

## ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 550.4:553.2

# ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ИЗОТОПНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВКРАПЛЕННОЙ СУЛЬФИДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ОРОГЕННЫХ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЯНО-КОЛЫМСКОГО МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОГО ПОЯСА (СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ)

© 2023 г. Член-корреспондент РАН В. Ю. Фридовский<sup>1,\*</sup>, Л. И. Полуфунтикова<sup>2,1</sup>, М. В. Кудрин<sup>1</sup>

Поступило 22.08.2022 г.

После доработки 08.09.2022 г.

Принято к публикации 09.09.2022 г.

Приводятся результаты исследования химического состава и изотопных характеристик серы вкрапленных пирита и арсенопирита из метасоматитов орогенных золоторудных месторождений Мало-Тарынское, Бадран, Хангалас, Вьюн и Шумный Яно-Колымского металлогенического пояса. Пирит и арсенопирит имеют нестехиометрический состав. Для арсенопирита характерно обогащение серой (As/S от 0.77 до 0.99), наличие примесей Sb, Co, Ni и Cu общей концентрацией не более 0.15 мас. %. Пирит содержит те же элементы (общая концентрация до 3.71%), реже Pb, обеднен S и обогащен As (до 3.16 мас. %). Отношение Ni/Co в пирите  $10.0 > Ni/Co > 0.1$  типично для гидротермального отрицательно заряженного пирита с высокой проводимостью (p-тип). Предполагается нахождение “невидимого” Au<sup>+</sup> во вкрапленных пирите и арсенопирите преимущественно в изоморфной структурно-связанной форме. Диапазон величин  $\delta^{34}S$  от –6.4 до +5.6‰ в сульфидах характерен для ювенильных/магматических источников серы изученных месторождений.

*Ключевые слова:* пирит, арсенопирит, химический состав, изотопные характеристики серы, орогенные Au месторождения, Яно-Колымский металлогенический пояс

DOI: 10.31857/S2686739722601697, EDN: GBDGYK

### ВВЕДЕНИЕ

На крупных орогенных золоторудных месторождениях (OGD) Яно-Колымского металлогенического пояса (ЯКМП) значительная, а нередко основная, часть золота присутствует в “невидимой” форме во вкрапленных пирите и арсенопирите проксимальных серицит-хлорит-карбонат-кварцевых метасоматитов [1–4]. Изучение изотопно-геохимических характеристик сульфидов из метасоматитов позволяют лучше понять эволюцию рудообразующих процессов и формирование Au-минерализации, что критически важно для переоценки сырьевого потенциала известных месторождений и подготовки программ поисков крупных месторождений в ЯКМП. Здесь мы представляем новые результаты исследования химического состава и изотопии S пирита и арсенопирита на примере титон-валанжинских OGD

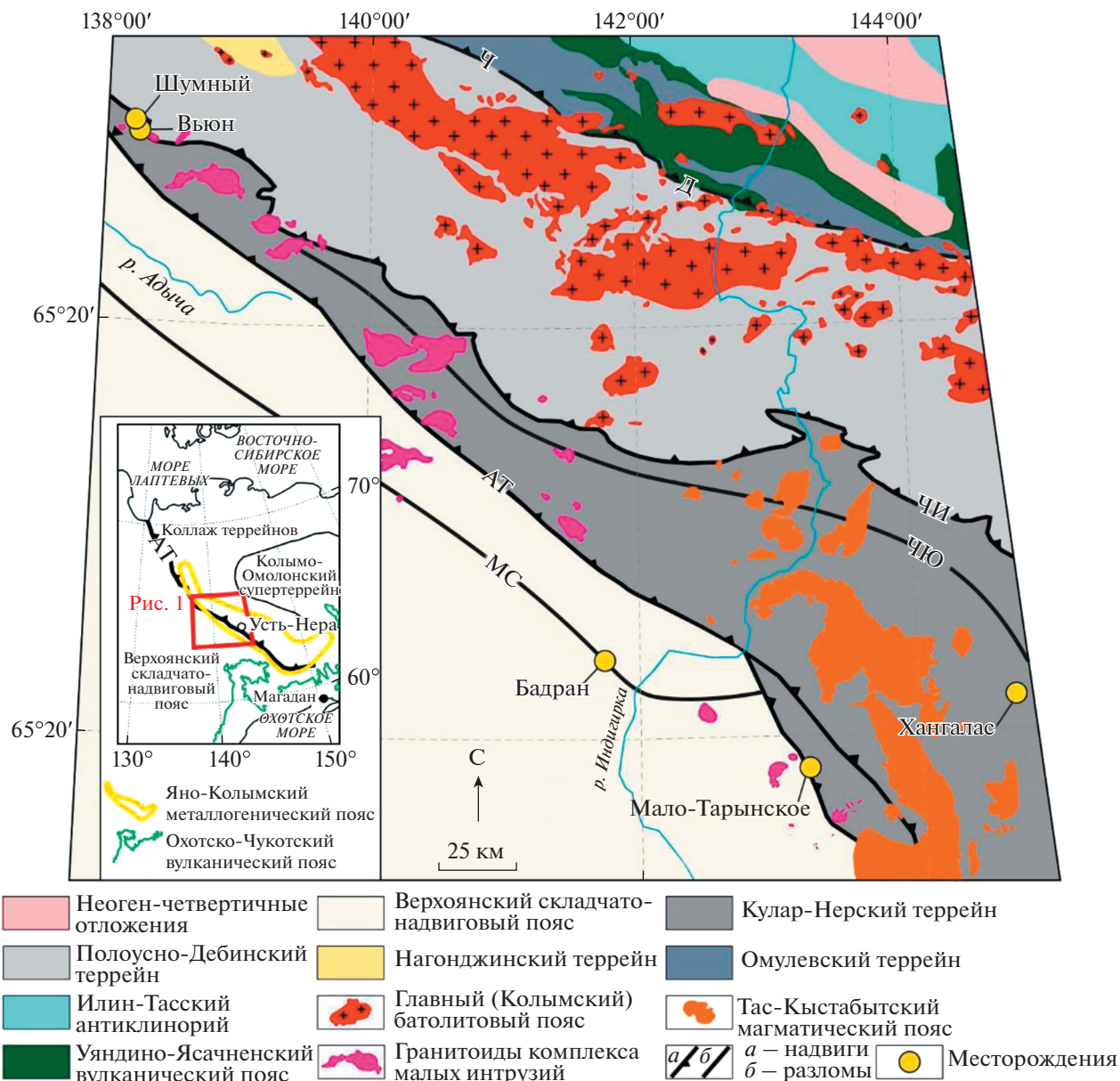
ЯКМП. Месторождения Мало-Тарынское, Бадран и Хангалас локализованы в верхнепермско-триасовых терригенных толщах, а Вьюн и Шумный – в позднеюрских дайках (151–145 млн лет, циркон, U–Pb SHRIMP-II [5]) трахибазальтов, андезитов, трахиандезитов, дацитов и гранодиоритов комплекса малых интрузий и их экзоконтактах (рис. 1).

