



УДК 550.42

<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-2-3>

СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) В РУДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА КОПЫЛОВСКОЕ, КАВКАЗ И КРАСНОЕ (БОДАЙБИНСКИЙ РАЙОН)

Е.Е. Паленова, С.А. Садыков

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; palenova@mineralogy.ru

Статья поступила в редакцию 15.04.2025 г., после доработки 22.05.2025 г., принята к печати 01.06.2025 г.

Аннотация. В статье приводятся данные об изотопном составе кислорода в жильном кварце и карбонатах, углерода в карбонатах и серы в сульфидах золоторудных месторождений Копыловское, Кавказ и Красное, расположенных в пределах Байкало-Патомского нагорья и залегающих в догалдынской (Копыловское, Кавказ) и аунакитской (Красное) свитах эдиакарского возраста. Изотопный состав кислорода кварца укладывается в узкий диапазон значений от +16.7 до +19.3 ‰, расчет $\delta^{18}\text{O}$ воды во флюиде показал постепенное увеличение значений в ряду месторождений Кавказ (+9.59...+10.59 ‰), Копыловское (+10.92...+11.42 ‰), Красное (+12.14...+12.94 ‰). Полученные данные близки к значениям $\delta^{18}\text{O}$ кварца из золоторудных месторождений Сухой Лог, Голец Высочайший и Вернинское, расположенных в том же районе, и, соответственно, источник флюида интерпретируется как метаморфогенно-гидротермальный. Изотопный состав кислорода железо-магнезиальных карбонатов из углеродистых сланцев месторождений Копыловское и Кавказ близок значениям, полученным для жильного кварца ($\delta^{18}\text{O}_{\text{карб.}} = +16.64...+18.38$ ‰), тогда как значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб.}}$ доломита из кварц-карбонатных жил Копыловского месторождения значительно ниже (+12.80 и +13.88 ‰). Вероятно, образование жил происходило из единого эволюционирующего метаморфогенно-гидротермального флюида при фракционировании изотопов кислорода между кварцем и карбонатом. Изотопные соотношения серы для пирита месторождений Копыловское и Кавказ перекрываются и составляют –11.91...–1.68 и –16.86...–6.66 ‰, соответственно. Сера в пирите месторождения Красное более тяжелая: –6.35...–0.09 ‰. Золотоносные галенит (месторождение Красное) и халькопирит (месторождение Кавказ) из поздних кварцевых жил также характеризуются изотопно-легкой серой: –3.12 и –6.32 ‰, соответственно. Значения $\delta^{34}\text{S}$ коррелируют с таковыми для метаморфогенного пирита вмещающих месторождения догалдынской и аунакитской свит, что указывает на коровый источник формирования золото-сульфидных руд.

Ключевые слова: Ленский золотоносный район, орогенные месторождения, черные сланцы, докембрий, рудогенез.

Финансирование. Работы выполнены в рамках государственной бюджетной темы ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № 122031600292-6.

Благодарности. Авторы признательны д.г.-м.н. Т.А. Веливецкой и д.г.-м.н. С.Г. Кряжеву за выполнение изотопных анализов. Особая благодарность д.г.-м.н. Е.В. Белогуб за обсуждение статьи и полезные комментарии.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с данной рукописью.

Вклад авторов. Е.Е. Паленова – разработка концепции, исследование, написание рукописи. С.А. Садыков – аналитические исследования. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Паленова Е.Е., Садыков С.А. Стабильные изотопы ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) в рудах месторождений золота Копыловское, Кавказ и Красное (Бодайбинский Район). Минералогия, 2025, 11(2), 47–69. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-2-3.

STABLE ISOTOPES ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) IN ORES FROM THE
KOPYLOVSKOE, KAVKAZ AND KRASNOE GOLD DEPOSITS (BODAIBO REGION)

E.E. Palenova, S.A. Sadykov

South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,
Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia; palenova@mineralogy.ru

Received 15.04.2025, revised 22.05.2025, accepted 01.06.2025

Abstract. The article presents data on isotopic composition of oxygen of vein quartz and carbonates, carbon of carbonates, and sulfur of sulfides of the Kopylovskoe, Kavkaz and Krasnoe gold deposits located within the Baikal-Patom Highland in the Ediacaran Dogaldyn (Kopylovskoe, Kavkaz) and Aunakit (Krasnoe) Formations. The oxygen isotopic composition of quartz fits a narrow range of values from +16.7 to +19.3 ‰; the calculated $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values of the fluid showed a gradual increase in a range from Kavkaz (+9.59 to +10.59 ‰) to Kopylovskoe (+10.92 to +11.42 ‰) and Krasnoe (+12.14 to +12.94 ‰) deposits. Our data are close to $\delta^{18}\text{O}$ values of quartz from the Sukhoi Log, Golets Vysochaishy and Verninskoe gold deposits located in the same region, thus, the fluid source is interpreted as metamorphic-hydrothermal. The oxygen isotopic composition of Fe-Mg carbonates from carbonaceous shales of the Kopylovskoe and Kavkaz deposits is close to those values of vein quartz ($\delta^{18}\text{O}_{\text{carb.}} = +16.64$ to +18.38 ‰), whereas the $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb.}}$ values of dolomite from quartz-carbonate veins of the Kopylovskoe deposit are significantly lower (+12.80 and +13.88 ‰). It is likely that the veins formed from a single evolving metamorphic-hydrothermal fluid upon oxygen isotopic fractionation between quartz and carbonate. Sulfur isotopic ratios for pyrite from the Kopylovskoe and Kavkaz deposits are overlapped: -1.68 to -11.91 , and -16.86 to -6.66 ‰, respectively. The $\delta^{34}\text{S}$ values of pyrite from the Krasnoe deposit are lower: -0.09 to -6.35 ‰. Gold-bearing galena (Krasnoe deposit) and chalcopyrite (Kavkaz deposit) from late quartz veins are also characterized by low $\delta^{34}\text{S}$ values: -3.12 and -6.32 ‰, respectively. The $\delta^{34}\text{S}$ values are correlated with those for metamorphic pyrite from the host Dogaldyn and Aunakit Formations, indicating a crustal source for the gold-sulfide ores.

Keywords: Lena gold province, orogenic deposits, black shales, Precambrian, ore genesis.

Funding. This work was supported by state contract of the South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS no. 122031600292-6.

Acknowledgements. The authors are grateful to T.A. Velivetskaya and S.G. Kryazhev for performing isotope analyses. We also sincerely thanks to E.V. Belogub for discussing the article and useful comments.

Conflict of interests. The authors declare that there are no conflicts of interest related to this manuscript.

Author contribution. E.E. Palenova – conceptualization, investigation, writing; S.A. Sadykov – analytical work. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Palenova E.E., Sadykov S.A. Stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) in ores of the Kopylovskoe, Kavkaz And Krasnoe gold deposits (Bodaibo Region) Mineralogy, 2025, 11(2), 47–69. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-2-3.

ВВЕДЕНИЕ

Орогенные месторождения золота эпизодически формировались на протяжении более 3 млрд лет истории Земли в период от среднего архея до позднего докембрия и непрерывно – в течение всего фанерозоя. Этот класс месторождений связан с блоками земной коры, деформированными и метаморфизованными в процессе аккреционно-коллизийного этапа орогенеза (Goldfarb et al., 2001). Они являются источником большей части мировых запасов золота, значительную долю которых занимают месторождения в углеродисто-терригенных комплексах. Последние вмещают более половины запасов золота России, в т. ч. крупнейшие место-

рождения Сухой Лог, Олимпиада, Нежданинское, Майское и др. Ленская золотоносная провинция, расположенная в Байкало-Патомском нагорье, – один из эталонных примеров объектов этого типа в нашей стране.

Месторождения Ленской провинции, в том числе крупные и гигантские (Сухой Лог ~2000 т Au, Вернинское ~300 т, Голец Высочайший ~100 т, Красный ~100 т и т. д.; Будяк и др., 2024) залегают в углеродистых терригенных и карбонатных отложениях Патомского комплекса, накопившихся на окраине и склоне Сибирского кратона в Палеоазиатском океане в криогении-эдиакаре (Чугаев и др., 2018 и ссылки в этой работе). Михайловская свита палеопротерозоя также вмещает месторождение

Чертово Корыто (80 т Au; Верховин и др., 2007). Рудные тела приурочены к зонам разломов и замкам складок высоких порядков.

Генезис коренных месторождений Ленской провинции обсуждается с момента открытия месторождения Сухой Лог в 1969 г. (Буряк, 1982). Ряд исследователей признают существенную роль процессов докембрийского осадконакопления в первичном концентрировании металла, а его дальнейшее перераспределение и формирование рудных тел связывают с процессами регионального метаморфизма (Немеров, 1989; Буряк, Хмелевская, 1997; Large et al., 2007). По другой точке зрения основным источником золота являлись палеозойские гранитоиды, а его концентрирование связано с орогенным метаморфизмом (Шер, 1972; Рундквист и др., 1992; Дистлер и др., 1996; Кучеренко и др., 2011). Современные исследователи (Tarasova et al., 2020; Будяк и др., 2024), развивая представления (Буряк, Хмелевская, 1997; Немеров и др., 2010), выделяют следующие этапы формирования месторождений, связанные с геологической историей региона: 1) накопление специализированных на золото осадков за счет гидротермальной активности задугового бассейна и сноса терригенного материала со стороны Муйского орогена (Чугаев, 2024), 2) катагенетическое перераспределение осадочно-поровых флюидов в сводовые части пологих антиклиналей с образованием аномально высоких концентраций золота и 3) метаморфогенно-метасоматическое перераспределение металла в результате декарбонизации катагенетического флюида с образованием экономически значимых рудных тел. Последний этап протекал в условиях коллизии и зонального метаморфизма, связанных с закрытием Палеоазиатского океана, на пике которых сформировались граниты Мамского комплекса (Зорин и др., 2008; Немеров и др., 2010; Tarasova et al., 2020). Также обосновано более позднее формирование золото-кварцевых жильных руд, связанное с герцинским магматизмом и становлением Конкудеро-Мамаканского комплекса гранитов (Chugaev et al., 2022).

Большинство генетических моделей образования вышеуказанных золоторудных месторождений основаны на геологических, минералогических, геохронологических и геохимических данных, в том числе на использовании геохимии стабильных изотопов (Вагина, 2011, 2012; Кряжев, 2017; Горячев и др., 2017; Tarasova et al., 2020, Тарасова и др., 2021, 2022; Онищенко, Сокерина, 2021; Будяк и др., 2024), которая является инструментом для

определения типа источников рудоносного флюида и металла. Наиболее полно изучено месторождение Сухой Лог (Distler et al., 2004; Лаверов и др., 2007; Meffre et al., 2008; Гаврилов, Кряжев, 2008; Кряжев и др., 2009; Иконникова и др., 2009; Чернышов и др., 2009; Дубинина и др., 2014), другие объекты охарактеризованы с разной степенью детальности. Исследования показывают, что, несмотря на общее сходство месторождений Ленской провинции, положение объектов на разных стратиграфических горизонтах и в зонах с различным уровнем метаморфизма придает особенности каждому из них. Поэтому изучение разномасштабных месторождений актуально с точки зрения и прикладной, и фундаментальной геологии. В статье приводятся данные анализа стабильных изотопов серы в сульфидах, углерода и кислорода в карбонатах, а также кислорода в жильном кварце месторождений золота Копыловское, Кавказ и Красное.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Ленская золотоносная провинция расположена в пределах Байкало-Патомского складчатого пояса (БПП), обрамляющего с юга в виде дуги архейско-раннепротерозойский фундамент Сибирской платформы. БПП рассматривается как один из крупных структурных элементов Центрально-Азиатского орогенного пояса (Рыцк и др., 2011; Ярмолюк и др., 2012), а его внутреннее строение определяется присутствием выступов раннепротерозойского фундамента (Чуйско-Тонодско-Нечерская цепочка блоков), а также палеорифтов, поднятий и эпикратонных прогибов, сложенных позднекембрийскими и раннепалеозойскими осадочными комплексами. В БПП выделяют Прибайкальскую, Патомскую и Бодайбинскую структурно-фациальные зоны, корреляция неопротерозойских отложений которых проводилась многими исследователями (Салоп, 1964; Казакевич и др., 1971; Кориковский, Федоровский, 1980; Иванов и др., 1995; Немеров и др., 2010; Гладкочуб и др., 2013). Внутренняя Бодайбинская зона (БЗ) представляет собой широкий, серповидный синклиниорий, который с юга полукольцом ограничивает выходы палеозойских гранитоидов. Патомский комплекс углеродистых терригенно-карбонатных пород слагает Патомскую и Бодайбинскую зоны БПП, в нем снизу вверх выделяются баллаганакская, дальнетайгинская, жуинская и юдомская серии (рис. 1; Немеров и др., 2010; Гладкочуб и др., 2013).

