

УДК 553.411:546.22

ИЗОТОПНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕРЫ АРСЕНОПИРИТА ИЗ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЗАЛЕЖИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧЕРТОВО КОРЫТО (ПАТОМСКОЕ НАГОРЬЕ)

Синкина Екатерина Андреевна¹,
vea@tpu.ru

Гаврилов Роман Юрьевич¹,
gavrilovru@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Месторождение Чертово Корыто располагается в пределах Ленской золотоносной провинции, в которой сосредоточены крупные по запасам месторождения золота (Сухой Лог, Вернинское, Высочайшее, Ожерелье и др.). Изучению этой провинции уделено много внимания, что отражено в огромном числе публикаций. Несмотря на это, единое представление о происхождении месторождений золота, образованных в черносланцевых толщах Бодайбинского прогиба, отсутствует. Дискуссионным остается вопрос об источнике полезного компонента и выявлении механизма его транспортировки, перераспределения и концентрирования. Ввиду этого становится актуальным изучение изотопных отношений серы сульфидов для определения возможного источника благородного металла. В месторождении Чертово Корыто изотопные отношения серы сульфидов изучены в ограниченном количестве и не отражают изменения этого параметра на глубину и по простиранию рудной залежи. В силу малоизученности этот объект является интересным для исследований в области изотопной геологии.

Цель – выявление возможных источников рудного вещества по результатам изотопных исследований серы арсенопирита.

Объектом исследования является арсенопирит из центральной части рудной залежи.

Методы. Масс-спектрометрические измерения с использованием газового масс-спектрометра.

Результаты. Исследования показали выдержанность изотопного состава серы арсенопирита (–3,8‰...+4,3 ‰) на глубине, что свидетельствует об однородном источнике серы в период рудообразования. Приближенные при этом к метеоритному стандарту значения указывают на эндогенный источник рудообразующих флюидов. Полученные данные согласуются с изотопным составом серы сульфидов различных по происхождению месторождений золота, образованных в сланцевом и ином субстратах.

Ключевые слова:

Изотопы, сера, сульфиды, арсенопирит, золоторудное месторождение, черные сланцы.

Введение

На сегодняшний день вопрос о возможных источниках рудного вещества в золотых месторождениях, образованных в черносланцевых толщах, является актуальным. Это связано с существованием различных представлений о механизмах образования таких объектов.

Согласно одной из теорий (метаморфогенно-гидротермальной) рудные зоны формируются в процессе метаморфизма изначально обогащенных золотом осадочных пород [1–5]. Представление о магматогенно-гидротермальном механизме подразумевает связь происхождения металлоносных флюидов с гранитным магматизмом [6–9] или с мантийными умеренно щелочными базальтовыми расплавами [10–12]. Ряд исследователей доказывают многоэтапность накопления и концентрирования металлов, делая акцент на преобладание породных источников золота [13]. Есть точка зрения о множественных источниках благородного металла, сосредоточенного в рудах одного месторождения. Предполагается совместный вклад мантийного субстрата, коровых расплавов и породных источников [14, 15]. Стоит при этом отметить, что авторы, предлагающие и доказывающие тот или иной вариант, нередко меняют свою точку зрения по причине появления новых фактов.

В связи с этим исследования в области «источников рудного вещества» активно продолжаются, о чем

свидетельствуют современные научные публикации [16–20].

Наиболее информативным, по мнению многих исследователей, является изотопный анализ состава серы сульфидов [21–24].

Известно, что в восстановительной среде в интервале температур 400–200 °С невозможна эффективная транспортировка благородного металла без участия серы [25]. Кроме того, наличие в рудах многих месторождений субмикроскопического золота, сингенетичного с пиритом и арсенопиритом [26–32], а также тесная пространственно-временная связь золота с сульфидной минерализацией дает основание предполагать общность происхождения двух элементов.

Авторами многих публикаций при этом отмечается важность прослеживания изменений изотопного состава серы сульфидов в пространстве и времени для получения изотопно-геохимической зональности рудных тел, залежей, месторождений [16, 17, 32].

В связи с имеющимися разногласиями и противоречиями накопление новых данных по изотопным отношениям серы сульфидов золотых месторождений, образованных в черных сланцах, остается актуальным.

В фокус данного исследования, несомненно, попадает месторождение Чертово Корыто. Изотопные исследования серы сульфидов в месторождении Чертово Корыто проведены фрагментарно и в ограничен-

ном количестве. Изотопы серы определены в различных генерациях пирита, арсенопирита, пирротина и в галените (18 проб). Пробы были отобраны из рудных интервалов залежи. Изотопные отношения серы в ранних и поздних сульфидах изменяются в интервале $-3,8...+4,7\%$ [32].

**Геологическая позиция и геологическое строение месторождения Чертово Корыто.
 Характер арсенопиритовой минерализации**

Месторождение Чертово Корыто расположено в Ленской золотоносной провинции, находящейся в зоне сочленения Байкальской горной системы и Сибирской платформы (рис. 1). Главным элементом провинции является Чуйско-Тонодско-Нечерский антиклинорий. На его территории расположено не-

сколько рудных узлов, в том числе Кевактинский рудный узел, связанный с Тонодским поднятием. Узел представляет собой крупный тектонически нарушенный блок, в пределах которого расположен исследуемый объект (рис. 1).

Рудная зона локализована в пределах михайловской свиты раннепротерозойского возраста и приурочена к висячему боку складчато-разломной области, контролируемой Амандракским разломом (рис. 2) [33]. Мощность зоны порядка 150 м, протяженность – 1,5 км. Михайловская свита характеризуется переслаиванием песчаников различной зернистости, алевролитов и аргиллитов. Последние занимают подчиненное положение (5–7 %). Вся толща осадочных пород была подвержена процессам регионального метаморфизма.

