

УДК 550.42 (571.55)

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4452

Шифр специальности ВАК: 1.6.10 (25.00.11)

Амазарканское золоторудное месторождение: условия формирования, источники рудного вещества (Восточное Забайкалье)

Б.Н. Абрамов^{1✉}, Ю.А. Калинин², А.А. Боровиков², В.Ф. Посохов³, В.Н. Реутский²

¹ Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия, г. Чита

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, г. Новосибирск

³ Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Россия, г. Улан-Удэ

✉ b_abramov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования состоит в необходимости выяснения источников и условий формирования золотого оруденения Амазарканского золоторудного месторождения. Характерной особенностью месторождения является пространственная совмещенность золотого оруденения и малых интрузий среднего и основного состава амуджиканского комплекса. *Целью* исследования является определение физико-химических условий и природы источника рудного вещества Амазарканского месторождения. *Методы.* Для определения элементного состава пород использовался ИСП-МС метод и стандартный химический анализ. Изотопный состав серы сульфидов определен методом газовой масс-спектрометрии, а состав флюидных включений в кварце рудных жил изучен традиционными методами термобарогеохимии и КР-спектроскопии в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Определение изотопного состава кислорода проводилось в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) с использованием установки MIR 10-30 системы лазерного нагрева с лазером CO₂ мощностью 100 ватт и длиной волны 10,6 мкм в инфракрасной области в присутствии реагента BrF₅. *Результаты.* Установлена пространственная приуроченность рудных зон к мезозойским дайкам амуджиканского комплекса (J₂₋₃). Соотношения Eu/Sm и Eu/Eu* в дайках указывают на фракционирование магматических расплавов в очагах на уровне нижней континентальной коры и низкую степень их дифференциации. Характер распределения РЗЭ в дайках амуджиканского комплекса и в рудах месторождения аналогичен. Eu/Sm–Eu/Eu* фигуративные точки составов рудных жил и гранодиоритов амуджиканского комплекса образуют единый тренд. Дайки амуджиканского комплекса характеризуются повышенным содержанием Au от 0,026 до 1,17 г/т. Эти данные дают основание предполагать наличие парагенетической связи Au-оруденения с породами амуджиканского комплекса. Рудные жилы продуктивных стадий рудообразования образовались при температуре от 125 до 410 °С. Расчетный изотопный состав S и O рудообразующего флюида, находящегося в равновесии с пиритом и кварцем, а также отношение Co/Ni > 1 в рудах указывают на присутствие магматической компоненты в его составе.

Ключевые слова: Амазарканское золоторудное месторождение, рудные ассоциации, изотопы кислорода, изотопы серы, индикаторные отношения элементов, магматические источники, флюидные включения

Благодарности: Работа выполнена по госзаданиям Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Института геологии и минералогии СО РАН (№ 122041400237-8, 122041400171-5), Геологического института СО РАН.

Для цитирования: Амазарканское золоторудное месторождение: условия формирования, источники рудного вещества (Восточное Забайкалье) / Б.Н. Абрамов, Ю.А. Калинин, А.А. Боровиков, В.Ф. Посохов, В.Н. Реутский // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 56–70. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4452

UDC 550.42 (571.55)

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4452

Amazarkan gold deposit: conditions of formation, sources of ore substance (Eastern Transbaikalia)

B.N. Abramov¹✉, Yu.A. Kalinin², A.A. Borovikov², V.F. Posokhov³, V.N. Reutsky²

¹ Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russian Federation

² V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

³ Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

✉ b_abramov@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to clarify the sources and conditions of formation of gold mineralisation of the Amazarkan gold deposit. The characteristic feature of the deposit is the spatial combination of gold mineralisation and small intrusions of the middle and basic composition of the Amudzhikan complex. **Aim.** Determination of physico-chemical conditions and nature of the source of the ore substance of the Amazarkan deposit. **Methods.** ICP-MS method and standard chemical analysis were used to determine the elemental composition of rocks. Sulfur isotope composition of sulfides was obtained using gas-source mass-spectrometry and fluid inclusions in quartz of ore veins were studied by traditional methods of thermobarogeochemistry and by FTIR spectroscopy at the Centre for Collective Use of Multi-element and Isotope Studies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk). The oxygen isotope composition was determined at the Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude) using the MIR 10-30 laser heating system with a 100-watt CO₂ laser and a wavelength of 10.6 μm in the infrared region in the presence of BrF₅ reagent. **Results.** The authors have established the spatial confinement of ore zones to Mesozoic dikes of the Amudzhikan complex (J₂₋₃). The Eu/Sm and Eu/Eu* ratios in the dikes indicate fractionation of magmatic melts in the sources at the level of the lower continental crust and low degree of their differentiation. The character of REE distribution in the rocks of dikes of the Amudzhikan complex is similar to the distribution of REE in the ores of the deposit. Eu/Sm–Eu/Eu* figurative points of compositions of ore veins and granodiorites of the Amudzhikan complex form a single trend. Dykes of the Amudzhikan complex are characterized by increased Au content from 0.026 to 1.171 g/t. These data suggest a paragenetic link between Au mineralization and rocks of the Amudzhikan complex. Ore veins of productive stages of ore formation were formed at temperatures ranging from 125 to 410°C. The calculated S and O isotopic composition of the ore-forming fluid in equilibrium with pyrite and quartz, as well as the Co/Ni>1 ratio in the ores indicate the presence of a magmatic component in its composition.

Keywords: Amazarkan gold deposit, ore associations, oxygen and sulfur isotopes, indicator ratios of elements, magmatic sources, fluid inclusions

Acknowledgements: The work was carried out according to state assignments of the Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (№ 122041400237-8, 122041400171-5), Institute of Geology SB RAS.

For citation: Abramov B.N., Kalinin Yu.A., Borovikov A.A., Posokhov V.F., Reutsky V.N. Amazarkan gold deposit: conditions of formation, sources of ore substance (Eastern Transbaikalia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 56–70. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4452

Введение

Забайкалье является крупной ресурсной базой России по рудной и россыпной золотодобыче. Месторождения золота Забайкальского края принадлежат к различным геолого-промышленным типам – собственно золоторудным и комплексным золотосодержащим. Среди них наибольшее количество принадлежит золото-кварцевой, золото-сульфидно-кварцевой и золото-серебряной рудным формациям. В последние годы существенный прирост запасов золота был достигнут за счет разведки и переоценки золото-железо-скарновых (Быстринское) и золото-содержащих Cu-Мо-порфировых (или золото-медно-

скарновых) (Култуминское, Бугдаинское, Лугоканское и др.) месторождений. Вероятно, и дальнейшие перспективы прироста запасов золота будут связаны с выявлением такого типа объектов. В то же время в современных сложных условиях обеспечения импортонезависимости государства [1] «классические» жильные месторождения, отрабатывавшиеся на протяжении длительного времени, пока не утратили своего значения.

Магматические комплексы Восточного Забайкалья, с которыми связана Au- и Cu-Мо-порфировая минерализация региона, представлены плутоническими и вулканоплутоническими произ-

водными шошонит-латитовой и высококалийевой известково-щелочной магм [1–3]. Установленная перемежаемость этих магм во времени и присутствие комбинированных даек сложного строения в рудных полях Мо-порфировых и золоторудных месторождений указывает на одновременное существование магматических очагов разных глубинных уровней (мантийного и корового), с которыми могла быть связана генерация магматических расплавов и магматогенных флюидов, участвовавших в процессах рудообразования на золоторудных и Cu–Мо-порфировых месторождениях. Основными критериями парагенетической связи процессов рудообразования и магматизма служат одновременность их проявления и совмещенность ареалов распространения. Проследить генетические связи рудной минерализации с конкретными магматическими фазами можно путем сопоставления геохимического состава магматических пород и руд, с ними связанных. Одним из таких инструментов является исследование геохимических особенностей и состава магматических пород и рудообразующих флюидов. Идентификация конкретных фаз рудоносных магматических комплексов, как вероятных магматических источников рудообразующих флюидов, может быть использована как критерий генетической связи рудообразования и магматизма и иметь большое значение для создания адекватных генетических моделей рудных месторождений. Амазарканское месторождение подготовлено к промышленному освоению. Ранее при проведении тематических работ был изучен структурный и магматический контроль оруденения, минеральный состав руд, выделены стадии минерализации. Цель настоящей работы авторы видят в обобщении всей накопленной геологической информации и в выяснении на этой основе, с учетом новых геохимических данных, условий рудообразования с оценкой возможных источников рудного вещества.

Фактический материал и методика исследования

В основу публикации положен фактический материал, собранный авторами в процессе полевых исследований, а также материал территориальных геологических фондов (г. Чита). Изучение элементного состава пород и руд проведено в аналитических лабораториях Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) и в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Содержания элементов определены рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре ARL Perform'X 4. Пороги обнаружения V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo 1–3 г/т; Hf, Ta, W, Nb, Bi, Th, U – 5–10 г/т. Содержания золота определялось пробирно-атомно-эмиссионным методом с индуктивно

связанной плазмой в ЗАО «SGS Vostok Limited» (г. Чита). Измерения концентраций редкоземельных элементов проведены ИСП-АЭС методом. Определение изотопного состава кислорода проводилось с использованием установки экстракции кислорода с лазерным нагревом, оснащенной лазером MIR 10-30 мощностью 30 ватт и длиной волны 10,6 мкм, в присутствии реагента BrF₅ в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН. Результаты анализа представлены относительно стандарта VSMOW. Изотопный состав серы в сульфидах и углерода в графите проанализирован в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН на базе ИГМ СО РАН. Измерения проводили на газовом масс-спектрометре Delta V Advantage в режиме двойного напуска после количественного окисления образцов в вакуумной установке. Методические детали описаны в [4, 5]. Значения $\delta^{34}\text{S}$ и $\delta^{13}\text{C}$ (‰) приведены относительно стандартов VCDT и VPDB, соответственно.

Для исследования флюидных включений (ФВ) применялись методы крио- и термометрии (микротермокамера THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений от –196 до +600 °C). Изучение состава газовой фазы ФВ проводилось методом КР-спектроскопии (спектрометр Ramanor U-1000 фирмы JobinYvon, лазер MillenniaProS2 (532 nm), детектор HORIBA JOBIN YVON, г. Новосибирск). Общая концентрация солей в растворах ФВ и принадлежность их к той или иной водно-солевой системе определялись по данным криометрии [6–11].

