

## РОЛЬ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА ОРОГЕННОГО ТИПА (Бодайбинский регион, Россия)

А.Е. Будяк, Ю.И. Тарасова✉

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Поступила в редакцию: 24.09.2024

Принята в печать: 25.03.2025

Опубликована онлайн: 30.03.2025

DOI: [10.15372/GIG2025122](https://doi.org/10.15372/GIG2025122)

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

Ссылка для цитирования:

**Будяк А.Е., Тарасова Ю.И. (2025).**

Роль органического углерода при формировании месторождений золота орогенного типа (Бодайбинский регион, Россия) // Геология и геофизика, т. 66, № 7, с. 860–882, DOI: [10.15372/GIG2025122](https://doi.org/10.15372/GIG2025122), EDN: [ZJKXZT](https://www.edn.ru/ZJKXZT).

© А.Е. Будяк, Ю.И. Тарасова, 2025

✉E-mail: [j.tarasova84@yandex.ru](mailto:j.tarasova84@yandex.ru)

В статье обобщены результаты многолетних геохимических исследований, посвященных региональной геологии Бодайбинского синклиория в целом и локальной (рудной) геологии отдельных золоторудных месторождений орогенного типа, локализованных в пределах крупнейшей в мире Ленской металлогенической провинции. Основное внимание уделено роли органического вещества в процессе рудогенеза. В работе представлены результаты исследования преобразования органического вещества углеродистых сланцев (растворимого (битумоида) и нерастворимого углеродистого вещества) в процессе катагенетических и метаморфических преобразований. Продемонстрировано отсутствие значимой корреляционной связи нерастворимого углерода с золотом. Это объясняется низкой сорбционной емкостью графитизированного органического вещества относительно его первичного (докатагенного) аналога. В битумоидах углеродистых сланцев идентифицированы сложные эфиры карбоновых кислот (липиды), подтверждающие бактериально-планктоногенное происхождение первичного органического вещества осадков. Сопоставимое содержание золота в битумоидах из пород в пределах месторождений и отложений на удалении от таковых указывает на первичную золотоносность органического флюида. Сделан вывод, что углерод играет одну из ведущих ролей в процессе мобилизации и миграции золота на стадии катагенных преобразований. Однако мнение о том, что органическое вещество может служить барьером на пути металлоносных гидротерм, не подтверждается для Ленской золотоносной провинции. На основании катагенной модели формирования нефтяных месторождений была показана высокая перспективность формирования золотого оруденения в пределах дальнетайгинско-жуинского стратиграфического уровня неопротерозойского разреза Байкало-Патомского региона.

*Органическое вещество, золоторудные месторождения орогенного типа, диагенез, катагенез, метаморфизм*

### ВВЕДЕНИЕ

Прикладная геология базируется на двух параллельно развивающихся направлениях – наука о твердых и жидких полезных ископаемых. В статье рассматривается вопрос сопряжения данных направлений, касающийся формирования рудных и газонефтяных месторождений, который, несмотря на ряд убедительных публикаций [Горжевский и др., 1990; Немеров и др., 2010; Sugiyama, 2015; Tarasova et al., 2020; и др.], так и остается за рамками общепринятых концепций их развития.

Ряд общих закономерностей происхождения месторождений рудного сырья и нефтяных месторождений, включающих в себя пространственное размещение, а также физико-химические условия их формирования, были отмечены еще в начале XX в. В.И. Вернадским. Эту идею развивали Г.Л. Поспелов [1967], обративший внимание на значительные сходства структурных и геоморфологических характе-

ристик рудных и нефтегазовых месторождений, В.Н. Холодов [1983, 2006], сделавший упор на теории отложения углеродсодержащих толщ, обогащенных рудным компонентом. Важным шагом в развитии данного направления является работа Ф.П. Мельникова [1989], который на основе изучения флюидных включений в минералах рудных месторождений сделал вывод о генетическом родстве рудного минералообразования с первичным нефтяным флюидом. Необходимо отметить великолепные работы Д.И. Горжевского с соавторами [1990], Б.А. Соколова и В.Н. Холодова [1993], детально описавших вопрос генетической связи органического флюида и рудной минерализации.

Связь потенциально нефтеносных отложений и золоторудной минерализации для месторождений орогенного типа, территориально размещенных в пределах южной окраины Сибирского кратона, была описана В.А. Буряком [1982]. Им была предложена концепция метаморфогенно-метасоматического пе-

нераспределения рудного вещества из вмещающих черносланцевых пород. В дальнейшем предложенный механизм формирования месторождений «сухоложского» генетического типа (СГТ) был развит в работах [Large et al., 2007; Немеров и др., 2010; Tarasova et al., 2020]. В предложенных работах утверждается, что нефте- и рудообразование являются обязательными частями единого процесса формирования месторождений СГТ. Смена этапов: седиментация → диагенез → катагенез (нефтеобразование) → метаморфизм (золотоотложение) – это единый эволюционный процесс, обусловленный полихронным развитием территории. С позиции общего развития рудной системы этот процесс протекает однонаправленно и заключается в следующем: 1) развитии бассейна осадконакопления с формированием углеродистых отложений, обогащенных элементами сидерохалькофильной специализации; 2) катагенном переводе исходного органического вещества (ОВ) и рудных компонентов в подвижное состояние (флюид); 3) миграции катагенного породного флюида в зоны пониженных *PT*-параметров; 4) концентрации (аккумуляции) в виде месторождений полезных ископаемых в результате перехода рудных компонентов из флюидного состояния в концентрированное твердое, а углеводородных – в твердое (графит) или газообразное.

Из всего вышесказанного вытекает цель данной работы, которая заключается в обосновании роли ОВ при оценке ресурсного потенциала на золотое оруденение Бодайбинского региона. Для этого использовался материал, полученный исследовательским коллективом под руководством В.К. Немерова и Э.А. Развозжаевой, начиная с конца XX в. до настоящего времени. Ввиду того, что данная статья базируется на реализации метаморфогенно-метасоматической концепции при формировании месторождений, ниже более подробно опишем основные ее моменты.

**Модель формирования месторождений СГТ** [Немеров и др., 2010; Tarasova et al., 2020]. Золоторудные месторождения СГТ в пределах Бодайбинского синклиналия приурочены к бужуихтинской, хомолхинской и аунакитской свитам (дальнетайгинско-жуинская группа) (рис. 1), накопление которых происходило в полуизолированном бассейне типа foreland [Жмодик и др., 2006; Станевич и др., 2007, 2010; Немеров и др., 2010; Будяк и др., 2016; Чугаев и др., 2018].

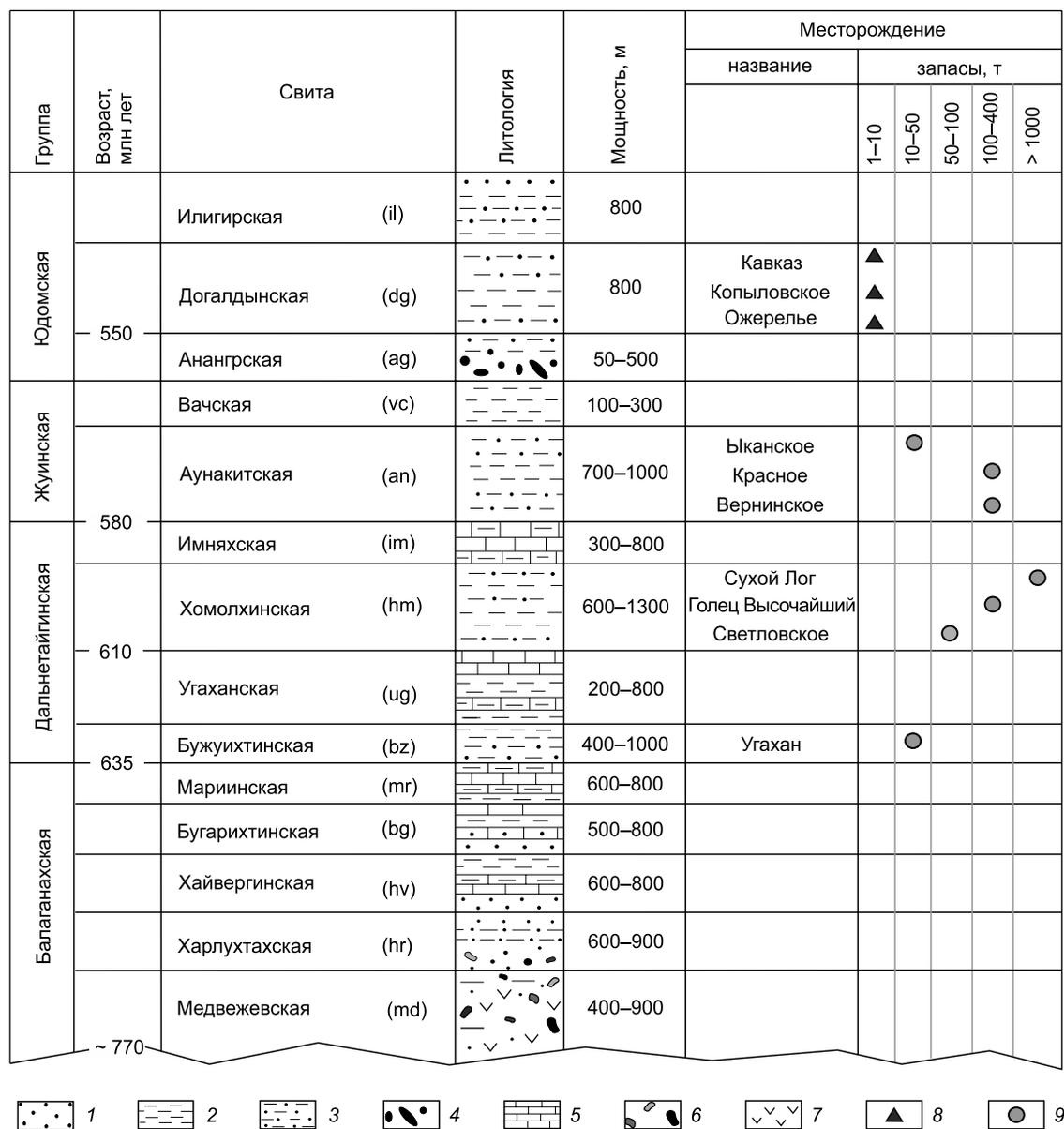
В основу предлагаемой модели формирования месторождений СГТ положена последовательность развития Бодайбинского палеобассейна с последовательным концентрированием золота на каждом из этапов преобразований осадочных толщ (рис. 2). Выделяется три основных этапа формирования золоторудной минерализации: I – конседиментационный (седиментация и диагенез, 635–580 млн лет), II – раннеколлизийный (катагенез, 570–550 млн лет), III – коллизийный (метаморфизм, 450–420 млн лет). Воз-

растные границы детально обоснованы в работах А.В. Чугаева [Chugaev et al., 2022; Чугаев, 2024].

*Этап I (седиментация и диагенез, 635–580 млн лет).* Осадконакопление бужуихтинской, хомолхинской и аунакитской свит с повышенным содержанием  $C_{орг}$  происходит в условиях склона и котловины задугового бассейна (бужуихтинская свита) [Чугаев и др., 2018]. Вещественный состав и их сидерохалькофильная специализация с надкларковым содержанием золота сформированы в результате поступления гидротермальных эксгалаций в области задугового спрединга, а также сноса материала с Муйской дуги. На этом же этапе происходит диагенетическое преобразование осадка с микробиологической сульфатредукцией и формированием диагенетической пиритовой минерализации (пирит-1). Золото при этом связано с рассеянной пиритовой минерализацией [Large et al., 2007; Таусон и др., 2009] и ОВ [Гольдберг, 1990; Полякова, 1996; Развозжаева и др., 2003; Немеров и др., 2009; Развозжаева, 2015].

*Этап II (катагенез, 570–540 млн лет).* Возникновение орогена с юга в результате аккреции Байкало-Муйского композитного террейна и более молодых островодужных систем к южной периферии Сибири [Станевич и др., 2010; Гордиенко, Метелкин, 2016] спровоцировало тектоническое напряжение в северном направлении и резкое сокращение акватории бассейна седиментации, что привело к формированию пологих складчатых структур [Станевич и др., 2010; Ванин и др., 2022, 2025]. По мере развития денудации возникшего орогена в бассейн поступает молассоидный материал, перекрывающий отложения дальнетайгинско-жуинской группы [Чугаев и др., 2018]. Рост литостатического давления и температур в черносланцевых отложениях бужуихтинской, хомолхинской и аунакитской свит создает условия, достаточные для начала процесса катагенетических трансформаций ( $T = 90–150^\circ$  и  $P = 1$  кбар). Формирование катагенного флюида и его миграция в область меньших давлений сопровождаются выщелачиванием рудных компонентов нефтематеринских отложений. Его постепенное нагнетание в сводовые части пологих антиклиналей обеспечивает здесь аномальный фон золота и формирование сульфидной минерализации (пирит-2).

