

# КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ УНИКАЛЬНОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУХОЙ ЛОГ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДЕТАЛЬНОГО ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

В.А. Ванин<sup>1,2,✉</sup>, А.М. Мазукабзов<sup>1</sup>, А.Е. Будяк<sup>1,2</sup>, А.В. Чугаев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

<sup>3</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
119017, Москва, Старомонетный пер., 35, Россия

Поступила в редакцию: 03.09.2024

Принята в печать: 18.02.2025

Опубликована онлайн: 22.02.2025

DOI: [10.15372/GiG2025111](https://doi.org/10.15372/GiG2025111)

EDN: [JQPMTO](https://www.edn.ru/JQPMTO)

Ссылка для цитирования:

Ванин В.А., Мазукабзов А.М., Будяк А.Е., Чугаев А.В. (2025). Концептуальная модель формирования уникального золоторудного месторождения Сухой Лог по результатам детального геолого-структурного анализа // Геология и геофизика, т. 66, № 7, с. 844–859, DOI: [10.15372/GiG2025111](https://doi.org/10.15372/GiG2025111), EDN: [JQPMTO](https://www.edn.ru/JQPMTO).

© В.А. Ванин, А.М. Мазукабзов, А.Е. Будяк, А.В. Чугаев, 2025

✉E-mail: [vanin\\_geo@mail.ru](mailto:vanin_geo@mail.ru)

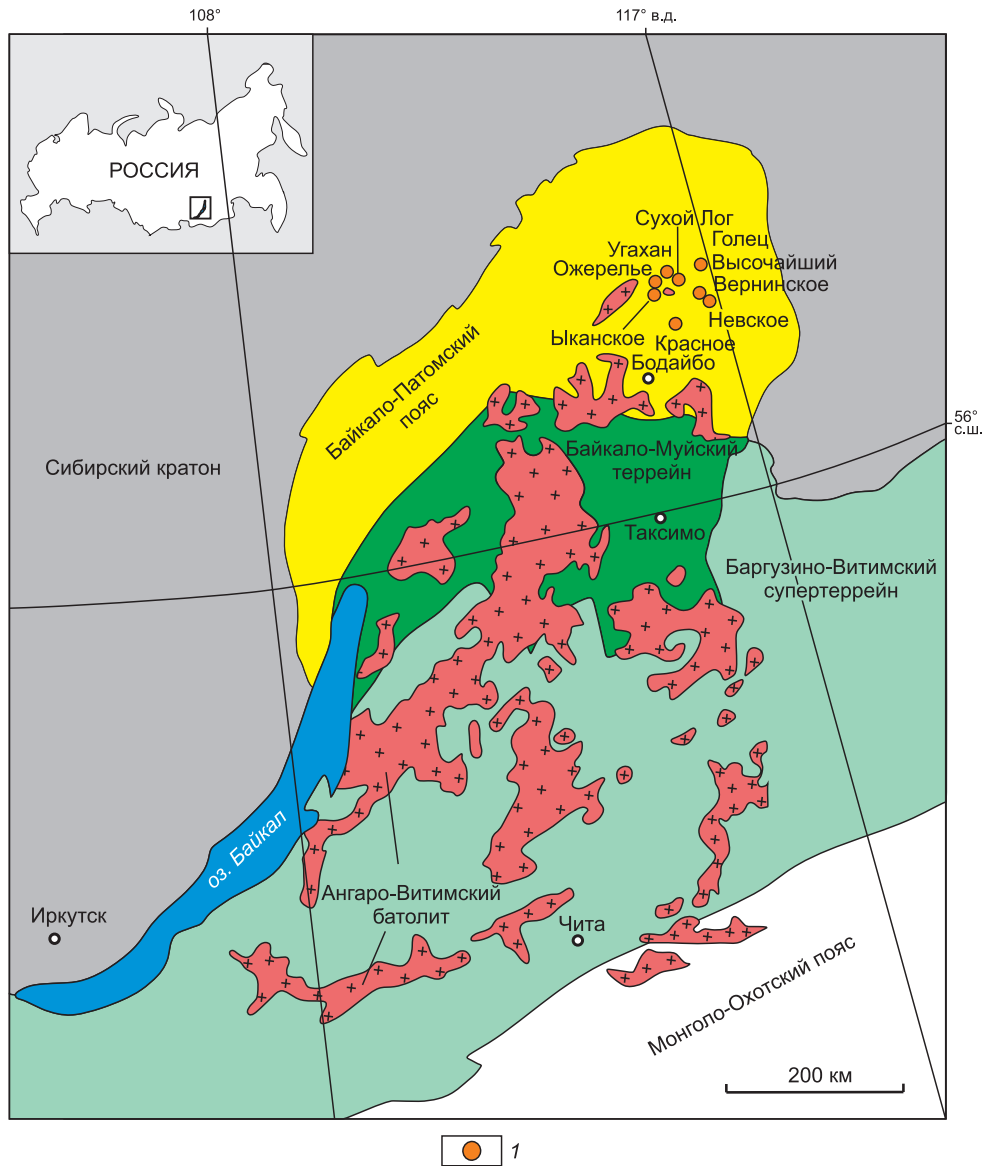
Представлены несколько опубликованных противоположных точек зрения о рудоконтролирующей структуре крупного (~2000 т) золоторудного месторождения Сухой Лог, а также данные детального геолого-структурного анализа, полученные авторами. Месторождение расположено в южном обрамлении Сибирского кратона в черсланцевых отложениях хомолхинской свиты (610–600 млн лет) на территории Байкало-Патомского складчатого пояса. Продемонстрирована сложная региональная структура Байкало-Патомского пояса, сформированная в результате присоединения Байкало-Муйского пояса к Сибирскому кратону. Формирование промышленных руд месторождения Сухой Лог и рудоконтролирующей складчатости приходится на поздний ордовик–ранний силур (~450–420 млн лет). Второй этап формирования слабозолотоносных руд приходится на ранний карбон (340–300 млн лет). В результате проведенного исследования установлено отсутствие рудоконтролирующей зоны разлома синскладчатого этапа (450–420 млн лет). Показано, что внутренняя структура золоторудной зоны представляет собой интенсивно деформированные породы в ядре антиклинали, где золото-кварц-пиритовые прожилки залегают послыно. Сделан вывод, что месторождение Сухой Лог является классическим примером дисгармоничного смятия пластичных горных пород в ядре антиклинали, где совмещены признаки двух стадий структурообразования: продольный изгиб с течением и ламинарное течение. Геолого-структурные исследования месторождения в совокупности с ранее опубликованными данными позволяют отнести месторождение к орогенному типу с метаморфогенно-метасоматическим характером перераспределения рудного вещества.

*Слоистость, кливаж осевой поверхности, сланцеватость, линейность, складка продольного изгиба, ламинарное течение, орогенный тип месторождения, месторождение Сухой Лог*

## ВВЕДЕНИЕ

Сухой Лог является одним из крупных месторождений мира, запасы рудного золота оцениваются в количестве ~2000 т [Государственный доклад..., 2018]. Оно расположено в южном обрамлении Сибирского кратона на территории Байкало-Патомского пояса (рис. 1). История изучения месторождения исследователями разных направлений насчитывает около 140 лет. История изучения месторождения Сухой Лог как гигантского месторождения прожилково-вкрапленного типа связана с именем выдающегося геолога В.А. Бурыка, который, несмотря на подавляющее отрицательное мнение относительно перспективности объекта, в 1961 г. смог обосновать постановку здесь геологических работ с целью выявления и оценки золотосульфидного оруденения. Несмотря на обнаружение в тот же год золотосульфидного оруденения, первые его запасы защищены только П.П. Поповым в 1977 г.

В настоящее время опубликовано достаточно большое количество трудов, посвященных его всестороннему изучению, однако, несмотря на столь значительное внимание исследователей, остается ряд вопросов, один из которых – это структурный контроль месторождения. Месторождение Сухой Лог классифицировано рядом исследователей как орогенное [Goldfarb et al., 2001, 2014; Large et al., 2007; Савчук, Волков, 2019] с выделением конкретного «сухоложского» подтипа [Буряк, 1982], что предполагает расшифровку структурных особенностей месторождения и условий локализации золоторудных зон. Изначально геологами, проводившими подсчет запасов [Кузнецов, 1977], структура месторождения понималась как лежащая антиклиналь с зоной смятия (структура нагнетания) в ее ядерной части при складкообразовании. Зона смятия является синскладчатой и вмещает золотое оруденение. Под рудной зоной понимается значительная часть объема пород с золото-сульфидной прожилково-вкрапленной минерализа-



**Рис. 1.** Тектоническая схема расположения месторождения Сухой Лог. Здесь и на рис. 2: 1 – месторождение золота. На врезке показан район исследований.

цией, локализованной в зоне смятия в ядерной части антиклинали.

В более поздних работах данная точка зрения не нашла поддержки, несмотря на то, что в работе [Кузнецов, 1977] были изложены фактические данные, основанные на прямых структурных наблюдениях. Например, в работе Н.П. Лобанова и соавторов [1976] месторождение Сухой Лог описывается как Кадали-Сухоложская зона смятия. Последняя уже понималась как разрывная структура сдвигонадвиговой природы с широким проявлением пластических деформаций, сочетающихся с хрупкими разрывами. При этом данная работа отрицает наличие рудоконтролирующей Сухоложской антиклинали.

Исследователи В.А. Буряк и Н.М. Хмелевская [1997] развивали концепцию, предложенную В.А. Бу-

ряком [1982], и в своих работах пришли к выводу, что «Интенсивное развитие трещин кливажа, микроскладок нагнетания и сжатия, сопутствующих микровзбросов и надвигов, обуславливают в совокупности развитие в ядерной части антиклинали и ее северном пологом крыле тектонической зоны повышенного расслабления и смятия, контролирующей оруденение» [Буряк, Хмелевская, 1997, с. 85]. Приведенные в работе [Буряк, Хмелевская, 1997] сведения использовались также в [Константинов и др., 2000; Константинов, 2010].

Важным результатом работы Б.Л. Вуда и Н.П. Попова [2006, с. 326] является высказывание: «ни одного крупного (главного) разлома не известно внутри месторождения Сухой Лог». Но при этом предполагается, что «проникающая осевая расслабленность

и кливаж являются главными каналами и аккумуляторами, по которым происходит движение флюида».

В статьях [Large et al., 2007; Meffre et al., 2008] говорится, что в процессе седиментации рудовмещающей хомолхинской свиты флюиды, обогащенные золотом и мышьяком, поступали вдоль рифтовых разломов субширотного простирания. В процессе диагенеза и ранней складчатости после формирования перекрывающей имняхской свиты обогащенные флюиды продолжали проникать по разломам в ниже лежащие отложения имняхской свиты. При последующих деформациях, связанных с метаморфическими событиями, рифтогенные разломы были повторно активизированы, создавая тем самым проницаемые структуры для потока метаморфических флюидов. По мнению авторов, кислый флюид растворял ранний золотоносный пирит вмещающих пород и перетлагал его в пределах зоны разрывных нарушений, что приводило к концентрации золота совместно с синдеформационным пиритом в осях складок. Основной вопрос данной концепции связан с тем, что разломная структура, существовавшая на протяжении всей эволюции месторождения, не была деформирована вместе с углеродистыми толщами.

