную природу содержащего его пирита, поскольку марказиты и пиритовые осадочно-диагенетические конкреции по сравнению с пи-

ритом в большей степени накапливают таллий [Vaughan, Craig, 1978]. Например, в пиритовой конкреции осадочно-диагенетического происхождения из зигазино-комаровской свиты БМА мы установили очень высокую концентрацию Tl (287.2 г/т) [Крупенин и др., 2013].

Высокое содержание Sb в сульфидах рудопрооявления связано уже с другой, “рудной”, генерацией пирита – с мышьяковистым пиритом или включениями арсенопирита в пирите, поскольку вместе с высоким содержанием Sb в сульфидах отмечается также наибольшее содержание As (см. табл. 4). Отметим, что Sb часто связан с мышьяковистым пиритом и арсенопиритом на золоторудных месторождениях, где отмечается положительная корреляция As и Sb с Au [Zacharias et al., 2004; Reich et al., 2005; Волков, Сидоров, 2016].

К отличительным особенностям “рудных” пиритов относится также высокая концентрация Ti, V, Co и Cu в пиритах рудопрооявления Восточно-Акташское, являющаяся самой большой в проанализированных монофракциях сульфидов.

#### Состав золота и его геохимические связи

**Исмакаевская рудная зона.** Выявляется некоторое различие в составе золота рудопрооявления Улюк-Бар с поверхности из коры выветривания и на глубине около 660–670 м из песчаников. В золоте из глубоких горизонтов рудопрооявления установлено более высокое содержание Ag, Fe, As, S; отношение Au/Ag составляет около 5 против 7–8 в золоте с поверхности из коры выветривания (см. табл. 3). По данным С.Г. Ковалева и И.В. Высоцкого [2001], в золоте из коры выветривания рудопрооявления Улюк-Бар это отношение еще выше – 27–28. Кроме того, в составе золота обнаружены примеси Pt до 3.1 мас. %, Pd до 0.79, Rh до 0.28 мас. %, что, по мнению авторов, обусловлено привнесом Au металлонесными флюидами мантийного генезиса.

Следует отметить, что в песчаниках из этого интервала скважины (гл. 663.3 м) в тесной пространственной связи с пиритом и арсенопиритом мы обнаружили торит [Мичурин, 2011]. Минералы тория и урана также выявлены в породах большеинзерской свиты на участке, который по ряду геохимических признаков мы относим к перспективным в отношении золотого оруденения [Мичурин, 2011]. Расчет возраста по их химическому составу по методике [Bowles, 2002] дает два значения: по ураниниту –  $922 \pm 62$  млн лет, по ториевым минералам – около 600 млн лет [Мичурин, Шарипова, 2011]. Это согласуется с данными изотопных исследований по валовым образцам пород Rb-Sr ( $996 \pm 26$  млн лет) и K-Ar ( $676-706$  млн лет) методами и галенитам Pb-Pb методом (950 млн лет), что позволяет говорить о двух этапах формирования рудопрооявлений золота Авзянского рудного района, первый из ко-

торых происходил в связи с тектонотермальной активизацией на границе среднего и позднего рифея, а второй – около 600–700 млн лет назад [Шарипова, Мичурин, 2015].

Обращает на себя внимание, что в золоте рудопрооявления Улюк-Бар помимо As других халькофилов не обнаружено. Вместе с тем из приведенного описания сульфидной минерализации следует, что в геохимическом плане золото здесь должно иметь корреляционные связи не только с As, но и с Pb, Cu, Zn – халькофильными элементами, имеющими сродство с серой. Действительно, согласно материалам Северо-Восточной экспедиции (данные А.Л. Чернова, Л.А. Логиновой и др.), геохимические аномалии этих элементов наряду с W были отнесены к поисковым критериям и признакам золотого оруденения в Авзянском рудном районе. Однако было установлено, что рудопрооявления коренного золота Исмакаевской зоны практически не имеют ореолов Cu, Zn, Pb и сопровождаются на поверхности вторичными и первичными ореолами Ag, As и W (Улюк-Бар), As и Ag (Кургашлинское), W (Рамеева жила), и доказывалось присутствие вертикальной зональности на рудопрооявлениях Улюк-Бар и Кургашлинское, заключающейся в том, что в их верхней части фиксируются ореолы Cu и Zn, а в нижней развивается геохимический ореол Mo.

Необходимо отметить, что в целом установленный ряд элементов-спутников на малосульфидных золотокварцевых рудопрооявлениях Исмакаевской зоны характерен именно для этого типа оруденения. Как показано В.Б. Чекваидзе с соавторами [2004] при учете геохимических данных по 40 золоторудным объектам, в золотокварцевых месторождениях наибольшие кларки концентраций имеют Ag, As и W, а в ряду вертикальной зональности элементы ранжируются в порядке максимумов их отложения по мере продвижения от подрудных горизонтов к надрудным в следующей последовательности: W-Co-Zn-Au-As-Sn-Bi-Mo-Cu-(Pb-Ag-Sb)-Hg. По материалам Северо-Восточной экспедиции, установленная вертикальная зональность рудопрооявлений Улюк-Бар и Кургашлинское имеет вид: Mo-(Cu-Zn)-(Ag-As-W), что прямо противоположно последовательности в золотокварцевых месторождениях и вызывает сомнения.

По нашим данным, геохимические связи золота на разных участках Исмакаевской зоны неодинаковы. В целом в пределах зоны Au имеет незначимые коэффициенты корреляции с Mn, U, As и W. Вместе с тем в рудопрооявлении Улюк-Бар высокая положительная связь Au устанавливается с S, As и Co, при этом Ag имеет наибольшие коэффициенты корреляции с Cu и Pb. Последнее указывает, что серебро помимо золота входит в халькопирит и галенит, это объясняет слабую корреляцию Au с Ag на рудопрооявлении. В галенитах по сравнению с другими сульфидами обычно отмечается наибольшая

концентрация Ag, достигающая 3 мас. % [Vaughan, Craig, 1978].

Неоднородность геохимических связей золота в пределах зоны обусловлена несколькими причинами. Приуроченность рудоносных зон к разрывным нарушениям и преимущественно к прослоям песчаников указывает на структурный и литологический контроль оруденения. Наличие в породах разных генераций “рудных” и “безрудных” минералов также может затушевывать картину корреляционных связей золота.

В частности, обращает на себя внимание то, что наибольшие значения содержания золота установлены в интервале скв. № 18, литологически представленном однородной толщей кварц-полевошпатовых песчаников, в которых отмечается неравномерная вкрапленность пирита. Песчаники разбиты сетью маломощных (до 5 мм) кварц-карбонатных прожилков, кроме того, в них изредка встречаются кварцевые жилы мощностью от 5 до 30 см. Опробование (см. табл. 5) показало наличие золота только в тех пробах песчаников, в которых присутствовала обильная вкрапленность до 2.0–2.5 мас. % сульфидов (преимущественно пирита), причем кварц-карбонатные прожилки в этих пробах отсутствовали. Вместе с тем в алевролитах, аргиллитах и сланцах из других скважин Исмакаевской зоны, несмотря на иногда значительную концентрацию в них сульфидов, достигающую 10 мас. %, золото не обнаружено (см. табл. 5). Очевидно, что в породах зоны присутствуют разные генерации сульфидов, одни из которых содержат золото, а другие нет. Причем, масштабность проявления не золотоносных и (или) слабо золотоносных сульфидов гораздо выше, чем “рудных”, поскольку по материалам Северо-Восточной экспедиции в 115 проанализированных монофракциях сульфидов Исмакаевской зоны среднее содержание Au составило всего 0.3 г/т. Согласно наблюдениям сульфидная минерализация максимально широко развита в алевросланцевых породах. Однако из 25 анализов пиритных и пирроотиновых концентратов из этих пород лишь в 4 пробах отмечена заметная концентрация золота: в одной пиритной (1.8 г/т) и трех пирроотиновых (от 1.2 до 3.7 г/т). В остальных пробах его содержание крайне невысоко – до 0.1 г/т в пирротине и до 0.9 г/т в пирите.