Краткая характеристика геологического строения месторождения

Амазарканское месторождение открыто Итакинской партией Читинского геологического управления при поисковых работах масштаба 1:10000, проводимых с 1964 по 1967 гг. Предварительная и детальная разведка месторождения проводились в 1993–1998 гг.

Месторождение расположено в юго-западной части Становой складчатой области в Пришилкинской мобильной зоне, образованной в результате коллизии Сибирского и Монголо-Китайского континентов в юрский период [2].

В Восточном Забайкалье значительная часть золоторудных месторождений образована в среднеюрское и раннемеловое время, соответствующие коллизионным и рифтогенным этапам развития региона [2].

В районе месторождения развиты осадочные и интрузивные образования архейского, палеозойского и мезозойского возрастов. В структурном отношении месторождение локализовано в узле пересечения Урюмо-Амазарканской северо-восточной зоны разломов с нарушениями более высоких порядков субширотного, северо-восточного и субмеридионального направлений (рис. 1).

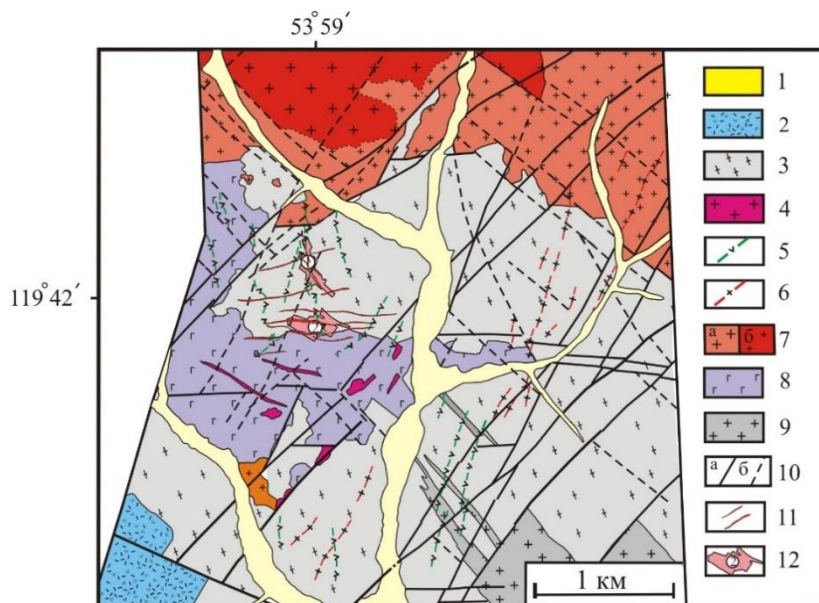


Рис. 1. Схема геологического строения Амазарканского золоторудного месторождения: 1 – четвертичные отложения (Q): аллювиальные песчано-галечные отложения пойм и надпойменных террас; 2 – нюкжинская серия (J₃ nk), фельзитовые и кварцевые порфиры и их туфы, песчаники, алевролиты, туфы, валунно-галечные конгломераты; 3 – амазарская свита (AR am₂), разнозернистые гранатовые гнейсы с прослоями кристаллических сланцев; амударканский интрузивный комплекс (J₃a): 4 – штоки гранодиорит-порфиров; 5 – дайки лампрофиров, диоритовых порфиров, габброидов; 6 – амананский комплекс (J₁a), дайки кварцевых порфиров, гранит-порфиров; 7 – олекминский комплекс (PZ₁): а) биотитовые граниты; б) порфировидные граниты; 8 – раннепротерозойские габброиды (PR₁); 9 – архейские гранито-гнейсы (AR); 10 – тектонические нарушения: а) главные; б) второстепенные; 11 – сульфидные кварц-карбонатные жилы; 12 – рудные тела по результатам опробования, в окружности 1 – Северная рудная зона, 2 – Широтная рудная зона

Fig. 1. Schematic geological map of the Amazarkan gold deposit: 1 – Quaternary rocs (Q): alluvial sand and pebble formations of floodplains and above-floodplain terraces; 2 – Nyukzha series (J₃ nk), felsic and quartz porphyries and their tuffs, sandstones, siltstones, tuffs, boulder-pebble conglomerates; 3 – Amazar formation (AR am₂), heterogeneous garnet gneisses with interlayers of crystalline schists; 3–5 – Amudzhikan intrusive complex (J₃a): 4 – granodiorite porphyry stocks; 5 – lamprophyre dikes, diorite porphyrites, gabbroids; 6 – Amanan complex (J₁a), dikes of quartz porphyry, granite porphyry; 7 – Olekma complex (PZ₁): a) biotite granites; b) porphyritic granites; 8 – Early Proterozoic gabbroids (PR₁); 9 – Archean granite-gneisses (AR); 10 – tectonic disturbances: a) main; b) secondary; 11 – sulfide quartz-carbonate veins; 12 – ore bodies based on sampling results, in circle 1 – Northern ore zone, 2 – Latitudinal ore zone

Породы, вмещающие месторождение, представлены отложениями амазарской свиты архея (U-Pb SHRIMP, 1873±3 млн лет) [12], сложенной гранулитам и гнейсами с прослоями кристаллических сланцев, амфиболитов и кальцифиров. В нижней части свиты преобладают гранулиты, в верхней части разреза преобладают гнейсы и кристаллические сланцы, часто с графитом. Общая мощность амазарканской свиты составляет около 3500 м. В минеральном составе графитовых гнейсов присутствуют кварц (50–55 мас. %), турмалин (20–25 мас. %), апатит (2–3 мас. %). Гнейсы и кристаллические сланцы в районе месторождения интенсивно графитизированы. Графит образует тонкочешуйчатые скопления (0,01–0,08 мм) и графитовые прожилки. По содержанию углерода (1,5–26,3 мас. %) графитовые гнейсы соответствуют высокоуглеродистым сланцам (табл. 1).

В пределах месторождения графитовые гнейсы представлены темно-серыми до черных

мелкозернистыми породами со слоисто-плочатой текстурой. Среднее содержание золота в графитовых гнейсах амазарской свиты составляет 0,09 г/т, что почти на два порядка превышает фоновые содержания (табл. 1), и колеблется от 0,05 до 2,54 г/т [13].

Отложения нюкжинской серии (J₃nk) обнажаются в юго-западной части Амазарканского рудного поля. Нижняя часть разреза серии представлена валунно-галечными конгломератами с прослоями и линзами песчаников. Верхняя часть разреза сложена вулканогенно-осадочными породами, залегающими на конгломератах с угловым несогласием. Мощность отложений нюкжинской серии составляет около 150 м.

В северо-западной части района месторождения обнажается габбро-диоритовый массив раннепротерозойского возраста, сложенный в центральной части кварцевыми диоритами, сменяющимися в краевых частях роговообманковыми габбро.

Таблица 1. Содержания золота, изотопный состав, Сорг графитовых гнейсов амазарской свиты

Table 1. Gold content, isotopic composition, Sorg of graphite gneiss of the Amazar formation

№ проб Sample no.	Минерал Mineral	$\delta^{313}\text{C}(\text{‰})$ PDB	$S_{\text{орг}}$ S _{org} (%)	Содержания Au, г/т Au content, g/t
Кварцево-сульфидные жилы с графитом Quartz-sulfide veins with graphite				
655	Графит Graphite	-28,43	-	10,85
655-1		-28,90	-	0,11
655-2		-27,23	-	0,76
Графитовые гнейсы/Graphite gneiss				
901	Графит Graphite	-24,84	8,20	0,06
902		-24,02	26,28	0,06
904		-22,30	1,52	2,54
905		-21,96	4,68	1,70
906		-22,28	3,06	0,21
907		-24,93	5,31	0,56
908		-24,93	11,8	0,42
Виды анализов/Types of analyses				
Спектрозолотометрия Spectrosolotometry (n=33)*			Пробирный анализ Assay (n=16)*	
Графитсодержащие гнейсы Graphite-containing gneiss			Графитовые гнейсы с сульфидной минерализацией Graphite gneiss with sulfide mineralization	
<u>от-до/</u> <u>from-to</u>		<u>0-0.4</u>	<u>от-до/</u> <u>from-to</u>	<u>0.1-11.0</u>
среднее/ <u>average</u>		0.09	среднее/ <u>average</u>	2.90

* – по данным фондовых материалов, n – число анализов.

* – according to stock materials, n is the number of analyses.

В северной части месторождения развиты интрузивные образования олекминского комплекса (PZ₁), представленного крупным массивом гранитоидов. Преобладающие в составе комплекса биотитовые и порфиридные граниты имеют возраст 358 ± 2 млн лет [14].

Амананский комплекс (J_{1a}) представлен редкими дайками гранит-порфиров и кварцевых порфиров возрастом 193–260 млн лет [15].

Амуджиканский комплекс (J_{3a}) представляют дайки гранодиорит-порфиров, диоритовых порфиров и лампрофиров возрастом 145–165 млн лет [15]. Мощность даек достигает 20 м, протяженность – 1,5 км. Простирание даек контролируется трещинными структурами северо-восточного, северо-западного, субширотного направлений, широко развитых в пределах площади. Контакты с вмещающими породами резкие, прямолинейные с зонами закалки, часто тектонические.

Диоритовые порфириты – темные, зеленовато-серые порфировые породы с тонкокристаллической основной массой. Вкрапленники роговой обманки, плагиоклаза (№ 30–34), биотита составляют 15–20 % объема породы. Основная масса гипидиоморфно-зернистой структуры состоит из плагиоклаза (№ 39–40), изредка встречается кварц. Акцессорные минералы – магнетит, апатит, редко титанит и алланит. Диорит-порфириты иногда слагают краевые

части даек гранодиорит-порфиров и имеют с ними постепенные переходы.

Гранодиорит-порфиры – серые или розовато-серые порфировые породы. Вкрапленники зонального плагиоклаза (№ 28–35), биотита, роговой обманки, редко кварца размером 3–4 мм составляют от 20 до 40 % объема породы, при преобладании плагиоклаза (до 60 % состава вкрапленников). Основная масса тонкозернистая, состоит из кварца (30–50 %) и полевых шпатов, из которых обычно преобладает калишпат, редко биотит и роговая обманка. Структура основной массы аплитовая, фельзитовая с элементами микропегматитовой. Акцессорные минералы представлены магнетитом, титанитом, цирконом, апатитом, очень редко алланитом.