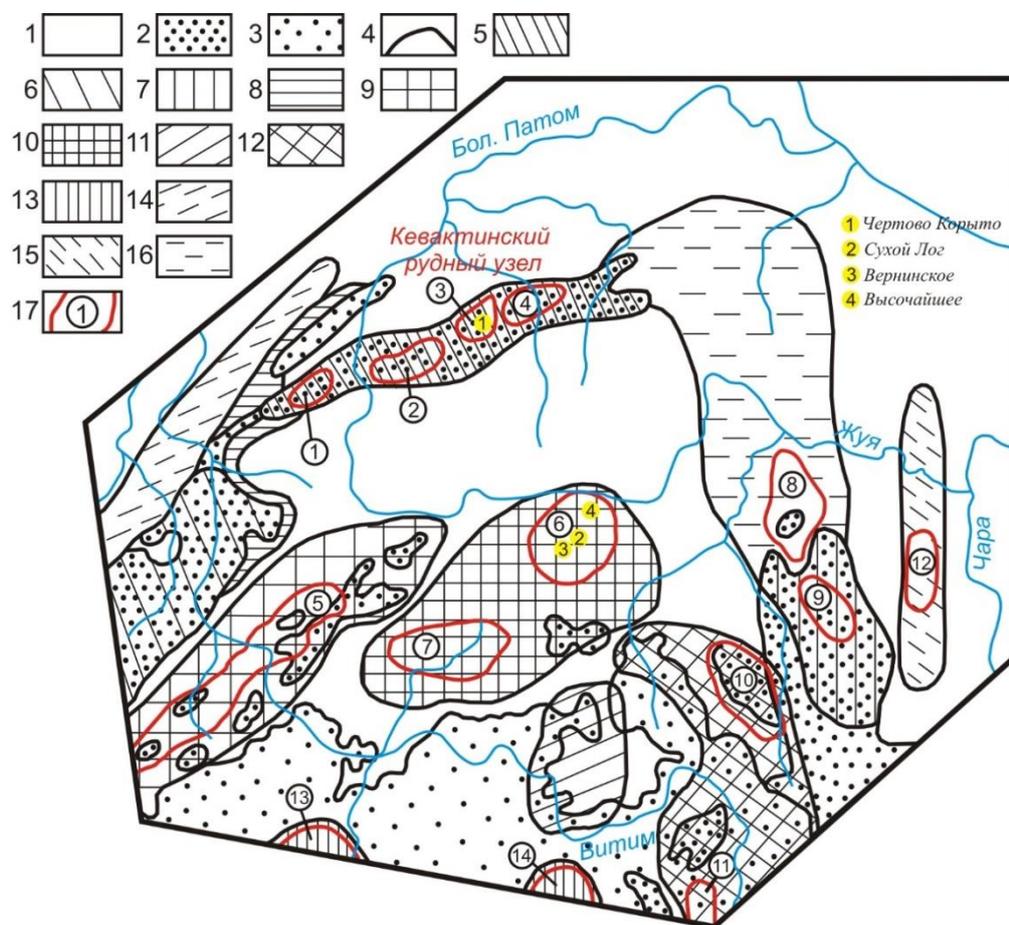


Рис. 1. Схематическая карта металлогенического районирования Патомского нагорья [34, с дополнениями авторов]: 1 – складчатый чехол (RF-PZ); 2 – выходы фундамента (до RF); 3 – гранитоиды (PZ); 4 – границы рудных районов; 5–16 – рудные районы: 5 – Тонодский, 6 – Чуйский, 7 – Нечерский, 8 – Витимский, 9 – Мамский, 10 – Бодайбинский, 11 – Синогинский; 12 – Нечеро-Жуинский, 13 – Муйский, 14 – Малочуйский, 15 – Джелиндинский, 16 – Патомо-Нечерский; 17 – рудные узлы: 1 – Туюканский, 2 – Хайвергинский, 3 – Кевактинский, 4 – Амандракский, 5 – Мамская слюдоносная полоса, 6 – Кропоткинский, 7 – Артемовский, 8 – Балаганах-Булбухтинский, 9 – Ченчинский, 10 – Атычак-Бираинский, 11 – Казбекский, 12 – Бестяхский, 13 – Додыхтинский, 14 – Чайандринский

Fig. 1. Schematic map of metallogenetic zoning of the Patom Upland [34, with additions of the authors]: 1 – folded cover (RF-PZ); 2 – foundation outlets (up to RF); 3 – granitoids (PZ); 4 – boundaries of ore districts; 5–16 – ore districts: 5 – Tonodskiy, 6 – Chuyskiy, 7 – Necherskiy, 8 – Vitimskiy, 9 – Mamskiy, 10 – Bodaybinskiy, 11 – Sinyuginskiy; 12 – Nechero-Zhuinskiy, 13 – Muyskiy, 14 – Malochuyskiy, 15 – Dzhelindinskiy, 16 – Patomo-Necherskiy; 17 – ore nodes: 1 – Tuyukanskiy, 2 – Khayverginskiy, 3 – Kevaktinskiy, 4 – Amandrakskiy, 5 – Mamskaya mica-bearing band, 6 – Kropotkinskiy, 7 – Artemovskiy, 8 – Balaganakh-Bulbukhtinskiy, 9 – Chenchinskiy, 10 – Atychakh-Birainskiy, 11 – Kazbekskiy, 12 – Bestyakhskiy, 13 – Dodykhtinskiy, 14 – Chayandrinskiy