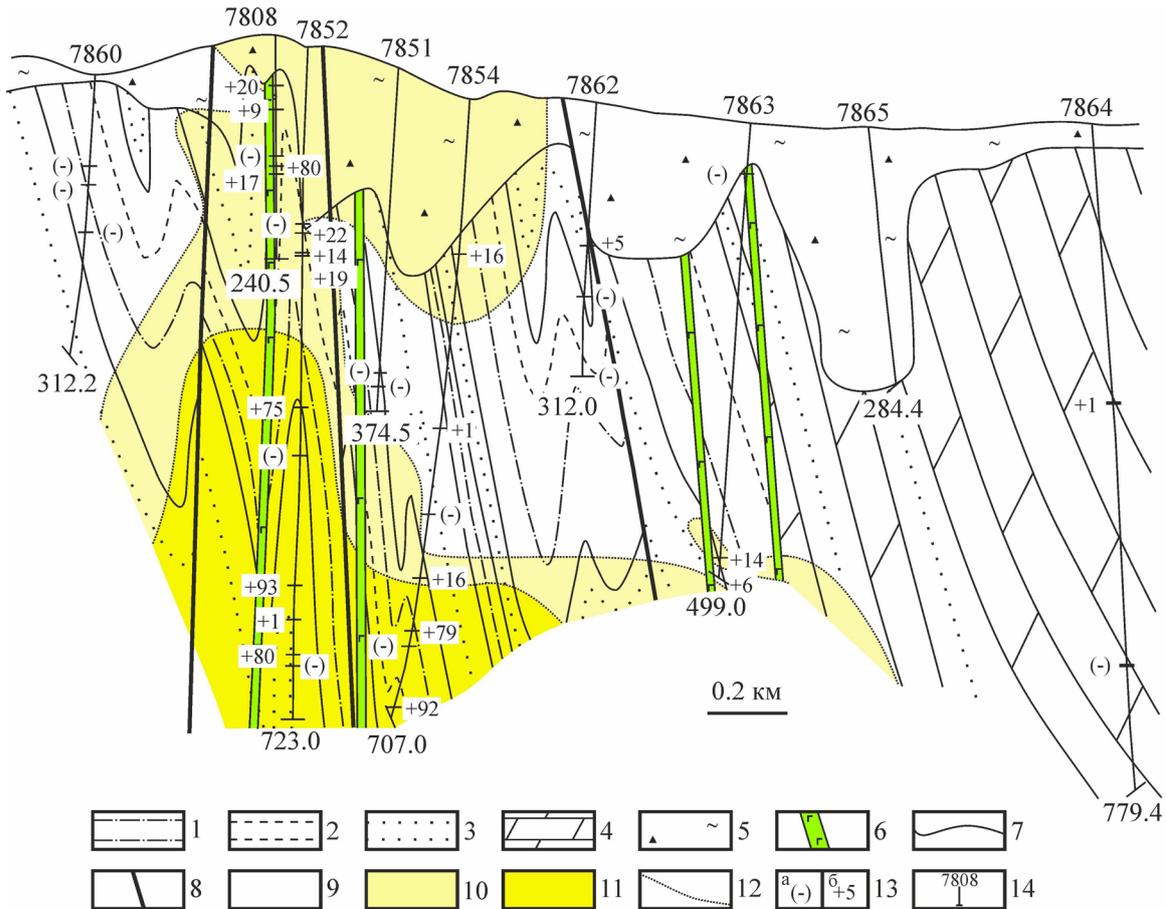
В песчаниках сульфидная минерализация проявлена значительно слабее. Она подразделяется на несколько генераций: арсенопирит встречается в двух модификациях [Мичурин и др., 2009], пирит образует три генерации. Арсенопирит-1 часто образует сростания с пиритом-2, и в нем отмечаются очень мелкие, размером около 0.005 мм, выделения золота. По данным микронзондового анализа пирит-2 характеризуется примесями Pb до 0.17 мас. % и As до 0.21 мас. %, к нему пространственно тяготеют прожилки пирротина, в которых в виде многочислен-

ных субмикроскопических кристаллов отмечается пирит-3, содержащий значительную концентрацию Co – до 2.63 мас. % и Ni – до 0.38 мас. % [Мичурин и др., 2009]. По материалам И.В. Высоцкого, наибольшей золотоносностью в песчаниках, вскрытых скв. № 18, характеризуются галенит и пирит-3, в которых содержание Au составляет 15–21 г/т (данные ICP-MS). В меньшей степени золотоносны пирротин, пирит-1 и 2, где концентрация Au колеблется от 3 до 12 г/т. Отметим при этом, что почти во всех проанализированных минералах установлена примесь Bi, наибольшая (1.16 мас. %) в галените, что характерно для этого минерала [Vaughan, Craig, 1978; Замятина и др., 2014]. В пирите-2 зафиксирована значительная концентрация As (0.6–1.3 мас. %) и Ni (до 0.7 мас. %) (см. рис. 4).

В целом обращает на себя внимание зависимость золотоносности сульфидов Исмакаевской зоны от литологического типа вмещающих пород – сульфиды из песчаников по сравнению с сульфидами из алевросланцевых пород в большей степени золотоносны.

Учитывая существенную связь золота с серой и мышьяком в скв. № 18, наиболее вероятным механизмом образования золотоносных сульфидов Исмакаевской зоны является замещение ранних “безрудных” пиритовых генераций арсенопиритом и его ассоциацией с “арсеникальным”, мышьяковистым пиритом при движении флюидов по зонам разломов. Мышьяковистый пирит и подобный механизм его образования широко распространены на золоторудных месторождениях [Коробейников и др., 1993; Юргенсон, 2003; Reich et al., 2005; Вихтер, 2009; Волков, Сидоров, 2016]. На месторождениях карлинского типа, например, содержание золота в руде является функцией от концентрации золотосодержащего мышьяковистого пирита, который встречается в виде мелких включений, как правило, менее нескольких микрон в диаметре в более ранних сульфидных [Волков, Сидоров, 2016]. Физико-химическое моделирование механизма замещения пирита арсенопиритом и мышьяковистым пиритом приводится в работе [Вилор и др., 2014]. Согласно температурам гомогенизации флюидных включений жильного кварца [Кобзарева, 2007; Шарипова, Мичурин, 2015] и температурам сульфидообразования [Мичурин и др., 2009], определенным по распределению никеля и кобальта между пиритом и пирротинном и по составу арсенопирита, температуры рудоносных флюидов Исмакаевской зоны составляли 250–450°C.