Положение месторождений контролируется региональными разломами – Адыча-Тарынским (месторождение Мало-Тарынское), Мугурдах-Селириканским (месторождение Бадран), Чаркы-Индибирским (месторождения Вьюн и Шумный) и Чай-Юреинским (месторождение Хангалас) (рис. 1). В рудных телах жильного/прожилкового и вкрапленного типов выделяется несколько минеральных ассоциаций – пирит-арсенопирит-кварцевая метасоматическая, пирит-арсенопирит-кварцевая жильная, золото-полисульфидно-кварцевая и сульфосольно-карбонатная [6]. Нашими исследованиями [3, 4] и работами [2, 7] за пределами известных рудных тел и в метасоматитах OGD ЯКМП выделены Py1 (диагенетический), Py2 (метаморфогенный), Py3 (метасоматический) и Apy1 (метасоматический).

<sup>1</sup>Институт геологии алмаза и благородных металлов, Сибирское отделение Российской академии наук, Якутск, Россия

<sup>2</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

\*E-mail: fridovsky@diamond.ysn.ru



**Рис. 1.** Схема геологического строения центральной части Яно-Колымского металлогенического пояса и положение изученных месторождений. Разломы: МС – Мугурдах–Селириканский, АТ – Адыча–Тарынский, ЧЮ – Чай–Юреинский, ЧИ – Чаркы–Индигирский, Д – Дарпирский, Ч – Чибагалахский.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы для минералого-геохимических и изотопно-геохимических исследований отобраны из обнажений, поверхностных и подземных горных выработок различных участков месторождений Мало-Тарынское, Бадран, Хангалас, Вьюн и Шумный. Для минералогических, микротектурных и геохимических исследований вкрапленного сульфидного оруденения были приготовлены аншлифы (всего 74) и зерна в эпоксидных шашках (100 сульфидных зерен в 10 шашках). Химические анализы составов пирита и ар-

сенопирита сделаны в отделе физико-химических методов анализа Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (ИГАБМ СО РАН, г. Якутск). Химический состав пирита (281 анализ) и арсенопирита (94 анализа) определен рентгеноспектральным методом (РСМ) на микроанализаторе Camebax-Micro ("Cameca", Courbevoie, France). Содержания Au более 2 г/т определены в порошкообразных мономинеральных образцах методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) с электротермическим распылением на спектрометре МГА-1000 (ЛЮМЭКС,

Россия). Изотопный состав серы  $\delta^{34}\text{S}$  (57 проб) изучен локальным и валовым методами в лаборатории стабильных изотопов ЦКП ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) по стандартным методикам, опубликованным в [3, 4]. Величины измерений  $\delta^{34}\text{S}$  приведены относительно международного стандарта VCDT и выражены в промилле (‰). Точность анализа величин  $\delta^{34}\text{S}$  составляла  $\pm 0.20\%$  (1 $\sigma$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Главными рудными минералами в прокси-мальных серицит-хлорит-карбонат-кварцевых метасоматитах изученных месторождений являются золотоносные (до 159.5 г/т)  $\text{Ru}_3$  и  $\text{Au}_1$ , содержание которых до 4–6%.  $\text{Ru}_3$  кубической и пентагондодекаэдрической формы часто имеет зональное строение [3],  $\text{Au}_1$  – короткопризматической и псевдопирамидальной формы. Размер кристаллов от долей до 1–1.5 мм, реже до 2–3 мм, в дайках отмечаются метакристаллы размером до 5 мм.

