

УДК 550.4

DOI: 10.24930/2500-302X-2025-25-1-134-155

## Геохимические особенности руд и вмещающих пород крупного месторождения золота Вернинское (Бодайбинский район, Россия)

А. А. Котов, А. В. Волков, Т. М. Злобина, К. Ю. Мурашов

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35, e-mail: kotovaleksey@gmail.com

Поступила в редакцию 06.05.2024 г., принята к печати 05.07.2024 г.

*Объект исследования* – крупное месторождение золота Вернинское (Бодайбинский район, Иркутская область). *Цель* – изучить распределение микроэлементов и РЕЕ в рудах и вмещающих породах и сделать выводы об особенностях рудообразования. *Материалы и методы* – рентгенфлуоресцентный анализ и масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой. *Результаты*. Вмещающие породы незначительно обогащены широким спектром элементов (по мере уменьшения коэффициента обогащения): As, Ag, W, Cr, Au, Ni, Cd, Ba, V, Bi, Sc, Sr, Co, Mo, Cs и Ti. Руды сильно обогащены Au, As и Ag. Обогащение руд Mo и Bi может быть связано с повышенной примесью этих элементов в диагенетическом пирите, широко развитом во вмещающих породах. Обогащенность Sr указывает на заимствование его в руды из вмещающих известковистых песчаников. Отложение заметного количества арсенопирита в рудах могло быть связано с дополнительным поступлением As из пород рудовмещающей аунакитской свиты, обогащенных этим элементом. *Выводы*. Показано, что по индикаторным геохимическим показателям большинство вмещающих пород месторождения относятся к сланцам и грауваккам, а некоторые образцы – к Fe-песчаникам. Распределение микроэлементов и РЕЕ в рудах свидетельствует о взаимодействии рудообразующего флюида с вмещающими породами. Полученные результаты соответствуют метаморфогенной модели формирования орогенных месторождений золота. Приведенная в статье информация имеет практическое значение для региональных прогнозно-металлогенических построений, поисков и оценки месторождений золота.

**Ключевые слова:** Бодайбинский район, месторождение Вернинское, прожилково-вкрапленные руды, геохимические особенности, микроэлементы, условия рудообразования

### Источник финансирования

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГЕМ РАН

## Geochemical Characteristics of Host Rocks and Ores of the Verninskoe Large Gold Deposit (Bodaibo District, Russia)

Aleksey A. Kotov, Aleksandr V. Volkov, Tatiana M. Zlobina, Konstantin Yu. Murashov

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, RAS, 35 Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia, e-mail: kotovaleksey@gmail.com

Received 06.05.2024, accepted 05.07.2024

*Research subject.* The Verninskoe large gold deposit (Bodaibo District, Irkutsk Oblast). *Aim.* The study of trace and rare earth element distribution in ores and host rocks and the specific features of ore formation. *Materials and Methods.* The geochemical features of ores and host rocks of the Verninskoe deposit are studied by X-ray fluorescence analysis and inductively coupled plasma mass spectrometry. *Results.* The host rocks are slightly enriched in a wide range of elements (given in the order of enrichment factor decreases): As, Ag, W, Cr, Au, Ni, Cd, Ba, V, Bi, Sc, Sr, Co, Mo, Cs, and Ti. The ores are highly enriched in Au, As, and Ag. The enrichment of the ores in Mo and Bi may be due to the relatively high admixture of these elements in diagenetic pyrite, which is widespread in host rocks. The Sr enrichment indicates its capture from the host calcareous sandstones. The deposition of a significant amount of arsenopyrite in the ores could be due to an additional supply of As from the rocks of the ore-bearing Aunakit Formation enriched in As. *Conclusions.* According

**Для цитирования:** Котов А.А., Волков А.В., Злобина Т.М., Мурашов К.Ю. (2025) Геохимические особенности руд и вмещающих пород крупного месторождения золота Вернинское (Бодайбинский район, Россия). *Литосфера*, **25**(1), 134-155. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-1-134-155>. EDN: CFOJTH

**For citation:** Kotov A.A., Volkov A.V., Zlobina T.M., Murashov K.Yu. (2025) Geochemical Characteristics of Host Rocks and Ores of the Verninskoe Large Gold Deposit (Bodaibo District, Russia). *Lithosphere (Russia)*, **25**(1), 134-155. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-1-134-155>. EDN: CFOJTH

© А.А. Котов, А.В. Волков, Т.М. Злобина, К.Ю. Мурашов, 2025

to geochemical indicator values, the host rocks of the deposit can be classified mostly as shales and graywackes, while a number of samples are represented by Fe-sandstones, litharenites, and sublitharenites. Trace element and REE distribution in the ores indicates the interaction of the ore-forming fluid with the host rocks. The results obtained correspond to the metamorphogenic model of formation of the orogenic gold deposits. The information given in the article is of practical importance for regional metallogenic forecasting and modeling and gold prospecting and evaluation.

**Keywords:** Bodaibo District, Verninskoe deposit, veinlet–disseminated ores, specific geochemical features, trace elements, ore formation conditions

#### Funding information

This work was supported by the IGEM RAS state assignment

#### Acknowledgements

The authors thank A.E. Budyak for constructive criticism and valuable recommendations in preparing this article.

## ВВЕДЕНИЕ

Многие крупные орогенные месторождения золота приурочены к региональным разломам в складчатых орогенных поясах, образовавшихся в зонах коллизии турбидитных террейнов (Groves et al., 1998). Эти разломы играют важную роль как транспортные транслитосферные каналы в земной коре для метаморфогенных рудоносных флюидов (Goldfarb, Pitcairn, 2023).

В подобных структурах центральной части Бодайбинского золоторудного района (Иркутская область) локализовано крупное месторождение Вернинское (рис. 1, врезка), доказанные и вероятные запасы которого, по данным ПАО “Полюс”, суммарно превышают 565 т золота, а добыча в 2021 г. достигла 9.1 т<sup>1</sup>. На долю Бодайбинского района приходится не менее 96% областного и почти 9.3% общероссийского объема добытого за 2022 г. золота.

Месторождение Вернинское расположено в 860 км от г. Иркутска и в 146 км от г. Бодайбо. Площадь месторождения Вернинское находится в 12 км юго-восточнее месторождения Сухой Лог – крупнейшего месторождения золота в России.

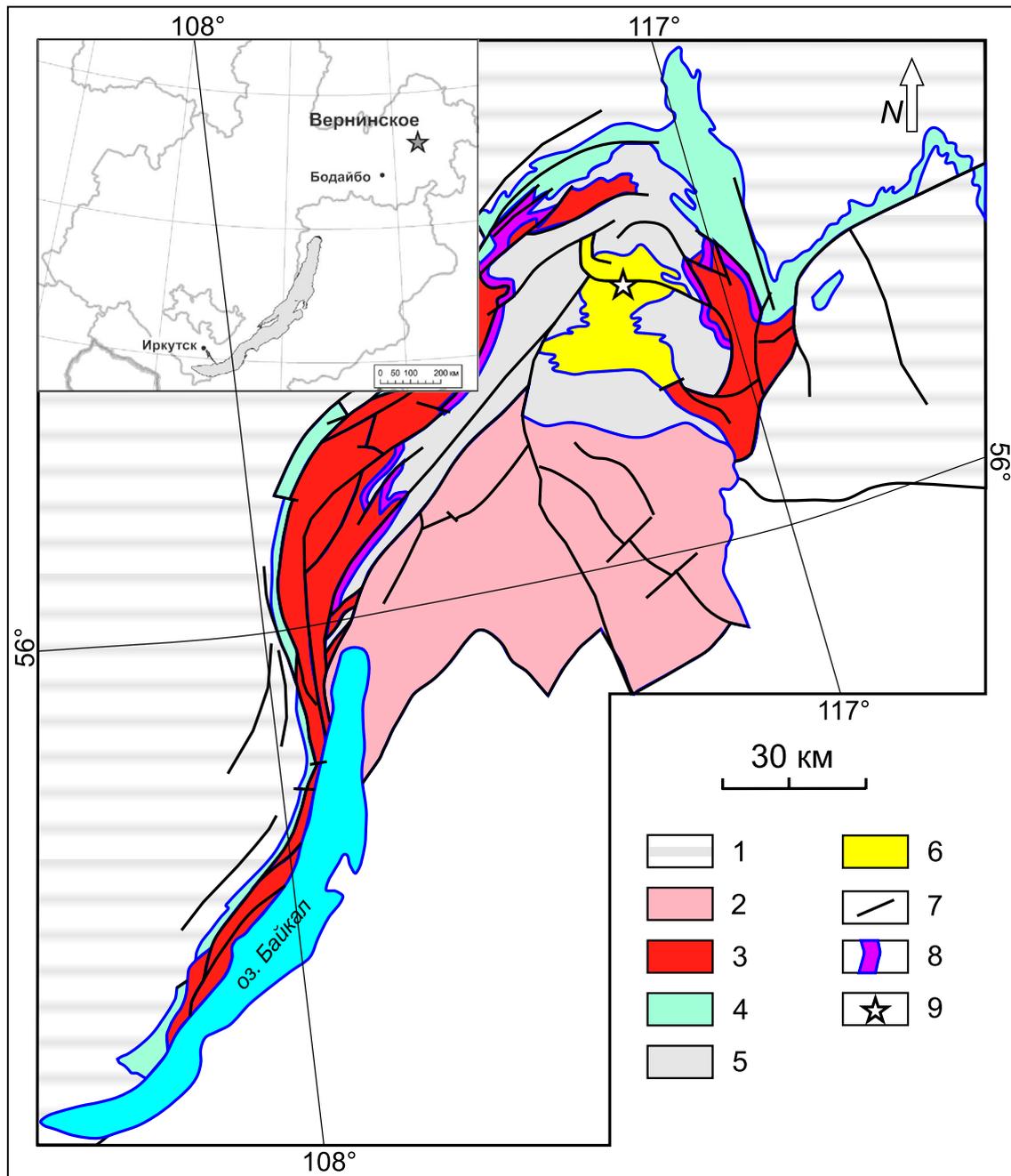
Месторождение Вернинское открыто в 1932 г. в результате геологоразведочных работ под руководством В.В. Ковалевича. В 1940–1980-х гг. площадь месторождения изучалась в ходе региональных геолого-съемочных, геохимических и геофи-

зических работ. В 1974–1977 гг. “Рудной” партией детально опойскована Вернинская рудная зона (Агарев, Суслов, 1978ф). В 1977–1990 гг. оценку и разведку месторождения проводила Кропоткинская партия. В 1985 г. на баланс поставлены запасы по жильной зоне Первенец (Черепанов и др., 1985ф). По результатам всех работ, проведенных на месторождении Вернинское в 1999 г., составлен отчет о запасах (Попов, 1999ф). В 2005 г. право на разведку с последующей отработкой золоторудного месторождения получило золотодобывающее предприятие ОАО “Первенец”, входящее в состав ПАО “Полюс”. Итоги выполненных геологоразведочных работ ПАО “Полюс” на месторождении Вернинское подведены в статье (Мартыненко и др., 2017).

Несмотря на длительную историю изучения, геохимические особенности руд и вмещающих пород месторождения Вернинское исследованы современными аналитическими методами явно недостаточно.

В статье кратко обобщена геологическая информация, приведены новые данные по распределению микроэлементов и REE, на основании которых сделаны выводы о геохимических особенностях руд и вмещающих пород месторождения. Известно, что микроэлементы и REE активно реагируют на окислительно-восстановительную среду обстановок рудообразования, что позволяет использовать их в качестве геохимических индикаторов источников вещества и решении вопросов генезиса золотого оруденения.

<sup>1</sup> [https://polyus.com/ru/operations/operating\\_mines/verninskoe/](https://polyus.com/ru/operations/operating_mines/verninskoe/)



**Рис. 1.** Позиция Бодайбинского золоторудного района и месторождения Вернинское в Байкало-Патомском поясе, по (Рыцк и др., 2011) с исправлениями.

1 – Сибирский кратон, 2 – Байкало-Муйский внутренний пояс, 3 – выступы раннедокембрийского фундамента, 4 – прибайкальский краевой прогиб, 5 – неопротерозойские континентальные рифты (Олокитский) и эпикратонные прогибы (Мамский, Патомский), 6 – Бодайбинская впадина, 7 – границы тектонических подразделений и разрывные нарушения, 8 – маркирующая толща низкокальцевых платобазальтов и продуктов размыва древней коры выветривания в структурах неопротерозойских рифтов и прогибов, 9 – позиция месторождения Вернинское.

**Fig. 1.** Position of the Bodaibo gold ore district and the Verninskoe deposit in the Baikalo–Patom belt (BPB), modified after (Rytsk et al., 2011).

1 – Siberian craton, 2 – Baikalo–Muya inner belt, 3 – Early Precambrian basement highs, 4 – Baikalo foredeep, 5 – Neoproterozoic continental rifts (Olokit) and epicratonic troughs (Mama, Patom), 6 – Bodaibo depression, 7 – boundaries of tectonic units and faults, 8 – marker sequence of low-K plateau basalts and erosion products of ancient weathering crust in the structures of Neoproterozoic rifts and troughs, 9 – position of the Verninskoe deposit.

## ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Авторами изучена коллекция руд и вмещающих пород месторождения Вернинское, включающая 25 образцов, отобранных в полевые сезоны 2015–2019 гг. сотрудниками ИГЕМ РАН из рудных тел 1, 2 и жильной зоны Первенец в карьере месторождения, а также из керна скважин (слепое рудное тело 3).

Определение концентрации главных и примесных элементов в пробах выполнено методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа на вакуумном спектрометре последовательно действия (с дисперсией по длине волны), модель Axios mAX Advanced производства компании PANalytical (Нидерланды), в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН. Спектрометр снабжен рентгеновской трубкой мощностью 4 кВт с Rh-анодом. Максимальное напряжение на трубке 60 кВ, максимальный анодный ток 160 мА. При градуировке спектрометра использованы отраслевые и государственные стандартные образцы химического состава горных пород и минерального сырья. В качестве контрольных образцов использованы стандартные образцы Геологической службы США (USGS). Анализ выполнен по методикам Научного совета по аналитическим методам исследований Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского, точности количественного анализа – по ОСТ РФ 41-08-205-04. Данная категория точности применяется для массового анализа проб минеральных веществ, контрольных анализов и при подсчете запасов месторождений полезных ископаемых (аналитик А.И. Якушев).

Измерения концентраций породообразующих элементов, микроэлементов и REE проводили методом ICP-MS в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН на масс-спектрометре с ионизацией индуктивно связанной плазмой X-Series II (аналитик Я.В. Бычкова). Вскрытие образцов осуществляли по методике кислотного разложения. Навеску порошка пробы, истертой до консистенции пудры, массой 50–100 мг разлагали в тефлоновых виалах Savillex в смеси концентрированных кислот: плавиковой и азотной (5:1) 1.5 мл и соляной 0.5 мл. Разложение производили в микроволновой печи Milestone. Фториды металлов разрушали путем трехкратного выпаривания пробы в концентрированной соляной кислоте под лампами до сухих солей. Затем к пробе добавляли 1 мл соляной кислоты, после чего в препарат добавляли 0.5 н HNO<sub>3</sub> до объема 50 мл. В качестве стандартных использовались аттестованные образцы BVVO-2 и COQ-1, разложенные с серией исследуемых проб. Пределы обнаружения элементов составляли от 0.1 нг/г для тяжелых

и средних по массе элементов с возрастанием до 1 нг/г для легких элементов. Погрешность анализа 1–3 отн. %. Для расчета концентраций элементов использовалась серия калибровочных растворов, приготовленных из стандартного раствора ICP-MS-68A, HPS (A и B) с диапазоном концентраций 0.03–10 мг/г.

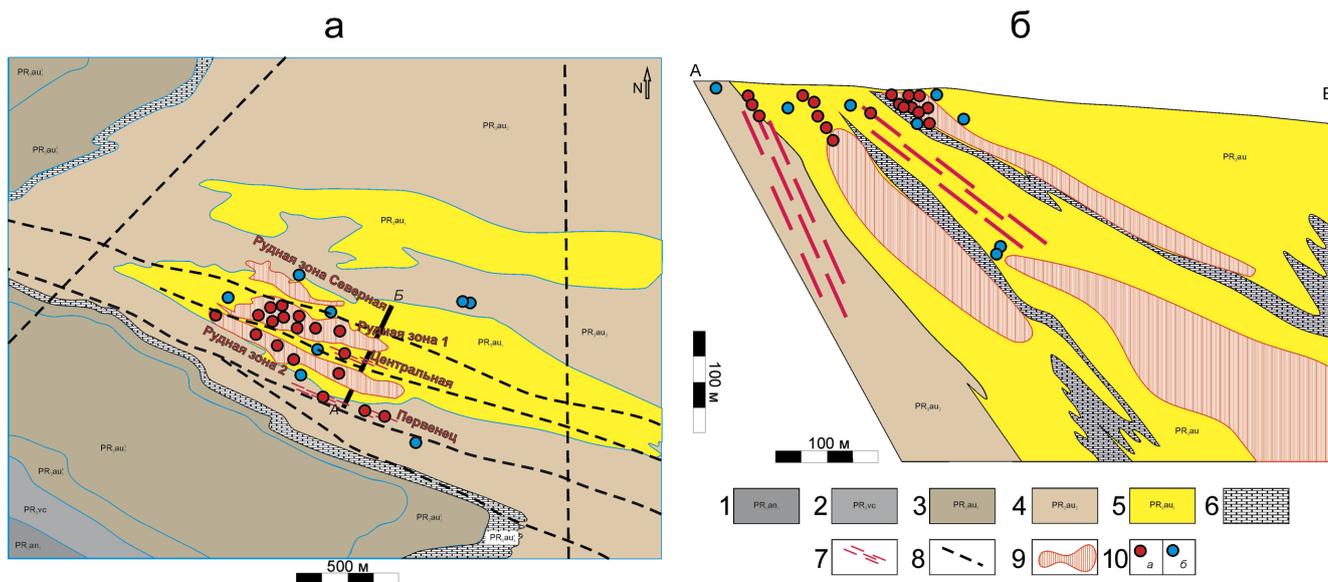
## ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение Вернинское расположено в Бодайбинском золоторудном районе Ленской золотоносной провинции и находится в пределах Вернинско-Невского рудного поля, которое входит в Маракано-Гунгусский рудно-россыпной узел (Мартыненко и др., 2017).

Бодайбинский рудный район приурочен к сочленению Сибирской рудной платформы и Байкало-Патомо-Витимского складчатого пояса (БПВСП) – восточной части Саяно-Байкальской складчатой области. Байкало-Патомо-Витимский складчатый пояс вклинивается на 250 км в южный край Сибирской платформы (см. рис. 1.), между Алданским щитом на востоке и основной частью кратона на западе. Формирование золотоносных терригенных формаций завершилось во второй половине вендакембрия, когда активная континентальная окраина восточноазиатского типа прекратила свое существование (Рыцк и др., 2011).

Протерозойские толщи Бодайбинского района подверглись зеленосланцевой фации (хлорит-мусковитовой ступени) регионального метаморфизма каледонского этапа (Русинов и др., 2008), предшествующему складчатости (Буряк, 1982; Иванов и др., 1995; Зорин и др., 2008). Породы аунакитской свиты характеризуются значительным количеством органического вещества ( $C_{орг} \approx 1.5–2$  мас. %), сохранившейся обломочной фракцией, представленной кварцем, цирконом, монацитом, а также высокотемпературными минералами: биотитом, роговой обманкой, графитом и турмалином, свидетельствующими о региональном метаморфизме зеленосланцевой фации (Кучеренко и др., 2012). Второй этап преобразования пород в Бодайбинском районе связан с герцинской активизацией эндогенных процессов, сопровождавшейся интенсивными стрессовыми деформациями и рассланцеванием (Русинов и др., 2008; Vanin et al., 2022; и др.).

Непосредственно в пределах Вернинско-Невского рудного поля выходов магматических пород не обнаружено. По геофизическим данным, на глубине 6 км предполагается не выходящий на поверхность интрузив гранитоидов, возраст которого не определен (Distler et al., 2004). Ближайший локальный выход палеозойских гранитоидов – Константиновский шток – расположен в 15 км северо-западнее рудного поля (U-Pb возраст по циркону около  $303 \pm 3$  млн лет, SIMS (Рыцк и др., 2021)).



**Рис. 2.** Схематическая карта месторождения Вернинское с проекциями рудных зон на поверхность (а) и разрез (б), по (Мартыненко и др., 2017), с дополнениями.

1–6 – метаморфизованные осадочные породы свит: 1 – Ангарской (PR<sub>3an</sub>), 2 – Вачской (PR<sub>3vc</sub>), 3–6 – Аунакитской (PR<sub>3au</sub>) (3–5 – чередование высокоуглеродистых филлитовых сланцев (3), слабоуглеродистых алевролитов (4), песчаников (5), 6 – горизонт известняков); 7 – жильная зона Первенец, 8 – разрывные нарушения, выявленные по геофизическим данным, 9 – зоны прожилково-вкрапленных руд, 10 – проекции мест отбора проб из рудных тел (а) и вмещающих толщ (б), на поверхность и разрез.

**Fig. 2.** Schematic map of the Verninskoye deposit with ore zones (a) and cross section (б), modified after (Martynenko et al., 2017).

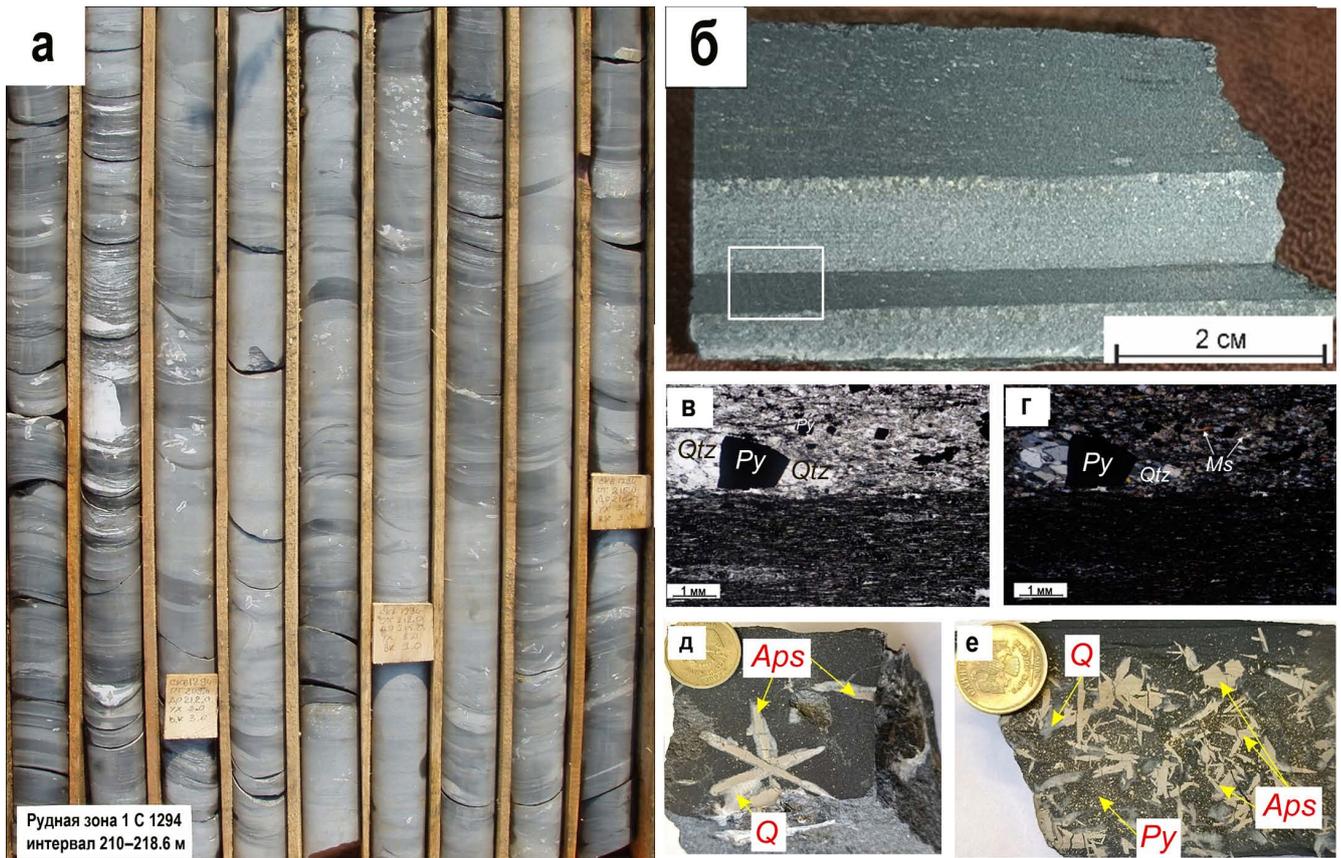
1–6 – metamorphosed sedimentary rocks: 1 – of the Angara (PR<sub>3an</sub>), 2 – Vacha (PR<sub>3vc</sub>), and 3 –Aunakit (PR<sub>3au</sub>) formations (3–5 – alternation of high-carbon phyllitic shales (3) with low-carbon siltstones (4) and sandstones (5) and 6 – limestone horizon; 7 – Pervenets vein zone; 8 – faults established from geophysical data; 9 – zones of veinlet–disseminated ores, 10 – projections of sampling sites from ore bodies (a) and host strata (б), to the schematic map and cross section.

Месторождение Вернинское, включая рудную зону Первенец, пространственно приурочено к Вернинской антиклинали и локализовано в ритмично переслаивающихся слабометаморфизованных отложениях верхней части нижней подсвиты и нижней части средней подсвиты аунакитской свиты верхнего протерозоя (Мартыненко и др., 2017).