Лампрофиры – макроскопически-чёрные с зеленоватым или буроватым оттенком массивные породы с порфириобластами водьяно-прозрачного кварца и калишпата размером до 1–5 мм. В порфириобластах калишпата часты включения зерен роговой обманки и биотита. Выделения кварца окружены каемкой амфибола, реже биотита (оцеллярная структура). Основная масса сложена плагиоклазом, роговой обманкой и биотитом, в интерстициях между ними встречаются скопления мелкозернистого кварца. Плагиоклаз замещен соссюритом, роговая обманка – актинолитом, хлоритом, порода карбонатизирована. Акцессорные минералы – апатит, магнетит, редко встречается турмалин.

Околорудные метасоматиты представлены турмалинизированными, березитизированными графитовыми гнейсами и сланцами, а также зонами сульфидизации, окварцевания и скарнирования. В зонах турмалинизации количество турмалина достигает 10 %. Часто он образует радиально-лучистые «турмалиновые солнца» размером до 0,8–1,0 мм. В тесном сростании с турмалином наблюдаются удлиненно-вытянутые листовидные обособления графита размером до 1,5–2,0 мм. Кварц-турмалиновые метасоматиты являются рудовмещающими для золото-турмалинового типа оруденения. Кварц-серицитовые метасоматиты и березиты сопровождают зоны дробления в гнейсах и тоже содержат графит, который наблюдается в виде неравномерной вкрапленности, пластинчатых агрегатов, ветвистых прожилков мощностью до 1 мм.

Рудные тела в пределах месторождения выявляются по данным опробования и представляют собой штокверковые зоны с кварц-сульфидной минерализацией в графитовых гнейсах. Среднее содержание золота в рудах составляет 2,6 г/т. В графитовых гнейсах с наложенной сульфидной минерализацией содержания золота варьируют от 0,1 до 11,0 г/т при среднем содержании (пробирный метод) 2,9 г/т (табл. 1). По подсчитанным запасам ис-

следуемый объект соответствует мелким месторождениям золота. Выделены Северная и Широтная рудные зоны, представленные участками распространения кварцево-жильной и прожилково-вкрапленной рудной минерализации штокверкового типа среди графитовых гнейсов. Широтная рудная зона образована штокверком прожилково-вкрапленного оруденения и локализована в узле сопряжения тектонических структур разной ориентации. Повышенные содержания золота отмечаются в зонах интенсивного развития прожилково-вкрапленной кварц-турмалин-сульфидной минерализации. Северная рудная зона сопряжена с мощной трещинной структурой субмеридиональной ориентировки, вмещающей измененные дайковые тела габбро-диоритового состава. В пределах Северной рудной зоны развиты золотоносные кварц-графитовые жилы мощностью до нескольких сантиметров. Главными рудными минералами являются магнетит, молибденит, пирит, арсенопирит, сфалерит, галенит. К второстепенным и редким минералам руд относятся халькопирит, марказит, мартит, мельниковит, шеелит, пентландит, кобальтин, Bi, Ag теллуриды, самородное Au, а также монацит, ксенотим и рабдофан.

На месторождении установлены минеральные ассоциации, соответствующие стадиям рудообразования: 1 – магнетитовая; 2 – молибденит-пирит-кварцевая; 3 – кварц-турмалиновая; 4 – кварц-пиритовая; 5 – пирит-арсенопирит-кварцевая; 6 – полиметаллическая; 7 – кварц-халцедон-

карбонатная [16]. Магнетитовая, молибденит-пирит-кварцевая, пирит-арсенопирит-кварцевая и полиметаллическая ассоциации имеют ограниченное распространение. Кварц-турмалиновая и кварц-пиритовая ассоциации широко представлены на площади всего месторождения. Продуктивными на Au оруденение являются кварц-пиритовая, пирит-арсенопирит-кварцевая и полиметаллическая ассоциации (табл. 2). Графит установлен в виде минеральных включений в кварце, пирите, халькопирите, марказите, арсенопирите. Агрегаты графита и его прожилки секутся более поздними прожилками сульфидно-карбонат-кварцевого состава. Руды месторождения отвечают малосульфидной золоторудной формации и относятся к арсенопирит-пирит-сфалерит-галенитовому минеральному типу. По содержанию сульфидов руды являются мало- и умеренно сульфидными.

Петрогеохимическая характеристика пород амуджиканского комплекса и руд

По соотношениям $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ мезозойские интрузивные образования основного и среднего составов соответствуют калиево-натриевой серии (табл. 3). В районе месторождения породы кислого состава представлены дайками кварцевых порфиров, соответствующих калиевой серии. По геохимическим особенностям состава интрузивные образования амуджиканского комплекса соответствуют интрузиям, сформированным в коллизионных и постколлизионных обстановках (рис. 2).

Таблица 2. Элементный состав (г/т) и индикаторные отношения элементов в сульфидно-кварцевых жилах рудных стадий Амазарканского месторождения

Table 2. Elemental composition (g/t) and indicator ratios of elements in sulfide-quartz veins of ore stages Amazarkan gold deposit

№ проб Sample no.	Au	As	Bi	Mo	Cu	Co	Ni	Pb	Sn	Sb	Nb	Rb	Sr	U	Th	La	Th/La	Nb/La	Co/Ni	Rb/Sr	U/Th
Кварц-турмалиновая стадия/Quartz-tourmaline stage																					
647-1	3,08	220	51,9	14,0	170	29,0	5,0	39,0	19,0	11,5	6,0	136	90	1,16	6,5	28,8	0,23	0,21	5,8	1,5	0,2
649	2,40	250	6,9	30,0	50,0	26,0	12,0	55,0	18,0	18,0	5,0	115	150	0,94	6,6	47,4	0,14	0,11	2,2	0,8	0,1
649-1	1,31	391	8,5	–	–	34,0	17,0	24,0	–	16,0	12,0	55	117	–	6,4	–	–	–	2,0	0,5	–
692	0,68	220	18,2	2,0	380	28,5	19,0	46,0	31,0	9,7	8,0	60,1	40	18,8	10	19,7	0,54	0,41	1,5	1,5	1,8
Кварц-пиритовая стадия/Quartz-pyrite stage																					
695	1,37	70	4,0	3,0	290	22,5	24,0	58,0	80,0	3,0	17,0	6,2	8,0	80,4	220	2,24	7,7	0,9	0,4	0,3	0,3
697	0,77	110	5,0	5,0	1630	18,5	10,0	47,0	90,0	5,0	29,0	8,5	14	158	180	3,12	5,7	1,8	0,9	0,5	0,5
655	10,8	270	148	132	60,0	13,8	17,0	98,0	64,0	139,0	18,0	40,4	8,0	17,4	90	2,50	12,5	0,8	0,2	0,2	0,2
655-1	0,11	40	4,4	60,0	40,0	13,3	5,0	26,0	28,0	60,0	19,0	4,3	10	74,2	180	1,30	3,6	2,7	0,4	0,4	0,4
656	–	140	71,3	16,0	20,0	15,6	5,0	108,0	22,0	16,0	15,0	14,5	5,0	119	150	1,36	14,9	3,1	0,8	0,1	0,1
698	1,38	30	32,3	61,0	30,0	8,7	6,0	29,0	12,0	61,0	21,0	25,4	17	79,0	620	5,02	25,1	1,5	0,1	0,2	0,2
Пирит-арсенопирит-кварцевая стадия/Pyrite-arsenopyrite-quartz stage																					
647	7,50	1819	59,0	–	–	84,0	2,0	89,0	–	54,0	–	37,0	48	–	4,2	–	–	–	42,0	0,8	–
654	0,35	1030	28,0	–	–	21,5	9,0	36,0	16,0	2,3	5,0	157	210	0,46	2,7	0,46	–	10,9	2,4	0,7	0,2
690	2,68	334022	128	–	450	138	17,0	120	18,0	19,0	2,0	11,1	10	8,6	4,7	8,6	5,87	0,2	8,1	1,1	1,8
693-1	0,47	70	18,6	51	30	97,0	46,0	56,0	16,0	18,5	15	46,6	110	2,98	6,0	3,0	0,55	5,0	2,1	0,4	0,5
Кварц-полиметаллическая стадия/Quartz-polymetallic stage																					
651-1	2,78	160	13,2	6,0	40	163	21,0	253	652	6,0	25	19,1	1,0	6,6	20	0,4	3,2	7,8	0,3	0,1	0,1