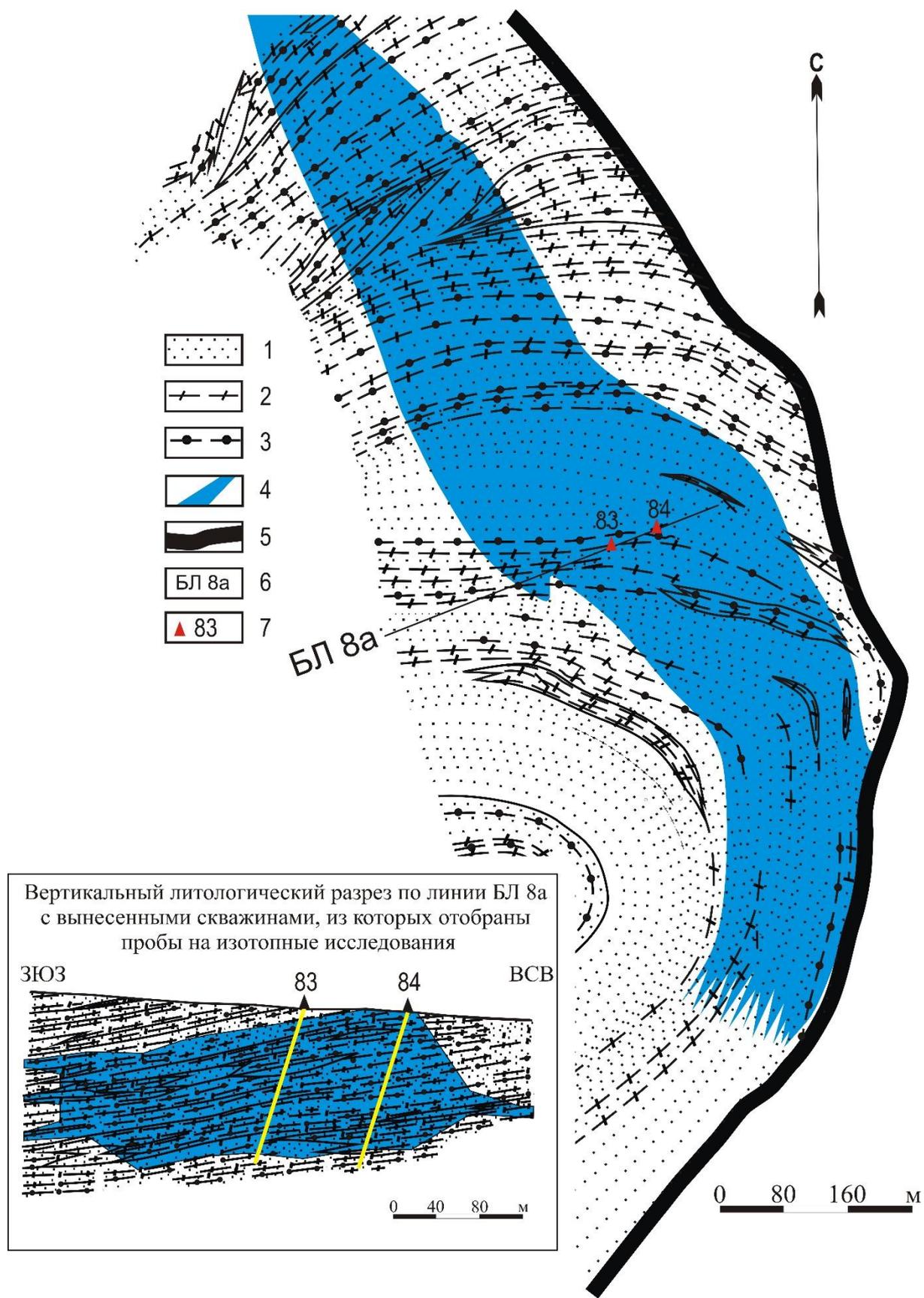


Рис. 2. Геологическое строение месторождения Чертово Кoryто: 1) песчаники; 2) алевролиты; 3) аргиллиты; 4) рудная залежь; 5) разлом; 6) буровая линия 8а; 7) скважина и ее номер

Fig. 2. Geological structure of the Chertovo Koryto deposit: 1) sandstones; 2) siltstones; 3) mudstones; 4) ore deposit; 5) fault; 6) drill line 8a; 7) well and its number

По результатам предшествующих исследований геохимическое поле месторождения Чертово Корыто характеризуется аномальными содержаниями мышьяка [35]. Элемент образует выдержанный ореол по всему объёму рудной залежи и за ее пределами. Наличие такой контрастной аномалии обусловлено присутствием в рудах большого количества арсенопирита.

Ранее авторами статьи был детально изучен вещественный состав руд месторождения [36, 37] и выявлено, что в рудах арсенопирит представлен двумя генерациями, различающимися химическим составом, физическими свойствами и пространственным расположением.

Арсенопирит I повсеместно развит в углеродистых сланцах. Образует как одиночные, так и сростные кристаллы короткопризматической и удлиненно-призматической формы размером до 0,5 см. В арсенопирите I в виде механических включений размером до 0,5 мм отмечается самородное золото I. Его среднее содержание в сульфиде составляет 6,3 г/т.

Арсенопирит II отмечается в кварцевых жилах и прожилках в форме зернистых масс с характерной каткластической структурой. В виде механических включений размером до 0,2 мм в арсенопирите II отмечается самородное золото II [36].

Арсенопирит I и арсенопирит II входят в состав продуктивных золотосодержащих минеральных комплексов.

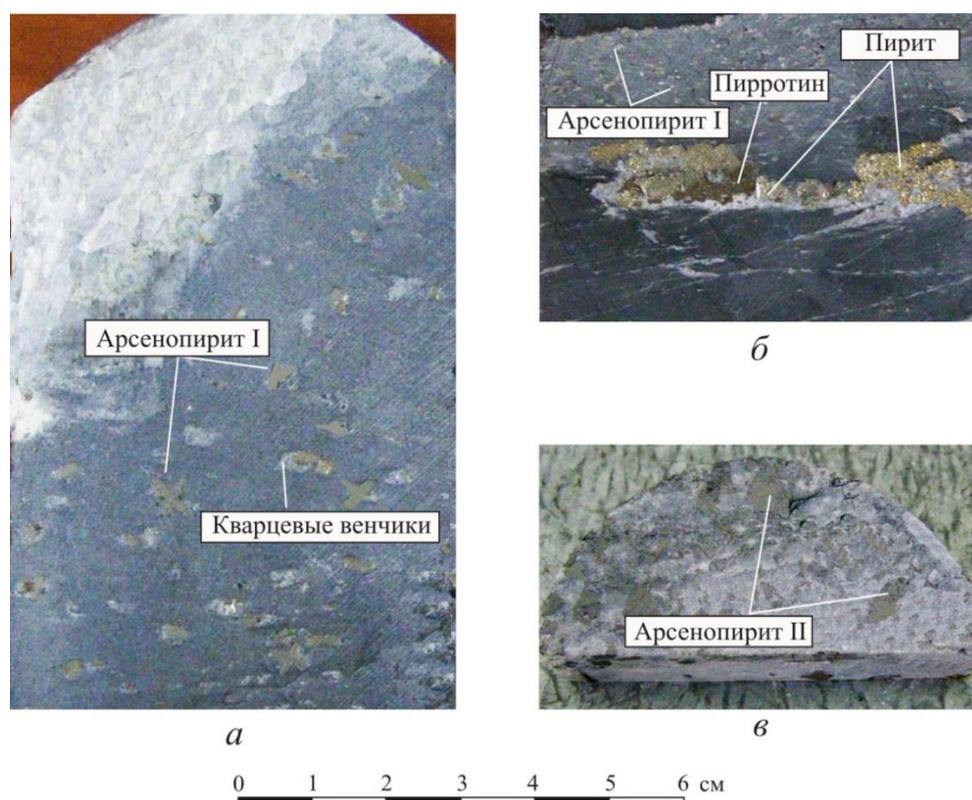


Рис. 3. Арсенопиритовая минерализация месторождения Чертово Корыто: а) метакристаллы арсенопирита I, рассеянные в породе, местами обрамленные «кварцевыми венчиками»; б) отдельные метакристаллы арсенопирита I и кварц-карбонат-пирит-пирротинный прожилок; в) плотные зернистые скопления арсенопирита II в относительно мощных жилах кварц-карбонатного состава

Fig. 3. Arsenopyrite mineralization of the Chertovo Koryto deposit: a) arsenopyrite I metacrystals scattered in the rock, sometimes framed by «quartz coronas»; b) separate arsenopyrite I metacrystals and quartz-carbonate-pyrite-pyrrhotite veins; c) dense granular accumulations of arsenopyrite II in relatively powerful veins of quartz-carbonate composition

Материал для исследования. Методы исследования

Материалом для исследования является арсенопирит двух генераций, отобранный из центральной части рудного тела из скважин 83 и 84 буровой линии 8а (рис. 2). Арсенопирит отбирался вручную под биноклем из протолочек с учетом генетической принадлежности.