*Этап III (метаморфизм, 450–420 млн лет).* В это время происходит непосредственно формирование рудных тел [Лаверов и др., 2007; Meffre et al., 2008; Юдовская и др., 2011; Чугаев и др., 2014; Chugaev et al., 2022]. Тектоническая активизация данного этапа проявилась в интенсивном складкообразовании, зональном метаморфизме и анатектическом гранитообразовании *S*-типа [Зорин и др., 2008]. Отмечается смена рудно-минералогических ассоциаций, связанная с постепенным изменением *PT*-параметров системы. Данный этап делится на две стадии:

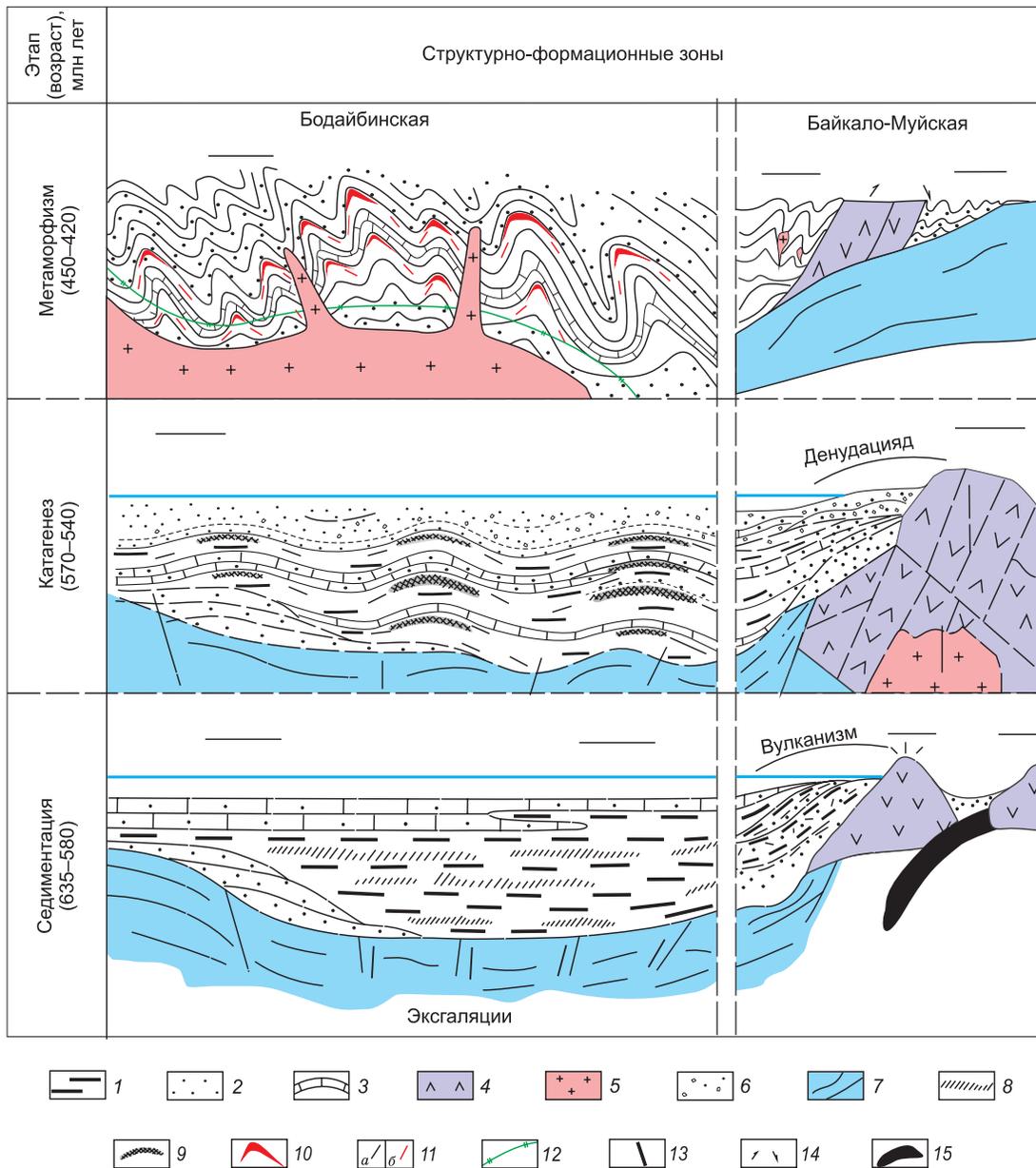


**Рис. 1.** Стратиграфическая схема размещения месторождений Бодайбинского синклиория по материалам: [Melezhik et al., 2009; Юдовская и др., 2011; Kuznetsov et al., 2013; Чумаков и др., 2013; Покровский, Буякайте, 2015; Powerman et al., 2015]. 1 – песчаники; 2 – пелиты; 3 – алевролиты; 4 – гравелиты; 5 – карбонаты; 6 – конгломераты; 7 – туфы; 8 – месторождения прожилково-вкрапленного золотокварцевого типа; 9 – месторождения штокверкового «сухоложского» типа.

– этап III, стадия 1. Прогрессивная стадия метаморфизма характеризуется увеличением *PT*-параметров до значений, характерных для метаморфизма зеленосланцевой фации ( $T \sim 300\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P \sim 3\text{--}4$  кбар). Происходит карбонизация ОБ до состояния неструктурированного графита. Распад металлоносных нефтидов сопровождается образованием  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{N}$ . Золото и сопутствующие элементы теряют связь с ОБ, частично переходя в метаморфогенные углекислотные растворы [Немеров и др., 2010; Развозжаева, 2015]. На данном этапе формируется высокотемпературная минеральная ассоциация пирротин–арсенопирит–халькопирит. Здесь же уста-

новлен сингенный поровый флюид с фазой азота высокой плотности (до  $0.53\text{ г/см}^3$ ) [Развозжаева и др., 2002; Distler et al., 2004];

– этап III, стадия 2. Регрессивная стадия метаморфизма сопровождается снижением *PT*-параметров ( $T = 270\text{--}320\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 0.3\text{--}0.5$  кбар). Столь значительная декомпрессия обусловлена появлением зон трещиноватости вдоль осей складок в обезвоженных толщах [Дамдинов и др., 2019]. Как следствие, кислый флюид направляется в образовавшиеся зоны разуплотнения, происходит формирование прожилково-вкрапленной минеральной ассоциации: пирит-3, арсенопирит-2, сфалерит, галенит с золотом.



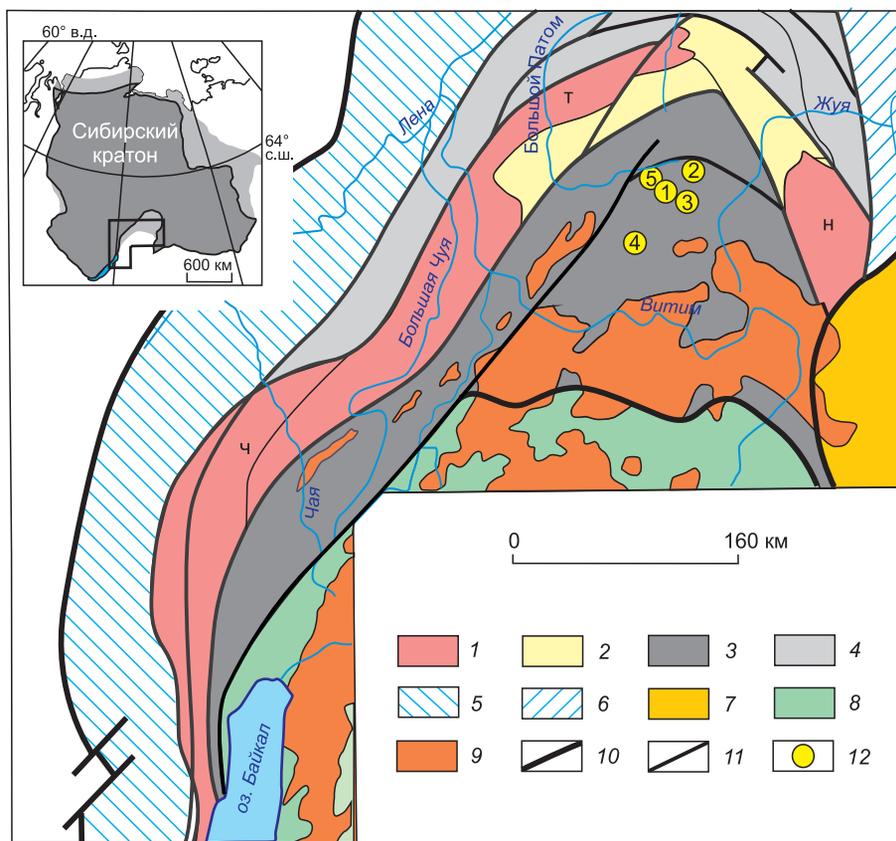
**Рис. 2.** Схема формирования золоторудных месторождений СГТ [Tarasova et al., 2020]: 1 – углеродистые алевропелиты; 2 – алевролиты, песчаники; 3 – карбонатные и терригенно-карбонатные отложения; 4 – вулканиты островодужного комплекса; 5 – анатектические граниты; 6 – молассоидные отложения; 7 – кристаллический фундамент; 8 – синдиagenетические надкларковые концентрации металлов; 9 – катагенетические скопления металлоносных нафтидов; 10 – метаморфогенно-метасоматические руды; 11 – направление миграции флюидов: *a* – катагенное, *b* – рудное; 12 – изограда граната регионального метаморфизма; 13 – разрывные нарушения; 14 – направление движения блоков; 15 – субдуцирующая литосфера.

Согласно представленной схеме [Немеров и др., 2010], ОВ играет ключевую роль на протяжении всей эволюции рудообразования.

**Геологическое строение региона.** Месторождения, рассматриваемые в данной статье (стратиграфически снизу вверх: Угахан – бужуйхтинская свита, Сухой Лог и Голец Высочайший – хомолхинская свита, Красный – аунакитская свита), расположены на территории Байкальской горной области (южное обрамление Сибирской платформы) и локализованы в

центре Бодайбинского синклиория (рис. 3) [Иванов и др., 2014].

В пределах Бодайбинской зоны выделяются складчатые структуры второго порядка – Бодайбинская, Маракано-Тунгусская и Хомолхино-Илигирская синклинали, которые разделены Кропоткинской и Кадаликанской антиклиналями (см. рис. 3). Исследуемые в данной статье золоторудные месторождения приурочены к антиклинальным структурам третьего порядка, осложняющим вышеперечисленные синклинали.



**Рис. 3.** Схема геологического строения Байкало-Патомской золоторудной провинции (по [Иванов, 2014]). 1 – выступы до-рифейского фундамента (Н – Нечерский, Т – Тонодский, Ч – Чуйский); 2 – часть синклиория с фундаментом, перекрытым рифейскими отложениями; 3, 4 – синклиории: 3 – Мамско-Бодайбинский, 4 – Байкало-Патомский; 5, 6 – Сибирская платформа: зоны линейных складок, сформированные в краевой части пассивной континентальной окраины: 5 – Приленская, 6 – Причарская; 7 – дорифейские образования Алданского щита и Становой зоны; 8 – разновозрастные образования Байкало-Муйского пояса; 9 – Верхнепалеозойские гранитоиды (Ангаро-Витимский батолит); 10 – главные разломы, разделяющие крупные литосферные блоки; 11 – разломы внутриблоковые; 12 – месторождения золота и их номера (1 – Сухой Лог, 2 – Голец Высочайший, 3 – Вернинское, 4 – Красный, 5 – Угахан, 6 – Ыканское).

В пределах неопротерозойских терригенно-карбонатных отложений Бодайбинского синклиория выделены медвежевско-балаганахская, дальнетайгинская, жуинская и юдомская группы (см. рис. 1). Осадочные толщи групп представляют собой переслаивание известковистых пород с филлитовидными сланцами и метапесчаниками. Накопление осадочных пород медвежевско-балаганахской группы происходило в открытом морском бассейне на пассивной окраине Сибирского кратона на протяжении тонийского–криогенового периодов неопротерозоя. Заложение палеобассейна было обусловлено окраинно-континентальным рифтогенезом, вызванным распадом суперконтинента Родиния (790–740 млн лет) [Кузьмин и др., 2006; Li et al., 2008; Богданова и др., 2009; Гладкочуб и др., 2013]. Залегающие стратиграфически выше отложения дальнетайгинско-жуинской (635–580 млн лет) и юдомской групп (580–540 млн лет) эдиакарского возраста [Melezhik et al., 2009; Чумаков и др., 2011, 2013; Kuznetsov et al., 2013; Гладкочуб и др., 2013; Powerman et al., 2015; Покровский,

Буякайте, 2015] отлагались в условиях эволюции от задугового бассейна к бассейну форланда в результате аккреции Байкало-Муйского террейна к Сибирскому континенту [Жмодик и др., 2006]. В результате раннекембрийского регионального метазенеза погружения (555–520 млн лет) [Виноградов и др., 1996] метаосадки были смяты в крупные линейные и дугообразные складки субширотного направления, осложненные более мелкой складчатостью высоких порядков, при широком развитии дизъюнктивных нарушений. В результате складчатых деформаций в пределах центральной части Байкало-Патомской провинции сформировалась Бодайбинская зона, которая с юга ограничивается выходами палеозойских гранитоидов Ангаро-Витимского батолита [Ярмолюк и др., 1997; Цыганков и др., 2007]. Во внешней приплатформенной части, на западе, севере и востоке, Бодайбинская зона ограничена Прибайкальской и Приленской системами краевых прогибов, отделенных от центральной части Чуйским, Тонодским и Нечерским поднятиями.

