

УДК 553.3.072
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5053
Шифр специальности ВАК: 1.6.9
Обзорная статья

Золоторудное месторождение Сухой Лог (Патомское нагорье). Часть I. Постановка проблемы, геодинамическая обстановка и геологическое строение

В.В. Слоквенко✉, Ю.В. Колмаков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉Vvs120@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* настоящей работы, состоящей из трех частей, продиктована сохраняющейся по сей день неопределенностью в вопросе генезиса оруденения месторождения-гиганта Сухой Лог и его аналогов. Подавляющее большинство современных исследований посвящены петрологии, изотопной геохронологии и геохимии. Опубликованных источников, посвященных изучению геофизических полей месторождения, крайне мало, но и они преимущественно посвящены изучению полей регионального масштаба и глубинного строения земной коры. Дополнение уже имеющихся исследований, посвященных образованию сухоложского оруденения, анализом детальных геофизических полей позволит восполнить недостаток сведений в этой области. *Целью* работы в целом является анализ структуры геофизических и радиогеохимических полей месторождения и определение вероятной природы аномалий. *Целью* первой части работы является синтез наиболее актуальной на данный момент геологической, геофизической и геохронологической информации по месторождению и анализ существующих точек зрения на формирование оруденения. Реконструкция геодинамического развития региона в совокупности с данными по геолого-тектонической позиции месторождения способствуют корректному объяснению причин и последовательности появления геофизических аномалий. Поскольку данная статья является в большей степени обзорной, ее *методами* являются поиск, синтез и анализ результатов наиболее актуальных и комплексных исследований, посвященных геодинамике, геохронологии, петрологии и металлогении месторождения Сухой Лог и Бодайбинского золоторудного района. *Результаты и выводы.* Золотое оруденение Бодайбинского района формировалось в непростых геодинамических условиях. Происходила неоднократная смена геодинамических обстановок и тектонических режимов. Формирование месторождения происходило в несколько этапов, что подтверждается как геохронологическими исследованиями, так и корреляцией с геодинамическим развитием региона.

Ключевые слова: геодинамическая обстановка, золотое оруденение, Бодайбинский золоторудный район, формирование оруденения, черносланцевые формации, полихронные и полигенные месторождения

Для цитирования: Колмаков Ю.В., Слоквенко В.В. Золоторудное месторождение Сухой Лог (Патомское нагорье). Часть I. Постановка проблемы, геодинамическая обстановка и геологическое строение // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 156–173. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5053

UDC 553.3.072
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5053
Review article

Sukhoy Log gold ore deposit (Patom Highlands). Part I. Problem statement, geodynamic setting and geological structure

V.V. Slokvenko✉, Yu.V. Kolmakov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉Vvs120@tpu.ru

Abstract. Relevance. The uncertainty surrounding the genesis of mineralization of the Sukhoy Log giant deposit and its analogues, a question which remains unresolved. The majority of modern studies are devoted to petrology, isotope geochronology and geochemistry. However, only a paucity of published sources focuses on the study of geophysical fields of the deposit, and even these are chiefly concerned with regional-scale fields and the deep structure of the Earth's crust. The integration of detailed geophysical fields with existing studies on the formation of the Sukhoy Log mineralization will facilitate a more precise understanding of the prevailing uncertainties in this area. **Aim.** To analyse the structure of the geophysical and radiogeochronological fields of the deposit and to determine the likely nature of the anomalies. The first part of the work is dedicated to synthesising the most relevant geological, geophysical and geochronological information on the deposit, as well as analysing existing views on the formation of mineralisation. The reconstruction of the geodynamic development of the region, in conjunction with data on the geological and tectonic position of the deposit, contributes to a correct explanation of the causes and sequence of geophysical anomalies. Since this is a review article, its methods are searching for the most relevant and comprehensive studies on geodynamics, geochronology, petrology and metallogeny of the Sukhoy Log deposit and the Bodaibo gold bearing district; their synthesis and analysis. **Results and conclusions.** Gold mineralization of the Bodaibo gold bearing district was formed in difficult geodynamic conditions. There was a repeated change of geodynamic settings and tectonic regimes. The formation of the deposit occurred in several stages, which is confirmed both by geochronological studies and correlation with the geodynamic development of the region.

Keywords: geodynamic setting, gold mineralization, Bodaibo gold bearing district, ore formation, black shale formations, polychronous and polygenic deposits

For citation: Slokvenko V.O., Kolmakov Yu.V. Sukhoy Log gold ore deposit (Patom Highlands). Part I. Problem statement, geodynamic setting and geological structure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 156–173. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5053

Введение

Генезис оруденения золоторудного месторождения Сухой Лог, расположенного в Бодайбинском прогибе Байкало-Патомской складчатой области, является предметом многолетних споров. Полноценного консенсуса по сей день достигнуто не было, и проблема по-прежнему стоит остро.

Оспариваются в основном два ключевых вопроса: источник рудных компонентов и относительная значимость процессов литогенеза, метаморфизма и магматизма на формирование оруденения.

По мнению одних исследователей [1–8], источником золота являются сами рудовмещающие осадочные толщи, сингенетично обогащенные в связи с вулканической активностью на уровне дна бассейна осадконакопления. Вопросы концентрирования золота, мышьяка и серы на этапе седиментогенеза подробно рассматривались в [9–15]. Вызывает множество споров роль органического вещества в процессе концентрирования золота на этапе седиментогенеза [16–18]. Золото первоначально могло находиться в виде металлоорганических соединений [19] или в виде тиоловых комплексов [20]. В работах [6, 7, 21] рассматривалась также роль органических соединений в транспортировке золота на последующих после седиментогенеза этапах литогенеза. Так, подвижные углеводороды были признаны потенциально важными агентами для накопления и переноса многих металлов, включая золото, в осадочных бассейнах.

Сторонники гипотезы сингенетичного обогащения в качестве ключевого этапа формирования оруденения выделяют региональный или динамотермальный метаморфизм [22–27]. Считается, что

рассеянное золото было экстрагировано метаморфогенными флюидами из вмещающих толщ и впоследствии переотложено в ходе регрессивного этапа метаморфизма. Данная концепция носит название метаморфогенно-гидротермальной. Этой концепцией подразумевается также и то, что любые гидротермальные изменения происходили изохимически – за счет исключительно внутренних ресурсов вмещающих пород [25]. В зарубежной литературе генетическую категорию месторождения и его аналогов определяют как орогенную, что основано, во-первых, на его приуроченности к складчатому поясу и, во-вторых, на непосредственном участии метаморфогенных флюидов, сопряженных с син- и постколлизийными процессами, в формировании оруденения [28–31].

Противоположная метаморфогенной гипотеза несет название магматогенно-гидротермальной. Данная концепция в значительной степени менее распространена и освещена в периодической литературе. Ключевым для формирования оруденения является процесс становления интрузий гранит-диорит-долеритового состава и сопряженный с ним метасоматизм [32–34]. Вопросы метасоматических преобразований на месторождении и его ближайших аналогах подробно рассмотрены в [17, 34, 35]. Метасоматиты, по представлениям авторов, соответствуют березитовому профилю, образованы в результате воздействия углекислотного флюида, осуществлявшего вынос оснований и привнос щелочных металлов. Метасоматизм мог происходить как в один этап, с привносом исключительно калия [35], так и в несколько этапов, когда сначала приносился натрий, а уже потом калий [17].

Возникает парадоксальная ситуация: как могут одновременно сосуществовать две столь противоречащие друг другу гипотезы, причем каждая из них имеет под собой научное обоснование? Подобный парадокс со временем привел к формированию комплексных гипотез, старающихся принять сложную и многоэтапную геологическую историю региона, смещая таким образом акцент с крайних точек зрения на формирование оруденения [36–43]. Данные концепции несут название метаморфогенно-метасоматических. Ключевым событием, согласно данным концепциям, является возникновение, причем неоднократное, единого для региона глубинного источника тепла и, вероятно, флюидов, с ним сопряженных, экстрагирующих и транспортирующих рудные компоненты из вмещающих пород [36, 38, 43]. Гидротермальные изменения, такие как, например, образование железомagneзиальных карбонатов, приурочены именно к регрессивному этапу динамотермального метаморфизма [39, 40]. Многоэтапность развития региона отражается и во множестве генераций пирита, от безрудных синседиментационного и диагенетического, до рудного метаморфогенного и пострудного метасоматического [4, 5, 37].

Несмотря на возросшее количество исследований, включающих петрологические, геохимические и геохронологические, соотношение процессов метаморфизма и метасоматизма в рудообразовании до сих пор остается предметом споров. Одним из способов приближения к решению возникшей проблемы является применение методов разведочной геофизики с целью уточнения относительного вклада различных геологических процессов в формирование оруденения.

Работ, ранее освещавших геофизические характеристики месторождения или сопряженных территорий, в периодической литературе крайне мало [33, 44]. Упомянутые работы, к тому же, в большей степени посвящены исследованию региональной геолого-геофизической обстановки и глубинного строения земной коры. Так, в работе [33] было установлено наличие залегающего на глубине криптобатолита – Угаханского плутона, и была выдвинута гипотеза о приуроченности месторождения к краевой его части. В работе [44] было установлено наличие мантийного выступа по Бодайбинским синклиниорием, гипотетически являющимся источником глубинных флюидов. Ни одна из работ не была посвящена изучению детальных полей месторождения.

Геодинамическое развитие Байкало-Патомской складчатой области Архей

Отложения архейского возраста в Патомском нагорье практически не вскрываются и изучены слабо. В связи с этим детальная геологическая ре-

конструкция развития региона в архейское время затруднена. В общих чертах стоит отметить, что в архейское время было сформировано континентальное основание региона – фундамент Сибирской платформы [45]. В течение раннепротерозойского тектономагматического цикла архейское основание было переработано, и был сформирован фундамент складчатой области, который вскрывается в блоках Чуйско-Нечерского антиклинория. Он состоит преимущественно из образований раннепротерозойского возраста с включениями регрессивно-метаморфизованных архейских реликтов. Конец архей–начало раннего протерозоя отмечается стабилизацией тектонического режима. Об этом свидетельствуют залегающие в основании раннепротерозойского разреза кварциты илинакской свиты, представляющие собой метаморфизованные продукты кор выветривания, переотложенных в прибрежно-морских условиях.

Ранний протерозой

За позднеархейской тектонической стабилизацией последовало заложение пассивной континентальной окраины, на длительный период предопределившей особенности режима осадконакопления в регионе. Раннепротерозойский осадочный комплекс включает в себя флишеидные отложения албазинской, михайловской и ходоканской свит. Область осадконакопления контролировалась Алеканомалотуюканским и Жуинским разломами (рис. 1). Корреляция свит раннего протерозоя затруднена, они ограниченно вскрываются в пределах выступов фундамента в Чуйско-Нечерском антиклинории. Несмотря на неоднозначность корреляции раннепротерозойского разреза, по общим представлениям кварциты илинакской свиты накапливались в прибрежно-морских условиях, а флишеидные породы – в условиях континентального склона. Наиболее вероятной интерпретацией подобных различий в составе отложений является фациальная зональность в пределах единой континентальной окраины: фации менялись от шельфа в Патомской области до континентального склона в Бодайбинской. Завершение раннепротерозойского осадконакопления было ознаменовано грабенообразованием, предположительно связанным с рифтингом. Грабены наполнялись вулканогенно-осадочными породами туюканской свиты. Впоследствии они были прорваны и метаморфизованы гранитоидами чуйско-кодарского (чуйско-нечерского) комплекса возрастом 1900 ± 50 млн лет, являющимися протоорогенными образованиями [46]. Весь раннепротерозойский цикл в целом был завершен тектономагматической активизацией с внедрением базитов туюканского комплекса и гранитоидов амандракского (ничатского) комплекса на рубеже 1700 ± 50 млн лет, что также привело и к

гидротермально-метасоматической переработке ранее сформированных пород. Дайки диабазов группируются в отчетливые пояса и фиксируют раннепротерозойские корово-мантийные глубинные разломы [46]. После тектономагматической активизации наступил этап тектонической стабилизации, сопровождающийся корообразованием вплоть до рифея.