Первая пачка нижней подсвиты аунакитской свиты (PR<sub>3au</sub><sup>1</sup>), преимущественно песчаниковая (Мартыненко и др., 2017), в пределах месторождения не выявляется, залегая на более глубоких горизонтах. Вторая пачка нижней подсвиты (PR<sub>3au</sub><sup>2</sup>) на поверхность также не выходит и вскрыта только на глубине скважинами колонкового бурения в ядре лежащей Вернинской антиклинали. Она представлена ритмичным переслаиванием углеродистых филлитовидных сланцев, алевролитов и слюдисто-кварцевых песчаников. Для нее характерно наличие в составе пород анкерита и сидерита, которые совместно с углисто-слюдистым веществом образуют цементирующую ткань породы. В пределах пачки на глубоких горизонтах выявлена кварцево-жильная зона Центральная и пространственно совмещаемая с ней рудная зона № 3.

Третья пачка нижней подсвиты (PR<sub>3 au</sub><sup>3</sup>) – основная рудовмещающая и поэтому наиболее детально изученная (Мартыненко и др., 2017). Мощность пачки в пределах Вернинской антиклинали составляет 170–230 м. Она представлена ритмичным переслаиванием горизонтов флишоидов, слагаемых преимущественно темноцветными углеродистыми филлитовидными сланцами и кварц-серицитовыми песчаниками, включая маркирующий горизонт переслаивания известковистых песчаников – известняков. Мощность этих отложений увеличивается по падению с юга на север от 15–20 м в лежащем крыле Вернинской антиклинали до 20–35 м в ее висячем крыле. Золотоносность в известковистых породах невысокая. Третья пачка вмещает наиболее интенсивные зоны прожилково-вкрапленной кварц-сульфидной минерализации с заключенными в них рудными зонами № 1 и 2.

Морфология антиклинали подчеркивается вторым маркирующим горизонтом известковистых песчаников третьей пачки нижней подсвиты аунакитской свиты (рис. 2). Строение антиклинали осложнено дислокационными зонами мелких приразломных складок, сопряженными с разрывными нарушениями.



**Рис. 3.** Рудовмещающие породы и различные типы руд месторождения Вернинское.

а – кварц-сульфидная прожилково-вкрапленная минерализация рудной зоны № 1 (рядовые руды); б – чередование светло-серой мусковит-кварц-карбонатной гидротермально-измененной породы с вкрапленностью сульфидов и более темной, тонко-полосчатой, рассланцованной, гидротермально-измененной породы, насыщенной углеродистым веществом (штуф); в – прозрачно-полированный шлиф (местоположение показано на “б”) – контакт светло-серой мусковит-кварц-карбонатной породы и тонкополосчатого рассланцованного метapelита с гнездом кварца, ассоциирующего с пиритом; г – то же в скрещенных николях; д, е – богатые арсенипиритовые руды (см. табл. 1).

**Fig. 3.** Wallrocks and various ore types of the Verninskoe deposit.

а – Quartz–sulfide veinlet–disseminated mineralization of ore zone no. 1 (run-of-mine ores); б – alternation of light gray muscovite–quartz–carbonate hydrothermally altered rock with sulfide dissemination and darker, thin-banded foliated hydrothermally altered rock saturated with carbonaceous material (grab sample); в – thin section (location is shown in “б”) – contact of light gray muscovite–quartz–carbonate rock and thin-banded foliated metapelite with a quartz pocket associated with pyrite; г – the same in crossed nicols; д, е – rich arsenopyrite ores (see Table 1).

В породах месторождения Вернинское просматривается характерная для этого этапа макро- и микрополосчатость (рис. 3б). Более темные слои в породах соответствуют повышенному содержанию углеродистого вещества по отношению к более светлым слоям, так же как и на месторождениях Сухой Лог и Голец Высочайший (Русинов и др., 2008). Кроме того, более темные полосы содержат реликты альбита, калиевого полевого шпата, карбоната и слюд (рис. 3б–г). В более светлых полосках присутствуют следы перекристаллизации, которая, возможно, и привела к выносу углеродистого вещества. В светлых полосках преобладает мелкий, дробленный кварц и достаточно широко рас-

пространены вкрапленники пирита. В рудных зонах кварц образует линзы и прожилки, сопровождающиеся пиритом (см. рис. 3а).

### Краткая характеристика рудных тел

На месторождении Вернинское выделяют четыре прожилково-вкрапленные рудные зоны субширотного простирания (см. рис. 2а): зоны 1 и 2 – основные по запасам, зона 3 – слепая, не выходящая на поверхность (см. рис. 2б), и зона Северная. Кроме того, на месторождении известны мощные кварцево-жильные зоны субширотного простирания – Первенец и Центральная.

В пределах месторождения выявлены также отдельные продуктивные кварцевые жилы субширотного, северо-западного и субмеридионального простирания.

Большая часть запасов месторождения Вернинское представлена прожилковыми золотосульфидно-кварцевыми рудами, типичный пример – рудная зона 1 (см. рис. 3 а, д, е). Рудная зона Первенец (см. рис. 2а) отнесена к золотокварцевой жильной формации, а рудная зона 2, где кварцево-жильные тела пространственно совмещены с золотосульфидно-кварцевой прожилково-вкрапленной зоной, может быть отнесена к смешанному типу.

Рудные зоны вытянуты в субширотном направлении, имея в целом северное – северо-восточное падение под углами 25–40° висячем крыле Вернинской антиклинали, 40–55° – в ее лежащем крыле и 35–45° – в ядерной части. По простиранию рудные зоны имеют протяженность более 800–1000 м, а по падению – 300–800 м. Рудные зоны, как правило, не имеют визуальных границ и выделяются по данным опробования. Из-за крайне неравномерного распределения золота (коэффициент вариации – 239%), внутреннее строение рудных зон довольно сложное (Мартыненко и др., 2017). Вкрапленная сульфидная минерализация в основном представлена арсенопиритом и пиритом, иногда сопровождается кварцем.

Продуктивные кварцевые жилы на 95–99% состоят из молочно-белого кварца, в котором часто присутствуют ксенолиты вмещающих пород, гнезда карбонатов (анкерита, сидерита, доломита и кальцита), а также слюд (серицита, мусковита, хлорита). В кварцевых жилах и прожилках из рудных минералов преобладают арсенопирит и пирит, реже встречаются сфалерит, галенит, халькопирит, блеклые руды и самородное золото (пробность 920–970 ‰).

Возраст прожилково-вкрапленных руд месторождения Вернинское варьируется от  $434 \pm 4$  до  $440 \pm 8$  млн лет (Rb-Sr метод; (Chugaev et al., 2022)). Изотопный возраст продуктивных золотокварцевых жил месторождения Вернинское не определялся. Значения возраста вкрапленно-прожилковых и кварцево-жильных руд ближайшего к Вернинскому месторождения Сухой Лог, по данным Rb-Sr метода, составляют  $447 \pm 6$  и  $321 \pm 14$  млн лет соответственно (Laverov et al., 2007).

#### ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

В составе терригенных вмещающих пород (песчаников и алевролитов) месторождения Вернинское преобладает SiO<sub>2</sub> (среднее – 67.17 мас. %), присутствуют высокие концентрации K<sub>2</sub>O (4.73 мас. %), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4.19 мас. %), CaO (1.72 мас. %), MgO (1.69 мас. %), TiO<sub>2</sub> (1.1 мас. %) (табл. 1). Такие содержания основных петрогенных элемен-

тов типичны для всех отложений дальнетайгинской серии (Чугаев, Чернышев, 2017). Высокое содержание серы (S<sub>ср</sub> – 1.67 мас. %) во вмещающих породах аунакитской свиты свидетельствует о наличии сульфидной минерализации (в основном тонковкрапленного пирита). В маркирующем горизонте известковистых песчаников содержание CaO и MgO достигает 16.38 и 13.59 мас. % соответственно. Кроме элементов, типичных для карбонатных отложений, отмечается увеличение содержания S до 2.38 мас. %, при этом содержание SiO<sub>2</sub> закономерно снижается до 36.69 мас. % (см. табл. 1).

Высокие концентрации Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 16.7 %) и K<sub>2</sub>O (4.7%) во вмещающих породах (см. табл. 1) указывают на широкое развитие серицита и мусковита в последних. В то же время для вмещающих пород характерны низкие и очень низкие значения Na<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и MnO (см. табл. 1). Соотношение K/Na в породах достигает 12.5, что обусловлено развитием калиевого полевого шпата и серицита. Для вмещающих пород в пределах месторождения свойственны достаточно высокие содержания Au, As и Ag. Значительное превышение содержаний данных элементов в отложениях аунакитской свиты относительно фоновых значений характерно для данной территории (Кучеренко и др., 2012; Yudovskaya et al., 2016; Tarasova et al., 2020). Результаты анализа микроэлементов во вмещающих породах представлены на рис. 4а и в табл. 2.

Терригенные породы обогащены достаточно широким спектром микроэлементов (по мере уменьшения коэффициента обогащения): As, Ag, W, Mo, Rb, Cr, Cd, Ba, V, Sc, U, Cs, Li, Th и REE, по сравнению со средними значениями верхней коры (Тейлор, Мак-Леннан, 1988). Известковистые песчаники обогащены более узким спектром микроэлементов (см. рис. 4а): As, Ag, Sr, W, Cd, Sc, Ba, Pb и Cu. Коэффициент обогащения As и Ag вмещающих пород превышает фоновые значения до нескольких десятков раз, прочие из перечисленных выше микроэлементов – до нескольких раз (см. рис. 4а).

При изучении геохимической специализации аунакитской свиты отмечено, что содержание REE значительно варьируется в зависимости от состава вмещающих пород и наличия рудной минерализации. В основной массе терригенных пород в среднем  $\sum REE = 181.63$  (табл. 3). Преобладают легкие REE ( $\sum LREE = 167.63$ ; см. табл. 3). Известковистые песчаники (см. табл. 1), в отличие от терригенных пород, не обогащены REE, имеют более низкое содержание  $\sum REE$  (37.35) и небольшую  $\sum LREE$  (28.38), незначительно обогащены LREE (LaN/YbN = 2.53,  $\sum LREE/\sum HREE = 3.16$ ; см. табл. 3). Данная тенденция является закономерной ввиду наличия в терригенных породах значительного количества минералов, обогащенных РЗЭ (Юдовская и др., 2011).

**Таблица 1.** Химический состав вмещающих пород и руд месторождения Вернинское, мас. %

**Table 1.** Chemical composition of the host rocks and ores of the Verninskoe deposit, mas. %

Вмещающие породы и подтипы руд	n	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ.	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	As	Au, г/т
Песчаники, сланцы	7	67.17	1.1	16.70	4.19	0.05	1.69	1.72	0.38	4.73	0.18	1.67	0.02	0.5
Известковистые песчаники	1	36.69	0.45	14.67	11.17	0.42	13.59	16.38	0.22	3.35	0.25	2.38	0.02	0.5*
Пиритовые прожилково-вкрапленные карбонатные руды	2	76.43	0.075	1.73	3.54	0.05	0.975	13.27	<0.10	0.4	0.06	3.19	0.01	2
Сульфидные прожилково-вкрапленные карбонатные руды	1	71.06	0.11	3.05	2.86	0.05	1.23	16.94	0.11	0.67	0.08	2.11	1.49	2
Сульфидные прожилково-вкрапленные руды	3	60.52	0.92	14.38	10.44	0.13	2.99	1.89	0.42	3.59	0.10	3.75	0.55	2.2
Богатая пиритовая руда	1	6.11	0.50	0.45	39.29	0.02	<0.10	0.02	<0.10	0.08	0.03	49.68	0.61	32.5*
Богатая арсенопиритовая руда	3	22.03	0.42	1.02	32.13	0.02	<0.10	0.20	<0.10	0.22	0.03	16.50	27.10	24.0*
Кварцево-жильные руды	7	88.90	0.17	2.77	3.22	0.04	0.48	2.07	0.10	0.62	0.17	1.10	0.30	6.7

Примечание. Средние содержания золота в породах и рядовых рудах (по данным опробования АО “Первенец”). \*По авторским данным.

Notes. Average gold grades in host rocks and run-of-mine ores are according to sampling data of AO Pervenets. \*According to authors' data.

### Типизация вмещающих пород

Рифейские терригенные породы Бодайбинского золоторудного района претерпели постдиагенетические и регионально-метаморфические преобразования (зеленосланцевой фации), в результате чего произошло рассланцевание, развитие карбоната, серицита, сульфидной минерализации (Large et al., 2007; Русинов и др., 2008; Иванов, 2015; Вуд, Попов, 2006). Во всех изучаемых отложениях довольно широко распространена рассеянная пиритизация (Large et al., 2007; Tarasova et al., 2020; и др.).