Изотопные исследования проведены в лаборатории изотопно-аналитической геохимии ИГМ СО РАН г. Новосибирск (аналитики В.Н. Реутский, О.П. Изох, М.Н. Колбасова).

Пробы сульфида для анализа представляли собой монофракции весом не менее 100 мг. Истертую пробу смешивали с толченым кварцем и пентаксидом ванадия. Далее пробу окисляли в вакуумированном реакторе из плавленного кварца при температуре 850 °С в течение 30 минут. Исследования проведены в газовом масс-спектрометре Delta V Advantage в режиме двойного напуска. Подготовка проб и масс-спектрометрические измерения контролировались набором образцов. Воспроизводимость значений с погрешностью не более 0,1 %. Всего проанализировано 33 пробы.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования представлены в таблице.

Интерпретируя изотопные отношения серы сульфидов следует понимать и учитывать, что в рудообразующую систему элемент (сера) может поступать из различных источников и в различных пропорциях. Поэтому сера сульфидов любых промышленно-генетических месторождений золота, имеющая множественный источник, характеризуется значительным разбросом $\delta^{34}\text{S}$ [28, 31]. При гомогенном однородном источнике сера демонстрирует относительно узкий диапазон $\delta^{34}\text{S}$ [7, 17, 18].

Из приведенных данных отчетливо видно, что в центральной части рудного тела изотопные отношения серы арсенопирита I изменяются в узких пределах от +4,3 ‰ до +0,1 ‰ и приближены к метеоритному стандарту. При этом отличные значения имеет изотопный состав серы арсенопирита II (от +1,3 до –3,8 ‰). В целом для продуктивных стадий минералообразования характерны выдержанные отношения изотопов серы арсенопиритов на глубину всей рудной залежи, что говорит об однородном источнике серы в период рудообразования. Отличающиеся значения изотопного состава серы арсенопиритов, вероятно, связаны с процессами смешения осадочной и ювенильной серы в различных пропорциях. Полученные данные не противоречат, а подтверждают ранее про-

веденные исследования [32], согласно которым для раннего пирротина, распространенного в виде мелкой вкрапленности в метасоматически преобразованных сланцах михайловской свиты, характерны более положительные значения $\delta^{34}\text{S}$ (+6,9 +7,1 ‰). То есть для его образования сера активно заимствовалась из вмещающих пород, а также поступала из дополнительного, предположительно, глубинного источника.

На территории Бодайбинского района локализовано много золоторудных месторождений (рис. 1). Исследуемый объект располагается на удалении (около 100 км к северу) от крупного месторождения Сухой Лог и других объектов (Вернинское, Высочайшее и др.). Все месторождения, несомненно, имеют общие черты и в то же время отличительные особенности. В частности, изотопные отношения серы сульфидов в рудах месторождений Вернинское, Сухой Лог, Высочайшее отличаются от изотопных отношений сульфидов в месторождении Чертово Кoryто (рис. 4). Они имеют более положительные значения, т. е. обогащены тяжелым изотопом. Изменение значений укладывается в интервал +5...+12 ‰. При этом за пределами рудных зон, согласно данным автора, $\delta^{34}\text{S}$ достигает +20 ‰ [17]. Возможно, различающиеся значения изотопного состава серы связаны с различным количественным привнесом элемента эндогенной природы в рудообразующую систему.

Таблица. Изотопные отношения серы арсенопирита из центральной части рудной залежи месторождения Чертово Кoryто

Table. Isotopic ratios of arsenopyrite sulphur from ore deposit central part of Chertovo Koryto deposit

Минерал Mineral	Глубина, м Depth, m	$\delta^{34}\text{S}$, ‰ (CDT)	Минерал Mineral	Глубина, м Depth, m	$\delta^{34}\text{S}$, ‰ (CDT)
Арсенопирит I Arsenopyrite I	23,2	+1,9	Арсенопирит I Arsenopyrite I	112,0	+0,1
Арсенопирит I Arsenopyrite I	43,9	+2,4	Арсенопирит II Arsenopyrite II	119,7	+0,9
Арсенопирит II Arsenopyrite II	44,0	+0,9	Арсенопирит II Arsenopyrite II	121,0	+1,3
Арсенопирит II Arsenopyrite II	52,8	–3,8	Арсенопирит I Arsenopyrite I	121,2	+0,9
Арсенопирит I Arsenopyrite I	59,5	+4,1	Арсенопирит I Arsenopyrite I	124,0	+1,3
Арсенопирит I Arsenopyrite I	60,5	+2,2	Арсенопирит II Arsenopyrite II	126,0	+0,2
Арсенопирит I Arsenopyrite I	63,0	+0,4	Арсенопирит I Arsenopyrite I	126,5	+2,5
Арсенопирит II Arsenopyrite II	63,1	–3,0	Арсенопирит I Arsenopyrite I	128,3	+0,8
Арсенопирит I Arsenopyrite I	75,9	+0,6	Арсенопирит I Arsenopyrite I	129,8	+2,2
Арсенопирит II Arsenopyrite II	79,4	+1,3	Арсенопирит II Arsenopyrite II	146,0	+0,6
Арсенопирит II Arsenopyrite II	83,4	–2,5	Арсенопирит I Arsenopyrite I	149,4	+0,6
Арсенопирит I Arsenopyrite I	85,2	+0,1	Арсенопирит I Arsenopyrite I	153,3	+4,3
Арсенопирит I Arsenopyrite I	85,0	+2,8	Арсенопирит I Arsenopyrite I	155,3	+3,3
Арсенопирит I Arsenopyrite I	87,2	+2,7	Арсенопирит I Arsenopyrite I	155,4	+2,5
Арсенопирит II Arsenopyrite II	90,0	–2,4	Арсенопирит I Arsenopyrite I	167,4	+0,3
Арсенопирит I Arsenopyrite I	91,65	+1,2	Арсенопирит I Arsenopyrite I	182,9	+2,5
Арсенопирит I Arsenopyrite I	99,4	+0,8			

