

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Краткое сообщение

УДК 550.4:550.8

EDN: HXQZHE

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-4-374-389

Эволюция орогенного золотого оруденения в структурах
южного и восточного обрамления Сибирского кратонаН.А. Горячев^a, А.Е. Будяк^b, Т.И. Михалицына^c, Ю.И. Тарасова^{d,e},
И.Н. Горячев^e, О.Т. Соцкая^f^{a,c,f}Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан, Россия^{a,b,d}Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия^{b,d,e}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Целью данного исследования являлось проведение сопоставления эволюции золотого рудообразования в структурах Байкало-Патомского и Верхояно-Колымского окраинно-континентальных орогенных поясов, возникших на пассивной окраине Сибирского континента в неопротерозое – палеозое и палеозое – мезозое и вмещающих самые крупные месторождения золота России. Отмечены черты сходства, зафиксированные не только в характеристиках этапности минерализации, но и в типоморфизме пирита – главного минерала рудных образований. Показана роль полихронных орогенных событий палеозойского и позднемезозойского времени, приведших к формированию крупных складчатых поясов в развитии масштабной золотой минерализации южного и восточного обрамления Сибирского кратона. Эти события вызывали мобилизацию и перераспределение благородных металлов из обогащенных ими стратиграфических горизонтов в результате формирования соответствующих орогенных плутонометаморфических поясов. Сравнительный анализ палеозойско-мезозойского и неопротерозойско-палеозойского металлогенических профилей южной и восточной окраин Сибирского кратона демонстрирует влияние процессов формирования орогенного золотого оруденения независимо от состава вмещающих толщ и возраста оруденения. Общие металлогенические характеристики палео-геодинамических обстановок формирования благороднометалльного оруденения орогенного типа независимо от его возраста могут послужить основой для геолого-генетических и прогнозных построений и выработки комплексных критериев оценки перспектив в пределах рассмотренных регионов.

Ключевые слова: Байкало-Патомский и Верхояно-Колымский орогенные пояса, золотое оруденение орогенного типа, пирит

Финансирование: Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по проектам Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН 121031700301-5 и Института геохимии СО РАН IX.130.3.1 (№ 0284-2021-0001), а также частично в рамках работ по проекту Научно-образовательного центра «Север: территория устойчивого развития». Аналитические исследования химического состава пород и руд осуществлены в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии СО РАН. Подготовка материала проведена на анализаторе фрагментов микроструктуры твердых тел «Минерал С7» с линией пробоподготовки в Межрегиональном научно-образовательном центре «Байкал».

Для цитирования: Горячев Н.А., Будяк А.Е., Михалицына Т.И., Тарасова Ю.И., Горячев И.Н., Соцкая О.Т. Эволюция орогенного золотого оруденения в структурах южного и восточного обрамления Сибирского кратона // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 374–389. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-374-389>. EDN: HXQZHE.



GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

Brief report

Evolution of orogenic gold mineralization in the southern and eastern framing structures of the Siberian craton

Nikolay A. Goryachev^a, Alexander E. Budyak^b, Tatiana I. Mikhaliitsyna^c,
Yulia I. Tarasova^d, Ivan N. Goryachev^e, Olga T. Sotskaya^f

^{a,c,f}North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute named after N.A. Shilo FEB RAS, Magadan, Russia

^{a,b,d}A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

^{b,d,e}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the research is to compare the evolution of gold ore mineralization in the structures of the Baikal-Patom and Verkhoyansk-Kolyma marginal continental orogenic belts that arose on the passive margin of the Siberian continent in the Neoproterozoic-Paleozoic and Paleozoic-Mesozoic, and hosting the largest gold deposits in Russia. The similarities are noted as they reveal themselves in the characteristics of the mineralization stages, and in the typomorphism of pyrite that is the main mineral of ore formations. The study demonstrated the role of polychronic orogenic events of the Paleozoic and late Mesozoic times, which led to the formation of large fold belts in the development of large-scale gold mineralization of the southern and eastern framing of the Siberian craton. These events caused precious metals to mobilize and redistribute from precious metal-rich stratigraphic horizons as corresponding orogenic plutonometamorphic belts were formed. A comparative analysis of the Paleozoic-Mesozoic and Neoproterozoic-Paleozoic metallogenic profiles of the southern and eastern margins of the Siberian craton demonstrates the influence of the formation processes of orogenic gold mineralization, regardless of the composition of the host strata and mineralization age. General metallogenic characteristics of paleogeodynamic formation settings of noble metal mineralization of the orogenic-type, regardless of its age, can serve as the basis for geological-genetic and forecasting predictions as well as for the development of integrated assessment criteria for their prospects within the regions under investigation.

Keywords: Baikal-Patom and Verkhoyansk-Kolyma orogenic belts, orogenic gold mineralization, pyrite

Funding: The study was conducted as a part of the implementation of the state assignment on the projects of the North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS 121031700301-5 and A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS IX.130.3.1 (no. 0284-2021-0001), and partly within the frameworks of the project of the Scientific and Educational Center "North: Territory of Sustainable Development". The analytical studies of the chemical composition of rocks and ores were carried out at the Resource Sharing Center "Isotope-Geochemical Research" of the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS. The material was prepared by the "Mineral C7" analyzer of solid body microstructure fragments with a sample preparation line at "Baikal" Interregional Scientific and Educational Center.

For citation: Goryachev N.A., Budyak A.E., Mikhaliitsyna T.I., Tarasova Yu.I., Goryachev I.N., Sotskaya O.T. Evolution of orogenic gold mineralization in the southern and eastern framing structures of the Siberian craton. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):374-389. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-374-389>. EDN: HXQZHE.

Введение

Сибирский кратон представляет собой жесткую раннедокембрийскую структуру, обрамленную разновозрастными складчатыми поясами, которые возникли в период между неопротерозоем и поздним мезозоем. Каждый из этих поясов является весьма продуктивным на золото и содержит очень крупные золоторудные месторождения. Стабильное положение кратона с мезопротерозоя привело к его окружению пассивными континентальными окраинами, развитие которых шло двумя путями. На современном южном фланге кратонной окраины мезо-неопротерозойская пассивная окраина сменилась задуговыми бассейнами в венде – раннем палеозое, на восточном краю обстановка пассивной окраины существовала вплоть до

конца мезозоя. В дальнейшем южный и юго-западный фланги наращивались за счет приращения подвижных поясов каледонид, герцинид и мезозойд с формированием золоторудных поясов соответствующего возраста, а на восточном фланге выдающаяся золотоносность была сформирована практически в один позднемезозойский этап.

Цель предлагаемого исследования заключалась в проведении сопоставления эволюции золотого орогенного оруденения двух крупных золоторудных территорий России для создания основы геолого-генетических и минералого-геохимических моделей происхождения крупных скоплений благородных металлов как продуктов длительной эволюции региональных геологических структур.



Материалы и методы исследования

Объектами представленного в настоящем материале исследования служат структуры южного и восточного обрамления Сибирского кратона, которые возникли на месте его пассивной окраины в неопротерозое – палеозое (Байкало-Патомский складчатый пояс) и палеозое – мезозое (Верхояно-Колымский складчатый пояс), а также локализованные в них крупнейшие в России месторождения золота орогенного типа. Авторы много лет ведут исследования золотоносности указанных структур и локализованных в них золоторудных месторождений с позиций как общего тектоно-металлогенического анализа, так и детальных методов седиментологии, геохронологии, общей и изотопной геохимии, тонких минералогических исследований на современной аппаратуре. В ходе работы проведено сопоставление изученных струк-

тур и месторождений на основе обзора полученных нами результатов такого комплексного исследования наряду с литературными данными других исследователей. Аналитические исследования химического состава пород и руд проводились в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии СО РАН. Подготовка материала проведена на анализаторе фрагментов микроструктуры твердых тел «Минерал С7» с линией пробоподготовки в Межрегиональном научно-образовательном центре «Байкал».

