*ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2022, том 502, № 1, с. 3–9*

## ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

*УДК 550.4:553.2*

# ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ СЕРЫ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗОЛОТОНОСНЫХ СУЛЬФИДОВ ОРОГЕННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БАДРАН, ЯНО-КОЛЫМСКИЙ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЙ ПОЯС (СЕВЕРО-ВОСТОК АЗИИ)

**© 2022 г. В. Ю. Фридовский[1,*], Л. И. Полуфунтикова[2,1], М. В. Кудрин[1], член-корреспондент РАН Н. А. Горячев[3]**

Поступило 20.09.2021 г.
После доработки 04.10.2021 г.
Принято к публикации 05.10.2021 г.

Изотопный состав серы изучен локальным методом в пирите и арсенопирите, отобранных на различных гипсометрических уровнях (от 587 до 970 м) из кварц-серицит-карбонат-пирит-арсенопиритовых метасоматитов минерализованной зоны Надвиговая орогенного золоторудного месторождения Бадран. Определены геохимические характеристики сульфидов. Узкий интервал изменения $\delta^{34}S$ пирита (от –0.7 до +1.9‰) и арсенопирита (от –1.1 до +0.3‰) свидетельствует о формировании сульфидов в ходе единого эволюционирующего гидротермального события. Выделено два типа пирита: изотопно и геохимически неоднородный с ростом величин $\delta^{34}S$ от центра к периферии зерен, синхронным уменьшением концентраций As, и гомогенный. Пирит и арсенопирит содержат структурно связанное золото, арсенопирит с околонулевыми величинами $\delta^{34}S$ более золотоносный. Оценка связи изотопного состава серы пирита и арсенопирита с глубиной показала наличие нелинейной вертикальной изотопно-геохимической зональности, обусловленной неоднородностью гидротермально-метасоматических изменений минерализованной зоны Надвиговая месторождения Бадран.

*Ключевые слова:* пирит, арсенопирит, локальный изотопный состав серы, изотопно-геохимическая неоднородность, орогенное месторождение Au Бадран, северо-восток Азии

**DOI:** 10.31857/S2686739722010030

## ВВЕДЕНИЕ

Вдоль северо-восточной окраины Сибирского кратона на границе с Колымо-Омолонским супертеррейном расположены многочисленные орогенные золоторудные месторождения позднеюрско-ранненеокомового Яно-Колымского металлогенического пояса (ЯКМП). Самородное золото здесь встречается в кварцевых жилах, а “невидимое” связано с сульфидами (пирит, арсенопирит) – как в жилах, так и в проксимальных метасоматитах рудных зон. Ранее изотопный анализ серы сульфидов из рудных тел, вмещающих пород и метатерригенных толщ месторождений ЯКМП проводился только из микронавесок. Он показал чрезвычайно изменчивый диапазон значений $\delta^{34}S$ от –23.1 до +5.7‰ ([1, 2] и ссылки в них). В зависимости от возраста вмещающих пород, как на это указывают Р. Гольдфарб и Д. Гровс [3], составы $\delta^{34}S$ сульфидов для орогенных золоторудных месторождений меняются от –20 до +25‰. Новые данные и закономерности по вариациям $\delta^{34}S$ могут быть получены с применением локального изучения изотопного состава S сульфидов [4, 5]. Совместный анализ изотопного состава с геохимическими характеристиками золотоносных сульфидов позволяет оценить/выявить латеральную и вертикальную изотопно-геохимическую зональность, возможные источники серы – комплексообразующего агента для золота, а следовательно, специфику рудообразующих процессов. В сообщении приводятся результаты анализа изотопного состав серы и геохимических характеристик пирита и арсенопирита месторождения Бадран, с целью выяснения наличия неоднородностей состава отдельных зерен, изменения вари-

*[1] Институт геологии алмаза и благородных металлов, Сибирское отделение Российской академии наук, Якутск, Россия*
*[2] Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия*
*[3] Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило, Магадан, Россия*
**E-mail: fridovsky@diamond.ysn.ru*