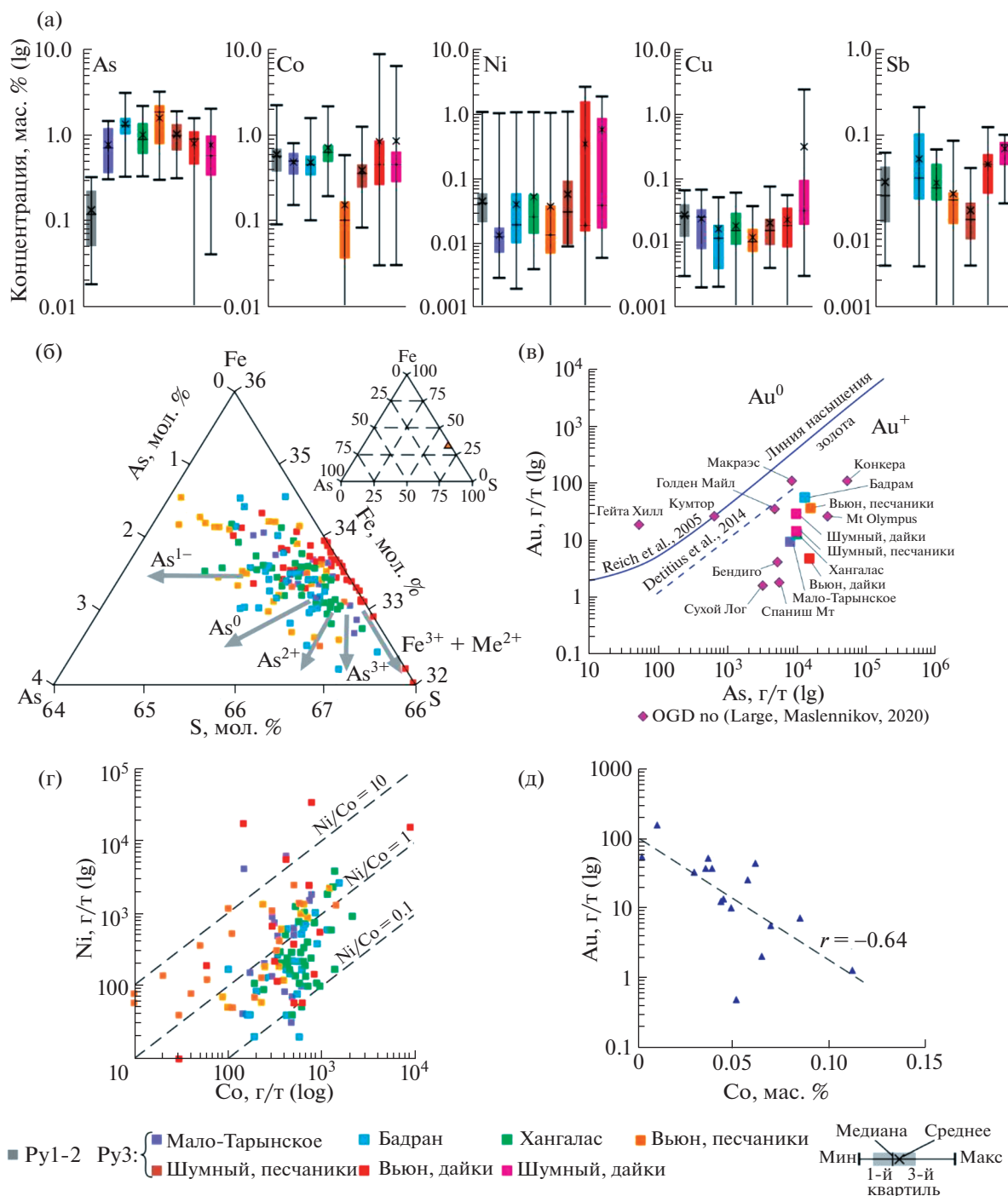
Пирит $_3$  содержит элементы-примеси: As, Co, Ni, Cu, реже Sb и Pb, другие элементы присутствуют в количествах ниже предела обнаружения РСМ (рис. 2 а). В  $\text{Ru}_3$  из терригенных толщ As является основной примесью (от 0.31 до 3.16 мас. %) и для большинства (68%) проанализированных зерен  $0.5 \text{ мас. \%} < C_{\text{As}} < 1.5 \text{ мас. \%}$ . В пиритах из даек содержание As имеет наибольшие вариации: от безмышьяковистых до  $C_{\text{As}} = 2.03 \text{ мас. \%}$  (месторождение Шумный) (рис. 2 а). Общее содержание остальных элементов-примесей изменяется от 0.01 до 0.55 мас. %, но преобладают зерна пирита, для которых  $\Sigma(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}, \text{Sb}, \text{Pb}) < 0.15 \text{ мас. \%}$ . Распределение концентраций элементов-примесей в  $\text{Ru}_3$  из терригенных пород и из даек сопоставимо, но наблюдается ряд особенностей (рис. 2 а). Пириты $_3$  месторождения Бадран имеют повышенные концентрации Sb (до 0.21 мас. %), на месторождении Мало-Тарынское примесь Sb ниже предела обнаружения (рис. 2 а), а на месторождении Хангалас установлена примесь Pb (до 0.11 мас. %). В нескольких кристаллах пирита из даек месторождений Вьюн и Шумный выявлены повышенные концентрации Sb ( $C_{\text{Sb}} = 0.12 \text{ мас. \%}$ ), Cu ( $C_{\text{Cu}}$  до 2.31 мас. %) и Ni ( $C_{\text{Ni}}$  до 3.52 мас. %). Пириты $_3$  из даек имеют отрицательную связь высокой степени для пар  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Co}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ni}^{2+}$  ( $r = -0.7...-0.9$ ). В  $\text{Ru}_3$  проявлена химическая зональность As: выделяется центральная ( $C_{\text{As}}$  до 3.07 мас. %), промежуточная ( $C_{\text{As}} < 2.0 \text{ мас. \%}$ ) и краевая ( $C_{\text{As}}$  до 2.20 мас. %) зоны. Концентрации Co и Ni могут заметно изменяться в объеме одного зерна. Повышенные содержания Co (до 0.22 мас. %) установлены в центральной части кристаллов, а Ni

(до 0.46 мас.%) по их периферии. Общая (эмпирическая) формула  $\text{Ru}_3$  из изученных OGD:  $\text{Fe}_{0.98-1.08}(\text{Ni}_{0.0-0.01}\text{Co}_{0.0-0.01})\text{S}_{1.95-2.00}\text{As}_{0.01-0.05}$ .