Результаты исследования и их обсуждение

Региональная позиция. Как уже отмечено выше, Сибирский кратон представляет собой жесткую раннедокембрийскую структуру, окруженную складчатыми поясами (рис. 1), которые возникли в период с неопротерозоя –

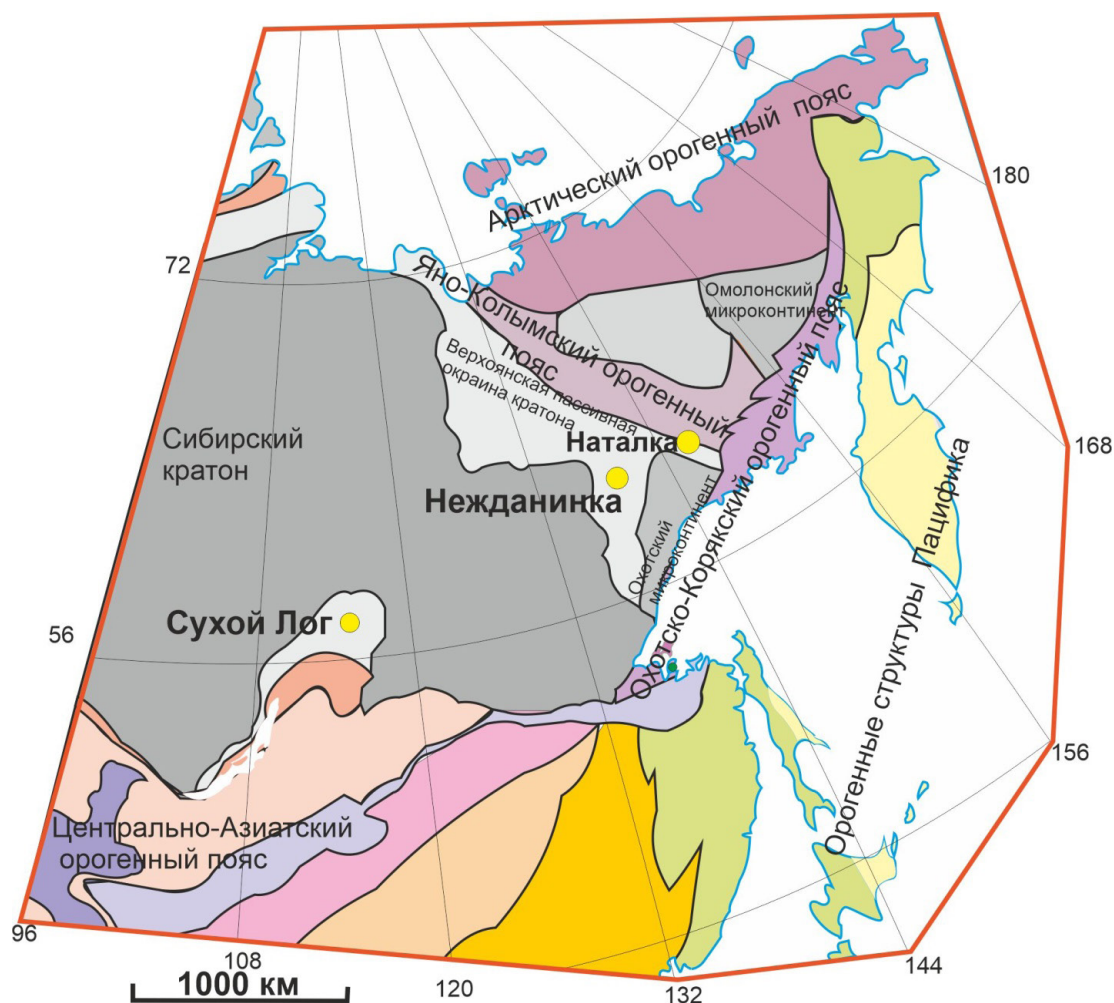


Рис. 1. Позиция крупнейших месторождений золота России в структурах обрамления Сибирского кратона
Fig. 1. Position of the major gold deposits in Russia in the framing structures of the Siberian craton



палеозоя (южный фланг) до палеозоя – позднего мезозоя (восточный фланг). Они возникли на месте крупных морских бассейнов пассивной окраины Сибирского континента, существовавших в неопротерозое – раннем палеозое на юге в современных координатах и в неопротерозое – начале позднего мезозоя на востоке [1, 2]. В указанных монографиях приводятся исчерпывающие характеристики данных структур и бассейнов, что освобождает нас от необходимости повторяться. Важнейшей чертой этих структур является то, что они вмещают крупнейшие месторождения золота России, такие как Сухой Лог, Наталка, Нежданинка.

Месторождение Сухой Лог расположено в центральной части Байкало-Патомского нагорья и приурочено к периклинальной части субширотной Сухоложской антиклинали – составной части Бодайбинского синклинория [3]. Ядро антиклинали сложено терригенно-углеродистыми отложениями хомолхинской свиты, на ее крыльях располагаются терригенно-известковистые породы имнянской свиты. Метаморфические преобразования пород отвечают хлорит-серицитовый субфации зеленосланцевой фации. Рудовмещающей является зона рассланцевания и интенсивных пластических деформаций, развивающаяся по тонкозернистым породам хомолхинской свиты. Промышленное прожилково-вкрапленное золотосульфидное оруденение представлено крупной рудной зоной ленточного типа северо-западного простирания и северо-восточного падения протяженностью около 4 км, локализованной в замке сильно сжатой антиклинальной складки, возможно, принадлежит к тому же происхождению. Магматизм в пределах месторождения не проявлен. Ближайшее тело гранитов – датированный поздним карбоном – ранней пермью Константиновский шток – расположен в 6 км южнее месторождения.

Рудная залежь состоит из вкрапленного сульфидного (преобладает пирит) оруденения в сочетании с прожилковым сульфидно-кварцевым оруденением и с поздними золотоносными кварцевыми жилами. Руды формировались в два этапа – каледонский и герцинский [4]. Они представлены главным образом ассоциацией, состоящей из пирита (четвертой генерации), небольшого количества арсенопирита, а также пирротина, кварца, серицита, железо-магнезиальных карбонатов. Структурные особенности пород деформированного ядра

антиклинали (изоклинали, складчатость, кливаж, метаморфическая слоистость, будинаж, деформации ранних складок, взаимоотношения между сульфидно-кварцевыми прожилками и поздними кварцевыми жилами и пр.) указывают на многократное проявление деформаций. Углеродистое вещество рассеяно во всей массе пород, а также концентрируется в промежутках между минералами либо по кливажным трещинам, ко всему прочему оно образует микровкрапленность в пиритах, формируя их сотовую структуру, его количество достигает 5 % [5]. Ранние генерации пирита (первая, вторая) отделены от рудоносного пирита третьей генерации этапом метаморфических преобразований, на котором происходило формирование пирротина в условиях зеленосланцевого метаморфизма [6]. Отличие пирита четвертой генерации по всем признакам указывает на то, что пострудная минерализация, включая кварцевые жилы, формировалась из флюида с более легким изотопным составом серы ($\delta^{34}\text{S}$ меньше 5 ‰).

Морфологические, геохимические и изотопные характеристики выявленных генераций сульфидов железа месторождений Сухой Лог, Голец Высочайший и Угахан отражают единую эволюцию рудообразующей системы во время их формирования. Новые данные показали важную роль пирита как индикатора условий формирования рудной минерализации, который по составу, изотопии серы и морфологическим особенностям характеризуется полной однотипностью генераций, несмотря на несколько разное геологическое положение месторождений. Это подтверждается не только сравнением с ранее изученными объектами в отношении минералогических данных, но и новыми результатами аргон-аргонового датирования фракций пирита [7].