В работе М.А. Юдовской с соавторами [2011] выдвигается гипотеза постдеформационного формирования месторождения Сухой Лог, что подразумевает наличие разрывных рудоконтролирующих структур. В статье Ю.С. Савчука и А.В. Волкова [2019] указывается, что рудоконтролирующей структурой является зона рассланцевания. В работе [Vursiy et al., 2020] говорится о том, что микроскладки, кливаж осевой поверхности и взбросы, образуя зону повышенной деформации, являются рудоконтролирующими структурами месторождения.

В статье Ю.И. Тарасовой с соавторами [Tarasova et al., 2020] на основе минералогических исследований для месторождений «сухоложского» типа высказывается мнение о формировании зон разрывных нарушений в осевых поверхностях антиклинальных складок на момент складкообразования в позднеордовикско-раннесилурийское время. Данный вывод был сделан на основе минералогических исследований, где установлено, что на момент основной складчатости происходила смена высокотемпературной минеральной ассоциации на низкотемпературную, при этом отмечается резкое падение давления с 5–6 до 0.5 кбар, что, по мнению авторов, предполагает формирование открытых полостей.

Таким образом, наличие Сухоложской рудолокализирующей антиклинали практически никем из исследователей не оспаривается. Тем не менее остается нерешенным ключевой вопрос – к каким именно плоскостным структурным и текстурным элементам приурочено золото-кварц-сульфидное оруденение.

Положение золоторудной зоны в ядерной части антиклинали дало основание большинству исследователей предполагать связь минерализации с разрывными нарушениями (зоной рассланцевания) в осевой части антиклинали [Буряк, Хмелевская, 1997; Савчук, Волков, 2019; Tarasova et al., 2020] либо с кливажом осевой поверхности (ОП) [Вуд, Попов, 2006; Vursiy et al., 2020]. Важно понимать, что слоистость, кливаж и сланцеватость являются структурами разного генезиса. Приуроченность золоторудной минерализации к какой-либо из этих текстур дает представление о структуре месторождения в целом, а соответственно, и о его генетической природе.

Проблема структурного контроля на месторождении Сухой Лог, вероятно, является следствием того, что среди исследователей предполагалось, что структурные характеристики месторождения известны и не требуют дополнительного исследования.

Целью настоящей работы является расшифровка эволюции структуры месторождения Сухой Лог, что поможет приблизиться к пониманию генезиса месторождения, сопоставить результаты проведенных исследований с предложенными гипотезами и сделать обоснованный вывод относительно его происхождения и развития.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения территории месторождения приемлемым является сочетание общих методов геологического картирования с детальными структурными наблюдениями. Большое внимание уделялось изучению и анализу малых структурных элементов, размерность которых варьирует от визуально наблюдаемых в образцах до структур, наблюдаемых в горных выработках. Сюда входят складки с набором характеризующих их элементов, кливаж осевой поверхности, элементы залегания слоистости, будинаж, линейность. Особое внимание уделялось кливажу, соотношение которого со слоистостью позволяет провести реконструкцию складчатых структур при пологих залеганиях толщи. Малые структурные формы, составляющие структурные парагенезы, позволяют выяснить динамические и кинематические условия формирования структуры района. Петроструктурные исследования использовались при изучении рудоконцентрирующих микроструктурных форм. Значительное внимание было уделено выявлению признаков, отражающих реологию пород при деформации. Перечисленный комплекс методов является необходимым для реконструкции складчатой структуры месторождения, в строении которого участвуют гетерогенные по составу породы, обладающие разной компетентностью при деформации. При обработке плоскостных и линейных элементов применялись методы стереогеометрического анализа.

## КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИИ БАЙКАЛО-ПАТОМСКОГО НАГОРЬЯ

Для понимания геохронологической последовательности проявленных событий на территории Бодайбинского региона в целом и месторождения Сухой Лог в частности необходимо структурировать и упорядочить опубликованную информацию многочисленных исследований в пределах изучаемой территории. Доминирующей в настоящее время является концепция метаморфогенно-метасоматического генезиса формирования месторождений «сухоложского» типа, к которому, кроме месторождения Сухой Лог, также относятся прочие месторождения Бодайбинского региона, расположенные в пределах дальнетайгинского–жуинского стратоуровней [Tarasova et al., 2020; Chugaev et al., 2022; Тарасова и др., 2022; Будяк и др., 2024а, 2024б; Чугаев, 2024]. Суть ее сводится к тому, что данные объекты имеют полистадийную историю формирования, при этом источником является коровый субстрат без привлечения дополнительного ювенильного флюида. Основным фактором исключения глубинного флюида на формирование месторождений «сухоложского» генетического типа являются следующие критерии: 1) повторяемость изотопных данных ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  и Pb-Pb) для образцов, отобранных в пределах рудных зон месторождений с безрудными образцами, отобранными из вмещающих данные месторождения отложений на расстоянии, достигающем 70 км; 2) аномальная сидерохалькофильная с золотом геохимическая специализация свит, вмещающих месторождения «сухоложского» типа (угаханская, хомолхинская и аунакитская), относительно прочих отложений региона; 3) повышенная дорудная флюидонасыщенность вмещающих оруденение антиформ. Предложенные критерии в указанных выше работах достаточно обоснованно доказывают формирование рудных концентраций золота в пределах месторождений «сухоложского» типа в результате перераспределения рудоносного флюида, ремобилизованного из вмещающих углеродистых пород без участия дополнительного глубинного флюида.

Комплекс методов вещественного изучения, проведенный исследователями разного профиля, позволил выделить четыре основных этапа геологической эволюции территории Байкало-Патомского пояса (БПП):

1. Поздний рифей–венд (610–580 млн лет). Накопление отложений, в том числе и золотоносных, в обстановке полуизолированного бассейна Foreland-типа [Станевич и др., 2007; Немеров и др., 2010; Powerman et al., 2015; Чугаев и др., 2018; Будяк и др., 2019].

2. Венд (~ 555 млн лет). Формирование региональной пологой складчатости, вероятно, связанной со сдвиговыми деформациями в структуре Байкало-

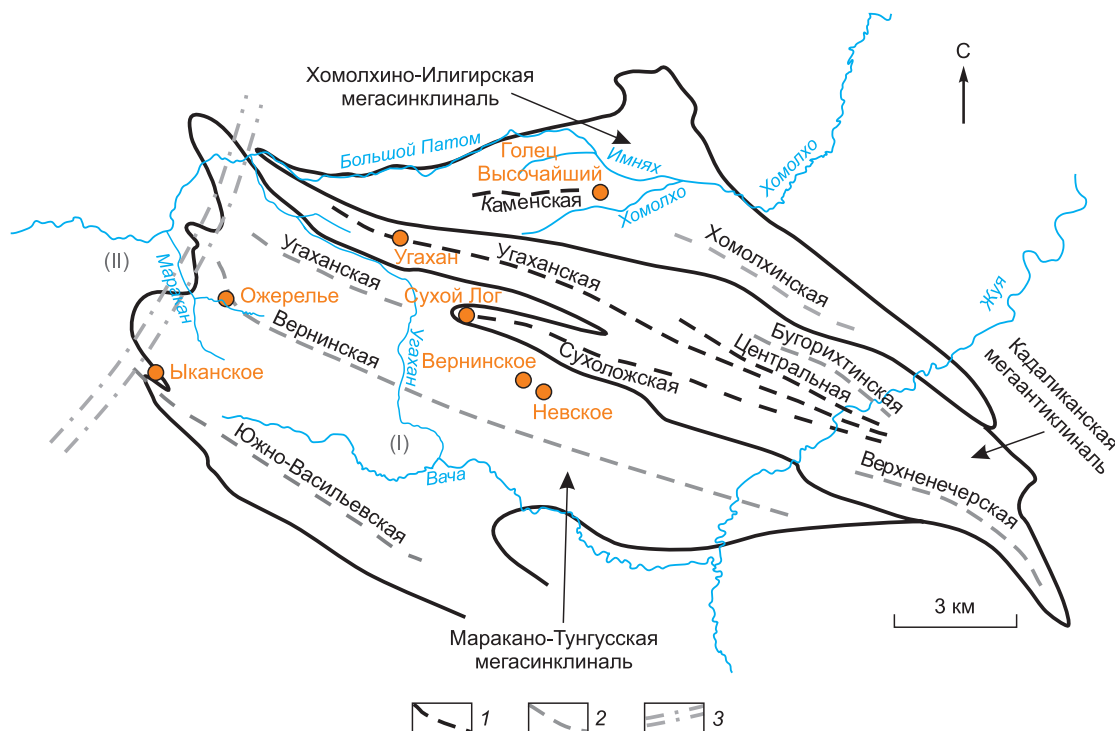
Муйского пояса (БМП) [Рыцк и др., 2019]. По данным авторов [Немеров и др., 2010; Юдовская и др., 2011], этот этап можно отнести к метаморфизму погружения (метагенез) как последствию накопления перекрывающих малассоидных отложений юдомского горизонта, мощность которых в структурах погружения достигала 3 км (максимум 7 км) [Немеров и др., 2010].

3. Поздний ордовик–ранний силур (450–420 млн лет). Формирование рудных тел месторождений происходило в результате постепенной смены прогрессивной стадии метаморфизма, достигающей фации зеленых сланцев ( $T$  до 400 °C,  $P$  до 5 кбар), до регрессивной стадии остывания рудной системы ( $T$  до 300–220 °C,  $P$  до 0.5 кбар) [Distler et al., 2004; Лаверов и др., 2007; Русинов и др., 2008; Юдовская и др., 2011; Дубинина и др., 2014; Чугаев, Чернышев, 2017; Tarasova et al., 2020; Ванин и др., 2022; Chugaev et al., 2022; и др.]. Как отмечалось выше, источником полезного компонента являлись метаосадочные вмещающие оруденение толщи, ремобилизация которого из вмещающих отложений произошла на прогрессивной стадии, а собственно выпадение из кислого флюида с формированием рудных тел – на регрессивной стадии метаморфизма. Согласно данным, представленным в работе [Ванин и др., 2022], в это же время на месторождении Голец Высочайший произошло формирование линейной изоклинальной складчатости, в том числе рудоконтролирующих складок и сквозного кливажа ОП. По мнению авторов [Зорин и др., 2008; Писаревский и др., 2023], метаморфические изменения, повлекшие перераспределение рудного вещества Бодайбинского региона, связаны с коллизионно-аккреционными событиями в южном обрамлении Сибирского кратона в данный временной период.