**Геолого-минералогические особенности золоторудных месторождений Байкало-Патомской золоторудной провинции.** Основные запасы коренного золота в Бодайбинском золоторудном районе связаны с месторождениями, локализованными в неопротерозойских метаосадочных породах черносланцевой формации Байкало-Патомского складчатого пояса [Буряк, 1982; Буряк, Хмелевская, 1997; Буряк, Бакулин, 1998; Large et al., 2007; Константинов, 2010; Будяк и др., 2019; Чугаев, 2024; и др.]. В настоящее время в пределах Бодайбинского региона, насчитывается более десятка крупно- и среднеобъемных (> 50 т золота) месторождений, которые большинством исследователей относятся к «сухоложскому» типу орогенных месторождений золота [Буряк, Бакулин, 1998; Буряк и др., 2002; Вуд, Попов, 2006; Дубинина и др., 2014; Иванов, 2014; Чугаев, Чернышев, 2017; Tarasova et al., 2020; Chugaev et al., 2022]. Экономическая значимость месторождений, относимых к «сухоложскому» типу, связана с прожилково-вкрапленной минерализацией. Золотоносные кварцевые жилы, секущие основные рудные тела, не имеют собственной экономической значимости [Чугаев, 2024], ввиду чего в данной статье рассматриваться не будут.

Прожилково-вкрапленные руды образуют различные по протяженности пластовые тела, приуроченные к замкам и крыльям антиклинальных складок. Главными минералами в прожилково-вкрапленных рудах являются сульфиды: пирит, пирротин и арсенопирит, в меньшей степени галенит, сфалерит. Их количество и соотношение сильно варьируют как внутри рудных тел отдельных месторождений, так и от приуроченности к тому или иному стратиграфическому уровню. Сульфиды в рудах присутствуют в виде отдельных зерен и скоплений, имеющих часто кварцевую оторочку (Q2), а также совместно с кварцем образуют линзовидные выделения и маломощные кварцевые прожилки (Q3) [Tarasova et al., 2020], ориентированные субпараллельно полосчатости метаосадочных пород [Ванин и др., 2022, 2025]. Золото в прожилково-вкрапленных рудах представлено в основном субмикронными самородными выделениями (редко до 1–2 мм) в сростании с сульфидами, реже в жильном кварце, секущем основные рудные тела (Q4) [Буряк, Бакулин, 1998; Константинов, 2010; Паленова и др., 2015; Сокерина и др., 2016; Tarasova et al., 2020; и др.].

Золотоносные кварцевые жилы пространственно совмещены с зонами прожилково-вкрапленной сульфидной минерализации и занимают по отношению к ней секущее положение. Рудные минералы в кварцевых жилах распределены крайне неравномерно и представлены главным образом пиритом и пирротинном, реже галенитом, сфалеритом и самородным золотом. Золото представлено в виде отдельных выделений размером до 2 мм или гнездовых скоплений. За пределами месторождений кварцевые жилы не золотоносны.

Большинством исследователей отмечается сложный парагенезис сульфидных минералов, формирующихся последовательно относительно друг друга. Разными авторами выделяется от четырех до шести генераций пирита, каждая из которых соответствует какому-либо из выделенных этапов становления месторождений (см. рис. 2). Данный аспект изучения месторождений «сухоложского» типа максимально подробно описан в большом количестве работ [Дистлер и др., 1995; Large et al., 2007; Meffre et al., 2008; Юдовская и др., 2011; Yakubchuk et al., 2014; Паленова и др., 2015; Горячев и др., 2019; Tarasova et al., 2020; и др.] и здесь рассматриваться не будет.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основу данной работы составляет материал, полученный значительным коллективом, который изначально возглавляли выдающиеся исследователи В.К. Немеров и Э.А. Развозжаева, за период более чем 30 лет. Пробы для исследования углерода были отобраны по всему стратиграфическому разрезу Байкало-Патомского нагорья с упором на подразделения дальнетайгинско-жуинского стратоевровня, к которым приурочены описываемые ниже золоторудные месторождения Угахан, Сухой Лог, Голец Высочайший и Красный.

**Золоторудное месторождение Угахан (бужуихтинская свита).** Месторождение расположено в северной части Бодайбинской структурно-формационной зоны (Бодайбинский синклиниорий) и приурочено к висячему (пологому) крылу Верхне-Угаханской антиклинали (структура третьего порядка) [Иванов, 2014; Бабяк и др., 2019; Будяк и др., 2024]. Апикальная часть складки полностью эродирована. На юге антиклиналь ограничена Гохтачинско-Угаханской, на севере – Хомолхинской синклиналими. Антиклиналь, как и прочие рудовмещающие структуры региона, запрокинута на юго-запад, ее осевая поверхность погружается в северном направлении под углом около 30°. Бужуихтинская свита подразделена на две подсвиты. Нижняя подсвита (bz<sub>1</sub>) сложена переслаивающимися углеродистыми сланцами, в подчиненном количестве отмечаются углеродсодержащие алевролиты и кварц-карбонатные песчаники. Верхняя подсвита (bz<sub>2</sub>) имеет существенно песчаный состав, углеродистые сланцы и алевролиты залегают в виде прослоев. Содержание органического углерода в отложениях свиты колеблется от 0.5 до 2.7 мас. % (среднее 1.3 мас. %, единичное определение 3.5 мас. %). Мощность свиты варьирует от 600 до 1100 м (в среднем ~ 800 м).

Рудная минерализация локализована в верхней подсвите бужуихтинской свиты. Рудные тела имеют пластообразную форму, субсогласное залегание с вмещающими породами и располагаются ярусно. Длина рудных тел по простиранию достигает до 4 км,

а по падению – до 600 м. Минерализация представлена пиритом и пирротином вкрапленно-прожилково-линзовидного типа, содержание – от первых долей процента до 10 %. Пирит установлен в четырех морфологических разновидностях: первые два до-рудных морфотипа (диагенетический и катагенный) содержат на своей поверхности значительное количество наночастиц золота и прочих сопутствующих элементов (As, Pb, Co, Ni, Zn и др.). На поверхности третьего (рудный) и четвертого (пострудный) морфологических типов пирита рудных элементов не обнаружено [Будяк и др., 2024б]. Самородное золото преимущественно мелкое ( $< 0.5$  мм). В большинстве случаев частицы золота наблюдаются в сростании с рудным пиритом (Py-3) либо по трещинам в нем, реже по окварцованным трещинам в породе вблизи выделений сульфидов.

Рудные залежи оконтурены по естественному борту 0.2 г/т. Золоторудная минерализация распределена крайне неравномерно, размах содержаний – от сотых долей до 2.8 г/т (среднее 1.35 г/т, единичное определение 13.74 г/т). Балансовые запасы месторождения составляют 44.5 т золота [Бабяк и др., 2019].

**Золоторудные месторождения Сухой Лог и Голец Высочайший (хомолхинская свита).** Месторождение Сухой Лог является одним из крупнейших месторождений мира, запасы рудного золота достигают ~ 1900 т [Буряк, Хмелевская, 1997; Савчук, Волков, 2019], запасы месторождения Голец Высочайший не достигают 100 т [Буряк, Хмелевская, 1997; Бабяк и др., 2019]. Несмотря на двадцатикратную разницу в количестве балансовых запасов руд, данные месторождения аналогичны по многим параметрам.

Оба месторождения локализованы в пределах антиклинальных структур третьего порядка в границах хомолхинского рудного поля [Буряк, Хмелевская, 1997; Вуд, Попов, 2006; Иванов, 2014; Vursiy et al., 2020]. Золоторудное месторождение Сухой Лог приурочено к западной периклинальной части субширотной Сухоложской антиклинали, месторождение Голец Высочайший – к пологому северному крылу Каменской антиклинали.

В геологическом строении обоих месторождений участвуют углеродсодержащие терригенные отложения хомолхинской свиты, которая имеет существенно сланцевый состав и расчленена на три подсвиты.

Золотосульфидное оруденение месторождения Сухой Лог приурочено к отложениям нижней ( $hm_1$ ) и верхней ( $hm_3$ ) подсвит хомолхинской свиты, которые представлены углеродистыми алевропелитами и метапелитами с подчиненными линзующимися прослоями алевролитов и тонкозернистых песчаников. Рудная минерализация месторождения Голец Высочайший отмечается исключительно в нижней подсвите. Средняя подсвита ( $hm_2$ ) отличается преобладанием кварцевых песчаников над углеродсодержащими

филлитами. Общая мощность хомолхинской свиты около 1100 м.

Рудные тела обоих месторождений имеют пластообразную форму, субсогласное залегание с вмещающими породами. В количественном отношении минеральный состав месторождений выражается следующими цифрами: жильно-прожилковый кварц (2–3 %), сульфидная минерализация (3–5 %), в том числе пирит (1.0–1.5 %) и пирротин (2.0–3.5 %). Сульфидная минерализация в пределах месторождений проявлена вкрапленниками, гнездами и прожилками пирит-пирротинового состава в парагенезисе с кварцем. На обоих месторождениях выделено по четыре морфологических разновидности пирита и по две разновидности пирротина. Так же как на месторождении Угахан, выделенные разновидности сменяют друг друга согласно этапности формирования месторождений. Кроме пирита и пирротина, встречаются марказит, халькопирит, галенит, рутил.

Самородное золото преимущественно мелкое ( $< 0.5$  мм), пластинчатой, чешуйчатой формы. В большинстве случаев наблюдается в ассоциации с пиритом-3, реже – в кварцевых прожилках и в сростании с пирротинном.

Золоторудная минерализация распределена неравномерно, размах содержаний, согласно собственным данным для месторождения Голец Высочайший от 0.07. до 9.4 г/т (среднее 1.8 г/т, единичное определение 137 г/т), месторождения Сухой Лог от 0.09 до 2.7 г/т (среднее 1.3 г/т).

**Месторождение Красный (аунакитская свита).** Рудные зоны месторождения Красный расположены в пределах Рудной и Верхне-Бодайбинской антиклинальных складок третьего порядка, разделенных Ложковой синклиналью [Tarasova et al., 2020]. Антиклинали, к замковой части которых приурочена золоторудная минерализация месторождения, представляют собой опрокинутые складки, осевые поверхности которых имеют юго-восточное простирание. Рудные тела локализованы в породах аунакитской свиты жуинской группы (см. рис. 1). Терригенные отложения аунакитской свиты, представленные чередующимися горизонтами углеродсодержащих ( $C_{орг}$  до 4 мас. %) метапесчаников и алевролитов, согласно залегают на карбонатных породах имняжской свиты. Общая мощность отложений аунакитской свиты достигает 1000 м. Выше по разрезу породы аунакитской свиты перекрываются углеродсодержащими ( $C_{орг}$  до 10 мас. %) кварц-серицитовыми сланцами с маломощными прослоями углеродистых кварцевых песчаников вачской свиты.

В районе месторождения отложения аунакитской свиты ( $an$ ) разделены на три подсвиты. В нижней подсвите выделены две пачки ( $an_1^1$  и  $an_1^2$ ). Нижняя ( $an_1^1$ ) представлена ритмично переслаивающимися кварцевыми и олигомиктовыми известковистыми песчаниками со слюдисто-кварцевыми алевролитистыми

ми и известковисто-сланцевыми сланцами, верхняя пачка ( $an_1^2$ ) сложена высокоуглеродистыми кварцево-сланцевыми филлитовидными сланцами. В пределах средней подсвиты нижняя пачка ( $an_1^1$ ) содержит темно-серые кварцевые, реже известковистые, алевропесчаники, верхняя пачка ( $an_2^2$ ) – высокоуглеродистые кварцево-сланцевые филлитовидные сланцы. Верхняя подсвита ( $an_3$ ) представлена переслаиванием темно-серых до черных кварцевых и олигомиктовых песчаников. Рудные тела месторождения имеют пластобразную форму и приурочены к контакту черносланцевых пачек с вышележащими песчаниками.

На месторождении выделены два рудных тела: верхнее – протяженностью 1100 м и мощностью до 60 м, нижнее – протяженностью 1440 м и мощностью до 90 м. В поперечном разрезе рудные тела, аналогично месторождению Сухой Лог, приурочены к замкам и крыльям антиклинальных складок, ввиду чего зачастую употребляется термин «седловидная» форма рудных тел. Наибольшая мощность рудных тел наблюдается в апикальных частях складок.

Рудная минерализация аналогична вышеописанной для месторождений бужуихтинской и хомолхинской свит. Так же как и на вышеописанных месторождениях нижележащих горизонтов, выделяются две разновидности пирротина и четыре морфологических типа пирита, представляющих дорудный, рудный и пострудный этапы формирования месторождения [Tarasova et al., 2020]. Золото приурочено к трещинам в Ру-3, присутствует в виде самостоятельных выделений или в ассоциации с галенитом. Размер самородного золота определяется размерами трещин, редко превышая 100 мкм, в основном субмикронного размера.

Золоторудная минерализация распределена неравномерно, размах содержаний – от 0.11 до 7.6 г/т (среднее 2.34 г/т). Балансовые запасы месторождения порядка 100 т золота.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Валовое определение  $C_{орг}$  в сланцах и рудах осуществлялось путем сжигания в кварцевой трубке с чувствительностью метода 0.01 % [Методы..., 1975]. Анализы выполнены В.Е. Суслопаровой, Т.С. Краснощековой.

Экстракция битумоидов и их исследование проведены по схеме органической геохимии [Корчагина, Четверикова, 1976]. Анализы по экстракции и групповому анализу выполнены в ИГХ СО РАН, аналитики А.Ю. Митрофанова, Н.Н. Брюханова. Органическое вещество горных пород обрабатывали многоступенчатой процедурой, которая включала отделение асфальтенов и асфальтеновых/асфальтообразующих кислот, нерастворимых в петролейном эфире, и дальнейшее хроматографическое элюирование остатка [Мартихаева и др., 2001]. Для анализа взвешенный

образец битума растворяли в хлороформе, смешанном с этанолом. Анализ золота в битумоиде осуществлен методом атомной абсорбции (спектрометр Perkin-Elmer-603 с атомизатором HGA-500, чувствительность метода  $10^{-3}$  мкг/мл (Au)) [Валл, Воропаева, 1986]. Контроль над качеством извлеченного битумоида осуществлялся методом ИК-спектроскопии. Съемка инфракрасных спектров битумоидов проводилась на спектрометре UR-10, спекорд М-80 (Германия) в Иркутском институте химии им. А.Е. Фаворского СО РАН.