Месторождение Наталка, расположенное на северо-востоке России, является крупнейшим месторождением золота, занимая второе место по запасам среди месторождений нашей страны. Оно локализовано среди пермских терригенных (песчаники, диамиктиты, алевролиты) отложений Аян-Юрхского антиклинория юго-восточного фланга Яно-Колымского орогенного пояса, смятых в крупноамплитудные складки. Они рассечены продольными разломами и серией даек дорудных лампрофиров и гранит-порфиров. Аргон-аргоновое датирование по серициту измененных даек показало 135 млн лет [8]. Попытка прямого



датирования руд [9] не позволила получить надежных датировок, определив возможный интервал рудообразования 136–132 млн лет. Согласно современным взглядам, оруденение месторождения сконцентрировано в едином крупном (4×1 км) теле, прослеженном на глубину более 500 м. Руды представляют собой сочетание прожилковых зон сульфидно-кварцевой минерализации мощностью 2–25 м и протяженностью 100–500 м, образующих своеобразный жильный каркас рудного тела с ареалом вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализации (1–10 % сульфидов). Собственно структура месторождения сформирована в два этапа: ранний этап орогенного поднятия и формирования разломов с взбросо-надвиговой кинематикой и поздний этап орогенного расширения со сбросо-сдвиговыми движениями по разломам. Минеральный состав руд достаточно простой: минералами жил и метасоматитов являются кварц, серицит, хлорит, кальцит, рудными минералами – пирит, арсенопирит, пирротин, галенит, сфалерит, халькопирит, шеелит, золото (пробностью 497–814 ‰), реже встречены тетраэдрит (5,7–18,6 % серебра), кобальтовый арсенопирит и кобальтин [10]. Указанные особенности позволяют считать это месторождение типично орогенным. Следует отметить также наличие в пределах рудного поля, вероятно, поздней антимонитовой минерализации, проявленной в кислой дайке [10] на фланге месторождения. Околорудные метасоматиты представлены во внешних зонах хлорит-карбонатными, во внутренних – серицит-кварцевыми и альбит-кварцевыми метасоматитами. Рудное тело месторождения фиксируется в обширных аномалиях золота, мышьяка и вольфрама. Данные по геохимии редких земель и изучению флюидных включений предполагают формирование руд из существенно магматического источника при небольшом вкладе метаморфических флюидов [11].

Нежданинское месторождение входит в пятерку крупнейших месторождений золота России по запасам. Оно расположено на западе Охотско-Корякского орогена в позднеюрской–раннемеловой Аллах-Юньской металлогенической зоне. Нежданинское месторождение локализовано в северной части Южно-Верхоянского сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса в тылу Удско-Мургальской (J_3 – K_1) окраинно-континентальной дуги. Верхоянский складчато-надвиговый пояс

залегает на архейско-протерозойском фундаменте, перекрытом терригенно-карбонатными отложениями протерозоя – палеозоя и мезозоя, слагающими пассивную окраину Сибирского кратона. Структура Нежданинского месторождения определяется линейной брахиантиклиналью северо-северо-восточного простирания в сочетании с региональным Кидерикинским разломом близкой ориентировки. Вмещающие породы представлены нижнепермскими алевритами и песчаниками, метаморфизованными до уровня начальных ступеней зеленосланцевой фации метаморфизма. В пределах рудных зон они изменены с развитием серицита, хлорита, кварца, анкерита. В пределах рудного поля зафиксировано два этапа магматизма:

1. Раннемеловой – дайки лампрофиров и диорит-порфиров и небольшие тела гранитов на заметном удалении с датами ~121 млн лет (циркон, U-Pb (ID-TIMS) метод) [12] и 122 млн лет [13].

2. Позднемеловой в виде небольших интрузивов диорит-гранодиорит-гранитного состава с датой 94 млн лет (циркон, U-Pb (ID-TIMS) метод) [12].

Согласно А.В. Прокопьеву с соавторами [14], возраст метаморфических приразломных образований близок к первому этапу магматизма и составляет 120–119 Ма по данным аргон-аргонового датирования, что совпадает с результатами рубидий-стронциевого датирования кварца [15].

Главным рудным телом месторождения является минерализованная зона № 1, сложенная тектонически переработанными осадочными породами с вкрапленным пирит-арсенопиритовым и прожилково-вкрапленным оруденением с линзой метасоматического кварца в осевой зоне и оперяющими кварцевыми жилами с богатым золотым оруденением (жилы 8, 14 и пр.). Формирование Нежданинского месторождения происходило в течение трех этапов:

1. Метаморфогенный этап кварц-карбонатных слабо золотоносных жил.

2. Главный этап формирования пирит-арсенопиритовой вкрапленной и золото-кварцевой прожилково-жильной минерализации.

3. Этап наложения серебро-полиметаллической минерализации с низкопробным золотом и перекристаллизованным кварцем.

Данные по изучению флюидного режима минералообразования, изотопный состав кис-



лорода, углерода, серы и свинца, а также сведения по геохимии редких и редкоземельных элементов свидетельствуют об участии в рудообразовании магматических и метаморфических источников [16, 17].

Таким образом, даже при краткой характеристике этих крупных объектов отчетливо выявляется сложная история формирования их руд независимо от времени их образования. Эта история разбивается на три этапа: дороженный (формирования осадочных рудовмещающих толщ), главный орогенный и второстепенный этап наложенного орогенного события.

Доороженная история. Стабильное положение кратона с мезопротерозоя привело к его окружению пассивными континентальными окраинами, развитие которых шло двумя путями. На современном южном фланге кратонной окраины мезо-неопротерозойская пассивная окраина сменилась задугowymi бассейнами в конце неопротерозоя [18, 19], на восточном краю обстановка пассивной окраины существовала вплоть до конца мезозоя в сочетании с позднепалеозойскими и раннемезозойскими задугowymi бассейнами [20].

Байкало-Патомский сектор Саяно-Байкальского орогенного пояса представляет собой деформированный средне-позднепротерозойский – неопротерозойско-раннепалеозойский бассейн пассивной континентальной окраины, на который наложился процесс задугового спрединга в неопротерозое [18]. Это зафиксировано наличием в разрезе черносланцевых горизонтов, обогащенных углеродом (до 10 %) и золотом (15–20 мг/т) [21, 22], и горизонтов с вулканическим составом [19].

Верхояно-Колымский бассейн пассивной континентальной окраины [20] также характеризуется многочисленными горизонтами раннего – позднего палеозоя, обогащенными золотом (до десятков мг/т) и относительно повышенными концентрациями углерода (до 3–4 %) [23]. В пермское время на его восточном (в современных координатах) фланге возник задуговой бассейн Удско-Мургальской дуги, отложениям которого характерно относительно повышенное количество углерода (1–1,5 %) [24] и высокое – золота (до 120 мг/т) [25]. Важным фактором, указывающим на задуговую обстановку, является появление в слоях этой части разреза вулканического материала, свидетельствующего о близости дуги.

В результате осадконакопления в разновозрастных бассейнах возникли сходные по генезису горизонты, обогащенные углеродом и благородными металлами (прежде всего золотом). Петрохимические и минералогические признаки рудосодержащих пород индицируют формирование благоприятных горизонтов в отложениях пассивной континентальной окраины с добавлением ювенильного вещества в связи с процессами рифтинга (палеопротерозойского и палеозойского) или в результате рассеянного спрединга в задугowych бассейнах (конец неопротерозоя и поздний палеозой).