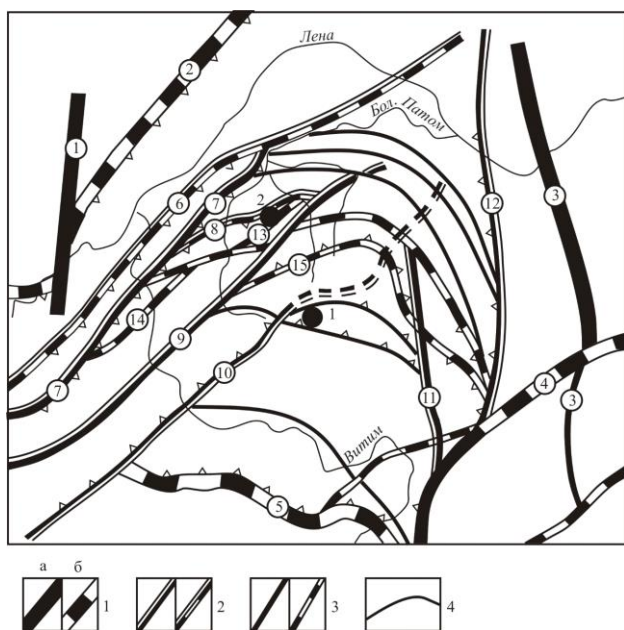


Рис. 1. Схема главных разломов фундамента окраинно-континентальной мегазоны [45, 46]: 1–3 – разломы палео- (а) и мезопротерозойского (б) заложения с активизацией во все последующие тектономагматические этапы: между крупными литосферными блоками (1); внутриблоковые конседиментационные (2) и прочие (3); 4 – разломы эпохи линейного складкообразования раннего-среднего палеозоя. Номера разломов: 1 – Восточно-Ньюский; 2 – Ленско-Ньюский; 3 – Чарский; 4 – Ничатский; 5 – Правомамаканский; 6 – Аkitкано-Джербинский; 7 – Алеканомалотуюканский; 8 – Тонодский; 9 – Чуйский; 10 – Абчадский; 11 – Нечерский; 12 – Жуинский; 13 – Хайвергино-Кевактинский; 14 – Язовский; 15 – Чуйско-Нечерский

Fig. 1. Scheme of the main basement faults of the marginal continental megazone [45, 46]: 1–3 – Paleo- (a) and Mesoproterozoic (b) faults with activation in all subsequent tectonomagmatic stages: between large lithospheric blocks (1); intra-block consedimentary (2) and other (3); 4 – faults of the Early-Middle Paleozoic linear folding. Faults: 1 – Eastern-Nyu; 2 – Lensko-Nyu; 3 – Charsky; 4 – Nichatsky; 5 – Pravomamakansky; 6 – Akitkano-Jerbinsky; 7 – Alekano-Malotuyukansky; 8 – Tonodsky; 9 – Chuysky; 10 – Abchadsky; 11 – Nechersky; 12 – Zhuinsky; 13 – Khaivergino-Kevaktinsky; 14 – Yazovsky; 15 – Chuisko-Nechersky

Ранний рифей

К раннерифейским отложениям Байкало-Патомской складчатой области относят тепторгинскую серию, включающую в себя пурпольскую и медвежевскую свиты. Согласно [1], в рифейский этап выделяются две мегазоны: внешняя палеошельфовая Байкало-Патомская и внутренняя Байкало- и Баргузино-Витимская.

Начало рифейского этапа формирования патомского нагорья знаменуется пурпольским временем. В это время во внешней зоне формировались осадки каолинит-кварцевого типа при переотложении раннепротерозойских кор выветривания в условиях плавного прогибания пассивной континентальной окраины [1, 2]. Считается, что именно в пурпольское время был заложен шельфовый морской бассейн [45]. Осадконакопление также контролировалось двумя разломами – с востока и юго-востока по-прежнему Жуинским, с запада и северо-запада уже Аkitкано-Джербинским [45].

Пурпольские отложения хорошо изучены в пределах Чуйско-Нечерского антиклинория, в Тонодском и Нечерском выступях фундамента. В целом пурпольским отложениям свойственны одни и те же фациальные признаки: по мере удаления от разломов фундамента увеличивается степень грубозерности отложений свиты и появляются косо-слоистые текстуры. Поскольку указанные фациальные особенности проявлены по всему разрезу свиты, считается, что береговая линия имела в пурпольское время стабильное положение.

Медвежевское время характеризуется как начальнорифтогенный этап развития региона и сопряжено с разрушением раннепротерозойского основания и заложением Олокит-Бодайбинского рифта (рис. 2). Считается, что этот этап служит продолжением Уджинско-Витимского рифта [47]. Олоkitская зона в современном виде представляет собой сильно сжатый рифейский рифтогенный трог, сложенный вулканогенно-терригенными толщами со стратиформным медно-цинковым колчеданным оруденением, продолжающийся в северо-восточном направлении под осевую часть Бодайбинского прогиба [47].

В три этапа была сформирована система грабенов, разделенных между собой горстами, поставляющими в грабены грубообломочный материал [45]. Грабены первых двух этапов имели субмеридиональную ориентировку, а третьего этапа – северо-восточную. В них формировалась непосредственно медвежевская свита – преимущественно конгломератовая, с повышенным содержанием железа, в некоторых участках в ее строении участвуют вулканогенные образования, по [48] представленные субаквальными эффузивами основного состава. Рифтогенез сопровождался внедрением интрузий перидотит-базальтового состава [1]. Накопление свиты осу-

ществлялось в условиях обширного континентального морского бассейна, береговые линии контролировались аналогично пурпольскому времени Актано-Джербинским и Жуинским разломами.

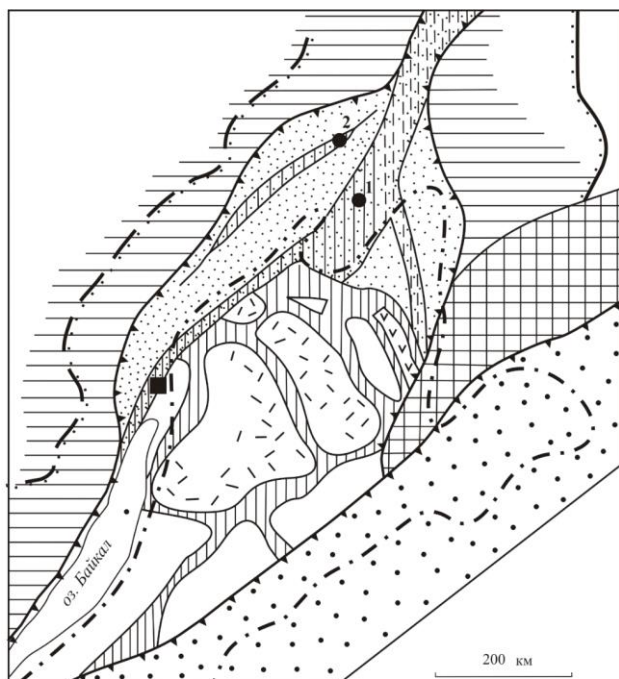


Рис. 2. Схема расположения палеорифтов в структуре Байкало-Патомской складчатой области [1, 46]: 1 – рифейский эпикратонный прогиб; 2 – Олоkit-Бодайбино-Вилу́йский палеорифт; 3 – палеорифты с андезит-базальтовым вулканизмом (а) и базит-ультрабазитовым магматизмом (б); 4 – реликтовые блоки фундаментов микроконтинентов с вулканидами андезит-дацит-плагиоориолитового (а) и основного (б) состава; 5 – граница Ангаро-Витимского ареал-плутона

Fig. 2. Location scheme of palaeorifts in the structure of the Baikal-Patom fold belt [1, 46]: 1 – Riphean epicratonic trough; 2 – Olokit-Bodaibo-Vilyuy paleorift; 3 – paleorifts with andesite-basalt volcanism (a) and basic-ultrabasic magmatism (b); 4 – relict blocks of microcontinent basement with andesite-dacite-plagiogiorite (a) and basic (b) volcanites; 5 – boundary of the Angaro-Vitim areal-pluton

Рифтогенное грабенообразование было проявлено в северной и частично в северо-западной частях морского бассейна. Области грабенообразования и не затронутые участки разделялись разломами, параллельными тем, что контролируют береговые линии морского бассейна. Аномально высокое содержание железа, проявленного в виде железистых кварцитов и хлорита, связывается по [2] с подводной вулканической деятельностью, сопутствующей

рифтогенным процессам: железо поступало в бассейн осадконакопления в растворе или в виде коллоидных соединений оксидов и гидроксидов.

Завершается рифтогенный этап магматической активизацией с внедрением основных, средних и кислых интрузий: в зонах пересечений магмоподводящих разломов земной коры формировались дайки и силлоподобные интрузии базитов чайского комплекса. Возраст метасоматических изменений пород медвежьей свиты составляет 1300 млн лет (Rb-Sr метод, [45]). Считается, именно в это время завершились активные магматические процессы в рифтингах во внешней палеошельфовой зоне [1]. На основании этих данных также обосновывается и возраст тепторгинской серии: нижняя ее возрастная граница обоснована несогласным залеганием пурпольской свиты на фундаменте платформы, а верхняя – по датировке метасоматических процессов.

Средний рифей

В среднем рифее Байкало-Патомская область развивается по типу пассивной континентальной окраины с контролирующими ее Ленско-Ньюйским сбросом и Чарским сбросо-сдвигом, которые осложнялись трансформноподобными разломами [45]. В качестве конседиментационной структуры развивается Жуинский разлом. Отложения среднего рифея наследуют зональность, свойственную пурпольскому времени: от шельфовой обстановки во внешней зоне до обстановки континентального склона во внутренней, положение береговой линии существенно не изменялось. Существовала отчетливая тенденция к стабилизации тектонического режима, что выразилось в увеличении со временем доли осадков карбонатного состава.

В первой половине среднего рифея в Байкало-Патомской зоне осуществлялось накопление отложений балаганхской серии, включающей в себя хорлухатскую, хайвергинскую, бугарихтинскую и бодайбокскую свиты. Во второй половине накапливалась часть дальнетайгинской серии, включая бужуихтинскую и угоханскую свиты. Осадконакопление осуществлялось в спокойной геодинамической обстановке. Отложения балаганхской серии и нижних свит дальнетайгинской серии характеризуются литофильной специализацией, содержание редких элементов близко к кларковым. Хотя отмечается наличие ореолов сидерофильной специализации над троговыми структурами, особенно над участками медвежьей основной магматизма, что может свидетельствовать о гидротермальной деятельности в первой половине среднего рифея [48]. Впрочем, большинством исследователей полагается полное отсутствие эндогенных процессов во всей окраинноконтинентальной системе в течение среднего рифея [1, 2, 45].

Балаганахские отложения в основном представлены низкозрелыми, слабодифференцированными аркозовыми, поли- и олигомиктовыми песчаниками, с незначительными прослоями углистых сланцев. Бужуихтинская и угоханская свиты представлены полевошпат-кварцевыми песчаниками с незначительными прослоями филлитовых сланцев и мелкозернистыми биохомогенными известняками.

Байкало-Витимскую и Байкало-Патомскую мегазоны можно рассматривать как единую геодинамическую окраинноконтинентальную систему [1]. Г.Л. Митрофановым была выявлена синхронность накопления известково-щелочной «островодужной» плагиоориолит-базальтовой и кремнисто-вулканогенной формаций внутренней зоны и балаганахской серии внешней зоны. Единство системы также косвенно подтверждается возрастанием доли пород карбонатного состава вверх по разрезу среднего рифея в обеих зонах.

Поздний рифей

Позднерифейский этап является завершающим в становлении континентально-окраинного бассейна осадконакопления. Развитие региона в течение позднего рифея происходило в обстановке растяжения. Согласно [1], в конце среднего рифея произошло заложение рифтингов в Байкало-Витимской зоне с образованием океанической коры. Несомненно, столь значительное геодинамическое событие не проявилось локально лишь в Байкало-Витимской зоне и затронуло всю окраинноконтинентальную систему. На фоне интенсивного рифтинового магматизма произошла активизация Олоkit-Бодайбинского палеорифта, развитого в основании эпикратонного прогиба. Индикаторами тектономагматической активизации являются метабазаиты нюрндканской толщи (1035±97 млн лет, [1]) во внутренней зоне и лерцолиты доросского комплекса во внешней зоне (1055±69 млн лет, [45]). Благодаря активизации рифтингов, во внешней зоне произошло усиление прогибания перикратонной области, что выразилось в трансгрессии моря вглубь континента. Согласно [45], на этапе накопления хомолхинской свиты, Сибирская платформа была практически полностью покрыта морем, осадконакопление происходило в условиях, аналогичных среднерифейскому времени.