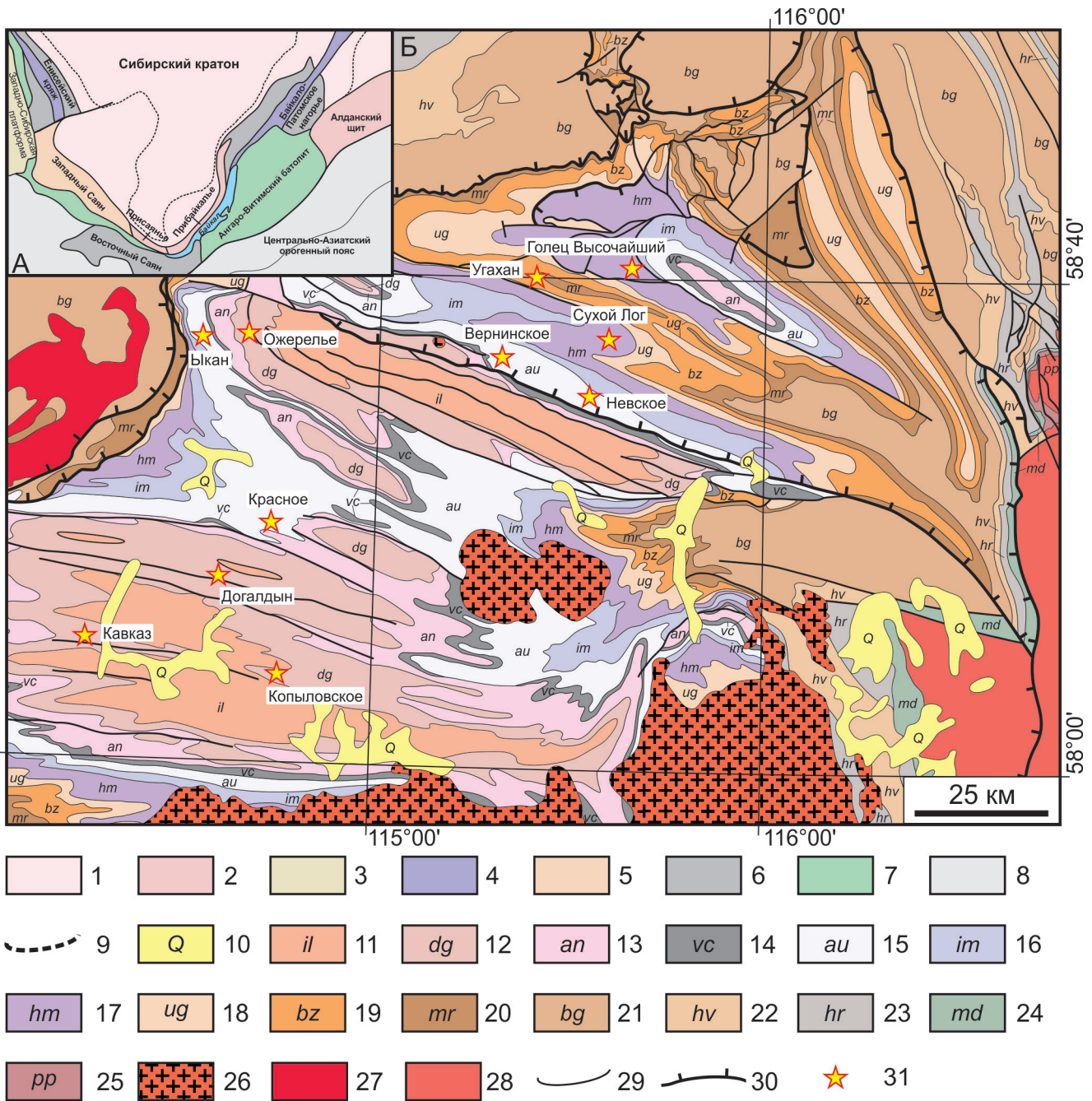


Рис. 1. Тектоническое положение Байкало-Патомского нагорья, с упрощениями по (Yudovskaya et al., 2016) (А) и геологическое строение Бодайбинской зоны, с изменениями по (Chugaev et al., 2022) (Б).

Рис. 1А: 1 – чехол Сибирской платформы; 2 – фундамент Сибирской платформы; 3 – Западно-Сибирская плита; 4 – рифтовые зоны; 5 – докембрийский фундамент складчатых поясов; 6 – пассивные континентальные окраины; 7 – активные окраины; 8 – Центрально-Азиатский орогенный пояс; 9 – границы докембрийской трансгрессии.

Рис 1Б: 10 – кайнозойские отложения; 11–23 – неопротерозойские отложения патомского комплекса (свиты): 11 – илигирская, 12 – догалдынская, 13 – анангская, 14 – вачская, 15 – аунакитская, 16 – имнянская, 17 – хомолхинская, 18 – угаханская, 19 – бужуихтинская, 20 – мариинская, 21 – бугорихтинская, 22 – хайвергинская, 23 – хорлухтахская; 24, 25 – тепторгинская серия мезопротерозоя (свиты): 24 – медвежевская, 25 – пурпольская; 26–28 – гранитные интрузии: 26 – Конкудеро-Мамаканского комплекса, карбон; 27 – Мамского комплекса, силур; 28 – Чуйско-Кодарского комплекса, палеопротерозой; 29 – основные разломы; 30 – надвиги; 31 – месторождения золота.

Fig. 1. Tectonic setting of the Baikal-Patom Highland, simplified after (Yudovskaya et al., 2016) (A) and geological map of the Bodaibo zone, modified after (Chugaev et al., 2022) (B).

Fig. 1A: 1 – cover of the Siberian Platform; 2 – basement of the Siberian Platform; 3 – West Siberian Platform; 4 – rift zones; 5 – Precambrian basement of fold belts; 6 – passive margins; 7 – active margins; 8 – Central Asian orogeny belt; 9 – boundary of Precambrian transgression.

Fig. 1B: 10 – Cenozoic sediments; 11–23 – formations of the Neoproterozoic Patom complex: 11 – Pигir; 12 – Dogaldyn; 13 – Anangra; 14 – Vacha; 15 – Aunakit; 16 – Imnyakh; 17 – Khomolkho; 18 – Ugakhan; 19 – Buzuikhta; 20 – Mariinskaya; 21 – Bugarikhta; 22 – Khaiverga; 23 – Khorlukhtakh; 24; 25 – formations of the Mesoproterozoic Teptorgo Group: 24 – Medvezhevka; 25 – Purpol; 26–28 – granitoid complexes: 26 – Carboniferous Konkudera-Mamakan; 27 – Silurian Mama; 28 – Paleoproterozoic Chuya-Kodar; 29 – main faults; 30 – thrusts; 31 – gold deposits.

Патомский комплекс (рис. 2) несогласно залегает на вулканогенно-осадочных отложениях медвежевской свиты, маркирующей начало рифтогенеза, приведшего к распаду Родинии и открытию Палеоазиатского океана между 715 и 665 млн лет (Gladkochub et al., 2019). По современным представлениям, Палеоазиатский океан существовал как открытый бассейн с океанической корой в интервале 665–625 млн лет, а затем около 610 млн лет назад был преобразован в бассейн форланда за счет причленения к Сибирскому кратону ряда микроконтинентов и островных дуг, в том числе Байкало-Муйской островной дуги (Gladkochub et al., 2019). Накопление патомского комплекса углеродистых терригенно-карбонатных пород протекало в условиях как открытого морского бассейна Палеоазиатского океана (баллаганахская серия, часть дальнетайгинской вплоть до угаханской свиты, включительно), так и бассейна форланда (начиная с хомолхинской свиты дальнетайгинской серии вплоть до юдомской серии включительно) (Чугаев и др., 2018). Бассейн форланда в жуинское и юдомское время состоял из частично изолированных участков с разной глубиной и гидродинамическим режимом, что определило появление фациальных зон, отличающихся по условиям осадконакопления (Чугаев и др., 2018). В основании джемкуканской свиты дальнетайгинской серии обнаружены ледниковые отложения, относимые к Мариноанскому оледенению, что позволило ограничить возраст ее накопления 635 млн лет (Чумаков и др., 2011, 2013). Считается, что дальнетайгинская и жуинская серии отлагались 635–580 млн лет назад, а юдомская – 580–540 млн лет назад (Melezhik et al., 2009; Юдовская и др., 2011; Kuznetsov et al., 2013; Gladkochub et al., 2013; Чумаков и др., 2011, 2013; Powerman et al., 2015; Покровский, Буякайте, 2015).

Закрытие Палеоазиатского океана привело к коллизионно-аккреционным событиям (Зорин и др., 2008, 2009), сопровождавшимся зональным региональным метаморфизмом и интенсивными пластическими деформациями пород патомского

комплекса (Буряк, 1982). Центральная часть Бодайбинского синклинория была метаморфизована в условиях зеленосланцевой фации. Метаморфизм эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций приурочен к периферийным частям выступов Чуйско-Тонодско-Нечерской зоны и контактам палеозойских гранитоидов (Кориковский, Федоровский, 1980; Иванов и др., 1995). Возраст регионального метаморфизма оценивается в 520 млн лет (Виноградов и др., 1996; Scott et al., 2007), а его пик был достигнут 450–420 млн лет назад, когда сформировались граниты S-типа Мамского комплекса (Зорин и др., 2008). Более молодые герцинские (320–300 млн лет) гранитоиды Конкудеро-Мамаканского комплекса связаны со становлением Ангаро-Витимского батолита (Бухаров и др., 1992; Неймарк и др., 1993; Ярмолук и др., 1997; Цыганков и др., 2010, 2017; Рыцк и др., 2021).

Большинство золоторудных объектов расположено в пределах бодайбинского синклинория БЗ в зоне зеленосланцевого метаморфизма серицит-хлоритовой и биотит-хлоритовой субфаций (рис. 1, 2). Региональные структуры – Бодайбинская и Маракано-Тунгусская синклинали второго порядка вмещают месторождения: Копыловское, Кавказ, Красное и Догадлынская жила в первой, и Сухой Лог, Голец Высочайший, Вернинское, Невское, Ыкан и др. во второй.

Месторождение Копыловское приурочено к одноименной антиклинали субширотного простирания, осложненной складками более высокого порядка. Шарнир антиклинали изогнут и полого погружается в юго-западном и восточном направлениях. На участке изгиба наблюдаются кварцевые жилы и штокверковые зоны, а также сдвиги-сбросы северо-восточного простирания. В строении месторождения участвуют отложения третьей (dg_3) и четвертой (dg_4) подсвит догадлынской свиты (Вамбольдт и др., 2011ф). Вмещающие породы представлены метапесчаниками, метаалевролитами, углеродисто-серицитовыми и серицитовыми сланцами, метаморфизованными в условиях серицит-

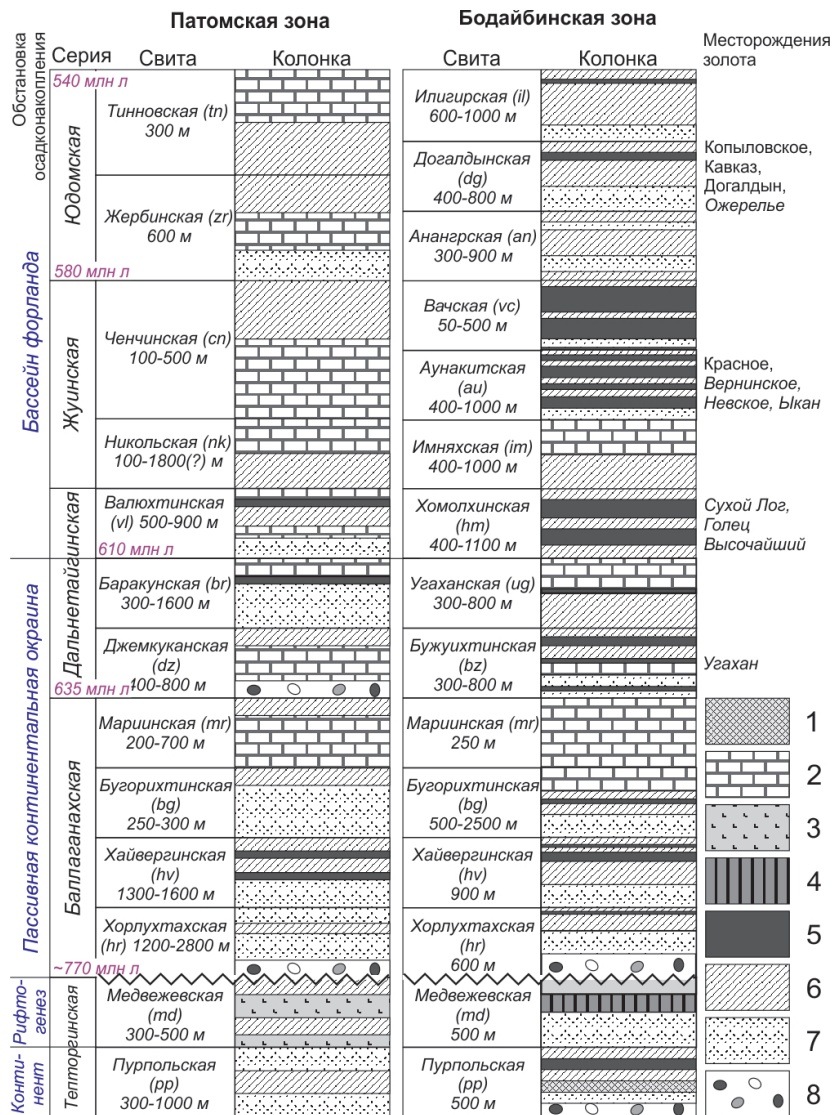


Рис. 2. Стратиграфическая корреляция неопротерозойских отложений патомского комплекса для Бодайбинской и Патомской зон Байкало-Патомского нагорья на основе стратиграфических колонок и данных (Иванов и др., 1995; Немеров и др., 2010; Чугаев и др., 2018). Курсивом выделены месторождения, расположенные в Маракано-Тунгусской синклинали.

1 – кварциты; 2 – известняки, доломиты; 3 – базальты; 4 – железистые кварциты; 5 – углеродистые сланцы; 6 – переслаивание сланцев и песчаников; 7 – песчаники; 8 – гравелиты, конгломераты.

Fig. 2. Stratigraphic correlation between the Neoproterozoic rocks of the Patom and Bodaibo zones within the Baikalo-Patom Highland based on stratigraphic schemes and data from (Ivanov et al., 1995; Nemerov et al., 2010; Chugaev et al., 2018). Deposits located in the Marakan-Tunguska Syncline are italicized.

1 – chert; 2 – limestone, dolostone; 3 – basalt; 4 – banded iron formation; 5 – carbonaceous shale; 6 – intercalation of shale and sandstone; 7 – sandstone; 8 – gravelites, conglomerate.

хлоритовой субфации зеленосланцевой фации (Паленова и др., 2013). Из магматических образований на площади известны редкие маломощные дайки лампрофиров. Ближайший гранитный массив расположен в 40 км к востоку (Аксенов и др., 2004ф). Золотое оруденение приурочено к ядру и северному крылу Копыловской антиклинали (Вамбольдт и др., 2011ф). Выделяют золото-сульфидно-кварце-

вый (кварцевые жилы и штокверковые зоны в ядре антиклинальной складки) и золото-сульфидный (минерализованные зоны во вмещающих породах) типы руд (Аксенов и др., 2004ф). Запасы золота категории C₁ + C₂ – 5260 кг при среднем содержании металла 1.5 г/т (Иванов, 2014; Информационный..., 2011ф).