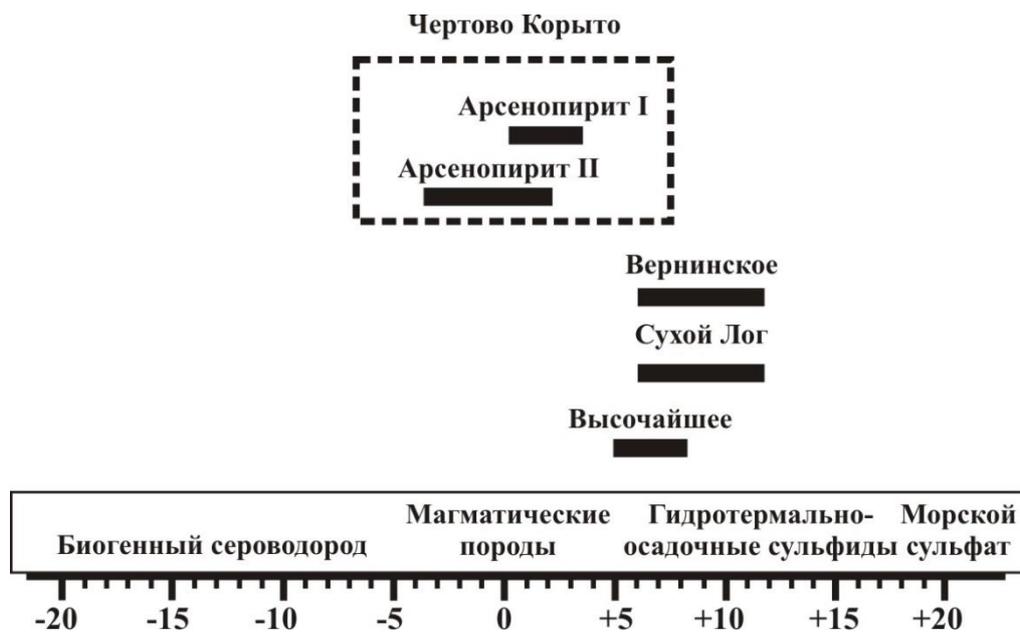


Рис. 4. Изотопные отношения серы сульфидов в рудах золоторудных месторождений Бодайбинского района [17, с дополнениями авторов]

Fig. 4. Isotopic ratios of sulfur sulfides in the ores of gold deposits of the Bodaibinsky district [17, with additions by the authors]

Существенно различающиеся изотопные отношения серы в сульфидов из руд и вмещающих пород обусловлены поступлением существенных объемов серы и золота в составе эндогенных флюидов. Аналогичные закономерности отмечаются во многих золоторудных месторождениях, локализованных в различных субстратах (терригенном, вулканогенном и др.) [7, 16–22].

Выводы

Полученные в рамках проведенного исследования результаты показали выдержанность изотопного состава серы арсенопирита (–3,8...+4,3 ‰) по глубине, что свидетельствует об однородном источнике серы в период

рудообразования. Более положительные значения $\delta^{34}\text{S}$ (+6,9 +7,1 ‰) ранних (дорудных) сульфидов указывают на активное заимствование серы из вмещающих пород и возможное поступление ее из глубинных источников. Отличие значений $\delta^{34}\text{S}$ ранних и поздних сульфидов связано с процессами смешения в различных соотношениях серы эндогенного и экзогенного генезиса.

Изотопный состав серы сульфидов в рудах месторождения Чертovo Корыто демонстрирует относительно узкий диапазон $\delta^{34}\text{S}$, что характерно для золоторудных месторождений Бодайбинского района. Большой разброс значений свойственен сере сульфидов из нерудных интервалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буряк В.А. Метаморфогенно-гидротермальный тип промышленного золотого оруденения. – М.: Наука, 1975. – 45 с.
2. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
3. Буряк В.А., Хмелевская Н.М. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). – Владивосток: Дальнаука, 1997. – 156 с.
4. Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits / M.A. Yudovskaya, V.V. Distler, V.Yu. Prokofiev, N.N. Akinfiev // *Geoscience Frontiers*. – 2016. – V. 7 (3). – P. 453–481.
5. Минералого-геохимические свидетельства полистадийности формирования месторождения Чертovo Корыто / Ю.И. Тарасова, О.Т. Соцкая, С.Ю. Скузоватов, В.А. Ванин, З.И. Куликова, А.Е. Будяк // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2016. – Т. 7. – № 4. – С. 663–677.
6. Шер С.Д. Металлогения золота. – М.: Недра, 1974. – 256 с.
7. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района / И.К. Рундквист, В.А. Бобров, Т.Н. Смирнова, М.Ю. Смирнов, М.Ю. Данилова, А.А. Ашеулов // *Геология рудных месторождений*. – 1992. – Т. 34. – № 6. – С. 3–15.

8. Geological and isotopic constraints on ore genesis, Huangjindong gold deposit, Jiangnan Orogen, southern China / Liang Zhang, Li-Qiang Yang, D.I. Groves, Yu Liu, Si-Chen Sun, Peng Qi, Sheng-Gang Wud, Jin-Song Peng // *Ore Geology Reviews*. – 2018. – V. 99 – P. 264–281.
9. Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия) / В.В. Дистлер, Г.Л. Митрофанов, В.К. Немеров, В.А. Коваленкер, А.В. Мохов, Л.К. Семейкина, М.А. Юдовская // *Геология рудных месторождений*. – 1996. – Т. 38. – № 6. – С. 467–484.
10. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Г. Кражев, Ю.В. Щегольков, Э.И. Алышева, С.Е. Борисовский // *Геология рудных месторождений*. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–46.
11. Кучеренко И.В. Пространственно-временные и петрохимические критерии связи образования золотого оруденения с глубинным магматизмом // *Известия АН СССР*. – 1990. – № 10. – С. 78–91.
12. Состав метасоматических минералов золоторудного месторождения Сухой Лог как критерий его генетической связи с базит-гипербазитовым магматизмом / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Е. Борисовский, Э.И. Алышева // *Доклады РАН*. – 2005. – Т. 405. – № 5. – С. 661–665.