К породам позднего рифея относят хомолхинскую и имняхскую свиты дальнетайгинской серии и ранние отложения жуинской серии в составе аунakitской и частично вачской свит.

Время накопления хомолхинской свиты палеошельфово́й зоны и ее аналогов соответствует времени раскрытия рифтингов внутренней зоны Байкало-Патомской складчатой области на фоне подновления Олоkit-Бодайбинского палеорифта.

Основным доводом в пользу общей активизации древнего рифта в основании прогиба в начале позднего рифея, помимо описанных выше интрузивных комплексов, являются повсеместно фиксируемые результаты гидротермальной деятельности, которая привела к формированию осадков с различной металлогенической специализацией, накапливавшихся в условиях спрединга дна морского бассейна [1–3, 45, 46, 48]. Формирование металлогенически специализированных осадков, обусловленных циркуляцией гидротерм по активным разломам фундамента в условиях спрединга дна, описывается гипотезой, вкратце приведенной в [46]. Морские воды, проникая по активным разломам фундамента в нижние горизонты земной коры и нагреваясь по мере углубления, вступают в реакцию с породами, содержащими рудные компоненты. В результате формировались насыщенные гидротермальные растворы, транспортирующие эти компоненты к поверхности дна бассейна. Наиболее крупными активными позднерифейскими разломами являлись Ленско-Нюйский, Чарский, Аkitкано-Джербинский, Жуинский, Чуйский и Абчадский, контролировавшие в том числе зоны резких фациальных переходов [2].

Геохимическими данными подтверждается, что в составе верхнерифейских отложений выделяется терригенный материал, сносимый с Сибирского кратона, а также вулканогенный материал, поступающий в связи вулканизмом спрединга дна бассейна осадконакопления [48]. Геохимические особенности, подобные отложениям хомолхинского времени, свойственны и свитам жуинской серии, что гласит о функционировании рифтовых систем на протяжении всего позднего рифея [48].

Таким образом, основным признаком позднерифейских отложений является переход от литофильной к сидерохалькофильной специализации осадков. В данной работе полагается, что две нижние свиты дальнетайгинского горизонта, бужуихтинская и угоханская, накапливались в среднем рифее ввиду их литофильной специализации и отсутствия признаков вулканической и гидротермальной деятельности, свойственных для верхнерифейских отложений. Время начала накопления осадков хомолхинской свиты, соответственно, составляет порядка 1000 млн лет, при этом, в соответствии с исследованием [49], полагается длительный период их накопления, вплоть до 300 млн лет.

Позднерифейский рифтогенез являлся ключевым фактором формирования многих месторождений Байкало-Патомской складчатой области. Так, в Мамско-Бодайбинской зоне осуществлялось накопление углеродистых толщ с повышенным содержанием золота и ЭПГ, которые вмещают большинство известных там благороднометалль-

ных месторождений (рис. 3). В Олоkitской зоне была проявлена свинцово-цинковая первично-осадочная минерализация с изотопным возрастом 740–760 млн лет [46]. Ярким примером месторождения с подобным типом оруденения является Холоднинское полиметаллическое месторождение [47, 50].

Одновременно с накоплением на уровне чехла специализированных углеродистых осадочных толщ на уровне фундамента в интенсивно тектонизированных зонах формировались металлоносные метасоматиты [46]. Об этом гласят изотопные датировки руд месторождений, развитых в отложениях нижнепротерозойского фундамента как в Байкало-Муйской зоне, так и в Чуйско-Нечерском антиклинории.

Так, в Байкало-Муйской зоне на Ирокиндинском месторождении фиксируется этап развития на

рубеже 950–700 млн лет, а на Каралонском, Уряхском и Чипчиконском – 1000, 900–700 млн лет [46]. В Тонодском поднятии в качестве примера можно привести месторождение Чертово Корыто с модельным возрастом свинца 1050–700 млн лет [46]. Месторождение контролируется глубинным разломом фундамента, вблизи которого произошло рифейское омоложение гранитов Амандракского комплекса, что также говорит о влиянии гидротерм на данном этапе развития региона.

Заложение системы рифтов в Байкало-Муйской зоне с последующим спредингом дна бассейна являлось начальным этапом цикла Вильсона и привело к образованию океанической коры (рис. 4) [51]. На этом этапе формировался молодой океан. В дальнейшем, на рубеже 950–90 млн лет, начинаются процессы субдукции океанической плиты под окраину Сибирского кратона [52].

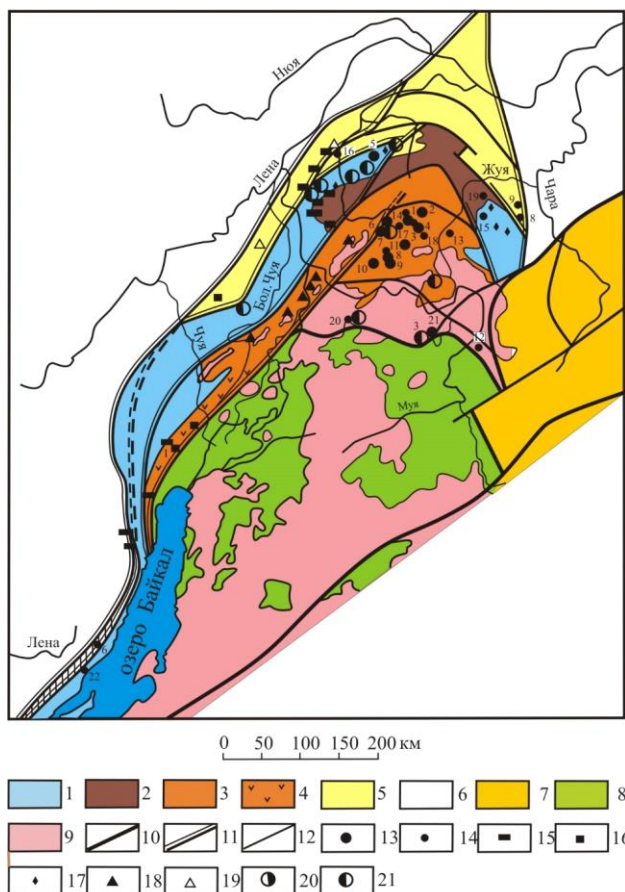


Рис. 3. Схема расположения рудных месторождений в окраинно-континентальной мегазоне [2, 46]: 1, 2 – выступы раннедокембрийского фундамента (1) и зоны перекрытия фундамента отложениями мезо-, неопротерозоя (2); 3, 4 – Мамско-Бодайбинская (3) и Олоkitская (4) структурно-фациальные зоны Мамско-Бодайбинского блока; 5 – Байкало-Патомский блок; 6 – чехол Сибирской платформы; 7 – раннедокембрийские образования Алданского щита; 8 – образования Байкало-Муйской мегазоны; 9 – палеозойские гранитоиды; 10–12 – разломы межблоковые (10), внутриблоковые (11) и консолидационные (12); 13 – месторождения золота: Сухой Лог (1), Высочайшее (2), Вернинское (3), Невское (4), Чертово Корыто (5), Ожерелье (6), Ыканское (7), Копыловское (8), Кавказ (9), Догалдынская жила (10); 14 – рудопоявления золота: Красное (11), Уряхское (12), Светловское (13), Верхне-Угоханское (14), Ходоканское (15), Гольцовое (16), Ровнинское (17), Атырканское (18), Балаганакское (19), Додыхтинское (20), Чаяндринское (21); 15–21 – месторождения и рудопоявления: железистых кварцитов (15), свинцово-цинковые (16), урана (17), мусковита (18), магнезита (19), олова (20), вольфрама (21)

Fig. 3. Scheme of ore deposits location in the marginal continental megazone [2, 46]: 1, 2 – protrusions of Early Precambrian basement (1) and zones of basement overlapping with Meso- and Neoproterozoic sediments (2); 3, 4 – Mama-Bodaibo (3) and Olokit (4) structural-facial zones of Mama-Bodaibo block; 5 – Baikal-Patom block; 6 – Siberian Platform cover; 7 – Early Precambrian formations of the Aldan Shield; 8 – Baikal-Muya megazone formations; 9 – Paleozoic granitoids; 10–12 – interblock (10), intra-block (11) and considerable (12) faults; 13 – gold deposits: Sukhoy Log (1), Vysochayshee (2), Verninskoe (3), Nevskoe (4), Chertovo Koryto (5), Ozherye (6), Ykansko (7), Kopylovskoe (8), Kavkaz (9), Dogaldynskaya vein (10), 14 – gold ore occurrences: Krasnoe (11), Uryakhsko (12), Svetlovskoe (13), Verkhne-Ugokhanskoe (14), Khodokanskoe (15), Goltsovo (16), Rovninskoe (17), Atyrkanskoe (18), Balaganakhskoe (19), Dodykhtinskoe (20), Chayandrinskoe (21); 15–21 – deposits and ore occurrences: ferruginous quartzites (15), lead-zinc (16), uranium (17), muscovite (18), magnesite (19), tin (20), tungsten (21)