На классификационной диаграмме (Hegron, 1988) (рис. 5) индикаторные показатели, определяющие для пород аунакитской свиты, вмещающей основные рудные тела месторождения Вернинское, попадают в поля сланцев и граувакков, а часть образцов – в поля Fe-песчаников, литаренитов и сублитаренитов. Следует отметить, что, по классификации, изученные образцы вмещающих пород месторождения Вернинское не отличаются от таковых других месторождений Бодайбинского района (см. рис. 5), а разнообразие по составам связано с выборкой проб из известковистого маркирующего горизонта и зон окварцевания, приуроченных к рудным зонам. М. Херрон отмечал (Hegron, 1988), что по содержанию CaO породы разделяются на бескальциевые (CaO <4 мас. %), известковые (4 мас. % < CaO < 15 мас. %) и карбонатные (CaO

>15 мас. %) отложения. Как видно из табл. 1, породы месторождения Вернинское относятся в основном к бескальциевым (0.2–3.55 мас. %). Только пробы, отобранные из известковистого маркирующего горизонта, относятся ко второму и третьему типам (9.99 – 16.94 мас. %).

### Сравнительная характеристика вмещающих пород (по индикаторным показателям)

По индикаторным показателям, предложенным в статье (Русинов и др., 2008), вмещающие породы месторождения Вернинское сопоставлены с месторождениями Сухой Лог и Голец Высочайший. На рис. 6 наблюдается близость состава вмещающих пород месторождений Вернинского и Голец Высочайший. В то же время вмещающие породы месторождения Вернинского отличаются от пород Сухого Лога (Yudovskaya et al., 2016) более высоким содержанием Ba и As (см. табл. 2, 3). Известно, что большая часть Ba входит в состав слюд, но, возможно, этот элемент присутствует и в других породообразующих минералах (Русинов и др., 2008). Мышьяк – наиболее характерный элемент-спутник золотой минерализации месторождений Бодайбинского региона, а его первичное поступление в бассейн связано с гидротермальной деятельностью в зоне спрединга задугового бассейна (Немеров и др., 2010).



**Таблица 2.** Элементный состав изученных образцов вмещающих пород и руд Месторождения Вернинское, г/т  
**Table 2.** Elemental composition of the studied samples of host rocks and ores of the Verninskoe deposit, ppm

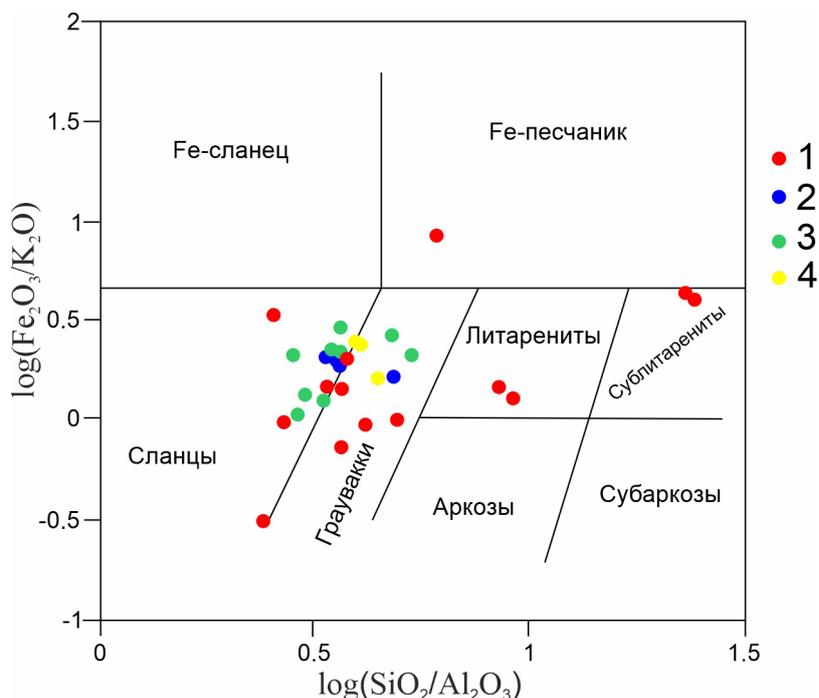
Элемент	Богатая пиритовая руда (n = 1)	Богатые арсенопиритовые руды (n = 3)	Кварцево- жильные руды (n = 7)	Сульфидные прожилково- вкрапленные руды (n = 3)	Пиритовые карбонатные прожилково- вкрапленные руды (n = 2)	Сульфидные карбонатные прожилково- вкрапленные руды (n = 1)	Известкови- стые сланцы (n = 1)	Песчаники, Сланцы (n = 7)
Li	0.68	2.14	5.05	23.43	2.99	4.13	12.21	31.51
Be	0.08	0.15	0.28	1.76	0.17	0.35	1.18	2.16
Sc	2.01	3.43	7.74	21.36	4.97	5.07	18.28	20.68
V	3.65	9.39	18.72	112.86	18.21	31.39	68.08	131.74
Cr	21.52	15.01	60.90	104.16	43.94	28.94	41.59	131.00
Co	29.37	28.92	5.54	33.74	3.44	2.67	8.11	15.63
Ni	263.87	216.06	30.92	72.80	40.62	22.01	24.91	36.49
Cu	90.20	114.84	24.15	30.03	27.86	19.56	31.91	17.09
Zn	1173.84	126.08	46.88	70.71	26.51	19.66	65.17	57.27
As	6050.00	271 040.00	2584.29	5510.00	85.00	14 880.00	210.00	260.00
Rb	1.89	9.90	22.61	129.74	13.91	22.61	75.01	154.45
Sr	13.47	42.81	314.28	228.09	1517.35	1343.63	1606.50	192.54
Y	3.58	3.83	6.41	13.33	7.52	9.84	9.46	14.90
Zr	57.63	59.58	41.19	151.76	27.50	51.88	93.30	160.20
Nb	5.31	4.44	2.18	11.60	0.76	1.11	3.21	12.77
Mo	0.67	4.07	1.52	1.79	2.20	1.96	0.84	2.81
Ag	5.20	4.48	0.47	0.81	0.26	0.63	0.42	0.56
Cd	4.56	0.54	0.11	0.23	0.06	0.09	0.12	0.20
Cs	0.09	0.39	0.93	5.63	0.44	0.69	2.67	6.73
Ba	6.96	85.51	216.54	910.12	228.78	310.52	685.59	1248.85
La	11.90	5.79	6.23	32.51	2.35	2.80	5.00	37.45
Ce	24.76	13.81	13.26	68.61	5.50	6.35	11.34	78.51
Pr	2.97	1.77	1.75	7.99	0.76	0.83	1.49	9.22
Nd	11.16	6.72	7.40	30.22	3.54	3.87	7.12	34.54
Sm	1.81	1.18	1.96	5.93	1.12	1.33	2.60	6.53
Eu	0.27	0.22	0.52	1.25	0.36	0.32	0.83	1.38
Gd	1.10	0.90	1.81	4.68	1.33	1.54	2.82	5.32
Tb	0.13	0.12	0.25	0.56	0.22	0.28	0.43	0.62
Dy	0.72	0.71	1.38	2.87	1.42	1.77	2.36	3.20
Ho	0.17	0.16	0.26	0.55	0.31	0.41	0.42	0.62
Er	0.49	0.50	0.70	1.92	0.93	1.22	1.19	1.69
Tm	0.09	0.09	0.09	0.26	0.14	0.20	0.19	0.26
Yb	0.66	0.69	0.60	1.86	0.94	1.46	1.34	1.97
Lu	0.11	0.11	0.09	0.30	0.14	0.22	0.22	0.33
Hf	1.54	1.83	1.16	4.37	1.02	1.46	2.75	4.76
Ta	0.39	0.34	0.15	0.88	0.07	0.09	0.26	0.99
W	5.18	9.04	3.13	13.08	1.35	0.98	4.99	17.02
Au	32.50	16.00	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
Pb	37.76	51.27	5.32	40.50	8.37	12.00	20.08	19.55
Bi	0.36	0.85	0.04	0.43	0.05	0.07	0.10	0.19
Th	4.23	2.62	1.44	9.76	0.71	1.02	3.07	11.64
U	1.15	1.00	0.79	3.67	0.61	0.90	1.84	4.25

Примечание. Н. о. – не определялось.

Note. Н. о. – it was not determined.

**Таблица 3.** Индикаторные показатели изученных образцов вмещающих пород и руд месторождения Вернинское  
**Table 3.** Indicator values of the studied samples of host rocks and ores of the Verninskoe deposit

Индикатор	Богатая пиритовая руда	Богатые арсенопиритовые руды	Кварцево- жильные руды	Сульфидные прожилково- вкрапленные руды	Пиритовые карбонатные прожилково- вкрапленные руды	Сульфидные карбонатные прожилково- вкрапленные руды	Известко- вистые сланцы	Черные сланцы
$\Sigma$ REE	56.33	32.76	36.30	159.51	19.02	22.60	37.35	181.63
$\Sigma$ LREE	52.87	29.49	31.12	146.51	13.61	15.50	28.38	167.63
$\Sigma$ HREE	3.46	3.27	5.18	13.00	5.41	7.10	8.97	14.01
$\frac{\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE	15.26	9.02	6.01	11.27	2.52	2.18	3.16	11.97
Hf/Sm	0.86	1.55	0.59	0.74	0.91	1.10	1.06	0.73
Nb/La	0.45	0.77	0.35	0.36	0.32	0.40	0.64	0.34
Th/La	0.36	0.45	0.23	0.30	0.30	0.36	0.61	0.31
Y/Ho	21.46	23.94	24.54	24.24	24.64	24.00	22.52	23.93
U/Th	0.27	0.38	0.55	0.38	0.86	0.88	0.60	0.37
Rb/Sr	0.14	0.23	0.07	0.57	0.01	0.02	0.05	0.80
Sr/Ba	1.94	0.50	1.45	0.25	6.63	4.33	2.34	0.15
Zr/Hf	37.31	32.50	35.51	34.73	26.96	35.53	33.93	33.67
Nb/Ta	13.75	13.19	14.29	13.13	10.86	12.33	12.35	12.96
Co/Ni	0.11	0.13	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Au/Ag	6.25	3.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu/Mo	134.12	28.24	15.94	16.81	12.69	9.98	37.99	6.09
Pb/Nd	3.38	7.63	0.72	1.34	2.37	3.10	2.82	0.57
Eu/Eu*	0.72	0.77	0.94	0.85	0.98	0.77	1.01	0.85
Ce/Ce*	1.08	1.19	0.99	1.07	0.98	0.95	0.93	1.07
LaN/YbN	12.33	5.72	7.10	11.85	1.69	1.30	2.53	12.90
LaN/SmN	4.12	3.05	1.98	3.42	1.31	1.31	1.20	3.58
GdN/YbN	1.36	1.06	2.45	2.03	1.14	0.85	1.70	2.18
LaN/LuN	11.37	5.63	7.30	11.25	1.74	1.32	2.36	11.88
$\Sigma$ Ce	50.79	28.09	28.63	139.33	12.14	13.85	24.95	159.72
$\Sigma$ Y	4.20	3.29	6.19	15.84	4.75	5.65	9.46	17.66
$\Sigma$ Sc	1.35	1.38	1.47	4.34	2.14	3.10	2.94	4.25
$\Sigma$ Y(безTb)	4.07	3.17	5.94	15.28	4.53	5.37	9.03	17.05
$\Sigma$ Sc(безTm)	1.26	1.29	1.38	4.08	2.01	2.90	2.75	3.99
Eu/Sm	0.15	0.19	0.27	0.21	0.32	0.24	0.32	0.21
Ce/Yb	37.78	20.12	22.25	36.82	5.85	4.35	8.46	39.82
Eu/Ce	0.01	0.02	0.04	0.02	0.07	0.05	0.07	0.02



**Рис. 5.** Классификация проб вмещающих пород месторождения Вернинское на дискриминационной диаграмме (Herron, 1988).

1 – вмещающие породы месторождения Вернинское, 2 – сланцы месторождения Сухой Лог (Буряк, Хмелевская, 1997), 3 – углеродистые сланы Патомского нагорья (Юдовская и др., 2011), 4 – углеродистые сланцы Вачской свиты (Развожаева и др., 2013).

**Fig. 5.** Classification of the samples of host rocks of the Verninskoe deposit on discrimination diagram (Herron, 1988).

1 – host rocks of the Verninskoe deposit, 2 – shales of the Sukhoi Log deposit (Buryak, Khmelevskaya, 1997), 3 – carbonaceous shales of the Patom highland (Yudovskaya et al., 2011), 4 – carbonaceous shales of the Vacha Formation (Razvozhayeva et al., 2013).

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУД

На месторождении Вернинское в ходе геолого-разведочных работ выделены два типа руд: преобладающий сульфидный (арсенопирит-пиритовый) прожилково-вкрапленный и кварцево-жильный. Текстуры руд прожилковые, вкрапленные, гнездобразные, структуры мелко- и среднезернистые, неравномерно-кристаллические. Распределение золота в рудах неравномерное, коэффициент вариации – 239 % (Мартыненко и др., 2017).