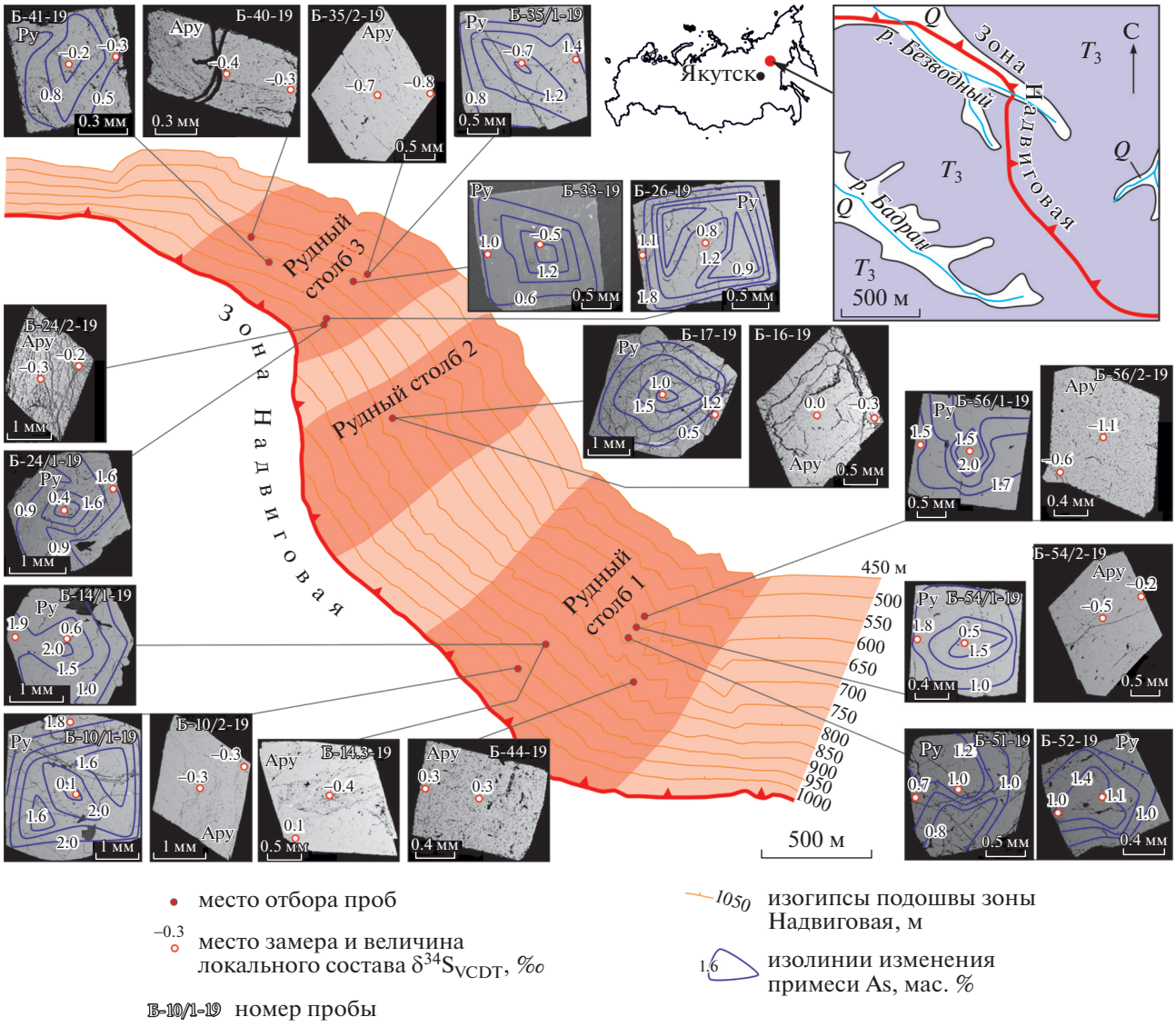


**Рис. 1.** Изогипсы подошвы зоны Надвиговая месторождения Бадран и положение проб с данными локального изотопного состава серы сульфидов и изменения примеси As, мас. % в пирите. На врезке: схема геологического строения месторождения Бадран. Q – четвертичные аллювиальные отложения, $T_3$ – позднетриасовые терригенные отложения.

аций величин $\delta^{34}S$ пиритов и арсенопиритов с глубиной и с содержанием в них золота, что важно для уточнения генетических аспектов формирования орогенных золоторудных месторождений ЯКМП.

## ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Месторождение Бадран (рис. 1), разрабатываемое с 1984 г., относится к типичным орогенным месторождениям золота с жильно-прожилковой кварцевой и вкрапленной сульфидной минерализацией, контролируемым разломами [6]. Месторождение локализуется в минерализованной зоне Надвиговая, мощностью от первых десятков сантиметров до 30 м, прослеженной поверхностными и подземными горными выработками по простиранию на расстояние более 5 км, по падению – более 1.2 км.

Отмеченное позволило изучить на различных глубинных уровнях изотопный состав серы и геохимические характеристики сульфидов из рудных столбов в кварц-серицит-карбонат-пирит-арсенопиритовых метасоматитах минерализованной зоны Надвиговая. Содержание золота в метасоматитах достигает первых грамм на тонну, а в рудных столбах с кварцевыми жилами мощностью до 3.5 м, содержание золота достигает нескольких кг на тонну [6]. Вмещающие верхнетриасовые (кар-

ний и норий) песчаники и алевролиты метаморфизованы до уровня начальных ступеней зеленосланцевой фации.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изотопный анализ серы выполнен в лаборатории стабильных изотопов центра коллективного пользования Дальневосточного геологического института РАН (ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток). Подготовка образцов для масс-спектрометрического изотопного анализа серы проведена локальным лазерным методом с использованием фемтосекундного комплекса лазерной абляции NWR Femto [7, 8]. Соотношение изотопов серы измеряли на массах 127 ($^{32}SF^{5+}$) и 129 ($^{34}SF^{5+}$) на масс-спектрометре MAT-253 (“Thermo Fisher Scientific”, Germany). Измерения проведены относительно лабораторного рабочего стандарта, калиброванного по международным стандартам IAEA-S-1, IAEA-S-2 и IAEA-S-3.

Результаты измерений $\delta^{34}S$ приведены относительно международного стандарта VCDT и выражены в промилле (‰). Точность анализа величин $\delta^{34}S$ составляла ±0.20‰ (2σ). Химический состав пирита и арсенопирита определен в отделе физико-химических методов анализа Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (ИГАБМ СО РАН, г. Якутск) по профилям по стандартной методике рентгеноспектральным методом на микроанализаторе Camebax-Micro (“Cameca”, Courbevoie, France). Условия съемки: ускоряющее напряжение: 20 кВ, ток: 25 нА, t измерений – 10 с, аналитические линии: Fekα, Cokα, Nikα, Cukα, AuMα, Skα, SbLα, AsLα, PbMα. Стандарты: $FeS_2$ – Fe, S; FeAsS – As; FeNiCo – Co, Ni; Au 850‰ – Au; $CuSbS_2$ – Sb; PbS – Pb. Содержание Au более 2 г/т определено в ИГАБМ СО РАН на атомно-эмиссионном спектрометре Agilent 4200 MP-AES с СВЧ-насыщаемой плазмой.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изотопный состав серы и составы сульфидов изучены для 12 зерен пирита и 9 зерен арсенопирита, отобранных на различных глубинах (от 587 до 916 м) (см. рис. 1). Арсенопириты представлены короткопризматическими кристаллами, для пиритов характерны кубические, реже пентагондодекаэдрические формы. Размер кристаллов от 1–1.5 до 2–3 мм. Результаты изотопных исследований приводятся на рис. 1 и в табл. 1.

Согласно полученным нами данным, изотопный состав серы пирита и арсенопирита месторождения Бадран характеризуется узким диапазоном значений от –1.1 до +1.9‰ и средней величиной +0.4‰ (табл. 1) и близок к значениям $\delta^{34}S$ для сульфидов из золото-кварцевых жил орогенных месторождений Адыча-Тарынской металлогенической зоны ЯКМП: арсенопирит – от –2.1 до +2.4‰, пирит – от –6.6 до +5.4‰ [2, 9].

Схожий изотопный состав серы арсенопирита и пирита золото-кварцевых жил месторождений Адыча-Тарынской металлогенической зоны ЯКМП и вкрапленной минерализации из рудных метасоматитов месторождения Бадран свидетельствует об их формировании в ходе единого изотопно равновесного гидротермального события. Образование ранней прожилково-вкрапленной малосульфидной золото-кварцевой минерализации произошло в условиях фазовой сепарации рудообразующих флюидов [10]. Близкие к нулю значения $\delta^{34}S$ характерны для ювенильных/магматических источников [3, 11–13].