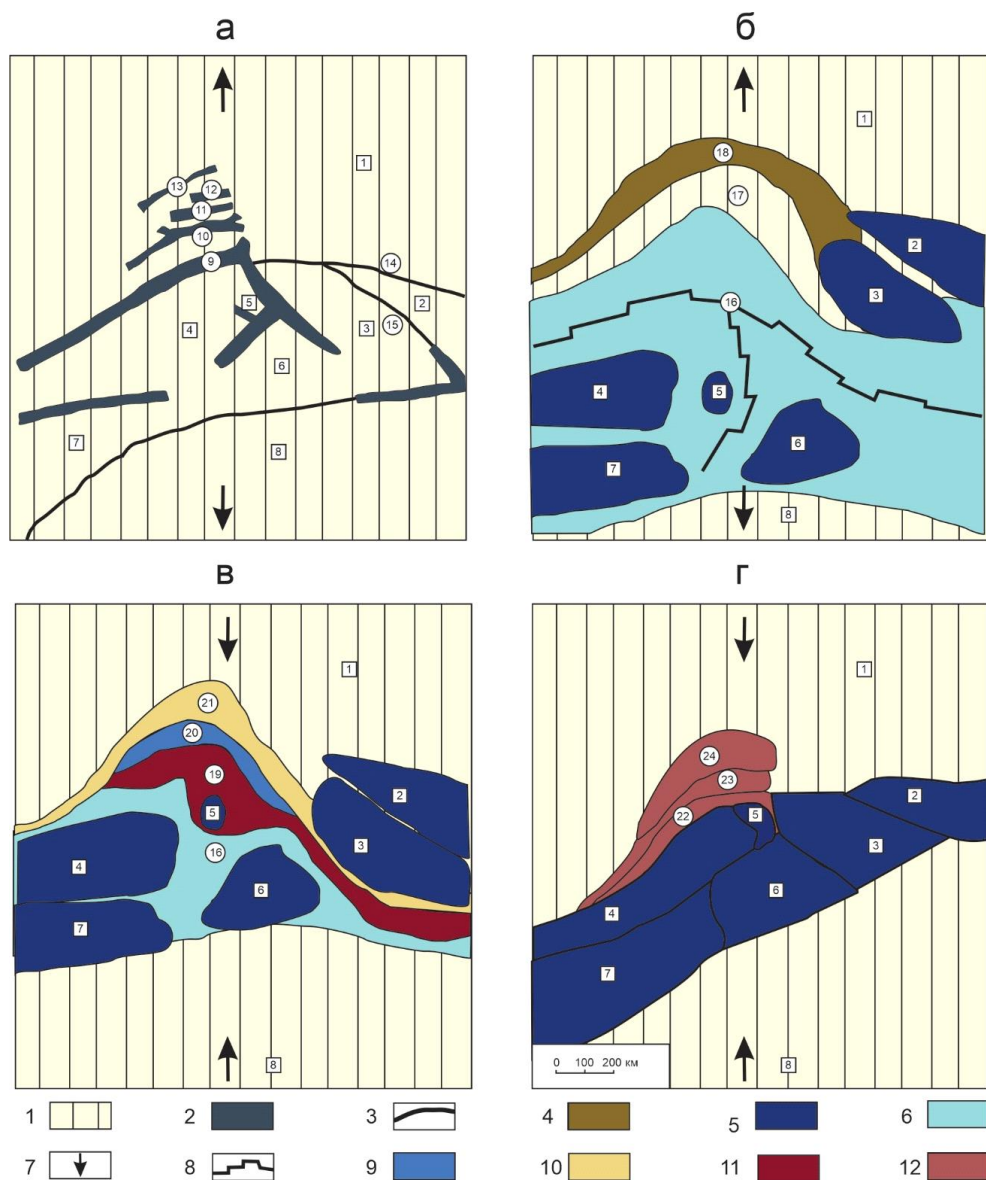


Рис. 4. Палеогеодинамические схемы этапов развития Байкало-Витимского пояса в протерозое: а) континентального рифтогенеза, б) молодого океана, в) зрелого океана, г) континентальной коллизии [51]: 1 – континенты; 2 – континентальные рифты; 3 – разломы; 4 – шельф пассивной окраины континента; 5 – микроконтиненты; 6 – океанический бассейн; 7 – направление движения литосферных плит; 8 – срединно-океанический хребет; 9 – глубоководная котловина; 10 – шельф; 11 – система островных дуг; 12 – коллизионные зоны. Цифры в квадратах – континенты и микроконтиненты, блоки: 1 – Сибирский, 2 – Становой, 3 – Каларо-Могочинский, 4 – Баргузино-Витимский, 5 – Муйский, 6 – Читинский, 7 – Хилокский, 8 – Тувино-Монгольский; цифры в кругах: 9–15 – континентальные рифты и разломы: 9 – Байкало-Витимский, 10 – Южно-Бодайбинский, 11 – Маракано-Тунгусский, 12 – Хомолхинский, 13 – Язовско-Саталахский, 14 – Становой, 15 – Джелтулакский; 16 – Байкало-Витимский океанический бассейн; 17, 18 – шельфы пассивной окраины континента: 17 – Бодайбинско-Удоканский, 18 – Чуйско-Узуйский; 19 – вулканические островные дуги; 20 – Делюн-Уранский задуговой бассейн; 21 – Бодайбинский шельф окраинного моря; 22–24 – коллизионные зоны: 22 – Байкало-Витимская, 23 – Мамско-Бодайбинская, 24 – Чуйско-Нечерская

Fig. 4. Paleogeodynamic schemes of the stages of the Baikal-Vitim fold belt development in the Proterozoic: а) continental riftogenesis, б) young ocean, в) mature ocean, г) continental collision [51]: 1 – continents; 2 – continental rifts; 3 – faults; 4 – shelf of passive continental margin; 5 – microcontinents; 6 – ocean basin; 7 – direction of lithospheric plates movement; 8 – mid-ocean ridge; 9 – deep-water basin; 10 – shelf; 11 – system of island arcs; 12 – collision zones. Figures in squares – continents and microcontinents, blocks: 1 – Siberian, 2 – Stanovoy, 3 – Kalaro-Mogocha, 4 – Barguzino-Vitim, 5 – Muya, 6 – Chita, 7 – Khilok, 8 – Tuva-Mongolian; figures in circles: 9–15 – continental rifts and faults: 9 – Baikal-Vitim, 10 – South-Bodaibo, 11 – Marakano-Tungusky, 12 – Khomolkho, 13 – Yazovsko-Satalakh, 14 – Stanovoy, 15 – Jeltulak, 16 – Baikal-Vitim ocean basin; 17, 18 – shelves of the passive continental margin: 17 – Bodaybo-Udoka, 18 – Chuya-Uguy; 19 – volcanic island arcs; 20 – Delun-Uranian beyond arc basin, 21 – Bodaybo marginal sea shelf, 22–24 – collision zones: 22 – Baikal-Vitim, 23 – Mama-Bodaibo, 24 – Chuya-Nechera

Молодой океан переходит в стадию зрелого, достигая максимальной глубины. Образуется система островных дуг и отколотых от Сибирского кратона микроконтинентов. Бассейн из шельфового постепенно переходит в задуговой, несущий название Делюн-Уранского задугового бассейна, спрединг дна бассейна продолжается.

На рубеже 740 млн лет происходит аккреция островных дуг к Сибирскому кратону, что приводит к кратковременной смене тектонического режима. На уровне фундамента в связи со сменой тектонического режима происходило формирование взбросо-сдвиговых деформаций, фиксируемых гранитоидами Язовского комплекса с возрастом 740 ± 20 млн лет [45]. К этому времени на уровне чехла отложения хомолхинской свиты, перекрытые карбонатными отложениями имнянской свиты, испытывали процессы катагенеза, а также складчатые деформации 1 этапа, выраженные в субгоризонтальных смещениях вдоль границ пластов [47].

Венд-ранний палеозой

К вендским образованиям Байкало-Патомской складчатой области относят поздние отложения жуинского горизонта, включающие в себя вачскую, анангскую и догалдынскую свиты, а также илигирскую свиту юдомского горизонта.

Дальнейшее развитие региона в венде было обусловлено завершением цикла Вильсона и переходом к коллизионной обстановке. Сибирский кратон с уже аккретивировавшей к нему системой островных дуг испытывал столкновения с рядом отколотых ранее микроконтинентов [51]. Окраинно-континентальный режим развития региона завершился, задуговый бассейн перешел к бассейну форланда, ограниченному орогеном с юга. Считается, что формирование орогена было завершено в анангское время. Полностью сформированный ороген стал новым поставщиком терригенного материала, при этом слагались грубообломочные полимиктовые молассовые толщи анангской и догалдынской свит. На этом этапе перекрытой оказалась и аунакитская свита – следующий после хомолхинской свиты геохимически специализированный горизонт, что способствовало катагенетическим преобразованиям его отложений.

На поздних этапах аккреции и коллизии микроконтинентов с окраиной Сибирского кратона рифей-вендские отложения испытали региональный метаморфизм и главную фазу линейного складкообразования.

В результате проявления главного этапа складчатости Байкало-Патомская область была разделена на структурные формы первого порядка. К ним относятся Мамско-Бодайбинский и Байкало-Патомский синклиналии, разделенные Чуйско-Нечерским антиклинорием (рис. 5).

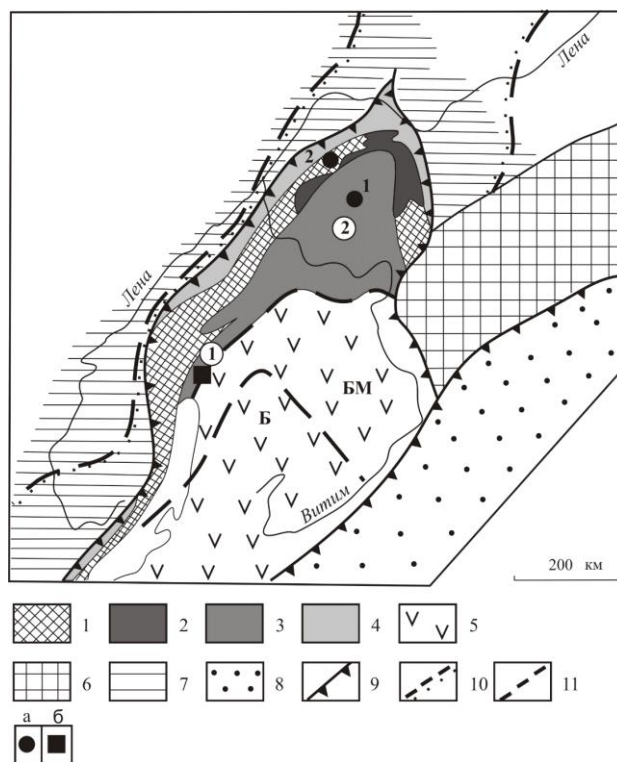


Рис. 5. Современная тектоническая схема Байкало-Патомской складчатой области [1, 46]: 1–4 – структуры окраинно-континентальной мегазоны: выступы раннедокембрийского фундамента (1) и зоны перекрытия фундамента отложениями рифея (2) в Чуйско-Нечерском антиклинории; Мамско-Бодайбинский блок (3); Байкало-Патомский блок (4); 5 – Байкало-Муйская мегазона (БМ) и Баргузинский докембрийский террейн (Б); 6 – раннедокембрийские образования Алданского щита; 7 – чехол Сибирской платформы; 8 – становая складчатая область; 9–11 – границы: складчатых областей (9), рифейской трансгрессии (10), мегазон (11); 12 – месторождения: золоторудные (а) – Сухой Лог (1) и Чертово Корыто (2); Холоднинское свинцово-цинковое (б). Цифры в кружках: 1 – Олоkitская и 2 – Мамско-Бодайбинская структурно-фациальные зоны Мамско-Бодайбинского блока

Fig. 5. Modern tectonic scheme of the Baikal-Patom fold belt [1, 46]: 1–4 – structures of the marginal continental megazone: Early Precambrian basement ledges (1) and zones of basement overlap with Riphean sediments (2) in the Chuya-Nechera anticlinorium; Mama-Bodaibo block (3); Baikal-Patom block (4); 5 – Baikal-Muysk megazone (BM) and Barguzin Precambrian terrane (B); 6 – Early Precambrian formations of the Aldan Shield; 7 – Siberian Platform cover; 8 – Stanovoy fold belt; 9–11 – boundaries of: folded regions (9), Riphean transgression (10), megazones (11); 12 – deposits: gold deposits (a) – Sukhoy Log (1) and Chertovo Koryto (2); Kholodninskoe lead-zinc deposit (b). Figures in circles: 1 – Olokit and 2 – Mama-Bodaibo structural-facial zones of the Mama-Bodaibo block

По структурам второго порядка развиты зоны смятия, для которых характерны интенсивная складчатость более высоких порядков, плейчатость, надвиги. Складчатость высоких порядков главного этапа относится к числу рудоконтролирующих факторов [17, 35, 36]. Наиболее ярко структурный контроль проявлен на месторождениях Кропоткинского рудного узла. В частности, Сухоложской антиклиналью – пликативной структурой третьего порядка, контролируется одноименное с ней месторождение.

С главной фазой складчатости связан региональный метаморфизм, проявленный на большей части Бодайбинского рудного района в зеленосланцевой фации [47]. Возраст метаморфизма исследователями оценивается по-разному. И.К. Рундквист оценивает возраст регионально-метаморфических преобразований в 520–570 млн лет [47]. В работе [53] приводится возраст метаморфизма рифейских толщ в диапазоне от 510 до 570 млн лет. Заметим, что большинство исследователей оценивает возраст пика метаморфических преобразований рифейских осадочных пород как середину венда. В работах [35, 54] катагенез отложений хомолхинской свиты датируется возрастом 630 млн лет, а их региональный метаморфизм – 570 млн лет.

Средний-поздний палеозой

Дальнейшее развитие региона в металлогеническом аспекте происходило в условиях активизации Забайкальского плюма [46]. Г.Л. Митрофанов считает, что в каледонский этап тектономагматической активизации плюм проявился дважды [1].

В первый раз палеозойский плюм был проявлен в Прибайкалье, в пределах Байкало-Витимской и Баргузино-Витимской зон, на границе верхнего кембрия и ордовика, существенно не затронув Бодайбинский прогиб. Возрастными индикаторами считаются внедренные вдоль Приморского разлома интрузии габбро-диорит-гранитовой серии (возрастом 535 ± 25 млн лет) и интенсивный метаморфизм с возрастом 520–530 млн лет. При этом в этих зонах формировались крупные сводовые поднятия. Второй раз плюм был проявлен в области сводового поднятия между Джида-Витимским и Абчадским глубинными разломами внедрением интрузий габбро-сиенитовой, габброидной или щелочной формации [1]. Возрастным индикатором выступают нефелиносодержащие габброидные интрузии итакитского комплекса, имеющие возраст 450–460 млн лет. В работе [55] возраст становления интрузий сынырского комплекса в бортах рифтовых систем, свидетельствующих о проявлении Ангаро-Витимского плутона, соответствует интервалу 300–285 млн лет, то есть сопоставляется с герцинским этапом ТМА [56].