4. Ранний карбон (340–300 млн лет). Формирование слабозолотоносных секущих кварцевых жил. Метаморфизм данного этапа связан со становлением гранитоидных интрузивных пород Ангара-Витимского батолита [Ярмолук и др., 1997; Цыганков и др., 2010, 2017]. Кварцевые жилы занимают секущее положение по отношению к рудоконтролирующим структурам, сформированным в поздний ордовик–ранний силур [Ванин и др., 2022].

## РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНАЯ ПОЗИЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУХОЙ ЛОГ

Золоторудное месторождение Сухой Лог расположено на территории Байкало-Патомского складчатого пояса в пределах Кадаликанской асимметричной мегаантиклинали. Последняя располагается между двух крупных структур – Хомолхино-Илигирской и Маракано-Тунгусской мегаинклиналями (см. рис. 1). Кадаликанская мегаантиклиналь осложнена складками 3-го порядка: Сухоложской, Ютеняхской, Угаханской, Центральной антиклиналями и Верхнене-



**Рис. 2.** Структурная позиция месторождения Сухой Лог. 1 – ось антиклиналей; 2 – ось синклиналей; 3 – граница между Бодайбинской (I) и Мамской (II) зонами.

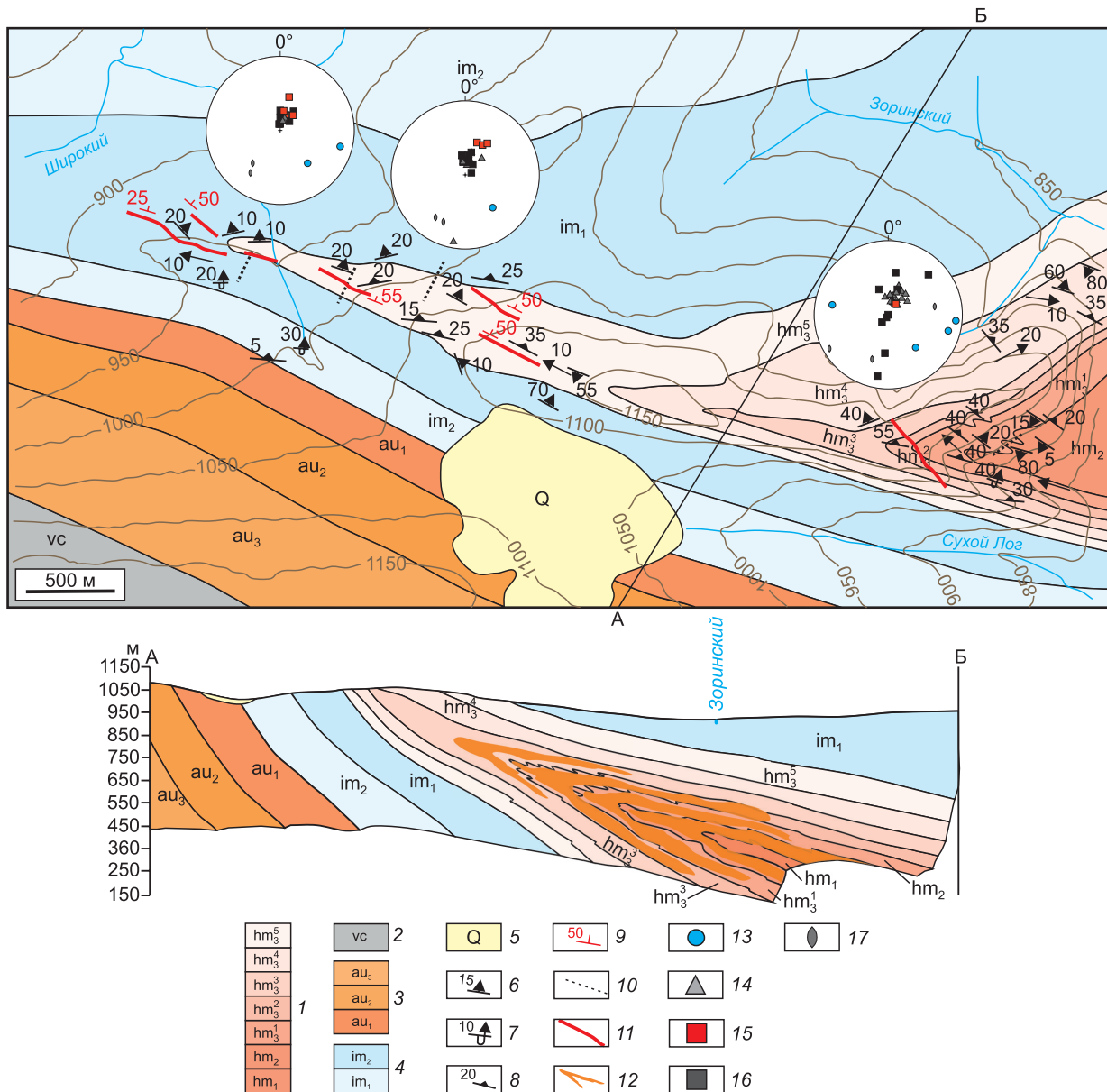
черской, Бугорихтинской синклиналями (рис. 2). Сухоложская антиклиналь является рудоконтролирующей структурой для месторождения Сухой Лог.

В региональном плане Кадаликанская мегаструктура имеет северо-западное простирание, и протяженность ее достигает 120 км при ширине 6 км. Внутренняя структура осложнена складчатостью разных порядков. С северо-востока Кадаликанская мегаантиклиналь не имеет четкой зоны перегиба с Хомолхино-Илигирской мегасинклинью, и граница ее выделяется достаточно условно. Мегаантиклиналь прослеживается от зоны сочленения Мамской и Бодайбинской структурных зон. Ядром Кадаликанской мегаантиклинали является Угаханская антиклиналь. Последняя является рудоконтролирующей для месторождения Угахан. Далее по простиранию в юго-восточном направлении Кадаликанская мегаантиклиналь приобретает отчетливую антиклинальную структуру с юго-западной вергентностью осевой поверхности. Северо-восточное крыло имеет нормальное залегание разреза, и просматривается четкая зона перегиба с Хомолхино-Илигирской мегасинклинью. Юго-восточная часть мегаантиклинали осложнена Верхнечерской синклинью, юго-западное крыло осложнено Сухоложской антиклинью. В свою очередь, юго-западное крыло имеет четкую зону перегиба с Маракано-Тунгусской мегасинклинью, и здесь отмечается перевернутое залегание горных пород. На этом крыле расположены месторождения Вернинское и Невское.

В становлении Кадаликанской мегаантиклинали просматриваются два этапа деформаций, которые имели место в позднеордовикско-раннесилурийское время [Зорин и др., 2008; Юдовская и др., 2011; Chugaev et al., 2022]. В первый этап деформаций, он же и является основным, была сформирована сама Кадаликанская мегаантиклиналь 2-го и осложняющие ее складки 3-го порядков. К складкам 3-го порядка относятся Сухоложская, Угаханская антиклинали и др. (см. рис. 2). По механизму формирования они соответствуют складкам продольного изгиба с течением, которые на стадии общего сплющивания приобрели черты, характерные для складок ламинарного течения. По морфологии – это асимметричные складки, осевые поверхности которых опрокинуты к юго-западу, а оси имеют северо-западную ориентировку. Первый этап деформации на месторождении Сухой Лог сменяется вторым этапом более слабого деформирования ранее сформированных структур, которое проявилось в виде наложенных малоамплитудных (0.5 м) складок флексурной формы, описанных в работе [Вуд, Попов, 2006].

#### ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУХОЙ ЛОГ

Геологическое строение месторождения рассмотрено в большом количестве опубликованных работ [Буряк, Хмелевская, 1997; Вуд, Попов, 2006; Юдов-



**Рис. 3.** Геолого-структурная схема месторождения Сухой Лог. Сферограммы изображены в верхней полусфере. 1–4 – свиты: 1 – хомолхинская, 2 – вачская, 3 – аунакитская, 4 – имняхская; 5 – четвертичные отложения; 6–12 – элементы залегания и углы падения: 6 – нормальная слоистость, 7 – перевернутая слоистость, 8 – кливаж ОП, 9 – кварцевые жилы, 10 – линейность А-типа, 11 – кварцевые жилы, 12 – золоторудные зоны; 13–17 – обозначения на диаграммах: 13 – шарниры складок, 14 – кливаж, 15 – кварцевые жилы, 16 – слоистость, 17 – линейность.

ская и др., 2011; Иванов, 2014; Yudovskaya et al., 2015; и др.], и здесь будет дано лишь краткое описание. В геологическом строении месторождения участвуют породы имняхской и хомолхинской свит верхнего рифея. Имняхская свита подразделяется на две подсвиты: нижняя представлена известковистыми песчаниками, сланцами и алевролитами, прослоями известняков; верхняя – известняками с прослоями сланцев и доломитов. Хомолхинская свита (610–600 млн лет) подразделяется на три подсвиты: нижняя представлена карбонатными сланцами и алевролитами с прослойками углеродистых известняков;

средняя – серыми известняками с прослоями алевролитов и углеродистых сланцев; верхняя – углеродистыми алевропелитами и метапелитами с подчиненными линзующимися прослоями алевролитов и тонкозернистых песчаников. Содержание  $C_{орг}$  от 0.5 до 5.0 мас. %, преимущественно 1.2–2.5 мас. %. Рудовмещающими являются углеродистые кварц-карбонат-серицитовые сланцы и кварцевые алевролиты верхней подсвиты хомолхинской свиты [Вуд, Попов, 2006]. Золото распространено исключительно в пирите и кварц-пирит-карбонатных прожилках [Буряк, Хмелевская, 1997].

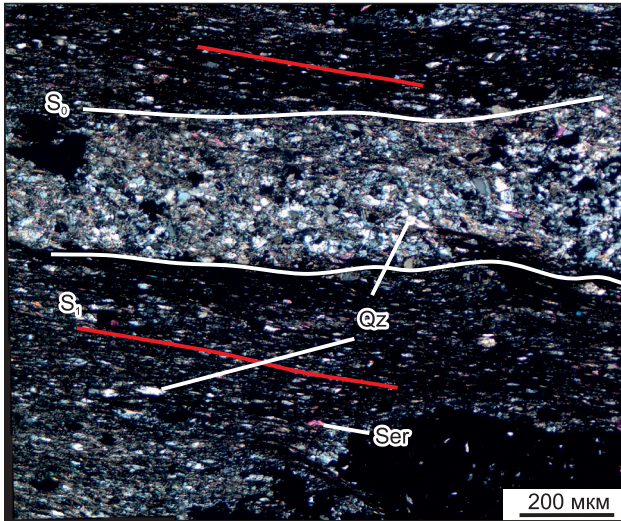


Рис. 4. Взаимоотношение кливажа ОП ( $S_1$ ) и слоистости в шлифе алевросланца из всячего крыла Сухоложской антиклинали. Увел.  $\times 5$ .  $S_0$  – слоистость,  $S_1$  – кливаж ОП ( $S_1$ ), Qz – кварц, Ser – серицит.