Микроэлементы в сульфидах могут встречаться в изоморфной структурно-связанной форме и в виде нано-/микровключений [8]. Для  $\text{Ru}_3$  из месторождений в терригенных толщах (Мало-Тарынское, Бадран, Хангалас) и месторождений в дайках (Вьюн, Шумный) характерна нестехиометричность составов (63% анализов  $\text{Fe}/(\text{S} + \text{As}) \neq 0.5$ ,  $\text{S}/\text{Fe} \neq 2.00$ ). Соотношение S/Fe изменяется на отдельных месторождениях в больших пределах (Вьюн  $\text{S}/\text{Fe} = 1.87-2.04$ ; Бадран  $\text{S}/\text{Fe} = 1.88-2.09$ ). Состав  $\text{Ru}_3$  отличается от расчетных значений ( $\text{Fe} = 46.547 \text{ мас. \%}$  и  $\text{S} = 53.453 \text{ мас. \%}$ ), что указывает на наличие вакантных позиций в структуре пирита, которые занимают элементы-примеси. В большинстве анализов пириты обеднены серой, недостаток которой восполняется  $\text{As}^{1-}$ , но мышьяк может в кристаллической решетке замещать Fe ( $\text{As}^{2+}$  and  $\text{As}^{3+}$ ) или находиться в виде нановключений ( $\text{As}^0$ ). Главным механизмом включения в состав пирита Co, Ni, Cu, Sb, Pb ( $\text{Me}^{2+}$ ) является изоморфное замещение Fe [9]. Тройная диаграмма As–Fe–S демонстрирует возможные сценарии вхождения микроэлементов в состав пирита (рис. 2 б). Наиболее ярко это проявлено для пары S–As: повышенные содержания As характерны для пиритов с недостатком серы, для всей выборки  $r_{\text{S-As}} = -0.68$  и увеличивается на отдельных объектах (Мало-Тарынское,  $r_{\text{S-As}} = -0.77$ ; дайки месторождения Вьюн,  $r_{\text{S-As}} = -0.80$ ). Корреляционные связи между Fe, S и другими элементами-примесями изменчивы и в большей степени проявляются на отдельных объектах (Мало-Тарынское,  $r_{\text{S-Cu}} = -0.54$ ; Шумный,  $r_{\text{Fe-Cu}} = -0.65$ ).

В  $\text{Ru}_3$  как на золоторудных месторождениях в терригенных толщах (Мало-Тарынское, Бадран и Хангалас), так и в дайках (Вьюн, Шумный) между Co, Ni и Fe наблюдаются обратные корреляционные связи различной степени от слабой ( $r = -0.3...-0.5$ ) до умеренной ( $r = -0.65$ ). Отношение Ni/Co в  $\text{Ru}_3$  изменяется в широких пределах (0.1–19.1), но в большинстве анализов  $C_{\text{Co}} > C_{\text{Ni}}$  и в 90% анализов  $10.0 > \text{Ni}/\text{Co} > 0.1$ , что характерно для гидротермального отрицательно заряженного пирита с высокой проводимостью (p-тип) [11] (рис. 2 г). Обедненный кобальтом  $\text{Ru}_3$  с обратной корреляционной связью между Co и Au является высоко золотоносным (рис. 2 д).

Золотоносность  $\text{Ru}_3$  варьирует от 0.3 г/т до 159.5 г/т (рис. 3 а). Наблюдения микровключений самородного золота носят единичный характер (м-ние Хангалас) [4]. В качестве индикатора оценки золотоносности пирита наиболее информативной является примесь As. Изменения фор-



**Рис. 2.** Вариации содержания и соотношения элементов примесей в пирите орогенных золоторудных месторождений центральной части ЯКМП. (а) распределение элементов-примесей в Py; (б) тройная диаграмма As–Fe–S [9] для Py3. Тренды замещения As → S:  $As^{1-}$  изоморфные замещения в Py3, нановключения  $As^0$ , As → Fe:  $As^{2+}$  изоморфные замещения в Py3,  $As^{3+}$  изоморфные замещения в Py3 и двухвалентные металлы ( $Me^{2+}$ ), изовалентно замещающие Fe (Co, Ni, Cu); (в–д) графики, показывающие соотношения в Py3 между концентрацией: (в) As и Au, (г) Ni и Co, (д) Co и Au изученных месторождений.