Наибольшие вариации величины $\delta^{34}S$ установлены в пиритах (от –0.7 до +1.9‰, среднее +0.9‰, коэффициент вариации CV = 84%). Изотопный состав серы пирита месторождения Бадран несколько тяжелее арсенопирита и характеризуется меньшим интервалом вариаций, чем $\delta^{34}S$ в пирите из кварцевых жил и метасоматитов (среднее +4.0‰) Верхне-Колымского золотоносного района [1]. По вариациям $\delta^{34}S$ в пирите выделено два типа кристаллов. Первый тип – изотопно-неоднородный с утяжелением серы от центра к периферии зерен (среднее в центре зерен 0.2‰, среднее на периферии зерен 1.5‰) (пробы Б-10/1–19, Б-14/1–19, Б-24/1–19, Б-26-19, Б-33-19, Б-35/1–19, Б-54/1–19). Разница величины $\delta^{34}S$ составляет до 2.1‰ (проба Б-35/1–19). Подобная зональность отмечена ранее на месторождении Сухой Лог, где она связывается как с первичной неоднородностью, так и с процессом перекристаллизации пирита во время формирования золотой минерализации [14]. Она может быть обусловлена также вариациями $fO_2$–pH условий рудообразующих процессов [15]. Второй тип с учетом ошибки анализа – изотопно-однородный пирит, в котором значения $\delta^{34}S$ в центре кристаллов незначительно (0.0–0.3‰) отличаются от периферии (пробы Б-17-19, Б-41–19, Б-51–19, Б-52-19, Б-56/1–19).

Пириты имеют нестехиометрический состав (более 60% анализов Fe/S + As ≠ 0.5), недостаток S (65% анализов S/Fe < 2.0 при $C_s$ = 50.08–53.22 мас. %) и элементы-примеси As, Co, Ni, Cu, Sb и Pb. Наиболее значимой является примесь As, она составляет 0.18–2.56 мас. % и часто формирует в кристаллах химическую зональность и блочность. Концентрации As более 2.0 мас. % фиксируются как в центральной части зерен (рис. 1, табл. 1, проба Б 14/1–19), так и по периферии (рис. 1, табл. 1, проба Б 10/1–19). Большинство зерен изотопно-неоднородного пирита характеризуются уменьшением концентраций As и утя-

**Таблица 1.** Изотопный состав серы и содержания Au (г/т) и As (мас. %) в пиритах и арсенопиритах из метасоматитов месторождения Бадран