В Бодайбинском районе в ареале воздействия плюма проявился магнезиально-железистый и углеродистый метасоматизм регионального характера [1]. Еще два этапа формирования золотого оруденения, связанные с гидротермально-метасоматическими процессами, датируются 447 ± 6 и 321 ± 14 млн лет [37, 38, 57].

Геолого-тектоническая обстановка и характеристика месторождения Сухой Лог

Месторождение Сухой Лог входит в состав Кропоткинского рудного узла Бодайбинского (ранее Ленского) золоторудного района (рис. 6). Бодайбинский район в геотектоническом отношении приурочен к структуре первого порядка – Бодайбинскому синклинию в составе Байкало-Патомской складчатой области. Структуры второго порядка синклиния контролируют локализацию рудных узлов. Так, Кропоткинский рудный узел, включающий месторождение Сухой Лог, контролируется Маракано-Тунгусской синклиналью.



Рис. 6. Географическое положение Бодайбинского золоторудного района [58]

Fig. 6. Geographical location of the Bodaibo gold bearing district [58]

Стратиграфические подразделения на территории месторождения представлены имняхской и хомолхинской свитами дальнетайгинской серии и аунакитской свитой жуинской серии (рис. 7). Рудовмещающей является хомолхинская свита, перекрывающей – имняхская, отложения аунакитской свиты распространены незначительно. Имняхская свита разделена на две подсвиты: нижняя (im1) и верхняя (im2). Im1 представлена карбонатно-терригенными породами, im2 – карбонатами с тонкими прослоями сланцев. Хомолхинская свита разделена на три подсвиты: верхняя (hm3), к которой приурочено оруденение, средняя (hm2) и нижняя (hm1). Hm3 и hm1 представлены от темно-серых до черных тонкослоистыми металавролитами и угле-

родистыми сланцами. Их слоистая текстура представлена чередованием очень тонких слоев алевролитов и сланцев с дисперсными включениями темного ила [45]. Нм2 представлена серыми известняками с прослоями алевролитов и является подстилающей. Нм3 дополнительно подразделяется на пять пачек (рис. 8). На территории месторождения распространены отложения только нижней подсвиты аунакитской свиты (ау1), представленной чередованием тонких слоев серых кварцевых песчаников, углеродистых алевролитов и сланцев.

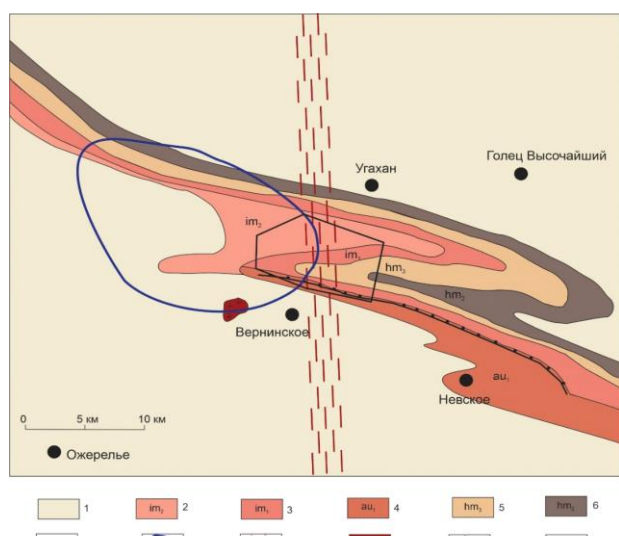


Рис. 7. Геолого-тектоническая схема Кропоткинского рудного узла: 1 – Рифей – вендские отложения, нерасчлененные; 2–6 – отложения в составе Маракано-Тунгусской синклинали, составляющие месторождение Сухой Лог: 2 – имняхская свита, верхняя подсвита; 3 – имняхская свита, нижняя подсвита; 4 – аунакитская свита, нижняя подсвита; 5 – хомолхинская свита, верхняя подсвита; 6 – хомолхинская свита, средняя подсвита; 7 – зоны надвигов; 8 – контур Угаханского минимума; 9 – региональная зона трещиноватости; 10 – Константиновский массив; 11 – контур территории месторождения Сухой Лог; 12 – положение месторождений сухоложского типа

Fig. 7. Geological and tectonic scheme of the Kropotkin ore cluster: 1 – poorly defined Riphean-Vendian sediments; 2–6 – sediments within the Marakano-Tunguska syncline, composing the Sukhoy Log deposit: 2 – Imnyakh Formation, upper sub-formation; 3 – Imnyakh Formation, lower sub-formation; 4 – Aunakit Formation, lower sub-formation; 5 – Khomolkho Formation, upper sub-formation; 6 – Khomolkho Formation, middle sub-formation; 7 – thrust zones; 8 – outline of the Ugahan low; 9 – regional fracture zone; 10 – Konstantinovsk intrusive body; 11 – outline of the territory of the Sukhoy Log deposit; 12 – location of the Sukhoy Log type deposits

Интрузивные образования вблизи месторождения представлены единственным Константиновским гранитоидным массивом, расположенным в 6 км юго-западнее месторождения. Массив расположен в краевой южной части Угаханского минимума, выделяемого в гравитационном поле двухсоттысячного масштаба. Данный минимум образован одноименным интрузивным телом (Угаханским плутоном) с параметрами примерно 10×14 км, с кровлей залегающей на глубине порядка 3 км [33]. Как отмечается этими же авторами, Константиновский массив является не апикалью более крупного Угаханского, а автономным силлом с подводящими каналами, по которым магматический материал поступал из того же, что и для Угаханского, очага. С силлом сопряжен дайковый пояс гранитоидов субширотного простирания, расположенный севернее от него. Породы осадочного чехла в области внедрения силла контактово метаморфизованы, что выразилось в их ороговикании с выделением сульфидов, в том числе пирротина, а также оксидов железа. Возраст массива U-Pb методом по циркону и сфену составляет 650–530 и 270–310 млн лет соответственно [47]. Более современные геохронологические исследования циркона [59] подтвердили верхнекаменноугольный возраст формирования массива (303 ± 3 млн лет), что позволяет сделать вывод о единовременности формирования Угаханского плутона, Константиновского силла и Ангаро-Витимского батолита [56]. Месторождение приурочено к краевой юго-восточной части плутона.

Вмещающие и перекрывающие породы регионально метаморфизованы в хлорит-серицитовый субфации фации зеленых сланцев.

Породы хомолхинской свиты обогащены органическим веществом, благодаря чему приобрели свое название – углистые (черные) сланцы. Обилие органического вещества обусловлено жизнедеятельностью простейших морских организмов, принадлежащих к биоценозу сульфидредуцирующих бактерий [16]. Учитывая приобретенную осадками металлогеническую специализацию, некоторыми исследователями [16] предполагается прямая корреляционная связь между содержанием золота и Сорг. Другими исследователями [17] такая связь отрицается.

Основной структурой месторождения является сухоложская антиклиналь – положительная пликативная структура 3 порядка, асимметричная и опрокинутая на юг, характеризующаяся значительной степенью тектонической переработки (рис. 8). Месторождение приурочено к области ее периклинального замыкания, основное рудное тело локализовано в области пересечения шарнира с осевой плоскостью складки.

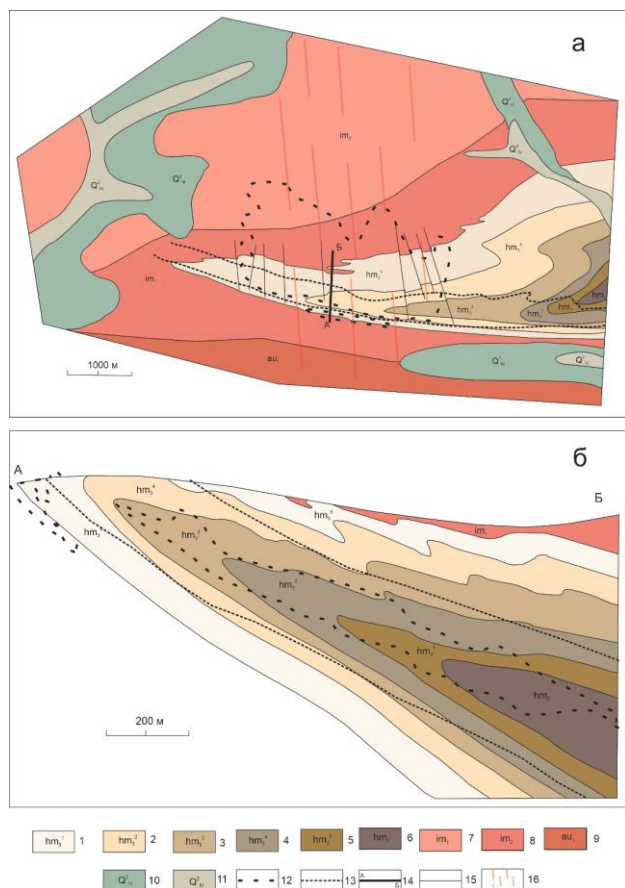


Рис. 8. Схематические геологическая карта (а) и разрез (б) месторождения Сухой Лог [17, 60–62, с дополнениями]: 1–5 – хомолхинская свита, верхняя подсвита: 1 – пятая пачка (алевритистые сланцы с прослоями мелкозернистых песчаников); 2 – четвертая пачка (переслаивание филлитов и алевролитов); 3 – третья пачка (алевритистые сланцы с прослоями известковых песчаников); 4 – вторая пачка (тонкослоистые филлиты); 5 – первая пачка (филлиты, известковые и углеродистые сланцы); 6 – хомолхинская свита, средняя подсвита; 7 – имняхская свита, верхняя подсвита; 8 – имняхская свита, нижняя подсвита; 9 – аунакитская свита, нижняя подсвита; 10, 11 – современные аллювиальные отложения: 10 – аллювий высокой и низкой пойм и озерно-болотные отложения; 11 – аллювий надпойменных террас; 12 – контуры пологопадающей рудной залежи; 13 – границы зоны расланцевания; 14 – линия разреза; 15 – разрывные нарушения; 16 – региональная зона трещиноватости

Fig. 8. Schematic geological map (a) and section (b) of the Sukhoy Log deposit [17, 60–62, with additions]: 1–5 – Khomolkho Formation, upper sub-formation: 1 – fifth pack (silty shale with interlayers of fine-grained sandstones); 2 – fourth pack (interbedded phyllites and siltstones); 3 – third pack (silty shale with interlayers of calcareous sandstones); 4 – second pack (thinly layered phyllites); 5 – first pack (phyllites, calcareous and carbonaceous shales); 6 – Khomolkho Formation, middle sub-formation; 7 – Imnyakh Formation, upper sub-formation; 8 – Imnyakh Formation, lower sub-formation; 9 – Aunakit Formation, lower sub-formation; 10, 11 – modern alluvial deposits: 10 – alluvium of high and low floodplains and lake-marsh sediments; 11 – alluvium of floodplain terraces; 12 – contours of the canopy ore deposit; 13 – boundaries of the stratification zone; 14 – section line; 15 – faults; 16 – regional fracture zone

Осевая плоскость складки падает в северном направлении под углом от 25° до 30° . Падение лежащего (подвернутого) крыла складки изменчиво: от 35° в западной части до 50° в восточной. Висячее крыло падает под углами от 10° до 15° . Шарнир складки погружается в северо-западном направлении под углами 0° – 15° [63]. Вдоль подвернутого крыла антиклинали отмечается взбросо-надвиговая зона субширотного простирания. Осевая плоскость осложнена зоной смятия, которой свойственны кливаж, сланцеватость, будинаж-структуры и мелкая складчатость.

Антиклиналь пересекает субмеридиональная зона трещиноватости, расположенная в пределах зоны разрывных нарушений над скрытым разломом фундамента [60]. Вдоль всей минерализованной зоны выделяется система секущих осевую плоскость диагональных разломов. Отмечается контроль поперечных деформаций антиклинали данной системой нарушений: на уровне денудаци-

онного среза отчетливо наблюдаются изгибы оси складки.

Как отмечается многими исследователями [2, 17, 35] на месторождении проявлен отчетливый структурный контроль оруденения. Он заключается в развитии наиболее интенсивно проявленной кварц-карбонатно-золотосульфидной минерализации преимущественно гнездово-прожилкового и прожилкового типа в области пересечения зоны смятия, ориентированной вдоль осевой плоскости антиклинали, и субмеридиональной зоны разрывных нарушений.