Вместе с тем выполненные геохимические исследования позволили авторам в составе *сульфидного прожилково-вкрапленного типа руд* выделить и дать характеристику следующим подтипам (см. табл. 1):

- 1) пиритовые прожилково-вкрапленные карбонатные руды,
- 2) сульфидные<sup>2</sup> прожилково-вкрапленные карбонатные руды,
- 3) сульфидные прожилково-вкрапленные руды,

4) богатые пиритовые руды,

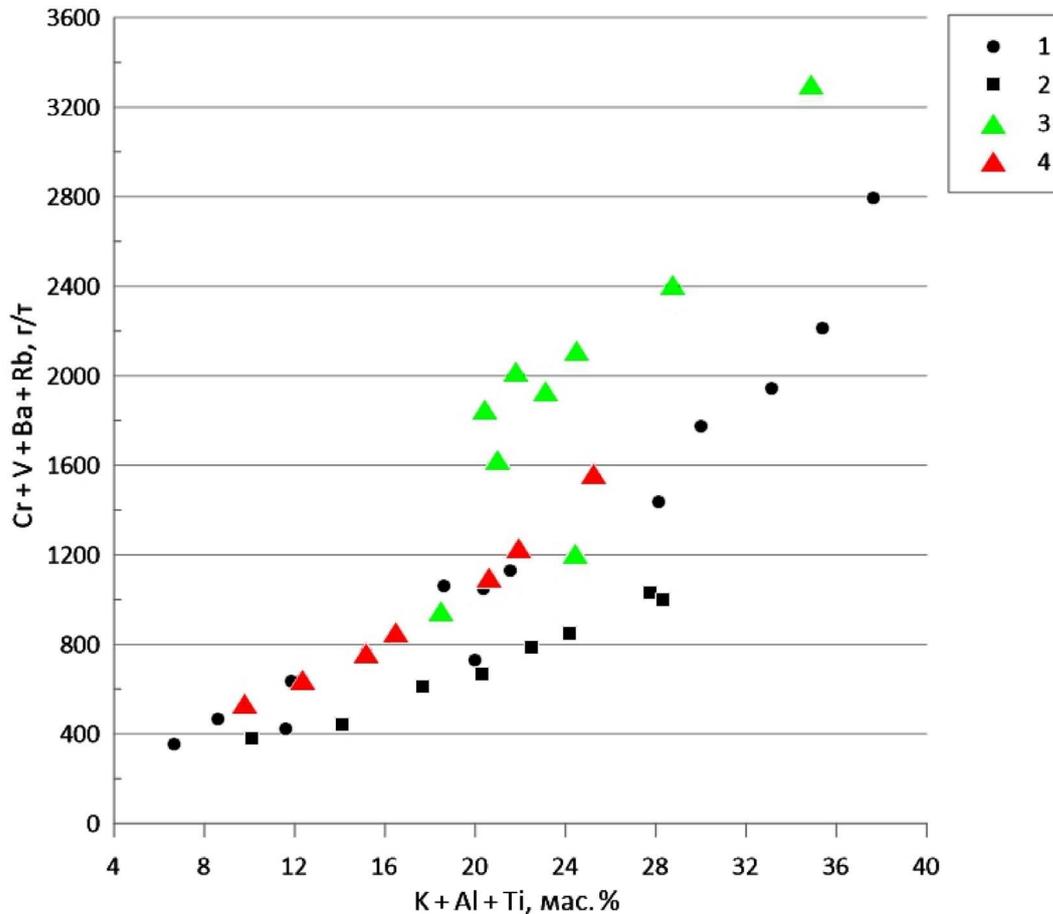
5) богатые арсенопиритовые руды.

*Пиритовые и сульфидные (пирит-арсенопиритовые) прожилково-вкрапленные карбонатные подтипы руд* представлены породами известковистых маркирующих горизонтов и характеризуются повышенным содержанием SiO<sub>2</sub> (76.43 и 71.06 мас. % соответственно) и CaO (13.27 и 16.94 мас. % соответственно) (см. табл. 1).

*Сульфидный прожилково-вкрапленный подтип* (см. табл. 1) отличается от богатых пиритовых и арсенопиритовых руд высокими значениями SiO<sub>2</sub>, рядовыми содержаниями Au (в среднем 2.5–3.5 г/т) и количеством сульфидов (1.5–6.5 %) (Мартыненко и др., 2010ф). Отметим, что содержание SiO<sub>2</sub> находится на том же уровне, что и во вмещающих породах (см. табл. 1).

*Богатые арсенопиритовые руды* имеют высокие содержания As и Au (в среднем 27.1 и 16.0 г/т соответственно), SiO<sub>2</sub> (22.03 мас. %), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (32.13 мас. %), S (16.50 мас. %) и незначительные концентрации Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1.02 мас. %), MnO (0.02 мас. %), CaO

<sup>2</sup> Сульфидные – арсенопирит-пиритовые.



**Рис. 6.** Соотношение породообразующих и примесных элементов в рудовмещающих породах месторождений Бодайбинского золоторудного узла.

1 – Голец Высочайший (Русинов и др., 2008), 2 – Сухой Лог (Русинов и др., 2008), 3 – углеродистый филлитовидный сланец (Вернинское), 4 – песчаник (Вернинское).

**Fig. 6.** The ratio of rock-forming and trace elements in ore-bearing rocks of deposits of the Bodaibo gold ore cluster.

1 – Golets Vysochaishii, 2 – Sukhoi Log (Rusinov et al., 2008), 3 – carbonaceous phyllite-like shale (Verninskoe), 4 – sandstone (Verninskoe).

(0.2 мас. %),  $K_2O$  (0.22 мас. %),  $P_2O_5$  (0.03 мас. %) (см. табл. 1).

Богатые пиритовые руды отличаются низкими содержаниями As и высокими Au (0.61 мас. % и 32.5 г/т соответственно) и  $SiO_2$  (6.11 мас. %),  $Fe_2O_3$  (39.29 мас. %), а содержание S достигает 49.68 мас. % (см. табл. 1). Кроме того, богатые пиритовые и арсенопиритовые руды характеризуются заметным количеством  $TiO_2$  (до 0.5 мас. %) и  $Al_2O_3$  (до 1.02 мас. %) (см. табл. 1).

В составе кварцево-жильных руд преобладает  $SiO_2$  (в среднем 88.90 мас. %), установлены (мас. %): CaO (2.07),  $Al_2O_3$  (2.77), MgO (0.48),  $Fe_2O_3$  (3.22),  $Na_2O$  (0.10),  $K_2O$  (0.62),  $TiO_2$  (0.17), MnO (0.04),  $P_2O_5$  (0.17). Сульфидов в кварцево-жильных рудах значительно меньше, чем в прожилково-вкрапленных рудах ( $S_{cp}$  – 1.10 мас. %) (см. табл. 1).

### Распределение микроэлементов в рудах

Сульфидные прожилково-вкрапленные карбонатные руды обогащены узким спектром микроэлементов (As, Ag, Sr, Mo) (см. рис. 4в).

Сульфидные прожилково-вкрапленные руды обогащены широким спектром микроэлементов (см. рис. 4в): Au, As, Ag, W, Bi, Pb, Cd, Co, Mo, Ni, Rb, Ba, Sc, U, V, Cr, Cs и некоторыми REE по сравнению со средними содержаниями в верхней коре (Тейлор, Мак-Леннан, 1988). Наиболее высокие коэффициенты обогащения установлены для As, Ag и W (см. рис. 4в).

Богатые руды арсенопиритовые и пиритовые подтипы руд имеют спектры микроэлементов средней величины (см. рис. 4б). Спектр пиритовых руд включает Au, As, Ag, Cd, Zn, Ni, Cu, W, Pb, Bi,

Co, а спектр арсенопиритовых руд – As, Au, Ag, Ni, Cd, Bi, W, Co, Cu, Zn, Pb, Mo (см. рис. 4б). Наиболее высокие коэффициенты обогащения установлены для Au, As, Ag, Cd, Zn (см. рис. 4в). Как видно на рисунке, богатые арсенопиритовые руды, в отличие от пиритовых руд, обогащены мышьяком (естественно) и молибденом.

*Кварцево-жильные руды* характеризуются узкими спектрами микроэлементов (см. рис. 4в), среди которых встречаются As, Ag, Sr, Mo, Zn, Cd и W (см. рис. 4в). Наиболее высокие коэффициенты обогащения установлены для As и Ag.

### Распределение REE в рудах

*Сульфидные прожилково-вкрапленные руды* характеризуются в среднем довольно высокими значениями  $\sum REE = 159.51$  (см. табл. 3) – и слабовыраженной отрицательной Eu-аномалией (рис. 7а). Они обогащены LREE относительно HREE ( $LaN/YbN = 11.85$ ,  $\sum LREE/\sum HREE = 11.27$ ; см. табл. 3), что отражается в наклоне линии спектра REE (рис. 7а).

*Пиритовый прожилково-вкрапленный карбонатный подтип* отличается самым низким значением  $\sum REE = 19.02$  (см. табл. 3) – и практически горизонтальной линией спектра REE, в котором отсутствует даже намек на Eu-аномалию (см. рис. 7а). Эта руда незначительно обогащена LREE относительно HREE ( $LaN/YbN = 1.69$ ,  $\sum LREE/\sum HREE = 2.52$ ; см. табл. 3).

*Сульфидный прожилково-вкрапленный карбонатный подтип* также имеет в среднем очень низкую  $\sum REE = 22.6$  (см. табл. 3) – и практически горизонтальную линию спектра REE со слабовыраженным отрицательным Eu-минимумом (см. рис. 7а). Эти руды также характеризуются в среднем незначительным обогащением LREE относительно HREE ( $LaN/YbN = 1.30$ ,  $\sum LREE/\sum HREE = 2.18$ ; см. табл. 3).

*Богатым сульфидным рудам* свойственны в среднем невысокая  $\sum REE = 32.75$  (см. табл. 3) – и близкондритовая морфология спектра REE со слабовыраженной отрицательной Eu-аномалией (см. рис. 7б). Они заметно обогащены LREE относительно HREE ( $LaN/YbN = 5.92$ ,  $\sum LREE/\sum HREE = 9.22$ ; см. табл. 3).

*Богатые пиритовые руды* характеризуются более высокой  $\sum REE = 56.33$ , чем упомянутые выше подтипы (см. табл. 3), и близкондритовой морфологией спектра REE с небольшим Eu-минимумом (см. рис. 7б). Они сильнее, чем другие подтипы, обогащены LREE относительно HREE ( $LaN/YbN = 12.33$ ,  $\sum LREE/\sum HREE = 15.26$ ; см. табл. 3).

*Кварцево-жильные руды* имеют в среднем невысокую  $\sum REE = 36.29$  (см. табл. 3), а в спектрах распределения REE присутствуют как положительные, так и слабовыраженные отрицательные Eu-аномалии

(см. рис. 7в). Они крайне неравномерно обогащены LREE относительно HREE ( $LaN/YbN = 1.38-11.62$ ,  $\sum LREE/\sum HREE = 1.83-12.05$ ; см. табл. 3), что заметно отражается в наклонах кривых спектров REE (см. рис. 7в).