В строении месторождения Кавказ выделяют сеть кварцевых жил, образующих полосу субширотного простирания шириной 200–800 м, контролирующуюся Миллионным и Корольковским взбросо-сдвигами. Последние осложняют северное крыло Кайро-Ленинской антиклинали и сопряжены со складками более высоких порядков, таких как Васильевская антиклиналь, к которой приурочено месторождение. Вмещающие породы относятся ко второй подсвите догалдынской свиты (dg_2), на незначительной территории наблюдаются отложения третьей и четвертой подсвит (dg_{3-4}) (Бенедюк и др., 1984ф; Вамбольдт и др., 2012ф). Они представлены метапесчаниками, метаалевролитами, углеродисто-серицитовыми и серицитовыми сланцами, по минералого-петрографическим и геохимическим характеристикам сходными с породами Копыловского месторождения (Паленова и др., 2013). Наблюдаются редкие дайки лампрофиров (Бенедюк и др., 1984ф). Золотое оруденение расположено в зоне влияния Миллионного разлома и в ядре Васильевской антиклинали (Вамбольдт и др., 2012ф). Выделяются золото-сульфидно-кварцевый (кварцевые жилы и штокверковые зоны в ядре антиклинальной складки) и золото-сульфидный (минерализованные зоны во вмещающих породах, преимущественно в зоне Миллионного разлома) типы руд (Суслов и др., 1981ф; Вамбольдт и др., 2012ф).

Месторождение Красное приурочено к шарнирам Рудной и Верхне-Бодайбинской антиклиналей третьего порядка, разделенных Ложковой синклиналью (Божко, Кузнецов, 2012ф; Кузьменко, 2013). Рудовмещающая антиклиналь представляет собой опрокинутую складку юго-восточного простирания, осложненную малоамплитудными дислокациями, сдвиговыми зонами, катаклазом, зонами трещиноватости (Tarasova et al., 2020). Месторождение залегает в аунакитской свите, отложения которой представлены переслаивающимися горизонтами углеродсодержащих ($C_{орг}$ до 4 мас. %) метапесчаников и алевролитов и согласно залегают на карбонатных породах имняхской свиты. В верхней части разреза породы перекрыты углеродистыми ($C_{орг} = 10$ мас. %) кварц-серицитовыми сланцами с прослоями углеродистых кварцевых песчаников вачской свиты (Tarasova et al., 2020). Все породы метаморфизованы в условиях серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации (Паленова и др., 2013). На месторождении выделено два рудных тела: верхнее протяженностью 1100 м и мощностью 60 м и нижнее протяженностью 1440 м и

мощностью 90 м, разделенные безрудными зонами. Золотое оруденение приурочено к зонам рассеянной и прожилково-вкрапленной пиритовой минерализации, в меньшей степени к кварцевым жилам и прожилкам с гнездами сульфидов (Tarasova et al., 2020).

Сульфидная минерализация на всех месторождениях образует послойную и рассеянную вкрапленность в сланцах, метапесчаниках и метаалевролитах, послойные кварц-пиритовые прожилки и просечки в штокверковых зонах, гнездовую и убогую рассеянную вкрапленность в кварцевых жилах. В рудах выделяются следующие последовательные минеральные ассоциации:

1. Седиментогенная и диагенетическая в виде послойной и рассеянной вкрапленности тонких кристаллов и фрамбоидов пирита-1, а также более поздних микроконкреций и «дендритовидных» форм пирита-1а. Очень редко в составе этой ассоциации встречаются тонкие выделения халькопирита и сфалерита (месторождение Красное).

2. Золотоносная метаморфогенная ассоциация мелко-среднезернистого ангедрального до эвгедрального микропористого пирита-2, обрастающего пирит-1 и 1а, с включениями нерудных минералов, сульфидов и самородного золота, а также субгедрального до эвгедрального пирита-2а в кварцевых линзах и прожилках (Паленова и др., 2015а).

3. Поздняя золотоносная ассоциация в секущих кварцевых и карбонат-кварцевых жилах с пиритом, халькопиритом, галенитом, сфалеритом и пирротинном в разных соотношениях (Паленова и др., 2015б).

Кроме того, за пределами рудных тел на месторождениях во вмещающих породах всех литологических разновидностей встречается крупнокристаллический не золотоносный эвгедральный пирит-3 размером до 2–5 см.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Фактический материал для исследования отобран сотрудниками ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (Е.В. Белогуб, К.А. Новоселовым, Е.Е. Паленовой) в ходе полевых работ 2010–2012 гг., а также представлен дочерними предприятиями Kopy Goldfields Ltd и ЗАО «СЖС Восток-Лимитед». Для изотопных анализов отбирались пробы из рудных зон и безрудных интервалов, пробоподготовка проводилась вручную Е.Е. Паленовой. Образцы были раздроблены в яшмовой ступке и просеяны до крупности

от -0.25 до $+0.10$ и -0.10 мм. Монофракции кварца и карбонатов извлечены и очищены с использованием бинокулярного микроскопа Stemi-2000C (Zeiss). Фракции сульфидов получены с помощью разделения минералов в бромформе (плотность 2.89 г/см^3) и очистки под бинокулярным микроскопом. Локальные пробы пирита разных генераций извлечены с поверхности образцов микробуром с алмазным наконечником.

Изотопный состав кислорода кварца определен в Аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток, Россия, аналитик д.г.-м.н. Т.А. Велливецкая). Проанализировано по пять проб жильного кварца из месторождений Копыловское и Красное и три пробы – из месторождения Кавказ. Пробы подготовлены лазерным методом фторирования. Кислород выделялся при нагреве проб инфракрасным лазером (MIR-10-30, New Wave Research, США) в атмосфере паров BrF_5 . Кислород очищен методом криогенного разделения, химическим методом с использованием KBr и хроматографическим методом на капиллярной колонке MOLSIV (длина 25 м, внутренний диаметр 0.32 мм, рабочая температура $60 \text{ }^\circ\text{C}$). Изотопный состав кислорода измерен на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (Thermo Scientific, Germany), работающем в режиме постоянного потока гелия, относительно лабораторного стандарта O_2 , откалиброванного по международному стандарту NBS-28 и стандарту UWG-2 (Valley et al., 1995). Воспроизводимость результатов определения $\delta^{18}\text{O}$ по стандартам составляла 0.1 ‰ , что соответствует величине 1σ при $n = 10$.

Изотопный состав кислорода воды во флюиде рассчитан с помощью уравнения $1000 \ln \alpha_{\text{Q-H}_2\text{O}} = 3.38(10^6 \times T^{-2}) - 2.9$, где T – температура кристаллизации в градусах Кельвина, выражение $1000 \ln \alpha_{\text{Q-H}_2\text{O}} \approx \delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$, а $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ – измеренное отношение изотопов кислорода в кварце (Clayton et al., 1972). Температуры гомогенизации первичных включений в изученных жилах месторождений Копыловское, Кавказ и Красное составляют $300\text{--}350$, $212\text{--}280$ и $260\text{--}330 \text{ }^\circ\text{C}$, соответственно (Ankushева et al., 2020). Учитывая, что температуры гомогенизации флюидных включений принимаются за минимальные температуры процесса минералообразования (Реддер, 1987), для расчета использованы максимальные значения полученных температур гомогенизации: 350 , 280 и $330 \text{ }^\circ\text{C}$ для месторождений Копыловское, Кавказ и Красное соответственно.

Изотопный состав кислорода и углерода в карбонатах месторождений Копыловское (три пробы) и Кавказ (две пробы), а также изотопный состав серы в сульфидах месторождений Копыловское (шесть проб), Кавказ (четыре пробы) и Красное (четыре пробы) определены на масс-спектрометре DeltaPlus Advantage производства фирмы Thermo Finnigan, сопряженном с высокотемпературным конвектором EA/ТС и элементным анализатором Flash1112 с интерфейсом ConFlo III (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс, Россия, аналитик к.г.-м.н. С.А. Садыков). Изотопные отношения измерены в непрерывном потоке газа. При определении изотопного состава кислорода и углерода в карбонатах использовались стандарты кальцита NBS-18 и NBS-19. Погрешность анализа при определении $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб.}}$ равна $\pm 0.08 \text{ ‰}$, VSMOW; $\delta^{13}\text{C} - \pm 0.06 \text{ ‰}$, PDB. При измерении изотопных отношений серы в сульфидах использован стандарт NBS-123, погрешность анализа $\delta^{34}\text{S}$ составила 0.08 ‰ , CDT.

Изотопные соотношения серы в пирите месторождения Копыловское (четыре анализа) также определены в ФГБУ ЦНИГРИ (г. Москва, Россия, аналитик д.г.-м.н. С.Г. Кряжев). Серу сульфидов переводили в SO_2 посредством реакции с CuO при $760 \text{ }^\circ\text{C}$ в вакууме с последующей криогенной очисткой газа и анализом изотопного состава серы на масс-спектрометре MI-1201. Результаты пересчитывали по отношению к метеоритному стандарту V–CDT. В качестве эталонов использовали лабораторный стандартный образец ЦНИГРИ МСА-«пирит» ($\delta^{34}\text{S} = +0.7 \text{ ‰}$) и стандартный образец сульфата NBS-127 ($\delta^{34}\text{S} = +20.3 \text{ ‰}$). Точность измерений составила $\pm 0.2 \text{ ‰}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изотопный состав кислорода жильного кварца. Жилы кварцевого и карбонат-кварцевого состава на изученных месторождениях представлены несколькими типами: 1) мощные ($1\text{--}8$ м) седловидные в замках складок и флексур; 2) тонкие (от нескольких мм до $1\text{--}5$ см) согласные слоистости и сланцеватости кварц-пиритовые прожилки и просечки; 3) секущие жилы различной мощности (от 1 см до $n \times 10$ см). Последние могут содержать золотоносную сульфидную минерализацию, представленную как пиритом, так и сульфидами Cu , Pb и Zn , а также рядом редких для изученных месторождений минералов (Паленова и др., 2015а, 2015б; Ankushева et al., 2020).

Таблица 1

**Изотопный состав кислорода жильного кварца
 месторождений Копыловское (1–5), Кавказ (6–8) и Красное (9–13)**

Table 1

**Oxygen isotopic composition of vein quartz of the
 Kopylovskoe (1–5), Kavkaz (6–8) and Krasnoe (9–13) deposits**

№ п/п	№ пробы	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$, ‰	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$, ‰ ¹	Примечание
1	338-36	+17.10	+11.32	1.96 г/т Au**
2	358/2	+17.00	+11.22	0.73 г/т Au**
3	3048-10	+16.70	+10.92	< 0.5 г/т Au**
4	504a/80.2	+17.00	+11.22	не золотоносная*
5	504a/145.65	+17.20	+11.42	не золотоносная*
6	284/5	+18.70	+10.59	с видимым золотом
7	3151-2	+18.70	+10.59	с видимым золотом
8	3151-0	+17.70	+9.59	41.3 г/т Au**
9	141422/251.8	+19.10	+12.74	1.85 г/т Au*
10	141429/85.1	+19.30	+12.94	1.62 г/т Au*
11	141425/135.6	+18.50	+12.14	с галенитом, Au, Ag (Паленова и др., 2015б)
12	141419/147	+19.00	+12.64	не золотоносная*
13	141422/349	+18.90	+12.54	не золотоносная*

Примечание. ¹ – рассчитанный изотопный состав кислорода воды (методику расчета см. в тексте). Здесь и в табл. 3: * – содержание золота в рядовой ядерной пробе интервала, к которому принадлежит жила (Божко, Кузнецов, 2012ф); ** – содержание золота в штучном образце по данным атомно-абсорбционного анализа (Perkin-Elmer 3110, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН), данные авторов.

Note. ¹ – the calculated $\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ isotopic composition (see text for calculation method). Here and in Table 3: * – the Au content in a common core sample of an interval, to which the vein belongs (Bozhko, Kuznetsov, 2012f); ** – the Au content in a hand specimen according to atomic absorption analysis (Perkin-Elmer 3110, SU FRC MG UB RAS), our data.

Изотопный состав кислорода кварца месторождений Копыловское, Кавказ и Красное укладывается в узкий диапазон значений $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ от +16.7 до +19.3 ‰ (табл. 1). Для месторождения Копыловское характерны слегка пониженные значения $\delta^{18}\text{O}$ от +16.7 до +17.2 ‰, для рудопроявления Красное – немного более высокие по сравнению с другими объектами: от +18.5 до +19.3 ‰. Изотопный состав кислорода в жильном кварце не зависит от содержания золота как в самой жиле, так и во вмещающих ее интервалах. Рассчитанный изотопный состав кислорода воды во флюиде постепенно увеличивается в ряду месторождений Кавказ (+9.59...+10.59 ‰), Копыловское (+10.92...+11.42 ‰), Красное (+12.14...+12.94 ‰).

Изотопный состав кислорода и углерода железо-магнезиальных карбонатов. Карбонаты в составе пелитоморфных пород догалдынской свиты на месторождениях Копыловское и Кавказ и аунакитской свиты на месторождении Красное распространены в виде крупных округлых и овальных выделений размером до 5–7 мм, а также ром-

боэдрических кристаллов размером 0.05–2.00 мм. В метапесчаниках карбонаты образуют пойкилокристаллы размером до 3 мм с элементами огранки, а также ксеноморфные выделения в составе цемента. Ранняя форма выделений – мелкие ромбоэдрические кристаллы анкерита или железистого доломита размером 0.05–0.30 мм, равномерно распределенные в породе, свободные от включений минералов матрицы и углеродистого вещества. Они часто захватываются крупными метакристаллами железисто-магнезиальных карбонатов («брейнерита») округлой, овальной или ромбоэдрической формы с включениями минералов матрицы и углеродистого вещества, частично замещаются ими (рис. 3). Также карбонаты присутствуют в жильной ассоциации и представлены железистым доломитом.