На месторождении проявлена наложенная гидротермально-метасоматическая минерализация, выраженная в замещении и перераспределении кварца, пирита и карбонатов [17, 35, 36].

Одной из важных характерных особенностей локализации золотого оруденения на месторождении является его приуроченность к метасоматизированным породам. При анализе взаимоотношений

метасоматических минеральных ассоциаций было выделено два этапа березетоидного метасоматизма: натриевой и калиевой направленности [17]. Первый этап, наложенный на регионально-метаморфизованные породы, происходил с образованием натриевых слюд (преимущественно парагонит) и магнезиально-железистых карбонатов. Как считают авторы, в данный этап кварц-сульфидная минерализация не образовывалась, что расходится с результатами исследований [38, 53, 57]. Второй этап накладывался на первый, что выразилось как в полном замещении натриевых слюд мусковитом, так и в формировании их ассоциаций. Помимо слюд также образовывались магнезиально-железистые карбонаты и кварц-сульфидная золотоносная минерализация. По мнению других исследователей, оруденение было сформировано за один золоторудный этап, в рамках которого, тем не менее, выделяется несколько генераций минералов без существенных перерывов, а отложение золота происходило непрерывно в течение всего этапа [35]. Натриевые слюды, по их мнению, являются диагенетическими или метаморфогенными, а образование калиевых слюд происходило в золоторудную стадию.

Оруденение связано с проявлениями кварц-карбонат-сульфидной наложенной минерализации в форме жил, прожилков и вкрапленников. Ее формирование происходило в два этапа [37, 38, 57]. Первый этап, в который сформировалась прожилково-вкрапленная кварц-сульфидная минерализация, датируется 447 ± 6 млн лет. Во второй этап, датируемый 321 ± 14 млн лет, сформировались золотоносные кварцевые жилы.

Текстуры сухоложских руд прожилково-вкрапленные, гнездово-линзовидные, в подчиненном количестве жильные кварцевого, кварц-карбонатного состава с незначительной примесью сульфидов. Промышленная золотоносность связана с сульфидной, почти исключительно пиритовой, минерализацией. Помимо пирита в виде самостоятельных макроскопических выделений из сульфидов встречается в весьма небольших количествах пирротин и на отдельных участках – арсенопирит. Они распространены в основном на глубоких горизонтах и флангах рудных тел. Во внешнем ореоле

рудной зоны, на крыльях антиклинальной складки, распространена рассеянная пиритовая вкрапленность в виде тонкозернистых пылевидных выделений. В пределах ядерной части Сухоложской антиклинали общая интенсивность пиритовой минерализации увеличивается в среднем до 3 %.

Заключение

Бодайбинский район характеризуется довольно сложной геодинамической историей. В течение длительного времени его формирования на окраине Сибирского кратона происходил целый ряд событий, способных привести к рудообразованию. Влияние некоторых из них подтверждается множеством исследований, и такие события выделяются как ключевые, влияние же других ввиду недостаточной доказательной базы либо отрицается, либо данные события просто игнорируются при составлении модели формирования месторождения. Так, подавляющее большинство исследователей сходится во мнении, что осадконакопление в условиях рифтогенеза способствовало накоплению геохимически специализированных отложений и являлось ключевым событием. Формирование вмещающих оруденение проницаемых структур на этапе линейного складкообразования, инициированного коллизионными процессами, также выделяется в ключевой этап и практически не оспаривается ввиду установленного структурного контроля оруденения, хотя бывают мнения, не укладывающиеся в устоявшуюся систему взглядов [64]. Основные споры ведутся касательно влияния событий постколлизионного этапа развития региона. Установлено неоднократное термальное влияние мантийного вещества на данном этапе [1, 55]. Предметом споров является характер проявления данного влияния: каковым было изменение структурно-вещественных комплексов на месторождении, происходило ли оно с привнесением вещества или являлось изохимическим? Приближение к ответу на данный вопрос позволит лучше понять модель формирования столь уникального месторождения, как Сухой Лог. Одним из способов приближения является анализ результатов геофизических методов, до этого активно не обсуждаемых в периодической литературе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митрофанов Г.Л. Тектонические закономерности размещения и формирования месторождений благородных металлов южного обрамления Сибирской платформы: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 2006. – 44 с.
2. Иванов А.И. Рифейско-палеозойское рудообразование в Байкало-Патомской золоторудной провинции // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 12. – С. 3–10.
3. Буряк В.А. Формирование золотого оруденения в углеродсодержащих толщах // Известия АН СССР. Сер. геол. – 1987. – № 12. – С. 94–105.
4. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia / R.R. Large, V.V. Maslennikov, F. Robert, L.V. Danyushevsky // Econ. Geol. – 2007. – Vol. 102. – P. 1233–1267.
5. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia / S. Meffre, R.R. Large, R. Scott, J. Woodhead // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 2008. – Vol. 72. – P. 2377–2391.

6. Emsbo P., Koenig A.E. Discovery and significance of gold-rich bitumen in the Rodeo deposit, northern Carlin Trend, Nevada // *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*. – 2005. – Vol. 69. – P. A123–A124.
7. Emsbo P., Koenig A.E. Transport of Au in petroleum: evidence from the northern Carlin Trend, Nevada // *Proceedings of the Ninth Biennial SGA Meeting*. – Dublin: SGA, 2007. – P. 695–698.
8. Titley S.R. Phanerozoic ocean cycles and sedimentary-rock-hosted gold ores // *Geology*. – 1991. – Vol. 19. – P. 645–648.
9. Highly metalliferous carbonaceous shale and Early Cambrian seawater / B. Lehmann, T.F. Nagler, H.D. Holland, M. Willie, J. Mao, J. Pan, D. Ma, P. Dulski // *Geology*. – 2007. – Vol. 35. – P. 403–406.
10. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes / R.J. Goldfarb, T. Baker, B. Dube, D.I. Groves, C.J.R. Hart, P. Gosselin // *Economic geology 100th anniversary volume*. – 2005. – P. 407–450.
11. Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits // *Economic Geology*. – 2011. – Vol. 106. – P. 331–358.
12. Origin of high-grade gold ore, source of ore fluid components, and genesis of the Meikle and neighboring Carlin-type deposits, northern Carlin Trend, Nevada / P. Emsbo, A.H. Hofstra, E.A. Lauha, G.L. Griffin, R.W. Hutchinson // *Economic Geology*. – 2003. – Vol. 98. – P. 1069–1105.
13. Genesis and organic geochemical characteristics of the carbonaceous rock stratabound gold deposits, South China / K. Hu, J. Zhai, Y. Liu, H. Wang, J. Zhang, R. Jia // *Science in China*. – 2000. – Vol. 43. – P. 507–520.
14. Williams-Jones A.E., Migdisov A.A. The solubility of gold in crude oil: implications for ore genesis. // *Proc. of the Ninth Biennial SGA Meeting*. – Dublin: SGA, 2007. – P. 765–768.
15. Chang Z., Large R.R., Maslennikov V. Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: evidence for an early timing and a seawater sulfur source // *Geology*. – 2008. – Vol. 36. – P. 971–974.
16. О генезисе продуктивных «углистых» сланцев Ленского золотоносного района / М.П. Лобанов, А.В. Синцов, В.И. Сизых, С.Н. Коваленко // *Доклады РАН*. – 2004. – Т. 394 (3). – С. 360–363.
17. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Г. Кряжев, Ю.В. Щегольков, Э.И. Алышева, С.Е. Борисовский // *Геология руд. Месторождений*. – 2008. – Т. 50 (1). – С. 3–46.
18. Ocean and atmosphere geochemical proxies derived from trace elements in marine pyrite: implications for ore genesis in sedimentary basins. / R.R. Large, I. Mukherjee, D.D. Gregory, J.A. Steadman, V.V. Maslennikov, S. Meffre // *Economic Geology*. – 2017. – Vol. 112 (2). – P. 423–450. DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.2.423>
19. Kucha H. Platinum group metals in the Zechstein copper deposits, Poland // *Economic Geology*. – 1982. – Vol. 77. – P. 1578–1591.
20. Hannington M.D., Herzig P.M., Scott S.D. Auriferous hydrothermal precipitates on the modern seafloor // *Gold metallogeny and exploration* / Ed. by R.P. Foster. Glasgow, Blackie, 1991. – P. 249–275. DOI: 10.1007/978-94-011-2128-6_8.
21. Williams-Jones A., Migdisov A. Experimental constraints on the transport and deposition of metals in ore-forming hydrothermal systems // *Building Exploration Capability for the 21st Century*. – USA: Society of Economic Geologists Publishing, 2014. – Vol. 18. – P. 77–96.
22. Origin of gold ores in black-shale hosted deposits of the Bodaybo Region, Russia / E.V. Belogub, E.E. Palenova, A.V. Chugaev, O.Yu. Plotinskaya // *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. – 2014. – Vol. 88 (supp. 2). – P. 252–253.
23. Онищенко С.А. Деформация и перекристаллизация сульфидных прослоев на золоторудном черносланцевом месторождении Голец Высочайший // *Литосфера*. – 2023. – Т. 23. – № 6. – С. 1059–1078.
24. Онищенко С.А., Сокерина Н.В. Особенности формирования золоторудного Черносланцевого месторождения Голец Высочайший (Бодайбинский рудный район // *Геология рудных месторождений*. – 2021. – Т. 63. – № 2. – С. 154–173.
25. Кряжев С.Г. Изотопно-геохимические и генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах // *Отечественная геология*. – 2017. – № 1. – С. 28–38.
26. Наложённые деформации Герцинского времени в структуре месторождения Голец Высочайший (Байкало-Патомский пояс), 40AR/39Ar данные / В.А. Ванин, А.М. Мазукабзов, Д.С. Юдин, А.В. Блинов, Ю.И. Тарасова // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2022. – Т. 13. – № 1. DOI: 10.5800/GT-2022-13-1-0575.
27. Брюханова Н.Н. Влияние CO₂ на формирование рудообразующего флюида месторождения Сухой Лог (Байкало-Патомское нагорье) // *Современные направления развития геохимии: материалы Всероссийской конференции (с участием зарубежных ученых), посвящённой 65-летию Института геохимии им. А.П. Виноградова и 105-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона*. – Иркутск, 21–25 ноября 2022. – Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. – С. 70–73.
28. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types / D.I. Groves, R.J. Goldfarb, M. Gebre-Mariam, S.G. Hagemann, F. Robert // *Ore Geology Reviews*. – 1998. – Vol. 13 (1–5). – P. 7–27.
29. Goldfarb R.J., Pitcairn I. Orogenic gold: is a genetic association with magmatism realistic? // *Mineral. Deposita*. – 2023. – Vol. 58 (1). – P. 5–35 (2023).
30. Meyer F.M. Case histories of orogenic gold deposits // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13 (3). – P. 369.
31. Lead isotope systematics of the orogenic gold deposits of the Baikal-Muya Belt (Northern Transbaikalia): contribution of the subcontinental lithospheric mantle in their genesis / A.V. Chugaev, V.A. Vanin, I.V. Chernyshev, K.N. Shatagin, I.V. Rassokhina, A.S. Sadasuyuk // *Geochem. International*. – 2022. – Vol. 60. – P. 1352–1379.
32. Шер С.Д. Околорудные изменения, сопутствующие золото-кварцевым жилам в Ленском золотоносном районе // *Метасоматические изменения боковых пород и их роль в рудообразовании* / под ред. Н.И. Наковника. – М.: Недра, 1966. – С. 282–291.
33. Лишневецкий Э.Н., Дистлер В.В. Глубинное строение земной коры района золото-платинового месторождения Сухой Лог по геолого-геофизическим данным (Восточная Сибирь, Россия) // *Геология рудных месторождений*. – 2004. – Т. 46 (1). – С. 88–104.