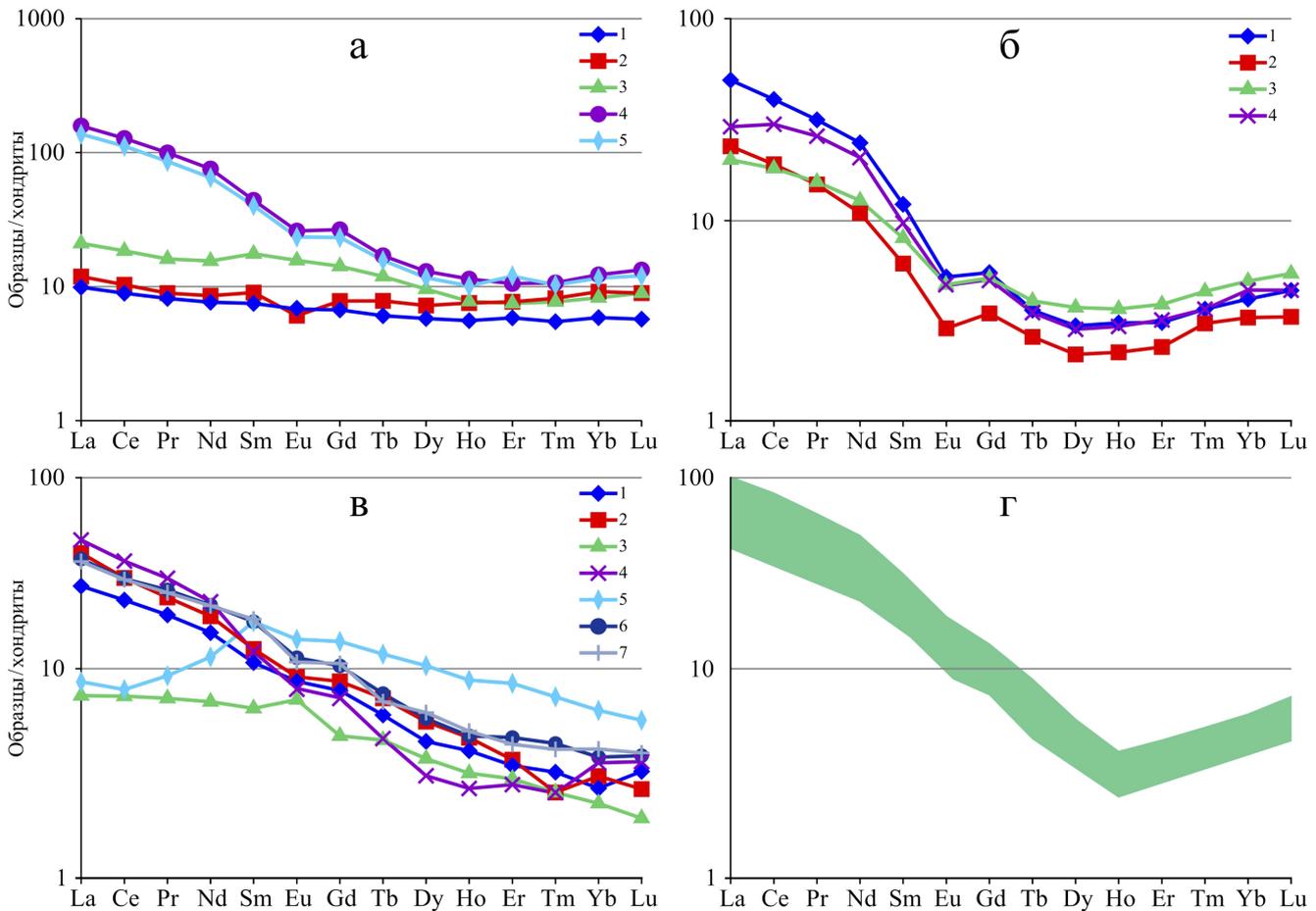
### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выполненные исследования показали, что, судя по индикаторным показателям, большинство вмещающих пород месторождения Вернинское относятся к сланцам и грауваккам, а некоторые образцы – к Fe-песчаникам. Часть проб, попавших в поля литаренитов и сублитаренитов, связана с зонами окварцевания, также имеющими место вблизи рудных зон месторождения (см. рис. 5). На графике (см. рис. 6) отмечается близость рудовмещающих пород месторождений Голец Высочайший и Вернинское по соотношению породообразующих и примесных элементов. В то же время рудовмещающие породы месторождения Вернинское незначительно отличаются от пород Сухого Лога (см. рис. 6).

Породы рудовмещающей аунакитской свиты в пределах месторождения Вернинское, по сравнению с верхней корой (Тейлор, Мак-Леннан, 1988), заметно обогащены As, содержание которого в песчаниках и сланцах составляет 260 г/т, а в известковистых песчаниках – 210 г/т (табл. 4). Представленные авторские данные немного превышают значения, опубликованные в работе (Tarasova et al., 2020), в которой содержание мышьяка во всех пачках аунакитской свиты не превышали 200 г/т. Возможно, незначительное расхождение по содержанию мышьяка связано с тем, что авторами данной работы исследованы образцы, отобранные в пределах рудного поля месторождения Вернинское, и в вернинских рудах содержания мышьяка многократно превышают значения в рудах, указанные в работе (Tarasova et al., 2020).

Обогащение вмещающих пород мышьяком предполагает его поступление в осадочные толщи еще на этапе седиментации. Сравнительный анализ содержаний мышьяка во вмещающих породах (г/т) и количества арсенопирита в рудах основных месторождений золота Бодайбинского района (Yudovskaya et al., 2016; Tarasova et al., 2020) показывает, что широкое развитие арсенопирита в рудах коррелирует с высокими содержаниями As во вмещающих породах (см. табл. 4).

Повышенные концентрации в рудах W, Mo и Bi (см. рис. 3б, в), с одной стороны, позволяют предположить участие магматического флюида при их формировании. С другой стороны, вмещающие терригенные породы обогащены W и Mo на том же уровне, что и прожилково-вкрапленные рядовые, и богатые руды (см. рис. 3а, б), это может быть связано с повышенной примесью этих элементов в по-



**Рис. 7.** Распределение REE во вмещающих породах и рудах месторождения Вернинское (а–в) и черных сланцах месторождения Сухой Лог (г), нормированных по хондритам (McDonough, Sun, 1995).

а – вмещающие породы и рядовые прожилково-вкрапленные руды: 1 – песчаники и сланцы, 2 – известковые песчаники, 3 – пиритовые прожилково-вкрапленные карбонатные руды, 4 – сульфидные прожилково-вкрапленные карбонатные руды, 5 – сульфидные прожилково-вкрапленные руды; б – богатые руды: 1 – пиритовая руда (в-14\33), 2–4 – арсенипиритовые руды (в-14\12, в-28\11 и в-20\10 соответственно); в – кварцево-жилвные руды, номера проб: 1 – в-19\11, 2 – в-10\2, 3 – в-10\10, 4 – в-29\11, 5 – в-14\48, 6 – в-14\64, 7 – в-14\49.

**Fig. 7.** REE distribution in the host rocks and ores of the Verninskoe deposit (a–в) and the black shales of the Sukhoi Log deposit (г), normalized to chondrites (McDonough, Sun, 1995).

а – host rocks and run-of-mine veinlet–disseminated ores: 1 – sandstones and shales, 2 – calcareous sandstones, 3 – pyrite veinlet–disseminated carbonate ores, 4 – sulfide veinlet–disseminated carbonate ores, 5 – sulfide veinlet–disseminated ores; б – rich ores: 1 – pyrite ore (в-14\33); 2–4 – arsenopyrite ores (в-14\12, в-28\11 and в-20\10, respectively); в – quartz vein ores, sample numbers: 1 – в-19\11, 2 – в-10\2, 3 – в-10\10, 4 – в-29\11, 5 – в-14\48, 6 – в-14\64, 7 – в-14\49.

родообразующих минералах. Аналогичным образом можно объяснить и появление примеси Sr в карбонатных прожилково-вкрапленных рудах (см. рис. 3в). Этот элемент приурочен к известковым песчаникам маркирующего горизонта (см. рис. 3а).

Как отмечается в статье (Goldfarb, Pitcairn, 2023), многие исследователи утверждали, что повышенные значения Bi, Te и W указывают на наличие флюида с магматическим источником, но в настоящее время признается, что это необязатель-

но так. Продемонстрировано (Pitcairn et al., 2006), что большинство из этих элементов извлекается из обломочных минералов в метаосадочных породах во время постепенного метаморфизма и поступает в эволюционирующую фазу метаморфического флюида.

Во многих работах показано, что метаосадочные породы с типичным обилием сингенетического или диагенетического пирита – необходимый источник для образования крупных месторождений золота (Сидоров и др., 2009; Large et al.,

**Таблица 4.** Содержание мышьяка во вмещающих породах, г/т, и арсенопирита в рудах основных месторождений золота Бодайбинского района

**Table 4.** The content of arsenic in the host rocks, ppm, and arsenopyrite in the ores of the main gold deposits of the Bodaibo district

Месторождение	Свита и основные породы	Содержание As во вмещающих породах	Кол-во арсенопирита в рудах
Вернинское	<i>Аунакитская свита</i> Песчаники, сланцы	260	Обильное
	Известковистые песчаники	210	—«—
Сухой Лог*	<i>Хомолхинская свита</i> Песчаники, сланцы,	49	Незначительное
Голец Высочайший*	известковистые сланцы		—«—
Чертово Корыто*	<i>Михайловская свита</i> Песчаники, сланцы, известковистые сланцы	230	Обильное

Примечание. \*По данным (Yudovskaya et al., 2016).

Note. \*According to (Yudovskaya et al., 2016).

2011; Tomkins, 2010; и др.). Значительное количество золота и связанных с ним элементов высвобождались из этих осадочных толщ во время прогрессивных метаморфических изменений, образуя на глубине породы, обедненные металлами, а высвобождающийся флюид переносил эти элементы на более высокие уровни земной коры (Pitcairn et al., 2006).

Известно, что флюиды, насыщенные Cl, концентрируют легкие REE и бедны тяжелыми REE, имеют величины отношений Hf/Sm, Nb/La, Th/La, как правило, меньше 1, а флюиды, насыщенные F, синхронно концентрируют легкие и тяжелые REE – значения Hf/Sm, Nb/La и Th/La обычно больше, чем 1 (Oreskes, Einaudi, 1990). В рудах месторождения Вернинское отношения Hf/Sm, Nb/La, Th/La значительно меньше 1 (см. табл. 3), за исключением отношения Hf/Sm в богатых арсенопиритовых рудах и сульфидных карбонатных прожилковокрапленных рудах, что указывает на их принадлежность к гидротермальной системе, обогащенной Cl, что коррелирует с результатами исследования флюидных включений (Котов и др., 2023).

Значения U/Th отражают окислительно-восстановительные особенности обстановки рудообразования (Jones, Manning, 1994). Th относительно неподвижен в низкотемпературной среде и концентрируется при осадконакоплении в мелкозернистых отложениях, таких как аргиллиты. Он обычно встречается в детритной фракции, связанной с тяжелыми минералами или глинами (Jones, Manning, 1994). В терригенных породах аунакитской свиты и залегающих в них рудах месторождения Вернинское U/Th <0.75 (см. табл. 3), что свидетельствует об окислительной обстановке как на момент непосредственного накопления осадочных

отложений, так и в процессе длительной многостадийной эволюции осадков вплоть до формирования месторождения. В рудах в карбонатных породах U/Th >0.75, что соответствует восстановительной среде рудоотложения (Jones, Manning, 1994).

В диагенетическом пирите обычно наблюдаются величины отношений Co/Ni >1 (Kun et al., 2014). Соотношение Co/Ni в пирите в рудах месторождения Вернинское значительно меньше 1 (от 0.1 до 0.15), что соответствует метаморфогенным гидротермальным флюидам (Jones, Manning, 1994) и согласуется с данными исследованиями флюидных включений (Котов и др., 2023).

Некоторые исследователи (Bau, 1991; Jones, Manning, 1994; Monecke et al., 2002) используют значения Y/No для классификации гидротермальных систем. В рудах месторождения Вернинское отношение Y/No >21.4, что характерно для современных гидротермальных флюидов задуговых бассейнов (Bau, 1991; Jones, Manning, 1994; Monecke et al., 2002). Известно, что орогенные месторождения, содержащие золото как основной продукт, образовывались преимущественно при коллизионных деформациях осадочных толщ, накопленных в задуговых обстановках (Якубчук, 2023). При этом сидерохалькофильная специализация, включающая золото и мышьяк, сформирована в результате разгрузки эксгалляционных гидротерм в условиях рассеянного задугового спрединга (Будяк и др., 2019).

Сумма REE во вмещающих породах значительно превышает концентрацию REE в рудах. Как и во вмещающих породах, в рудах месторождения Вернинское преобладают легкие REE, однако их соотношение незначительно отличается друг от друга (см. табл. 3). В рудах месторождения выявляе-

ны отрицательные аномалии Eu и низкие концентрации  $\Sigma$ REE, что характерно для метаморфогенных флюидов (Вау, 1991; Monecke et al., 2002; Волков и др., 2016).

Спектры REE сульфидных прожилково-вкрапленных руд образуют в основном слабонаклонные близзондритовые кривые, во многом сходные по конфигурации со спектрами REE вмещающих пород (см. рис. 5) аунакитской свиты, а также вмещающих пород хомолхинской свиты и руд месторождения Сухой Лог (см. рис. 7б, г). Данный факт свидетельствует о том, что отложения хомолхинской и аунакитской свит, вмещающих все крупные месторождения Бодайбинского региона, накапливались в однотипной геодинамической обстановке.

Сходство морфологии спектров REE прожилково-вкрапленных руд и вмещающих пород указывает на унаследованность REE рудами из вмещающих пород. Богатые и рядовые сульфидные руды отличаются от карбонатных прожилково-вкрапленных руд (см. рис. 7а, б) более крутым наклоном спектра REE и появлением слабовыраженной отрицательной Eu-аномалии.

Вполне возможна связь рудообразования с региональным метаморфизмом вмещающих терригенных углеродистых толщ, которые могли служить основным источником микроэлементов и REE.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты геохимических исследований руд и вмещающих пород месторождения Вернинское подтверждают возможность метаморфогенной модели образования орогенных месторождений золота Бодайбинского района, которая обсуждается геологами на протяжении последних 30 лет (Буряк, 1982; Large et al., 2007; Немеров и др., 2010; Yudovskaya et al., 2016; Tarasova et al., 2020; и др.). Основными поставщиками золота, мышьяка и серебра в орогенную рудообразующую систему могли служить диагенетические сульфиды терригенных и терригенно-карбонатных пород аунакитской свиты неопротерозойского возраста, как показано в статье (Powerman et al., 2015). Региональный метаморфизм вмещающих терригенно-карбонатных пород в условиях фации зеленых сланцев стимулировал перекристаллизацию вмещающих пород, ремобилизацию и перераспределение сульфидов, с сохранением слоистой текстуры. В результате этого процесса породы аунакитской свиты были рассланцованы, а первичная сульфидная минерализация, обогащенная золотом и рядом сопутствующих элементов, преобразована до формирования метаморфогенных пирита и арсенопирита. При этом происходила не только перекристаллизация сульфидов, но и высвобождение и миграция золота, мышьяка, серебра и других элементов. Появление обильного арсенопирита в рудах месторожде-

ния могло быть связано с дополнительным поступлением As из пород аунакитской свиты, обогащенной этим элементом.