мы и концентрации As в пирите из золоторудных месторождений отражают эволюцию гидротермальной системы. В Py3 установлена высокая сте-

пень корреляции Au и As ( $r_{Au-As}$  до 0.9) (рис. 3 б). На графике соотношения Au и As в Py3 изученные месторождения располагаются ниже линии на-

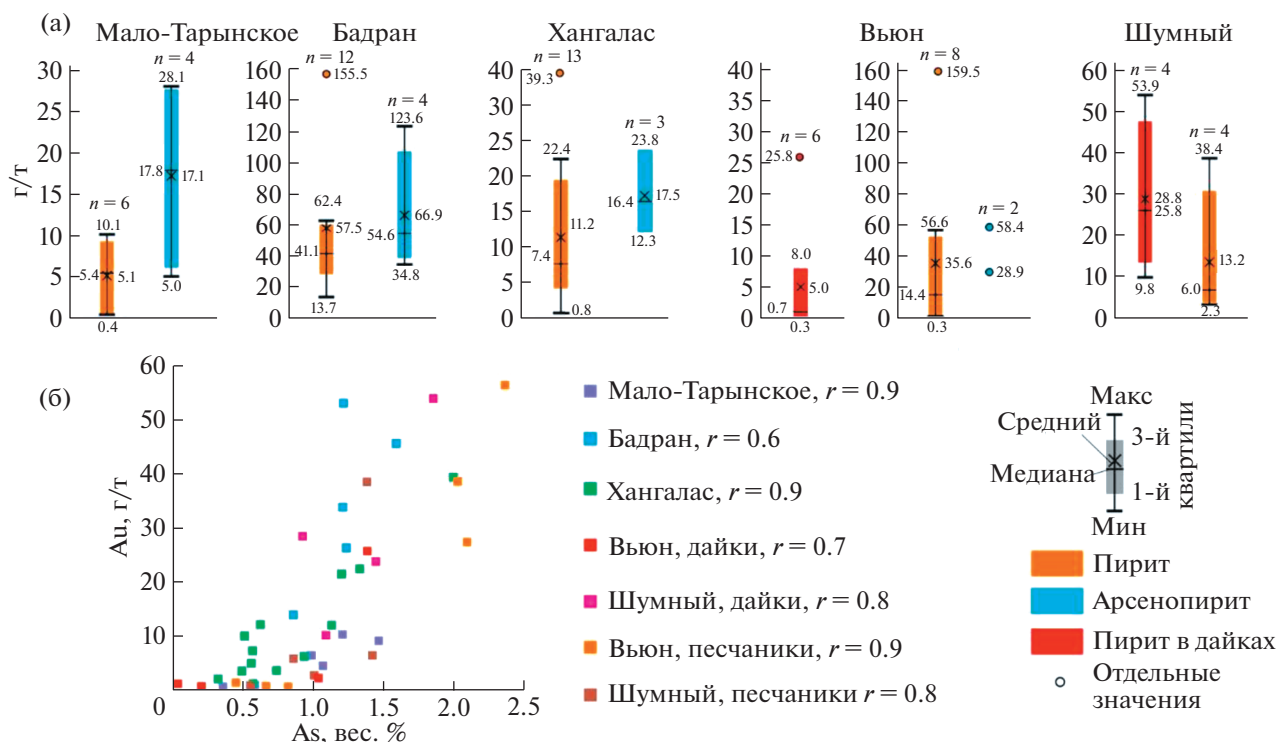


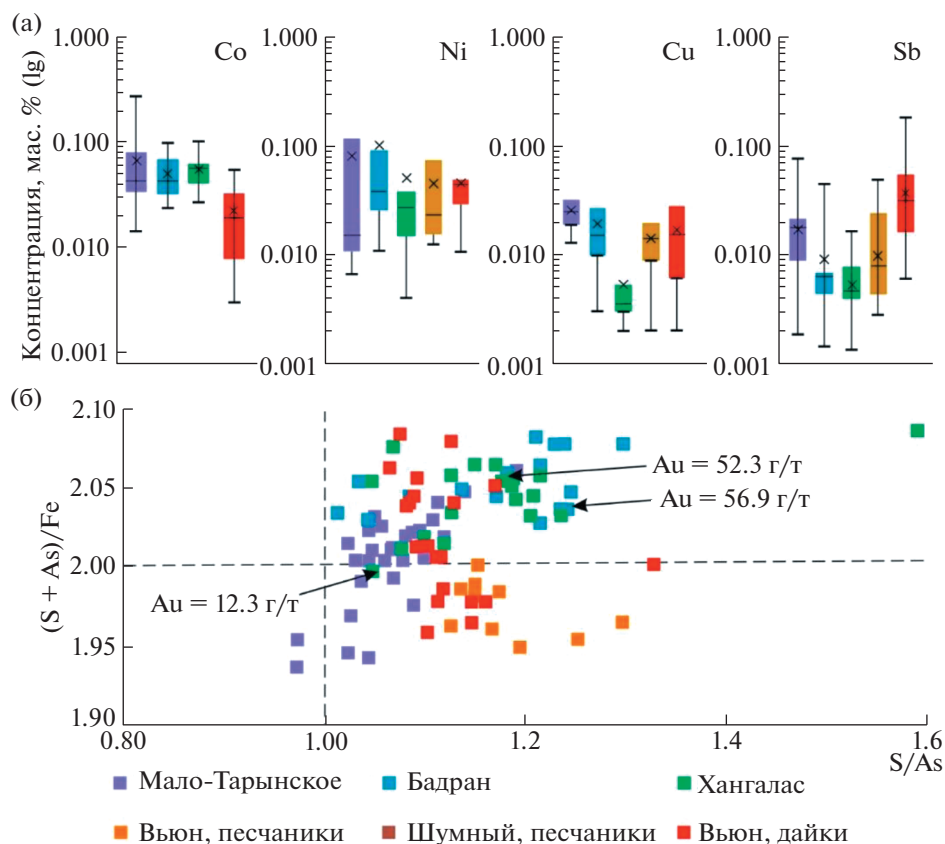
Рис. 3. Содержание золота в сульфидах из метасоматитов изученных месторождений (а) и диаграмма соотношения между концентрацией As и Au в Py3 (б).