Изотопный состав кислорода поздних железомagneзиальных карбонатов из углеродистых сланцев месторождений Копыловское и Кавказ (табл. 2) близок значениям, полученным для жильного кварца ($\delta^{18}\text{O}_{\text{карб.}} = +16.64...+18.38$ ‰), тогда как значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб.}}$ жильных карбонатов Копылов-

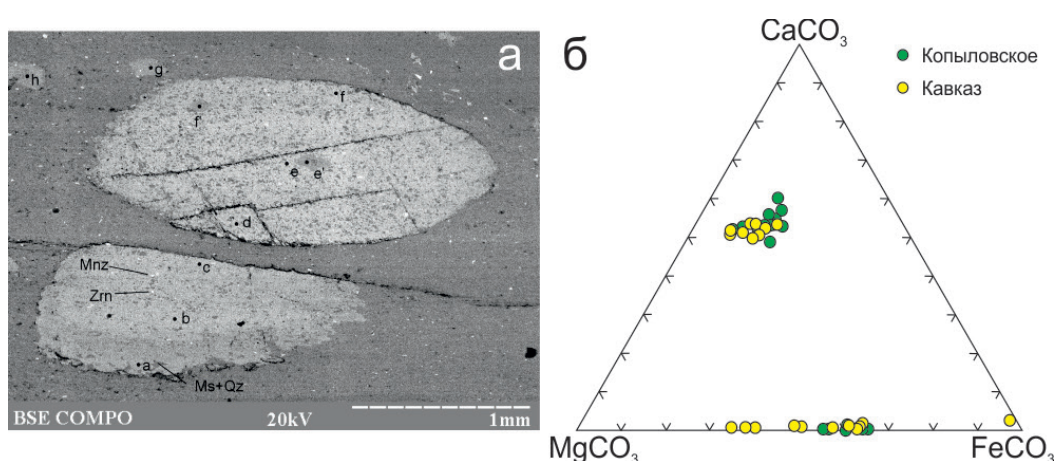


Рис. 3. Овальные агрегаты железо-магнезиальных карбонатов («брейнерита») с включениями мелких кристаллов железистого доломита (точки e', f, g, h), а также монацита (Mnz) и циркона (Zrn) в углеродистом сланце месторождения Копыловское (а) и вариации состава карбонатов на треугольной диаграмме, формульные коэффициенты (б).

СЭМ РЭММА-202М с ЭДА (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, аналитик В.А. Котляров).

Fig. 3. Oval aggregates of Fe-Mg carbonates (“breinerite”) with inclusions of small crystals of Fe-bearing dolomite (points e', f, g, h), monazite (Mnz) and zircon (Zrn) in carbonaceous shale of the Kopylovskoe deposit (a) and variations in the composition of carbonates on ternary diagram, apfu (б).

REMMA-202M SEM with EDA (SU FRC MG UB RAS, analyst V.A. Kotlyarov).

Таблица 2

**Изотопный состав кислорода и углерода карбонатов
месторождений Копыловское (1–3) и Кавказ (4, 5)**

Table 2

**Oxygen and carbon isotopic composition of carbonates of the
Kopylovskoe (1–3) and Kavkaz (4, 5) deposits**

№ п/п	№ пробы	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$, ‰	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$, ‰	Примечание
1	К-23	+18.38	-13.00	Брейнерит из сланца
2	511/135	+12.80	-13.30	Доломит из кварц-карбонатной жилы
3	514/126.5	+13.88	-13.16	Доломитовая жила с пиритом
4	516/70.3	+16.64	-9.76	Брейнерит из сланца
5	121518/72	+17.38	-8.93	Брейнерит из сланца

ского месторождения значительно ниже (+12.80 и +13.88 ‰). Вместе с тем, изотопный состав углерода карбоната во вмещающих породах и жилах Копыловского постоянен; $\delta^{13}\text{C} = -13.16 \dots -13.00$ ‰.

Изотопный состав серы сульфидов. Изотопный состав серы пирита разных генераций, а также халькопирита и галенита из поздних секущих кварцевых жил с золотом характеризуется широкими вариациями с отрицательными значениями (табл. 3). Измеренные изотопные соотношения серы для пирита месторождений Копыловское и Кавказ перекрываются и варьируют от -11.91 до -1.68 и от -16.86 до -6.66 ‰, соответственно. Изо-

топный состав серы пирита месторождения Красное имеет более высокие значения: -6.35 от до -0.09 ‰. Наиболее ранние (диагенетические) генерации пирита-1 характеризуются относительно высокими значениями $\delta^{34}\text{S} -1.68$ от до -0.09 ‰, тогда как в метаморфических генерациях (пирит-2, 2а, 3) происходит постепенное «облегчение» изотопного состава серы, причем весьма неравномерное (даже в одном образце значения $\delta^{34}\text{S}$ сильно варьируют, рис. 4) и в широких пределах от -16.86 до -3.7 ‰. Золотоносные галенит и халькопирит из поздних кварцевых жил также характеризуются низкими значениями $\delta^{34}\text{S}$: -3.12 и -6.32 ‰, соответственно. Примечательно, что сульфиды месторождения

Таблица 3

**Изотопный состав серы сульфидов
 месторождений Копыловское (1–10), Кавказ (11–14) и Красное (15–18)**

Table 3

**Sulfur isotopic composition of sulfides of the
 Kopylovskoe (1–10), Kavkaz (11–14) and Krasnoe (15–18) deposits**

№ п/п	№ пробы	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$, ‰	Примечание
1	514/86.1	-1.68	Пирит-1, тонкозернистый
2	513/90.1	-3.70	Пирит-2, мелкозернистый
3	514/216.4a	-11.71	Пирит-2, мелкозернистый, золотоносный
4	513/90.1	-7.30	Пирит-2, среднезернистый с оторочкой кварца
5	513/90.1	-8.20	Пирит-2а, из кварцевой жилы
6	513/90.1	-9.30	Пирит-2а, из кварцевой жилы
7	358/2	-3.75	Пирит-2а, из кварцевой жилы с золотом (0.73 г/т Au)**
8	514/126.5	-8.32	Пирит-2а, из карбонатной жилы
9	К-23	-9.23	Пирит-2а, из кварцевой жилы
10	514/216.4б	-11.91	Пирит-3, крупнокрист., не золотоносный
11	516/110.5	-9.61	Пирит-2, мелкозернистый, золотоносный зона Миллионного разлома (3.83 г/т Au)*
12	121518/109	-6.66	Пирит-3, крупнокрист., не золотоносный зона Миллионного разлома
13	516/119.25	-16.86	Пирит-3, крупнокрист., не золотоносный зона Миллионного разлома (0.08 г/т Au)*
14	3151-0	-6.32	Халькопирит из кварцевой жилы с золотом (41.3 г/т Au)**
15	141150/1516	-0.09	Пирит-1, тонкозернистый, конкреция
16	141401285	-6.35	Пирит-2, мелкозернистый, золотоносный
17	141411110	-0.74	Пирит-3, крупнокрист., не золотоносный
18	141425/135.6	-3.12	Галенит золотоносный с теллуридами из кварцевой жилы (1.13 г/т Au)*

Красное (аунакитская свита) характеризуются менее широкими вариациями изотопного состава серы, чем образцы из месторождений Копыловское и Кавказа (догалдынская свита), что, однако, может отражать недостаточность выборки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Вариации изотопного состава кислорода в жильном кварце подробно изучены для месторождения золота Сухой Лог и менее детально – для месторождений Голец Высочайший и Вернинское (Distler et al., 2004; Иконникова и др., 2009; Кряжев и др., 2009; Дубинина и др., 2014). Значения $\delta^{18}\text{O}$ в жильном кварце этих объектов варьируют от +14.8 до +18.1 ‰. В работе (Distler et al., 2004) получены более низкие значения (от +8.8 до +13.5 ‰), которые впоследствии оказались близки к данным

для валовых проб углеродистых сланцев Западного, Центрального и Основного участков месторождения Сухой Лог; $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = +8.9...+14.7$ ‰ (Иконникова и др., 2009) до +17.3 ‰ (Дубинина и др., 2014). Показано локальное «облегчение» изотопного состава кислорода вмещающих сланцев в зальбандах кварцевых прожилков, что объяснялось нарушением изотопно-кислородной системы вмещающих пород при формировании жил (Иконникова и др., 2009). Изотопный состав кислорода флюидной фазы, рассчитанный по уравнениям фракционирования в системе кварц-вода в зависимости от температуры, показал значения $\delta^{18}\text{O} = +10...+12$ ‰, при предполагаемой максимальной температуре кристаллизации в 360 °С, и +4...+6 ‰ при минимальной температуре 200 °С (Иконникова и др., 2009). На основании полученных данных сделан вывод о взаимодействии флюида с вмещаю-

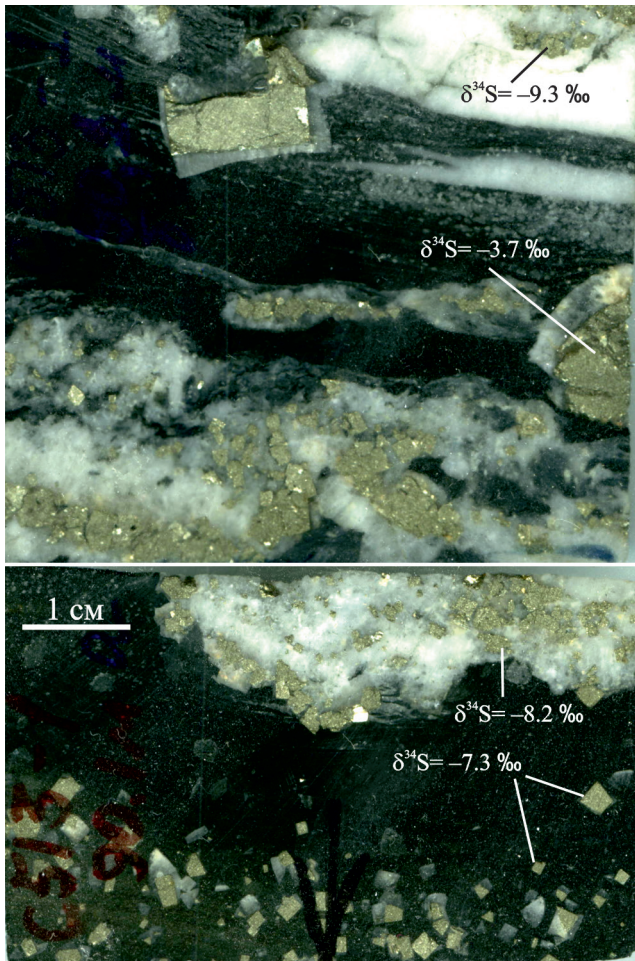


Рис. 4. Вариации изотопного состава серы в метаморфогенном мелко-, среднезернистом пирите-2 (вкрапленность в сланце) и пирите-2а (кварц-пиритовые прожилки).

Образец 513/90.1, месторождение Копыловское.

Fig. 4. Variations in $\delta^{34}\text{S}$ values of metamorphic fine- to medium-grained pyrite-2 (dissemination in shale) and pyrite-2a (quartz-pyrite veinlets).

Sample 513/90.1, Kopylovskoe deposit.

щими породами и отложении жильного кварца в условиях низкого соотношения флюид–порода, что отличает метаморфогенно-гидротермальное оруденение от магматогенно-гидротермального (Иконникова и др., 2009; Кряжев и др., 2009).

По-видимому, аналогичные процессы происходили и при формировании жильных и штокверковых руд месторождений Копыловское, Кавказ и Красное, изученных в этой работе. Узкий диапазон значений $\delta^{18}\text{O}$ для золотоносных и безрудных жил (от +16.7 до +19.3 ‰), близок к таковым для месторождений Сухой Лог (рис. 5), Вернинское и Голец Высочайший. Рассчитанный изотопный состав

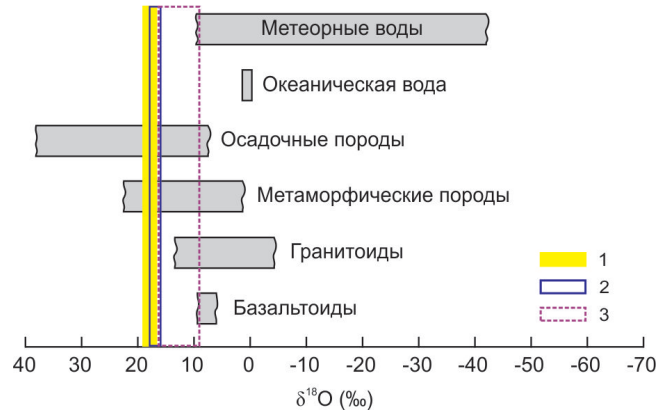


Рис. 5. Изотопный состав кислорода жильного кварца месторождений Копыловское, Кавказ и Красное (1) в сравнении с $\delta^{18}\text{O}$ жильного кварца (2) и вмещающих пород (3) месторождения Сухой Лог (Иконникова и др., 2009; Дубинина и др., 2014).

Диапазоны $\delta^{18}\text{O}$ в важнейших геологических резервуарах приведены по (Hoefs, 2009).

Fig. 5. Oxygen isotopic composition of vein quartz of the Kopylovskoe, Kavkaz and Krasnoe deposits (1) in comparison with $\delta^{18}\text{O}$ values of vein quartz (2) and host rocks (3) of the Sukhoy Log deposit (Ikonnikova et al., 2009; Dubinina et al., 2014).

The $\delta^{18}\text{O}$ ranges of most important geological reservoirs are given after (Hoefs, 2009).

кислорода воды во флюиде от +9.59 до +12.94 ‰ укладывается в диапазоны, оцененные для флюида на месторождении Сухой Лог. Вероятно, источник флюида и механизм формирования жильной минерализации был общим для всех объектов Ленской провинции, вне зависимости от их стратиграфического и регионального положения, по крайней мере, в зоне зеленосланцевой фации метаморфизма. Изотопно-кислородные данные показывают, что флюид не отвечает равновесию с магматическими породами при высоких температурах (Иконникова и др., 2009), а также средним значениям $\delta^{18}\text{O}$ в гранитоидах (Hoefs, 2009). Расчеты отношений флюид/порода (Дубинина и др., 2014) указывают на образование жильных тел с участием флюида дегидратационной или метаморфогенной природы под действием механизма пересыщения, вызванного перепадами давления («pressure solution»).