В пользу этого механизма образования свидетельствуют минералогическая зональность, отражающаяся в распределении мышьяковистого пирита в пределах Исмакаевской зоны, данные по изотопному составу серы сульфидов, а также приуроченность первичного геохимического ореола As к разрывным нарушениям. Минералогическая зо-



**Рис. 5.** Распределение пирита с разным знаком термо-ЭДС вкострестии Ирмакаевской рудной зоны [Шарипова, Мичурин, 2011, с изменениями].

1 – сланцы; 2 – алевролиты; 3 – песчаники; 4 – доломиты; 5 – кора выветривания; 6 – долериты; 7 – литологические контакты; 8 – тектонические нарушения; 9–11 – зоны пирита с разным знаком термо-ЭДС (9 – n-тип  $\approx 100\%$ , 10 – p-тип 10–50%, 11 – p-тип  $>50\%$ ); 12 – граница между зонами; 13a – знак термо-ЭДС; 13b – содержание пирита p-типа, %; 14 – скважины, глубина, м.

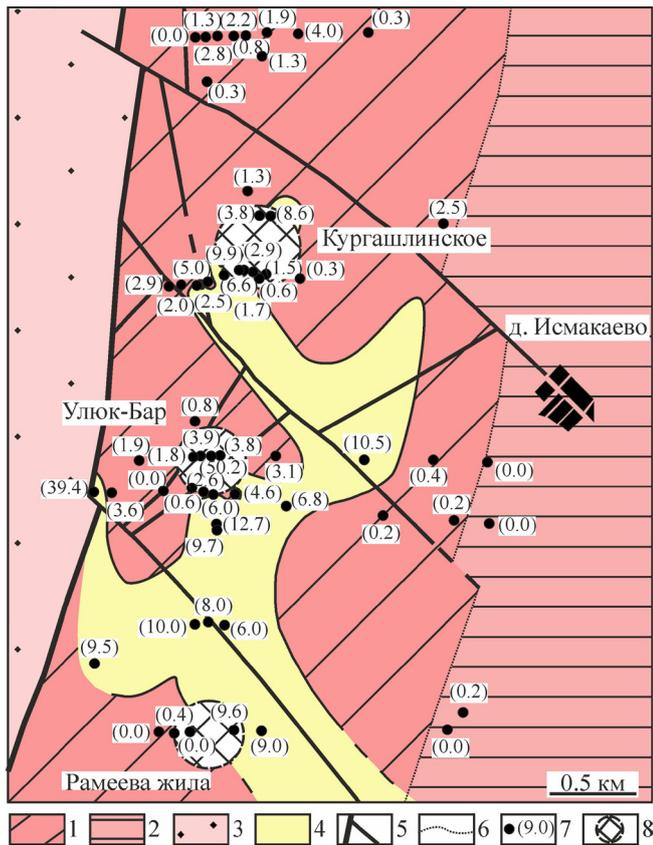
**Fig. 5.** The distribution of pyrite with a different thermo-emf sign across strike of the Ismaikaevskaya ore zone [Sharipova, Michurin, 2011 with changes].

1 – shales; 2 – siltstones; 3 – sandstones; 4 – dolomites; 5 – weathering crust; 6 – dolerites; 7 – lithologic boundaries; 8 – faults; 9–11 – pyrite zones with a different thermo-emf sign (9 – n-type  $\approx 100\%$ , 10 – p-type 10–50%, 11 – p-type  $>50\%$ ); 12 – boundary between zones; 13a – thermo-emf sign; 13b – p-type pyrite content, %; 14 – boreholes, depth, m.

нальность заключается в том, что доля пирита с проводимостью p-типа, обусловленной примесью As, закономерно увеличивается с глубиной в районе рудопоявления Улюк-Бар (рис. 5), а зона его развития контролируется разрывными нарушениями [Шарипова, Мичурин, 2011]. Минералогическую зональность подчеркивает зональное распределение изотопных характеристик сульфидов, которые на глубине (700–300 м) имеют относительно близкий к метеоритному стандарту изотопный состав серы ( $\delta^{34}\text{S}$  от  $-2.7$  до  $3.6\%$ ), более однородный по сравнению с таковым верхней части рудной зоны, где увеличивается дисперсия значений  $\delta^{34}\text{S}$  ( $-4.3\text{...}5.4\%$ ). Изотопная зональность связана главным образом с изменением состава и физико-

химических характеристик рудоносных флюидов, сера которых имела магматогенный источник, в результате их взаимодействия с вмещающими породами [Мичурин и др., 2009]. Наконец, обобщение данных по распределению мышьяка в коренных породах Ирмакаевской рудной зоны (учтено около 3700 спектральных полуколичественных анализов по 68 скважинам) показывает, что первичный геохимический ореол As строго приурочен к разрывным нарушениям северо-западного и северо-восточного простирания (рис. 6), опережающих региональный субмеридиональный Караташский разлом [Шарипова, Мичурин, 2011].

В целом минералогические и геохимические особенности рудопоявления золота Ирмакаевской



**Рис. 6.** Проекция на дневную поверхность среднего содержания мышьяка по скважинам Исмакаевской рудной зоны [Шарипова, Мичурин, 2011, с изменениями].

1–3 – свиты: 1 – большеинзерская, 2 – суранская, 3 – zigazino-комаровская; 4 – зона среднего содержания As по скважинам 5–50 г/т; 5 – тектонические нарушения; 6 – стратиграфические границы; 7 – положение скважины и среднее содержание As в породах; 8 – рудопроявления золота.

**Fig. 6.** The projection on the daylight surface of mean content of arsenic in bore holes at the Ismaeuev ore zone [Sharipova, Michurin, 2011 with changes].

1–3 – formations: 1 – Bolshoi Inzer, 2 – Suran, 3 – Zigazino-Komarovo; 4 – zone of average As content in boreholes 5–50 ppm; 5 – faults; 6 – stratigraphic boundaries; 7 – borehole position and average As content in rocks; 8 – gold occurrences.

зоны (преобладающий пирит-арсенопиритовый состав сопутствующих рудоносному кварцу сульфидов, образованных при 250–450°C и имеющих магматогенный источник серы, связь Au с As) сходны с таковыми в золото-мышьяково-сульфидных месторождениях орогенно-складчатых областей ба-кырчикского типа [Вихтер, 2009].

Следует отметить, что самое высокое среднее содержание As в коренных породах зоны установлено в тех скважинах, которые пробурены непосредственно в пределах площади рудопроявлений:

в скв. № 7807 – 50.2 г/т (Улюк-Бар), скв. № 7870 – 9.9 (Кургашлинское), скв. № 7879 – 9.6 г/т (Рамеева жила). В связи с этим обращает на себя внимание участок, возможно, перспективный на золото, расположенный примерно в 700 м юго-западнее рудопроявления Улюк-Бар на пересечении разрывного нарушения северо-западного простирания и Караташского разлома (см. рис. 6). Здесь в скв. № 9 до глубины 108 м по 51 полуколичественному спектральному анализу установлено среднее содержание As 39.4 г/т, и только в этой скважине по материалам Северо-Восточной экспедиции в сульфидных концентратах выявлено значимое содержание золота ( $\geq 6$  г/т).