Орогенные события как фактор формирования золотых руд. Рассмотрим палеозойские орогенные события Байкало-Патомского пояса. Расшифровке формирования золотосодержащих тектонических структур Байкало-Патомского нагорья посвящено большое количество литературы [18, 26–30], анализ которой позволяет предложить следующую модель орогенных событий формирования этой достаточно богатой золотом провинции. Проведенные геохронологические исследования [9, 31] выделяют два этапа орогенеза в ее пределах. Ранний, главный и коллизионный, связанный с коллизией Муйского микроконтинента (кратонного террейна), фиксируется в проявлении регионального Мамского плутонометаморфического пояса с метаморфизмом амфиболитовой (до гранулитовой) фации, приведшей к формированию пояса мигматит-гранитов, датированных уран-свинцовым методом 447 млн лет [31]. Именно по флангам этого пояса и над его погруженной частью концентрируется главное золотое оруденение орогенного типа (рис. 2). Поздний этап, связанный с формированием в позднем палеозое Ангаро-Витимского батолита, привел к возникновению золото-кварцевого жильного оруденения в пределах крупных месторождений (Сухой Лог, Вернинское), а также в самостоятельных жильных образованиях (Догалдинское месторождение). На месторождении Сухой Лог для него получена дата 321 млн лет [15].

Далее рассмотрим мезозойские орогенные события Верхояно-Колымского пояса. Крупнейшие месторождения орогенного золота Верхояно-Колымского пояса, равно как и большинство других золото-кварцевых и золото-сульфидно-кварцевых месторождений и рудопроявлений, располагаются в зоне проявления фации зеленосланцевого метаморфизма орогенных плутонометаморфических



Рис. 2. Ассоциация золотого оруденения с плутоно-метаморфическим Мамско-Оронским поясом в Бодайбинском районе (составлено на основе государственной геологической карты Российской Федерации¹ с дополнениями и изменениями):

1 – PR-PZ, отложения пассивной окраины кратона; 2 – биотитовая изограда мамского метаморфизма; 3 – гранатовая изограда мамского метаморфизма; 4 – дистеновая изограда мамского метаморфизма; 5 – месторождения, рудопроявления и пункты минерализации золота; 6 – рудопроявления и пункты минерализации олова; 7 – ареалы оловоносности; 8 – ареалы золотоносности

Fig. 2. Gold mineralization association with the plutono-metamorphic Mama-Oron belt in the Bodaibo district (compiled on the basis of the state geological map of the Russian Federation¹ added and revised):

1 – PR-PZ, deposits of the passive margin of the craton; 2 – biotite isograd of Mama metamorphism; 3 – garnet isograd of Mama metamorphism; 4 – disthene isograd of Mama metamorphism; 5 – deposits, ore occurrences and sites of gold mineralization; 6 – ore occurrences and tin mineralization sites; 7 – tin-bearing areas; 8 – gold-bearing areas

поясов [32] (рис. 3) разного возраста (позднеюрско-раннемелового – Наталка, Павлик и большинство месторождений Яно-Колымского пояса; мелового – Нежданка, Ветренское, золото-сурьмяное месторождение Сарылах и пр.) [33]. Согласно современным датировкам [34–36], золотое оруденение орогенного типа формировалось в два этапа 150–135 млн лет и 130–116 млн лет, что отвечает главным орогенным событиям Яно-Колымского и Охот-

ско-Корякского орогенных поясов. Время формирования главной стадии орогенного золота после внедрения коллизионных гранитов (пик – 150 млн лет [37]) предполагает формирование основного оруденения на фоне остывания региональной плутонометаморфической системы, в то время как позднее оруденение тесно связано с процессами приразломного зонального метаморфизма, отвечающего орогенному событию на прилегающих территориях

¹ Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-Б 1:1000000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-50 – Бодайбо. Объяснительная записка / сост. Л.Б. Макарьев, Г.Л. Митрофанов, Н.Н. Митрофанова, В.М. Пай, Л.К. Семейкина [и др.], ред. Г.Л. Митрофанов. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. 612 с. + 7 вкл.

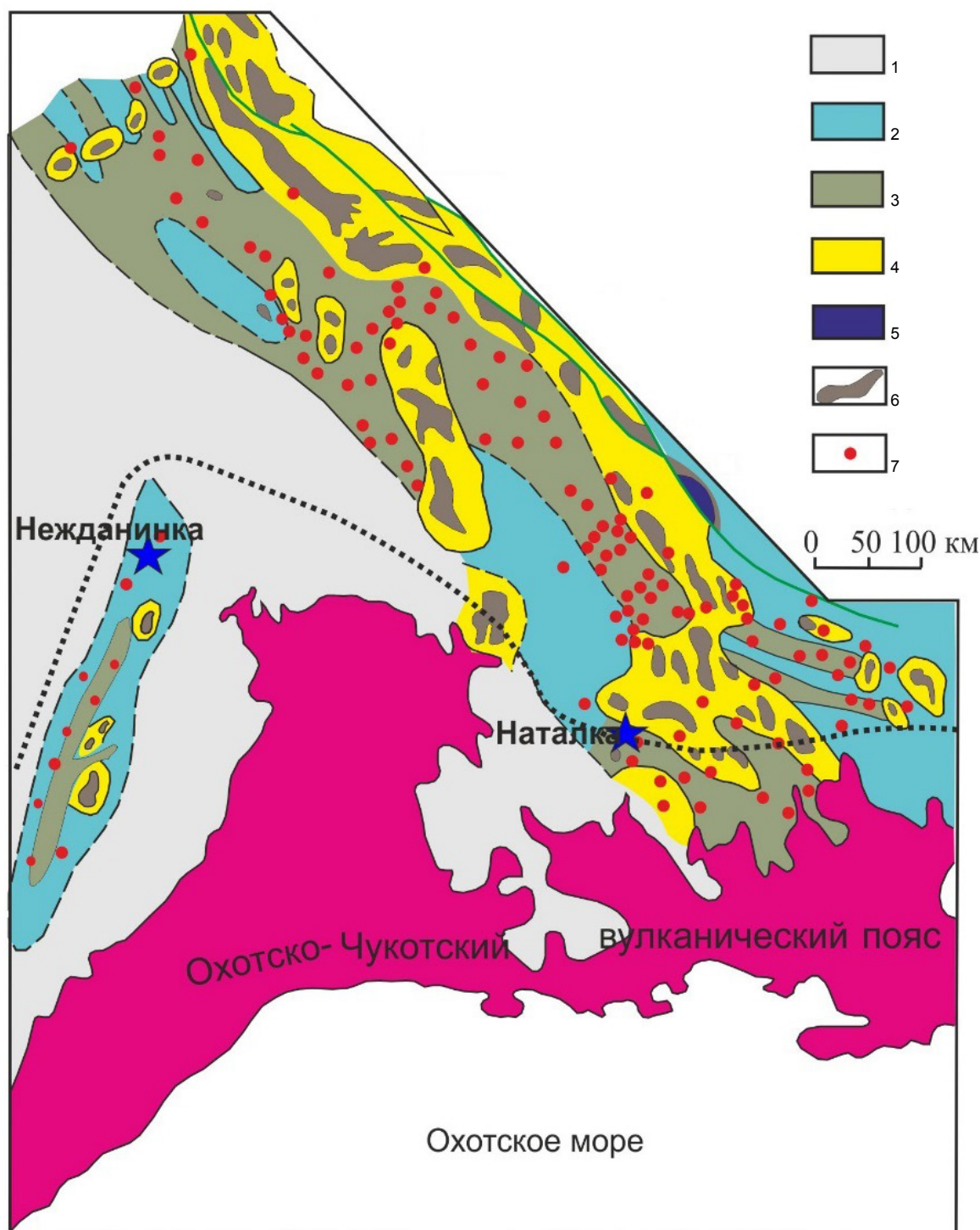


Рис. 3. Ассоциация золотого оруденения с плутоно-метаморфическими поясами Верхояно-Колымской складчатой системы [37]:

- 1 – слабо метаморфизованные породы; 2–4 – метаморфизованные породы зеленосланцевой фации: 2 – хлорит-серицитовая субфации, 3 – биотит-хлоритовой субфации, 4 – коричневого биотита и кордеита; 5 – амфиболиты; 6 – S- и I-типы гранитоида; 7 – месторождения золота

Fig. 3. Gold mineralization association with plutono-metamorphic belts of Verkhoyansk-Kolyma fold system [37]:

- 1 – weakly metamorphosed rocks; 2–4 – metamorphosed rocks of the greenschist facies: 2 – chlorite-sericite subfacies, 3 – biotite-chlorite subfacies, 4 – brown biotite and cordierite; 5 – amphibolites; 6 – S- and I-types of granitoid; 7 – gold deposits



Охотско-Корякского орогенного пояса.