| № пп | № пробы | Характеристика породы | Место отбора, абсолютная отметка, м | Положение точки анализа в зерне | $\delta^{34}S_{VCDT}$ (‰) | $C_{Au}$, г/т | $C_{As}$, мас. % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | | | Пирит | | | | |
| 1 | Б-10/1-19 | Катаклазит с кварцевыми прожилками и вкрапленностью пирита | Рудный столб 1, 916 | Центр | 0.1 | 51.03 | 2.560 |
| | | | | Периферия | 1.8 | | 2.070 |
| 2 | Б-54/1-19 | Метасоматит по песчанику с вкрапленностью пирита | Рудный столб 1, 852 | Центр | 0.5 | 26.22 | 1.990 |
| | | | | Периферия | 1.8 | | 0.924 |
| 3 | Б-14/1-19 | Катаклазит с кварцевыми прожилками и вкрапленностью пирита | Рудный столб 1, 840 | Центр | 0.6 | 47.25 | 2.170 |
| | | | | Периферия | 1.9 | | 0.996 |
| 4 | Б-24/1-19 | Метасоматит по алевролиту с кварцевыми прожилками и вкрапленностью пирита | Рудный столб 3, 748 | Центр | 0.4 | 36.86 | 1.810 |
| | | | | Периферия | 1.6 | | 0.376 |
| 5 | Б-17-19 | Метасоматит по алевролиту с вкрапленностью пирита | Рудный столб 2, 730 | Центр | 1.0 | 53.04 | 2.240 |
| | | | | Периферия | 1.2 | | 0.181 |
| 6 | Б-26-19 | Метасоматит по алевролиту с вкрапленностью пирита | Рудный столб 3 730 | Центр | 0.8 | 36.74 | 1.360 |
| | | | | Периферия | 1.1 | | 2.010 |
| 7 | Б-51-19 | Катаклазит с кварцевыми прожилками и вкрапленностью пирита | Рудный столб 1, 687 | Центр | 1.0 | 57.41 | 1.420 |
| | | | | Периферия | 0.7 | | 1.050 |
| 8 | Б-52-19 | Метасоматит по песчанику с вкрапленностью пирита | Рудный столб 1, 687 | Центр | 1.1 | 33.78 | 1.440 |
| | | | | Периферия | 1.0 | | 0.673 |
| 9 | Б-41-19 | Катаклазит с вкрапленностью пирита | Рудный столб 3, 663 | Центр | –0.2 | 13.7 | 1.120 |
| | | | | Периферия | –0.3 | | 0.266 |
| 10 | Б-56/1-19 | Метасоматит по песчанику с вкрапленностью пирита | Рудный столб 1, 627 | Центр | 1.5 | 45.36 | 2.190 |
| | | | | Периферия | 1.5 | | 1.600 |
| 11 | Б-33-19 | Катаклазит с вкрапленностью пирита | Рудный столб 3, 615 | Центр | –0.5 | 19.61 | 1.650 |
| | | | | Периферия | 1.0 | | 0.232 |
| 12 | Б-35/1-19 | Метасоматит по алевролиту с вкрапленностью пирита | Рудный столб 3, 587 | Центр | –0.7 | 155.45 | 1.390 |
| | | | | Периферия | 1.4 | | 0.685 |
| | | | Арсенопирит | | | | |
| 13 | Б-10/2-19 | Катаклазит с кварцевыми прожилками и вкрапленностью арсенопирита | Рудный столб 1, 916 | Центр | –0.3 | 150.73 | 45.760 |
| | | | | Периферия | –0.3 | | 45.460 |
| 14 | Б-54/2-19 | Метасоматит по песчанику с вкрапленностью арсенопирита | Рудный столб 1, 852 | Центр | –0.5 | 52.33 | 41.870 |
| | | | | Периферия | –0.2 | | 42.970 |
| 15 | Б-14/3-19 | Катаклазит с кварцевыми прожилками и вкрапленностью арсенопирита | Рудный столб 1, 840 | Центр | –0.4 | 168.45 | 41.200 |
| | | | | Периферия | 0.1 | | 44.840 |
| 16 | Б-44-19 | Метасоматит по песчанику с кварцевыми прожилками и вкрапленностью арсенопирита | Рудный столб 1, 749 | Центр | 0.3 | 62.37 | 42.880 |
| | | | | Периферия | 0.3 | | 42.680 |

**Таблица 1.** Окончание

| № пп | № пробы | Характеристика породы | Место отбора, абсолютная отметка, м | Положение точки анализа в зерне | $\delta^{34}S_{VCDT}$ (‰) | $C_{Au}$, г/т | $C_{As}$, мас. % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 17 | Б-24/2-19 | Метасоматит по алевролиту с кварцевыми прожилками и вкрапленностью арсенопирита | Рудный столб 3, 748 | Центр | –0.3 | 123.56 | 44.430 |
| | | | | Периферия | –0.2 | | 44.610 |
| 18 | Б-16-19 | Метасоматит по алевролиту с вкрапленностью арсенопирита | Рудный столб 2, 723 | Центр | 0.0 | 154.27 | 42.500 |
| | | | | Периферия | –0.3 | | 43.790 |
| 19 | Б-56/2-19 | Метасоматит по песчанику с вкрапленностью арсенопирита | Рудный столб 1, 627 | Центр | –1.1 | 56.94 | 43.310 |
| | | | | Периферия | –0.6 | | 42.290 |
| 20 | Б-40-19 | Метасоматит по песчанику с кварцевыми прожилками и вкрапленностью арсенопирита | Рудный столб 3, 609 | Центр | –0.4 | 133.01 | 42.880 |
| | | | | Периферия | –0.3 | | 41.680 |
| 21 | Б-35/2-19 | Метасоматит по алевролиту с вкрапленностью арсенопирита | Рудный столб 3, 587 | Центр | –0.7 | 34.81 | 42.560 |
| | | | | Периферия | –0.8 | | 42.360 |