**Горноприисковая рудная зона.** По данным С.Г. Ковалева и И.В. Высоцкого [2001], в составе золота месторождения Горный Прииск установлены Ag (2.02–4.27 мас. %), Bi (0.00–1.22), As (0.00–0.72), Se (0.00–0.34), Ni (0.00–0.28), Sb (0.00–0.26), Te (0.00–0.25), Sn (0.00–0.09 мас. %). Еще определялись Cu, Co, Hg, но их содержание в золоте было ниже предела обнаружения. Обращает на себя внимание относительно высокое значение отношения Au/Ag (21–48) и довольно существенное содержание Bi в золоте месторождения. Сравнительный анализ с нашими данными по рудопроявлению Богряшка (см. табл. 3) позволяет сделать вывод, что золото в пределах Горноприисковой зоны имеет очень близкий химический состав с практически одинаковым набором элементов-примесей. Это свидетельствует в пользу единого источника золота в пределах зоны и, вероятно, одновременного образования ее золоторудных объектов. От золота Исмакаевской зоны оно отличается большими величинами отношения Au/Ag ( $>21$ ) и устойчивой относительно высокой (0.4–1.2 мас. %) примесью висмута. Вероятно, золото Горноприисковой зоны представляет собой висмутоаурит – разновидность самородного золота, в котором содержание висмута может достигать 4.0 мас. %. В связи с этим стоит отметить также в породах рудопроявления Богряшка высокую корреляцию Au с Bi (0.79) и присутствие металлического твердого раствора (Sn, Pb, Bi), в котором содержание Bi достигает 27.72 мас. % (см. рис. 3г).

Находки самородных Sn и Pb, а также продуктов их сростания в южноуральских золоторудных месторождениях известны давно [Новгородова, 1983]. В месторождении Березняки Южного Урала более чем в 20 скважинах обнаружены металлические шарики размером до 1–3 мм, состоящие из субграфических сростаний свинца и олова, в которых отмечается примесь Au, Re, Pt [Сначев, Кузнецов, 2009]. В рифейских отложениях БМА также описаны находки самородного олова в коренных породах, в котором обнаружены примеси Pb, As, Sb, Ag, Pd, Rh, S, Ti [Ковалев и др., 1999]. Отличительной особенностью обнаруженного нами твер-

дого раствора (Sn, Pb, Bi) является очень высокое содержание в нем Bi. Присутствие висмута в гидротермальном растворе приводит к концентрированию золота, а по составу его минералов в золоторудных месторождениях можно судить о физико-химических условиях рудообразования [Новоселов и др., 2014]. В совокупности с минералогическими наблюдениями (преимущественная форма выделения пирита – сфероидальные агрегаты мозаичной структуры), высокая корреляция Au с Bi и присутствие минералов висмута в рудопроявлении Богряшка отражают низкотемпературные условия рудообразования в восстановительной обстановке.

Кроме того, следует отметить присутствие в породах рудопроявления совместно с самородным золотом включений ураноторита (см. рис. 3в). Расчет его химического возраста, выполненного в соответствии с работой [Bowles, 2002], по двум точечным определениям дает различающиеся значения  $28 \pm 3$  и  $273 \pm 13$  млн лет, что указывает на переотложение минерала и (или) нарушение его U-Th-Pb-системы. Согласно полученным результатам, содержания Au и Th в породах рудопроявления Богряшка не коррелируют между собой, что можно объяснить вхождением тория в разные минералы, не только в ураноторит, но и монацит, образование которого, вероятно, не связано с золоторудным процессом. Вместе с тем в месторождении Горный Прииск коэффициент корреляции Au с Th, по нашим данным, составляет 0.87, а по материалам геолого-поисковых работ (данные И.В. Высоцкого), здесь установлены прямая зависимость между содержаниями золота, калия и тория в породах и отсутствие связи между концентрациями золота и урана [Мичурин, 2011].

В целом в рудопроявлениях Горноприисковой зоны отмечается сильная положительная связь Au с  $S_{\text{общ}}$ , халькофильными и сидерофильными элементами Ag, Cu, Co, Pb, Ni, т.е. элементами, входящими в состав сульфидных минералов. Следует отметить, что пириты, халькопириты и пирротины месторождения Горный Прииск характеризуются близким к метеоритному стандарту изотопным составом серы. Их значения  $\delta^{34}\text{S}$  образуют интервал от  $-4.8$  до  $0.9\%$ , при среднем  $-2.0\%$ , что указывает на магматогенный источник серы, участвовавшей в образовании сульфидной минерализации [Мичурин и др., 2009]. Вместе с тем по результатам исследования корреляции Au с As не зафиксировано. Однако ранее при поисковых работах по данным полуколичественного спектрального метода в месторождении Горный Прииск из всех проанализированных элементов была отмечена только неустойчивая связь золота с мышьяком. В рудопроявлении Богряшка было установлено, что концентрации As иногда увеличиваются до 3000 г/т вблизи участков с повышенным содержанием золота в породах ( $>0.3$  г/т). По нашим данным, на рудопрояв-

лении коэффициент корреляции Au с As составляет  $\approx 0.1$  ( $n = 15$ ), который резко вырастает до 0.93, если анализ проводить без учета пробы А-12344 (As = 1508 г/т, Au = 0.1 г/т). Отсутствие четкой зависимости между содержаниями Au и As объясняется здесь наличием нескольких генераций сульфидов, которые, кроме того, распределены зонально. В сульфидных концентратах из скв. № 33, 35, 36 в интервале глубин от 31 до 51 м устанавливается сильная положительная связь Au (содержание от 0.3 до 66.0 г/т, среднее 26.0 г/т,  $n = 7$ ) с As (содержание до 5000.0 г/т) с коэффициентом корреляции 0.92. В более глубоких горизонтах рудопроявления (56–190 м) увеличивается содержание золота в сульфидных концентратах до 163.0 г/т (среднее 51.4 г/т,  $n = 9$ ) и, при отсутствии его связи с As (содержание до 500.0 г/т), фиксируется уже относительно высокий коэффициент корреляции с Cu (0.77). “Сквозными” элементами, связанными с Au независимо от глубины опробования, являются Pb (0.81) и Zn (0.46–0.70). При этом содержание Pb в сульфидных концентратах увеличивается на глубине в среднем до 400 г/т, а в интервале 31–51 м они ниже и составляют в среднем 161 г/т. Вместе с тем коэффициент корреляции Pb с Au не изменяется. Cu и Zn ведут себя по-другому – их концентрация в сульфидных концентратах выше ближе к поверхности, где она составляет в среднем 853 и 879 г/т против 394 и 592 г/т соответственно из глубоких горизонтов рудопроявления (56–190 м). Такое распределение элементов в сульфидных концентратах рудопроявления обусловлено, по-видимому, вертикальной зональностью и отвечает средне-верхней части круто падающих рудоносных зон в золоторудных месторождениях, где максимумы концентрации элементов увеличиваются в вертикальном ряду (Co, Mo, Sn, W)–Bi–Zn–Cu, As–Au–Pb–Ag–Sb–Hg [Чекваидзе и др., 2004].