Рассмотрим общие и отличительные черты орогенной минерализации разного возраста. Обстановки формирования осадочных толщ в бассейнах пассивной окраины континента с переходом в задуговые на финальной стадии их существования приводят к накоплению благородных металлов в осадочных рудовмещающих толщах, что свидетельствует об их важной роли как источника металла. В орогенной истории золотое оруденение формировалось в два этапа: ранний и главный, который включал в себя возникновение региональной плутонометаморфической системы [38] с формированием золоторудной минерализации на регрессивной стадии ее существования, а также поздний, соответствующий проявлению орогенных событий в прилегающих структурах также с формированием золотого оруденения орогенного типа [24] (с ним связано проявление поздних этапов благороднометалльного оруденения в крупных рудных месторождениях).

Важной особенностью орогенных структур является широкое (региональное) распространение пиритовой минерализации, тесно связанной с формированием золотого оруденения [39–42]. Для рассмотренных регионов установлено одинаковое количество генераций пирита, соответствующее эволюции складчатых структур (пирит седиментационный, метаморфогенно-катагенный и метаморфогенно-рудный), за исключением позднего пирита, проявленного в Бодайбинском синклинии, и их близкие типоморфные особенности (состав, термоэлектрические свойства) [39, 40–42]. Следовательно, несмотря на разное региональное нахождение и возраст окраинно-платформенных золотоносных складчатых поясов, они характеризуются общими чертами проявления золотого оруденения орогенного типа.

Отличия фиксируются в разной минерало-геохимической специализации орогенных руд. Более широкое развитие минералов мышьяка и сурьмы в месторождениях восточного фланга, вероятно, обусловлено общей зараженностью рудовмещающих толщ этими элементами [43]. С другой стороны, четкая локализация поздних золото-сурьмяных и золотых орогенных месторождений в Яно-Колымском поясе в зонах крупных сквозькоровых разломов [44] предполагает и влияние активированной мантии на эти процессы.

Заключение

Формирование масштабной золотой минерализации в южном и восточном обрамлении Сибирского кратона произошло в палеозойское и позднемезозойское время и являлось следствием полихронных орогенных событий, приведших к формированию крупных складчатых поясов. Эти события вызывали мобилизацию и перераспределение благородных металлов из обогащенных ими стратиграфических горизонтов в результате формирования соответствующих орогенных плутонометаморфических поясов. Сравнительный анализ палеозойско-мезозойского и неопротерозойско-палеозойского металлогенических профилей южной и восточной окраин Сибирского кратона позволяет говорить об универсальности процессов формирования орогенного золотого оруденения независимо от состава вмещающих толщ и возраста оруденения. Общие металлогенические характеристики палеогеодинамических обстановок формирования благороднометалльного оруденения орогенного типа независимо от его возраста могут послужить основой для геолого-генетических и прогнозных построений и выработки комплексных критериев оценки перспектив в пределах рассмотренных регионов.

Список источников

1. Геодинамика, магматизм и металлогения Дальнего Востока России / под ред. А.И. Ханчука. Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 2006. 572 с. EDN: QKFSVT.
2. Геодинамика, магматизм и металлогения Дальнего Востока России / под ред. А.И. Ханчука. Кн. 2. Владивосток: Дальнаука, 2006. 409 с. EDN: QKFSWD.
3. Буряк В.А., Хмелевская Н.М. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира. Владивосток: Дальнаука, 1997. 156 с.
4. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.V., Lishnevsky E.N. Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia // Ore Geology Reviews. 2004. Vol. 24. Iss. 1-2. P. 7–44. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.007>. EDN: KFCODN.



5. Жмодик С.М., Куликов А.А., Шестель С.Т. Распределение золота в черных сланцах Витимо-Патомского района // Геология и геофизика. 1993. № 2. С. 67–76.
6. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., et al. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits // *Ore Geology Reviews*. 2020. Vol. 119. P. 103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>.
7. Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Yu.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Yu.I., et al. ^{40}Ar - ^{39}Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia) // *Ore Geology Reviews*. 2022. Vol. 144. P. 104855. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>.
8. Ньюберри Р.Дж., Лейер П.У., Ганс П.Б., Гончаров В.И., Горячев Н.А., Ворошин С.В. [и др.]. Предварительный анализ хронологии мезозойского магматизма и оруденения на северо-востоке России с учетом датировок $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и данных по рассеянным элементам изверженных и оруденелых пород // Золотое оруденение и гранитоидный магматизм Северной Пацифики: сб. тр. Всерос. совещ. (Магадан, 4–6 сентября 1997 г.). Магадан, 2000. Т. 1. С. 181–205.
9. Акинин В.В., Альшевский А.В., Ползуненков Г.О., Сергеев С.А., Сидоров А.В. Возраст орогенного золоторудного месторождения Наталка (U-Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Re-Os ограничения) // Тихоокеанская геология. 2023. Т. 42. № 6. С. 62–79. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-6-62-79>. EDN: SGJBWY.
10. Гончаров В.И., Ворошин С.В., Сидоров В.А. Наталкинское золоторудное месторождение. Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 2002. 250 с.
11. Горячев Н.А., Викентьева О.В., Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю., Алпатов В.А., Голуб В.Н. Наталкинское месторождение мирового класса: распределение РЗЭ, флюидные включения, стабильные изотопы кислорода и условия формирования руд (Северо-Восток России) // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 5. С. 414–444. EDN: JSJRSX.
12. Чернышев И.В., Бахарев А.Г., Бортников Н.С., Гольцман Ю.В., Котов А.Б., Гамянин Г.Н. [и др.]. Геохронология магматических пород района золоторудного месторождения Нежданинское (Якутия, Россия): U-Pb, Rb-Sr и Sm-Nd-изотопные данные // Геология рудных месторождений. 2012. Т. 54. № 6. С. 487–512. EDN: PNQPAZ.
13. Layer P.W., Newberry R.J., Fujita K., Parfenov L.M., Trunilina V., Bakharev A. Tectonic setting of the plutonic belts of Yakutia, northeast Russia, based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and trace element geochemistry // *Geology*. 2001. Vol. 29. Iss. 2. P. 167–170. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0167:TSOTPB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0167:TSOTPB>2.0.CO;2).
14. Прокопьев А.В., Борисенко А.С., Гамянин Г.Н., Фридовский В.Ю., Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С. [и др.]. Возрастные рубежи и геодинамические обстановки формирования месторождений и магматических образований Верхояно-Колымской складчатой области // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 10. С. 1542–1563. <https://doi.org/10.15372/GiG20181004>. EDN: YLSPTF.
15. Чугаев А.В., Чернышев И.В., Гамянин Г.Н., Бортников Н.С., Баранова А.Н. Rb-Sr-изотопная систематика гидротермальных минералов, возраст и источники вещества золоторудного месторождения Нежданинское (Якутия) // Доклады Академии наук. 2010. Т. 434. № 4. С. 534–539. EDN: NBSZUH.
16. Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Викентьева О.В., Прокофьев В.Ю., Алпатов В.А., Бахарев А.Г. Состав и происхождение флюидов в гидротермальной системе Нежданинского золоторудного месторождения (Саха Якутия, Россия) // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 2. С. 99–145. EDN: HZRSZH.
17. Чернышев И.В., Бортников Н.С., Чугаев А.В., Гамянин Г.Н., Бахарев А.Г. Источники металлов крупного орогенного золоторудного Нежданинского месторождения (Якутия, Россия): результаты высокоточного изучения изотопного состава свинца (MC-ICP-MS) и стронция // Геология рудных месторождений. 2011. Т. 53. № 5. С. 395–418. EDN: OJGRCL.
18. Будяк А.Е., Горячев Н.А., Скузоватов С.И. Геодинамические предпосылки формирования масштабного оруденения в южном обрамлении Сибирского кратона в протерозое // Доклады академии наук. 2016. Т. 470. № 5. С. 562–565. <https://doi.org/10.7868/S0869565216290181>. EDN: WLNNIH.
19. Будяк А.Е., Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И., Ванг К.Л., Горячев Н.А. Единая неопротерозойская-раннепалеозойская эволюция рудоносных осадочных комплексов юга Сибирского кратона // Доклады Академии наук. 2019. Т. 484. № 3. С. 335–339. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524843335-339>. EDN: MIMDQW.
20. Худoley А.К., Гурьев Г.А. Южное Верхоянье – пример среднепалеозойско-мезозойской пассивной окраины // Доклады Академии наук. 1998. Т. 362. № 5. С. 666–669.
21. Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Корнилова Т.А. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 729–747. EDN: MKTVOD.