Извлечение нерастворимого углеродистого вещества (НУВ) проводилось по методике, заключающейся в бескислотной обработке породы [Развозжаева, 1983]. Навеска 0.5–1.5 кг породы заливалась дистиллированной водой и неоднократно перемешивалась. Всплывшее углеродистое вещество – концентрат НУВ – помещалось в делительную воронку, заливалось водой и неоднократно встряхивалось. После отстаивания при комнатной температуре и удаления водного раствора процедура многократно повторялась. Выделение концентратов НУВ проводилось в центрифуге на предварительно очищенную от эмульсии рентгеновскую пленку, которая помещалась в пробирку вместе с концентратом НУВ в водной среде. После высушивания с верхней части пленки снималось углеродистое вещество с минимальным содержанием минеральных примесей.

Для количественного определения благородных металлов (БМ) в исходных породах и образцах НУВ использовалась дуговая атомно-эмиссионная спектрометрия. Спектральная установка для выполнения количественного атомно-эмиссионного анализа БМ в концентратах НУВ включает генератор «Везувий», дифракционный спектрограф ДФС-458 и многоканальный анализатор спектров МАЭС. Метод определения подробно описан в [Васильева и др., 2012]. Часть материала анализировалась атомно-абсорбционным методом [Меньшиков и др., 1977]. Аналитики в Восточно-Сибирском НИИ геологии, геофизики и минерального сырья Л.П. Поддубная, Г.М. Муратова, в ИГХ СО РАН М.Г. Кожарская, Г.И. Щербакова.

Состав газовой фазы отдельных флюидных включений в кварце был проанализирован на рамановском спектрометре Horiba Jobin-Yvon. LabRAM HR800 (ИГМ СО РАН), оснащенный аргоновым лазером с диаметром 1.5 мкм, мощностью 3 Вт в первичных двухфазных (жидкость + газ) флюидных включениях размером от 30 мкм. Полученные результаты обработаны в соответствии с приведенными спектрами [Frezza et al., 2012]. Исследования проводились на образцах кварца из золотоносных кварц-сульфидных прожилков, характеризующих процесс формирования золотосульфидной минерализации (синрудный кварц), и кварца из поздних, секущих рудную минерализацию, прожилков (пострудный

кварц) [Yudovskaya et al., 2016; Сокерина и др., 2016; Tarasova et al., 2020].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Содержание органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) в породах бужуихтинской свиты как в пределах месторождения, так и за его пределами колеблется в интервале 0.4–2.9 мас. % (среднее по 133 пробам – 1.3 мас. %). При этом непосредственно в рудной зоне месторождения среднее содержание  $C_{\text{орг}}$  составляет 1.4 мас. %, что незначительно выше относительно образцов, отобранных на удалении от рудной зоны (1.1 мас. %). Отмечается низкая корреляционная связь между валовыми содержаниями Au и  $C_{\text{орг}}$  как во вмещающих породах, так и в пределах зоны рудных изменений месторождения Угахан (коэффициент корреляции (КК): +0.17 в 74 пробах и +0.14 в 59 пробах соответственно).

Подобная же закономерность отмечается и для отложений хомолхинской свиты, вмещающей месторождения Сухой Лог и Голец Высочайший. При этом в черносланцевых пачках хомолхинской свиты отмечается существенное увеличение содержания  $C_{\text{орг}}$ , вариации значений которого находятся в интервале от 0.4 до 5.2 мас. % (единичное определение – 7 мас. %). Согласно полученным аналитическим данным по 63

пробам, отобранным в различных точках Бодайбинского синклинория, преимущественное содержание  $C_{\text{орг}}$  хомолхинской свиты колеблется в пределах 1.3–3.2 мас. % (среднее 2.4 мас. %). Содержание  $C_{\text{орг}}$  несколько увеличивается в рудной зоне месторождений Сухой Лог и Голец Высочайший (среднее по 41 пробе месторождения Сухой Лог – 2.7 мас. %, среднее по 39 пробам месторождения Голец Высочайший – 2.3 мас. %).

Отложения аунакитской свиты вне рудных объектов сопоставимы по содержанию органического углерода с черносланцевыми толщами хомолхинской свиты, среднее содержание  $C_{\text{орг}}$  по 72 пробам равно 2.2 мас. %. Содержания  $C_{\text{орг}}$  в пределах месторождения колеблется в интервале 1.5–3.6 мас. % (среднее 2.3 мас. %). Отложения хомолхинской и аунакитской свит и расположенные в их пределах месторождения демонстрируют отсутствие явной корреляционной связи между валовым содержанием органического углерода и содержанием золота. Независимо от места отбора проб, КК между содержаниями золота и углерода составляет +0.18 для пород и руд хомолхинской свиты и –0.11 для пород и руд аунакитской свиты (табл. 1). В пределах месторождения Красный КК верхнего и нижнего рудных тел (+0.09 в 54 пробах и –0.06 в 49 пробах соответственно) практически не отличаются друг от друга и от КК образцов вмещаю-

Таблица 1. Параметры органического углерода в отложениях Бодайбинского синклинория

Объект	$C_{\text{орг(общ)}}$ , мас. %	Содержание Au в породе, г/т	Корреляция $C_{\text{орг}}$ с Au
Илигирская свита (4)	0.4–1.1	н.о.–0.008	н.о.
Вачская свита (12)	$\frac{3.4–12.6}{6.2}$	н.о.–0.005	»
Аунакитская свита (72)	$\frac{0.4–3.4}{2.2}$	н.о.–0.02	–0.14
Месторождение Красный (верхнее рудное тело) (54)	$\frac{0.5–4.4}{2.3}$	$\frac{0.09–4.17}{1.82}$	+0.09
Месторождение Красный (нижнее рудное тело) (49)		$\frac{0.11–7.6}{2.34}$	–0.06
Хомолхинская свита (63)	$\frac{0.6–3.6}{2.4}$	н.о.–0.02	+0.18
Месторождение Сухой Лог (41)	$\frac{0.4–5.2}{2.7}$	$\frac{0.09–2.7}{1.3}$	+0.09
Месторождение Голец Высочайший (39)	$\frac{0.6–4.1}{2.3}$	$\frac{0.07–9.4}{1.8}$	+0.24
Угаханская свита (19)	0.2–1.1	н.о.–0.01	н.о.
Бужуихтинская свита (74)	$\frac{0.6–2.4}{1.2}$	н.о.–0.01	+0.17
Месторождение Угахан (59)	$\frac{0.4–2.9}{1.4}$	$\frac{0.01–2.8}{1.35}$	+0.14
Мариинская свита (12)	0.1–0.9	н.о.	н.о.
Бугарихтинская свита (14)	0.1–0.9	»	»
Хайвергинская свита (9)	0.1–0.8	н.о.–0.005	»

Примечание. Здесь и в табл. 2–4: в круглых скобках указано количество проб. Над чертой – разброс значений (от–до), под чертой – среднее арифметическое; н.о. – не обнаружено. Предел обнаружения:  $C_{\text{орг}}$  – 0.01 % [Методы..., 1975]; Au –  $0.005 \cdot 10^{-4}$  % [Меньшиков и др., 1977].

**Таблица 2.** Параметры растворимого углеродистого вещества (битумоид) в отложениях Бодайбинского синклиниория

Объект	Содержание битумоида, %	Содержание Au в битумоиде, г/т
Илигирская свита (2)	0.08	0.3
Вачская свита (4)	0.009–0.023 0.014	0.05
Аунакитская свита (5)	0.007–0.015 0.011	0.94–1.31 1.18
Месторождение Красный (4)	0.041–0.049 0.046	0.91–1.45 1.28
Имняхская свита (1)	0,016	0.2
Хомолхинская свита (5)	0.005–0.017 0.012	0.83–1.97 1.47
Месторождение Сухой Лог (3)	0.023–0.051 0.044	0.91–2.76 1.92
Месторождение Голец Высочайший (3)	0.03–0.047 0.041	1.16–2.21 1.73
Угаханская свита* (2)	0.005–0.009	0.1
Бужуихтинская свита* (4)	0.005–0.013 0.009	0.53–0.98 0.76
Месторождение Угахан (3)	0.008–0.024 0.021	0.53–1.17 0.82
Мариинская свита (1)	0.005–0.008	0.1
Бугарихтинская свита (2)	0.005–0.008	0.1
Хайвергинская свита (2)	0.005–0.009	0.1

\* Сведения частично заимствованы из [Немеров и др., 2010].

щих пород за пределами месторождения (–0.14 в 72 пробах для 95 %-го уровня значимости по критерию Стьюдента).

**Растворимое углеродистое вещество (битумоид).** Для исследования катагенного флюида органической природы из концентрата углеродистого вещества всех вышеперечисленных месторождений и

вмещающих их углеродистых сланцев была выделена его растворимая составляющая (битумоид), которая, по мнению ряда исследователей, является «реликтом первичной нефти» [Варшал и др., 1994, 1998; Развозжаева, 2015] (табл. 2).

*Бужуихтинская свита.* Разброс содержаний выделенного битумоида в образцах углеродистых глинистых сланцев бужуихтинской свиты, отобранных на различном удалении от месторождения Угахан (от 1 до 70 км), варьирует в пределах 0.005–0.013 мас. % (в среднем 0.009 мас. %). В пределах рудной зоны месторождения количество битумоида значительно увеличивается – до 0.024 мас. % (среднее 0.021 мас. %).

Элементный состав битумоида отложений бужуихтинской свиты месторождения Угахан включает  $C_{орг}$  (63.1 %), Н (9.7 %), N + S + О (27.4 %). Концентрации Au в битумоиде из отложений бужуихтинской свиты, независимо от степени близости к рудной зоне месторождения, варьируют от 0.53 до 1.37 г/т (среднее 0.98 г/т). При этом содержание Au в битумоидах пород нижележащих хайвергинской, бугарихтинской и мариинской свит, а также вышележащей угаханской свиты находится на уровне предела обнаружения. Ввиду крайне малого выхода растворимого углеродистого вещества на месторождении Угахан, разделить его на фракции не удалось, в связи с чем в настоящем исследовании были частично использованы данные из работы В.К. Неменова [Немеров и др., 2010] (табл. 3). Согласно работе [Развозжаева, 2015], повышенные концентрации золота и сопутствующих Рb, As, U, Cu, Sb и др. демонстрируют предпочтительную приуроченность к вязким фракциям битумоидов. Содержание битумоидов в среднем составляет 0.0098 %. Из них хлороформенный битумоид (ХБ) составляет 0.0025 %, остальная часть (0.0073 %) представлена спиртобензольными битумоидами (СББ). В групповом составе доминирует углеводородная фракция (~ 50 %), в меньшей степени развиты

**Таблица 3.** Распределение золота в различных фракциях битумоида

Свита	Асф		АК		СБС		БС		УВ		Σ, г/т
	%	г/т	%	г/т	%	г/т	%	г/т	%	г/т	
Илигирская	4	17.2	12	0.67	16	0.38	17	0.49	51	0.02	0.92
Вачская	3	0.21	11	0.18	16	н.о.	21	н.о.	49	н.о.	0.02
Аунакитская	4	34.6	12	1.4	15	0.47	17	0.19	52	н.о.	1.65
Хомолхинская	3.5	54.3	12	2.6	16	0.34	18	0.24	51	0.01	2.31
Угаханская*	4	4.27	15	0.85	13	0.31	16	0.16	52	н.о.	0.36
Бужуихтинская*	4	18.8	13	0.57	15	0.49	17	0.23	51	0.01	0.95
Мариинская	5	0.46	14	0.21	16	0.14	16	н.о.	49	н.о.	0.04
Бугарихтинская	3	0.14	11	0.16	18	н.о.	19	н.о.	49	н.о.	0.07
Хайвергинская	4	1.24	13	0.62	14	0.27	17	0.09	52	н.о.	0.18

Примечание. Залитый столбец – выход фракции от общей массы битумоида (%), незалитый столбец – содержание золота в исследуемой фракции (г/т). Фракции битумоида: Асф – асфальтены, АК – асфальтогеновые кислоты, СБС – спиртобензольные смолы, БС – бензольные смолы, УВ – углеводороды.

\* Сведения заимствованы из [Немеров и др., 2010].

бензолные и спиртобензолные смолы ( $\Sigma$  фракции смол  $\sim 30\%$ ), а наиболее металлоемкие асфальтеновые фракции (асфальтогеновые кислоты (АК) и асфальтены (Асф)) имеют резко подчиненное значение, редко превышая 15 и 5 % соответственно. Среднее содержание золота в асфальтенах бужуихтинской свиты: Асф – 18.8 г/т (max 27.4 г/т).