сыщения Au:  $C_{Au} = 0.02 \times C_{As} + 4 \times 10^{-5}$  (рис. 2 в) [9]. Отмеченное косвенно указывает на преобладание структурно-связанной формы “невидимого” золота  $Au^+$  в Py3.

Для  $Au_{Py1}$  так же, как и для  $Au_{Py3}$  характерны примеси Sb, Co, Ni и Cu, микропримеси других элементов присутствуют в количествах ниже предела обнаружения РСМ (рис. 4 а). Общая концентрация их изменяется в значительных пределах, но в большинстве проанализированных зерен  $\Sigma$  (Sb, Co, Ni, Cu) составляет не более 0.15%. Содержание отдельных элементов нестабильно и индивидуально для различных объектов. Основной примесью в  $Au_{Py3}$  является Sb (рис. 4 а). На месторождении Мало-Тарынское на долю Sb приходится 60% всего объема элементов-примесей, а для  $Au_{Py3}$  из даек – в среднем 85% и в отдельных образцах содержание Sb достигает 1.03–1.8 мас. %. Примесь Co составляет 30–45% от общего объема примесей. На месторождении Вьюн в  $Au_{Py1}$  из даек  $C_{Co} = 0.01–0.06$  мас. %, а в терригенных породах  $C_{Co}$  в количестве ниже предела обнаружения РСМ. Примесь Ni ( $C_{Ni} = 0.01–0.30$  мас. %) и Cu ( $C_{Cu} = 0.01–0.04$  мас. %) определена в 65% проанализированных зерен.  $Au_{Py1}$  имеет нестехиометрический состав (в 72% анализов  $Fe/(S + As) \neq 0.5$ ) и обычно обогащен серой (As/S от 0.77 до 0.99) (рис. 4 б). Наиболее близок к стехиометрическо-

му составу  $Au_{Py1}$  месторождения Мало-Тарынское. Главные изоморфные замещения в  $Au_{Py1}$  происходят по схеме  $S^{1-} \rightarrow As^{1-}$  ( $r = 0.92–0.99$ ) и  $Fe^{2+}(Fe^{3+}) \rightarrow As^{2+}(As^{3+})$  ( $r = 0.65–0.84$ ). Элементы примеси в  $Au_{Py1}$  (Sb, Co, Ni, Cu) могут занимать как анионные, так и катионные вакантные позиции в структуре кристаллов и их распределение в арсенопирите носит менее упорядоченный характер, чем в пирите. Между главными элементами и элементами-примесями преобладают отрицательные корреляционные связи слабой и умеренной силы. Наиболее проявлена связь As и Sb ( $r = -0.45...-0.61$ ). Арсенопириты с нестехиометрическим составом и избытком S обычно золотосодержательны [12]. Содержания золота в  $Au_{Py1}$  изученных месторождений до 126.3 г/т (рис. 3 а).

Одной из возможных причин вариации содержания S, As, Fe и элементов примесей в  $Au_{Py1}$  изученных месторождений может являться неоднородность температурного поля кристаллизации минерала, что отмечалось также на месторождениях Благодатное и Олимпиада Енисейского края [13]. На корреляционной диаграмме с линией насыщения Au по [10] средние значения As и Au также, как и в  $Au_{Py3}$  располагаются в поле изоморфной структурно-связанной формы  $Au^+$  в  $Au_{Py1}$ .



**Рис. 4.** Распределение элементов-примесей в арсениците (а) из метасоматитов и диаграмма соотношений S/As и (S + As)/Fe (б) изученных месторождений ЯКМП. Пересечение линий S/As = 1 и (S + As)/Fe = 2 соответствует стехиометрическому составу [13].

Исследования стабильных изотопов  $\delta^{34}\text{S}$  дают сведения об источниках серы рудных флюидов, что важно для понимания генезиса рудных месторождений [14–16]. Величина  $\delta^{34}\text{S}$  определяется участием различных резервуаров в формировании руд, вариациями физико-химических параметров при эволюции рудообразующих систем и другими факторами [16, 17]. РуЗ месторождения Мало-Тарынское имеет интервал величин  $\delta^{34}\text{S}$  от  $-5.5$  до  $+1.4\text{‰}$ , Ау1 показал следующие значения  $\delta^{34}\text{S}$ :  $-1.6$  и  $-1.4\text{‰}$  (табл. 1). На месторождении Бадран этот показатель в РуЗ и Ау1, отобранных на различных глубинах (от 587 до 916 м) имеет узкий диапазон от  $-1.1$  до  $+1.5\text{‰}$ . Наибольшие вариации  $\delta^{34}\text{S}$  установлены в РуЗ (от  $-0.7$  до  $+1.5\text{‰}$ ), а в Ау1 получены значения  $\delta^{34}\text{S}$  в диапазоне от  $-1.1$  до  $+0.1\text{‰}$ .