Изотопный состав кислорода в карбонатах месторождений Сухой Лог, Голец Высочайший и Вернинское также укладывается в диапазон значений от +15.5 до +20.0 ‰ (Кряжев и др., 2009; Дубинина и др., 2014), более высокие значения получены В.В. Дистлером с соавторами; от +24.2 до +29.8 ‰ (Distler et al., 2004). Анкерит месторождения Чер-

тово Корято, которое залегает в раннепротерозойской михайловской свите, имеет более легкий состав кислорода от +14.2 до +15.1 ‰ (Вагина, 2012). В целом, изотопный состав кислорода «брейнерита» из пород месторождений Копыловское и Кавказ (от +16.64 до +18.38 ‰), близок к таковому для жильного кварца этих объектов, тогда как жильный карбонат характеризуется более низкими значениями изотопного состава кислорода от +12.80 до +13.88 ‰. Последнее, вероятно, указывает на фракционирование изотопов кислорода при кристаллизации кварца и карбонатов в жилах. В то же время, можно предполагать общий источник флюида, участвовавшего в формировании кварцевых жил и поздних карбонатов во вмещающих породах.

Углерод в карбонатах месторождений Сухой Лог, Голец Высочайшей и Вернинское показывает значительно более высокие значения изотопного состава от -9.2 до -3.8 ‰ (Кряжев и др., 2009; Дубинина и др., 2014), чем в месторождениях Копыловское и Кавказе от -13.30 до -8.93 ‰. Еще более низкие значения (от -18.5 до -17.4 ‰ $\delta^{13}\text{C}$) имеют карбонаты месторождения Чертово Корято (Вагина, 2012). Узкий диапазон значений изотопного состава углерода карбонатов месторождения Копыловское в жилах и во вмещающих породах от -13.3 до -13.0 ‰ можно объяснить их кристаллизацией при участии одного эволюционирующего флюида. При сопоставлении изотопного состава углерода в разных месторождениях Бодайбинского района наблюдается широкий разброс данных для месторождений, залегающих в разных свитах: Чертово Корято – в михайловской, Сухой Лог и Голец Высочайший – в хомолхинской, Вернинское – в аунакитской и Копыловское и Кавказ – в догалдынской (рис. 6). Для месторождения Сухой Лог также характерна разница в изотопном составе углерода карбоната вмещающих пород (от -6.1 до -3.8 ‰) и жил (от -9.2 до -4.6 ‰).

Причины вариаций изотопного состава углерода в карбонатах дискуссионны. Так, С.Г. Кряжев с соавторами (2009), предполагал, что при карбонатизации пород определяющую роль играли процессы перераспределения углерода (органического и осадочно-карбонатного) в пределах рудовмещающих толщ при диагенезе и последующем метаморфизме без участия внешних источников углерода. По другой точке зрения, карбонат в рудовмещающих сланцах хомолхинской свиты месторождения Сухой Лог привнесен во время гидротермально-метасоматического процесса, а его источником

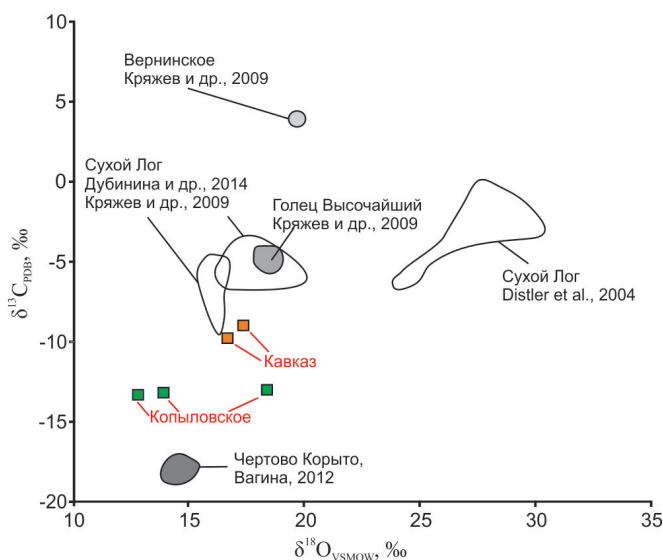


Рис. 6. Изотопный состав кислорода и углерода карбонатов месторождений Копыловское и Кавказ в сравнении с опубликованными данными по $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ для месторождений Сулой Лог, Голец Высочайший, Вернинское, Чертово Корято.

Fig. 6. Oxygen and carbon isotopic composition of carbonates of the Kopylovskoe and Kavkaz deposits in comparison with published $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values for the Sukhoy Log, Golets Vysochayshy, Verninskoe and Chertovo Koryto deposits.

были известняки имняхской свиты (Дубинина и др., 2014). Е.А. Вагина (2012) интерпретирует изотопный состав углерода анкерита месторождения Чертово Корято как результат смешения «тяжелого» мантийного углерода и «легкого» углерода керогена михайловской свиты (-26.2...-24.6 ‰ $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$). Отсутствие единого взгляда на процесс карбонатизации углеродисто-терригенных толщ Байкало-Патомского нагорья, по-видимому, связан с недостаточно систематическим подходом к его изучению. Возможно, более детальное исследование изотопного состава карбонатов во всем разрезе патомского комплекса, а также для других месторождений Ленской провинции позволит выработать единый взгляд на его генезис.

Наиболее систематические сведения получены по изотопии сульфидной серы, где главным минералом для исследования выступал пирит разных генераций, как в рудных зонах, так и в различных стратиграфических единицах за пределами месторождений. Кроме того, изучались пирротин и арсенипирит в месторождениях, где они присутствуют в качестве главных рудных минералов (табл. 4). Наиболее хорошо изучен изотопный состав серы

Таблица 4

Вариации изотопного состава серы в сульфидах месторождений Ленской золотоносной провинции

Table 4

Variations in S isotopic composition of sulfides from deposits of the Lena gold-bearing province

Месторождение (свита)	Минерал	$\delta^{34}\text{S}$, ‰	Ссылка
Чертово Корыто (михайловская, mh)	Пирит	-0.2...+4.7	Вагина, 2011
	Арсенопирит	-3.8...+1.3	Вагина, 2011
	Пирротин	+2.7...+7.1	Вагина, 2011
	Галенит	+1.8...+2.5	Вагина, 2011
Угахан (bz)	Пирит	+2.1...+9.1	Тарасова и др., 2022
	Пирротин	+8.3...+8.9	Тарасова и др., 2022
	Марказит	+8.8...+9.1	Тарасова и др., 2022
Сухой Лог (hm)	Пирит	+3.5...+15	Distler et al., 2004
		+6.2...+21.6	Гаврилов, Кряжев, 2008
		+5.8...+10.6	Кряжев и др., 2009
		+9.1...+21.2	Горячев и др., 2017
Голец Высочайший (hm)	Пирит	+4.5...+7.9	Кряжев и др., 2009
		+5.7...+8.9	Горячев и др., 2017
		+6.1...+6.9	Онищенко, Сокерина, 2021
		+5.3...+8.7	Тарасова и др., 2021
	Пирротин	+4.2...+9.5	Горячев и др., 2017
		+4.6...+7.0	Онищенко, Сокерина, 2021
		+3.8...+4.6	Тарасова и др., 2021
Вернинское (au)	Пирит	+4.5...+6.5	Кряжев и др., 2009
		+12.4...+17.8	Горячев и др., 2017
	Арсенопирит	+11.3...+11.6	Кряжев и др., 2009
		+10.5...+14.0	Горячев и др., 2017
Ыкан (au)	Пирит	-7.9...-2.4	Будяк и др., 2024
		-5.1...-3.4	Будяк и др., 2024
Красное (au)	Пирит	-7.4...-4.5	Tarasova et al., 2020
		-6.35...-0.09	Эта работа
	Галенит	-3.12	Эта работа
Копыловское (dg)	Пирит	-11.91...-1.68	Эта работа
Кавказ (dg)	Пирит	-16.86...-6.66	Эта работа
		Халькопирит	-6.32

пирита месторождения Сухой Лог (Distler et al., 2004; Кряжев и др., 2009; Иконникова, 2010; Кряжев, 2017), для которого установлено уменьшение значений $\delta^{34}\text{S}$ от +22 до +10 ‰, связанное с его гидротермально-метаморфической перекристаллизацией в рудной зоне (Иконникова, 2010). Закономерное «облегчение» серы сульфидов (пирита и пирротина) от ранних генераций к поздним установлено и для месторождения Чертово Корыто, однако здесь разброс значений невысок: от +4.7 до +1.7 ‰ в пирите и от +7.1 до +2.7 ‰ в пирротине (Вагина, 2011).

Отрицательные значения $\delta^{34}\text{S}$ установлены ранее для пирита и пирротина месторождений Красное (-7.4...-4.5) и Ыкан (-7.9...-2.4 ‰), залегающих в аунакитской свите в зоне серицит-хлоритовой и эпидот-амфиболитовой фаций метаморфизма, соответственно. От ранних генераций к поздним здесь наблюдается небольшое «утяжеление» сульфидной серы (Tarasova et al., 2020; Будяк и др., 2024). Значения $\delta^{34}\text{S}$, полученные для пирита и галенита месторождения Красное в этой работе, показывают более «тяжелый» состав серы пирита от -6.35 до -0.09 ‰, тем не менее, перекрываю-

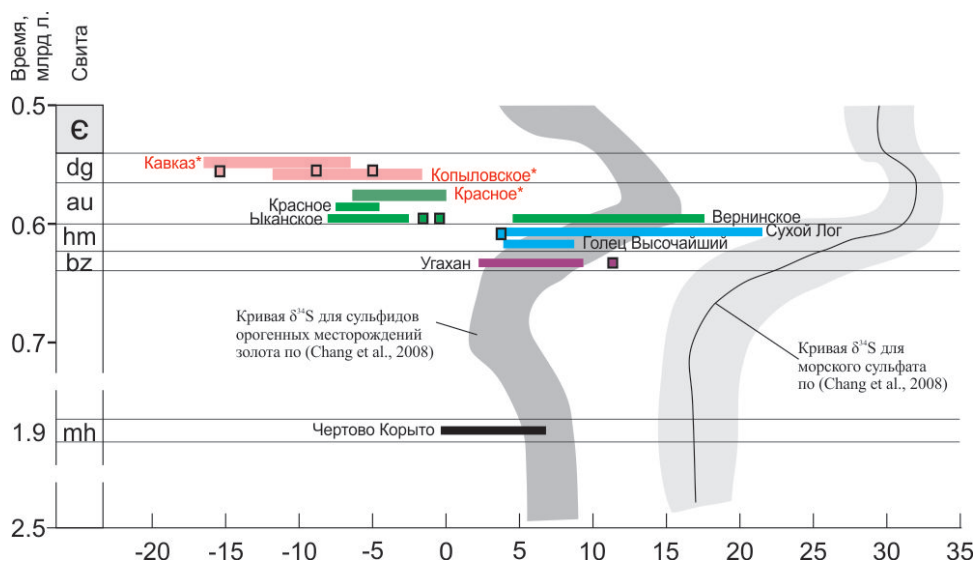


Рис. 7. Изотопный состав серы в сульфидах месторождений Копыловское, Кавказ и Красное (* – наши данные) в сравнении с $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов месторождений Чертово Кoryто (Вагина, 2011), Угахан (Тарасова и др., 2022), Голец Высочайший (Кряжев и др., 2009; Горячев и др., 2017; Онищенко, Сокерина, 2021; Тарасова и др., 2021), Сухой Лог (Distler et al., 2004; Гаврилов, Кряжев, 2008; Кряжев и др., 2009; Горячев и др., 2017), Вернинское (Кряжев и др., 2009; Горячев и др., 2017), Ыканское (Будяк и др., 2024), Красное (Tarasova et al., 2020). Точками показаны значения $\delta^{34}\text{S}$ в метаморфогенном пирите бужуихтинской, хомолхинской, аунакитской и догалдынской свит за пределами месторождений, по (Чугаев и др., 2018).

Fig. 7. Sulfur isotopic composition of sulfides from the Kopylovskoe, Kavkaz, and Krasnoe deposits (* – our data) in comparison with $\delta^{34}\text{S}$ values of sulfides from the Chertovo Koryto (Vagina, 2011), Ugakhan (Tarasova et al., 2022a), Golets Vysochayshiy (Kryazhev et al., 2009; Goryachev et al., 2017; Onishchenko, Sokerina, 2021; Tarasova et al., 2022b), Sukhoi Log (Distler et al., 2004; Gavrilov, Kryazhev, 2008; Kryazhev et al., 2009; Goryachev et al., 2017), Verninskoe (Kryazhev et al., 2009; Goryachev et al., 2017), Ykan (Budyak et al., 2024) and Krasnoe (Tarasova et al., 2020) deposits. The points show the $\delta^{34}\text{S}$ values of metamorphic pyrite of the Buzhuikhhta, Khomolkho, Aunakit and Dogaldyn formations outside the deposits, after (Chugaev et al., 2018).

щийся с предыдущими данными. Наиболее широкие вариации, и вместе с тем «легкий» изотопный состав, имеет сера пирита месторождений Копыловское и Кавказ, залегающих в догалдынской свите; от -11.91 до -1.68 и от -16.86 до -6.66 ‰, соответственно. Локальные колебания изотопного состава серы в пирите месторождения Копыловское показаны на рис. 4. В целом, от ранних генераций пирита к более поздним на этих объектах происходит неравномерное постепенное «облегчение» изотопного состава серы.