желением $\delta^{34}S$ от центра к периферии (среднее в центре 1.6 мас. %, среднее на периферии зерен 1.2 мас. %) (пробы Б-14/1–19, Б-24/1–19, Б-26-19, Б-33–19, Б-35/1–19, Б-54/1–19). Для As не характерно проявление корреляционных связей с другими элементами-примесями, а с содержаниями S наблюдается значимая отрицательная корреляционная связь (r = –0.47), что указывает на процессы изоморфного замещения. Общая концентрация примеси Co, Ni, Cu, Sb и Pb не превышает 0.54%. Кобальт является постоянной примесью в пиритах и составляет 0.008–0.157 мас. %. Для него характерна сильная корреляционная связь с Ni (r = 0.61), превышение концентрации Co над Ni (Co/Ni = 1.1–31.0). Примесь Ni, Cu и Pb фиксируется в 30% анализов и характеризуется секторальным распределением в объеме кристалла. Примесь Sb (от 0.001 до 0.208 мас. %, среднее 0.040 мас. %) присутствует во всех проанализированных зернах, а изменения ее концентрации отличаются наибольшим коэффициентом вариаций (CV = 109.42%).

Величины $\delta^{34}S$ арсенопирита несколько ниже, чем пирита, и имеют весьма узкий диапазон вариаций от –1.1 до +0.3‰ (среднее –0.4‰, CV = 78%). Это согласуется с ранее полученными оценками $\delta^{34}S$ для арсенопирита из золото-кварцевых жил Адыча-Тарынской металлогенической зоны ЯКМП [2]. Для арсенопиритов также характерны нестехиометричность составов (Fe/S + As = = 0.497–0.479) и обогащенность серой (As/S = = 0.77–0.99). Суммарное содержание типоморфных элементов-примесей Co, Ni, Cu и Sb составляет 0.1–0.5 мас. %. Распределение концентраций элементов-примесей в кристаллах часто имеет зональный характер, так в центральной части наблюдаются повышенные содержания кобальта или сурьмы, при этом между этими элементами наблюдается значимая отрицательная корреляция (r = –0.39, на периферии до r = –0.47). Повышение концентрации Sb (более 0.15 мас. %) сопровождается уменьшением содержания As (r = –0.46). Как и в пиритах, для арсенопиритов характерна сильная корреляционная связь между Co и Ni (r = = 0.64) и преобладание концентраций Co (Co/Ni = = 1.09–15.0). Примесь Cu не превышает 0.04 мас. % и для нее не характерна упорядоченность распределения.

Оценка зависимости изотопного состава S пирита и арсенопирита от глубины показала наличие нелинейной вертикальной изотопно-геохимической зональности (рис. 2а). Так, $\delta^{34}S$ арсенопирита выше уровня 700–750 м имеет величину +0.3...–0.5‰, ниже – отмечается облегчение изотопного состава S до –1.1‰ (r = 0.74) (рис. 2а). Сходная тенденция характерна для $\delta^{34}S$ пирита из центра зерен (r = 0.5). Можно предположить связь изменения с глубиной $\delta^{34}S$ сульфидов с неоднородностью гидротермально-метасоматических изменений минерализованной зоны Надвиговая, как это показано на примере золоторудного месторождения Сухой Лог [14].

Пирит и арсенопирит из метасоматитов месторождения Бадран содержат золото (см. табл. 1). При близком диапазоне концентраций золота в пирите – от 13.7 до 155.45 г/т и в арсенопирите – от 34.81 до 168.45 г/т, его средние содержания выше в арсенопирите (109.26 г/т), чем в пирите (42.87 г/т) (табл. 1). Микровключений самородного золота $Au^0$ на электронном сканирующем микроскопе JEOL JSM-6480LV не обнаружено. Можно пред-