В структурном плане месторождение Сухой Лог локализовано в изоклиальной, сильно сжатой, опрокинутой антиклинали 3-го порядка южной вергент-

ности. Всячее крыло имеет нормальное залегание слоистых пород и угол падения  $10\text{--}20^\circ$  (рис. 3). Лежачее крыло имеет опрокинутое залегание слоистых пород и угол падения до  $30\text{--}40^\circ$ . Ось антиклинали простирается в западно-северо-западном направлении. Осевая поверхность имеет азимут падения  $20\text{--}30^\circ$ , угол падения  $20\text{--}30^\circ$ . Шарнир имеет пологое погружение под углом  $5\text{--}10^\circ$  в западно-северо-западном направлении. В юго-восточной части месторождения отчетливо дешифрируется замок антиклинали, где кажущееся расширение антиклинали обусловлено крутым рельефом и пологим залеганием пород. Эта часть структуры имеет так же сильно сжатую изоклиальную форму, как западная и центральная части антиклинали. Преобладающий азимут падения пород  $30\text{--}40^\circ$ , угол падения  $20\text{--}30^\circ$ . Азимут падения кливажа ОП  $10\text{--}40^\circ$ , угол падения  $20\text{--}40^\circ$ .

**Основные тектурные и линейные элементы месторождения Сухой Лог.** Основными плоскостными тектурными элементами на территории месторождения являются слоистость ( $S_0$ ), проникающий кливаж ОП (сланцеватость  $S_1$ ) (рис. 4) и кварцевые жилы. Дополнительных плоскостных тектурных элементов на территории месторождения не выявлено. К линейным структурным элементам отнесена линейность А-типа (рис. 5, в).

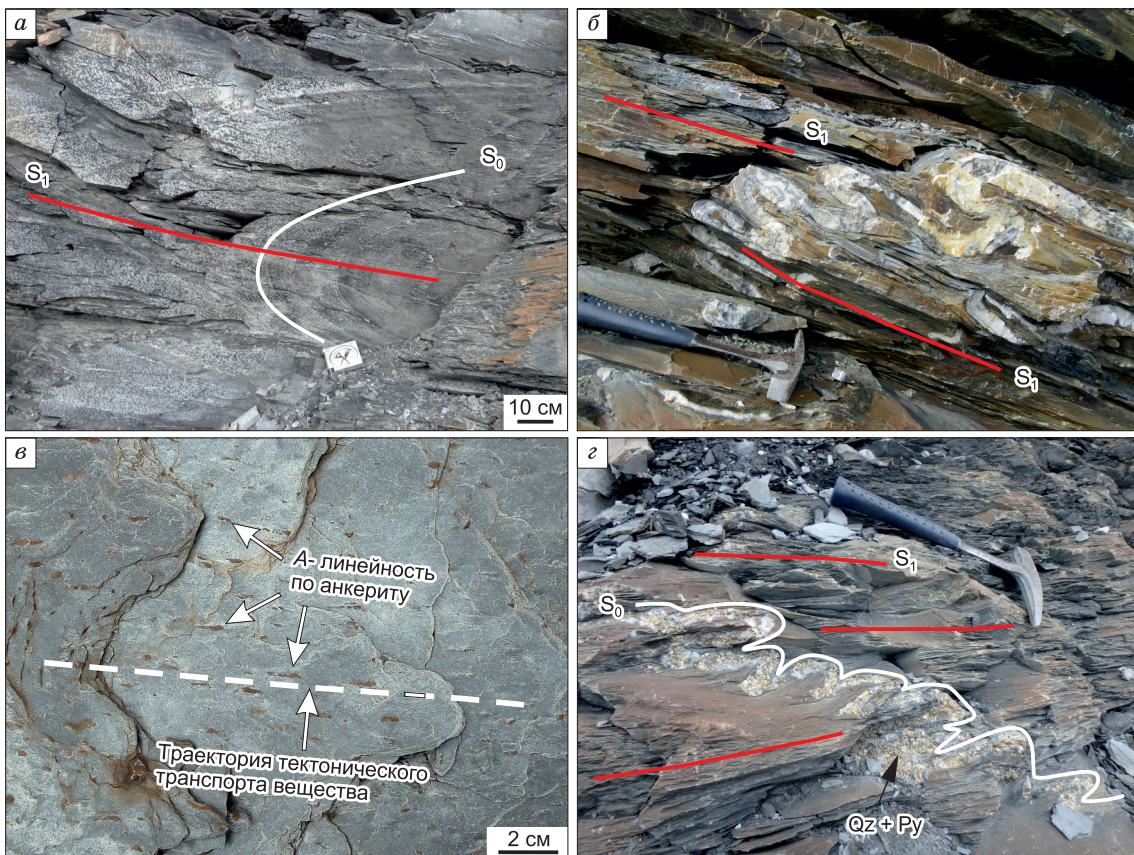


Рис. 5. Фотографии малых структурных форм месторождения Сухой Лог. а – замок мелкошаштабной асимметричной антиклинали; б – межслоевая складка волочения; в – метаморфическая линейность А-типа на плоскости слоистости; г – смятая в складки кварц-пиритовая минерализация. Здесь и на рис. 6, 7: Qz – кварц, Py – пирит.

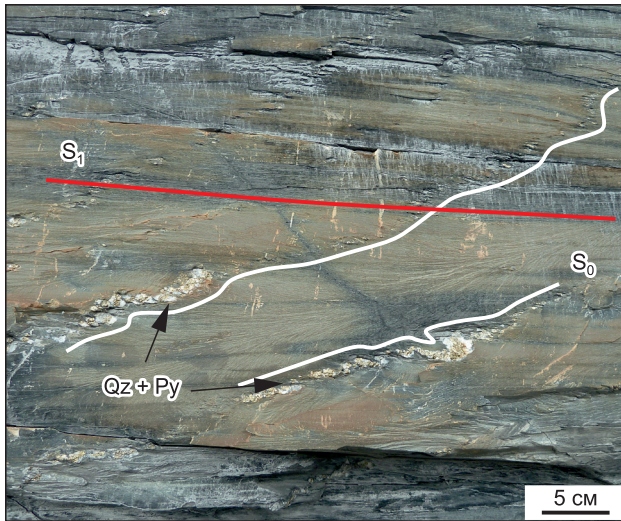


Рис. 6. Смятая в складки кварц-пиритовая минерализация, трассирующая плоскости слоистости.

Слоистость ( $S_0$ ) является первичной текстурой и имеет важное значение для расшифровки рудоконтролирующей структуры месторождения Сухой Лог. На крыльях складок слоистость часто затушевывается текстурами кливажа ОП ( $S_1$ ) и распознается по большей части лишь в шлифах, где видно пересечение слоистости кливажом ОП ( $S_1$ ) под острым углом ( $10^\circ$ ) (см. рис. 4).

Более отчетливо слоистость распознается в замках складок, где кливаж ОП пересекает слоистость под углом до  $90^\circ$  (см. рис. 5, а). По плоскостям слоистости отмечаются межслоевые проскальзывания, в результате чего были сформированы межслоевые складки волочения (см. рис. 5, б) и метаморфогенная линейность А-типа (см. рис. 5, в). К слоистости приурочена вся золото-кварц-пиритовая минерализация (рис. 6, 7). Часто слоистость неразличима невооруженным глазом и распознается по трассирующей ее сульфидной минерализации. На рисунке 5, г отчетливо наблюдаются смятая в складки кварц-пиритовая минерализация, которая в пределах месторождения является золотоносной (золотоносный пирит рудной генерации), и недеформированные текстуры кливажа ОП.

Известно, что кливаж ОП формируется на этапе складкообразования и, зная это, можно сделать вывод, что он был сформирован в период времени поздний ордовик–ранний силур. Кливаж ОП широко распространен в породах как на территории месторождения Сухой Лог, так и за его пределами, включая однотипное месторождение Голец Высочайший [Ванин и др., 2022]. Кливаж ОП является сквозным, пронизывает слоистость деформированных пород и близко соответствует наклону ОП Сухоложской антиклинали. По текстурным признакам кливаж ОП соответствует сланцеватости ( $S_1$ ). Об этом свидетельствует плоскопараллельная ориентировка сло-

дистых минералов (серицит), сформированных по плоскостям кливажа ОП (рис. 8). Фактически в результате продолжительных деформационных процессов предположительно на заключительной стадии деформационного этапа позднего ордовика–раннего силура произошла трансформация кливажа ОП в сланцеватость ( $S_1$ ). На разных участках Сухоложской антиклинали кливаж ОП ( $S_1$ ) имеет близкие элементы залегания – азимут падения  $350\text{--}30^\circ$  и угол падения  $20\text{--}40^\circ$  (см. рис. 3, диаграммы). По плоскостям кливажа ОП фиксируются срывы надвиговой кинематики [Юдовская и др., 2011]. Данные срывы малоамплитудные, являются индикаторами хрупких деформаций, возникли после формирования кливажа ОП и носят пострудный характер. В редких случаях по плоскостям кливажа ОП присутствуют тонкие прожилки кварц-пиритовой минерализации [Large et al., 2007; Юдовская и др., 2011].

Метаморфогенная линейность сформировалась на ранней стадии деформационного этапа позднего ордовика–раннего силура в результате межслоевых

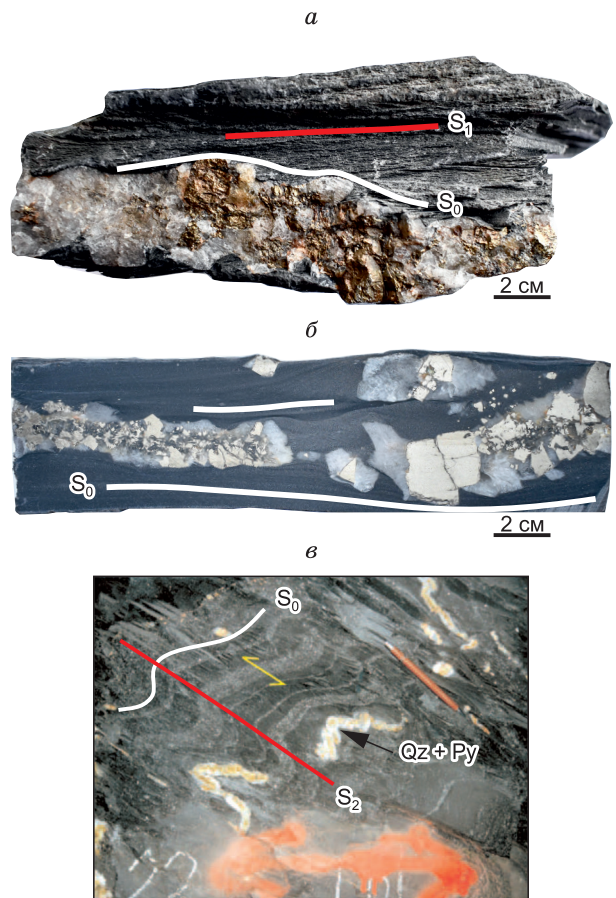


Рис. 7. Послойное залегание золото-кварц-пиритовой минерализации. а – образец с взаимоотношением кварц-пиритовой минерализации и кливажа ОП; б – срез образца, где видны текстуры слоистости, огибающие кварц-пиритовую минерализацию; в – послойное залегание кварц-пиритовой минерализации в замке антиклинали, фото из [Large et al., 2007].