Изотопный состав  $\delta^{34}\text{S}$  сульфидов из метасоматитов месторождения Хангалас имеет узкий интервал отрицательных значений  $\delta^{34}\text{S}$  в диапазоне от  $-2.1$  до  $-0.6\text{‰}$ , соответственно для РуЗ (от  $-1.9$  до  $-0.6\text{‰}$ ) и Ау1 (от  $-2.1$  до  $-1.1\text{‰}$ ). На месторождении Вьюн зафиксирован неоднородный изотопный состав  $\delta^{34}\text{S}$  сульфидов. Наибольшие ва-

риации в  $\delta^{34}\text{S}$  установлены в РуЗ из даек (от  $-6.4$  до  $+3.1\text{‰}$ ). В сульфидах из терригенных пород получены значения  $\delta^{34}\text{S}$  в Ру от  $+2.3$  до  $+5.6\text{‰}$  и Ау  $+4.4\text{‰}$ . Анализ изотопного состава  $\delta^{34}\text{S}$  в РуЗ из месторождения Шумный показал положительные значения от  $+2.1$  до  $+5.1\text{‰}$ . Изотопный состав  $\delta^{34}\text{S}$  в РуЗ из песчаников колеблется от  $+4.3$  до  $+5.0\text{‰}$ , в РуЗ из даек – от  $+2.1$  до  $+5.1\text{‰}$ .

В целом изотопный состав серы сульфидов изученных месторождений показывает диапазон величин  $\delta^{34}\text{S}$  от  $-6.4$  до  $+5.6\text{‰}$  (среднее  $\delta^{34}\text{S}$  для Ау1 и РуЗ из терригенных пород  $+0.4$  и  $+0.8\text{‰}$  соответственно, среднее  $\delta^{34}\text{S}$  для РуЗ из даек  $+0.5\text{‰}$ ) (табл. 1). Эти данные согласуются с результатами Г.Н. Гамянина и др. [6] для сульфидов из жильных руд OGD западной части ЯКМП, однако  $\delta^{34}\text{S}$  сульфидов несколько тяжелее, чем из золото-кварцевых жил восточной части ЯКМП (среднее  $\delta^{34}\text{S}$  для Ау и Ру соответственно  $-3.9\text{‰}$  и  $-4.4\text{‰}$ ) [17]. Схожий изотопный состав серы арсенирита и пирита из кварцевых жил [4, 6] и вкрапленных руд может свидетельствовать об их формировании в ходе единого гомогенного эволюционирующего гидротермального события.

**Таблица 1.** Изотопный состав  $\delta^{34}\text{S}$  пирита и арсенопирита из метасоматитов изученных месторождений ЯКМП

Месторождение	Минерал	Порода	$\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ , ‰	n	Источник
Мало-Тарынское	Арсенопирит	Песчаники, алевролиты	-1.6; -1.4	2	Данная работа
	Пирит		-5.5; -2.3; 1.4	3	
Бадран*	Арсенопирит	Песчаники, алевролиты	-1.1/-0.6; -0.7/-0.8; -0.5/-0.2; -0.4/-0.3; -0.4/0.1; -0.3/-0.3; -0.3/-0.2; 0.0/-0.3	16	Фридовский и др., 2022
	Пирит		-0.7/1.4; -0.5/1.0; -0.2/-0.3; 0.3/0.3; 0.1/1.8; 0.4/1.6; 0.5/1.8; 0.6/1.9; 0.8/1.1; 1.0/1.2; 1.0/0.7; 1.1/1.0; 1.5/1.5	26	
Хангалас	Арсенопирит	Песчаники, алевролиты	-2.1; -1.4; -1.2; -1.1	4	Kudrin et al., 2021 и данная работа
	Пирит		-1.9; -1.5; -1.5; -1.3; -0.8; -1.0; -0.6	7	
Вьюн	Арсенопирит	Песчаники, алевролиты	4.4	1	Данная работа
	Пирит		2.3; 3.7; 4.4; 5.6	4	
	Пирит		Дайки	-6.4; -4.7; -4.6; -1.9; 3.1; 3.1	
Шумный	Пирит	Песчаники, алевролиты	4.3; 5.0	2	Данная работа
		Дайки	2.1; 2.4; 2.5; 4.8; 5.1	5	

Примечание. \* – Для месторождения Бадран приведены значения изотопного состава серы пирита и арсенопирита, определенные локальным методом на периферии (знаменатель) и в центре (числитель) зерен.

## ВЫВОДЫ

Нестехиометрический состав  $\text{Ar}_{\text{U1}}$  и  $\text{Py}_{\text{U3}}$  из проксимальных метасоматитов орогенных золоторудных месторождений Мало-Тарынское, Бадран, Хангалас, Вьюн и Шумный Яно-Колымского металлогенического пояса свидетельствует о наличии в структуре кристаллов вакантных позиций, которые заполняются элементами-примесями и структурно-связанной формой “невидимого”  $\text{Au}^+$ .  $\text{Ar}_{\text{U1}}$  обогащен серой (As/S от 0.77 до 0.99), содержит примеси Sb, Co, Ni и Cu (общая концентрация не более 0.15%).  $\text{Py}_{\text{U3}}$  содержит те же элементы (общей концентрацией до 3.71%), реже Pb, обеднен S и обогащен As (до 3.16 мас. %). Отношение Ni/Co в  $\text{Py}_{\text{U3}}$   $10.0 > \text{Ni/Co} > 0.1$  типично для гидротермального отрицательно заряженного пирита с высокой проводимостью (p-тип). Установленный диапазон величин  $\delta^{34}\text{S}$  от -6.4 до +5.6‰ в  $\text{Ar}_{\text{U1}}$  и  $\text{Py}_{\text{U3}}$  может указывать на участие ювенильных/магматических источников в рудообразовании, но не исключает возможность поступления серы в минералообразующий флюид из осадочных пород на орогенных золоторудных месторождениях центральной части ЯКМП.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке по плану НИР ИГАБМ СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков А.В., Сидоров А.А., Гончаров В.И., Сидоров В.А. Вкрапленные золото-сульфидные месторождения Северо-Востока России // Геология рудных месторождений. 2002. № 44. С. 159–174.
2. Горячев Н.А., Соцкая О.Т., Игнатъев А.В., Веливецкая Т.И., Горячева Е.М., Семьшев Ф.И., Бердников Н.В., Малиновский М.А., Альшевский А.В. О сульфидной минерализации зон крупных разломов Яно-Колымского орогенного пояса // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2020. № 1. С. 11–29.
3. Фридовский В.Ю., Полуфунтикова Л.И., Кудрин М.В., Горячев Н.А. Изотопный состав серы и геохимические характеристики золотоносных сульфидов орогенного месторождения Бадран, Яно-Колымский металлогенический пояс (северо-восток Азии) // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 502. № 1. С. 3–9.
4. Kudrin M.V., Fridovsky V.Y., Polufuntikova L.I., Kryuchkova L. 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. V. 11. № 4. P. 403.
5. Fridovsky V.Yu., Yakovleva K.Yu., Vernikovskaya A.E., Vernikovskiy V.A., Matushkin N.Y., Kadilnikov P.I., Rodionov N.V. Geodynamic Emplacement Setting of Late Jurassic Dikes of the Yana–Kolyma Gold Belt, NE Folded Framing of the Siberian Craton: Geochemical, Petrologic, and U–Pb Zircon Data // Minerals. 2020. V. 10. № 11. P. 1000.
6. Гамянин Г.Н., Фридовский В.Ю., Викентьева О.В. Благороднометалльная минерализация Адыча-Та-