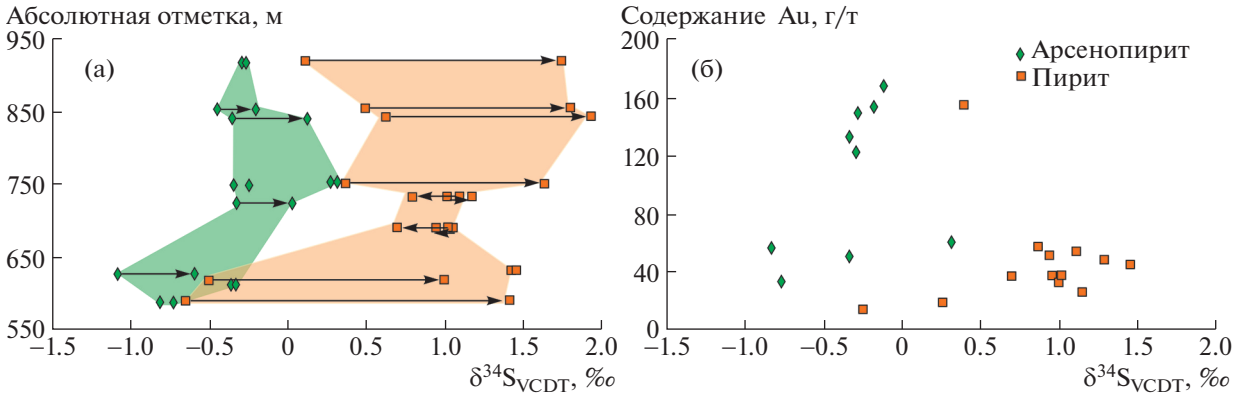


**Рис. 2.** Связь изотопного состава серы пиритов и арсенопиритов из руд месторождения Бадран с глубиной (а) и с содержанием в них золота (б). Показано: стрелкой – направление изменения изотопного состава S от центра к периферии зерна, цветом – области изменения изотопного состава S.

положить, что также как и на месторождении Хангалас [9] золото в сульфидах, в основном, "невидимое" структурно связанное $Au^{+}$. Из рис. 2б следует, что и пирит, и арсенопирит имеют низкое содержание Au во всем интервале изотопного состава серы. Однако образцы, характеризующиеся высоким содержанием золота (168.45 г/т), имеют узкий диапазон величин $\delta^{34}S$, близкий к 0 (от –0.5 до +0.5‰).

## ВЫВОДЫ

Гомогенный изотопный состав серы в локальных микропробах пирита и арсенопирита из рудных столбов месторождения Бадран указывает на их формирование в ходе единого эволюционирующего гидротермального события. Величины $\delta^{34}S$, близкие к нулю, соответствуют представлениям об участии глубинных мантийных флюидов в рудообразовании месторождения Бадран [16]. В рудах выявлены две разновидности пирита: изотопно и геохимически неоднородный с ростом $\delta^{34}S$ от центра к периферии зерен, синхронным уменьшением концентраций As, и гомогенный. Пирит и арсенопирит содержат концентрации структурно связанного золота, арсенопирит с околонулевыми величинами $\delta^{34}S$ более золотоносный. Оценка связи изотопного состава S пирита и арсенопирита с глубиной показала наличие нелинейной вертикальной изотопно-геохимической зональности, обусловленной неоднородностью гидротермально-метасоматических изменений минерализованной зоны Надвиговая месторождения Бадран.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет средств по плану НИР ИГАБМ СО РАН, СВКНИИ ДВО РАН и ИГХ СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тюкова Е.Э., Ворошин С.В.* Изотопный состав серы в сульфидах из руд и вмещающих пород Верхне-Колымского региона (Магаданская область) // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 1. С. 29–43.
2. *Гамянин Г.Н., Фридовский В.Ю., Викентьева О.В.* Благороднометалльная минерализация Адыча-Тарынской металлогенической зоны: геохимия стабильных изотопов, флюидный режим и условия рудообразования // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. №. 10. С. 1586–1605.
3. *Goldfarb R.J., Groves D.I.* Orogenic Gold: Common or Evolving Fluid and Metal Sources through Time // Lithos. 2015. № 233. P. 2–26.
4. *Guy B.M., Ono S., Gutzmer J., Lin Y., Beukes N.J.* Sulfur Sources of Sedimentary "buckshot" Pyrite in the Auriferous Conglomerates of the Mesoarchean Witwatersrand and Ventersdorp Supergroups, Kaapvaal Craton, South Africa // Mineralium Deposita. 2014. № 6. P. 751–775.
5. *Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Будяк А.Е., Тарасова Ю.И.* Опыт применения локального анализа изотопного состава серы сульфидов руд крупнейших месторождений Бодайбинского синклинория (Восточная Сибирь) // ДАН. 2019. Т. 484. №. 4. С. 460–463.
6. Золоторудные месторождения России // Константинов М. М. М.: Акварель, 2010. 349 с.
7. *Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Budnitskiy S.Y., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V., Levitskii V.I.* Precision Analysis of Multisulfur Isotopes in Sulfides by Femtosecond Laser Ablation GC-IRMS at High Spatial Resolution // Chemical Geology. 2018. V. 493. P. 316–326.
8. *Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V.* An Improved Femtosecond Laser-ablation Fluorination Method for Measurements of Sulfur Isotopic Anomalies ($\Delta^{33}S$ and $\Delta^{36}S$) in Sulfides with High Precision // Rapid Communications in Mass Spectrometry. 2019. V. 33.P. 1722–1729.
9. *Kudrin M.V., Fridovsky V.Yu., Polufuntikova LI., Kryuchkova L.Yu.* Disseminated Gold–Sulfide Mineralization in Metasomatites of the Khangalas Deposit, Yana–

Kolyma Metallogenic Belt (Northeast Russia): Analysis of the Texture, Geochemistry, and S Isotopic Composition of Pyrite and Arsenopyrite // Minerals. 2021. №. 4. P. 403.