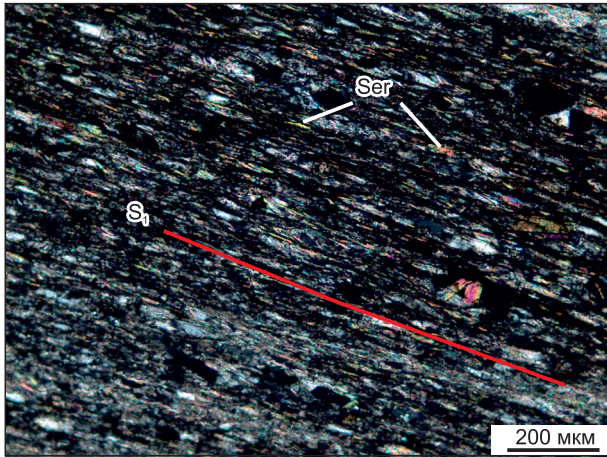


Рис. 8. Фото кливажа ОП (сланцеватости ( $S_1$ )) в микрошлифе. Ser – серицит.

проскальзываний при складкообразовании. Представлена *A*-типом, выражена удлиненными линейно-ориентированными, выветренными, железисто-карбонатными минералами (анкерит) на плоскостях слоистости (см. рис. 5, в). Азимут погружения линейности составляет  $25\text{--}35^\circ$  и угол погружения  $10\text{--}20^\circ$ . Распространение линейности наблюдается исключительно на плоскостях слоистости, что свидетельствует об интенсивных тектонических подвижках именно по этим плоскостям, т. е. о межслоевых скольжениях. Метаморфическая линейность является одним из факторов, по которым возможно отличить в полевых условиях плоскости слоистости от плоскостей кливажа ОП. На последних линейность, а следовательно, и тектонические подвижки в условиях пластических деформаций не зафиксированы.

Золото-кварц-пиритовая минерализация имеет послойное залегание. На рисунке 7, а видно, что рудная минерализация залегает под острым углом к кливажу ОП. На срезе того же образца различимы текстурные элементы слоистости, обгибающие кварц-



Рис. 9. Пострудная кварцевая жила, пересекающая слоистость в карьере месторождения.

пиритовую минерализацию (см. рис. 7, б). Особенно отчетливо приуроченность рудной минерализации к слоистости наблюдается в замках складок разного масштаба, где кливаж ОП практически перпендикулярен рудной минерализации (см. рис. 7, в). Рудная минерализация часто смята в складки, повторяя складчатые элементы слоистости (см. рис. 5, г; 6; 7, в).

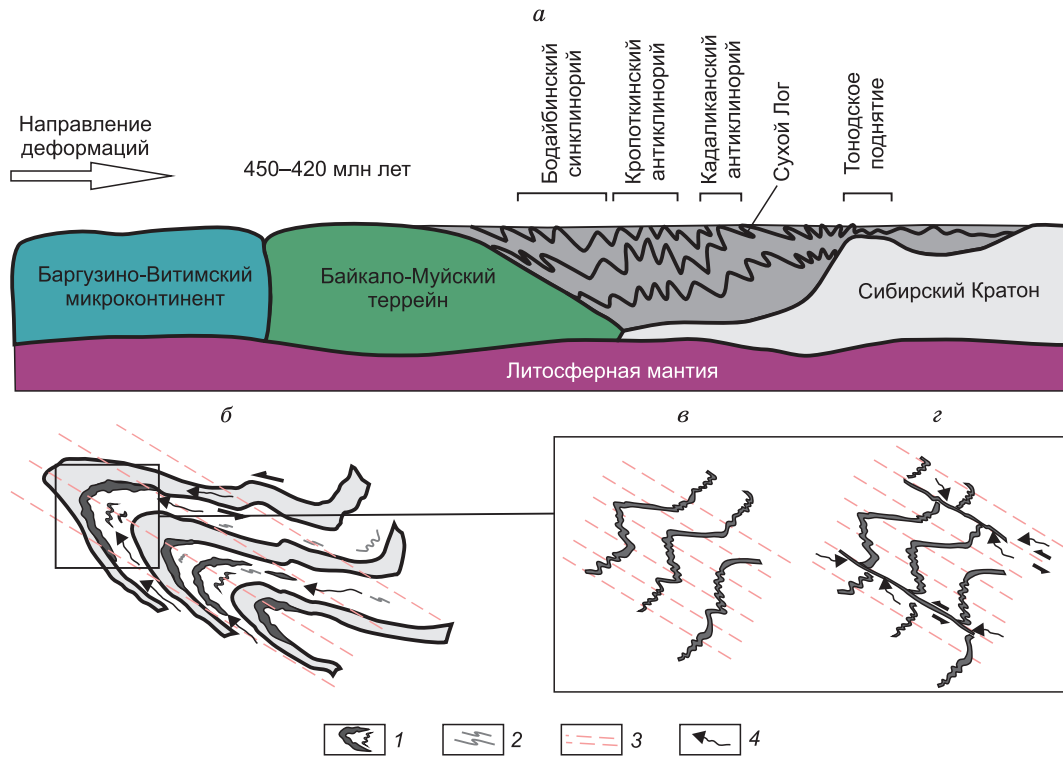
Кварцевые жилы распространены в центральной и западной частях антиклинали, имеют секущее положение по отношению к слоистости (рис. 9), кливажу ОП и, соответственно, к послойным золото-кварц-пиритовым прожилкам. Кварцевые жилы часто будинированы, мощность в раздувах достигает 3 м. Простираение жил составляет  $20\text{--}30^\circ$ , углы падения  $25\text{--}50^\circ$  (см. рис. 3). Данные кварцевые жилы заполняют плоскости зоны хрупкопластического разлома, наложенного на уже сформированную рудоконтролирующую Сухоложскую антиклиналь.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате полученных данных на территории месторождения Сухой Лог из плоскостных текстурных элементов установлены плоскости слоистости  $S_0$ , кливажа ОП ( $S_1$ ) и пострудные кварцевые жилы. Геолого-структурными наблюдениями установлено, что прожилково-вкрапленная золото-кварц-сульфидная минерализация приурочена в основном к слоистости (см. рис. 5, г).

Послойная золотоносная кварц-пиритовая минерализация месторождения Сухой Лог имеет длительный этап формирования и эволюцию состава. Она получила свое начало формирования с этапа седиментогенеза и последующего диагенеза высокоуглеродистых отложений хомолхинской свиты с возрастом 610–600 млн лет [Немеров и др., 2010; Powerman et al., 2015; Будяк и др., 2019; Тарасова и др., 2021]. Данный этап развития бассейна связан с аккреционно-коллизийными событиями Байкало-Муйского композитного террейна (БМКТ) и Сибирского кратона [Парфенов и др., 2003; Рыцк и др., 2007, 2009; Руженцев и др., 2012; Писаревский и др., 2023]. В результате этих событий возник форландовый бассейн, в котором происходило накопление отложений, в том числе и рудовмещающей хомолхинской свиты. Развитие форландового бассейна имело место до самого раннего кембрия. Затем в начале кембрия южная часть Сибирского кратона, включая БПП, а также БМКТ, были совместно перекрыты карбонатными отложениями, которые на платформе рассматриваются как отложения осадочного чехла, а в пределах прилегающих областей складчатого пояса – как отложения шельфа.

Развитие основной складчатости БПП совпало с метаморфическим событием (450 млн лет). В этот же временной отрезок происходил этап непосредственного рудообразования (450–420 млн лет назад) [Лаве-



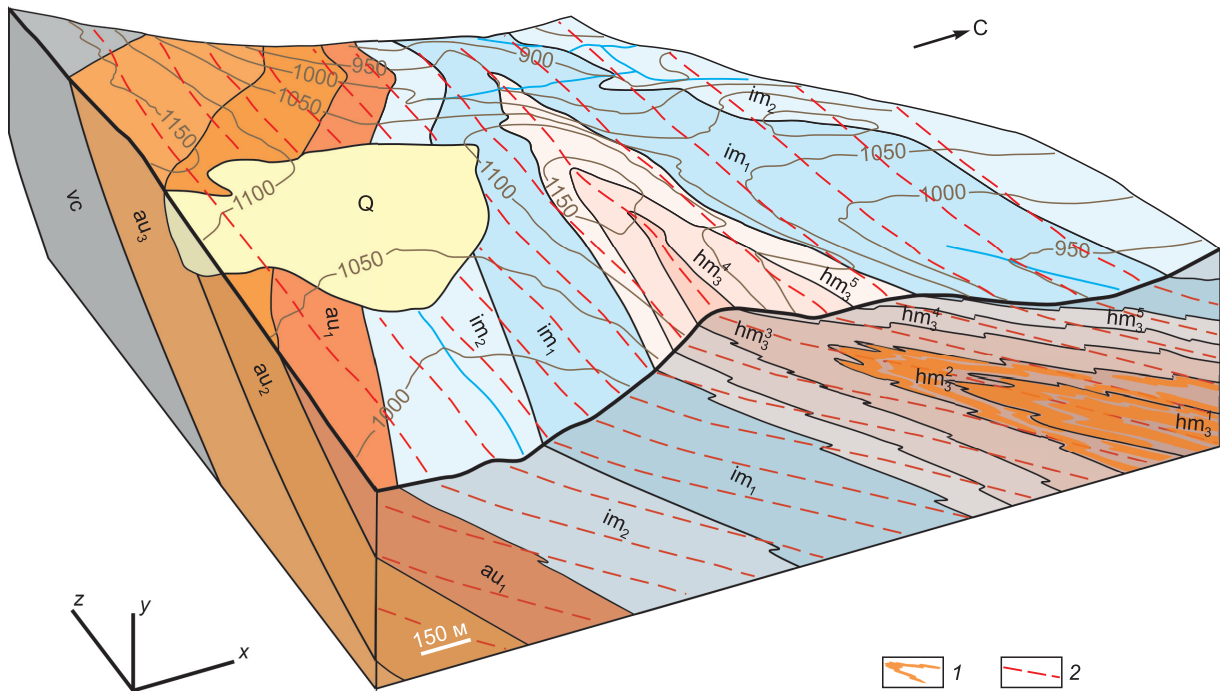
**Рис. 10.** Схема формирования складчатой структуры Байкало-Патомского складчатого пояса. *a* – модель формирования складчатости БПП (по собственным данным и данным листов О-50-ХІІ, О-50-ХІІІ, О-50-І, О-50-ХІХ и др. [Аносов и др., 1988]); *б* – модель формирования структурной ловушки для месторождений «сухоложского» типа [Писаревский и др., 2023]; *в* – схема дисгармоничной складчатости рудных прожилков; *г* – формирование покливажных рудных прожилков в результате микросмещений по кливажу ОП. 1 – послослойные золоторудные зоны; 2 – межслоевые складки и волочения; 3 – кливаж осевой поверхности; 4 – движение флюидов.