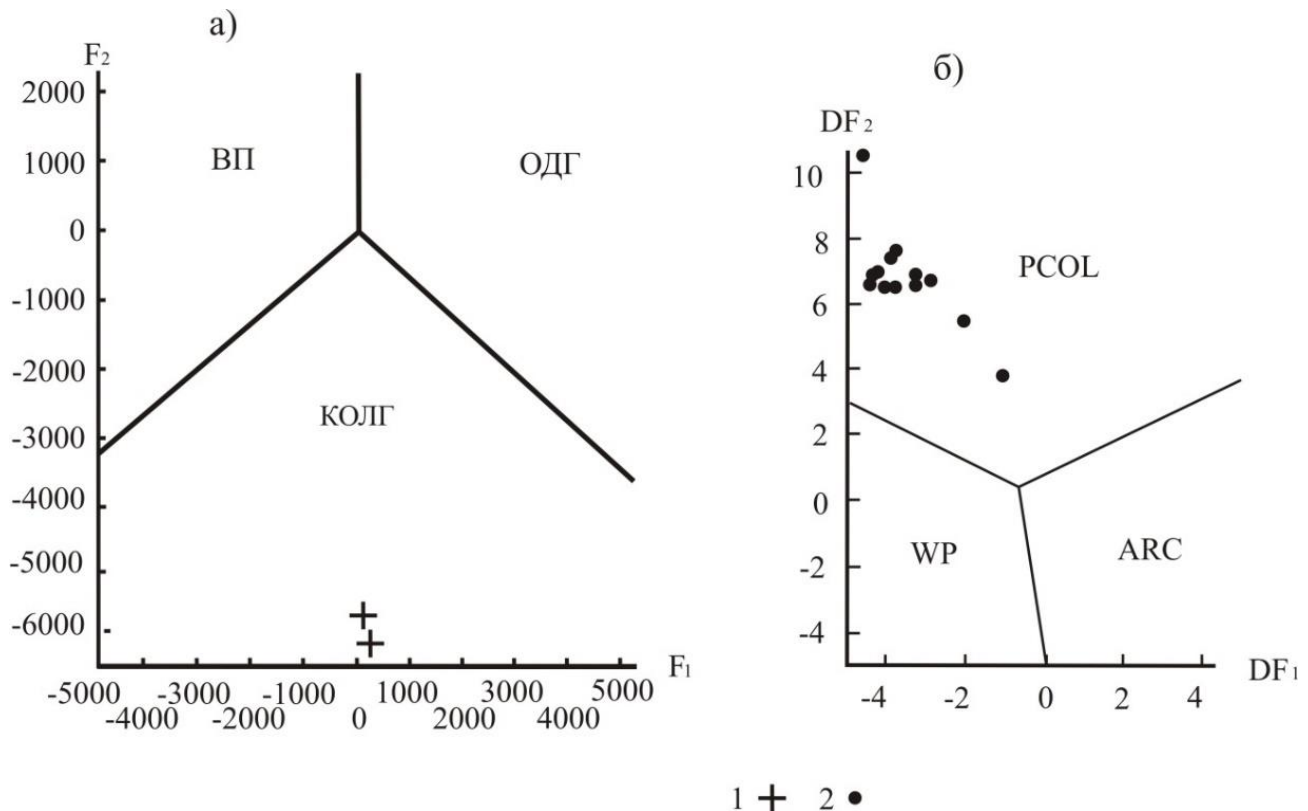


Рис. 2. Дискриминационные диаграммы интрузивных пород Амазарканского месторождения: а) диаграмма F_1 - F_2 [18] с фигуративными точками кислых по составу магматических пород амананского комплекса (J_1) – 1; $F_1=196,203\text{SiO}_2+753,953\text{TiO}_2+481,96\text{Al}_2\text{O}_3+92,664\text{FeO}^*+521,5\text{MgO}+374,766\text{CaO}+7,571\text{Na}_2\text{O}-584,778\text{K}_2\text{O}+0,379\text{Ba}-0,339\text{Sr}-0,733\text{Rb}-0,429\text{La}-3,33\text{Ce}-5,242\text{Nd}+10,565\text{Sm}-19823,8$; $F_2=1292,962\text{SiO}_2+4002,667\text{TiO}_2+1002,231\text{Al}_2\text{O}_3+1297,136\text{FeO}^*+262,067\text{MgO}+1250,48\text{CaO}+1923,417\text{Na}_2\text{O}+1009,287\text{K}_2\text{O}+0,3634\text{Ba}-0,325\text{Sr}-0,701\text{Rb}+0,8015\text{La}+3,347\text{Ce}+2,68\text{Nd}+10,11\text{Sm}-126860,0$; $\text{FeO}^*=0,9\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$. Породы: ВПГ – внутриплитные, ОДГ – островодужные, КОЛГ – коллизионные; б) дискриминационная диаграмма DF_1 - DF_2 [19] с фигуративными точками магматических пород амуджиканского комплекса среднего состава (J_2 -3) – 2;

$$DF_1=-2,45605\ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)+1,11985\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)-2,22475\ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)+2,48861\ln(\text{FeO}/\text{SiO}_2)-0,212024\ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)-0,06661\ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)+1,29066\ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)-0,28377\ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)-0,40211\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)+0,030635\ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)-11,43097347;$$

$$DF_2=-0,57759\ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)-0,01121\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)+0,69125\ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)-1,99798\ln(\text{FeO}/\text{SiO}_2)-1,72014\ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)+0,305275\ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)+0,816018\ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)-1,791727\ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)+0,871298\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)+0,335479\ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)-12,20158596.$$

Породы: PCOL – постколлизионные, WP – внутриплитные, ARC – островодужные

Fig. 2. Discrimination diagrams of intrusive rocks of the Amazarkan deposit area: a) diagram F_1 - F_2 [18] with figurative points of acidic igneous rocks of the Amanan complex (J_1) – 1;

$$F_1=196.203\text{SiO}_2+753.953\text{TiO}_2+481.96\text{Al}_2\text{O}_3+92.664\text{FeO}^*+521.5\text{MgO}+374.766\text{CaO}+7.571\text{Na}_2\text{O}-584.778\text{K}_2\text{O}+0.379\text{Ba}-0.339\text{Sr}-0.733\text{Rb}-0.429\text{La}-3.33\text{Ce}-5.242\text{Nd}+10.565\text{Sm}-19823.8;$$

$$F_2=1292.962\text{SiO}_2+4002.667\text{TiO}_2+1002.231\text{Al}_2\text{O}_3+1297.136\text{FeO}^*+262.067\text{MgO}+1250.48\text{CaO}+1923.417\text{Na}_2\text{O}+1009.287\text{K}_2\text{O}+0.3634\text{Ba}-0.325\text{Sr}-0.701\text{Rb}+0.8015\text{La}+3.347\text{Ce}+2.68\text{Nd}+10.11\text{Sm}-126860.0$$

$\text{FeO}^*=0.9\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$.

Rocks: PCOL – post-collisional, WP – intraplate, ARC – island-arc; б) discrimination diagram DF_1 - DF_2 [19] with figurative points of igneous rocks of average composition of the Amudzhikan complex (J_2 -3) – 2;

$$DF_1=-2,45605\ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)+1,11985\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)-2,22475\ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)+2,48861\ln(\text{FeO}/\text{SiO}_2)-0,212024\ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)-0,06661\ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)+1,29066\ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)-0,28377\ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)-0,40211\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)+0,030635\ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)-11,43097347;$$

$$DF_2=-0,57759\ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)-0,01121\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)+0,69125\ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)-1,99798\ln(\text{FeO}/\text{SiO}_2)-1,72014\ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)+0,305275\ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)+0,816018\ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)-1,791727\ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)+0,871298\ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)+0,335479\ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)-12,20158596;$$

Rocks: PCOL – post-collisional, WP – intraplate, ARC – island-arc

Таблица 3. Содержания и соотношения химических элементов в интрузивных образованиях амуджиканского комплекса района Амазарканского месторождения (от–до)

Table 3. Contents and ratios of chemical elements in intrusive formations of the amudzhikan complex of the Amazarkan deposit field area (from–to)

Соотношения элементов Ratios of elements	Диориты Diorites (n=14)	Гранодиориты Granodiorites (n=5)	Кварцевые порфиры Quartz porphyry (n=2)	Габброиды Gabbroids (n=3)
Na ₂ O/K ₂ O	0,18–0,31	0,28–2,10	0,06–0,12	1,72–2,79
Mg#	–	1,05–2,10	–	1,72–2,79
Eu/Sm	0,18–0,33	0,18–0,24	–	0,31–0,35
Au	0,026–1,171	0,087	–	–

Примечание. «–» – нет данных/Note. "–" – no data available.

Классификационная диаграмма [17] в координатах Ас и (Na+K)/Ca, где Ас – универсальный параметр кислотности-основности, учитывающий не только содержание, но и химическую активность порообразующих элементов, а (Na+K)/Ca – параметр, характеризующий степень щелочности-известковистости, позволяет показать металлогеническую специализацию магматических пород. На этой диаграмме составы габброидов, диоритов и гранодиоритов амуджиканского комплекса Амазарканского месторождения попадают в эталонное известково-щелочное поле, за исключением некоторых образцов гранодиоритов, которые попадают в поля субщелочных и щелочных гранитов (рис. 3).

Диаграмма также демонстрирует редкометалльную Мо металлогеническую специализацию этих пород. Фигуративные точки состава пород амуджиканского комплекса образуют тренд, близкий к Мо металлогеническому тренду. Значения коэффициента Mg# варьируют в гранодиоритах от 1,05 до 2,10, в диоритах – от 1,40 до 1,56, в габброидах от – 1,72 до 2,79 (табл. 3). Соотношения Eu/Sm > 0,2 и Eu/Eu* от 0,93 до 1,05 в породах основного и среднего составов (табл. 3) указывают, соответственно, на формирование магматических расплавов в магматических очагах на уровне нижней континентальной коры [20]. Гранодиориты и диориты амуджиканского комплекса в районе месторождения характеризуются повышенным содержанием Au от 0,026 до 1,71 г/т (табл. 3).

Породы амуджиканского комплекса рассматриваются как первичные выплавки глубинного мантийного вещества [21]. Преобладание производных высококальциевой известково-щелочной магмы и наличие пород нормальной известково-щелочной серии объясняется плавлением корового материала под воздействием латитовой магмы, происходит смешение коровых и мантийных расплавов и ассимиляция корового материала мантийными магмами [2, 22].

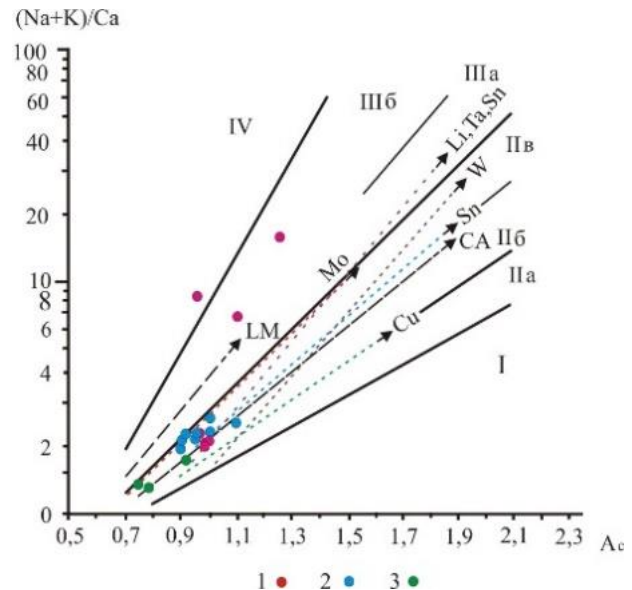


Рис. 3. Диаграмма (Na+K)/Ca–Ac для магматических пород Амазарканского месторождения по [17]. Породы амуджиканского комплекса: 1 – гранодиориты, 2 – диориты, 3 – габброиды. Классификационные поля пород: I – известковое, II – известково-щелочное (IIa – субизвестковистые, IIb – известково-щелочные, IIв – субизвестково-щелочные граниты); III – субщелочное (IIIa – субщелочные и щелочные граниты и лейкограниты, IIIб – щелочные апаитовые граниты); IV – щелочные. Эталонные тренды (штрих-пунктирные линии): Ca – главный известково-щелочной, LM – латитовый (монзонитовый), Sn – оловянный, Cu – медно-порфировый, Mo–(Cu) – молибденовый, W–(Mo) – вольфрам-молибденовый; Li, Ta, Nb, Sn – литий-тантал-ниобий