22. Parshin A., Bashkeev A., Davidenko Y., Persova M., Iakovlev S., Bukhalov S., et al. Lightweight unmanned aerial system for time-domain electromagnetic prospecting – the next stage in applied UAV-geophysics // *Applied Sciences* (Switzerland). 2021. Vol. 11. P. 2060. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21200.23042>.
23. Кокин А.В. Новые данные по золотоносности осадочных пород юго-восточного обрамления Сибирской платформы // *Доклады Академии наук*. 1990. Т. 313. № 3. С. 697–699.
24. Ведерников И.Л. Распределение органического углерода в золотоносных толщах перми Аян-Юряхского антиклинория // *Чтения памяти академика К.В. Симакова: тез. докл. Всерос. науч. конф. (г. Магадан, 25–27 ноября 2009 г.)*. Магадан, 2009. С. 43–44. EDN: TBNZVP.
25. Михалицына Т.И. Литология и геохимия верхнепермских пород Аян-Юряхского антиклинория на примере разреза руч. Тихоня (Магаданская область) // *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. 2014. № 4. С. 17–28. EDN: THKYXV.
26. Иванов А.И. Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы). М.: Изд-во ЦНИГРИ. 2017. 215 с. EDN: ZOIMFF.
27. Блинов А.В., Паршин А.В., Костерев А.Н. Особенности постановки геофизических методов поисков золотоурановых объектов в горных районах Северного Забайкалья // *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. 2014. № 1. С. 55–60. EDN: UMIVTT.
28. Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В., Костерев А.Н., Морозов В.А., Михалев А.О. [и др.] Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 2 // *География и природные ресурсы*. 2016. № 56. С. 150–155. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.
29. Бабяк В.Н., Блинов А.В., Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Новые данные о геолого-структурных особенностях золоторудных месторождений Ожерелье, Ыканское, Угахан и Голец Высочайший // *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 4. С. 388–412. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412>. EDN: UWHZEJ.
30. Блинов А.В., Тарасова Ю.И. Минералого-петрографическая характеристика месторождения Угахан // *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 2. С. 160–176. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-160-176>. EDN: URLQFK.
31. Зорин Ю.А., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Пресняков С.Л., Сергеев С.А. Силурийский возраст главных складчатых деформаций рифейских отложений Байкало-Патомской зоны // *Доклады Академии наук*. 2008. Т. 423. № 2. С. 228–233. EDN: JTXFAD.
32. Горячев Н.А. Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 2003. 143 с. EDN: QKEBMV.
33. Горячев Н.А., Соцкая О.Т., Горячев И.Н., Михалицына Т.И. Минералого-геохимические особенности раннемелового золотого оруденения восточного фланга Яно-Колымского орогенного пояса (Магаданская область, Россия) // *Тихоокеанская геология*. 2023. Т. 42. № 6. С. 80–95. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-6-80-95>. EDN: LVMTTG.
34. Goryachev N.A., Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia // *Ore Geology Reviews*. 2014. Vol. 59. P. 123–151. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.11.010>.
35. Goldfarb R.J., Taylor R.D., Collins G., Goryachev N.A., Orlandini O. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia // *Gondwana Research*. 2014. Vol. 25. Iss. 1. P. 49–102. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.03.002>.
36. Фридовский, В.Ю., Горячев Н.А., Крымский Р.Ш., Кудрин М.В., Беляцкий Б.В., Сергеев С.А. Возраст золотого оруденения Яно-Колымского металлогенического пояса, Северо-Восток России, первые данные по Re-Os изотопной геохронологии самородного золота // *Тихоокеанская геология*. 2021. Т. 40. № 4. С. 18–32. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-4-18-32>. EDN: HLDPRX.
37. Акинин В.В., Прокопьев А.В., Торо Х., Миллер Э.Л., Вуден Дж., Горячев Н.А. [и др.]. U-Pb SHRIMP возраст гранитоидов Главного батолитового пояса (Северо-Восток Азии) // *Доклады Академии наук*. 2009. Т. 426. № 2. С. 216–221. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09040217>. EDN: KAVTCR.
38. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., et al. Indicator and isotope geochemical characteristics of iron sulfides from the Golets Vysochaishy deposit, East Siberia // *geology of ore deposits*. 2022. Vol. 64. Iss. 7. P. 503–512. <https://doi.org/10.1134/S1075701522070108>.
39. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Блинов А.В. [и др.]. Типоморфизм сульфидов золоторудного месторождения Угахан (Байкало-Патомское нагорье) // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2022. Т. 503. № 1. С. 12–17. <https://doi.org/10.31857/S2686739722030136>. EDN: EOJDKO.
40. Горячев Н.А., Мишунин В.И., Горячева Е.М., Соцкая О.Т., Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Термо-ЭДС сульфидов:



возможности метода и значение для минералогических исследований (на примере изучения пирита и арсенопирита золоторудных месторождений восточного и южного обрамления Сибирского кратона) // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2022. № 3. С. 41–55. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2022-3-41-55>. EDN: KBDJHF.

41. Соцкая О.Т., Семышев Ф.И., Малиновский М.А., Альшевский А.В., Ливач А.Э., Горячев Н.А. Пирит зон сульфидизации терригенных комплексов Яно-Колымского орогенного пояса (Северо-Восток России): генерации, типохимизм, минеральные ассоциации // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2022. № 1. С. 14–30. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2022-1-14-30>. EDN: QFRYIL.

42. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Стадийность формирования рудной зоны Холоднинского колчеданно-полиметаллического месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 201–211. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-201-211>. EDN: RANYSC.

43. Кокин А.В. Мышьяковая Южно-Верхоянская провинция // Геология и геофизика. 1985. Т. 26. № 1. С. 74–81.

44. Горячев И.Н. Mineral prospectivity mapping для прогноза месторождений золота и металлогенического районирования Центрально-Колымского региона (Магаданская область, Россия) // Геоинформатика. 2023. № 1. С. 4–17. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-1-4-17>. EDN: RJRSJL.

References

1. Khanchuk A.I. *Geodynamics, magmatism and metallogeny of Eastern Russia*. Book 1. Vladivostok: Dalnauka; 2006, 572 p. (In Russ.). EDN: QKFSVT.