13. Геодинамические условия формирования золоторудных месторождений Бодайбинского неопротерозойского прогиба / М.И. Кузьмин, В.В. Ярмолюк, А.М. Спиридонов, В.К. Немецков, А.И. Иванов, Г.Л. Митрофанов // Доклады РАН. – 2006. – Т. 407. – № 6. – С. 793–797.
14. Наталкинское золоторудное месторождение мирового класса: распределение РЗЭ, флюидные включения, стабильные изотопы кислорода и условия формирования руд (Северо-Восток России) / Н.А. Горячев, О.В. Викентьева, Н.С. Бортников, В.Ю. Прокофьев, В.А. Алпатов, В.В. Голуб // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50. – № 5. – С. 414–444.
15. Спиридонов А.М., Зорина Л.Д. Геолого-генетические модели золоторудных месторождений Забайкальской части Монголо-Охотского складчатого пояса // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 11. – С. 1158–1169.
16. Ying Ma, Shao-Yong Jiang, Hua-Liang Li. Isotope geochemistry and genesis of the Liyuan gold deposit, Shanxi, North China // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 92. – P. 129–143.
17. Кряжев С.Г. Изотопно-геохимические и генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах // Отечественная геология. – 2017. – № 1. – С. 28–38.
18. In-situ sulfur isotope analysis of pyrite from the Pangjiahe gold deposit: Implications for variable sulfur sources in the north and south gold belt of the South Qinling orogeny / Jian Ma, Xinbiao Lü, A. Escolme, Song Li, Ningli Zhao, Xiaofeng Cao, Lejun Zhang, Fei Lu // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 98. – P. 38–61.
19. Multistage pyrite in the Getang sediment-hosted disseminated gold deposit, southwestern Guizhou Province, China: insights from textures and in situ chemical and sulfur isotopic analyses / Xinlu Hu, Yongjun Gong, Guoping Zeng, Zhenjie Zhang, Jian Wang, Shuzhen Yao // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 99. – P. 1–16.
20. Ore genesis of the Bake gold deposit, southeastern Guizhou province, China: constraints from mineralogy, in-situ trace element and sulfur isotope analysis of pyrite / An-Lu Liu, Man-Rong Jiang, Th. Ulrich, Jun Zhang, Xiao-Jun Zhang // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 102. – P. 740–756.
21. Sulfur isotope and metal variations in sulfides in the BIF-hosted orogenic Cuiabá gold deposit, Brazil: implications for the hydrothermal fluid evolution / C. Kresse, L.M. Lobato, S.G. Hagemann, R.C. Figueiredo e Silva // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 98. – P. 1–27.
22. Fluid inclusions, H-O-S-Pb isotopes and metallogenic implications of Triassic Hua'naote Ag-Pb-Zn deposit (Inner Mongolia, China) in the eastern Central Asian Orogenic Belt / G.-Y. Qu, K.-Y. Wang, H. Yang, Q.-F. Sun, J. Li, W.-Y. Cai, C.-K. Lai // Journal of Geochemical Exploration. – 2021. – V. 225. – Article № 106766.
23. Fluid inclusion and stable (H-O-C) isotope studies of the giant Shuangjianzishan epithermal Ag-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia, NE China / H. Zhang, D. Zhai, J. Liu, P. Li, K. Li, H. Sun // Ore Geology Reviews. – 2019. – V. 115. – Article № 103170.
24. In situ pyrite sulfur isotope and trace element analyses of the world-class Dachang gold deposit, northern Qinghai-Tibetan Plateau: implications for metallogenesis / W. Zhai, S.-Q. Zheng, L.-Y. Zhang, S.-Y. Han, W. Wang // Ore Geology Reviews. – 2021. – V. 138. – Article № 104347.
25. Gold speciation and transport in geological fluids: insights from experiments and physical-chemical modelling / G.S. Pokrovski, N.N. Akinfiev, A.Y. Borisova, A.V. Zotov, K. Kouzmanov // Geological Society. – London, Special Publications, 2014. – V. 402. – P. 9–70.
26. Золотоносный арсенопирит и условия его образования на золоторудных месторождениях Олимпиада и Ведуга (Енисейский край, Сибирь) / А.Д. Генкин, Ф.Е. Вагнер, Т.Л. Крылова, А.И. Цепин // Геология рудных месторождений. – 2002. – Т. 44. – № 1. – С. 59–76.
27. Новожилов Ю.И., Гаврилов А.М. Золото-сульфидные месторождения в углеродисто-терригенных толщах. – М.: ЦНИГРИ, 1999. – 175 с.
28. Involvement of anomalously As-Au-rich fluids in the mineralization of the Heilan'gou gold deposit, Jiaodong, China: evidence from trace element mapping and in-situ sulfur isotope composition / Kai Feng, Hong-Rui Fan, Fang-Fang Hua, Kui-Feng Yang, Xuan Liu, Yi-Ning Shangguane, Ya-Chun Cai, Peng Jiang // Journal of Asian Earth Sciences. – 2018. – V. 160. – P. 304–321.
29. Золотоносность арсенопирита золото-сульфидных месторождений Восточного Казахстана / К.Р. Ковалев, Ю.А. Калинин, Е.А. Наумов, М.К. Колесникова, В.Н. Королюк // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 2. – С. 225–242.
30. Geological characteristics, modes of occurrence of gold and genesis of San' guanmiao gold deposit, Shangnan, Shaanxi Province / C. Wang, R. Wang, Y. Liu, Y. Xue, X. Hu, L. Niu // Mineral Deposits. – 2021. – V. 40 (3). – P. 491–508.
31. Temperature-controlled ore evolution in orogenic gold systems related to synchronous granitic magmatism: an example from the iron Quadrangle Province, Brazil / W. Fabricio-Silva, H.E. Frimmel, M.E. Shutesky, C.A. Rosière, A.J. Massucatto // Economic Geology. – 2021. – V. 116 (4). – P. 937–962.
32. Вагина (Синкина) Е.А. Минеральные комплексы руд и генезис золоторудного месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 63–69.
33. Структурнодинамическая модель золоторудных месторождений, образованных в несланцевом и черносланцевом субстрате. Ч. 2. Месторождение Чертово Корыто (Патомское нагорье) / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 1. – С. 23–38.
34. Иванов А.И., Лившиц В.И., Первалов О.В. Докембрий Патомского нагорья. – М.: Недра, 1995. – 352 с.
35. Гаврилов Р.Ю. Аномальное геохимическое поле золоторудного месторождения Чертово Корыто (Ленский рудный район) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 7. – С. 7–16.
36. Reflectivity and microhardness of sulfide minerals as genetic information source (case study: Pyrite and arsenopyrite) / E.A. Sinkina, M.V. Korovkin, O.V. Savinova, A.A. Makarova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 33. DOI: 10.1088/1755-1315/33/1/012053.
37. Sinkina E.A., Savinova O.V., Nepryakhina O.B. Geology, mineralogy and fluid inclusion studies of the Chertovo Koryto deposit, North Transbaikal, Russia // Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining: 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2016. – Albena, Bulgaria, 30 June 2016 – 6 July 2016. – Code 124231.