Fig. 3. Diagram (Na+K)/Ca–Ac for igneous rocks of the Amazarkan deposit according to [17]. Amudzhikan complex: 1 – granodiorites, 2 – diorites, 3 – gabbroids. Classification fields of rocks: I – calcareous, II – calc-alkaline (IIa – subcalcareous, IIb – calc-alkaline, IIв – subcalc-alkaline granites); III – subalkaline (IIIa – subalkaline and alkaline granites and leucogranites, IIIb – alkaline apatitic granites); IV – alkaline. Reference trends (dash-dotted lines): Ca – main calc-alkaline, LM – latite (monzonite), Sn – tin, Cu – porphyry copper, Mo–(Cu) – molybdenum, W–(Mo) – tungsten-molybdenum; Li, Ta, Nb, Sn – lithium-tantalum-niobium-tin

Таблица 3. Отношения Na₂O/K₂O и Eu/Sm, Mg# индекс и содержание Au в интрузивных породах амуджиканского комплекса в районе Амазарканского месторождения

Table 3. Na₂O/K₂O and Eu/Sm ratios, Mg# index and Au content in intrusive rocks of the Amudzhikan complex in the Amazarkan deposit area

Соотношения элементов Ratios of elements	Диориты Diorites (n=14)	Гранодиориты Granodiorites (n=5)	Кварцевые порфиры Quartz porphyry (n=2)	Габброиды Gabbroids (n=3)
Na ₂ O/K ₂ O	0,18–0,31	0,28–2,10	0,06–0,12	1,72–2,79
Mg#	–	1,05–2,10	–	1,72–2,79
Eu/Sm	0,18–0,33	0,18–0,24	–	0,31–0,35
Au	0,026–1,171	0,087	–	–

Примечание. «–» – нет данных/Note. "–" – no data available.

Спектры распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в сульфидно-кварцевых рудах, кварцево-углеродистых жилах месторождения, а также в гранодиоритах и диоритах достаточно близки (рис. 4). Кроме того, на диаграмме в координатах $Eu/Sm-Eu/Eu^*$ фигуративные точки составов рудных жил и гранодиоритов амуджиканского комплекса образуют единый тренд (рис. 5).

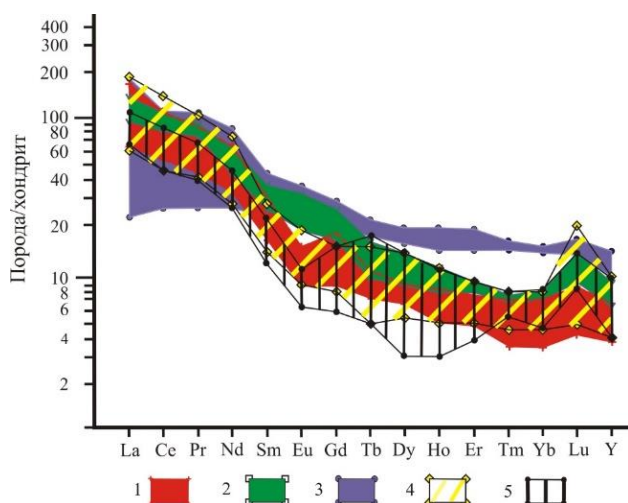


Рис. 4. Спайдер-диаграмма распределения редкоземельных элементов в породах и рудах Амзарканского месторождения. Поля на диаграмме: амуджиканский интрузивный комплекс (J2-3): 1 – гранодиориты, 2 – диориты; 3 – базальты нюкжинской серии (J3); рудоносные жилы: 4 – сульфидно-кварцевые, 5 – сульфидно-кварцевые с включениями графита

Fig. 4. Spider diagram of the distribution of rare earth elements in rocks and ores of the Amazarkan deposit. Fields in the diagram: Amudzhikan intrusive complex (J2-3): 1 – granodiorites, 2 – diorites; 3 – Nyukzha series basalts (J3); ore-bearing veins: 4 – sulfide-quartz, 5 – sulfide-quartz with graphite inclusions

На связь Au-оруденения с процессами магматизма также указывает отношения Co/Ni в рудах, которое составляет величину более 1,5, что может косвенно свидетельствовать об участии магматического флюида в рудообразовании [23]. Значения отношения Nb/La , превышающие 1, свидетельствуют о наличии в рудах тяжелых лантаноидов, что косвенно указывают на глубинный источник оруденения (табл. 2) [24]. Соотношения Nb/La и Th/La в рудах меньше 1 указывают на наличие в рудоносных флюидах хлора, что подтверждается результатами исследования флюидных включений (ФВ). Присутствие хлоридов характерно для состава рудообразующих магматических флюидов Мо и Си-Мо порфировых месторождений Восточного Забайкалья, связанных с интрузиями амуджиканского комплекса.

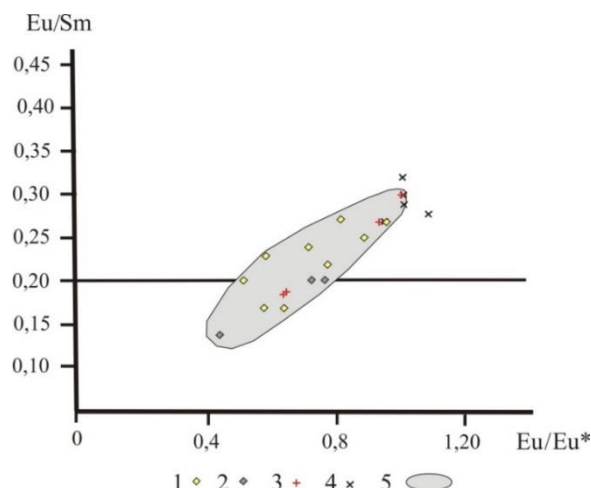


Рис. 5. Диаграмма $Eu/Sm-Eu/Eu^*$ интрузивных и рудных образований Амзарканского месторождения. Значения: 1 – сульфидно-кварцевые руды, 2 – кварцево-графитовые жилы; амуджиканский комплекс: 3 – гранодиориты, 4 – диориты; 5 – область значений распределения рудных жил и гранодиоритов амуджиканского комплекса

Fig. 5. $Eu/Sm-Eu/Eu^*$ diagram of intrusive and ore formations of the Amazarkan deposit. Values: 1 – sulphide-quartz ores, 2 – quartz-graphite veins; the Amudzhikan complex: 3 – granodiorites, 4 – diorites; 5 – area of distribution values of ore veins and granodiorites of the Amudzhikan complex

Величины соотношения U/Th (табл. 2) в рудных минеральных ассоциациях кварц-турмалиновой (0,1–1,8), кварц-пиритовой (0,1–0,5), пирит-арсенопирит-кварцевой (1819–2270) и кварц-полиметаллической (0,1) стадий может свидетельствовать об изменении редокс-потенциала в процессе рудообразования от окислительных ($U/Th < 0,75$) к восстановительным ($U/Th > 0,75$) условиям [24].

Термобарогеохимия и изотопный состав флюида кварцево-сульфидных руд

Флюидные включения. В кварце минеральных ассоциаций кварц-турмалиновой, кварц-пиритовой, пирит-арсенопирит-кварцевой стадий Амзарканского месторождения присутствуют флюидные включения (ФВ) газовые (тип I), двухфазные (тип II) и трёхфазные с галитом (тип III), а также ФВ, содержащие жидкую фазу CO_2 (тип IV) (рис. 6). При нагревании двухфазные и трёхфазные с галитом ФВ (типы II и III) гомогенизируются в жидкую фазу, газовые ФВ (типы I и IV), содержащие тонкую каёмку раствора, гомогенизируются в газовую фазу. Общий интервал температуры гомогенизации ФВ охватывает диапазон от 125 до 410 °С. Растворы включений, судя по температуре их эвтектики (–55, –52 и –23 °С), относятся к водно-солевым системам $NaCl+KCl+H_2O$ и $CaCl_2+NaCl+H_2O$ [9]. Соленость включений варьирует от 0,4 до 38,5 мас. % экв. $NaCl$ (табл. 4, рис. 7).

Таблица 4. Результаты исследования флюидных включений

Table 4. Results of the study of fluid inclusions

Образец Sample	Тип* Type*	Кол-во Quantity	Т гомогениза- ции газа T of vapor ho- mogenization	Т эвтектики T of eutectic	Т плавления T miting			Соленость в мас. % экв, NaCl Salinity in wt % eq, NaCl
					льда ice	гидрата CO2 CO2 hydrate	галита halite	
Кварц-турмалиновая рудная стадия / Quartz-tourmaline ore stage								
722-1	II	6	154...150	-23	4,2...3,8	-	-	6,7-6,2
722-1	IV	10	306...230	-24,5...-23	-	8,9...8,7	-	2,6-2,2
Кварц-пиритовая рудная стадия / Quartz-pyrite ore stage								
645	III	4	360...345	-23	-	-	130	29
645	II	5	230...170	-23	-22...-5,8	-	-	22-7,2
719	I	10	254...150	-23,6...-23	-3,8...-1,5	-	-	6,2-2,3
Кварц-пирит-арсенопиритовая стадия / Quartz-pyrite-arsenopyrite stage								
655	III	8	316...230	-52	-	-	310-230	38,5-33,3
655	II	8	332...125	-55...-23	-6,4...-1,5	-	-	9,7-2,3
655	I	3	410...382	-23	-2...-0,2	-	-	3,4-0,4

Примечание: *типы включений – газовые (I), двухфазные (II), трёхфазные с галитом (III), двухфазные с жидкой CO₂ (IV).

Note: *types of inclusions – gas (I), two-phase (II), three-phase with halite (III), two-phase with liquid CO₂ (IV).