2. Khanchuk A.I. *Geodynamics, magmatism and metallogeny of Eastern Russia*. Book 2. Vladivostok: Dalnauka; 2006, 409 p. (In Russ.). EDN: QKFSDW.

3. Buryak V.A., Khmelevskaya N.M. *Sukhoi Log – one of the largest gold deposits in the world*. Vladivostok: Dalnauka; 1997, 156 p. (In Russ.).

4. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.V., Lishnevsky E.N. Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geology Reviews*. 2004;24(1-2):7-44. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.007>. EDN: KFCODN.

5. Zhmodik S.M., Kulikov A.A., Shestel' S.T. Distribution of gold in black shales of the Vitimo-Patom region. *Geologiya i geofizika*. 1993;2:67-76. (In Russ.).

6. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., et al. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits. *Ore Geology Reviews*. 2020;119:103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>.

7. Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Yu.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Yu.I., et al. ^{40}Ar - ^{39}Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia). *Ore Geology Reviews*. 2022;144:104855. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>.

8. Newberry R.G., Leyer P.U., Gans P.B., Goncharov V.I., Goryachev N.A., Voroshin S.V. Preliminary chronology analysis of Mesozoic magmatism and mineralization in the North-East of Russia taking into account $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and data on trace elements of igneous and mineralized rocks. *Zolotoe orudnenie i granitoidnyi magmatizm Severnoi Patsifikii: sb. tr. Vseros. soveshch. = Gold mineralization and granitoid magmatism of North Pacific: collection of proceedings of the All-Russian conference*. 4–6 September 1997, Magadan. Magadan; 2000, vol. 1, p. 181-205. (In Russ.).

9. Akinin V.V., Alshevsky A.V., Polzunenkov G.O., Sergeev S.A., Sidorov V.A. Age of Natalka orogenic gold deposit (U-Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Re-Os constrain). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2023;42(6):62-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-6-62-79>. EDN: SGJBWY.

10. Goncharov V.I., Voroshin S.V., Sidorov V.A. *Natalka gold deposit*. Magadan: North-Eastern Interdisciplinary Scientific Research Institute; 2002, 250 p. (In Russ.).

11. Goryachev N.A., Golub V.V., Vikent'eva O.V., Bortnikov N.S., Prokof'ev V.Yu., Alpatov V.A. The world-class Natalka gold deposit, Northeast Russia: REE patterns, fluid inclusions, stable oxygen isotopes, and formation conditions of ore. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2008;50(5):414-444. (In Russ.). EDN: JSJRSX.

12. Layer P.W., Newberry R.J., Fujita K., Parfenov L.M., Trunilina V., Bakharev A. Tectonic setting of the plutonic belts of Yakutia, northeast Russia, based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and trace element geochemistry. *Geology*. 2001;29(2):167-170. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0167:TSOTPB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0167:TSOTPB>2.0.CO;2).

13. Chernyshev I.V., Bortnikov N.S., Goltsman Y.V., Gamyranin G.N., Chugaev A.V., Bairova E.D., et al. Geochronology of igneous rocks at and near to the Nezhdaninka gold deposit, Yakutia, Russia: U-Pb, Rb-Sr, and Sm-Nd isotopic data. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2012;54(6):487-512. (In Russ.). EDN: PNQPAZ.

14. Prokof'ev A.V., Borisenko A.S., Gamyranin G.N., Fridovskii V.Yu., Kondrat'eva L.A., Anisimova G.S., et al. Age constraints and tectonic settings of metallogenic and magmatic events in the Verkhoyansk-Kolyma folded area. *Geologiya i geofizika*.



2018;59(10):1542-1563. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG20181004>. EDN: YLSPTF.

15. Chugaev A.V., Chernyshov I.V., Gamyarin G.N., Bortnikov N.S., Baranova A.N. Rb-Sr isotopic systematic of hydrothermal minerals, age, and matter sources of the Nezhdaninskoe gold deposit (Yakutia). *Doklady Akademii nauk*. 2010;434(4):534-539. (In Russ.). EDN: NBSZUH.

16. Bortnikov N.S., Vikent'eva O.V., Prokof'ev V.Yu., Gamyarin G.N., Alpatov V.A., Bakharev A.G. Fluid composition and origin in the hydrothermal system of the Nezhdaninsky gold deposit, Sakha (Yakutia), Russia. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2007;49(2):99-145. (In Russ.). EDN: HZRSZH.

17. Chernyshev I.V., Bortnikov N.S., Chugaev A.V., Gamyarin G.N., Bakharev A.G. Metal sources of the large Nezhdaninsky orogenic gold deposit, Yakutia, Russia: results of high-precision MC-ICP-MS analysis of lead isotopic composition supplemented by data on strontium isotopes. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2011;53(5):395-418. (In Russ.). EDN: OJGRCL.

18. Budyak A.E., Goryachev N.A., Skuzovatov S.Y. Geodynamic background for large-scale mineralization in the southern environs of the Siberian craton in the proterozoic. *Doklady Akademii nauk*. 2016;470(5):562-565. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869565216290181>. EDN: WLNNIH.

19. Budyak A.E., Skuzovatov S.Y., Tarasova Y.I., Goryachev N.A., Wang K.L. Common neoproterozoic–early paleozoic evolution of ore-bearing sedimentary complexes in the southern Siberian craton. *Doklady Akademii nauk*. 2019;484(3):335-339. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869-5652484335-339>. EDN: MIMDQW.

20. Khudolei A.K., Gur'ev G.A. Southern Verkhoyansk area as an example of a Middle Paleozoic-Mesozoic passive margin. *Doklady Akademii nauk*. 1998;362(5):666-669. (In Russ.).

21. Nemerov V.K., Razvozhayeva E.A., Budyak A.E., Stanevich A.M., Kornilova T.A. Biogenic sedimentation factors of mineralization in the Neoproterozoic strata of the Baikal-Patom region. *Geologiya i geofizika*. 2010;51(5):729-747. (In Russ.). EDN: MKTVOD.

22. Parshin A., Bashkeev A., Davidenko Y., Persova M., Iakovlev S., Bukhalov S., et al. Lightweight unmanned aerial system for time-domain electromagnetic prospecting – the next stage in applied UAV-geophysics. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11:2060. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21200.23042>.

23. Kokin A.V. New data on the gold content of sedimentary rocks of the southeastern frame of the Siberian Platform. *Doklady Akademii nauk*. 1990;313(3):697-699. (In Russ.).

24. Vedernikov I.L. Distribution of organic carbon in Permian gold-bearing strata of the Ayan-Yuryakh anticlinorium. In: *Chteniya pamyati akademika K.V. Simakova: tez. dokl. Vseros. nauch. konf. = Readings in memory of the Academician K.V. Simakov: report abstracts of the All-Russian scientific conference*. 25–27 November 2009, Magadan. Magadan; 2009, p. 43-44. (In Russ.). EDN: TBNZVP.

25. Mikhailitsyna T.I. Lithology and geochemistry of the upper permian rocks of the Ayan-Yuryakh anticlinorium (case of the Tikhonya creek section, Magadan oblast). *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra DVO RAN = Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2014;4:17-28. (In Russ.). EDN: THKYXV.

26. Ivanov A.I. *Gold of Baikal-Patom (geology, mineralization, prospects)*. Moscow: Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals; 2014, 215 p. (In Russ.). EDN: ZOIMFF.

27. Blinov A.V., Parshin A.V., Kosterev A.N. Features of geophysical methods for gold and uranium deposits prospecting in mountain regions of Northern Transbaikalia. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2014;1:55-60. (In Russ.). EDN: UMIVTT.

28. Parshin A.V., Budyak A.E., Blinov A.V., Kosterev A.N., Morozov V.A., Mikhalev A.O., et al. Low-altitude unmanned aeromagnetic survey in management of large-scale structuralgeological mapping and prospecting for ore deposits in composite topography. Part 2. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2016;56:150-155. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.