Установлено (Чугаев и др., 2018), что в Бодайбинской зоне за пределами месторождений золота изотопный состав серы метаморфогенного пирита закономерно изменяется в сторону «облегчения» от бужуихтинской свиты к догалдынской, причем значения $\delta^{34}\text{S}$ в пирите из бужуихтинской и хомолхинской свит положительные ($+10.86$ и $+3.44$ ‰, соответственно), а начиная с аунакитской свиты – отрицательные и постепенно уменьшаются. Так, в аунакитской свите значения $\delta^{34}\text{S}$ в пирите

составляют от -1.90 до -1.03 ‰, а к концу разреза в догалдынской свите уменьшаются до интервала от -15.49 до -8.86 ‰. Такое резкое «облегчение» сульфидной серы не согласуется с кривой $\delta^{34}\text{S}$ для сульфидов орогенных месторождений золота, которая, в целом, повторяет кривую $\delta^{34}\text{S}$ для морского сульфата (Chang et al., 2008). На основании этих данных сделан вывод о том, что на рубеже 600–580 млн лет бассейн осадконакопления (бассейн форланда) был изолирован от мирового океана и имел свой уникальный изотопный состав сульфата (Чугаев и др., 2018).

Сравнение изотопного состава серы сульфидов в рудах разных месторождений с данными, полученными по рудовмещающим свитам за пределами месторождений (Чугаев и др., 2018), показывает хорошую согласованность значений для целого ряда объектов, в том числе для месторождений Красное, Копыловское и Кавказ (рис. 7). С.Г. Кряжев (2017) предлагал использовать данные изотопного состава серы пирита для оконтуривания потенциальных слепых рудных зон месторождений сухоложского

типа по критерию выделения аномалий $\delta^{34}\text{S}$, превышающих +4 ‰. Как видно из табл. 4 и рис. 7, по этому критерию выделяются месторождения Угахан, Сухой Лог, Голец Высочайший и Вернинское, однако в эту область не попадают ряд других объектов, в том числе крупных – месторождения Красное и Чертово Корыто. В целом, широкие вариации и неоднородность изотопного состава серы сульфидов может свидетельствовать о ее коровом источнике, ведущую роль в котором играют рудовмещающие осадочные толщи, а отличия в поведении изотопного состава серы от ранних генераций к поздним, возможно, указывают на особенности механизмов рудоотложения в Ленской провинции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ впервые для золоторудных месторождений Копыловское, Кавказ и Красное, расположенных в пределах Байкало-Патомского нагорья, установлен изотопный состав кислорода в жильном кварце, а для месторождений Копыловское и Кавказ – также изотопный состав кислорода и углерода в карбонатах и серы в золотоносных сульфидах. Сходство изотопного состава кислорода в кварце золотоносных жил и поздних железо-магнезиальных карбонатов в рудовмещающих толщах указывает на их образование из единого эволюционирующего метаморфогенно-гидротермального флюида. Изотопный состав серы сульфидов изменяется в широких пределах и коррелирует с изменением значений $\delta^{34}\text{S}$ в метаморфогенном пирите вмещающих углеродисто-терригенных свит, что указывает на коровый источник формирования золото-сульфидных руд.

ЛИТЕРАТУРА

- Аксенов И.М., Кангаров И.Ю., Вилор Н.В. (2004ф) Отчет о результатах геологоразведочных работ 2000–2004 г. с подсчетом запасов в пределах золоторудного месторождения «Копыловское» по состоянию на 1.09.2004 (лицензия ИРК 01466 БР). Т. 1. Бодайбо–Иркутск, ООО «Угрюм-река», 92 с.
- Бенедюк В.Ф., Жукович М.А., Суслон Н.А. (1984ф) Отчет о результатах поисково-оценочных работ на рудное золото в пределах участка Кавказ за 1982–84 гг. Иркутск, Фонды Бодайбинской экспедиции, 78 с.
- Божко Е.Н., Кузнецов А.Ю. (2012ф) Информационный отчет по результатам поисково-оценочных работ на рудопоявлении «Красное» в 2011–2012 гг. (лицензия № ИРК 2804 БР). Бодайбо, 85 с.
- Будяк А.Е., Тарасова Ю.И., Чугаев А.В., Горячев Н.А., Веливецкая Т.А., Игнатъев А.В. (2024) Особенности формирования золоторудной минерализации в условиях амфиболитовой фации метаморфизма: месторождение Ыкан (Байкало-Патомский пояс). *Тихоокеанская геология*, 43(2), 64–87. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2024-43-3-64-87>
- Буряк В.А. (1982) *Метаморфизм и рудообразование*. М., Недра, 256 с.
- Буряк В.А., Хмелевская Н.М. (1997) Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). Владивосток, Дальнаука, 156 с.
- Бухаров А.А., Халилов В.А., Страхова Т.М., Черников В.В. (1992) Геология Байкало-Патомского нагорья по новым данным U-Pb датирования акцессорного циркона. *Геология и геофизика*, 33(12), 29–39.
- Вагина Е.А. (2011) Изотопный состав серы сульфидов руд золотого месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье). *Вестник Томского государственного университета*, 353, 195–198.
- Вагина Е.А. (2012) Изотопный состав углерода и кислорода в рудах золотого месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье). *Вестник Томского государственного университета*, 360, 168–171.
- Вамбольдт А.Я., Божко Е.Н., Синюков Ю.Д. (2012ф) Отчет о результатах геологоразведочных работ на лицензионной площади «Кавказ», выполненных в 2011 году (О-50-ХIII, Бодайбинский район). Бодайбо, 46 с.
- Вамбольдт А.Я., Краснощеков А.Н., Власова Н.А. (2011ф) Отчет по результатам геологоразведочных работ, выполненных в 2010 году. Бодайбо, 94 с.
- Верхоzin А.В., Мартыненко В.Г., Бенедюк В.Ф., Бураков В.В., Лесков В.В., Колмаков Ю.В., Кучеренко И.В. (2007) Месторождение золота Чертово Корыто. Отчет о результатах разведочных работ 1996–2007 гг. и технико-экономическое обоснование. Бодайбо, АО Тонода.
- Виноградов В.И., Пичугин Л.П., Быховер В.Н. и др. (1996) Изотопные признаки и время эпигенетических преобразований верхнедокембрийских отложений Уринского поднятия. *Литология и полезные ископаемые*, 1, 68–78.
- Гаврилов А.М., Кряжев С.Г. (2008) Минералогическо-геохимические особенности руд месторождения Сухой Лог. *Разведка и охрана недр*, 8, 3–16.
- Гладкочуб Д.П., Станевич А.М., Мазукабзов А.М., Донская Т.В., Писаревский С.А., Николь Г., Мотова З.Л., Корнилова Т.А. (2013) Ранние этапы развития палеоазиатского океана: данные по LA-ICP-MS датированию детритовых цирконов из позднедокембрийских толщ южного фланга Сибирского кратона. *Геология и геофизика*, 54(10), 1472–1490.
- Горячев Н.А., Игнатъев А.В., Веливецкая Т.А., Будяк А.Е., Тарасова И.Ю. (2017) Об изотопном составе серы сульфидов руд Бодайбинского синклиория. *Основные проблемы в учении об эндогенных рудных месторождениях: Новые горизонты*. М., ИГЕМ РАН, 406–408.

- Дистлер В.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К., Коваленкер В.А., Мохов А.В., Семейкина Л.К., Юдовская М.А. (1996) Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия). *Геология рудных месторождений*, 38(6), 467–484.
- Дубинина Е.О., Чугаев А.В., Иконникова Т.А., Авдеев А.С., Якушев А.И. (2014) Источники вещества и флюидный режим формирования кварц-карбонатных жил на месторождении золота Сухой Лог, Байкало-Патомское нагорье. *Петрология*, 22(4), 347–379. <https://doi.org/10.7868/S0869590314040037>
- Зорин Ю.А., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Пресняков С.Л., Сергеев С.А. (2008) Силурийский возраст главных складчатых деформаций рифейских отложений Байкало-Патомской зоны. *Доклады академии наук*, 423(2), 228–233.
- Зорин Ю.А., Скляров Е.В., Беличенко В.Г., Мазукабзов А.М. (2009) Механизм развития системы островная дуга – задуговой бассейн и геодинамика Саяно-Байкальской складчатой области в позднем рифее – раннем палеозое. *Геология и геофизика*, 50(3), 209–226.
- Иванов А.И. (2014) Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы). М., ФГУП ЦНИГРИ, 215 с.
- Иванов А.И., Лифшиц В.И., Перевалов О.В. и др. (1995) Докембрий Патомского нагорья. М., Недра, 352 с.
- Иконникова Т.А., Дубинина Е.О., Сароян М.Р., Чугаев А.В. (2009) Изотопный состав кислорода жильного кварца и вмещающих пород на месторождении Сухой Лог (Россия). *Геология рудных месторождений*, 51(6), 560–567.
- Иконникова Т.А. (2010) Поведение стабильных изотопов (O, C, S) в гидротермально-метасоматическом рудообразовании на месторождении Сухой Лог. Автореферат дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М., ИГЕМ РАН, 23 с.
- Информационный отчет по участку Копыловский (Иркутская область, Бодайбинский район). 2011ф. ООО «Копыловский», 19 с.
- Казакевич Ю.П., Шер С.Д., Жаднова Т.П., Стороженов А.А., Кондратенко А.К., Николаева Л.А., Аминов В.Б. (1971) Ленский золотоносный район. Т. 1. Стратиграфия, тектоника, магматизм и проявления коренной золотоносности. *Труды ЦНИГРИ*, вып. 85. М., Недра, 164 с.
- Кориковский С.П., Федоровский В.С. (1980) Ранний докембрий Патомского нагорья. М., Наука, 468 с.
- Кряжев С.Г. (2017) Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах. Дисс на соиск. степ. док. геол.-мин. наук. Москва, 288 с.
- Кряжев С.Г., Устинов В.И., Гриненко В.А. (2009) Особенности флюидного режима формирования золоторудного месторождения Сухой Лог по изотопно-геохимическим данным. *Геохимия*, 10, 1108–1118.
- Кузьменко А.А. (2013) Золотое оруденение в пределах Артемовского рудного узла на примере месторождения «Красное» (Бодайбинский район, Восточная Сибирь). *Материалы Третьей Российской молодежной Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования»*. М., ИГЕМ РАН, 146–150.
- Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., Мартыненко В.Г., Верховзин А.В. (2011) Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизм в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч. 1. Обзор петролого-геохимических исследований рудовмещающего субстрата. *Известия Томского политехнического университета*, 319(1), 35–41.
- Лаверов Н.П., Чернышев И.В., Чугаев А.В., Байрова Э.Д., Гольцман Ю.В., Дистлер В.В., Юдовская М.А. (2007) Этапы формирования крупномасштабной благороднометалльной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь): результаты изотопно-геохронологического изучения. *Доклады академии наук*, 415(2), 236–241.
- Неймарк Л.А., Рыцк Е.Ю., Гороховский Б.М., Амелин Ю.В., Овчинникова Г.В., Смирнов М.Ю., Грачева Т.В. (1993) Геохронологическое и изотопно-геохимическое изучение золоторудных месторождений Байкальской складчатой области / Изотопное датирование эндогенных формаций М., Наука, 124–146.
- Немеров В.К. (1989) Геохимическая специализация позднедокембрийских черных сланцев Байкало-Патомского нагорья. Дисс на соиск. степ. канд. геол.-мин. наук. Иркутск, ИГГ СО РАН, 144 с.
- Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Корнилова Т.А. (2010) Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона. *Геология и геофизика*, 51(5), 729–747.
- Онищенко С.А., Сокерина Н.В. (2021) Особенности формирования золоторудного черносланцевого месторождения Голец Высочайший (Бодайбинский рудный район). *Геология рудных месторождений*, 63(2), 154–173. <https://doi.org/10.1134/S1075701521020045>
- Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Заботина М.В. (2013) Минералого-геохимическая характеристика углеродистых толщ золоторудных объектов Артемовского узла (Бодайбинский район). *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*, 2(43), 29–36.
- Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Плотинская О.Ю., Новоселов К.А., Масленников В.В., Котляров В.А., Блинов И.А., Кузьменко А.А., Грибоедова И.Г. (2015а) Эволюция состава пирита на золоторудных месторождениях в черносланцевых толщах Копыловское и Кавказ (Бодайбинский район, Россия) по данным РСМА и ЛА-ИСП-МС. *Геология рудных месторождений*, 57(1), 71–92. <https://doi.org/10.7868/S0016777015010025>
- Паленова Е.Е., Блинов И.А., Заботина М.В. (2015б) Минералы серебра в кварцевых жилах рудопроявления золота Красное (Бодайбинский район). *Минералогия*, 2, 9–17.