**Акташская рудная зона.** По данным М.В. Рыкуса и В.И. Сначева [1999], в составе золота рудопроявления Восточно-Акташское отмечается относительно высокое содержание Ag (13.78–17.40 мас. %), отношение Au/Ag колеблется от 4.7 до 6.2. Его характерными примесями являются Bi (0.07–0.30 мас. %), Te (0.06–0.10) и Cu (0.02–0.10 мас. %). В одной из 11 проанализированных проб установлено присутствие Hg (0.23 мас. %) и As (0.03 мас. %). Указанные авторы считают, что по химическому составу золото может быть отнесено к коровому типу, сформировавшемуся в близповерхностных условиях.

Действительно, слабо золотосодержащие пириты рудопроявления характеризуются устойчивым обогащением тяжелого  $^{34}\text{S}$  изотопа относительно метеоритного стандарта ( $\delta^{34}\text{S} = 11.3\text{--}14.0\%$ ), что свидетельствует о коровом источнике серы [Шарипова, Мичурин, 2015]. Однако отсутствие связи Au с S, Ni, Cu и слабая корреляция с Co, Zn и Pb указывают на то, что золото в рудопроявлении в большей

степени связано не с сульфидами, а с кварцевыми и анкерит-кварцевыми прожилками. Анкериты по изотопному составу углерода ( $\delta^{13}\text{C} = -5.0 \dots -3.7\%$ ) отличаются от вмещающих известняков, что позволяет предполагать участие в рудном процессе глубинной  $\text{CO}_2$  [Шарипова, Мичурин, 2015]. Состав примесных элементов золота и присутствие в нем Hg, типично “мантийного” элемента [Юдович, Кетрис, 2011], указывают на привнос Au металлоносными флюидами мантийного генезиса.

## ВЫВОДЫ

1. В Исмакаевской рудной зоне сульфиды из рудопроявлений золота по сравнению с сульфидами из вмещающих отложений характеризуются более высокой концентрацией As, Co, Ni, Cu, Pb. Пириты из рудопроявления Богряшка отличаются высокой концентрацией Sb, из рудопроявления Восточно-Акташское – Co и V.

2. Сходный химический состав золота свидетельствует в пользу единого его источника для объектов Горноприисковой зоны. Для нее характерны устойчивая примесь Bi в золоте (0.4–1.2 мас. %) и более высокое отношение Au/Ag ( $>21$ ) в сравнении таковым Исмакаевской и Акташской зон (5–8). В Горноприисковой и Исмакаевской зонах самородное золото ассоциирует с ураноториевыми минералами.

3. В Авзянском рудном районе геохимические связи золота неоднородны. В малосульфидных золото-кварцевых рудопроявлениях Исмакаевской зоны оно связано, как правило, только с As, и это имеет наибольшее значение для поисков золота и выявления перспективных рудоносных участков. Иногда устанавливается корреляция золота с S и Co. Золотоносные сульфиды образовались при движении флюидов ( $T = 250\text{--}450^\circ\text{C}$ ) по зонам разломов в результате замещения ранних “безрудных” пиритовых генераций мышьяковистым пиритом, содержание которого в породах увеличивается с глубиной и контролируется разрывными нарушениями. В Горноприисковой зоне отмечается сильная положительная корреляция золота с серой и халькофильными элементами (Cu, Co, Pb, Ni, Zn). Связь Au с As проявлена нечетко, что в рудопроявлении Богряшка объясняется наличием нескольких генераций сульфидов и присутствием вертикальной геохимической зональности, отвечающей средневерхней части круто падающих рудоносных зон в золото-сульфидных месторождениях. В рудопроявлении Восточно-Акташское золото-сульфидно-кварцевого типа Au сильной положительной корреляцией связано с Ag, слабой – с Co и As.

4. В целом изотопные и геохимические характеристики сульфидов и золота Авзянского рудного района свидетельствуют в пользу магматогенной природы рудоносных флюидов. Формирование рудопроявлений связано с этапами тектонотермаль-

ной активизации, происходившей на границе среднего и позднего рифея и в венде.

Авторы искренне признательны Н.В. Чередниченко и Н.В. Адамович за выполнение анализов методом ICP-MS.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-35-00144.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.А., Тимофеева Е.А. (2008) Редкоземельные фосфаты в горных породах и аллювиальных отложениях западного склона Южного Урала. *Литосфера*, (1), 140-145.
- Бобохов А.С., Бобохова Р.Б., Горожанин В.М., Мичурин С.В. (1993) Термогазогеохимические и изотопные поисковые критерии колчеданного и золотосульфидного оруденения (на примере месторождений Башкортостана). Препринт. Уфа: УНЦ РАН, 23 с.
- Бугельский Ю.Ю., Сиротин В.И., Новиков В.М., Слукин А.Д., Шатров В.А., Кузнецова О.Ю., Носик Л.П. (2003) Диагенетические минералы как индикаторы цикличности и перерывов в осадконакоплении Воронежской антеклизы. *Вестн. Воронежского ун-та. Геология*, (2), 40-56.
- Вилор Н.В., Казьмин Л.А., Горячев Н.А. (2014) Сульфидарсенидные комплексы золота в рудообразующих гидротермальных растворах (термодинамическое моделирование). *Геохимия*, (10), 936-945.
- Вихтер Б.Я. (2009) Золото-мышьяково-сульфидные месторождения терригенных комплексов складчаторогенных областей. М.: “Альт-Консул”, 108 с.
- Волков А.В., Сидоров А.А. (2016) Геолого-генетическая модель месторождений золота карлинского типа. *Литосфера*, (6), 145-165.
- Замятина Д.А., Мурзин В.В., Молошаг В.П., Варламов Д.А., Замятин Д.А., Ким Л.П., Горева А.А., Викенштейн И.В. (2014) Минералогия, геохимия и физико-химические условия формирования руд и метасоматитов Тамуньерского золотосульфидного месторождения, Северный Урал. *Литосфера*, (6), 102-117.
- Кобзарева Ж.С. (2007) Минералого-термобарогеохимические особенности жильного кварца в рифейских осадочных комплексах Авзяно-Белорецкого золото-рудного района (Ю. Урал). Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 24 с.
- Ковалев С.Г., Высоцкий И.В. (2001) Геохимия золота западного склона Южного Урала. *Геология и перспективы расширения сырьевой базы Башкортостана и сопредельных территорий*. Мат-лы IV Респ. геол. конф. Т. 2. Уфа: НИИ БЖД РБ, 134-140.
- Ковалев С.Г., Высоцкий И.В., Фаткуллин И.Р. (1999) Сложнодислоцированные углеродсодержащие толщи западного склона Южного Урала. Уфа: БГУ, 118 с.
- Ковалев С.Г., Тимофеева Е.А., Пиндюрина Е.О. (2009) Монацитовая минерализация западного склона Южного Урала. *Геологический сборник*. Вып. 8. Уфа: ИГ УНЦ РАН, 138-144.
- Коробейников А.Ф., Нарсеев В.А., Пшеничкин А.Я., Ревякин П.С., Арифлулов Ч.Х. (1993) Пириты золо-