**Хомолхинская свита.** Содержание битума в образцах хомолхинской свиты за пределами месторождения варьирует от 0.005 до 0.017 %. В пределах зоны с рудной минерализацией содержание растворимого углеродистого вещества (битумоид), извлеченного из углеродистого концентрата, увеличивается до 0.051 % (среднее 0.043 %). Доля ХБ в нем составляет 0.25 %, остальная часть представлена СББ. Концентрации Au в битумоидах хомолхинской свиты вне рудных зон месторождений варьируют от 0.83 до 2.76 г/т (среднее 2.32 г/т). Определенные содержания золота сопоставимы с установленными ранее значениями для месторождения Сухой Лог [Развозжаева, 2015]. По данным ИК-спектроскопии, в битумоидах хомолхинской свиты (ХБ и СББ) преобладающими структурами являются сложнэфирные группировки и алифатические связи углеводородов (УВ) [Евсеев и др., 2008]. При разделении битумоида на фракции установлено, что доминирующей является углеводородная фракция (45–65 %), в меньшей мере представлена фракция смол (32–48 %). Количество наиболее вязких фракций битумоидов, представленных АК и Асф, имеет подчиненный характер: асфальтогеновых кислот от 2 до 34 % (среднее 16 %), асфальтенов редко достигает 5 % (среднее 3.5 %, единичное определение 8 %). Среднее содержание золота в вязких фракциях хомолхинской свиты составляет: в АК 2.6 г/т, в Асф 54.3 г/т.

Элементный состав СББ, извлеченных из метосадков хомолхинской свиты, включает С (64.2 %), Н (7.4 %), N + S + O (26.2 %), что близко к соответствующим значениям для битумов, выделенных из породы непосредственно в пределах месторождений Сухой Лог и Голец Высочайший: С (63.8–64.9 %), Н (7.2–7.6 %), N + S + O (22.7–27.9 %).

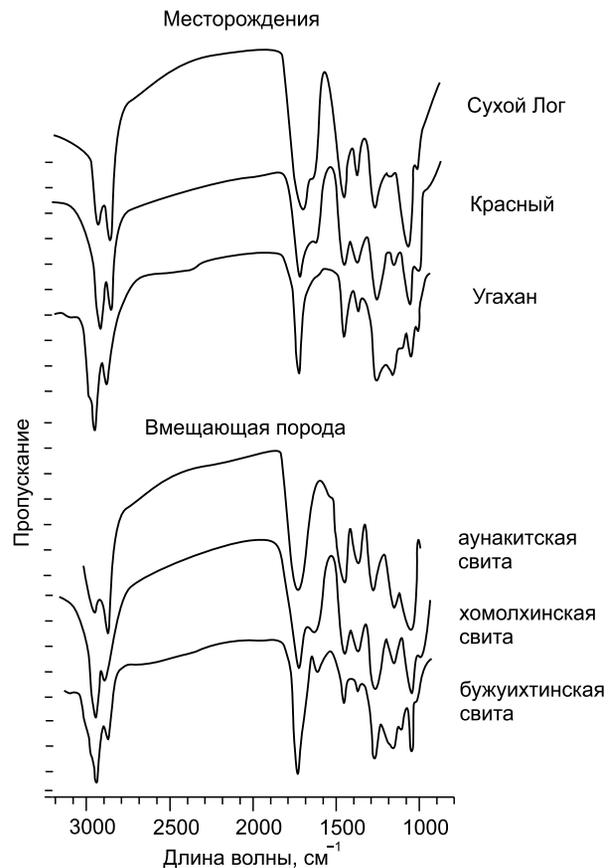
**Аунакитская свита.** Содержание битума в образцах аунакитской свиты за пределами месторождения варьирует от 0.007 до 0.015 %. Для образцов, отобранных в пределах рудного поля месторождения, но не имеющих рудной минерализации, значения также не превышают 0.018 %. По мере приближения к рудной зоне месторождения Красный количество битумоидов резко увеличивается, достигая значений 0.049 %. Распределение битумоида между ХБ и СББ абсолютно соответствует полученному для отложений хомолхинской свиты (25–30 и 70–75 % соответственно).

Концентрации Au в битумоидах аунакитской свиты, варьируют от 0.91 до 2.15 г/т (среднее 1.66 г/т). Они находятся в тех же рамках, как и содержания золота в битумоидах в пределах месторождения Крас-

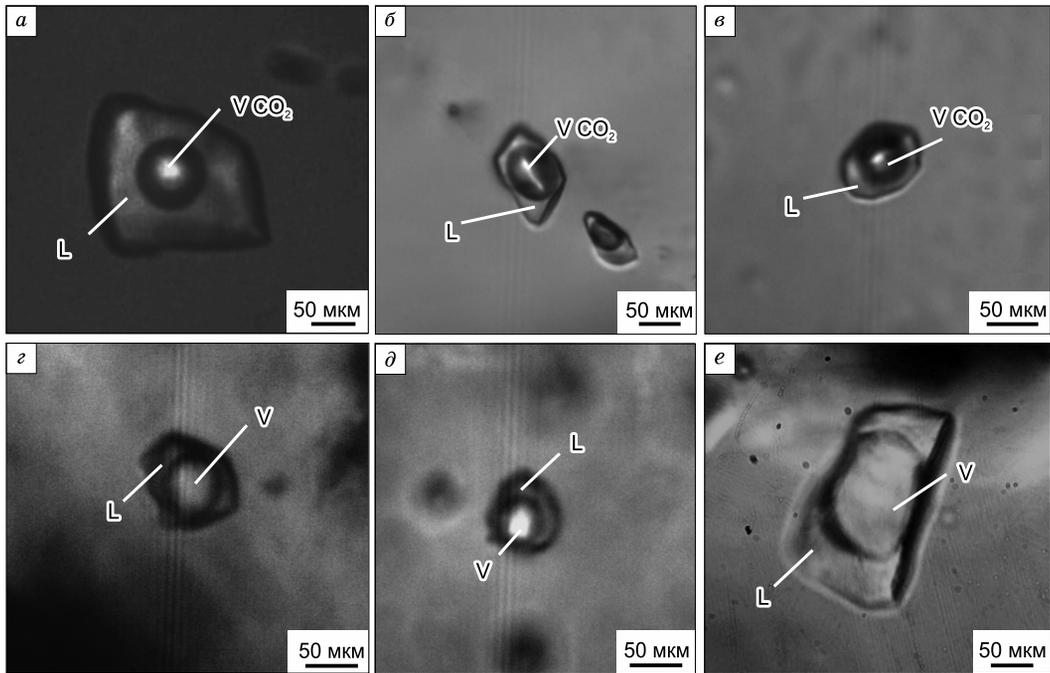
ный. В вышележащих отложениях вачской свиты содержание Au в битумах систематически ниже пределов обнаружения, независимо от близости к известным месторождениям (см. табл. 3), ввиду чего установить наличие корреляционной зависимости между содержанием Au и  $C_{\text{орг}}$  в извлеченном битумоиде невозможно.

Доминирующей фракцией битумоида аунакитской свиты как вмещающих отложений, так и пород в пределах рудной зоны месторождения Красный является углеводородная (в среднем около 50 %). Сумма значений фракции бензолных и спиртобензолных смол представлены значительно меньшим содержанием (в среднем около 30 %). Соответственно, АК и Асф получили наименьшее распространение, в сумме не превышая 20 %, при этом количество наиболее металлоемкой асфальтеновой фракции битумоидов аунакитской свиты колеблется в пределах 3–5 % (среднее 4 %; единичное определение 6 %) от общего количества выделенного битумоида. Среднее содержание золота в вязких фракциях аунакитской свиты: АК 1.4 г/т, в Асф 34.6 г/т.

Элементный состав СББ, извлеченных из метосадков аунакитской свиты, включает С (63.9 %), Н (9.4 %), N + S + O (всего 27.2 %). Аналогичный состав был получен для месторождения Красный.



**Рис. 4.** ИК-спектры спиртобензольного битумоида месторождений Угахан, Сухой Лог, Красный и вмещающих отложений бужуихтинской, хомолхинской и аунакитской свит.



**Рис. 5.** Флюидные включения в гидротермальном кварце кварц-сульфидных прожилков из рудной зоны месторождений Угахан, Голец Высочайший и Красный. L – жидкая фаза, V – газовая фаза.

*ИК-спектры* ОВ всех исследуемых отложений дальнотайгинско-жуинского стратоуровня как в пределах непосредственно месторождений, так и на удалении от них имеют абсолютное сходство (рис. 4). Как видно из рис. 4, в ИК-спектрах битумоидов были идентифицированы полосы поглощения простых ( $1000\text{--}1150$ ,  $1280\text{ см}^{-1}$ ) и сложных ( $1720\text{--}1740\text{ см}^{-1}$ ) эфиров, а также алифатических соединений ( $1380\text{--}1390$ ,  $1460\text{--}1470$ ,  $2800\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ ) [Развозжаева, 2015]. На присутствие ароматических структур в битумоидах изученных отложений Бодайбинского синклинория указывает плечо поглощения вблизи  $1600\text{ см}^{-1}$  в пределах интенсивной полосы  $\text{C}=\text{O}$  ( $1740\text{ см}^{-1}$ ). Полоса в области  $3200\text{--}3400\text{ см}^{-1}$  указывает на присутствие ОН-групп, связанных с карбоновыми кислотами и спиртами. Аналогичные результаты были получены ранее для битумов месторождения Вернинское [Развозжаева, 2015].

*Газовый состав флюидных включений* месторождений Угахан, Голец Высочайший и Красный определен в двухфазных включениях (жидкость + газ) синрудного и пострудного кварца. Синрудный кварц представлен светло-серым льдистым кварцем с гнездобразными выделениями сульфидов и широким развитием гидроксидов железа по ним. Пострудный кварц представлен массивным, молочно-белым, реже серым, кварцем с гнездами крупных агрегатов анкерита, сидерита и хлорита. Всего изучены 92 пластины (Угахан – 24, Голец Высочайший – 48, Красный – 20).

В синрудном кварце всех изучаемых месторождений присутствуют преимущественно двухфазные

(жидкость + газ) флюидные включения размером  $10\text{--}80\text{ мкм}$ , в подчиненном количестве развиваются газовые. В большинстве изученных включений, газовый пузырек занимает от 30 до 50 об. % вакуоли (см. рис. 5). Наличие плотной каймы вокруг пузырька указывает на преобладающее количество углекислоты в системе (рис. 5). Методом рамановской спектроскопии установлено, что основным компонентом флюидных включений синрудного кварца является  $\text{CO}_2$  (табл. 4), содержание которой изменяется в интервале 64–92 мол. %. В подчиненном количестве присутствуют  $\text{N}_2$  и  $\text{CH}_4$  (2.14–19.6 и 2.97–15.7 мол. % соответственно), фиксируется присутствие  $\text{H}_2\text{S}$  до 17.4 мол. %. Напротив, в газовой фазе флюидных включений пострудного кварца доля  $\text{CO}_2$  существенно снижается, варьируя от 0 до 50, при этом доля  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2\text{S}$  возрастает:  $\text{N}_2$  до 30,  $\text{CH}_4$  до 89, а  $\text{H}_2\text{S}$  до 63 мол. % (см. табл. 4).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты изучения ОВ на месторождениях Угахан, Сухой Лог, Голец Высочайший и Красный сопоставлялись как между собой, так и с данными по отложениям бужуйхтинской, хомолхинской и аунакитской свит, вмещающим перечисленные месторождения, а также прочим углеродистым отложениям осадочного палеобассейна Бодайбинского синклинория [Развозжаева и др., 2011; 2013; Ганжа, Развозжаева, 2014; и др.].

Содержание валового органического углерода в пределах бужуйхтинской, хомолхинской и аунакит-

**Таблица 4.** Состав флюидных включений месторождений Угахан, Голец Высочайший и Красный

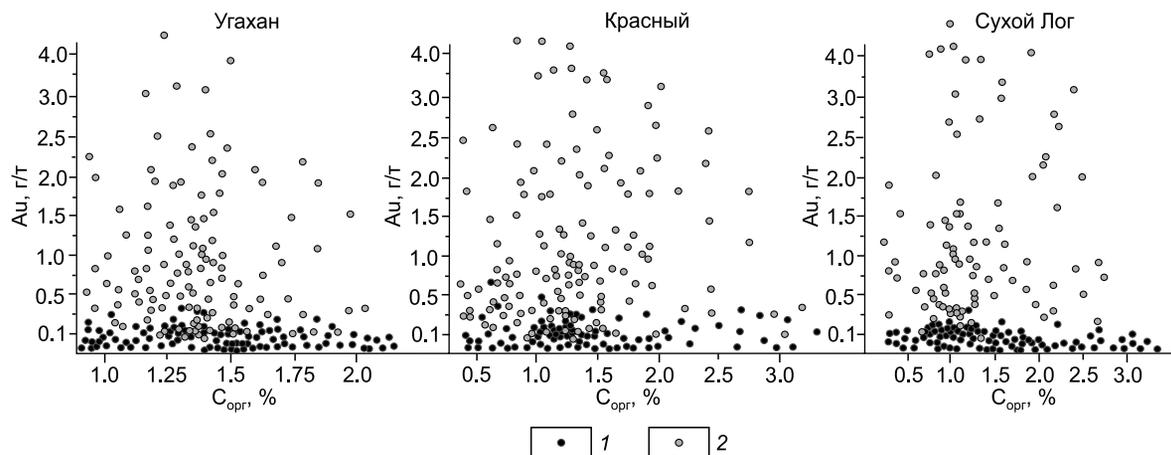
Месторождение	Состав газовой фазы флюидных включений, мол. %			
	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S
<b>Синрудный кварц</b>				
Голец Высочайший (47)	64.7–92.1	2.1–19.6	5.8–16.5	н.о.–20.1
Красный (52)	71.3–92.6	4.4–18.7	5.6–10.4	4.8–16.7
Угахан (41)	54.9–82.5	7.1–17.2	3.0–15.7	7.2–17.4
<b>Пострудный кварц</b>				
Голец Высочайший (36)	н.о.–37.2	10.7–29.4	33.2–74.1	25.8–59.4
Красный (50)	н.о.–48.1	9.5–21.6	29.7–88.8	19.3–63.1
Угахан (53)	н.о.–40.3	5.3–24.9	40.6–84.7	30.8–56.9

Примечание. Исследования выполнены на рамановском спектрометре Horiba Jobin Yvon LabRAM HR800 (ИГМ СО РАН); в скобках приведено количество изученных включений.