- Покровский Б.Г., Буякайте М.И. (2015) Геохимия изотопов С, О и Sr в неопротерозойских карбонатах юго-западной части Патомского палеобассейна, юг Средней Сибири. *Литология и полезные ископаемые*, 2, 159–186. <https://doi.org/10.7868/S0024497X15010048>
- Рёддер Э. (1987) Флюидные включения в минералах. М., Мир, 632 с.
- Рундквист И.К., Бобров В.А., Смирнова Т.Н., Смирнов М.Ю., Данилова М.Ю., Ащеулов А.А. (1992) Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района. *Геология рудных месторождений*, 34(6), 3–15.
- Рыцк Е.Ю., Ковач В.П., Ярмолук В.В., Коваленко В.И., Богомоллов Е.С., Котов А.Б. (2011) Изотопная структура и эволюция континентальной коры Восточно-Забайкальского сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса. *Геотектоника*, 5, 17–51.
- Рыцк Е.Ю., Толмачева Е.В., Великославинский С.Д., Кузнецов А.Б., Родионов Н.В., Андреев А.А., Федосеев А.М. (2021) Результаты исследования циркона (SIMS) из гранитоидов Константиновского штока (район золоторудного месторождения Сухой Лог): возраст, источники и геологические следствия. *Доклады академии наук*, 496(2), 169–175. <https://doi.org/10.31857/S2686739721020171>
- Салоп Л.И. (1964) Геология Байкальской горной области. Т. 1. М., Недра, 586 с.
- Сулов Н.А., Мартыненко В.Г., Бобров В.А. (1981ф) Отчет о результатах поисковых работ на золото в пределах Васильевского рудного узла за 1978–1981 гг. Иркутск, Фонды Бодайбинской экспедиции, 67 с.
- Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Горячев Н.А., Игнатев А.В., Веливецкая Т.А., Блинов А.В., Горячева Е.М. (2022) Типоморфизм сульфидов золоторудного месторождения Угахан (Байкало-Патомское Нагорье). *Доклады академии наук*, 50(1), 12–17. <https://doi.org/10.31857/S2686739722030136>
- Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Иванов А.В., Горячев Н.А., Игнатев А.В., Веливецкая Т.А., Радомская Т.А., Блинов А.В., Бабяк В.Н. (2021) Типоморфизм, типохимизм и изотопно-геохимические характеристики сульфидов железа месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь). *Записки Российского минералогического общества*, 1, 1–14. <https://doi.org/10.31857/S0869605521010123>
- Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н., Хубанов В.Б., Буянтуев М.Д. (2017) Геодинамика позднепалеозойского батолитообразования в западном Забайкалье. *Петрология*, 25(4), 395–418. <https://doi.org/10.7868/S0869590317030049>
- Цыганков А.А., Литвиновский Б.А., Джань Б.М., Рейков М., Лю Д.И., Ларионов А.Н., Пресняков С.Л., Лепехина Е.Н., Сергеев С.А. (2010) Последовательность магматических событий на позднепалеозойском этапе магматизма Забайкалья (результаты U-Pb изотопного датирования). *Геология и геофизика*, 51(9), 1249–1276.
- Чернышев И.В., Чугаев А.В., Сафонов Ю.Г., Сароян М.Р., Юдовская М.А., Еремина А.В. (2009) Изотопный состав свинца по данным высокоточного MC-ICP-MS-метода и источники вещества крупномасштабного благороднометалльного месторождения Сухой Лог (Россия). *Геология рудных месторождений*, 51(6), 550–559.
- Чугаев А.В. (2024) Золоторудные месторождения орогенного типа Северного Забайкалья (Россия): геологическое строение, возраст, источники вещества и генезис. *Геохимия*, 69(9), 752–830. <https://doi.org/10.31857/S0016752524090015>
- Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В., Дубинина Е.О., Гареев Б.И., Шатагин К.Н., Тарасова Ю.И., Горячев Н.А., Скузоватов С.Ю. (2018) Изотопные (Sm-Nd, Pb-Pb и $\delta^{34}\text{S}$) и геохимические характеристики метасадочных пород Байкало-Патомского пояса (Северное Забайкалье) и эволюция осадочного бассейна в неопротерозойское время. *Петрология*, 26(3), 213–244. <https://doi.org/10.7868/S0869590318030019>
- Чумаков Н.М., Капитонов И.Н., Семихатов М.А., Леонов М.В., Рудько С.В. (2011) Вендский возраст верхней части патомского комплекса Средней Сибири: U/Pb LA-ICPMS датировки обломочных цирконов никольской и жербинской свит. *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 19(2), 115–119.
- Чумаков Н.М., Семихатов М.А., Сергеев В.Н. (2013) Опорный разрез вендских отложений юга Средней Сибири. *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 21(4), 26–52.
- Шер С.Д. (1972) Металлогения золота. М., Недра, 296 с.
- Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов Н.В., Мохов А.В., Антонов А.В., Сергеев С.А. (2011) Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов. *Геология рудных месторождений*, 53(1), 32–64.
- Ярмолук В.В., Будников С.В., Коваленко В.И., Антипин В.С., Горегляд А.В., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Козаков И.А., Ковач В.П., Яковлева З.С., Бережная Н.Г. (1997) Геохронология и геодинамическая позиция Ангаро-Витимского батолита. *Петрология*, 5(5), 451–466.
- Ярмолук В.В., Ковач В.П., Козаков И.К., Козловский А.М., Котов А.Б., Рыцк Е.Ю. (2012) Механизмы формирования континентальной коры Центрально-Азиатского складчатого пояса. *Геотектоника*, 4, 3–27.
- Ankusheva N.N., Palenova E.E., Shanina S.N. (2020) Fluid inclusion evidences for the P-T conditions of quartz veins formation in the black shale-hosted gold deposits, Bodaybo ore region, Russia. *Journal of Earth Science*, 31(3), 514–522. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1024-5>
- Chang Z., Large R.R., Maslennikov V. (2008) Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: Evidence for an early timing and a seawater sulfur source. *Geology*, 38(12), 971–974. <https://doi.org/10.1130/G25001A.1>

- Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Y.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Y.I., Gareev B.I., Batalin G.A., Rassokhina I.V., Oleinikova T.I. (2022) ^{40}Ar - ^{39}Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia). *Ore Geology Reviews*, 144, 104855. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>
- Clayton R.N., O'Neil J.R., Mayeda T. (1972) Oxygen isotope exchange between quartz and water. *Journal of Geophysical Research*, 77(17), 3057–3067. <https://doi.org/10.1029/JB077i017p03057>
- Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.Y., Lishnevskiy E.N. (2004) Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geology Reviews*, 24, 7–44. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.007>
- Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Stanevich A.M., Pisarevsky S.A., Zhang S., Motova Z.L., Mazukabzov A.M., Li H. (2019) U-Pb detrital zircon geochronology and provenance of Neoproterozoic sedimentary rocks in southern Siberia: New insights into breakup of Rodinia and opening of Paleo-Asian Ocean. *Gondwana Research*, 65, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.07.007>
- Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S. (2001) Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18, 1–75. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(01\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(01)00016-6)
- Hoefs J. (2009) Stable isotope geochemistry. Sixth Edition. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 285 p.
- Kuznetsov A.B., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Letnikova E.F., Kaurova O.K., Konstantinova G.V. (2013) Age constraints on the Neoproterozoic Baikal Group from combined Sr isotopes and Pb–Pb dating of carbonates from the Baikal type section, southeastern Siberia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.06.003>
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang Z. (2007) Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log Deposit, Lena gold province, Russia. *Economic Geology*, 102, 1233–1267. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233>
- Meffre S., Large R.R., Scott R., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Woodhead J., Hergt J.M., Maslennikov V. (2008) Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(9), 2377–2391. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.03.005>
- Melezhik V.A., Pokrovsky B.G., Fallick A.E., Kuznetsov A.B., Bujakaite M.I. (2009) Constraints on $^{87}Sr/^{86}Sr$ of Late Ediacaran seawater: insight from Siberian high-Sr limestones. *Journal of the Geological Society*, 166(1), 183–191. <https://doi.org/10.1144/0016-76492007-171>
- Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N., Kapitonov I., Hourigan J. (2015) Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia. *Precambrian Research*, 267(1), 39–71. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.015>
- Scott R.J., Large R.R., Meffre S., Maslennikov V.V. (2007) Structural controls on the development of the giant Sukhoi Log gold deposit, Siberia: Deformation in the Desert. *Geological Society of Australia Specialist Group in Tectonics and Structural Geology Alice Springs*, 55.
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., Reutsky V.N., Abramova V.D., Gareev B.I., Bryukhanova N.N., Parshin A.V. (2020) Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}C$, $\delta^{34}S$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasnyi gold mine (Baikal-Patom Highlands): Constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits. *Ore Geology Reviews*, 119, 103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>
- Valley J.W., Kitchen N., Kohn M., Niendorf C.R., Spicuzza M.J. (1995) UWG-2, a garnet standard for oxygen isotope ratios: Strategies for high precision and accuracy with laser heating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 5223–5231. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00386-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00386-X)
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiyev N.N. (2016) Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*, 7(3), 453–481. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010>

REFERENCES

- Aksenov I.M., Kangarov I.Yu., Vilor N.V. (2004) *Unpublished report on results of geological exploration works in 2000–2004 with calculation of reserves within the Kopylovskoe gold deposit as of 01.09.2004 (license IRK 01466 BR)*. T. 1. Bodaibo-Irkutsk, OOO Ugryum-reka, 92 p. (in Russian).
- Ankusheva N.N., Palenova E.E., Shanina S.N. (2020) Fluid inclusion evidences for the P-T conditions of quartz veins formation in the black shale-hosted gold deposits, Bodaybo ore region, Russia. *Journal of Earth Science*, 31(3), 514–522. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1024-5>
- Benedyuk V.F., Zhukovich M.A., Suslov N.A. (1984) *Unpublished report on results of prospecting and evaluation work for primary gold within the Caucasus area for 1982–84*. Irkutsk, Funds of the Bodaibo Expedition, 78 p. (in Russian).
- Bozhko E.N., Kuznetsov A.Yu. (2012) *Unpublished information report on results of prospecting and evaluation work at the Krasnoe ore deposit in 2011–2012 (license No. IRK 2804 BR)*. Bodaibo, 85 p. (in Russian).
- Budyak A.E., Tarasova Yu.I., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V. (2024) Formation of gold mineralization under amphibolite facies metamorphism: Ykan deposit (Baikal-Patom Belt). *Russian*

- Journal of Pacific Geology*, 18(3), 288–309. <https://doi.org/10.1134/S1819714024700052>
- Bukharov A.A., Khalilov V.A., Strakhova T.M., Chernikov V.V. (1992) Geology of the Baikal-Patom Highland based on new data of U-Pb dating of accessory zircons. *Geologiya i geofizika (Geology and Geophysics)*, 12, 29–39. (in Russian).
- Buryak V.A. (1982) *Metamorphism and ore formation*. Moscow, Nauka, 256 p. (in Russian).
- Buryak V.A., Khmelevskaya N.M. (1997) *Sukhoi Log – one of the world's largest gold deposit: genesis, localization of ore, and forecasting criteria*. Vladivostok, Dal'nauka, 156 p. (in Russian).
- Chang Z., Large R.R., Maslennikov V. (2008) Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: Evidence for an early timing and a seawater sulfur source. *Geology*, 38(12), 971–974. <https://doi.org/10.1130/G25001A.1>
- Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Safonov Y.G., Saroyan M.R., Yudovskaya M.A., Eremina A.V. (2009) Lead isotopic composition from data of high-precision MC-ICP-MS and sources of matter in the large-scale Sukhoi Log noble metal deposit, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 51(6), 496–504. <https://doi.org/10.1134/S1075701509060063>
- Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Y.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Y.I., Gareev B.I., Batalin G.A., Rassokhina I.V., Oleinikova T.I. (2022) ⁴⁰Ar-³⁹Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia). *Ore Geology Reviews*, 144, 104855. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>
- Chugaev A.V. (2024) Orogenic gold deposits of Northern Transbaikalia, Russia: geology, age, sources, and genesis. *Geochemistry International*, 62(9), 909–978. <https://doi.org/10.1134/S0016702924700484>
- Chugaev A.V., Budyak A.E., Chernyshev I.V., Dubinina E.O., Gareev B.I., Shatagin K.N., Tarasova Y.I., Goryachev N.A., Skuzovatov S.Y. (2018) Isotopic (Sm-Nd, Pb-Pb, and δ³⁴S) and geochemical characteristics of the metasedimentary rocks of the Baikal-Patom Belt (Northern Transbaikalia) and evolution of the sedimentary basin in the Neoproterozoic. *Petrology*, 26(3), 213–244. <https://doi.org/10.1134/S0869591118030025>
- Chumakov N.M., Kapitonov I.N., Semikhatov M.A., Leonov M.V., Rudko S.V. (2011) Vendian age of the upper part of the Patom complex in Middle Siberia: U/Pb LA-ICPMS dates of detrital zircons from the Nikolskoe and Zherba formations. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 19(2), 233–237. <https://doi.org/10.1134/S0869593811020043>
- Chumakov N.M., Semikhatov M.A., Sergeev V.N. (2013) Vendian reference section of southern middle Siberia. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 21(4), 359–382. <https://doi.org/10.1134/S0869593813040023>
- Clayton R.N., O'Neil J.R., Mayeda T. (1972) Oxygen isotope exchange between quartz and water. *Journal of Geophysical Research*, 77(17), 3057–3067. <https://doi.org/10.1029/JB077i017p03057>
- Distler V.V., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K., Kovalenker V.A., Mokhov A.V., Semeikina L.K., Yudovskaya M.A. (1996) Modes of occurrence of the platinum group elements and their origin in the Sukhoi Log gold deposit (Russia). *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy (Geology of Ore Deposits)*, 38(6), 413–428. (in Russian).
- Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.Y., Lishnevskiy E.N. (2004) Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geology Reviews*, 24, 7–44. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.007>
- Dubinina E.O., Chugaev A.V., Ikonnikova T.A., Avdeenko A.S., Yakushev A.I. (2014) Sources and fluid regime of quartz-carbonate veins at the Sukhoi Log gold deposit, Baikal-Patom Highland. *Petrology*, 22(4), 329–358. <https://doi.org/10.1134/S0869591114040031>
- Gavrilov A.M., Kryazhev S.G. (2008) Mineralogy and geochemistry of ore of the Sukhoi Log deposit. *Razvedka i okhrana nedr (Exploration and Protection of Mineral Resources)*, 8, 3–16 (in Russian).
- Gladkochub D.P., Stanevich A.M., Mazukabzov A.M., Donskaya T.V., Motova Z.L., Kornilova T.A., Pisarevsky S.A., Nicoll G. (2013) Early evolution of the Paleasian Ocean: LA-ICP-MS dating of detrital zircon from Late Precambrian sequences of the southern margin of the Siberian Craton. *Russian Geology and Geophysics*, 54(10), 1150–1163. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.09.002>
- Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Stanevich A.M., Pisarevsky S.A., Zhang S., Motova Z.L., Mazukabzov A.M., Li H. (2019) U-Pb detrital zircon geochronology and provenance of Neoproterozoic sedimentary rocks in southern Siberia: New insights into breakup of Rodinia and opening of Paleo-Asian Ocean. *Gondwana Research*, 65, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.07.007>
- Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S. (2001) Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18, 1–75. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(01\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(01)00016-6)
- Goryachev N.A., Ignatyev A.V., Velivetskaya T.A., Budyak A.E., Tarasova I.Yu. (2017) About S isotopic composition of sulfides from ores of the Bodaibo Synclinorium. *Osnovnye problemy v uchenii ob endogennykh rudnykh mestorozhdeniyakh: novyye gorizonty (Main Problems in the Doctrine of Endogenic Ore Deposits: New Horizons)*. Moscow, IGEM RAN, 406–408 (in Russian).
- Hoefs J. (2009) *Stable isotope geochemistry*. Sixth Edition. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 285 p.
- Ikonnikova T.A., Dubinina E.O., Saroyan M.R., Chugaev A.V. (2009) Oxygen isotopic composition of quartz veins and host rocks at the Sukhoi Log deposit, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 51(6), 505–512. <https://doi.org/10.1134/S1075701509060075>
- Ikonnikova T.A. (2010) Behavior of stable isotopes (O, C, S) in hydrothermal-metasomatic ore formation at the Sukhoi Log deposit. (Abstract of candidate dissertation). M., IGEM RAS, 23 p. (in Russian).