ров и др., 2007; Юдовская и др., 2011; Chugaev et al., 2022] (рис. 10, *a*). Генетическая связь рудного процесса, метаморфизма и, соответственно, складчатости, обсуждалась многократно и на сегодняшний день считается абсолютно доказанной [Large et al., 2007; Паленова и др., 2015; Тарасова и др., 2016; Чугаев, 2024; и др.]. Согласно [Зорин и др., 2008], данный этап метаморфических преобразований связан с каледонскими событиями, которые были проявлены в самой южной части БМКТ. Здесь к южной части БМКТ были присоединены венд-кембрийские образования Баргузино-Витимского супертеррейна, являющиеся частью раннепалеозойского Прибайкальского коллизионного метаморфического пояса [Рыцк и др., 2009].

Коллизионные события, проявленные в южной части БМКТ, привели к такому эффекту, при котором БМКТ стал индентером, деформирующим породы БПП в своеобразную структуру, напоминающую структуру выжимания (см. рис. 10, *a*). На юге, в зоне примыкания к БМКТ, складки имеют южную vergentность осевых поверхностей. Далее на север, на территории Кротопокского антиклинория, ОП складок приобретают вертикальное залегание. В районе Кадаликанской антиклинали ОП складок вновь при-

обретают южную vergentность. При приближении к Тонодскому выступу Сибирского кратона ОП складок приобретают северную vergentность. Далее на север, за пределами Тонодского выступа, венд-раннепалеозойские осадочные толщи деформированы в малоамплитудную пологую симметричную складчатость. Важно отметить, что породы БМКТ и Баргузино-Витимского супертеррейна также испытали деформации при каледонских событиях, которые не отображены на рис. 10 ввиду его схематичности.

В результате складкообразования отложений форландового бассейна произошло формирование основных рудоконтролирующих структур, в том числе и Сухоложской антиклинали. По своим генетическим особенностям Сухоложская антиклиналь сочетает в себе признаки структур продольного изгиба со скольжением и структур ламинарного течения, которые реализовались в слоистых породах с разными реологическими свойствами. Естественно, при динамическом воздействии процессы преобразования по-разному протекали в породах различного литологического состава и в разных областях формирующихся структур. На стадии изгиба происходили межслоевые проскальзывания с формированием межслоевых складок волочения (см. рис. 5, *б*) на кры-



**Рис. 11.** Генерализованная геолого-структурная блок-схема месторождения Сухой Лог. 1 – золоторудные зоны; 2 – кливаж ОП (сланцеватость). Свиты: hm – хомолхинская; vc – вачская; au – аунакитская; im – имнянская.

лях Сухоложской антиклинали и осложняющих складок в ее замке. Также формировались межслоевые полости приоткрывания в призмковых частях складок и линейность на крыльях складки (см. рис. 5, в) по траектории перемещения слоев перпендикулярно шарниру антиклинали.

На стадии складкообразования (поздний ордовик–ранний силур) (см. рис. 10, б) Сухоложская антиклиналь приобрела изоклиную форму, где висячее и лежащее крылья в ее сильно сжатой части тесно сближены. На этой стадии был сформирован кливаж ОП. На крыльях антиклинали слоистость имеет субпараллельное направление с кливажом ОП  $S_1$ . Угол между этими плоскостными текстурными элементами составляет в среднем  $10^\circ$ . На крыльях антиклинали также видно послойное распределение рудной минерализации и то, как под острым углом к рудной минерализации подходит кливаж ОП  $S_1$  (см. рис. 7, а). Ввиду того, что крылья антиклинали тесно сближены, послойная золоторудная минерализация, распределенная в замке, висячем и лежащем крыльях, образует сплошную рудную зону типа штокверка, падающего на север под углом  $25^\circ$  и простирающимся вдоль оси антиклинали. На рисунке 11 изображена генерализованная блок-схема месторождения Сухой Лог, где на разрезе показано послойное положение прожилково-вкрапленной золото-кварц-пиритовой минерализации.

Как было указано выше, вмещающие золотое оруждение отложения верхней подсвиты хомолхинской

свиты имеют глинистый состав и обогащены углеродистым веществом ( $C_{орг}$  от 1 до 5 %). Такой состав горных пород снижает их компетентность (устойчивость к деформациям) и придает породам большую пластичность. Карбонатная имнянская свита по составу является более компетентной относительно углеродистых алевролитов хомолхинской свиты. В процессе формирования Сухоложской антиклинали при сдавливании карбонатными породами имнянской свиты глинистые породы хомолхинской свиты в ядре антиклинали деформируются, образуя дисгармоничную складчатость (см. рис. 10, в; 11).

В работе [Large et al., 2007] демонстрируются тонкие прожилки кварц-пиритовой минерализации по плоскостям кливажа ОП, причем плоскости кливажа, заполненные кварц-пиритовыми прожилками, имеют явные признаки смещения (см. рис. 10, з). Судя по данным, представленным в литературе и геологическим наблюдениям, распространение рудных прожилков по кливажу ОП не получило масштабного проявления и на месторождении встречается в редких случаях. Послойные и покливажные прожилки имеют схожий состав, но последние имеют гораздо меньшую мощность. По своим морфологическим и геометрическим признакам эти прожилки являются прожилками альпийского типа, что обусловило схожий состав как покливажных, так и послойных прожилков. Подобная ситуация описана в работе [Жмодик и др., 2006] о металлоносных углеродисто-кремнистых сланцах дабанжалгинской свиты Окинского

## Эволюция формирования месторождения Сухой Лог

| Возраст, млн лет | Давление, кбар | Температура, °C | Событие                                                                                          | Глубина, км | Этап       | Условия                                  | Тип структуры                                                                                   | Рудная минерализация         |
|------------------|----------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 610–600          | 0              | 0               | Осадконакопление продуктивной толщи (хомолхинской свиты). Диагенез                               | 0           | Дорудный   | Литификация                              | Формирование слоистости                                                                         | Пирит-1                      |
| 555              | 1              | 100             | Погружение продуктивной толщи. Метагенез                                                         | 3–5         |            | Катагенные преобразования                |                                                                                                 | Пирит-2                      |
| 450–420          | 2.8 (до 5)     | 440             | Прогрессивный метаморфизм (коллизивно-аккреционные события южного обрамления Сибирского кратона) | 8           | Рудный     | Пластическое состояние                   | Формирование:<br>– складчатости;<br>– кливажа ОП;<br>– трансформации кливажа ОП в сланцеватость | Пирротин, рудоносный пирит-3 |
| 420              | 0.3            | 350–240         | Регрессивный метаморфизм                                                                         | 8           |            | Переход к хрупко-пластическому состоянию | Формирование:<br>– кинг-зон;<br>– микросмещений по кливажу ОП                                   |                              |
| 320–290          | 0.5            | 120             | Термальное событие (формирование Ангаро-Витимского батолита)                                     | 8           | Пострудный | Переход к хрупкому состоянию             | Формирование зоны разлома и выполнение кварцевыми жилами                                        | Пирит-4                      |

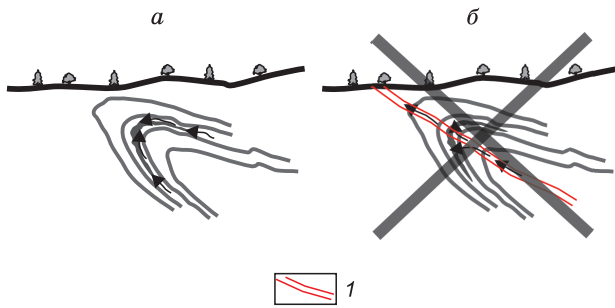
Примечание. Возраст формирования толщи и наложенных событий приведен по данным [Зорин, 2008; Melezhik et al., 2009; Цыганков и др., 2010; Юдовская и др., 2011; Kuznetsov et al., 2013; Чумаков и др., 2013; Powerman et al., 2015; Будяк и др., 2019; Chugaev et al., 2022]; температура приведена по данным [Yudovskaya et al., 2015; Tarasova et al., 2022]; этапы формирования рудной минерализации приведены по данным [Large et al., 2007; Tarasova et al., 2020]. Формирование кинг-зон (кренуляционного кливажа) приводится по [Ванин, Мазукабзов, 2021].

района, где демонстрируется наличие редких мало-мощных прожилков по плоскостям кливажа ОП (в самой работе говорится про серии эшелонированных трещин, параллельных осевой поверхности складки), обогащенных рудным веществом при дислокации слоистых пород в складки продольного изгиба со скольжением вдоль слоев. Время формирования кливажа ОП (систем трещин параллельных ОП складки, по [Жмодик и др., 2006]) отведено к завершающей стадии складкообразования. При этом покливажные прожилки значительно обогащены рудным веществом относительно концентраций, находящихся в самом слое замковой части складки. По всей вероятности, образование рудных прожилков по плоскостям кливажа ОП происходило после формирования самого кливажа ОП на стадии продолжающихся деформационных процессов в условиях смены пластических деформаций на хрупкие (см. рис. 10, з).

Известно, что кливаж ОП формируется ортогонально направлению сжимающих тектонических сил, которые привели к образованию складок продольного изгиба с элементами чистого сдвига [Алексеев, 1990]. По плоскостям кливажа на момент его формирования смещения отсутствуют [Талицкий, 1983] (см. рис. 10, в). Предполагается, что образование рудных прожилков по плоскостям кливажа ОП должно сопровождаться движением флюидов в процессе подвижек по уже сформированным поверхностям кливажа ОП. Из данных, приведенных в рабо-

тах [Large et al., 2007; Юдовская и др., 2011], видно, что покливажные прожилки сосредоточены там, где произошли подвижки по плоскостям кливажа ОП. Смещения по любым поверхностям текстур обычно происходят в условиях хрупкопластических деформаций при положении плоскостей кливажа ОП к осям сжатия от 45° и до существующих 30°. Вероятно, на заключительной стадии деформационного этапа (поздний ордовик–ранний силур) был запущен процесс трансформации кливажа ОП в сланцеватость  $S_1$  (см. рис. 8; 10, з). В таблице показана эволюция формирования месторождения Сухой Лог.