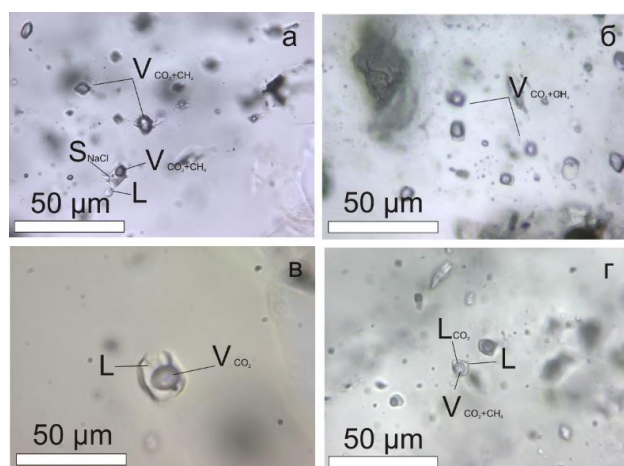


Рис. 6. Типы ФВ в кварце рудных жил Амазарканского месторождения. Газовое (тип I) и трехфазное с галитом (тип III) ФВ – (а); газовые ФВ (тип I) – (б); двухфазное ФВ (тип II) – (в); ФВ с жидкой CO₂ (тип IV). Фазы ФВ V – газ, L – жидкость, S – твердая фаза.

Fig. 6. Types of PV in quartz of ore veins of the Amazarkan deposit. Gas (type I) and three-phase with halite (type III) PV – (a); gas PV (type I) – (b); biphasic EF (type II) – (v); PV with liquid CO₂ (type IV). PV phases V – gas, L – liquid, S – solid phase

В замороженных включениях (тип IV) плавление CO₂ происходит при температуре от –57 до –56,8 °С, гомогенизация CO₂ в газовую фазу происходит при температуре от 27 до 29 °С. В глубоко охлажденных газовых включениях (тип I) наблюдалось выпадение CO₂ в виде небольшой твердой фазы, которая превращалась в газ при температуре от –88 до –56,7 °С, что указывает на низкую плотность газовой фазы. По данным КР-спектроскопии газовая фаза флюидных включений содержит CO₂ от 0 до 100, N₂ от 0 до 59,7 и CH₄ от 0,1 до 40,3 мольных %.

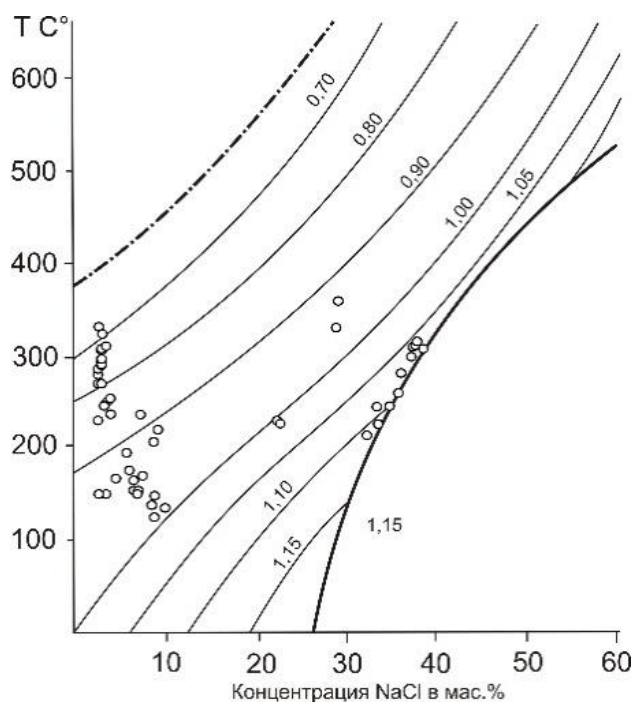


Рис. 7. Диаграмма состояния водно-солевой системы NaCl-H₂O насыщенных паром растворов H₂O-NaCl по [10, 11]. Штрих-пунктирная линия – кривая равновесия «пар-жидкость»; жирная сплошная линия – кривая равновесия «жидкость-галит»; тонкие сплошные линии – изохоры, указана плотность (г/см³). Показаны температура гомогенизации и соленость ФВ в кварце рудных жил Амазарканского месторождения

Fig. 7. Diagram of the state of the NaCl-H₂O water-salt system of steam-saturated H₂O-NaCl solutions according to [10, 11]. The dash-dotted line is the vapor-liquid equilibrium curve; thick solid line – liquid-halite equilibrium curve; thin solid lines are isochors; density is indicated (g/cm³). The homogenization temperature and salinity of PV in quartz of ore veins of the Amazarkan deposit are shown

По данным исследования ФВ в кварце руд Амазарканского месторождения минералообразование в ходе *кварц-турмалиновой стадии* происходило в интервале температуры от 306 до 150 °С при участии гомогенных флюидов средней до низкой солености (6,7–2,2 мас. % экв. NaCl). Минеральные ассоциации *кварц-пиритовой стадии* могли кристаллизоваться в интервале температуры от 360 до 150 °С в среде гетерофазного флюида, представленного водно-солевой фракцией высокой до средней солености (29–7,2 мас. % экв. NaCl) и парообразной с низким содержанием хлоридов (6,7–2,3 мас. % экв. NaCl). Образование минералов *пирит-арсенопирит-кварцевой стадии* также происходило при участии гетерофазного флюида при температуре от 410 до 230 °С. Водно-солевая флюидная фракция характеризовалась высокой соленостью (38,5–33,3 мас. % экв. NaCl), парообразная содержала меньше хлоридов (3,4–0,4 мас. % экв. NaCl). Присутствие газовых и водно-солевых ФВ в кварце рудных жил месторождения Амазаркан может указывать на гетерофазное состояние рудообразующего флюида в результате разделения гомогенного флюида на парообразную и водно-солевую фракции при понижении давления и температуры.

Изотопный состав О, S и С в минералах рудных жил. Кварц различных рудных стадий весьма однороден по изотопному составу кислорода ($\delta^{18}\text{O}=+10,7\pm 0,2$). Таким образом, с большой вероятностью кварц кристаллизовался из флюидов близкого состава при схожих условиях. Применяя уравнение [25] $\delta^{18}\text{O}_{\text{кварц}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}=3,34(10^6/T^2)-3,31$, где Т – температура по Кельвину, получаем $\delta^{18}\text{O}$ минералообразующего гидротермального флюида для температур 350...400 °С (по гомогенизации включений) в диапазоне от +5,5 до +6,7 ‰. Полученные значения $\delta^{18}\text{O}$ соответствуют флюиду магматической природы: +5,5 – +9,0 ‰, [26] (табл. 5).

Сера пиритов Амазарканского месторождения в среднем имеет $\delta^{34}\text{S}=+2,5$ ‰ и колеблется в очень узком диапазоне (табл. 6), что так же, как и в случае с кварцем, указывает на единство источников и стабильность условий минералообразования. Исходя из предположения, что во флюиде преобладал H_2S , для расчёта $\delta^{34}\text{S}$ флюида используем уравнения фракционирования [27]:

$$\Delta_{\text{пирит-H}_2\text{S}}=\delta^{34}\text{S}_{\text{пирит}}-\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}=0,4(10^6/T^2).$$

$$\Delta_{\text{халькопирит-H}_2\text{S}}=\delta^{34}\text{S}_{\text{халькопирит}}-\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}=0,05(10^6/T^2).$$

Рассчитанный изотопный состав серы во флюиде Амазарканского месторождения составляет +3,5 ‰ в равновесии с пиритом и +3,1 ‰ в равновесии с халькопиритом (для 350 °С). Полученные значения, с учётом имеющейся ограниченной статистики, близки к интервалу, характерному для магматического источника – 3– +3 ‰ [26]. Небольшое обога-

щение пирита тяжёлым изотопом серы относительно мантийного диапазона может быть связано как с физико-химическими условиями кристаллизации, включая кристаллизацию полисульфидных парагенезисов, так и с незначительной контаминацией флюида.

Таблица 5. Изотопный состав кислорода и сосуществующего с ним флюида Амазарканского месторождения

Table 5. Isotopic composition of oxygen and the fluid co-existing with it Amazarcan gold deposit

№ проб Sample no.	Состав руд Ore composition	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ (SMOW)	Изотопный состав флюида при различных температурах, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ Isotopic composition of the fluid at different temperatures, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$	
Кварц-турмалиновая рудная стадия Quartz-tourmaline ore stage			170 °C	360 °C
646	Pr (до (to) 1 %)	10,78	–2,92	+5,71
Кварц-пиритовая рудная стадия Quartz-pyrite ore stage			125 °C	410 °C
696	Pr (до (to) 3 %)	10,88	–7,19	+5,86
Пирит-арсенопирит-кварцевая рудная стадия Pyrite-arsenopyrite-quartz ore stage			280 °C	320 °C
693-1	Pr, as, sf (до (to) 3 %)	10,58	+5,01	+5,55

Примечание: минералы: Pr – пирит, as – арсенопирит, sf – сфалерит.

Note: Minerals: Pr – pyrite, as – arsenopyrite, sf – sphalerite.

Таблица 6. Изотопный состав серы сульфидных минералов и расчетный состав серы во флюиде Амазарканского месторождения

Table 6. Sulfur isotope composition of sulfide minerals and calculated sulfur composition in the fluid of the Amazarcan gold deposit

Образец Sample	Минерал Mineral	$\delta^{34}\text{S}$, ‰ CDT	Изотопный состав серы во флюиде $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ ‰ CDT при различных температурах Isotopic composition of sulfur in fluid $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ ‰ CDT at various temperatures	
Кварц-турмалиновая рудная стадия Quartz-tourmaline ore stage			170 °C	360 °C
646	Пирит/Pyrite	+1,9	−0,13	+0,83
647-1		+2,6	+0,57	+1,55
652		+2,3	+0,27	+1,25
693		+2,7	+0,67	+1,63
694		+2,5	+0,47	+1,45
Кварц-пиритовая рудная стадия Quartz-pyrite ore stage			125 °C	410 °C
645	Пирит/ Pyrite	+2,3	−0,22	+1,44
689		+3,1	+0,58	+1,24
696		+2,6	+0,08	+1,74
Кварц-пирит-арсенопиритовая стадия Quartz-pyrite-arsenopyrite stage			280 °C	320 °C
690	Пирит/Pyrite	+2,8	+1,49	+1,69
693-1	Халькопирит Chalcopyrite	+3,0	+1,69	+1,89

Графит кварцево-графитовых жил Северной рудной зоны месторождения имеет изотопный состав углерода в узком диапазоне от $-27,2$ до $-28,9$ ‰ (табл. 1). Такой изотопно-лёгкий углерод характерен для биогенного вещества, что в данном случае указывает на заимствование углерода из осадочных толщ. Источником углерода во флюиде могут являться графитовые гнейсы амазарканской свиты, породы которой содержат повышенные содержания Au. Графит амазарской свиты имеет несколько утяжеленный изотопный состав углерода от $-21,96$ до $-24,93$ ‰ $\delta^{13}\text{C}$ (‰) по сравнению с графитом золотоносных кварцево-графитовых жил (табл. 1). Незначительное обогащение флюида тяжёлым изотопом серы можно объяснить избирательным извлечением рудообразующим флюидом компонентов вмещающих толщ.