- Ivanov A.I. (2014) *Gold of Baikal-Patom: geology, mineralization, prospects*. Moscow, FGUP TsNIGRI, 215 p. (in Russian).
- Ivanov A.I., Lifshits V.I., Perevalov T.M. et al. (1995) *Precambrian of the Patom Highlands*. Moscow, Nedra, 262 p. (in Russian).
- Kazakevich Yu.P., Sher S.D., Zdanova T.P., Storozhenko A.A., Kondratenko A.K., Nikolaeva L.A., Aminev V.B. (1971) Lena gold-bearing region. Vol. 1. Stratigraphy, tectonics, magmatism, and primary gold deposits. *Trudy TsNIGRI. Proceedings of TsNIGRI*, is. 85. Moscow, Nedra, 161 p. (in Russian).
- Korikovskiy S.P., Fedorovskiy V.S. (1980) *Early Precambrian of the Patom Highland*. Moscow, Nauka, 468 p. (in Russian).
- Kryazhev S.G. (2017) *Genetic models and criteria for the forecasting gold deposits in carbonaceous-terrigenous complexes. (Doctor dissertation)*. Moscow, 288 p. (in Russian).
- Kryazhev S.G., Ustinov V.I., Grinenko V.A. (2009) Fluid regime at the Sukhoi Log gold deposit: Isotopic evidence. *Geochemistry International*, 47(10), 1041–1049. <https://doi.org/10.1134/S0016702909100085>
- Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martunenko V.G., Verkhozin A.V. (2011) Petrological-geochemical features of wall-rock metasomatism in the Sukhoi Log gold deposit (Lena region). Part 1. Review of petrological and geochemical studies of the ore-bearing substrate. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta (Proceedings of the Tomsk Polytechnical University)*, 319(1), 35–41 (in Russian).
- Kuzmenko A.A. (2013) Gold mineralization within the Artemovskiy ore cluster on example of the Krasnoe deposit (Bodaibo district, Eastern Siberia). *Materialy tret'ey Rossiyskoy molodezhnoy shkoly «Novoye v poznanii protsessov rudoobrazovaniya» (Proceedings of the Third Russian Youth School "New in the Understanding of Ore Formation Processes")*. Moscow, IGEM RAN, 146–150. (in Russian).
- Kuznetsov A.B., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Letnikova E.F., Kaurova O.K., Konstantinova G.V. (2013) Age constraints on the Neoproterozoic Baikal Group from combined Sr isotopes and Pb–Pb dating of carbonates from the Baikal type section, southeastern Siberia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2011.06.003>
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevskiy L.V., Chang Z. (2007) Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log Deposit, Lena gold province, Russia. *Economic Geology*, 102, 1233–1267. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233>
- Laverov N.P., Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Bairova E.D., Gol'tsman Y.V., Distler V.V., Yudovskaya M.A. (2007) Formation stages of the large-scale noble metal mineralization in the Sukhoi Log deposit, East Siberia: results of isotope-geochronological study. *Doklady Earth Sciences*, 415(1), 810–814. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07050339>
- Meffre S., Large R.R., Scott R., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevskiy L.V., Woodhead J., Hergt J.M., Maslennikov V. (2008) Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(9), 2377–2391. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.03.005>
- Melezhik V.A., Pokrovskiy B.G., Fallick A.E., Kuznetsov A.B., Bujakaite M.I. (2009) Constraints on $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of Late Ediacaran seawater: insight from Siberian high-Sr limestones. *Journal of the Geological Society*, 166(1), 183–191. <https://doi.org/10.1144/0016-76492007-171>
- Neimark L.A., Ryt'sk E.Yu., Gorokhovskiy B.M. (1993). Geochronology and isotope geochemistry of gold deposits in the Baikal fold region. In: *Isotopic Dating of Endogenic Rocks*. Moscow, Nauka, 124–146 (in Russian).
- Nemerov V.K. (1989) *Geochemical specialization of the Late Precambrian black shales of the Baikal-Patom Highland. (Candidate dissertation)*. Irkutsk, 144 p. (in Russian).
- Nemerov V.K., Razvozhayeva E.A., Budyak A.E., Stanevich A.M., Kornilova T.A. (2010) Biogenic sedimentation factors of mineralization in the Neoproterozoic strata of the Baikal-Patom region. *Russian Geology and Geophysics*, 51(5), 572–586. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.04.012>
- Onishchenko S.A., Sokerina N.V. (2021) Features of the formation of the Golets Vysoschaiskii gold-ore black-shale deposit (Bodaibo ore district). *Geology of Ore Deposits*, 63(2), 138–155. <https://doi.org/10.1134/S1075701521020045>
- Palenova E.E., Belogub E.V., Novoselov K.A., Maslennikov V.V., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Plotinskaya O.Y., Griboedova I.G., Kuzmenko A.A. (2015a) Chemical evolution of pyrite at the Kopylovskiy and Kavkaz black shale-hosted gold deposits, Bodaybo district, Russia: Evidence from EPMA and LA-ICP-MS data. *Geology of Ore Deposits*, 57(1), 64–84. <https://doi.org/10.1134/S107570151501002X>
- Palenova E.E., Belogub E.V., Novoselov K.A., Zabolotina M.V. (2013) Mineralogical and geochemical characteristics of carbonaceous strata of gold objects of the Artemovskiy cluster (Bodaibo district). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiyskoy akademii yestestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdeniy (News of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits)*, 2(43), 29–36. (in Russian).
- Palenova E.E., Blinov I.A., Zabolotina M.V. (2015b) Silver minerals from quartz veins of the Krasnoe deposit (Bodaibo ore region). *Mineralogiya (Mineralogy)*, 2, 9–17. (in Russian).
- Pokrovskiy B.G., Bujakaite M.I. (2015) Geochemistry of C, O, and Sr isotopes in the Neoproterozoic carbonates

- from the southwestern Patom paleobasin, southern Middle Siberia. *Lithology and Mineral Resources*, 50(2), 144–169. <https://doi.org/10.1134/S0024490215010046>
- Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N., Kapito-nov I., Hourigan J. (2015) Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia. *Precambrian Research*, 267(1), 39–71. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.015>
- Roedder E. (1984) Fluid inclusions. In: Ribbe, P.H. (Ed.), *Review in Mineralogy*, vol. 12. Mineralogical Society of America, p. 644.
- Rundqvist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N., Cmirnov M.Y., Danilova M.Y., Ascheulov A.A. (1992) Stages of formation of the Bodaibo ore district. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy (Geology of Ore Deposits)*, 34, 3–15 (in Russian).
- Rytsk E.Y., Kovach V.P., Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Bogomolov E.S., Kotov A.B. (2011) Isotopic structure and evolution of the continental crust in the East Transbaikalian segment of the Central Asian Foldbelt. *Geotectonics*, 45(5), 349–377. <https://doi.org/10.1134/S0016852111050037>
- Rytsk E.Y., Tolmacheva E.V., Velikoslavinsky S.D., Kuznetsov A.B., Rodionov N.V., Andreev A.A., Fedoseenko A.M. (2021) Results of the study of zircon (SIMS) from granitoids of the Konstantinovskii Stock (area of the Sukhoi Log gold deposit): Age, sources, and geological consequences. *Doklady Earth Sciences*, 496(2), 146–150. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21020173>
- Salop L.I. (1964) *Geology of the Baikal mountain region*. Vol. 1. Moscow, Nedra, 586 p. (in Russian).
- Scott R.J., Large R.R., Meffre S., Masslenikov V.V. (2007) Structural controls on the development of the giant Sukhoi Log gold deposit, Siberia: Deformation in the Desert. *Geological Society of Australia Specialist Group in Tectonics and Structural Geology Alice Springs*, 55.
- Sher S.D. (1972) *Metallogeny of gold*. Moscow, Nedra, 256 p. (in Russian).
- Suslov N.A., Martynenko V.G., Bobrov V.A. (1981) *Unpublished report on results of prospecting for gold within the Vasilievsky ore cluster for 1978–1981*. Irkutsk, Funds of the Bodaibo Expedition, 67 p. (in Russian).
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., Reutsky V.N., Abramova V.D., Gareev B.I., Bryukhanova N.N., Parshin A.V. (2020) Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): Constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits. *Ore Geology Reviews*, 119, 103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Blinov A.V., Goryacheva E.M. (2022a) Typomorphism of Pyrite from the Ugakhan Gold Deposit (Baikal–Patom Highlands). *Doklady Earth Sciences*, 503(1), 81–85. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22030138>
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Radomskaya T.A., Blinov A.V., Babyak V.N. (2022b) Indicator and Isotope Geochemical Characteristics of Iron Sulfides from the Golets Vysochaisky Deposit, East Siberia. *Geology of Ore Deposits*, 64(7), 503–512. <https://doi.org/10.1134/S1075701522070108>
- Tsygankov A.A., Burmakina G.N., Khubanov V.B., Buyantuev M.D. (2017) Geodynamics of Late Paleozoic batholith-forming processes in Western Transbaikalia. *Petrology*, 25(4), 396–418. <https://doi.org/10.1134/S0869591117030043>
- Tsygankov A.A., Litvinovsky B.A., Jahn B.M., Reichow M.K., Liu D.Y., Larionov A.N., Presnyakov S.L., Lepekhina Y.N., Sergeev S.A. (2010) Sequence of magmatic events in the Late Paleozoic of Trans-Baikal region, Russia (U-Pb isotope dating). *Russian Geology and Geophysics*, 51(9), 972–994. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.08.007>
- Unpublished information report on the Kopylovsky area (Irkutsk region, Bodaybo district)*. LLC “Kopylovsky”, 2011ф. 19 p.
- Vagina E.A. (2011) S isotopic composition of sulfides of ores from the Chertovo Koryto gold deposit (Patom Highland). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta (Bulletin of the Tomsk State University)*, 353, 195–198 (in Russian).
- Vagina E.A. (2012) C and O isotopic composition of ores of the Chertovo Koryto gold deposit (Patom Highland). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta (Bulletin of the Tomsk State University)*, 360, 168–171 (in Russian).
- Valley J.W., Kitchen N., Kohn M., Niendorf C.R., Spicuzza M.J. (1995) UWG-2, a garnet standard for oxygen isotope ratios: Strategies for high precision and accuracy with laser heating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 5223–5231. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00386-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00386-X)
- Vamboldt A.Ya., Bozhko E.N., Sinyukov Yu.D. (2012) *Unpublished report on results of geological exploration work on the licensed area “Kavkaz” carried out in 2011 (O-50-XIII, Bodaibo district)*. Bodaibo, 46 p. (in Russian).
- Vamboldt A.Ya., Krasnoshchekov A.N., Vlasova N.A. (2011) *Unpublished report on results of geological exploration work carried out in 2010*. Bodaibo, 94 p. (in Russian).
- Verkhovozin A.V., Martynenko V.G., Benedyuk V.F., Burakov V.V., Leskov V.V., Kolmakov Yu.V., Kucherenko I.V. (2007) *Chertovo Koryto gold deposit. Unpublished report on exploration results and feasibility study of 1996–2007*. ZAO Tonoda Gold, Bodaibo (in Russian).
- Vinogradov V.I., Pichugin L.P., Bykhover V.N. (1996) Isotopic features and dating of epigenetic alterations of the Upper Precambrian deposits of the Ura Uplift. *Litologiya i poleznye iskopaemye (Lithology and Mineral Resources)*, 31, 60–69 (in Russian).
- Yarmolyuk V.V., Budnikov S.V., Kovalenko V.I., Antipin V.S., Goreglyad A.V., Sal’nikova E.B., Kotov

A.B., Kozakov I.K., Kovach V.P., Yakovleva S.Z., Berezhnaya N.G. (1997) Geochronology and geodynamic setting of the Angara-Vitim batholith. *Petrologiya (Petrology)*, 5(5), 401–414. (in Russian).

Yarmolyuk V.V., Kozlovsky A.M., Kovach V.P., Kozakov I.K., Kotov A.B., Rytsk E.Y. (2012) Mechanisms of continental crust formation in the Central Asian Foldbelt. *Geotectonics*, 46(4), 251–272. <https://doi.org/10.1134/S001685211204005X>

Yudovskaya M.A., Distler V.V., Mokhov A.V., Rodionov N.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. (2011) Relationship between metamorphism and ore formation at the Sukhoi Log gold deposit hosted in black slates from the data of U-Th-Pb isotopic SHRIMP-dating of accessory minerals. *Geology of Ore Deposits*, 53(1), 27–57. <https://doi.org/10.1134/S1075701511010077>

Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiyev N.N. (2016) Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*, 7(3), 453–481. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010>

Zorin Yu.A., Mazukabzov A.M., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Presnyakov S.L., Sergeev S.A. (2008) Silurian age of major folding in Riphean deposits of the Baikal-Patom zone. *Doklady Earth Sciences*, 423(1), 1235–1239. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08080114>

Zorin Yu.A., Sklyarov E.V., Belichenko V.G., Mazukabzov A.M. (2009) Island arc-back-arc basin evolution: implications for Late Riphean-Early Paleozoic geodynamic history of the Sayan-Baikal folded area. *Russian Geology and Geophysics*, 50(3), 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.06.022>

Информация об авторах

Паленова Екатерина Евгеньевна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; palenova@mineralogy.ru

Садыков Сергей Ахматович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; sadykov@mineralogy.ru

Information about the authors

Ekaterina E. Palenova – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia; palenova@mineralogy.ru

Sergey A. Sadykov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia; sadykov@mineralogy.ru