- торудных месторождений (свойства, зональность, практическое применение). М.: ЦНИГРИ, 216 с.
- Крупенин М.Т., Мичурин С.В., Чередниченко Н.В., Адамович Н.В. (2013) Элементы-примеси в пиритах Саткинского рудного поля. *Ежегодник-2012*. Тр. ИГТ УрО РАН. Вып. 160, 213-223.
- Крупенин М.Т., Мичурин С.В., Шарипова А.А., Гуляева Т.Я., Петрищева В.Г. (2016) Минералогические и геохимические особенности магнезиально-железистых карбонатов Авзянского рудного района Южного Урала в связи с закономерностями метасоматоза. *Вестн. Урал. отд. РМО*, **13**, 73-88.
- Ларионов Н.Н. (2003) Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Южно-Уральская серия. Лист N-40-XXII (Тукан). Мин-во природных ресурсов РФ.
- Мичурин С.В. (2011) О связи тория и золота в рифейских отложениях Башкирского антиклинория. *Геологический сборник*. Вып. 9. Уфа: ИГ УНЦ РАН, 208-215.
- Мичурин С.В., Биктимерова З.Р., Канипова З.А., Даниленко С.А. (2014) Цинк в карбонатных породах суранской свиты нижнего рифея (Южный Урал). *Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий*. Мат-лы 10 межрег. науч.-практ. конф. Уфа: ДизайнПресс, 150-154.
- Мичурин С.В., Ковалев С.Г., Горожанин В.М. (2009) Генезис сульфатов и сульфидов в нижнерифейских отложениях Камско-Бельского авлакогена и Башкирского мегантиклинория. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 192 с.
- Мичурин С.В., Шарипова А.А. (2011) Химическое датирование уран-ториевой минерализации из нижнерифейских отложений Башкирского антиклинория. *Геологический сборник*. Вып. 9. Уфа: ИГ УНЦ РАН, 216-219.
- Нечаев В.П. (1982) Особенности гидротермально-метасоматического процесса на некоторых золоторудных проявлениях западного склона Южного Урала. *Вопросы минералогии, геохимии и генезиса полезных ископаемых Южного Урала*. Уфа: БФАН СССР, 52-56.
- Новгородова М.И. (1983) Самородные металлы в гидротермальных рудах. М.: Наука, 287 с.
- Новоселов К.А., Белогуб Е.В., Ермолина-Кутсие О.С., Михайлов А.Б., Котляров В.А. (2014) Минералогия золоторудных проявлений зеленокаменного пояса Кухмо (Финляндия). *Литосфера*, (2), 115-124.
- Потехин А.Г., Пацков А.А., Засухин Г.Н., Петрикова В.П. (1977) Отчет о ревизионно-поисковых работах на золото на Авзянском участке по работам Авзянского отряда за 1975-1977 гг. Уфа: БТГУ, Башкирский геол. фонд.
- Римская-Корсакова М.Н., Дубинин А.В. (2003) Редкоземельные элементы в сульфидах подводных гидротермальных источников Атлантического океана. *Докл. АН*, **389**(5), 672-676.
- Рыкус М.В., Сначёв В.И. (1999) Золото западного склона Южного Урала. Уфа: УНЦ РАН, 170 с.
- Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А. (1999) Месторождения золота Урала. Екатеринбург: УГГА, 570 с.
- Сергеева Н.Д. (1982) Сопоставление айской и большеинзерской свит нижнего рифея Башкирского мегантиклинория Южного Урала по аксессуарным минералам. *Верхний докембрий и палеозой Южного Урала (стратиграфия и литология)*. Уфа: БФАН СССР, 20-26.
- Сначёв В.И., Кузнецов Н.С. (2009) Геология золото-порфирирового месторождения Березняки (Восточно-Уральская мегазона). *Геологический сборник*. Вып. 8. Уфа: ИГ УНЦ РАН, 197-203.
- Таусон В.Л., Бабкин Д.Н., Пархоменко И.Ю., Меньшиков В.И., Липко С.В., Пастушкова Т.М. (2010) Распределение химических форм тяжелых металлов (Hg, Cd, Pb) между пиритом и гидротермальным раствором. *Геохимия*, (6), 651-656.
- Типоморфизм минералов (1989). Справочник. Под ред. Л.В. Чернышевой. М.: Недра, 560 с.
- Чекваидзе В.Б., Миляев С.А., Исаакович И.З. (2004) Комплексная петрографо-минералого-геохимическая методика поисков золоторудных месторождений. М.: "Бородино-Е", 132 с.
- Чернов А.Л., Алексеев А.А., Логинова Л.А., Пацков А.А., Куксов В.Н. (1982) Отчет о детальных поисках коренного золота на Центральном участке за 1979-1982 гг. Учаль: ПГО "Башкиргеология", Башкирский геол. фонд.
- Чернов А.Л., Нечаев В.П. (1980) Отчет о поисково-оценочных работах на объекте "Участок Горный прииск. Авзянский район" за 1976-1979 гг. (отчет в 2 томах). Кусимовский рудник: ПГО "Башкиргеология", Башкирский геологический фонд.
- Шарипова А.А., Мичурин С.В. (2011) Термо-ЭДС пирита из рудопоявлений золота в нижнерифейских отложениях Башкирского антиклинория. *Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов АН РБ*. Вып. 17. Уфа, 110-117.
- Шарипова А.А., Мичурин С.В. (2015) Изотопно-геохимическая характеристика рудопоявлений золота в докембрийских отложениях Башкирского мегантиклинория. *Байкальская молодеж. научн. конф. по геологии и геофизике*. Мат-лы III всерос. молодеж. науч. конф. Улан-Удэ, БНЦ СО РАН, 249-252.
- Шарипова А.А., Мичурин С.В., Веливецкая Т.А., Игнатьев А.В. (2017) Золотоносный пирит в рифейских отложениях Башкирского мегантиклинория (на примере рудопоявления Богряшка). *Вестн. АН Республики Башкортостан*, **22**(1), 83-93.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2011) Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 742 с.
- Юргенсон Г.А. (2003) Типоморфизм и рудные формации. Новосибирск: Наука, 369 с.
- Bowles J.F.W. (2002) Applications of Electron Microbeam Analysis in the Earth Sciences. *Microchim. Acta*, **138**, 125-131.
- Gregory D.D., Large R.R., Halpin J.A., Baturina E.L., Lyons T.W., Wu S., Danyushevsky L., Sack P.J., Chapraz A., Maslennikov V.V., Bull S.W. (2015) Trace Element Content of Sedimentary Pyrite in Black Shales. *Econ. Geol.*, **110**, 1389-1410.
- Guangzhou M., Renmin H., Jianfeng G., Weiqiang L., Kuidong Z., Guangming L. (2009) Existing forms of REE in gold-bearing pyrite of the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province, China. *J. Rare Earths*, **27**(6), 1079-1087.
- Kohn M.J., Riciputi L.R., Stakes D., Orange D.L. (1998) Sulfur isotope variability in biogenic pyrite: Reflections of heterogeneous bacterial colonization? *Amer. Miner.*, **83**, 1454-1468.

- Kun L., Ruidong Y., Wenyong C., Rui L., Ping T. (2014) Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province, China. *Chin. J. Geochem.*, **33**, 109-118.
- Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S., Palenik C.S., Chrysosoulis S.L., Ewing R.C. (2005) Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**(11), 2781-2796.
- Vaughan D.J., Craig J.R. (1978) Mineral chemistry of metal sulfides. Cambridge: University Press, 494 p.
- Zacharias J., Fryda J., Paterova B., Mihaljevic M. (2004) Arsenopyrite and As-bearing pyrite from the Roudny deposit, Bohemian Massif. *Miner. Mag.*, **68**(1), 31-46.