Поступила 29.12.2021 г.

Информация об авторах

Синкина Е.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Гаврилов Р.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 553.411:546.22

ISOTOPIC CHARACTERIZATION OF ARSENOPYRITE SULFUR FROM THE CENTRAL PART OF THE CHERTOVO KORYTO DEPOSIT (PATOM UPLAND)

Ekaterina A. Sinkina¹,
vea@tpu.ru

Roman Yu. Gavrilov¹,
GavrilovRY@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. The Chertovo Koryto is located within the Lena gold-bearing province, in which large reserves of gold deposits are concentrated (Sukhoi Log, Verninskoe, Vysochayshee, Ozherele and other). A lot of time was devoted to the study of this province, which was reflected in a huge number of publications. Despite this, there is no single idea about the origin of the gold deposits formed in the black shale deposits of the Bodayba trough. The question of the source of the useful component and the determination of the mechanism of its transportation, redistribution and concentration remains debatable. In this regard, it becomes relevant to study the isotopic ratios of sulfur sulfides to determine a possible source of the noble metal. In the Chertovo Koryto deposit, the sulfur isotope ratios of sulfides have been studied in limited quantities. They do not reflect changes in $\delta^{34}\text{S}$ at depth and along the strike of the ore deposit. Therefore, this object is interesting for research in the field of isotope geology.

The aim of the work is to identify possible sources of ore matter based on the results of isotopic studies of sulfur of the main mineral of ores – arsenopyrite.

The object of the study is arsenopyrite from the central part of the ore deposit.

Methods: mass spectrometric measurements using a gas mass spectrometer.

Results. Studies have shown the constancy of the isotopic composition of arsenopyrite sulfur ($-3.8...+4.3\%$) in depth, which indicates a homogeneous source of sulfur during ore formation. Values close to the meteorite standard indicate an endogenous source of ore-forming fluids. The data obtained are consistent with the isotopic composition of sulfur of sulfides of different origin gold deposits formed in shale and other substrates.

Key words:

Isotopes, sulfur, sulfides, arsenopyrite, gold deposit, black shales.

REFERENCES

- Buryak V.A. *Metamorfogenno-gidrotermalny tip promyshlennogo zolotogo orudneniya* [Metamorphogenic-hydrothermal type of industrial gold mineralization]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 45 p.
- Buryak V.A. *Metamorfizm i rudoobrazovanie* [Metamorphism and ore formation]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p.
- Buryak V.A., Khmelevskaya N.M. *Sukhoi Log – odno iz krupnykh zolotorudnykh mestorozhdeniy mira (genezis, zakonomenosti razmeshcheniya orudneniya, kriterii prognozirovaniya)* [Sukhoi Log is one of the largest gold deposits in the world (genesis, patterns of mineralization placement, forecasting criteria)]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1997. 156 p.
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akiniev N.N. Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*, 2016, vol. 7 (3), pp. 453–481.
- Tarasova Yu. I., Sotskaya O.T., Skuzovatov S.Yu., Vanin V.A., Kulikova Z.I., Budyak A.E. Mineralogical and geochemical evidence for multi-stage formation of the Chertovo Koryto deposits. *Geodynamics and Tectonophysics*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 663–677. In Rus.
- Sher S.D. *Metallogeniya zolota* [Metallogeny of gold]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 256 p.
- Rundkvist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N., Smirnov M.Yu., Danilova M.Yu., Ashcheulov A.A. Etapy formirovaniya Bodaybinskogo zolotorudnogo rayona [Stages of formation of the Bodayba gold mining district]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1992, vol. 34, no. 6, pp. 3–15.
- Liang Zhang, Li-Qiang Yang, Groves D.I., Yu Liu, Si-Chen Sun, Peng Qi, Sheng-Gang Wud, Jin-Song Peng. Geological and isotopic constraints on ore genesis, Huangjindong gold deposit, Jiangnan Orogen, southern China. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 99, pp. 264–281.
- Distler V.V., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K., Kovalenker V.A., Mokhov A.V., Semeykina L.K., Yudovskaya M.A. Formy nakhozhdeniya metallov platinovoy gruppy i ikh genezis v zolotorudnoy mestorozhdenii Suhoy Log (Rossiya) [Forms of finding platinum group metals and their genesis in the Sukhoi Log gold deposit (Russia)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1996, vol. 38, no. 6, pp. 467–484.
- Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shchegolov Yu.V., Alysheva E.I., Borisovskiy S.E. Okolorudny metasomatizm terrigenykh uglerodistykh porod v Lenskom zolotorudnom rayone [Near-ore metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore region]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–46.
- Kucherenko I.V. Prostranstvenno-vremennyye i petrokhimicheskiye kriterii svyazi obrazovaniya zolotogo orudneniya s glubinnym magmatizmom [Spatiotemporal and petrochemical criteria for relation of gold mineralization formation to deep magmatism]. *Izvestiya AN SSSR*, 1990, no. 10, pp. 78–91.
- Rusinov V.L., Rusinova O.V., Borisovskiy S.E., Alysheva E.I. Sostav metasomaticheskikh mineralov zolotorudnogo mestorozhdeniya Sukhoi Log kak kriteriy ego geneticheskoy svyazi s bazitgiperbazitovym magmatizmom [The composition of metasomatic minerals of the Sukhoi Log gold deposit as a criterion of its genetic relationship with basite-hyperbasite magmatism]. *Doklady RAN*, 2005, vol. 405, no. 5, pp. 661–665.
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Spiridonov A.M., Nemerov V.K., Ivanov A.I., Mitrofanov G.L. Geodinamicheskiye usloviya formirovaniya zolotorudnykh mestorozhdeniy Bodaybinskogo neoproterozoyskogo progiba [Geodynamic conditions for the formation of gold deposits of the Bodayba Neoproterozoic trough]. *Doklady RAN*, 2006, vol. 407, no. 6, pp. 793–797.
- Goryachev N.A., Vikenteva O.V., Bortnikov N.S., Prokofev V.Yu., Alpatov V.A., Golub V.V. Natalkinskoe zolotorudnoye mestorozhdenie mirovogo klassa: raspredelenie RZE, flyuidnye vklucheniya, stabilnyye izotopy kisloroda i usloviya formirovaniya rud (Severo-Vostok Rossii) [World-class Natalkinskoe gold deposit: REE distribution, fluid inclusions, stable oxygen isotopes and ore formation conditions (North-East of Russia)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2008, vol. 50, no. 5, pp. 414–444.