- рынской металлогенической зоны: геохимия стабильных изотопов, флюидный режим и условия рудообразования // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. №. 10. С. 1586–1605.
7. Соцкая О.Т., Семьшев Ф.И., Малиновский М.А., Альшевский А.В., Ливач А.Э., Горячев Н.А. Пирит зон сульфидизации терригенных комплексов Яно-Колымского орогенного пояса (Северо-Восток России): генерации, типохимизм, минеральные ассоциации // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2022. № 1. С. 14–30.
  8. Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S., Palenik C.S., Chryssoulis S.L., Ewing R.C. Solubility of gold in arsenian pyrite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2005. Т. 69. С. 2781–2796.
  9. Roma'n N., Reich M., Leisen M., Morata D., Barra F., Deditius A.P. Geochemical and micro-textural fingerprints of boiling in pyrite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2019. V. 246. P. 60–85.
  10. Deditius A.P., Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S., Chryssoulis S.L., Walshe J., Ewing R.C. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2014. V. 140. P. 644–670.
  11. Large R.R., Maslennikov V.V. Invisible gold paragenesis and geochemistry in pyrite from orogenic and sediment-hosted gold deposits // *Minerals*. 2020. V. 10. №. 4. P. 339.
  12. Генкин А.Д. Золотоносный арсенопирит из золоторудных месторождений: внутреннее строение зерен, состав, механизм роста и состояние золота // Геология рудных месторождений. 1998. Т. 40. №. 6. С. 551–557.
  13. Сазонов А.М., Кирик С.Д., Сильянов С.А., Баюков О.А., Тишин П.А. Типоморфизм арсенопирита золоторудных месторождений Благодатное и Олимпиада (Енисейский край) // *Минералогия*. 2016. № 3. С. 53–70.
  14. Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Алпатов В.В., Наумов В.Б., Носик Л.П., Миронова О.Ф. Минералогическо-геохимические особенности и условия образования Нежданнинского месторождения золота (Саха-Якутия, Россия) // Геология рудных месторождений. 1998. № 2. С. 137–156.
  15. 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.
  16. Goldfarb R., Groves D. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time // *Lithos*. 2015. V. 233. P. 2–26.
  17. 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.

## GEOCHEMICAL AND ISOTOPIC CHARACTERISTICS OF DISSEMINATED SULFIDE MINERALIZATION OF OROGENIC GOLD DEPOSITS OF THE YANA-KOLYMA METALLOGENIC BELT (NORTH-EAST OF RUSSIA)

Corresponding Member of the RAS V. Yu. Fridovsky<sup>a, #</sup>, L. I. Polufuntikova<sup>b, a</sup>, and M. V. Kudrin<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Ammosov Northeastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: fridovsky@diamond.ysn.ru*

The results of the study of the chemical composition and isotopic characteristics of the sulfur of disseminated pyrite and arsenopyrite from metasomatites of the Malo-Taryn, Badran, Khangalas, V'yun and Shumnyy orogenic gold deposits of the Yana-Kolyma metallogenic belt are presented. Pyrites and arsenopyrites have a non-stoichiometric composition. Arsenopyrites are characterized by sulfur enrichment (As/S from 0.77 to 0.99), minor of Sb, Co, Ni and Cu with a total concentration of up to 0.15 wt %. Pyrites contain the same elements (total concentration up to 3.71%), less often Pb, depleted with S and enriched with As (up to 3.16 wt %). The ratio of Ni/Co in pyrite is  $10.0 > \text{Ni/Co} > 0.1$ , it is characteristic of hydrothermal negatively charged pyrite with high conductivity (p-тип). It is assumed that the “invisible” Au<sup>+</sup> is found in disseminated pyrite and arsenopyrite mainly in an isomorphic structurally related form. A range of values  $\delta^{34}\text{S}$  from –6.4 to +5.6‰ in sulfides, is characteristic of juvenile/magmatic sources of sulfur of the studied deposits.

**Keywords:** pyrite, arsenopyrite, chemical composition, isotopic composition of sulfur, orogenic gold deposits, Yana-Kolyma metallogenic belt, northeast Russia