34. Петролого-геохимические черты окорудного метасоматизма в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч. 1. Обзор петролого-геохимических исследований рудовмещающего субстрата / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верховин // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 35–41.
35. Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов Н.В., Мохов А.В., Антонов А.В., Сергеев С.А. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb- изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53 (1). – С. 32–64.
36. Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits / M.A. Yudovskaya, V.V. Distler, V.Yu. Prokofiev, N.N. Akinfiev // Geoscience Frontiers. – 2016. – Vol. 7 (3). – P. 453–481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010>.
37. Chugaev A.V. Orogenic gold deposits of Northern Transbaikalia, Russia: geology, age, sources, and genesis // Geochem. Int. – 2024. – Vol. 62. – P. 909–978. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702924700484>
38. 40Ar-39Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia) / A.V. Chugaev, A.E. Budyak, Yu.O. Larionova, I.V. Chernyshev, A.V. Travin, Yu.I. Tarasova, B.I. Gareev, G.I. Batalin, I.V. Rassokhina, T.I. Oleinikova // Ore Geology Reviews. 2022. – Vol. 144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>
39. Особенности формирования золоторудной минерализации в условиях амфиболитовой фации метаморфизма: месторождение Ыкан (Байкало-Патомский пояс) / А.Е. Будяк, Ю.И. Тарасова, А.В. Чугаев, Н.А. Горячев, Т.А. Веливецкая, А.В. Игнатьев // Тихоокеанская геология. – 2024. – Т. 43. – № 3. – С. 64–87. DOI: 10.30911/0207-4028-2024-43-3-64-87
40. Геолого-минералогические и геохимические особенности золоторудного месторождения Угхан «Сухоложского» типа / А.Е. Будяк, Ю.И. Тарасова, А.В. Чугаев, Н.А. Горячев // Геология и геофизика. – 2024. – Т. 65. – № 3. – С. 446–470. DOI: 10.15372/GiG2023132.
41. Колмаков Ю.В. Вещественная и петрофизическая эволюция минералообразующей системы золоторудного месторождения Чертова корыто (Патомское нагорье, Россия) // Минералообразующие системы месторождений высокотехнологичных металлов: достижения и перспективы исследований : Всероссийская конференция, проводимая в рамках мероприятий, посвященных 300-летию РАН. – М.: Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 2023. – С. 93–96.
42. Минералы РЗЭ в черных сланцах раннепротерозойской михайловской свиты (Байкало-Патомское нагорье, Сибирь) / Е.Е. Паленова, Е.А. Рожкова, Е.В. Белогуб, М.А. Рассомахин // Минералогия. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 47–66.
43. Quartz-hosted fluid inclusions in commercial ores of various type at the Verninskoe gold deposit, Bodaibo District, Russia / A.A. Kotov, V.Yu. Prokofiev, A.V. Volkov, T.M. Zlobina, K.Yu. Murashov // Geochem. International. – 2023. – Vol. 61. – P. 517–528. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702923040079>
44. Глубинное строение и геодинамика Саяно-Байкальской горной области и сопредельных районов Восточной Сибири / А.М. Алакшин, С.В. Лысак, Б.М. Письменный, А.В. Поспеев, Е.В. Поспеева // Глубинное строение территории СССР. – М.: Наука, 1991. – С. 88–105.
45. Докембрий Патомского нагорья / А.И. Иванов, В.И. Лившиц, О.В. Перевалов, Т.М. Страхова, Б.В. Яблоновский. – М.: Недра, 1995. – 352 с.
46. Колмаков Ю.В. Геолого-петрофизические характеристики месторождений золота в протерозойских углеродистых толщах Восточной Сибири как основа прогнозной интерпретации аэрогеофизических данных: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2021. – 272 с.
47. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района / И.К. Рундквист, В.А. Бобров, Т.Н. Смирнова, М.Ю. Смирнов, М.Ю. Данилова, А.А. Ащеулов // Геология руд. Месторождений. – 1992. – Т. 34 (6). – С. 3–15.
48. Немеров В.К., Станевич А.М. Эволюция рифей-вендских обстановок биолитогенеза Байкальской горной области // Геология и геофизика – 2001. – Т. 42 (3). – С. 456–470.
49. Возраст детритовых цирконов и источники сноса терригенных пород хомолхинской свиты (Южный фланг Бодайбинской зоны Патомского нагорья) / Е.Ю. Рыцк, В.П. Ковач, А.Е. Будяк, Е.В. Толмачева, А.В. Чугаев, Е.В. Адамская, А.М. Федосеев // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса от океана к континенту. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2022. – Т. 20. – С. 250–252.
50. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Стадийность формирования рудной зоны Холоднинского колчеданно-полиметаллического месторождения // Наука о Земле и недропользование. – 2023. – Т. 46. – № 2 (83). – С. 201–211. DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-2-201-211.
51. Гусев Г.С., Песков А.И., Соколов С.К. Палеогеодинамика Муйского сегмента протерозойского Байкало-Витимского пояса // Геотектоника. – 1992. – № 2. – С. 72–86.
52. Конников Э.Г., Цыганков А.А., Врублевская Т.Т. Байкало-Муйский вулканоплутонический пояс: структурно-вещественные комплексы и геодинамика / науч. ред. М.И. Кузьмин. – М.: ГЕОС, 1999. – 163 с.
53. Новые данные об условиях рудоотложения и составе рудообразующих флюидов золото-платинового месторождения Сухой Лог / Н.П. Лавров, В.Ю. Прокофьев, В.В. Дистлер, М.А. Юдовская, А.М. Спиридонов, В.И. Гребенщикова, Н.Л. Матиль // Доклады РАН. – 2000. – Т. 371 (1). – С. 88–92.
54. Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia / V.V. Distler, M.A. Yudovskaya, G.L. Mitrofanov, V.Yu. Prokofiev // Ore Geol. Reviews. – 2004. – Vol. 24 (1–2). – P. 7–44.
55. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Кузьмин М.И. Северо-Азиатский суперплюм в фанерозое: магматизм и глубинная геодинамика // Геотектоника. – 2000. – № 5. – С. 3–29.
56. Хубанов В.Б., Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н. Продолжительность и геодинамика формирования Ангара-Витимского батолита: по данным U-Pb изотопного LA-ICP-MS датирования магматических и детритовых цирконов // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62 (12). – С. 1619–1641. DOI: 10.15372/GiG2021112.

57. Этапы формирования крупномасштабной благороднометальной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь): результаты изотопно-геохронологического изучения / Н.П. Лаверов, И.В. Чернышев, А.В. Чугаев, Е.Д. Бадирова // Доклады РАН. – 2007. – Т. 415 (2). – С. 236–241.
58. Typomorphic features and source of native gold from the Sykhoi Log Area Placer Deposits, Bodaibo gold-bearing district, Siberia, Russia / A. Lalomov, A. Grigorieva, A. Kotov, L. Ivanova // Minerals. – 2023. – Vol. 13 (5). – P. 707. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13050707>
59. Результаты исследования циркона (SIMS) из гранитоидов Константиновского штока (район золоторудного месторождения Сухой Лог): возраст, источники и геологические следствия / Е.Ю. Рыцк, Е.В. Толмачева, С.Д. Великославинский, А.Б. Кузнецов, Н.В. Родионов, А.А. Андреев, А.М. Федосеенко // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 496. – № 2. – С. 169–175. DOI: 10.31857/S2686739721020171.
60. Яновский В.М. Рудоконтролирующие структуры терригенных миогеосинклиналей. – М.: Недра, 1990. – 244 с.
61. Золоторудные месторождения СССР. Т. 3. Геология золоторудных месторождений Западной и Восточной Сибири. – М.: ЦНИГРИ, 1986. – С. 173–191.
62. Современная геолого-экономическая оценка месторождения Сухой Лог / И.А. Карпенко, И.Ф. Мигачев, Б.К. Михайлов, Н.Г. Петраш // Руды и металлы. – 2006. – № 2. – С. 22–27.
63. Иванов А.И. Основные черты геологического строения и золотоносность Бодайбинского рудного района // Руды и металлы. – 2008. – № 3. – С. 43–61.
64. Ванин В.А., Мазукабзов А.М. Парадокс в изучении месторождения - гиганта Сухой лог // Геология на окраине континента: Материалы II молодежной научной конференции-школы ДВГИ ДВО РАН, Владивосток. – Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2022. – С. 133–135.

Информация об авторах

Владимир Валерьевич Слоквенко, аспирант, ассистент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; Vvs120@tpu.ru

Юрий Викторович Колмаков, доктор геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; kolmakovyv@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2525-9214>

Поступила в редакцию: 14.03.2025

Поступила после рецензирования: 24.03.2025

Принята к публикации: 18.06.2025

REFERENCES

1. Mitrofanov G.L. *Tectonic regularities of noble metals deposits allocation and formation of the Siberian platform south margins*. Dr. Diss. Moscow, 2006. 44 p. (In Russ.)
2. Ivanov A.I. Riphean–Paleozoic ore formation in the Baikal-Patom gold province. *Razvedka i okhrana nedr*, 2009, no. 12, pp. 3–10. (In Russ.)
3. Buryak V.A. Formation of gold mineralization in carbon-containing strata. *Izvestiya of the Academy of sciences of the U.S.S.R.*, 1987, no. 12, pp. 94–105. (In Russ.)
4. Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danuishevsky L.V. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia. *Econ. Geol.*, 2007, vol. 102, pp. 1233–1267.
5. Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 2008, vol. 72, pp. 2377–2391.
6. Emsbo P., Koenig A.E. Discovery and significance of gold-rich bitumen in the Rodeo deposit, northern Carlin Trend, Nevada. *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*, 2005, vol. 69, pp. A123–A124.
7. Emsbo P., Koenig A.E. Transport of Au in petroleum: evidence from the northern Carlin Trend, Nevada. *Proc. of the Ninth Biennial SGA Meeting*. Dublin, SGA, 2007. pp. 695–698.
8. Titley S.R. Phanerozoic ocean cycles and sedimentary-rock-hosted gold ores. *Geology*, 1991, vol. 19, pp. 645–648.
9. Lehmann B., Nagler T.F., Holland H.D., Willie M., Mao J., Pan J., Ma D., Dulski P. Highly metalliferous carbonaceous shale and Early Cambrian seawater. *Geology*, 2007, vol. 35, pp. 403–406.
10. Goldfarb R.J., Baker T., Dube B., Groves D.I., Hart C.J.R., Gosselin P. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. *Economic geology 100th anniversary volume*, 2005, pp. 407–450.
11. Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Economic Geology*, 2011, vol. 106, pp. 331–358.
12. Emsbo P., Hofstra A.H., Lauha E.A., Griffin G.L., Hutchinson R.W. Origin of high-grade gold ore, source of ore fluid components, and genesis of the Meikle and neighboring Carlin-type deposits, northern Carlin Trend, Nevada. *Economic Geology*, 2003, vol. 98, pp. 1069–1105.
13. Hu K., Zhai J., Liu Y., Wang H., Zhang J., Jia R. Genesis and organic geochemical characteristics of the carbonaceous rock stratabound gold deposits, South China. *Science in China*, 2000, vol. 43, pp. 507–520.
14. Williams-Jones A.E., Migdisov A.A. The solubility of gold in crude oil: implications for ore genesis. *Proc. of the Ninth Biennial SGA Meeting*. Dublin, Society for Geology Applied to Mineral Deposits, 2007. pp. 765–768.