15. Spiridonov A.M., Zorina L.D. Geologo-genetic models of gold deposits in the Transbaikalian area of the Mongolo-Okhotsk fold belt. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 11, pp. 1158–1169. In Rus.
16. Ying Ma, Shao-Yong Jiang, Hua-Liang Li. Isotope geochemistry and genesis of the Liyuan gold deposit, Shanxi, North China. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 92, pp. 129–143.
17. Kryazhev S.G. Isotope-geochemical and genetic models of gold deposits in carbonaceous terrigenous strata. *Domestic geology*, 2017, vol. 92, pp. 28–38. In Rus.
18. Jian Ma, Xinbiao Lü, Escolme A., Song Li, Ningli Zhao, Xiaofeng Cao, Lejun Zhang, Fei Lu. In-situ sulfur isotope analysis of pyrite from the Pangjiahe gold deposit: Implications for variable sulfur sources in the north and south gold belt of the South Qinling orogeny. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 98, pp. 38–61.
19. Xinlu Hu, Yongjun Gong, Guoping Zeng, Zhenjie Zhang, Jian Wang, Shuzhen Yao. Multistage pyrite in the Getang sediment-hosted disseminated gold deposit, southwestern Guizhou Province, China: Insights from textures and in situ chemical and sulfur isotopic analyses. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 99, pp. 1–16.
20. An-Lu Liu, Man-Rong Jiang, Ulrich Th., Jun Zhang, Xiao-Jun Zhang. Ore genesis of the Bake gold deposit, southeastern Guizhou province, China: Constraints from mineralogy, in-situ trace element and sulfur isotope analysis of pyrite. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 102, pp. 740–756.
21. Kresse C., Lobato L.M., Hagemann S.G., Figueiredo e Silva R.C. Sulfur isotope and metal variations in sulfides in the BIF-hosted orogenic Cuiabá gold deposit, Brazil: implications for the hydrothermal fluid evolution. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 98, pp. 1–27.
22. Qu G.-Y., Wang K.-Y., Yang H., Sun Q.-F., Li J., Cai W.-Y., Lai C.-K. Fluid inclusions, H-O-S-Pb isotopes and metallogenic implications of Triassic Hua'nate Ag-Pb-Zn deposit (Inner Mongolia, China) in the eastern Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Geochemical Exploration*, 2021, vol. 225, article no. 106766.
23. Zhang H., Zhai D., Liu J., Li P., Li K., Sun H. Fluid inclusion and stable (H-O-C) isotope studies of the giant Shuangjianzhan epithermal Ag-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia, NE China. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 115, article no. 103170.
24. Zhai W., Zheng S.-Q., Zhang L.-Y., Han S.-Y., Wang W. In situ pyrite sulfur isotope and trace element analyses of the world-class Dachang gold deposit, northern Qinghai-Tibetan Plateau: implications for metallogenesis. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 138, article no. 104347.
25. Pokrovski G.S., Akiniev N.N., Borisova A.Y., Zotov A.V., Kouzmanov K. Gold speciation and transport in geological fluids: insights from experiments and physical-chemical modelling. *Geological Society*. London, Special Publications, 2014. Vol. 402, pp. 9–70.
26. Genkin A.D., Vagner F.E., Krylova T.L., Tsepin A.I. Zolotonosny arsenopirit i usloviya ego obrazovaniya na zolotorudnykh mestorozhdeniyakh Olimpiada i Veduga (Eniseyskiy kryazh, Sibir) [Gold-bearing arsenopyrite and conditions of its formation at the Olimpiada and Veduga gold deposits (Yenisei Ridge, Siberia)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2002, vol. 44, no. 1, pp. 59–76.
27. Novozhilov Yu.I., Gavrilov A.M. *Zoloto-sulfidnye mestorozhdeniya v uglerodisto-terrigennykh tolshchakh* [Gold-sulfide deposits in carbon-terrigenous strata]. Moscow, CNIGRI Publ., 1999. 175 p.
28. Kai Feng, Hong-Rui Fan, Fang-Fang Hua, Kui-Feng Yang, Xuan Liu, Yi-Ning Shangguane, Ya-Chun Cai, Peng Jiang. Involvement of anomalously As-Au-rich fluids in the mineralization of the Heilan'gou gold deposit, Jiaodong, China: evidence from trace element mapping and in-situ sulfur isotope composition. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, vol. 160, pp. 304–321.
29. Kovalev K.R., Kalinin Yu.A., Naumov E.A., Kolesnikova M.K., Korolyuk V.N. Gold-bearing arsenopyrite in Kazakhstan gold-sulfide deposits. *Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no 2, pp. 225–242. In Rus.
30. Wang C., Wang R., Liu Y., Xue Y., Hu X., Niu L. Geological characteristics, modes of occurrence of gold and genesis of San'guanmiao gold deposit, Shangnan, Shaanxi Province. *Mineral Deposits*, 2021, vol. 40 (3), pp. 491–508.
31. Fabricio-Silva W., Frimmel H.E., Shutesky M.E., Rosière C.A., Massucatto A.J. Temperature-controlled ore evolution in orogenic gold systems related to synchronous granitic magmatism: an example from the iron Quadrangle Province, Brazil. *Economic Geology*, 2021, vol. 116 (4), pp. 937–962.
32. Vagina (Sinkina) E.A. Mineral complexes of ores and the genesis of the Chertovo Koryto gold deposit (Patom upland). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 63–69. In Rus.
33. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Structural and dynamic model of gold ore deposits formed in non-shale and black shale substrate. P. 2. Chertovo Koryto deposit (Patom upland)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 1, pp. 23–38. In Rus.
34. Ivanov A.I., Livshits V.I., Perevalov O.V. *Dokembriy Patomskogo nagorya* [Precambrian of the Patom Upland]. Moscow, Nedra Publ., 1995. 352 p.
35. Gavrilov R.Y. Anomalous geochemical field of the Chertovo Koryto gold deposit (Lensky ore district). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 7, pp. 7–16. In Rus.
36. Sinkina E.A., Korovkin M.V., Savinova O.V., Makarova A.A. Reflectivity and microhardness of sulfide minerals as genetic information source (case study: Pyrite and arsenopyrite). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33. DOI: 10.1088/1755-1315/33/1/012053.
37. Sinkina E.A., Savinova O.V., Nepryakhina O.B. Geology, mineralogy and fluid inclusion studies of the Chertovo Koryto deposit, North Transbaikal, Russia. *Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2016*. Albena, Bulgaria, 30 June 2016 – 6 July 2016. Code 124231.

Received: 29 December 2021.

Information about the authors

Ekaterina A. Sinkina, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Roman Yu. Gavrilov, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.