Золоторудная зона по своим физико-механическим параметрам соответствует зоне дизъюнктивного сжатия или дизъюнктивного шва, которая была описана в работе [Гончаров и др., 2005]. Данные дизъюнктивные швы образуются в осевых поверхностях складок. По наличию установленных на месторождении структурных, текстурных и линейных элементов можно говорить, что окончательное формирование Сухоложской антиклинали 3-го порядка происходило на стадии общего сплющивания с возникновением складок ламинарного течения. Послойное распределение золоторудной минерализации обусловило то, что рудные зоны не выходят на поверхность и приурочены к крыльям и замку антиклинали (см. рис. 3; 10, б; 11). В случае, если бы орудование было приурочено к кливажным зонам ОП либо к зоне разлома, то рудные зоны обнажались бы на



**Рис. 12.** Предлагаемая схема формирования складчатой структуры на месторождении Сухой Лог. *а* – наиболее вероятная схема месторождения – гибридная складка (совмещение продольного изгиба с ламинарным течением); *б* – схема месторождения, связанная с разрывным нарушением. 1 – зона разлома. Остальные усл. обозн. см. на рис. 10.

дневной поверхности, пересекая слоистость в замке антиклинали (рис. 12, б).

Анализ приведенных выше геолого-структурных признаков, характерных для месторождения Сухой Лог, позволяет выделить в становлении рудоконтролирующей структуры два парагенезиса: 1) продольный изгиб с течением и 2) общее сплющивание с элементами ламинарного течения. Структурные элементы ламинарного течения свойственны в основном осевой части складки (хомолхинская свита), а продольного изгиба – внешнему обрамлению (имняхская свита). В результате наложения деформации возникла гибридная складка с признаками сходства структур различного генезиса. Осевая часть складки по структурному парагенезису близка к динамометаморфическому [Паталаха, 1970]. Однако зафиксированный структурный парагенезис возник при деформации в осевой части складки, поскольку в ней сосредоточены выходы верхов хомолхинской свиты, обогащенной пластичным пелитоидным материалом. В процессе деформации общего сплющивания проявились деформация удлинения–укорочения, в результате которой возникли сланцеватые текстуры, подобные текстурам в вязких разломах. Данная особенность приводит к противоречивым выводам, связанным со сложностью расшифровки структуры месторождения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили уточнить сценарий геологических событий, проявившихся на территории БПП:

Верхний рифей–венд (610–580 млн лет) – седиментация и диагенез сидерохалькофильно-специализированных осадочных пород, в том числе и хомолхинской свиты. В структурном понимании происходило формирование первичных текстур слоистости  $S_0$ .

Поздний ордовик–ранний силур (450–420 млн лет) – аккреционно-коллизийные события в южном обрамлении Сибирского кратона. Развитие основной складчатости, в том числе и рудоконтролирующих антиклинальных складок. При складкообразовании был сформирован широко распространенный на территории БПП кливаж ОП, а также происходили межслоевые скольжения с образованием межслоевых складок волочения. В результате межслоевых скольжений на плоскостях слоистости сформирована метаморфогенная линейность *A*- и *B*-типа. На заключительной стадии данного этапа произошла трансформация кливажа ОП в сланцеватость ( $S_1$ ).

Ранний карбон (340–330 млн лет) – с данным этапом связано внедрение гранитоидов Ангаро-Витимского батолита. На этом этапе происходило формирование зон хрупкопластических разломов и заполнение их слабозолотоносными кварцевыми жилами. Данные разломы занимают секущее положение по отношению к структурам и текстурам, сформированным на предыдущих этапах.

Проведенный геолого-структурный анализ месторождения Сухой Лог позволил установить, что в пределах рудоконтролирующей Сухоложской антиклинали отсутствуют вязкие разломные зоны синскладчатого (синрудного) деформационного этапа.

Внутренняя структура золоторудной зоны представляет собой зону смятия объема пород в ядре антиклинали, где послойно залегают золото-кварц-пиритовые прожилки разной мощности.

По всей вероятности, месторождение Сухой Лог является классическим примером дисгармоничного смятия пород с разными реологическими свойствами в ядре антиклинали продольного изгиба на стадии общего сплющивания с элементами ламинарного течения. В результате складкообразования и продолжающихся деформаций на крыльях складки происходили межслоевые проскальзывания с формированием межслоевых складок волочения и метаморфогенной линейности в направлении перемещения слоев. В межслоевом пространстве создавались условия для движения растворов и диффузии полезных компонентов, формирование полостей, в которых в связи с возникновением пониженного давления отлагается растворенный материал из вмещающих пород, в том числе и золото. Таким образом, в зонах межслоевых скольжений возникали условия, которые способствовали возникновению локальных гидротермальных процессов.

Месторождение Сухой Лог относится к орогенному типу и характеризуется метаморфогенно-метасоматическим характером перераспределения рудного вещества. В структуре месторождения отсутствуют признаки рудоконтролирующего разлома, по плоскостям которого бы мог поступать эндогенный флюид в зону рудоотложения.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Минобрнауки РФ (проект № 13.1902.24.44, соглашение № 075-15-2024-641).

## ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев В.Б. (1990). Структурный парагенезис зон стресс-метаморфизма // Геотектоника, № 5, с. 21–32.
- Аносов В.С., Степанов Н.Н., Агеева Л.С. (1988). Геологическое строение бассейнов рек Витим, Большой Патом и Жуя (листы О-50-I, III, VII-X, XIII-XVI, XXI, XXII; О-49-VI, XI, XII, XVII, XVIII). Объяснительная записка о результатах космофотогеологического картирования м-ба 1 : 200 000, проведенного в 1984–1988 гг. Иркутск, Иркутский филиал ТФГИ по СФО.
- Будяк А.Е., Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И., Ванг К.Л., Горячев Н.А. (2019). Единая неопротерозойская-раннепалеозойская эволюция рудоносных осадочных комплексов юга Сибирского кратона // ДАН, т. 484, № 3, с. 335–339.
- Будяк А.Е., Тарасова Ю.И., Чугаев А.В., Горячев Н.А., Веливецкая Т.А., Игнатьев А.В. (2024a). Особенности формирования золоторудной минерализации в условиях амфиболитовой фации метаморфизма: месторождение Ыкан (Байкало-Патомский пояс) // Тихоокеанская геология, т. 43, № 3, с. 64–87, DOI: [10.30911/0207-4028-2024-43-3-64-87](https://doi.org/10.30911/0207-4028-2024-43-3-64-87).
- Будяк А.Е., Чугаев А.В., Тарасова Ю.И., Горячев Н.А., Блинов А.В., Абрамова В.Д., Рассохина И.В., Реутский В.Н., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Ванин В.А. (2024b). Геолого-минералогические и геохимические особенности золоторудного месторождения Угахан «сухоложского» типа (Байкало-Патомское нагорье) // Геология и геофизика, т. 65, № 3, с. 446–470, DOI: [10.15372/GiG2023132](https://doi.org/10.15372/GiG2023132), EDN: [SLMNJM](https://www.edn.ru/SLMNJM).
- Буряк В.А. (1982). Метаморфизм и рудообразование. М., Недра, 256 с.
- Буряк В.А., Хмелевская Н.М. (1997). Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). Владивосток, Дальнаука, 156 с.
- Ванин В.А., Мазукабзов А.М. (2021). Структура золоторудного месторождения Голец Высочайший (Северное Забайкалье) // Геодинамика и тектонофизика, т. 12, № 1, с. 60–75, DOI: [10.5800/GT-2021-12-1-0512](https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-1-0512).
- Ванин В.А., Мазукабзов А.М., Юдин Д.С., Блинов А.В., Тарасова Ю.И. (2022). Наложенные деформации герцинского времени в структуре месторождения Голец Высочайший (Байкало-Патомский пояс),  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  данные // Геодинамика и тектонофизика, т. 13, № 1, с. 1–13.
- Вуд Б.Л., Попов Н.П. (2006). Гигантское месторождение золота Сухой Лог (Сибирь) // Геология и геофизика, т. 47, № 3, с. 315–341, EDN: [NDLLUB](https://www.edn.ru/NDLLUB).
- Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С. (2005). Введение в тектонофизику: учеб. пособ. / Ред. Н.В. Короновский. М., КДУ, с. 496.
- Государственный доклад. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 гг. (2018). Ред. Е.А. Киселев. М., ФГБУ ВИМС, 372 с.
- Дубинина Е.О., Чугаев А.В., Иконникова Т.А., Авдеевко А.С., Якушев А.И. (2014). Источники вещества и флюидный режим формирования кварц-карбонатных жил на месторождении золота Сухой Лог, Байкало-Патомское нагорье // Петрология, т. 22, № 4, с. 347–379.
- Жмодик С.М., Пустников А.А., Буслов М.М., Миронов А.Г. (2006). Геодинамика Саяно-Байкало-Муйского аккреционно-коллизийного пояса в неопротерозое–раннем палеозое, закономерности формирования и локализации благородно-металльного руденения // Геология и геофизика, т. 47, № 1, с. 183–197, EDN: [NDLLHJ](https://www.edn.ru/NDLLHJ).
- Зорин А.Ю., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Пресняков С.Л., Сергеев С.А. (2008). Силурийский возраст главных складчатых деформаций рифейских отложений Байкало-Патомской зоны // ДАН, т. 423, № 2, с. 228–233.
- Иванов А.И. (2014). Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы). М., ЦНИГРИ, 215 с.
- Константинов М.М. (2010). Золоторудные месторождения России. М., Акварель, 365 с.
- Константинов М.М., Некрасов Е.М., Сидоров А.А., Стружков С.Ф. (2000). Золоторудные гиганты России и мира. М., Научный мир, 272 с.
- Кузнецов В.Г. (1977). Золоторудное месторождение Сухой Лог (геологическое строение и подсчет запасов по состоянию на 1 февраля 1977 года). Иркутск.
- Лаверов Н.П., Чернышев И.В., Чугаев А.В., Банрова Э.Д., Гольцман Ю.В., Дистлер В.В., Юдовская М.А. (2007). Этапы формирования крупномасштабной благороднометалльной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь): результаты изотопно-геохронологического изучения // ДАН, т. 415, № 2, с. 236–241.
- Лобанов М.П., Радченко К.М., Чернецкая И.И., Охотников И.А., Номоконова Ю.А., Новикова Э.Ф. (1976). Рудонносные углистые пелитоиды линейных зон смятия Патомского нагорья // Геология и геофизика, № 9, с. 34–45.
- Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Корнилова Т.А. (2010). Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона // Геология и геофизика, т. 51, № 5, с. 729–747, EDN: [MKTVOD](https://www.edn.ru/MKTVOD).
- Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Плотинская О.Ю., Новоселов К.А., Масленников В.В., Котляров В.А., Блинов И.А., Кузьменко А.А., Грибедова И.Г. (2015). Эволюция состава пирита на золоторудных месторождениях Копыловское и Кавказ в черносланцевых толщах (Бодайбинский район, Россия) по данным РСМА и ЛА-ИСП-МС // Геология рудных месторождений, т. 57, № 1, с. 71.
- Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г., Беличенко В.Г., Булгатов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Томуртогов О., Янь Х. (2003). Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология, т. 22, № 6, с. 1–41.
- Паталаха Е.И. (1970). Механизм возникновения структур течения в зонах смятия // Алма-Ата, Наука, 216 с.
- Писаревский С.А., Иванов А.В., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Ванин В.А., Дымшиц А.М., Шарыгин И.С., Четвертаков И.В., Гладкочуб Е.А., Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Шелохов И.А., Смирнов А.С., Вахромеев А.Г. (2023). Сибирский кратон и его складчатые обрамления в истории Земли: палеогеография, палеогеодинамика и полезные ископаемые. Иркутск, Восточно-Сибирская типография, 232 с.
- Руженцев С.В., Минина О.Р., Некрасов Г.Е., Аристов В.А., Голионко Б.Г., Доронина Н.А., Лыхин Д.А. (2012). Байкало-Витимская складчатая система: строение и геодинамическая эволюция // Геотектоника, № 2, с. 3–28.
- Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев С.Г., Щегольков Ю.В., Алышева Э.И., Борисовский С.Е. (2008). Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе // Геология рудных месторождений, т. 50, № 1, с. 3–46.
- Рышк Е.Ю., Ковач В.П., Коваленко В.И., Ярмолук В.В. (2007). Структура и эволюция континентальной коры Байкальской складчатой области // Геотектоника, № 6, с. 23–51.