ской свит, независимо от степени метасоматических изменений и близости к рудной зоне изученных месторождений, варьирует в пределах ~ 0.6–4.0 мас. % (единичное определение 7 мас. % – рудная зона месторождения Сухой Лог), что значительно превышает его содержание в прочих отложениях, расположенных в пределах разреза Байкальской горной области (см. табл. 1). Исключением являются отложения вачской свиты, содержание C<sub>орг</sub> которой достигает 10 мас. % (среднее ~ 6.8 мас. %). При пересчете баланса ОВ необходимо учитывать, что основная часть ОВ (до 70 мас. %) мигрирует из толщи нефтематеринских пород в виде образовавшегося катагенного флюида (палеонефти) и всплывает по субвертикальным трещинно-поровым каналам вверх. Таким образом, количество C<sub>орг</sub> в породе на раннем докатагенном этапе развития палеобассейна (седиментация и диагенез) необходимо увеличивать в 2–3 раза относительно его современного количества – до 5–8 мас. %.

Согласно проведенным исследованиям, органический углерод осадочных отложений более чем на 99.5 % представлен его нерастворимой частью (НУВ) и всего на 0.5 % его растворимой частью (битумоид).

Соответственно, отсутствие значимой корреляционной связи золота и ОВ (см. табл. 1, рис. 6) может свидетельствовать о том, что НУВ, представляющее подавляющую часть C<sub>орг</sub> во вмещающих черных сланцах, не является важным фактором, способствующим сорбции золота. Это подтверждает выводы, сделанные ранее Э.А. Развозжаевой и соавторами [2013], о неспособности упорядоченного графитизированного углеродистого вещества сорбировать металл из внешнего флюида. В своей работе В.К. Немеров с соавторами [2010] также утверждают, что в процессах постседиментационных преобразований (метаморфизм различных фаций) углеродсодержащих пород металлоносное УВ в результате метаморфизма и окисления теряет связь с металлами. Используя показатель металлоемкости углеродистого вещества (ПМУВ), авторы наглядно продемонстрировали тренд снижения металлоемкости ОВ от протокатагенетических к апокатагенетическим и метаморфическим (зеленсланцевая фация) группам пород более чем в 5 раз, что, вероятно, связано с потерей H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N. Таким образом, к началу метаморфических преобразований (стадия апокатагенеза) происходит



**Рис. 6.** Корреляционная диаграмма соотношений содержаний золота с концентрацией органического углерода: 1 – рудная зона; 2 – вмещающая порода.

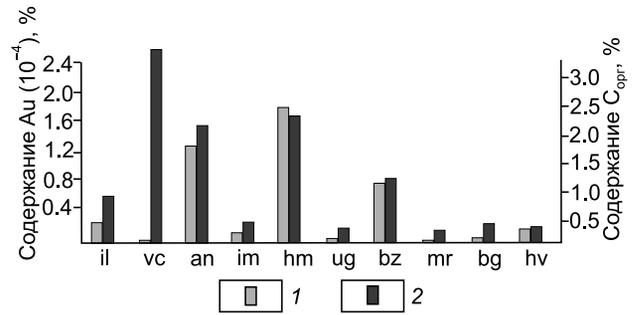
максимальное истощение металлогенического и флюидного ресурса углеродистой металлоносной толщи.

Принимая данное утверждение, мы приходим к выводу, что количество графитизированного ОВ в породе не может являться прямым признаком при поисковых работах на рудное золото.

При этом содержание битумоида в рудной зоне изучаемых месторождений увеличивается почти в три раза для месторождения Угахан (с 0.008 до 0.020 %) и более чем в четыре раза для месторождений Голец Высочайший и Сухой Лог (с 0.011 до 0.041 % и 0.043 % соответственно), а также месторождения Красный (с 0.011 до 0.046 %) (см. табл. 2). Столь значимое увеличение концентрации битумоида в зоне рудообразования объясняется катагенной миграцией органического флюида в сводовые части антиклинальных структур, которые на более позднем этапе контролировали процесс формирования аномальных содержаний золота. Незначительные, но сопоставимые между собой содержания битумоида во вмещающих отложениях за пределами месторождений, по всей вероятности, являются реликтом остаточной нефтенасыщенности («мертвая» нефть), которая необходима для смачивания порового пространства при капиллярном вертикальном и латеральном продвижении катагенного флюида. Согласно [Неручев, Смирнов, 2007], количество такой остаточной нефти варьирует в пределах 30–40 % от порово-трещинного пространства. Избыточные концентрации образовавшегося флюида над той частью, которая формирует остаточную нефтенасыщенность, отмечаются в увеличенном количестве битумоида в апикальных частях антиклиналей. Можно предположить, что, чем выше начальное содержание ОВ в нефтематеринской породе (докатагенный этап), тем выше содержание битумоида в рудной зоне в настоящее время. Соответственно, углеродсодержащие отложения, резерв ОВ которых не превышает порога остаточной нефтенасыщенности («мертвой» нефти), не способны реализовать модель формирования месторождений СГТ. Исходя из данного утверждения, отложения нижележащих хайвергинской, бугарихтинской, мариинской, а также вышележащей илигирской свит, согласно этому показателю, не имеют перспектив на формирование месторождений СГТ (рис. 7).

Другим показателем оценки перспективности является содержание золота в первичном катагенном флюиде. Необходимо отметить, что содержание золота в битумоиде бужуихтинской, хомолхинской и аунакитской свит, независимо от близости к рудной зоне изучаемых месторождений, значительно выше относительно отложений хайвергинской, бугарихтинской, вачской и илигирской свит (см. рис. 7).

Как известно, количество переносимого золота в составе катагенного флюида зависит от специализации нефтематеринских пород, а также от его генезиса и элементного состава [Конторович и др., 1987;

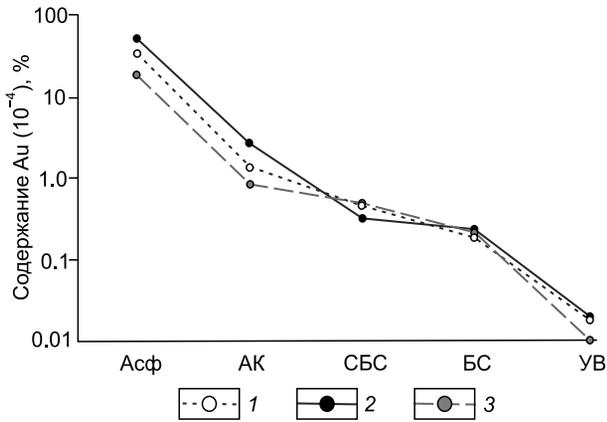


**Рис. 7.** Концентрации Au в битумоидах (анализы выполнены в Восточно-Сибирском НИИ геологии, геофизики и минерального сырья Г.А. Валл и в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН Н.Н. Брюхановой) и  $C_{орг}$  в породе неопротерозойских отложений Бодайбинского региона. Названия свит и их стратиграфическая принадлежность приведены на рис. 1. 1 – содержание Au ( $10^{-4}$  %); 2 – содержание  $C_{орг}$  (%).

Конторович, 2008; Sugiyama, 2015; Развозжаева, 2015; Скибицкая и др., 2016, 2018], ввиду чего при изучении битумоида, который, согласно [Баранова и др., 1991; Развозжаева, 2015], представляет собой реликт первичного катагенного флюида, особое внимание было уделено именно этим аспектам.

Значительное обогащение золотом битумоида бужуихтинской, хомолхинской и аунакитской свит хорошо согласуется с нашими работами [Немеров и др., 2010; Будяк и др., 2015; Чугаев и др., 2018], в рамках которых была продемонстрирована сидерохалькофильная с ураном и золотом специализация отложений дальнетайгинско-жуинского стратоуровня. В многочисленных исследованиях доказывается, что приобретение халькофильной геохимической специализации данных отложений Бодайбинского региона происходило на этапе седиментации под влиянием деятельности вулканических аппаратов Байкало-Муйской зоны, а также поступления гидротермальных эксгалаций в зоне рассеянного спрединга Олоkitского задугового бассейна в эдиакарский период неопротерозойской эры [Немеров, Станевич, 2001; Станевич и др., 2010; Чугаев, 2024; и др.]. Соответственно, геохимическая специализация битумоида первоначально связана с седиментационным, а позже с этапом катагенных преобразований данных углеродистых отложений.

Идентификация сложных и простых эфирных связей в образцах битумоидов отложений бужуихтинской, хомолхинской и аунакитской свит (см. рис. 4), а также расположенных в них месторождений, указывает на бактериально-планктоногенный источник ОВ исследуемых толщ. Таким образом, битумоид, являющийся реликтом палеонефти, наследует геохимическую специализацию углеродсодержащих (нефтематеринских) толщ докатагенной стадии развития. Полученные спектры исследуемых образцов типич-



**Рис. 8.** Содержание золота во фракциях битумоидов отложений дальнетайгинского и жуинского стратоуровней. Свиты: 1 – ауанакитская, 2 – хомолхинская, 3 – бужухтинская.

ны для битумоидов низких и средних стадий катагенеза (градациях катагенеза МК<sub>1</sub>–МК<sub>2</sub>), являющихся главной фазой нефтеобразования [Глязнецова и др., 2005], которые имеют повышенный показатель металлоемкости (ПМУВ) [Немеров и др., 2010]. Полное сходство спектров битумоидов разных толщ между собой говорит о едином бассейне осадконакопления с однотипным источником углерода в них (см. рис. 4).

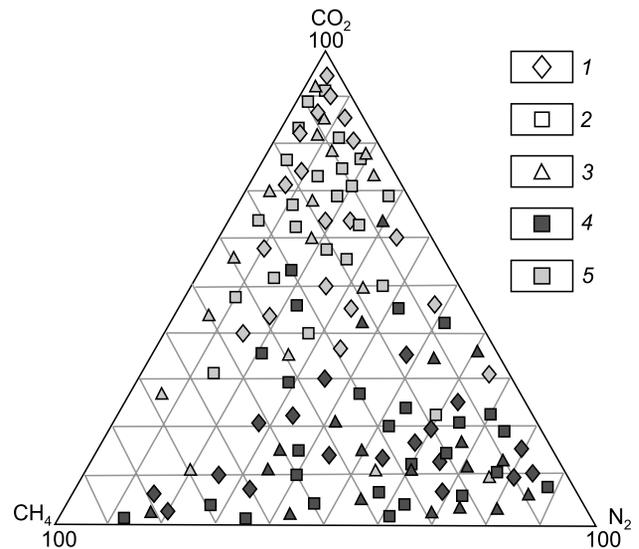
Присутствие в составе битумоида, выделенного из метapelитов этих месторождений, ассоциации элементов N + S + O (~ 27 %) указывает на значительное количество тяжелых неуглеводородных фракций [Варшал и др., 1994; Развозжаева и др., 2013]. Анализ распределения металлов по фракциям битумоидов: АК, Асф, спиртобензольные смолы (СБС), бензольные смолы (БС) и УВ, выделенных из черных сланцев всего Бодайбинского разреза и, в частности, из рудных зон изучаемых месторождений, показывает, что концентрации металлов варьируют в очень широких пределах (см. табл. 3). Весьма устойчива одна и та же закономерность – самые высокие их содержания связаны с фракциями АК и Асф, заметно более низкие значения приурочены к фракции смол (БС и СБС), а самые низкие содержания отмечаются во фракции УВ (рис. 8). Наблюдаемая закономерность подтверждает избирательную приуроченность металлов к тяжелым (вязким) фракциям растворимой составляющей углеродистого вещества черных сланцев, которая объясняется наличием в их молекулах электронодонорных атомов S, N, O. Согласно Л.М. Гиндину [1984], соединения металла с серой в органическом флюиде образуются по типу R<sub>1</sub>–S–R<sub>2</sub> и являются крайне эффективными и избирательными реагентами для сидерохалькофильных элементов (Au, Ag, Cu, Pb, Ni, Co, Sb и др.). Вторым вариантом концентрирования металлов является механизм комплексообразования с кислородсодержащими функ-

циональными группировками [Варшал и др., 1994, 1998; Развозжаева, 2015].

Данное мнение подтверждается исследованием [Sugiyama, 2015], в котором на экспериментальных данных продемонстрировано, что вязкая часть сырой нефти способна растворять благородные металлы в концентрациях, превышающих 1 г/т. Многочисленные исследователи [Buchler, 1978; Manning, Gize, 1993; Fuchs et al., 2015; и др.] также подтверждают, что растворение металлов и их перенос в составе нефтей коррелируют с увеличением в составе нефти тяжелых неуглеводородных фракций и присутствием атомов азота (N).

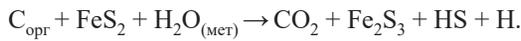
Необходимо отметить, что одним из основных носителей таких элементов, как V, Ni, Cu, U, Ga и др. в нефтях, горючих сланцах, углях и рассеянном ОБ осадочных пород, являются порфирины (производные хлорофиллов), связь которых с металлами впервые была установлена А. Трейбсом в начале прошлого века. Однако, несмотря на высокие содержания Ni и Cu, в исследованных битумоидах порфирины обнаружены не были [Евсеев и др., 2008], что свидетельствует о значительном преобразовании катагенного флюида при метакатагенезе с потерей его наиболее металлоемкой составляющей. Такой вывод позволяет предполагать, что начальные дометаморфические содержания золота и сопутствующих элементов в катагенном флюиде могли быть значительно выше.