Заключение

Образование многочисленных, близких по возрасту, разноглубинных рудоносных магматических очагов характерно для развития рудно-магматических систем, возникающих при мантийно-коровом взаимодействии [27]. В Восточном Забайкалье эти процессы выразились в пространственной и временной совмещенности золотого оруденения и малых интрузий кислого, среднего и

основного состава амуджиканского комплекса [1, 28–35]. При этом магматические очаги пород основного состава и преобладающей части пород среднего составов локализовались в нижней континентальной коре. Мезозойские магматические образования амуджиканского комплекса (J_{2-3}), развитые в районе Амазарканского месторождения, являются вероятными источниками вещества для золотого оруденения. Полученные данные по изотопному составу кислорода и серы позволяют сделать вывод о том, что рудоносный флюид Амазарканского месторождения имел преимущественно магматический источник. Изотопные характеристики углерода свидетельствуют о ремобилизации его из вмещающих толщ, вероятно, сопровождавшейся переотложением золота.

Рудные жилы месторождения Амазаркан образовались в интервале температуры от 120 до 410 °C при участии флюидов, солёность которых варьировала от $0,4$ до $38,5$ мас. % экв. NaCl (рис. 7, табл. 4). В качестве основных солевых компонентов рудообразующие флюиды содержали NaCl, KCl, и CaCl_2 . Газовая фаза флюидов была представлена CO_2 , N_2 и CH_4 . Подобные физико-химические условия рудообразования типичны для золоторудных месторождений Восточного Забайкалья [1, 31–35].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности России / Н.С. Бортников, А.В. Волков, А.Л. Галямов, И.В. Викентьев, А.В. Лаломов, К.Ю. Мурашов // Геология рудных месторождений. – 2023. – Т. 65. – № 5. – С. 371–380.
2. Спиридонов А.М., Зорина Л.Д., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2006. – 291 с.
3. Берзина А.Н., Берзина А.П., Гимон В.О. Cu-Mo-порфировая рудно-магматическая система Аксут (Северо-Восточная Тува): источники и процессы формирования рудоносной магмы // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 4. – С. 549–566.
4. Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1990. – № 54. – P. 1353–1357.
5. Geology, mineralization, igneous geochemistry, and zircon U-Pb geochronology of the early Paleozoic shoshonite-related Julia skarn deposit, SW Siberia, Russia: toward a diversity of Cu-Au-Mo skarn to porphyry mineralization in the Altai-Sayan orogenic system / S.G. Soloviev, S.G. Kryazhev, D.V. Semenova, Yu.A. Kalinin, S.S. Dvurechenskaya, N.V. Sidorova // *Ore Geology Reviews*. – 2022. – Vol. 142. – 104706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104706>
6. Пиритизированные двусторчатые моллюски из верхнего триаса орогенного золото-сурьмяного месторождения Сентачан (Восточная Якутия): минеральный состав и изотопный состав серы / Г.А. Пальянова, Е.С. Соболев, В.Н. Реутский, Н.С. Бортников // Геология рудных месторождений. – 2016. – Т. 58. – № 6. – С. 513–521.
7. Reutsky V.N., Borzdov Yu.M., Palyanov Yu.N. Carbon isotope fractionation associated with HPHT crystallization of diamond // *Diamond and Related Materials*. – 2008. – Vol. 17 (11). – P. 1986–1989.
8. Bakke R.J. AqSo–NaCl: computer program to calculate p-T-V-x properties in the H_2O -NaCl fluid system applied to fluid inclusion research and pore fluid calculation // *Computers and Geosciences*. – 2018. – № 115. – P. 122–133.
9. Борисенко А.С. Анализ солевого состава растворов газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений. – М.: Недра, 1982. – С. 37–47.
10. Bodnar R.J. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties of inclusion fluids // *Economic Geology*. – 1988. – № 78. – P. 535–542.
11. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for NaCl– H_2O fluid inclusions // *Fluid inclusions in minerals: methods and applications* / Eds. B. de Vivo, M.L. Frezzotti. – Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Inst State Univ, 1994. – P. 117–131.
12. Гаврикова С.Н., Николаева Л.Л., Галанин А.В. Ранний докембрий южной части Становой складчатой области. – М.: Недра, 1991. – 170 с.
13. Краткий справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.Е. Мирошников, А.С. Поваренных, В.Г. Прохоров. – М.: Недра, 1977. – 183 с.

14. Возраст и границы Олекминского магматического пояса Селенгино-Станового супертеррейна центрально-азиатского подвижного пояса / В.П. Ковач, А.Б. Котов, А.М. Ларин, Е.Б. Сальникова, С.Д. Великославинский, С.З. Яковлева, Ю.В. Плуткина // Доклады Академии Наук. – 2018. – Т. 483. – № 1. – С. 62–67.
15. Александров Г.В., Рублев А.Г. Новые данные о возрасте и металлоносности амананского, амуджиканского, нерчуганского комплексов Северо-Восточного Забайкалья // Эндогенные процессы и металлогения в зоне БАМ / под ред. В.С. Соболева. – Новосибирск: Наука, 1983. – С. 141–147.
16. Лукин В.А. и др. Отчет о поисково-разведочных работах и детальной разведке верхних горизонтов Амазарканского золоторудного месторождения за 1993–1998 гг. – Чита: ФГУП «Читагеологразведка» 2002. – 263 с.
17. Бородин Л.С. Модельная система петрохимических и металлогенических трендов гранитоидов как система прогноза месторождений Sn, Li, Ta, W, Mo, Cu // Геология рудных месторождений. – 2004. – Т. 46. – № 1. – С. 1–26.
18. Великославинский С.Д. Геохимическая типизация кислых магматических пород ведущих геодинамических обстановок // Петрология. – 2003. – Т. 11. – № 4. – С. 363–380.
19. Великославинский С.Д., Крылов Д.П. Геодинамическая позиция магматических пород среднего состава по геохимическим данным // Петрология. – 2015. – Т. 23. – № 5. – С. 451–458.
20. Винокуров С.Ф. Европиевые аномалии в рудных месторождениях и их геохимическое значение // Доклады Академии Наук. – 1996. – Т. 346. – № 6. – С. 792–795.
21. Зорина Л.Д., Куликова З.И. Рудогенерирующий магматизм и золотое оруденение Дарасунского рудного узла в Восточном Забайкалье // Проблемы петрогенезиса и рудообразования: Тез. докл. чтений им. А.Н. Заварицкого. – Екатеринбург, 1998. – С. 68–70.
22. Jones B., Manning D.A.C. Composition of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones // Chemical Geology. – 1994. – Vol. 111. – P. 111–129.
23. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, Southeastern Guizhou Province, China / L. Kun, Y. Ruidong, C. Wenying, L. Rui, T. Ping // Chinese Journal of Geochemistry. – 2014. – № 33. – P. 109–118.
24. Геохимические особенности палеозойских Au-Ag эпitherмальных месторождений (Северо-Восток России) / А.В. Волков, А.А. Сидоров, Н.Е. Савва, Е.Е. Колова, К.Ю. Мурашов // Доклады Академии Наук. – 2017. – Т. 472. – № 4. – С. 443–448.
25. Matsuhisa Y., Goldsmith J.R., Clouton R.N. Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1979. – Vol. 43. – P. 1131–1140.
26. Ohmoto H., Rye R.O. Isotope of sulfur and carbon // Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. – N.Y.: J. Wiley and Sons, 1979. – P. 509–567.
27. Mineralogical and geochemical peculiarities and PT conditions of ores from the Kyzyl-Tashtyg VMS polymetallic deposit, Eastern Tuva: fluid inclusion and S, O, C isotopic data / R.V. Kuzhuget, N. Ankusheva, Yu.A. Kalinin, F. Pirajno, V.N. Reutsky // Ore Geology Reviews. – 2022. – Vol. 142. – 104717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104717>
28. Distinctive features of the major and trace element composition of biotite from igneous rocks associated with various types of mineralization on the example of the Shakhtama Intrusive Complex (Eastern Transbaikalia) / Yu. Redin, A. Redina, A. Malyutina, V. Dultsev, Yu. Kalinin, B. Abramov, A. Borisenko // Minerals. – 2023. – Vol. 13. – 1334. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13101334>
29. Состояние и перспективы развития учения о структурах рудных полей и месторождений / Ю.Г. Сафонов, Г.И. Горбунов, А.А. Пэк, А.В. Волков, Т.М. Злобина, Г.Г. Кравченко, Е.П. Малиновский // Геология рудных месторождений. – 2007. – Т. 49. – № 5. – С. 386–420.
30. Абрамов Б.Н. Карийский золоторудный узел (Восточное Забайкалье): геохимические особенности руд, связь магматизма с оруденением // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2023. – № 1 (53). – С. 61–67.
31. Абрамов Б.Н., Калинин Ю.А., Боровиков А.А. Итакинское золоторудное месторождение: изотопный состав, вероятные источники рудного вещества (Восточное Забайкалье) // Геосферные исследования. – 2022. – № 2. – С. 6–22.
32. Прокофьев В.Ю., Зорина Л.Д. Флюидный режим Дарасунской рудно-магматической системы (Восточное Забайкалье) по данным исследования флюидных включений // Геология и геофизика. – 1996. – Т. 37. – № 5. – С. 50–61.
33. Минералогия и условия формирования Новоширокского золото-полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) / В.Ю. Прокофьев, Г.Д. Киселева, А.А. Долманова-Тополь и др. // Геология рудных месторождений. – 2017. – Т. 59. – № 6. – С. 542–575. DOI: [10.7868/S0016777017060041](https://doi.org/10.7868/S0016777017060041)
34. Прокофьев В.Ю. Геохимические особенности рудообразующих флюидов гидротермальных месторождений золота различных генетических типов (по данным исследования флюидных включений) / под ред. Л.Д. Зорина. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 2000. – 186 с.
35. Прокофьев В.Ю., Наумов В.Б., Миронова О.Ф. Физико-химические параметры и геохимические особенности флюидов мезозойских золоторудных месторождений // Геохимия. – 2020. – Т. 65. – № 2. – С. 123–144. DOI: [10.31857/S0016752520020107](https://doi.org/10.31857/S0016752520020107)