- Рыцк Е.Ю., Ковач В.П., Макеев А.Ф., Богомолов Е.С., Ризванова Н.Г. (2009). Восточная граница Прибайкальского коллизионного пояса: геологические, геохронологические и Nd-изотопные данные // *Геотектоника*, № 4, с. 16–26.
- Рыцк Е.Ю., Сальникова Е.Б., Ярмлюк В.В., Андреев А.А., Богомолов Е.С., Лебедева Ю.М., Великославинский С.Д., Анисимова И.В., Плоткина Ю.В., Федосеенко А.М. (2019). Раннекембрийский возраст и коровые источники гранитоидов Горячинского плутона (Северное Прибайкалье): геодинамические следствия // *ДАН*, т. 484, № 4, с. 486–471.
- Савчук Ю.С., Волков А.В. (2019). Крупные и суперкрупные орогенные золотые месторождения: геодинамика, структура, генетические следствия // *Литосфера*, т. 19, № 6, с. 813–833, DOI: [10.24930/1681-9004-2019-19-6-813-833](https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-6-813-833).
- Станевич А.М., Мазуказов А.М., Постников А.А., Немеров В.К., Писаревский С.А., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Корнилова Т.А. (2007). Северный сегмент палеоазиатского океана в неопротерозое: история седиментогенеза и геодинамическая интерпретация // *Геология и геофизика*, т. 48, № 1, с. 60–79, EDN: [NYTYYZ](https://www.edn.ru/nytyyz/).
- Талицкий В.Г. (1983). Кливаж плейчатости в метаморфических породах Макбальского брахиантиклинория (Северный Тянь-Шань) // *Вестник моск. ун-та. Серия 4. Геология*, № 5, с. 34–38.
- Тарасова Ю.И., Соцкая О.Т., Скузоватов С.Ю., Ванин В.А., Куликова З.И., Будяк А.Е. (2016). Минералого-геохимические свидетельства полистадийности формирования месторождения Чертово Корыто // *Геодинамика и тектонофизика*, т. 7 (4), с. 663–677.
- Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Иванов А.В., Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Радомская Т.А., Блинов А.В., Бабяк В.Н. (2021). Типоморфизм, типохимизм и изотопно-геохимические характеристики сульфидов железа месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь) // *Записки РМО*, т. 150, № 1, с. 63–75.
- Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Блинов А.В., Горячева Е.М. (2022). Типоморфизм сульфидов золоторудного месторождения Угахан (Байкало-Патомское нагорье) // *Докл. РАН. Науки о земле*, т. 503, № 1, с. 12–17, DOI: [10.31857/S2686739722030136](https://doi.org/10.31857/S2686739722030136).
- Цыганков А.А., Литвиновский Б.А., Джань Б.М., Рейков М., Лю Д.И., Ларионов А.Н., Пресняков С.Л., Лепехина Е.Н., Сергеев С.А. (2010). Последовательность магматических событий на позднепалеозойском этапе магматизма Забайкалья (результаты U-Pb изотопного датирования) // *Геология и геофизика*, т. 51, № 9, с. 1249–1276, EDN: [MVSOGD](https://www.edn.ru/mvsogd/).
- Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н., Хубанов В.Б., Буянтугев М.Д. (2017). Геодинамика позднебайкальского батолитообразования в Западном Забайкалье // *Петрология*, т. 25, № 4, с. 395–418.
- Чугаев А.В. (2024). Золоторудные месторождения орогенного типа северного Забайкалья (Россия): геологическое строение, возраст, источники вещества и генезис // *Геохимия*, т. 69, № 9, с. 752–830, DOI: [10.31857/S0016752524090015](https://doi.org/10.31857/S0016752524090015).
- Чугаев А.В., Чернышев И.В. (2017). Pb-Pb изотопная систематика орогенных месторождений золота Байкало-Патомского складчатого пояса (Северное Забайкалье, Россия) и оценка роли неопротерозойской коры в их формировании // *Геохимия*, № 11, с. 1027–1040.
- Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В., Дубинина Е.О., Гареев Б.И., Шатагин К.Н., Тарасова Ю.И., Горячев Н.А., Скузоватов С.Ю. (2018). Изотопные (Sm-Nd, Pb-Pb и  $\delta^{34}\text{S}$ ) и геохимические характеристики метасадочных пород Байкало-Патомского пояса (Северное Забайкалье) и эволюция осадочного бассейна в неопротерозойское время // *Петрология*, т. 26, № 3, с. 213–244.
- Чумаков Н.М., Семихатов М.А., Сергеев В.Н. (2013). Опорный разрез вендских отложений юга Средней Сибири // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, т. 21, № 4, с. 26–51.
- Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов Н.В., Мохов А.В., Антонов А.В., Сергеев С.А. (2011). Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении сухой лог по данным U-Th-Pb изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов // *Геология рудных месторождений*, т. 53, № 1, с. 32–64.
- Ярмлюк В.В., Коваленко В.И., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. (1997). Ангаро-Витимский батолит: к проблеме геодинамики батолитообразования в Центрально-Азиатском складчатом поясе // *Геотектоника*, № 5, с. 18–32.
- Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Yu.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Yu.I., Gareev B.I., Batalin G.A., Rasokhina I.V., Oleinikova T.I. (2022).  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia) // *Ore Geol. Rev.*, v. 144, 04855, DOI: [10.1016/j.oregeorev.2022.104855](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855).
- Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.Yu., Lishnevskii E.N. (2004). Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia // *Ore Geol. Rev.*, v. 24 (1–2), p. 7–44, DOI: [10.1016/j.oregeorev.2003.08.007](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.007).
- Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S. (2001). Orogenic gold and geologic time: a global synthesis // *Ore Geol. Rev.*, v. 18 (1–2), p. 1–75, DOI: [10.1016/S0169-1368\(01\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(01)00016-6).
- Goldfarb R.J., Taylor R., Collins G., Goryachev N.A., Orlan-dini O.F. (2014). Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia // *Gondwana Res.*, v. 25 (1), p. 49–102, DOI: [10.1016/j.gr.2013.03.002](https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.03.002).
- Kuznetsov A.B., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Letnikova E.F., Kaurova O.K., Konstantinova G.V. (2013). Age constraints on the Neoproterozoic Baikal Group from combined Sr isotopes and Pb-Pb dating of carbonates from the Baikal type section, southeastern Siberia // *J. Asian Earth Sci.*, v. 62, p. 51–66, DOI: [10.1016/j.jseae.2011.06.003](https://doi.org/10.1016/j.jseae.2011.06.003).
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang Z. (2007). Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia // *Econ. Geol.*, v. 102 (7), p. 1233–1267, DOI: [10.2113/gsecongeo.102.7.1233](https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233).
- Meffre S., Large R.R., Scott R.J., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V.V., Hergt J.M. (2008). Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia // *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 72 (9), p. 2377–2391, DOI: [10.1016/j.gca.2008.03.005](https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.03.005).
- Melezhik V.A., Pokrovsky B.G., Fallick A.E., Kuznetsov A.B., Bujakaite M.I. (2009). Constraints on  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  of Late Ediacaran seawater: insight from Siberian high-Sr limestones // *J. Geol. Soc.*, v. 166 (1), p. 183–191, DOI: [10.1144/0016-76492007-171](https://doi.org/10.1144/0016-76492007-171).
- Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N., Kapitonov I., Hourigan J. (2015). Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia // *Precambrian Res.*, v. 267, p. 39–71, DOI: [10.1016/j.precamres.2015.05.015](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.015).
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., Reutsky V.N., Abramova V.D., Gareev B.I., Bryukhanova N.N., Parshin A.V. (2020). Mineralogical and isotope-geochemical ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  and Pb-Pb) Characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): Constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits // *Ore Geol. Rev.*, v. 119, 103365, DOI: [10.1016/j.oregeorev.2020.103365](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365).
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Radomskaya T.A., Blinov A.V.,

- Babyak V.N. (2022).** Indicator and isotope geochemical characteristics of iron sulfides from the Golets Vysochaishy deposit, East Siberia // *Geology of Ore Deposits*, v. 64 (7), p. 503–512, DOI: [10.1134/S1075701522070108](https://doi.org/10.1134/S1075701522070108).
- Vursiy G.L., Zibrov I.A., Lobov S.G., Yakubchuk A.S. (2020).** The Sukhoi Log gold deposit, Russia, in: Sillitoe R.H., Goldfarb R.J., Robert F., Simmons S.F. (Eds.). *Geology of the World's Major Gold Deposits and Provinces*. Society of Economic Geologists, Littleton, v. 23, p. 526–543, DOI: [10.5382/SP.23.25](https://doi.org/10.5382/SP.23.25).
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiyev N.N. (2015).** Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits // *Geosci. Front.*, v. 7 (3), p. 453–481, DOI: [10.1016/j.gsf.2015.07.010](https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010).