10. *Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Викентьева О.В., Прокофьев В.Ю., Прокопьев А.В.* Золото-сурьмяные месторождения Сарылах и Сентачан (Саха-Якутия): пример совмещения мезотермальных золото-кварцевых и эпитермальных антимонитовых руд // Геология рудных месторождений. 2010. Т. 52. № 5. С. 381–417.
11. *Xue Y., Campbell I., Ireland T.R., Holden P., Armstrong R.* No Mass-independent Sulfur Isotope Fractionation in Auriferous Fluids Supports a Magmatic Origin for Archean Gold Deposits // Geology. 2013. № 7. P. 791–794.
12. *Кряжев С.Г.* Изотопно-геохимические и генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах // Отечественная геология. 2017. № 1. С. 28–38.
13. *Гамянин Г.Н., Бортников Н.С., Алпатов В.В.* Нежданинское золоторудное месторождение – уникальное месторождение Северо-Востока России. М.: ГЕОС, 2001. 230 с.
14. *Дубинина Е.О., Иконникова Т.А., Чугаев А.В.* Неоднородность изотопного состава серы пирита на месторождении Сухой Лог и определяющие ее факторы // ДАН. 2010. Т. 435. № 6. С. 786–790.
15. *Гриненко В.А., Гриненко Л.Н.* Геохимия изотопов серы. М.: Недра, 1974. 272 с.
16. *Оболенский А.А., Гущина Л.В., Анисимова Г.С., Серкебаева Е.С., Томиленко А.А., Гибшер Н.А.* Физико-химическое моделирование процессов минералообразования Бадранского золоторудного месторождения (Якутия) // Геология и геофизика. 2011. Т 52. № 3. С 373–392.

# SULFUR ISOTOPE COMPOSITION AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE GOLD-BEARING SULFIDES OF THE BADRAN OROGENIC DEPOSIT, YANA-KOLYMA METALLOGENIC BELT (NORTHEAST ASIA)

**V. Yu. Fridovsky[a, #], L. I. Polufuntikova[b,a], M. V. Kudrin[a], and Corresponding Member of the RAS N. A. Goryachev[c]**

[a] *Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*

[b] *Ammosov Northeastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation*

[c] *Shilo North-Eastern Integrated Research Institute, Magadan, Russian Federation*

[#] *E-mail: fridovsky@diamond.ysn.ru*

The sulfur isotope composition was studied by the local method for pyrite and arsenopyrite selected at various hypsometric levels (from 587 to 970 m) from quartz-sericite-carbonate-pyrite-arsenopyrite metasomatites of the Nadvigovaya mineralized zone of the Badran orogenic gold deposit. The geochemical characteristics of sulfides have been determined. The established narrow interval of changes of $\delta^{34}S$ of pyrite (from –0.7 to +1.9‰) and arsenopyrite (from –1.1 to +0.3‰) indicates that the elements were formed during a single evolving isotopic-equilibrium hydrothermal event. Two types of pyrite are identified: isotopically and geochemically heterogeneous with an increase in the values of $\delta^{34}S$ from the center to the edges of the grains, a synchronous decrease in As concentrations, and homogeneous. Pyrite and arsenopyrite contain structurally bound gold, arsenopyrite with about zero values of $\delta^{34}S$ is more gold-bearing. The assessment of the relationship of the isotopic composition of S pyrite and arsenopyrite with depth showed the presence of a nonlinear vertical isotope-geochemical zoning due to the heterogeneity of hydrothermal-metasomatic changes in the Nadvigovaya mineralized zone of the Badran deposit.

*Keywords:* pyrite, arsenopyrite, local isotopic composition of sulfur, isotopic-geochemical heterogeneity, Badran orogenic gold deposit, northeast Asia