Кроме отсутствия корреляции золота с графитизированным НУВ и увеличения количества золото-содержащего битумоида в зоне рудообразования, отмечается увеличение доли CO<sub>2</sub> во флюидных включениях из кварца с рудным содержанием золота и ее



**Рис. 9.** Связь между составом газовой составляющей флюидных включений и содержанием золота в образцах месторождений Угахан, Голец Высочайший и Красный (%). 1–3 – месторождения: 1 – Красный, 2 – Голец Высочайший, 3 – Угахан; 4 – флюидные включения в Q4 (Au < 0.1 г/т); 5 – флюидные включения в Q3 (Au > 0.1 г/т).

значительное снижение в пострудном кварце (см. табл. 4, рис. 9). Разница состава рудного и пострудного флюидов свидетельствует о значительном расходовании углекислоты на этапе рудоотложения. Это подтверждается значительным увеличением содержания  $\text{CO}_2$  в валовых пробах из рудной зоны относительно вмещающих отложений: на 2 % для месторождения Угахан и до 4 % для месторождений Сухой Лог, Голец Высочайший и Красный, расположенных в пределах хомолхинской и аунакитской свит [Tarasova et al., 2020; Тарасова и др., 2022; Будяк и др., 20246]. Такая закономерность объясняется протеканием рудного процесса в условиях изоляции системы от внешних источников флюида [Large et al., 2007; Дубинина и др., 2014; Tarasova et al., 2016]. Увеличение содержания  $\text{CO}_2$  в пробах с повышенным содержанием золота является следствием преобразования  $\text{C}_{\text{орг}}$  в процессе метаморфического окисления в присутствии воды и ранних сульфидов (py-I и py-II):



Таким образом, дальнейший процесс рудоотложения проходил с участием мобильного флюида, богатого углекислотой и сероводородом, в кислой среде [Вилор и др., 2021] и связан с реакцией восстановления золота из раствора на новообразованных сульфидных минералах (py-III, ау), вплоть до формирования на их поверхности наночастиц самородного золота [Таусон и др., 2009, 2018; Паленова и др., 2015]. Таким образом, можно утверждать, что увеличение содержания  $\text{CO}_2$  в пробах из рудных тел месторождений будет тем значительнее, чем сильнее вмещающие породы были обогащены ОВ.

Кроме углекислоты, в составе флюидных включений рудных и пострудных кварц-карбонат-сульфидных прожилков отмечено значительное количество метана и азота (см. табл. 4, рис. 10). Отношения  $\text{CO}_2/\text{CH}_4 \leq 18$  и  $\text{CO}_2/\text{N}_2 \leq 21$  указывают на формирование флюида за счет разложения первичного ОВ сапропелевого типа с высоким содержанием углерода, азота и водорода [Сокерина и др., 2016].

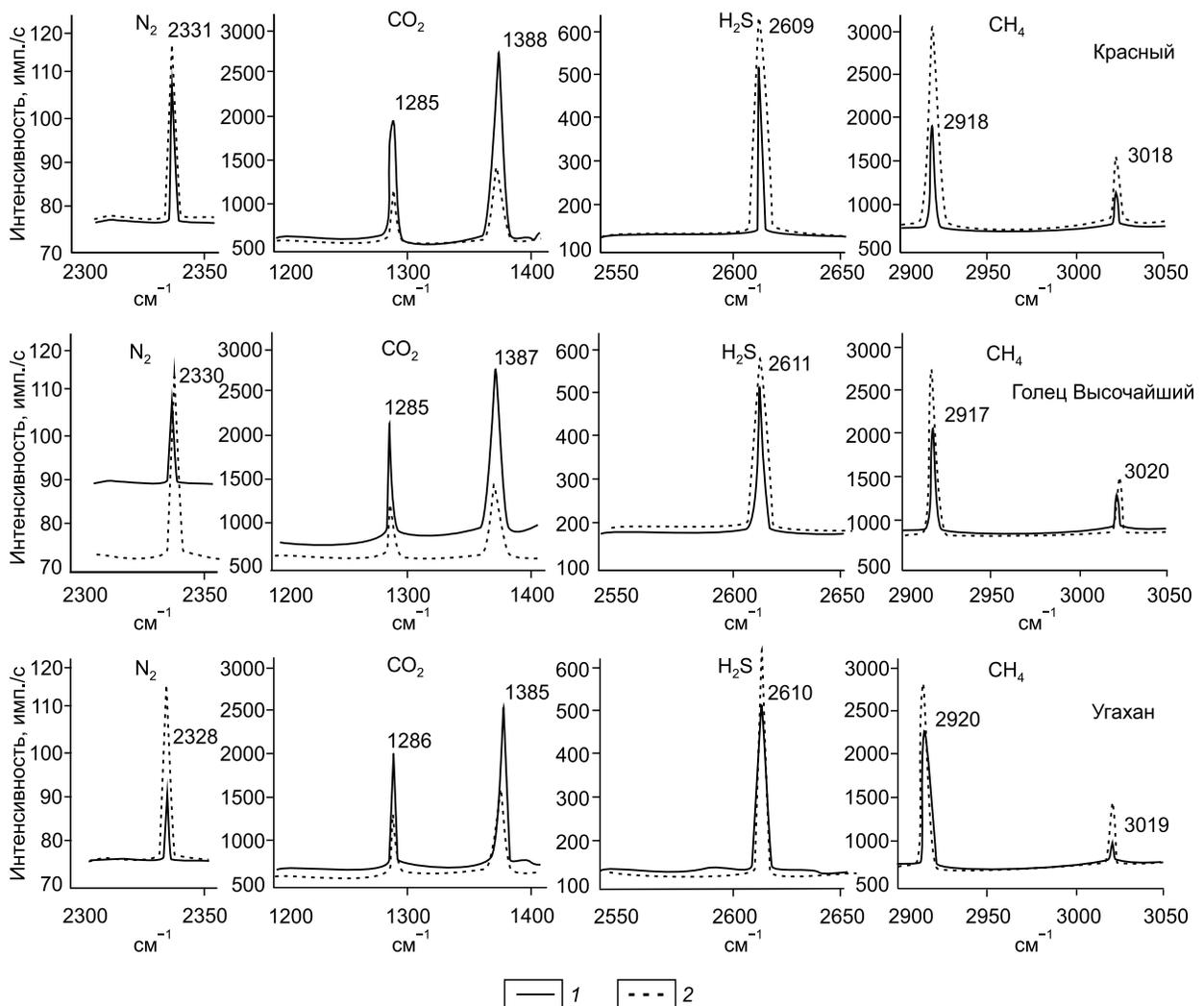


Рис. 10. Рамановские спектры  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CH}_4$  в первичных газожидких флюидных включениях гидротермального кварца месторождений Угахан, Голец Высочайший и Красный. 1 – синрудный кварц, 2 – пострудный кварц.

Состав флюида, полученный для месторождений Угахан, Голец Высочайший и Красный, аналогичен составу флюида таких месторождений, как Чертово Корято, Сухой Лог и Ыкан [Развозжаева и др., 2002; Кряжев и др., 2009; Yudovskaya et al., 2016; Сокерина и др., 2016; Будяк и др., 2024а, 2024б], что не противоречит тезису об аналогичных условиях их формирования. Кроме месторождений Бодайбинского региона, известен ряд золоторудных месторождений, находящихся в черносланцевых толщах по всему миру, со схожими характеристиками [Naack et al., 1984; Kerrick, Caldeira, 1998; Zhong et al., 2015; Stepanov, 2021; и др.]. Следовательно, модель формирования месторождений СГТ может в той или иной мере быть распространена на прочие месторождения орогенного типа, территориально связанные с осадочными и вулканогенно-осадочными углеродистыми отложениями.

Полученные сведения говорят как минимум о двух основных этапах формирования рудной минерализации: 1) прерудный – конседиментационное накопление и катагенное перераспределение вещества вмещающих пород; 2) рудный – окисление ОВ катагенного флюида, деструкция его полимерлипидных компонентов и формирование золоторудных тел *in situ* в результате восстановления углекислотного флюида на сульфидных агрегатах.

Таким образом, подтверждается концепция метаморфогенно-метасоматического формирования месторождений СГТ, предложенная В.А. Бурыком [1982] и развитая в более поздних работах [Large et al., 2007; Немеров и др., 2010; Паленова и др., 2015; Tarasova et al., 2020], согласно которой  $C_{орг}$  на прерудном (подготовительном) этапе играл заметную роль в процессе миграции и мобилизации золота.

Ввиду вышесказанного, можно оценить вероятный масштаб оруденения в конкретных стратиграфических подразделениях.

**Ресурсный потенциал углеродсодержащих отложений.** Как было отмечено, концентрация в породе ОВ, количество выделенного из углеродистого концентрата битумоида, а также содержание золота в битумоиде бужуихтинской, хомолхинской и аунакитской свит значительно выше относительно стратиграфически ниже лежащих отложений хайвергинской, бугарихтинской и мариинской свит (см. рис. 7). Несмотря на высокие значения перечисленных параметров бужуихтинской свиты, вмещающей незначительное по запасам месторождение Угахан (~ 50 т), они тем не менее не достигают значений, описанных для отложений хомолхинской и аунакитской свит, вмещающих крупные месторождения Голец Высочайший, Красный (~ 100 т) и гигантское месторождение Сухой Лог (~ 2000 т). Согласно предложенной модели формирования месторождений СГТ (см. рис. 2) [Немеров и др., 2010], можно оценить ресурсный потенциал трех вышеописанных свит для формирования золоторудных месторождений.

Для этого принимаем, что основная функция ОВ в формировании месторождений золота заключается в следующем: 1) мобилизации золота из вмещающих отложений, 2) миграции золота с катагенным флюидом в область наименьших температур и давлений (нефтяные ловушки), 3) деструкции ОВ с высвобождением золота на стадии метаморфизма.

Таким образом, дорудный (рудоподготовительный) процесс напрямую связан с диагенетическим и катагенным этапом развития бассейна, в результате которого рассеянное в породе ОВ переходит в подвижное состояние. Для численной оценки генерации и эмиграции нефти в данной статье мы воспользуемся моделью перераспределения катагенного флюида, предложенной С.Г. Неручевым и С.В. Смирновым для нефтяного месторождения Варьеганское [Неручев, Смирнов, 2007]. Выбор этой модели продиктован тем, что авторы дали количественную оценку формирования нефтяного месторождения при реализации катагенного процесса в породах сапропелевого типа с оценкой главной фазы нефтеобразования ( $МК_1$ – $МК_2$ ), что соответствует изученному нами битумоиду, а также верификацией предложенной модели в виде сопоставления полученных расчетных данных с реальным объектом.

Как известно, главным фактором, определяющим латеральную миграцию, является «Архимедова сила» всплывания первичных скоплений УВ в водонасыщенной поровой среде коллекторов вверх по восстанию слоев от наиболее погруженных участков нефтесборной площади до максимально приподнятых в пределах замкнутой ловушки.

Важным фактором катагенного перемещения флюида является нефтенасыщенность в каналах миграции. Авторами [Неручев, Смирнов, 2007] вводится понятие «остаточная “мертвая” нефть» необходимая для смачивания трещинно-капиллярного пространства. Для достижения порога, при котором происходит миграция нефти, необходима нефтенасыщенность не менее 30 % порового пространства. Согласно [Неручев, Смирнов, 2007], в породах изученных отложений при первичной концентрации ОВ, достигающей 3–5 %, нефтенасыщенность порового пространства будет превышать 44–75 %. Как было показано выше, первичное содержание  $C_{орг}$  в отложениях угаханской, хомолхинской и аунакитской свит могло колебаться от 5 до 8 мас. %. Это говорит о катагенной нефтенасыщенности толщи, значительно превышающей 30 %, необходимой для смачивания порового пространства («мертвая» нефть), что неминуемо приводит к возникновению свободной нефтяной фазы, способной к ее миграции в катагенных условиях. При показателях нефтенасыщенности, превышающих 50 %, в складчатых областях скорость миграции флюида будет превышать 10 км/млн лет (max ~ 2500 км/млн лет) [Неручев, Смирнов, 2007]. Учитывая, что время на реализацию нефтенакпле-

ния от начала катагенных преобразований (~ 555 млн лет) [Meffre et al., 2008; Yudovskaya et al., 2016] до метаморфических событий (~ 450 млн лет) [Лаверов и др., 2007; Meffre et al., 2008; Юдовская и др., 2011; Чугаев и др., 2014; Chugaev et al., 2022] превышает 100 млн лет, а максимальный размах нефтесборного бассейна вряд ли будет превышать 500 км, параметром зависимости от времени можно пренебречь.

Ввиду отсутствия данных о плотности нефтяных скоплений на заключительной стадии катагенного процесса в Бодайбинском районе, за основу расчетов будут приняты значения, представленные в модели формирования Варьеганского нефтяного месторождения [Неручев, Смирнов, 2007]. При пересчете баланса месторождений Бодайбинского региона плотность нефтенасыщенности Варьеганского месторождения будет использована как базовая для месторождения Красный (аунакитская свита), которое выбрано в качестве эталона из-за его средних размеров относительно прочих месторождений, а также максимальной изученности.