15. Chang Z., Large R.R., Maslennikov V. Sulfur isotopes in sediment- hosted orogenic gold deposits: Evidence for an early timing and a seawater sulfur source. *Geology*, 2008, vol. 36, pp. 971–974.
16. Lobanov M.P., Sintsov A.V., Sizykh V.I., Kovalenko S.N. On the genesis of productive “carbonaceous” shales of the Lena gold-bearing area. *Doklady of the Academy of sciences of Russia*, 2004, vol. 394, no. 3, pp. 360–363. (In Russ.)
17. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shchegolkov Yu.V., Alysheva E.I., Borisovskii S.E. Near-ore metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore region. *Geology of ore deposits*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 1–44. (In Russ.)
18. Large R.R., Mukherjee I., Gregory D.D., Steadman J.A., Maslennikov V.V., Meffre S. Ocean and atmosphere geochemical proxies derived from trace elements in marine pyrite: implications for ore genesis in sedimentary basins. *Economic Geology*, 2017, vol. 112, no. 2, pp. 423–450. DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.2.423>
19. Kucha H. Platinum group metals in the Zechstein copper deposits, Poland. *Economic Geology*, 1982, vol. 77, pp. 1578–1591.
20. Hannington M.D., Herzig P.M., Scott S.D. Auriferous hydrothermal precipitates on the modern seafloor. *Gold metallogeny and exploration*. Ed. by R.P. Foster. Glasgow, Blackie, 1991. pp. 249–275. DOI: 10.1007/978-94-011-2128-6_8.
21. Williams-Jones A., Migdisov A. Experimental constraints on the transport and deposition of metals in ore-forming hydrothermal systems. *Building Exploration Capability for the 21st Century*. USA, Society of Economic Geologists Publ., 2014. Vol. 18, pp. 77–96.
22. Belogub E.V., Palenova E.E., Chugaev A.V., Plotinskaya O.Yu. Origin of gold ores in black-shale hosted deposits of the Bodaybo Region, Russia. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2014, vol. 88 (suppl. 2), pp. 252–253.
23. Onishchenko S.A. Deformation and recrystallization of sulfide interlayers at the Golets Vysochaishii Gold-Ore Black-Shale Deposit. *Lithosphere*, 2023, vol. 23, no. 6, pp. 1059–1078. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-6-1059-1078>.
24. Onishchenko S.A., Sokerina N.V. Features of the formation of the Golets Vysochaishii Gold-Ore Black-Shale Deposit (Bodaybo Ore District). *Geology of Ore Deposits*, 2021, vol. 63, no. 2, pp. 138–155. DOI: 10.1134/S1075701521020045. (In Russ.)
25. Kryazhev S.G. Isotopic geochemic and genetic models of the gold ore deposits into the carbon bearing terrigenous series. *Domestic geology*, 2017, no. 1, pp. 28–38. (In Russ.)
26. Vanin V.A., Mazukabzov A.M., Yudin D.S., Blinov A.V., Tarasova Yu.I. The hercynian imposed deformations in the Golets Vysochaishii deposit structure (Baikal-Patom Belt), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 05–75. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-1-0575>
27. Bryukhanova N.N. Influence of CO₂ on the formation of ore-forming fluid of the Sukhoi Log deposit (Baikal-Patom Belt). *Modern directions of geochemistry development. Proc. of the All-Russian Conference devoted to the 65th anniversary of the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry and the 105th anniversary of the birth of Academician L.V. Towson*. Irkutsk, V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS Publ., 2022. pp. 70–73.
28. Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Robert F. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 1998, vol. 13, pp. 7–27.
29. Goldfarb R.J., Pitcairn I. Orogenic gold: is a genetic association with magmatism realistic? *Mineralium Deposita*, 2023, vol. 58, no. 1, pp. 5–35.
30. Meyer F.M. Case histories of orogenic gold deposits. *Minerals*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 369.
31. Chugaev A.V., Vanin V.A., Chernyshev I.V., Shatagin K.N., Rassokhina I.V., Sadasyuk A.S. Lead isotope systematics of the orogenic gold deposits of the Baikal-Muya Belt (Northern Transbaikalia): contribution of the subcontinental lithospheric mantle in their genesis. *Geochem. International*, 2022, vol. 60, pp. 1352–1379.
32. Sher S.D. Wallrock alteration accompanying gold-quartz veins in the Lena gold-bearing district. *Metasomatic alterations of the lateral rocks and their part in ore formation*. Ed. by N.I. Nakovnik. Moscow, Nedra Publ., 1966. pp. 282–291. (In Russ.)
33. Lishnevskiy E.N., Distler V.V. Crustal depth structure of the Sukhoi Log gold-platinum deposit area based on geological and geophysical data (Eastern Siberia, Russia). *Geology of ore deposits*, 2004, vol. 46, no. 1, pp. 88–104. (In Russ.)
34. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhosin A.V. Petrologic and geochemic features of the near ore metasomatism in gold ore deposit Sukhoi Log (Lenskii region). Part 1. Review of petrological and geochemical studies of the ore-bearing substrate. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 28–37. (In Russ.)
35. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. Relationship between metamorphism and ore formation at the Sukhoi Log gold deposit hosted in black slates from the data of UThPb isotopic SHRIMP dating of access minerals. *Geology of ore deposits*, 2011, vol. 53, Iss. 1, pp. 27–57.
36. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akiniev N.N. Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*, 2015, no. 7, pp. 453–481. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.010.
37. Chugaev A.V. Orogenic gold deposits of Northern Transbaikalia, Russia: geology, age, sources, and genesis. *Geochem. Int.*, 2024, vol. 62, pp. 909–978. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702924700484>
38. Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Yu.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Yu.I., Gareev B.I., Batalin G.I., Rassokhina I.V., Oleinikova T.I. 40Ar-39Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaybo District (Northern Transbaikalia, Russia). *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>
39. Budyak A.E., Tarasova Yu.V., Goryachev N.A., Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V. Formation of gold mineralization in the amphibolite phase of metamorphism: the Ykan deposit (Baikal-Patom belt). *Pacific geology*, 2024, vol. 43, no. 3, pp. 64–87. (In Russ.) DOI: 10.30911/0207-4028-2024-43-3-64-87
40. Budyak A.E., Tarasova Y.I., Chugaev A.A., Goryachev N.A. Geological, mineralogical and geochemical features of the Sukhoi Log type gold deposit Ugakhan. *Geology and geophysics*, 2024, vol. 65, no. 3, pp. 446–470. (In Russ.) DOI: 10.15372/GiG2023132.
41. Kolmakov Yu.V. Substantial and petrophysical evolution of the mineral-forming system of the Chertovo Koryto gold deposit (Patom Highlands, Russia). *Mineral-forming systems of high-tech metal deposits: achievements and prospects of research*. Moscow, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS Publ., 2023. pp. 93–96. (In Russ.)

42. Palenova E.E., Rozhkova E.A., Belogub E.E., Rozhkova E.A., Belogub E.V., Rassomakhin M.V., Rassomakhin M.A. REE minerals in black shales of the Early Proterozoic Mikhailovskaya Formation (Baikal-Patom Plateau, Siberia). *Mineralogy*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 47–66. (In Russ.)
43. Kotov A.A., Prokofiev V.Y., Volkov A.V., Zlobina T. M., Murashov k. Yu. Quartz-hosted fluid inclusions in commercial ores of various type at the Verninskoe Gold Deposit, Bodaibo District, Russia. *Geochem. International*, 2023, vol. 61, pp. 517–528. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702923040079>
44. Alakshin A.M., Lysak S.V., Pismenny B.M., Pospeev A.V., Pospeeva E.V. Depth structure and geodynamics of the Sayano-Baikal mountain region and adjacent areas of Eastern Siberia. *Depth structure of the USSR territory*. Moscow, Nauka Publ., 1991. pp. 88–105. (In Russ.)
45. Ivanov A.I., Livshits V.I., Perevalov O.V., Strakhova T.M., Yablonovsky B.V. *Precambrian of the Patom Highlands*. Moscow, Nedra Publ., 1995. 352 p. (In Russ.)
46. Kolmakov Yu.V. *Geological and petrophysical characteristics of gold deposits in Proterozoic carbonaceous strata of East Siberia as a basis for predictive interpretation of airborne geophysical data*. Dr. Diss. Tomsk, 2021, 272 p. (In Russ.)
47. Rundquist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N., Smirnov M.Y., Danilova M.Y., Ascheulov A.A. Stages of formation of the Bodaibo gold bearing district. *Geology of Ore Deposits*, 1992, vol. 34, no. 6, pp. 3–15. (In Russ.)
48. Nemerov V.K., Stanevich A.M. Evolution of the Riphean-Vendian settings of biolithogenesis of the Baikal Mountains. *Geology and Geophysics*, 2001, vol. 42, no. 3, pp. 456–470. (In Russ.)
49. Ryt'sk E.Yu., Chugaev A.V., Adam'skaya E.V., Fedoseenko A.M. Age of detrital zircons and sources of demolition of terrigenous rocks of the Khomolkhinskaya Formation (Southern flank of the Bodaibinskaya Zone of the Patom Plateau). *Geodynamic Evolution of Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt from Ocean to Continent*. Irkutsk, Institute of Earth Crust SB RAS Publ., 2022. Vol. 20, pp. 250–252. (In Russ.)
50. Tarasova Yu.I., Budyak A.E. Formation stages of the Kholodninskoye pyrite-polymetallic deposit ore zone. *Earth sciences and subsoil use*, 2023, vol. 46, no. 2, pp. 201–211. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-201-211>.
51. Gusev G.S., Peskov A.I., Sokolov S.K. Paleogeodynamics of the Muisk segment of the Proterozoic Baikal-Vitimsk belt. *Geotectonics*, 1992, no. 2, pp. 72–86. (In Russ.)
52. Konnikov E.G., Tsygankov A.A., Vrublevskaya T.T. *Baikal-Muisk volcanic-plutonic belt: structural-material complexes and geodynamics*. Ed. by M.I. Kuzmin. Moscow, GEOS Publ., 1999. 163 p. (In Russ.)
53. Laverov N.P., Prokofiev V.Y., Distler V.V., Yudovskaya M.A., Spiridonov A.M., Grebenshchikova V.I., Matel N.L. New data on conditions of ore deposition and composition of ore-forming fluids of the Sukhoi Log gold-platinum deposit. *Doklady of the Russian Academy of Science*, 2000, vol. 371, no. 1, pp. 88–92. (In Russ.)
54. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokofiev V.Yu. Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geol. Reviews*, 2004, vol. 24, pp. 7–44.
55. Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Kuzmin M.I. North-Asian superplume in the Phanerozoic: magmatism and deep geodynamics. *Geotectonics*, 2000, no. 5, pp. 3–29. (In Russ.)
56. Khubanov V.B., Tsygankov A.A., Burmakina G.N. Duration and geodynamics of the Angaro-Vitimsky batholith formation: based on U-Pb isotopic LA-ICP-MS dating of magmatic and detrital zircons. *Geology and Geophysics*, 2021, vol 62, no. 12, pp. 1619–1641. (In Russ.) DOI: 10.15372/GiG2021112.
57. Laverov N.P., Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Chugaev A.V., Badirova E.D. Stages of formation of large-scale noble-metal mineralization of the Sukhoi Log deposit (Eastern Siberia): results of isotope-geochronological study. *Doklady of the Russian Academy of science*, 2007, vol. 415, no. 2, pp. 236–241. (In Russ.)
58. Lalomov A., Grigorieva A., Kotov A., Ivanova L. Typomorphic features and source of native gold from the Sykhoi Log Area Placer Deposits, Bodaibo Gold-Bearing District, Siberia, Russia. *Minerals*, 2023, vol. 13, no. 5. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13050707>
59. Ryt'sk E.Yu., Velikoslavinsky S.D., Kuznetsov A.B., Rodionov N.V., Andreev A.A., Fedoseenko A.M. Results of the study of zircon (SIMS) from granitoids of the Konstantinovskiy Stock (area of the Sukhoi Log gold deposit): age, sources and geologic implications. *Doklady of the Russian Academy of science*, 2021, vol. 496, no. 2, pp. 169–175. (In Russ.) DOI: 10.31857/S2686739721020171.
60. Yanovsky V.M. *Ore-controlling structures of terrigenous myogeosynclines*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 244 p. (In Russ.)
61. *Gold ore deposits of the USSR. Vol. 3. Geology of gold ore deposits of Western and Eastern Siberia*. Moscow, Central Geological Research Institute for Nonferrous and Precious Metals Publ., 1986. pp. 173–191. (In Russ.)
62. Karpenko I.A., Migachev I.F., Mikhailov B.K., Petrash N.G. Modern geological and economic evaluation of the Sukhoi Log deposit. *Ores and Metals*, 2006, no. 2, pp. 22–27. (In Russ.)
63. Ivanov A.I. Main features of geological structure and gold content of the Bodaibo gold bearing district. *Ores and Metals*, 2008, no. 3, pp. 43–61. (In Russ.)
64. Vanin V.A., Mazukabzov A.M. Paradox in the study of the giant Sukhoi Log deposit. Geology on the continental margin. *Proc. of the II Youth Scientific Conference-School of the Far Eastern Federal University of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok*. Vladivostok, Far Eastern Federal University Publ., 2022. pp. 133–135.

Information about the authors

Vladimir V. Slokvenko, Postgraduate Student, Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. Vvs120@tpu.ru

Yuri V. Kolmakov, Dr. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; kolmakovyv@tpu.ru

Received: 14.03.2025

Revised: 24.03.2025

Accepted: 18.06.2025