Приведенная в статье информация имеет практическое значение для региональных прогнозно-металлогенических построений, поисков и оценки месторождений золота.

## Благодарности

Авторы благодарят А.Е. Будяка за конструктивную критику и ценные рекомендации при подготовке данной статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Будяк А.Е., Брюханова Н.Н. (2012) Селен, висмут и ртуть месторождений золота различных генетических типов в черносланцевых формациях. *Геохимия*, **9**, 881-888.
- Будяк А.Е., Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И., Ванг К.-Л., Горячев Н.А. (2019) Единая неопротерозойская-раннепалеозойская эволюция рудоносных осадочных комплексов юга Сибирского кратона. *Докл. АН*, **484**(3), 80-84.
- Буряк В.А. (1982) *Метаморфизм и рудообразующие процессы*. М.: Наука, 157 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.
- Волков А.В., Мурашов К.Ю., Сидоров А.А. (2016) Геохимические особенности руд Наталкинского месторождения золота, крупнейшего на Северо-Востоке России. *Докл. АН*, **466**(5), 574-577.
- Волков А.В., Прокофьев В.Ю., Тюкова Е.Э., Сидоров В.А., Мурашов К.Ю., Сидорова Н.В. (2017) Новые данные по геологии и геохимии золотокварцевого месторождения Родионовское (Северо-Восток России). *Геология руд. месторождений*, **59**(2), 93-112.
- Волков А.В., Сидоров А.А., Савва Н.Е., Прокофьев В.Ю., Колова Е.Е., Мурашов К.Ю., Сидорова Н.В., Земскова М.И., Савчук Ю.С., Аристов В.В., Вольфсон А.В. (2016) Золотокварцевые месторождения Яно-Колымского складчатого пояса: геохимические особенности руд и флюидов, условия рудообразования. *Вестн. СВНЦ ДВО РАН*, **3**, 3-21.
- Волков А.В., Сидоров А.А., Савва Н.Е., Томсон И.Н., Алексеев В.Ю. (2008) Зоны тонкорассеянной сульфидной минерализации Северо-Востока России – эффективные источники вещества рудных месторождений. *Тихоокеанский рудный пояс: материалы новых исследований (к 100-летию Е.А. Радкевич)*. Владивосток: Дальнаука, 36-51.
- Вуд Б.Л., Попов Н.П. (2006) Гигантское месторождение золота Сухой Лог (Сибирь). *Геология и геофизика*, **47**(3), 315-341.
- Дистлер В.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К. и др. (1996) Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия). *Геология руд. месторождений*, **38**(6), 467-484.

- 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. *Докл. АН*, **423**(2), 228-233.
- Иванов А.И. (2015) Золоторудные месторождения в углеродистых терригенных и карбонатно-терригенных комплексах и перспективы выявления новых месторождений в Российской Федерации. *Руды и металлы*, **1**, 46-63.
- Иванов А.И., Лифшиц В.И., Перевалов О.В. и др. (1995) Докембрий Патомского нагорья. М.: Недра, 353 с.
- Котов А.А., Прокофьев В.Ю., Волков А.В., Злобина Т.М., Мурашов К.Ю. (2023) Флюидные включения в кварце из разных типов промышленных руд месторождения золота Вернинское (Бодайбинский район, Россия). *Геохимия*, **68**(5), 508-520. doi: 10.31857/S0016752523040076
- Котов А.А., Прокофьев В.Ю., Злобина Т.М., Мурашов К.Ю. (2016) Влияние палеосейсмогенных факторов на формирование золоторудных месторождений в зонах дислокаций. *Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе*. Мат-лы докл. III Всеросс. конф. (19–23 сентября 2016 г. Иркутск). Иркутск: ИЗК РАН, 156-159.
- Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. (2006) Т. 2. М.: ИГЕМ РАН, 672 с.
- Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., Мартыненко В.Г., Верхожин А.В. (2012) Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в Вернинском золоторудном месторождении (Ленский район). *Изв. Томского политехн. ун-та*, **321**(1), 22-33.
- Мартыненко В.Г. (2010ф) Золоторудное месторождение Вернинское. Отчет ОАО “Первенец” по результатам разведочных работ за 2005–2008 гг. с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.2009 г.
- Мартыненко В.Г., Домашов А.В., Дейс С.Ю., Корзиков А.Г., Кушнарев П.И. (2017) Основные черты геологического строения Вернинского месторождения. *Разведка и охрана недр*, **4**, 1-8.
- Михалицына Т.И., Соцкая О.Т. (2020) Роль черносланцевых толщ в формировании золоторудных месторождений Наталка и Павлик (яно-колымский орогенный пояс). *Геология и геофизика*, **12**, 1648-1671. DOI: 10.15372/GiG2020149.
- 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.
- Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Прокопчук С.И. (2013) Сорбционная активность нерастворимого углеродистого вещества черносланцевых образований в процессе регионального метаморфизма (Байкало-Патомское нагорье). *Геохимия*, **1**, 92-96.
- Рундквист Д.В. (1997) Фактор времени в образовании гидротермальных месторождений: периоды, эпохи, мегаэтапии и стадии рудообразования. *Геология руд. месторождений*, **39**(1), 11-24.
- Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев С.Г. и др. (2008) Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе. *Геология руд. месторождений*, **50** (1), 3-46.
- Рыцк Е.Ю., Ковач В.П., Ярмолук В.В., Коваленко В.И., Богомолов Е.С., Котов А.Б. (2011) Изотопная структура и эволюция 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. *Докл. РАН. Науки о земле*, **496**(2), 169-175.
- Сидоров А.А., Волков А.В., Савва Н.Е. О зонах тонкой сульфидизации. (2009) (Северо-Восток России). *Докл. АН*, **427**(1), 84-89.
- Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. (1988) Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 384 с.
- Чугаев А.В., Чернышев И.В. (2017) Pb–Pb изотопная систематика орогенных месторождений золота Байкало-Патомского складчатого пояса (Северное Забайкалье, Россия) и оценка роли неопротерозойской коры в их формировании. *Геохимия*, **11**, 1027-1040. doi: 10.7868/S0016752517110048
- Шаров В.Н., Фелелов Н.Н., Лепин В.С. (2000) Нижняя граница бодайбинской серии верхнего рифея. *Отчет геол.*, **4**, 39-42.
- Шер С.Д. (1974) Металлогения золота. М.: Недра.
- 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 аксессуарных минералов. *Геология руд. месторождений*, **53**(1), 32-64.
- Якубчук А.С. (2023) Металлогения золота в геодинамике Центральной Азии. Автореф. дисс. ... докт. наук. М.: МГУ, 42 с.
- Bau M. (1991) Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium. *Chem. Geol.*, **93**, 219-230.
- Bodnar R.J., Lecumberri-Sanchez P., Moncada D., Steele-MacInnes P. (2014) Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Elsevier, 119-142.
- Brown P. (1989) FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *Amer. Miner.*, **74**, 1390-1393.
- 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 Geol. Rev.*, **144**(104855).
- Chugaev A.V., Chernyshev I. V. (2017) Pb–Pb isotopic systematics of orogenic gold deposits of the Baikal-Patom folded belt (Northern Transbaikalia, Russia) and an assessment of the role of the Neoproterozoic crust in their formation. *Geochemistry*, **11**, 1027-1040. doi: 10.7868/S0016752517110048
- Collins P.L.P. (1979) Gas hydrates in CO<sub>2</sub>-bearing fluid in-

- clusions and the use of freezing data for estimation of salinity. *Econ. Geol.*, **74**, 1435-1444.
- Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L. et al. (2004) Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geol. Rev.*, **24**(12), 7-44.
- Goldfarb R.J., Groves D.I. (2015) Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, **233**, 2-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.011>
- Goldfarb R.J., Pitcairn I.K. (2023) Orogenic gold: is a genetic association with magmatism realistic? *Mineral. Depos.*, **58**, 5-35. <https://doi.org/10.1007/s00126-022-01146-8>.
- Goldfarb R.J., Taylor R., Collins G.S., Goryachev N.A., Orlandini O.F. (2014) Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia. *Gondw. Res.*, **25**, 48-102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2013.03.002>
- Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Robert F. (1998) Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geol. Rev.*, **13**, 7-27.
- Groves D.I., Santosh M., Deng J., Wang Q., Yang L., Zhang L. (2020) A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. *Mineral. Depos.*, **55**, 275-292. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00877-5>
- Herron M. (1988) Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *J. Sediment. Petrol.*, **58**(5), 820-829.
- Hoefs J. (2009) Stable Isotope Geochemistry. Springer, 285 p.
- Irber W. (1999) The Lanthanide Tetrad Effect and Its Correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of Evolving Peraluminous Granite Suites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **63**(3/4), 489-508.
- Jones B., Manning D.A.C. (1994) Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chem. Geol.*, **111**, 111-129.
- Kun L., Ruidong Y., Wenyong Ch., et al. (2014) Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province, China. *Chin. J. Geochem.*, **33**, 109-118.
- Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. (2011) A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Econ. Geol.*, **106**, 331-358.
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang Z. (2007) Multi-stage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia. *Econ. Geol.*, **102**, 1233-1267.
- 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. *Dokl. Earth Sci.*, **415**, 810-814.
- Lawrence D.M., Treloar P.J., Rankin A.H., Boyce A., Harbidge P. (2013) A fluid inclusion and stable isotope study at the Loulo mining district, Mali, West Africa: Implications for multifluid sources in the generation of orogenic gold deposits. *Econ. Geol.*, **108**, 229-257. <http://dx.doi.org/10.2113/econgeo.108.2.229>
- McDonough W.F., Sun S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, 223-253.
- Monecke T., Kempe U., Götze J. (2002) Genetic significance of the trace element content in metamorphic and hydrothermal quartz: a reconnaissance study. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **202**, 709-724.
- Oreskes N., Einaudi M.T. (1990) Origin of rare earth element-enriched hematite breccias at the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, roxby downs, South Australia. *Econ. Geol.*, **85**, 1-28.
- Pitcairn I.K., Teagle D.A.H., Craw D., Olivo G.R., Ker-rich R., Brewer T.S. (2006) Sources of metals and fluids in orogenic gold deposits: Insights from the Otago and Alpine schists, New Zealand. *Econ. Geol.*, **101**, 1525-1546.
- Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N., Kapitonov I., Hourigane J. (2015) Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia. *Precamb. Res.*, **267**, 39-71.
- Prokofiev V.Yu., Naumov V.B. (2020) Physicochemical Parameters and Geochemical Features of Ore-Forming Fluids for Orogenic Gold Deposits Throughout Geological Time *Minerals*, **10**(1), 50. <http://dx.doi.org/10.3390/min10010050>
- Prokofiev V.Yu., Safonov Yu.G., Lüders V., Borovikov A.A., Kotov A.A., Zlobina T.M., Murashov K.Yu., Yudovskaya M.A., Selektor S.L. (2019) The sources of mineralizing fluids of orogenic gold deposits of the Baikal-Patom and Muya areas, Siberia: Constraints from the C and N stable isotope compositions of fluid inclusions. *Ore Geol. Rev.*, **111**, 102988. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102988>
- Ridley J.R., Diamond L.W. (2000) Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models. *Gold in 2000. SEG Reviews*, **13**, 141-162.
- 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 Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits. *Ore Geol. Rev.*, **2**, 128-146. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>
- Tomkins AG (2010) Windows of metamorphic sulfur liberation in the crust: implications for gold deposit genesis *Geochim. Cosmochim. Acta*, **74**, 3246-3259.
- Vanin V.A., Mazukabzov A.M., Yudin D.S., Blinov A.V., Tarasova Yu.I., (2022) The Hercynian imposed deformations in the Golets Vysochaishii deposit structure (Baikal-Patom belt),  $^{40}Ar/^{39}Ar$  data. *Geodynam. Tectonophys.*, **13**(1), 0575. doi:10.5800/GT-2022-13-1-0575
- Yakubchuk A., Stein H., Wilde A. (2014) Results of pilot Re-Os dating of sulfides from the Sukhoi Log and Olympiada orogenic gold deposits, Russia. *Ore Geol. Rev.*, **59**, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.003>
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiev N.N. (2016) Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geosci. Front.*, **7**(3), 453-481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010>