## REFERENCES

- Alekseev A.A., Timofeeva E.A. (2008). Rare-earth phosphates in the rocks and alluvium in the South Urals western slope. *Litosfera*, (1), 140-145. (In Russian)
- Bobokhov A.S., Bobokhova R.B., Gorozhanin V.M., Michurin S.V. (1993) *Termogazogeoхимические и изотопные поисковые критерии колчеданного и золото-сульфидного оруденения (на примере месторождений Башкортостана)* [Thermogas geochemical and isotopic search criteria of pyrite and gold-sulfide mineralization (on the example of Bashkortostan deposits)]. Ufa, USTs RAS 23 p. (In Russian)
- Bowles J.F.W. (2002) Applications of Electron Microbeam Analysis in the Earth Sciences. *Microchim. Acta*, **138**, 125-131.
- Bugel'skii Yu.Yu., Sirotn V.I., Novikov V.M., Slukin A.D., Shatrov V.A., Kuznetsova O.Yu., Nosik L.P. (2003) Diagenetic minerals as indicators of cyclicality and interruptions in the sedimentation of the Voronezh anticline. *Vestn. Voronezhskogo Univ. Geologiya*, (2), 40-56. (In Russian)
- Chekvaizde V.B., Milyaev S.A., Isaakovich I.Z. (2004) *Kompleksnaya petrografo-mineralogo-geokhimicheskaya metodika poiskov zolotorudnykh mestorozhdenii* [Complex petrographic-mineralogical-geochemical methods of prospecting gold ore deposits]. Moscow, "Borodino-E" Publ., 132 p. (In Russian)
- Chernov A.L., Alekseev A.A., Loginova L.A., Patskov A.A., Cooksov V.N. (1982.) *Otchet o detal'nykh poiskakh korenogo zolota na Tsentral'nom uchastke za 1979-1982 gg.* [Report on detailed searches for indigenous gold in the Central Section for 1979-1982]. Uchaly, PGO "Bashkirgeology", Bashkirian geological fund. (In Russian unpublished)
- Chernov A.L., Nechaev V.P. (1980) *Otchet o poiskovo-otsechnykh rabotakh na ob'ekte "Uchastok Gornyi priisk. Avzyanskiy raion" za 1976-1979 gg.* [Report on prospecting and appraisal work at the site "Gornyi Prisk, Avzyan region" for the years 1976-1979]. Kusimovskiy mine: PGO "Bashkirgeology", Bashkir geological fund (In Russian unpublished)
- Gregory D.D., Large R.R., Halpin J.A., Baturina E.L., Lyons T.W., Wu S., Danyushevsky L., Sack P.J., Chappaz A., Maslennikov V.V., Bull S.W. (2015) Trace Element Content of Sedimentary Pyrite in Black Shales. *Econ. Geol.*, **110**, 1389-1410.
- Guangzhou M., Renmin H., Jianfeng G., Weiqiang L., Kuidong Z., Guangming L. (2009) Existing forms of REE in gold-bearing pyrite of the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province, China. *J. Rare Earths*, **27**(6), 1079-1087.
- Judovich Ya.E., Ketris M.P. (2011) *Geokhimicheskie indikatory litogeneza (Litologicheskaya geokhimija)* [Geochemical indicators of lithogenesis (Lithological geochemistry)]. Syktyvkar, Geoprint Publ., 742 p. (In Russian)
- Jurgenson G.A. (2003) *Tipomorfizm i rudnye formacii* [Typomorphism and ore formations]. Novosibirsk, Nauka Publ., 369 p. (In Russian)
- Kobzareva Zh.S. (2007) *Mineralogo-termobarogeoхимические особенности шил'ного кварца в рифейских осадочных комплексах Авзяно-Белорецкого золоторудного района (Yu. Ural)*. Dis. kand. geol.-min. nauk [Mineralogical and thermobarogeochemical features of vein quartz in Riphean sedimentary complexes of the Avzyan-Beloretsk gold field (Southern Urals). Cand. geol. and min. sci. diss.] Rostov-na-Donu, 24 p. (In Russian)
- Kohn M.J., Riciputi L.R., Stakes D., Orange D.L. (1998) Sulfur isotope variability in biogenic pyrite: Reflections of heterogeneous bacterial colonization? *Amer. Miner.*, **83**, 1454-1468.
- Korobeinikov A.F., Narseev V.A., Pshenichkin A.Ja., Revyakin P.S., Arifulov Ch.H. (1993) *Pirity zolotorudnykh mestorozhdenii (svoistva, zonal'nost', prakticheskoe primeneniye)* [Pyrites of gold deposits (properties, zoning, practical application)]. Moscow, TsNIGRI Publ., 216 p. (In Russian)
- Kovalev S.G., Timofeeva E.A., Pindyurina E.O. (2009) Monazite mineralization on the western slope of the Southern Urals. *Geologicheskii sbornik*, Vyp. 8. Ufa, IG UNTs RAN, 138-144. (In Russian)
- Kovalev S.G., Vysotskii I.V. (2001) Geochemistry of gold on the western slope of the Southern Urals. *Mat-ly IV Resp. geol. konf. "Geologiya i perspektivy rasshireniya syr'evoi bazy Bashkortostana i sopredel'nyh territorii"*. Vyp. 2. ["Geology and prospects of expanding the raw material base of Bashkortostan and adjacent territories". Proc. IV Republ. Geol. Conf. V. 2.]. Ufa, NII BZhD RB, 134-140. (In Russian)
- Kovalev S.G., Vysotskii I.V., Fatkullin I.R. (1999) *Slozhnodislotsirovannye uglerodsoderzhashchie tolshchi zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala* [Complexly dislocated carbonaceous strata of the western slope of the Southern Urals]. Ufa, Bashkirian State Univ. 118 p. (In Russian)
- Krupenin M.T., Michurin S.V., Cherednichenko N.V., Adamovich N.V. (2013) [Elements-impurities in the pyrite of the Satka ore field. *Ezhгодnik-2012*. Trudy IGG UrO RAN. V. 160, 213-223. (In Russian)
- Krupenin M.T., Michurin S.V., Sharipova A.A., Gulyaeva T.Ya., Petrishcheva V.G. (2016) Mineralogical and geochemical features of magnesian-ferruginous carbonates of the Avzyan ore region of the South Urals in connection with the regularities of metasomatism. *Vestn. Ural. otd. RMO*, (13), 73-88. (In Russian)
- Kun L., Ruidong Y., Wenyong C., Rui L., Ping T. (2014) Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province, China. *Chin. J. Geochem.*, **33**, 109-118.
- Larionov N.N. (2003) *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoy Federatsii masshtaba 1 : 200 000. Juzhno-Ural'skaya seriya. List N-40-XXII (Tukan)* [State geological map of the Russian Federation, scale 1 : 200 000. The South Ural Series. Sheet N-40-XXII (Tukan)]. Ministerstvo prirodnnykh resursov RF. (In Russian)
- Michurin S.V. (2011) About connection of thorium and gold