Информация об авторах

Баир Намжилович Абрамов, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии и рудогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Россия, 672007, г. Чита, ул. Недорезова, 16А; b_abramov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8905-1677>

Юрий Александрович Калинин, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории прогнозно-металлогенических исследований, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; kalinin@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5877-666x>

Андрей Александрович Боровиков, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории прогнозно-металлогенических исследований, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; borovik@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1665-176X>

Виктор Федорович Посохов, старший научный сотрудник лаборатории инструментальных методов анализа Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Россия, 670047 г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6А; vitaf1@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6346-3182>

Вадим Николаевич Реутский, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории изотопно-аналитической геохимии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; reutsky@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5083-6629>

Поступила в редакцию: 28.11.2023

Поступила после рецензирования: 20.12.2023

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L., Vikentev I.V., Lalomov A.V., Murashov K.Yu. Problems of development of the mineral resource base of the high-tech industry of Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2023, vol. 65, no. 5, pp. 371–386. (In Russ.)
2. Spiridonov A.M., Zorina L.D., Kitaev N.A. *Gold-bearing ore-magmatic systems of Transbaikalia*. Novosibirsk, Geo Publ., 2006. 291 p. (In Russ.)
3. Berzina A.N., Berzina A.P., Gimon V.O. Cu-Mo-porphyry ore-magmatic system of Aksut (North-Eastern Tuva): sources and processes of ore-bearing magma formation. *Russian Geology and Geophysics*, 2021, vol. 62, no. 4, pp. 549–566. (In Russ.)
4. Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 54, pp. 1353–1357.
5. Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Semenova D.V., Kalinin Yu.A., Dvurechenskaya S.S., Sidorova N.V. Geology, mineralization, igneous geochemistry, and zircon U-Pb geochronology of the early Paleozoic shoshonite-related Julia skarn deposit, SW Siberia, Russia: toward a diversity of Cu-Au-Mo skarn to porphyry mineralization in the Altai-Sayan orogenic system. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 142, 104706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104706>
6. Palyanova G.A., Sobolev E.S., Reutskiy V.N., Bortnikov N.S. Pyritized bivalve mollusks from the Upper Triassic of the Sentachan orogenic gold-antimony deposit (Eastern Yakutia): mineral composition and isotopic composition of sulfur. *Geology of Ore Deposits*, 2016, vol. 58, no. 6, pp. 513–521. (In Russ.)
7. Reutsky V.N., Borzdov Yu.M., Palyanov Yu.N. Carbon isotope fractionation associated with HPHT crystallization of diamond. *Diamond and Related Materials*, 2008, vol. 17 (11), pp. 1986–1989.
8. Bakker R.J. AqSo–NaCl: computer program to calculate p-T-V-x properties in the H₂O–NaCl fluid system applied to fluid inclusion research and pore fluid calculation. *Computers and Geosciences*, 2018, no. 115, pp. 122–133.
9. Borisenko A.S. Analysis of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals by cryometry method. *Using methods of thermobarogeochemistry in the search and study of ore deposits*. Moscow, Nedra Publ., 1982. pp. 37–47. (In Russ.)
10. Bodnar R.J. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties of inclusion fluids. *Economic Geology*, 1988, no. 78, pp. 535–542.
11. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for NaCl–H₂O fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Eds. B. De Vivo, M.L. Frezzotti. Blacksburg, VA, Virginia Polytechnic Inst State Univ, 1994. pp. 117–131.
12. Gavrikova S.N., Nikolaeva L.L., Galanin A.V., Orlov V.N. Early Precambrian of the southern part of the Stanovoi folded region. Moscow, Nedra Publ., 1991. 171 p. (In Russ.)
13. Voytkovich G.V., Miroshnikov A.E., Povarennykh A.S., Prokhorov V.G. *A brief guide to geochemistry*. Moscow, Nedra Publ., 1977. 183 p. (In Russ.)
14. Kovach V.P., Kotov A.B., Larin A.M., Salnikova E.B., Velikoslavinskiy S.D., Yakovleva S.Z., Plotkina Yu.V. Age and boundaries of the Olekminsky magmatic belt of the Selengino-Stanovoi superterrane of the Central Asian mobile belt. *Doklady Earth Sciences*, 2018, vol. 483, pp. 62–67. (In Russ.)
15. Aleksandrov G.V., Rublev A.G. New data on the age and metal content of the Amanan, Amudjikan, Nerchugan complexes of Northeastern Transbaikalia. New data on the age and metal content of the Amanan, Amudjikan, Nerchugan complexes of Northeastern Transbaikalia. *Endogenous processes and metallogeny in the BAM zone*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. pp. 141–147. (In Russ.)
16. Lukin V.A. *Report on exploration work and detailed exploration of the upper horizons of the Amazarkan gold deposit for 1993–1998*. Chita, Chitageologrosvetka Publ., 2002. 263 p. (In Russ.)
17. Borodin L.S. Model system of petrochemical and metallogenic trends of granitoids as a forecast system for deposits Sn, Li, Ta, W, Mo, Cu. *Geology of Ore Deposits*, 2004, vol. 46, no. 1, pp. 1–26. (In Russ.)
18. Velikoslavinskiy S.D. Geochemical typification of acid magmatic rocks of leading geodynamic settings. *Petrology*, 2003, vol. 11, no. 4, pp. 363–380. (In Russ.)
19. Velikoslavinskiy S.D., Krylov D.P. Geodynamic position of magmatic rocks of medium composition according to geochemical data. *Petrology*, 2015, vol. 23, no. 5, pp. 451–458. (In Russ.)
20. Vinokurov S.F. Europium anomalies in ore deposits and their geochemical significance. *Doklady Earth Sciences*, 1996, vol. 346, no. 6, pp. 792–795. (In Russ.)

21. Zorina L.D., Kulikova Z.I. Ore-generating magmatism and gold mineralization of the Darasunsky ore node in Eastern Transbaikalia. *Problems of petrogenesis and ore formation: Thesis of the A.N. Zavaritsky Readings*. Ekaterinburg, 1998. pp. 68–70. (In Russ.)
22. Jones B., Manning D.A.C. Composition of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 1994, vol. 111, pp. 111–129.
23. Kun L., Ruidong Y., Wenying C., Rui L., Ping T. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, Southeastern Guizhou Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2014, no. 33, pp. 109–118.
24. Volkov A.V., Sidorov A.A., Savva N.E., Kolova E.E., Murashov K.Yu. Geochemical features of Paleozoic Au-Ag epithermal deposits (North-East of Russia). *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 472, no. 4, pp. 443–448. (In Russ.)
25. Matsuhisa Y., Goldsmith J.R., Clouton R.N. Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, vol. 43, pp. 1131–1140.
26. Ohmoto H., Rye R.O. Isotope of sulfur and carbon. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. N.Y., J. Wiley and Sons, 1979. pp. 509–567.
27. Kuzhuget R.V., Ankusheva N., Kalinin Yu.A., Pirajno F., Reutsky V.N. Mineralogical and geochemical peculiarities and PT conditions of ores from the Kyzyl-Tashtyg VMS polymetallic deposit, Eastern Tuva: fluid inclusion and S, O, C isotopic data. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 142, 104717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104717>
28. Redin Yu., Redina A., Malyutina A., Dultsev V., Kalinin Yu., Abramov B., Borisenko A. Distinctive features of the major and trace element composition of biotite from igneous rocks associated with various types of mineralization on the example of the Shakhtama Intrusive Complex (Eastern Transbaikalia). *Minerals*, 2023, vol. 13, 1334. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13101334>
29. Safonov Yu.G., Gorbunov G.I., Pek A.A., Volkov A.V., Zlobina T.M., Kravchenko G.G., Malinovskiy E.P. State and prospects of development of the doctrine of the structures of ore fields and deposits. *Geology of ore Deposits*, 2007, vol. 49, no. 5, pp. 386–420. (In Russ.)
30. Abramov B.N. Kariskij gold-ore cluster (Eastern Transbaikalia): geochemical features of ores, relationship of magmatism with mineralization. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2023, no. 1 (53), p. 61–67. (In Russ.)
31. Abramov B.N., Kalinin Yu.A., Borovikov A.A. Itakinskoe gold deposit: isotopic composition, probable sources of ore matter (Eastern Transbaikalia). *Geospheric research*, 2022, no. 2, pp. 6–22. (In Russ.)
32. Prokofiev V.Yu., Zorina L.D. Fluid regime of the Darasun ore-magmatic system (Eastern Transbaikalia) according to the study of fluid inclusions. *Russian Geology and Geophysics*, 1996, vol. 37, no. 5, pp. 50–61. (In Russ.)
33. Prokofiev V.Yu., Kiseleva G.D., Dolomanova-Topol A.A. Mineralogy and formation conditions of Novoshirokinsky base metal-gold deposit, Eastern Transbaikalian Region, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2017, vol. 59, no. 6, pp. 521–550. DOI: [10.1134/S1075701517060046](https://doi.org/10.1134/S1075701517060046)
34. Prokofiev V.Yu. *Geochemical features of ore-forming fluids of hydrothermal gold deposits of various genetic types (based on the study of fluid inclusions)*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 186 p. (In Russ.)
35. Prokofiev V.Yu., Naumov V.B., Mironova O.F. Physicochemical parameters and geochemical features of fluids at Mesozoic gold deposits. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 2, pp. 128–150. DOI: [10.1134/S001670292002010X](https://doi.org/10.1134/S001670292002010X)

Information about the authors

Bair N. Abramov, Dr. Sc., Leading Researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, 16A, Nedorezova street, Chita, 672007, Russian Federation. b_abramov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8905-1677>

Yury A. Kalinin, Dr. Sc., Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademik Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. kalinin@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5877-666x>

Andrey A. Borovikov, Cand. Sc., Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademik Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. borovik@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1665-176X>

Viktor F. Posokhov, Senior Researcher, Geological Institute SB RAS, 6A, st. Sakhyanova, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. vitafl1@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6346-3182>

Vadim N. Reutsky, Dr. Sc., Leading Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Akademik Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. reutsky@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5083-6629>

Received: 28.11.2023

Revised: 20.12.2023

Accepted: 09.09.2024