REFERENCES

- Bau M. (1991) Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium. *Chem. Geol.*, **93**, 219-230.
- Bodnar R.J., Lecumberri-Sanchez P., Moncada D., Steele-MacInnes P. (2014) Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Elsevier, 119-142.
- Brown P. (1989) FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *Amer. Miner.*, **74**, 1390-1393.
- Budyak A.E., Bryukhanova N.N. (2012) Selenium, bismuth and mercury of gold deposits of various genetic types in black shale formations. *Geochemistry*, **9**, 881-888.
- Budyak A.E., Skuzovatov S.Yu., Tarasova Yu.I., Vang K.-L., Goryachev N.A. (2019) Unified Neoproterozoic-Early Paleozoic evolution of ore-bearing sedimentary complexes of the southern Siberian craton. *Dokl. Akad. Nauk*, **484**(3), 80-84. (In Russ.)
- Buryak V.A. (1982) Metamorphism and ore forming processes. Moscow, Nauka Publ., 157 p. (In Russ.)
- Buryak V.A., Khmelevskaya N.M. (1997) Sukhoi Log – one of world's largest gold deposits (genesis, spatial distribution pattern of ore mineralization, forecasting criteria) Vladivostok, Dal'nauka Publ., 157 p. (In Russ.)
- 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 Geol. Rev.*, **144**(104855).
- Collins P.L.P. (1979) Gas hydrates in CO<sub>2</sub>-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity. *Econ. Geol.*, **74**, 1435-1444.
- Distler V.V., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K. et al. (1996) Forms of occurrence of platinum group metals and their genesis in the Sukhoi Log deposit (Russia) (in Russ.) *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **38**(6), 467-484. (In Russ.)
- Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L. et al. (2004) Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geol. Rev.*, **24**(12), 7-44.
- Goldfarb R.J., Groves D.I. (2015) Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, **233**, 2-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.011>
- Goldfarb R.J., Pitcairn I.K. (2023) Orogenic gold: is a genetic association with magmatism realistic? *Mineral. Depos.*, **58**, 5-35. <https://doi.org/10.1007/s00126-022-01146-8>.
- Goldfarb R.J., Taylor R., Collins G.S., Goryachev N.A., Orlandini O.F. (2014) Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia. *Gondw. Res.*, **25**, 48-102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2013.03.002>
- Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Robert F. (1998) Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geol. Rev.*, **13**, 7-27.
- Groves D.I., Santosh M., Deng J., Wang Q., Yang L., Zhang L. (2020) A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. *Mineral. Depos.*, **55**, 275-292. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00877-5>
- Herron M. (1988) Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *J. Sediment. Petrol.*, **58**(5), 820-829.
- Hoefs J. (2009) Stable Isotope Geochemistry. Springer, 285 p.
- Irber W. (1999) The Lanthanide Tetrad Effect and Its Correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of Evolving Peraluminous Granite Suites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **63**(3/4), 489-508.
- Ivanov A.I. (2015) Gold deposits within carbonaceous terrigenous and carbonate terrigenous complexes and prospects of discovering new such deposits in the Russian federation. *Rudy i Metallurgiya*, **1**, 46-63. (In Russ.)
- Ivanov A.I., Lifshits V.I., Perevalov O.V. et al. (1995) The Precambrian in the Patom Highland. Moscow, Nedra Publ., 353 p. (In Russ.)
- Jones B., Manning D.A.C. (1994) Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chem. Geol.*, **111**, 111-129.
- Kotov A.A., Prokof'ev V.Yu., Volkov A.V., Zlobina T.M., Murashov K.Yu. (2023) Fluid inclusions in quartz from various types of industrial ores of the Verninskoye gold deposit (Bodaibinsky district, Russia). *Geochemistry*, **68**(5), 508-520. (In Russ.). doi: 10.31857/S0016752523040076
- Kotov A.A., Prokof'ev V.Yu., Zlobina T.M., Murashov K.Yu. (2016) The influence of paleoseismic factors on the formation of gold ore deposits in dislocation zones. *Present-day Geodynamics of Central Asia and Dangerous Natural Processes: Results of Research Work on a Quantitative Basis*. Materials of Reports of III All-Russian Conference (September 19–23, 2016, Irkutsk). Irkutsk, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Science, 156-159. (In Russ.)
- Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozhin A.V. (2012) Petrological and geochemical features of wallrock metasomatism at the Verninskoe gold ore deposit (Lena district) (in Russ). *Izv. Tomsk. Politekh. Univ.*, **321**(1), 22-33.
- Kun L., Ruidong Y., Wenyong Ch., et al. (2014) Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province, China. *Chin. J. Geochem.*, **33**, 109-118.
- Large and superlarge ore mineral deposits. (2006) V. 2. Moscow, IGEM RAN Publ., 672 p. (In Russ.)
- Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. (2011) A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Econ. Geol.*, **106**, 331-358.
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang Z. (2007) Multi-stage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia. *Econ. Geol.*, **102**, 1233-1267.
- 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. *Dokl. Earth Sci.*, **415**, 810-814.
- Lawrence D.M., Treloar P.J., Rankin A.H., Boyce A., Harbidge P. (2013) A fluid inclusion and stable isotope study at the Loulo mining district, Mali, West Africa: Implica-

- tions for multfluid sources in the generation of orogenic gold deposits. *Econ. Geol.*, **108**, 229-257. <http://dx.doi.org/10.2113/econgeo.108.2.229>
- Martynenko V.G. (2010f) Verninskoe gold ore deposit. Report of OAO Pervenets on the results of exploration operations in 2005–2008 with of ore reserves calculation as of 01.01.2009. (In Russ.)
- Martynenko V.G., Domashov A.V., Deis S.Yu., Korzakov A.G., Kushnarev P.I. (2017) The main features of the geological structure of the Verninskoe deposit (in Russ). *Razvedka i Okhrana Nedr*, **4**, 1-8.
- McDonough W.F., Sun S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, 223-253.
- Mikhailitsina T.I., Sotskaya O.T. (2020) The role of black shale strata in the formation of the Natalka and Pavlik gold ore deposits (Yana–Kolyma orogenic belt) *Geol. Geofiz.*, **12**, 1648-1671. (In Russ.) DOI: 10.15372/GiG2020149
- Monecke T., Kempe U., Götze J. (2002) Genetic significance of the trace element content in metamorphic and hydrothermal quartz: a reconnaissance study. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **202**, 709-724.
- Nemerov V.K., Stanevich A.M., Razvozzhaeva E.A., Budyak A.E., Kornilova T.A. (2010) Biogenic sedimentation factors of ore formation in Neoproterozoic strata of the Baikal-Patom region. *Geol. Geofiz.*, **51**(5), 729-747.
- Oreskes N., Einaudi M.T. (1990) Origin of rare earth element-enriched hematite breccias at the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, roxby downs, South Australia. *Econ. Geol.*, **85**, 1-28.
- Pitcairn I.K., Teagle D.A.H., Craw D., Olivo G.R., Kerrich R., Brewer T.S. (2006) Sources of metals and fluids in orogenic gold deposits: Insights from the Otago and Alpine schists, New Zealand. *Econ. Geol.*, **101**, 1525-1546.
- Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N., Kapitonov I., Hourigane J. (2015) Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia. *Precamb. Res.*, **267**, 39-71.
- Prokofiev V.Yu., Naumov V.B. (2020) Physicochemical Parameters and Geochemical Features of Ore-Forming Fluids for Orogenic Gold Deposits Throughout Geological Time. *Minerals*, **10**(1), 50. <http://dx.doi.org/10.3390/min10010050>
- Prokofiev V.Yu., Safonov Yu.G., Lüders V., Borovikov A.A., Kotov A.A., Zlobina T.M., Murashov K.Yu., Yudovskaya M.A., Selektor S.L. (2019) The sources of mineralizing fluids of orogenic gold deposits of the Baikal-Patom and Muya areas. Siberia: Constraints from the C and N stable isotope compositions of fluid inclusions. *Ore Geol. Rev.*, **111**, 102988. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102988>
- Razvozhayeva E.A., Budyak A.E., Prokopchuk S.I. (2013) Sorption activity of insoluble carbonaceous matter in black shale formations during regional metamorphism (Baikal–Patom highland). *Geokhimiya*, **1**, 92-96. (In Russ.)
- Ridley J.R., Diamond L.W. (2000) Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models. *Gold in 2000. SEG Rev.*, **13**, 141-162.
- Rundkvist D.V. (1997) The time factor in the formation of hydrothermal deposits: periods, epochs, megastages, and stages of ore formation. *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **39**(1), 11-24. (In Russ.)
- Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G. et al. (2008) Wallrock metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore district (in Russ). *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **50**(1), 3-46.
- Rytsk E.Yu., Kovach V.P., Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Bogomolov E.S., Kotov A.B. (2011) Isotopic structure and evolution of the crust within the East Transbaikalian segment of the Central Asian foldbelt. *Geotektonika*, **5**, 17-51. (In Russ)
- Rytsk E.Yu., Tolmacheva E.V., Velikoslavinskii S.D., Kuznetsov A.B., Rodionov N.V., Andreev A.A., Fedosenko A.M. (2021) Results of the study (SIMS) of zircon from granitoids of the Konstantinovskii stock (area of the Sukhoi Log gold ore deposit): age, sources, and geological consequences. *Dokl. Ross. Akad. Nauk. Nauki o Zemle*, **496**(2), 169-175. (In Russ.)
- Sharov V.N., Fefelov N.N., Lepin V.S. (2000) The lower boundary of the Bodaibo Group, Upper Riphean. *Otech. Geol.*, **4**, 39-42. (In Russ.)
- Sher S.D. (1974) Metallogeny of Gold. Moscow, Nedra Publ. (In Russ.)
- Sidorov A.A., Volkov A.V., Savva N.E. (2009) On fine sulfidization zones (northeastern Russia). *Dokl. Akad. Nauk*, **427**(1), 84-89. (In Russ.)
- 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 Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits. *Ore Geol. Rev.*, **2**, 128-146. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>
- Teilor S.R., Mak-Lennan S.M. (1988) Continental crust: Its composition and evolution. Moscow, Mir Publ., 384 p. (In Russ.)
- Tomkins AG (2010) Windows of metamorphic sulfur liberation in the crust: implications for gold deposit genesis *Geochim. Cosmochim. Acta*, **74**, 3246-3259.
- Vanin V.A., Mazukabzov A.M., Yudin D.S., Blinov A.V., Tarasova Yu.I., (2022) The Hercynian imposed deformations in the Golets Vysochaishii deposit structure (Baikal-Patom belt),  $^{40}Ar/^{39}Ar$  data. *Geodynam. Tectonophys.*, **13**(1), 0575. doi:10.5800/GT-2022-13-1-0575
- Volkov A.V., Murashov K.Yu., Sidorov A.A. (2016) Geochemical features of the ores of the Natalka gold deposit, the largest in Northeastern Russia. *Dokl. Akad. Nauk*, **466**(5), 574-577. (In Russ.)
- Volkov A.V., Prokofiev V.Yu., Tyukova E.E., Sidorov V.A., Murashov K.Yu., Sidorova N.V. (2017) New data on the geology and geochemistry of the Rodionovskoye gold quartz deposit (Northeast Russia). *Geol. Ore Depos.*, **59**(2), 93-112. (In Russ.)
- Volkov A.V., Sidorov A.A., Savva N.E., Prokof'ev V.Y., Kolova E.E., Murashov K.Y., Sidorova N.V., Zems-kova M.I., Savchuk Yu.S., Aristov V.V., Vol'fson A.V. (2016) Gold quartz deposits of the Yano-Kolyma folded belt: geochemical features ores and fluids, ore formation conditions. *Vestn. SVNTs DVO RAN*, **3**, 3-21. (In Russ.)
- Volkov A.V., Sidorov A.A., Savva N.E., Tomson I.N., Alekseev V.Yu. (2008) Zones of finely dispersed sulfide mineralization in the North-East of Russia are effective sources of ore deposits. *Pacific Ore belt: materials of new research (dedicated to the 100th anniversary of*

- E.A. Radkevich*). Vladivostok, Dal'nauka Publ., 36-51. (In Russ.)
- Vud B.L., Popov N.P. (2006) Giant gold deposit Sukhoi Log (Siberia). *Geol. Geofiz.*, **47**(3), 315-341.
- Yakubchuk A., Stein H., Wilde A. (2014) Results of pilot Re–Os dating of sulfides from the Sukhoi Log and Olympiada orogenic gold deposits, Russia. *Ore Geol. Rev.*, **59**, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.003>
- 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. *Geosci. Front.*, **7**(3), 453-481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010>
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. (2011) Interrelation of metamorphism and ore formation processes at the Sukhoi Log black shale gold deposit as based on the results of U–Th–Pb isotopic SHRIMP dating of accessory minerals. *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **53**(1), 32-64. (In Russ.)
- Zorin Yu.A., Mazukabzov A.M., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Presnyakov S.L., Sergeev S.A. (2008) Silurian age of the main folded deformations of the Riphean deposits of the Baikal-Patom zone. *Dokl. Akad. Nauk*, **423**(2), 228-233. (In Russ.)