29. Babyak V.N., Blinov A.V., Tarasova Ju.I., Budyak A.E. New data on the geological and structural features of the Ozhereliye, Ykanskiye, Ugahan and Golets Vysochaishy gold fields. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2019;42(4):388-412. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412>. EDN: UWHZEJ.

30. Blinov A.V., Tarasova Ju.I. Mineralogical and petrographic characteristics of the Ugahan deposit. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(2):160-176. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-160-176>. EDN: URLQFK.

31. Zorin Yu.A., Mazukabzov A.M., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Presnyakov S.L., Sergeev S.A. Silurian age of major folding in riphean deposits of the Baikal-Patom zone. *Doklady Akademii nauk*. 2008;423(2):228-233. (In Russ.). EDN: JTXFAD.

32. Goryachev N.A. *Origin of gold quartz vein belts throughout the Northern Pacific area*. Magadan: North-Eastern Integrated Research Institute; 2003, 143 p. (In Russ.). EDN: QKEBMV.



33. Goryachev N.A., Sotskaya O.T., Goryachev I.N., Mikhailitsyna T.I. Mineralogical and geochemical features of the early cretaceous gold ore mineralization of the eastern flank of Yana-Kolyma orogenic belt (Magadan region, Russia). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2023;42(6):80-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-6-80-95>. EDN: LVMTTG.
34. Goryachev N.A., Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia. *Ore Geology Reviews*. 2014;59:123-151. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.11.010>.
35. Goldfarb R.J., Taylor R.D., Collins G., Goryachev N.A., Orlandini O. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia. *Gondwana Research*. 2014;25(1):49-102. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.03.002>.
36. Fridovsky V.Y., Kudrin M.V., Goryachev N.A., Krymsky R.S., Belyatsky B.V., Sergeev S.A. The age of gold mineralization in the Yana-Kolyma metallogenic belt, Northeastern Russia: first data of Re-Os isotope geochronology of native gold. *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2021;40(4):18-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-4-18-32>. EDN: HLDPRX.
37. Akinin V.V., Prokopiev A.V., Toro J., Miller E.L., Wooden J., Goryachev N.A., et al. U-Pb SHRIMP ages of granitoides from the Main batholith belt (North East Asia). *Doklady Akademii nauk*. 2009;426(2):216-221. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1028334X09040217>. EDN: KAVTCR.
38. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., et al. Indicator and isotope geochemical characteristics of iron sulfides from the Golets Vysochaishy deposit, East Siberia. *Geology of Ore Deposits*. 2022;64(7):503-512. <https://doi.org/10.1134/S1075701522070108>.
39. Tarasova Y.I., Budyak A.E., Goryachev N.A., Blinov A.V., Goryacheva E.M., Ignatiev A.V., et al. Typomorphism of pyrite from the Ugakhan gold deposit (Baikal-Patom highlands). *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*. 2022;503(1):12-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2686739722030136>. EDN: EOJDKO.
40. Goryachev N.A., Mishunin V.I., Goryacheva E.M., Sotskaya O.T., Tarasova YU.I., Budyak A.E. Sulfide thermo-EMF: method capabilities and significance for mineralogical research (exemplified by the study of pyrite and arsenopyrite gold deposits in the eastern and southern margins of the Siberian craton). *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra DVO RAN = Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2022;3:41-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2022-3-41-55>. EDN: KBDJHF.
41. Sotskaya O.T., Semyshev F.I., Malinovsky M.A., Al'shevsky A.V., Livach A.E., Goryachev N.A. Pyrite from sulfidization zones of terrigenous complexes in the Yana-Kolyma orogenic belt (North-East Russia): generations, typochemistry, mineral associations. *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra DVO RAN = Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2022;1:14-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2022-1-14-30>. EDN: QFRYIL.
42. Tarasova Yu.I., Budyak A.E. Formation stages of the Kholodninskoye pyrite-polymetallic deposit ore zone. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):201-211. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-201-211>. EDN: RANYSC.
43. Kokin A.V. Arsenic South Verkhoyansk province. *Geologiya i geofizika*. 1985;26(1):74-81. (In Russ.).
44. Goryachev I.N. Mineral prospectivity mapping for forecasting gold deposits in the Central Kolyma region (Magadan region, Russia). *Geoinformatika*. 2023;1:4-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-1-4-17>. EDN: RJRSJL.

Информация об авторах / Information about the authors



Горячев Николай Анатольевич,
академик РАН,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
главный научный сотрудник лаборатории петрологии,
изотопной геохронологии и рудогенеза,
Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский
институт им. Н.А. Шило ДВО РАН,
г. Магадан, Россия,
главный научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
goryachev@neisri.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2745-9167>
Nikolay A. Goryachev,
Academician of the Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Chief Researcher of the Laboratory of Petrology,
Isotope Geochronology and Ore Genesis,

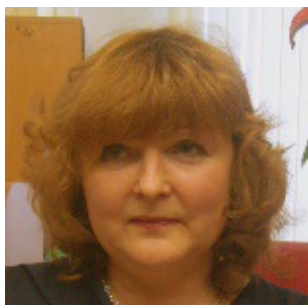


North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute
named after N.A. Shilo FEB RAS,
Magadan, Russia,
Chief Researcher of the Laboratory of Ore Formation Geochemistry
and Geochemical Exploration Methods,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
goryachev@neisri.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2745-9167>



Будяк Александр Евгеньевич,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
руководитель департамента рудной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
заместитель директора по научной работе,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
budyak@igc.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0814-2583>

Alexander E. Budyak,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Head of the Department of Ore Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Deputy Director for Research,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
budyak@igc.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0814-2583>



Михалицына Татьяна Ивановна,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник лаборатории петрологии,
изотопной геохронологии и рудогенеза,
Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский
институт им. Н.А. Шило ДВО РАН,
г. Магадан, Россия,
tim_66@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8668-7805>

Tatiana I. Mikhaliitsyna,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher of the Laboratory of Petrology,
Isotope Geochronology and Ore Genesis,
North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute
named after N.A. Shilo FEB RAS,
Magadan, Russia,
tim_66@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8668-7805>



Тарасова Юлия Игоревна,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник департамента рудной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
старший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
✉ j.tarasova84@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8741-9645>



Yulia I. Tarasova,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher of the Department of Ore Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Senior Researcher of the Laboratory of Ore Formation Geochemistry
and Geochemical Exploration Methods,
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
✉ j.tarasova84@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8741-9645>

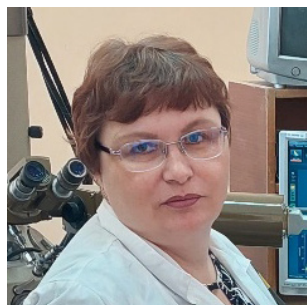


Горячев Иван Николаевич,

научный сотрудник департамента рудной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
ivan.goryachev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-5250-9410>

Ivan N. Goryachev,

Researcher of the Ore Geology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
ivan.goryachev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-5250-9410>



Соцкая Ольга Тарасовна,

кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник лаборатории петрологии,
изотопной геохронологии и рудогенеза,
Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский
институт им. Н.А. Шило ДВО РАН,
г. Магадан, Россия,
sotskaya@neisri.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3240-8927>

Olga T. Sotskaya,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Researcher of the Laboratory of Petrology,
Isotope Geochronology and Ore Genesis,
North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute
named after N.A. Shilo FEB RAS,
Magadan, Russia,
sotskaya@neisri.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3240-8927>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 25.09.2023; одобрена после рецензирования 19.10.2023; принята к публикации 29.11.2023.

The article was submitted 25.09.2023; approved after reviewing 19.10.2023; accepted for publication 29.11.2023.