- in the Riphean deposits of the Bashkir anticlinorium. *Geologicheskii sbornik*. Vyp. 9. Ufa, IG UNTs RAN, 208-215. (In Russian)
- Michurin S.V., Biktimerova Z.R., Kanipova Z.A., Danilenko S.A. (2014) Zinc in the carbonate rocks of the Suran Formation of the Lower Riphean (the Southern Urals). *Geologija, poleznye iskopaemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredel'nyh territorii*. Mat-ly 10 Mezhhreg. nauch.-prakt. konf. [Geology, minerals and problems of geoecology of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories. Proc. 10-th Interregion. scientific-practical. Conf.], Ufa, DizainPress Publ., 150-154. (In Russian)
- Michurin S.V., Kovalev S.G., Gorozhanin V.M. (2009) *Genezis sul'fatov i sul'fidov v nizhnerifeyevskikh otlozhenijah Kamsko-Bel'skogo avlakogena i Bashkirskogo megantiklinoriya* [Genesis of sulfates and sulfides in the Lower Riphean deposits of the Kama-Belsk aulacogene and the Bashkir meganticlinorium]. Ufa, DizainPoligrafServis Publ., 192 p. (In Russian)
- Michurin S.V., Sharipova A.A. (2011) Chemical dating of uranium-thorium mineralization Lower Riphean rocks of the Bashkir anticlinorium]. *Geologicheskii sbornik* Vyp. 9. Ufa, IG UNTs RAN, (9), 216-219. (In Russian)
- Nechaev V.P. (1982) Features of the hydrothermal-metasomatic process on some gold ore manifestations of the western slope of the Southern Urals. *Voprosy mineralogii, geohimii i genezisa poleznykh iskopaemykh Juzhnogo Urala* [Issues of mineralogy, geochemistry and genesis of minerals in the Southern Urals]. Ufa, BFAN SSSR, 52-56. (In Russian)
- Novgorodova M.I. (1983) *Samorodnye metally v gidrotermal'nykh rudakh* [Native metals in hydrothermal ores]. Moscow, Nauka Publ., 287 p. (In Russian)
- Novoselov K.A., Belogub E.V., Ermolina-Kutsie O.S., Mikhailov A.B., Kotlyarov V.A. (2014) Mineralogy of gold occurrences from the Kuhmo greenstone belt (Finland). *Litosfera*, (2), 115-124. (In Russian)
- Potehin A.G., Patskov A.A., Zasuhin G.N., Petrikova V.P. (1977) *Otchet o revizionno-poiskovykh rabotakh na zoloto na Avzyanskom uchastke po rabotam Avzyanskogo otryada za 1975-1977 gg.* [Report on revision and prospecting works for gold in the Avzyan section from the works of the Avzyan area for 1975-1977]. Ufa: BTGU., Bashkirian geological fund. (In Russian unpublished)
- Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S., Palenik C.S., Chrysosulis S.L., Ewing R.C. (2005) Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**(11), 2781-2796.
- Rimskaja-Korsakova M.N., Dubinin A.V. (2003) Rare earth elements in sulfides submarine hydrothermal sources of the Atlantic Ocean. *Dokl. Akad. Nauk*, **389**(5), 672-676. (In Russian)
- Rykus M.V., Snachev V.I. (1999) *Zoloto zapadnogo sklona Juzhnogo Urala* [Gold on the western slope of the Southern Urals]. Ufa, UNTs RAN, 170 p. (In Russian)
- Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Polenov Yu.A. (1999) *Mestorozhdeniya zolota Urala* [Deposits of gold in the Urals]. Ekaterinburg, UGGA, 570 p. (In Russian)
- Sergeeva N.D. (1982) Comparison of the Aya and Bolsheinzher Formations of the Lower Riphean of the Bashkir Megantiklinorium of the Southern Urals along accessory minerals. *Verhniy dokembrii i paleozoy Juzhnogo Urala (stratigrafiya i litologiya)* [Upper Precambrian and Paleozoic of the Southern Urals (stratigraphy and lithology)] Ufa, BFAN SSSR, 20-26. (In Russian)
- Sharipova A.A., Michurin S.V. (2011) Thermo-EMF pyrite from gold ore occurrences in the Lower Riphean deposits of the Bashkir anticlinorium. *Geologiya. Izv. Otdeleniya nauk o Zemle i prirodnym resursom AN RB*. Vyp. 17. Ufa, 110-117. (In Russian)
- Sharipova A.A., Michurin S.V. (2015) Isotope-geochemical characteristics of gold ore occurrences in the Precambrian deposits of the Bashkir megantiklinorium. *Baikal'skaja molodezhnaya nauchnaya konferenciya po geologii i geofizike*. Mat-ly III Vseros. molodezh. nauch. konf. [Proc. of III Baikal Youth Scientific Conf. on geology and geophysics]. Ulan-Ude, BNTs SO RAN, 249-252. (In Russian)
- Sharipova A.A., Michurin S.V., Velivetskaja T.A., Ignat'ev A.V. (2017) Auriferous pyrite in Riphean deposits of the Bashkir meganticlinorium (on the example, ore-occurrence Bogryashka). *Vestn. AN Respubliki Bashkortostan*, **22**(1), 83-93. (In Russian)
- Snachov V.I., Kuznetsov N.S. (2009) Geology of the gold-porphry deposit Berezhnyaki (East-Ural megazone). *Geologicheskii sbornik*. Vyp. 8. Ufa, IG UNTs RAN, 197-203. (In Russian)
- Tauson V.L., Babkin D.N., Parkhomenko I.Yu., Men'shikov V.I., Lipko S.V., Pastushkova T.M. (2010) Distribution of chemical forms of heavy metals (Hg, Cd, Pb) between pyrite and hydrothermal solution. *Geokhimiya*, (6), 651-656. (In Russian)
- Tipomorfizm mineralov. Spravochnik*. (1989) (Pod red. L.V. Chernyshevoi) [Typomorphism of minerals. Handbook]. Moscow, Nedra Publ., 560 p. (In Russian)
- Vaughan D.J., Craig J.R. (1978) Mineral chemistry of metal sulfides. Cambridge: University Press, 494 p.
- Vikhter B.Ya. (2009) *Zoloto-mysh'yakovo-sul'fidnye mestorozhdeniya terrigennykh kompleksov skladchato-orogennykh oblastei* [Gold-arsenic-sulfide deposits of terrigenous complexes of folded-orogenic regions]. Moscow, "Al't-Konsul" Publ., 108 p. (In Russian)
- Vilor N.V., Kaz'min L.A., Goryachev N.A. (2014) Sulphoarsenic complexes of gold in ore-forming hydrothermal solutions (thermodynamic modeling). *Geokhimiya*, (10), 936-945. (In Russian)
- Volkov A.V., Sidorov A.A. (2016) Geological-genetic model of Carlin type gold deposits. *Litosfera*, (6), 145-165. (In Russian)
- Zacharias J., Fryda J., Paterova B., Mihaljevic M. (2004) Arsenopyrite and As-bearing pyrite from the Roudny deposit, Bohemian Massif. *Mineral. Mag.*, **68**(1), 31-46.
- Zamyatina D.A., Murzin V.V., Moloshag V.P., Varlamov D.A., Zamyatin D.A., Kim L.P., Goreva A.A., Viken't'ev I.V. (2014) Mineralogy, geochemistry and physical-chemical conditions of ore formation and metasomatites Tamunier gold-sulphide deposit, the Northern Ural. *Litosfera*, (6), 102-117. (In Russian)