В соответствии с данной моделью плотность нефти в местах ее катагенного нагнетания достигает 2.7 млн т/км<sup>2</sup>. Соответственно, такая плотность первичной нефти в апикальной части антиформы будет принята при пересчете баланса для месторождения Красный и в этой статье принимается как стандарт ( $\rho_{ст} = 2.7$  млн т/км<sup>2</sup>). Таким образом, и содержание  $C_{орг}$  в породе аунакитской свиты также будет принято в качестве стандарта ( $C_{ст} = 2.3$  %). Содержание  $C_{орг(общ)}$  в пределах месторождения Угахан в два раза меньше относительно среднего значения рудной зоны месторождений Сухой Лог и Красный (~ 1.3, ~ 2.4, ~ 2.3 % соответственно) (см. рис. 7, 11). При этом количество выделенного битумоида из углеродистого концентрата ( $C_{орг(общ)}$ ) сопоставимо (в среднем: Угахан

~ 0.009 %, Сухой Лог ~ 0.012 %, Красный ~ 0.012 %) (см. рис. 11) и, по всей видимости, зависит от наличия остаточной («мертвой») нефти в поровом пространстве и в пересчетах учитываться не будет. Поскольку показатели битумоида всех изучаемых объектов продемонстрировали полную идентичность (см. рис. 4), предполагается, что нефтеотдача из материнских пород будет одинаковая и учитываться в обсуждении также не будет.

Таким образом, при пересчете баланса полезного компонента для исследуемых месторождений плотность катагенного нагнетания палеонефти принималась как отношение количества ОВ отложений бужуихтинской (bz) и хомолхинской (hm) и аунакитской (an) свит к эталонному значению содержания  $C_{орг}$  ( $C_{ст}$ ):

$$k_{p(bz)} = C_{(bz)}/C_{ст} = 1.3/2.3 \% = 0.6,$$

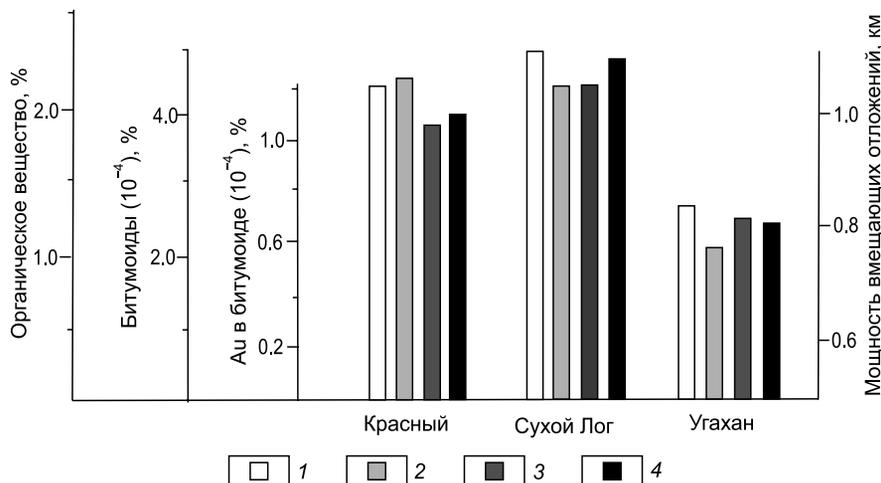
$$k_{p(hm)} = C_{(hm)}/C_{ст} = 2.4/2.3 \% = 1.1,$$

$$k_{p(an)} = C_{(an)}/C_{ст} = 2.3/2.3 \% = 1.0,$$

где  $k_p$  – коэффициент плотности катагенного флюида;  $C$  – содержание  $C_{орг}$  в отложениях: (bz) – бужуихтинской, (hm) – хомолхинской, (an) – аунакитской свит.

Для оценки потенциальных ресурсов нефти на слабоизученный геологический объект, по аналогии с хорошо изученным эталонным, распространяется такая характеристика, как средняя плотность запасов. Мощность нефтегенерирующей толщи в 1 км<sup>2</sup> (или на 1 км<sup>3</sup> осадочных пород) принимается как стандарт, ввиду чего первым действием при оценке ресурсного потенциала изучаемых стратиграфических подразделений необходимо ввести такой параметр, как коэффициент мощности нефтегенерирующей толщи.

Мощность нефтегенерирующей черносланцевой толщи бужуихтинской свиты варьирует от 700 до



**Рис. 11.** Концентрации валового ОВ и битумоида в черносланцевых отложениях, вмещающих месторождения Красный, Сухой Лог и Угахан, а также золота в битумоиде. 1 – содержание ОВ в породе (%); 2 – содержание битумоида в выделенном ОВ (10<sup>-4</sup>, %); 3 – содержание золота в битумоиде (10<sup>-4</sup>, %); 4 – мощность отложений свиты, вмещающей месторождение (км).

1000 м (в среднем 800 м). Это меньше, чем мощность хомолхинской (1100 м) и аунакитской (1000 м) свит (см. рис. 11):

$$k_{h(bz)} = h_{bz}/h_{ст} = 800 \text{ м}/1000 \text{ м} \approx 0.8,$$

$$k_{h(hm)} = h_{hm}/h_{ст} = 1100 \text{ м}/1000 \text{ м} \approx 1.1,$$

$$k_{h(an)} = h_{an}/h_{ст} = 1000 \text{ м}/1000 \text{ м} \approx 1.0,$$

где  $k_h$  – коэффициент мощности нефтегенерирующей толщи;  $h_{bz}$  – мощность бужуихтинской свиты;  $h_{hm}$  – мощность хомолхинской свиты;  $h_{an}$  – мощность аунакитской свиты;  $h_{ст}$  – стандарт.

В итоге можно посчитать приблизительную плотность палеонефти ( $\rho_{oil}$ ) на 1 км<sup>2</sup>:

$$\rho_{oil(bz)} = (k_p \cdot \rho_{ст}) \cdot k_h = 0.8 \cdot 0.6 \cdot 2.7 \text{ млн т/км}^2 = 1.3 \text{ млн т/км}^2,$$

$$\rho_{oil(hm)} = (k_p \cdot \rho_{ст}) \cdot k_h = 1.1 \cdot 1.1 \cdot 2.7 \text{ млн т/км}^2 = 3.3 \text{ млн т/км}^2,$$

$$\rho_{oil(an)} = (k_p \cdot \rho_{ст}) \cdot k_h = 1.0 \cdot 1.0 \cdot 2.7 \text{ млн т/км}^2 = 2.7 \text{ млн т/км}^2.$$

Таким образом, ресурс золота на 1 км<sup>2</sup> будет рассчитываться по формуле

$$C_{1(bz)} = \rho_{oil(bz)} \cdot C_{2(bz)} = 1.3 \text{ млн т/км}^2 \cdot 0.98 \text{ г/т} = 1274 \text{ кг/км}^2,$$

$$C_{1(hm)} = \rho_{oil(hm)} \cdot C_{2(hm)} = 3.3 \text{ млн т/км}^2 \cdot 2.07 \text{ г/т} = 7590 \text{ кг/км}^2,$$

$$C_{1(an)} = \rho_{oil(an)} \cdot C_{2(an)} = 2.7 \text{ млн т/км}^2 \cdot 1.57 \text{ г/т} = 4482 \text{ кг/км}^2,$$

где  $C_1$  – содержание золота в 1 км<sup>2</sup> апикальной части антиклинали, вмещающей катагенный флюид;  $C_2$  – среднее содержание золота в палеонефти свиты по результатам аналитических работ (см. рис. 11).

Концентрация золота в первичной катагенной ловушке для отложений бужуихтинской свиты, по предварительной оценке, ~ 1.3 т/км<sup>2</sup>, что в шесть раз меньше относительно предполагаемой концентрации золота для отложений хомолхинской и в 3.5 раза меньше относительно предполагаемой концентрации золота для отложений аунакитской свит.

С учетом того, что антиклинальные структуры третьего порядка в Бодайбинском районе, как правило, занимают не менее 50 км<sup>2</sup> (чаще значительно больше), на основе приведенных значений можно сделать вывод о высокой перспективности отложений бужуихтинской свиты для дальнейших поисковых работ. Тем не менее возможность обнаружения объектов, сопоставимых по запасам с месторождениями хомолхинской и аунакитской свит, маловероятна.

Что касается прочих стратиграфических подразделений региона, то, по всей вероятности, начальное (конседиментационное) содержание ОВ отложений не превысило суммарных путей потерь нефти при вертикальной и затем латеральной миграции и полностью исчерпалось при образовании остаточной

нефти в пределах нефтесборной площади. Таким образом, перспективы данных отложений для формирования месторождений СГТ крайне маловероятны.

Предлагаемый алгоритм ресурсной оценки золота для разных стратиграфических подразделений имеет смысл исключительно для месторождений СГТ, так как любое отклонение от рассматриваемой модели (см. рис. 2) полностью меняет механизм формирования месторождения. Необходимо отметить, что предложенный алгоритм в значительной степени упрощен по причине недостаточности имеющейся информации. Обращаем внимание, что в наших расчетах:

- не проводилась палеорекострукция рудовмещающих антиклинальных структур, вмещающих будущее месторождение, для определения масштаба нефтесборного бассейна;

- не учитывался колоссальный раздув мощности отложений в апикальной части антиклинали, как это было показано в работе С.М. Жмодика и соавторов [1991], ввиду чего, несомненно, занижена реальная перспективность рудовмещающих структур;

- не учитывался коэффициент прогрессивного уплотнения материнских пород при их погружении под нагрузкой вышележащих отложений, а, соответственно, значительно занижена мощность нефтегенерирующей черносланцевой толщи (показатель  $k_h$ );

- не учитывался коэффициент остаточной («мертвой») нефти, необходимой для первичного смачивания капиллярной системы, по которой происходит миграция катагенного флюида. Таким образом, чем больше масштаб нефтесбора, тем больше первично обогащенной нефти расходуется на смачивание трещинно-капиллярной системы, которая не участвует в рудном процессе на заключительном этапе;

- не восстанавливался реально существовавший на момент катагенных трансформаций состав первичной нефти, которая, как было показано выше, могла быть в значительно большей степени обогащена золотом и сопутствующими компонентами;

- не использовался при расчете баланса золотосодержащего флюида водный раствор, который, являясь полноправным участником катагенной миграции, согласно работе Д.И. Горжевского с соавторами [1990], мог быть столь же значительным транспортером металла, как и нефти.

Таким образом, предложенный алгоритм оценки ресурсного потенциала, базирующийся на главенствующей роли ОВ на этапе рудоподготовки, предполагает приближенные показатели, основанные на сопоставлении уже известных и оцененных объектов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вышеприведенные данные свидетельствуют о максимальной продуктивности палеобассейна в дальнетайгинско-жуинское время. Сопряженность таких фактов, как существование задугового бассейна

на, увеличение концентрации в нем ОВ и существование в отложениях этого времени стратиформных месторождений золота, приводит к выводу об их генетической связи:

1. Сорбционная емкость углеродистого вещества отложений определяется степенью их метаморфизма. Максимальное количество золота сорбируется аморфным углеродом пород, преобразования которого не превышают стадии мезокатагенеза. По мере увеличения температурного градиента метаморфических преобразований происходит его графитизация с закономерным снижением сорбционной активности. Таким образом, количество графитизированного ОВ в породе не может являться прямым признаком при поисковых работах на рудное золото.

2. Растворимая компонента (битумоид) рассеянного углеродистого вещества черносланцевых толщ наследует геохимический потенциал нефтематеринских пород и является источником и транспортером металла в процессах нефте- и рудогенеза, что предполагает генетическую взаимосвязь между этими породами и рудными месторождениями. Основными концентраторами металла в битумоидах являются тяжелые неуглеводородные фракции.

3. На основе начальных содержаний  $C_{орг}$  в породе и концентрации золота в растворимой фракции углеродистого вещества (битумоид) можно сделать вывод о высокой перспективности для формирования месторождений золота «сухоложского» типа в отложениях хомолхинской и аунакитской свит, в меньшей степени бужуйтинской свиты.

4. Начальное содержание  $C_{орг}$  отложений нижележащей балаганахской серии не превысило суммарных путевых потерь нефти при катагенной миграции и полностью исчерпалось при образовании остаточной нефти в пределах нефтесборной площади. Таким образом, поисковые перспективы в пределах данных отложений крайне маловероятны.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по проекту IX.130.3.1 (№ 0284-2021-0001). Работа осуществлена с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск).

## ЛИТЕРАТУРА

- Бабяк В.Н., Блинов А.В., Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. (2019). Новые данные о геолого-структурных особенностях золоторудных месторождений Ожерелье, Ыканское, Угахан и Голец Высочайший // Науки о Земле и недропользование, т. 42, № 4, с. 388–412, DOI: [10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412](https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412).
- Баранова Н.Н., Варшал Г.М., Велюхова Т.К. (1991). Комплексобразующие свойства природных органических веществ и их роль в генезисе золоторудных месторождений // Геохимия, № 2, с. 1799–1804.
- Богданова С.В., Писаревский С.А., Ли Ч.Х. (2009). Образование и распад Родинии (по результатам МПГК 440) // Стратиграфия. Геологическая корреляция, т. 17, № 3, с. 29–45.
- Будяк А.Е., Горячев Н.А., Развозжаева Э.А., Спиридонов А.М., Соцкая О.Т., Брюханова Н.Н. (2015). Геохимия рассеянного органического вещества в золоторудных месторождениях черносланцевых формаций // ДАН, т. 463, № 6, с. 692–695, DOI: [10.7868/S0869565215240160](https://doi.org/10.7868/S0869565215240160).
- Будяк А.Е., Горячев Н.А., Скузоватов С.Ю. (2016). Геодинамические предпосылки формирования масштабного оруденения южного обрамления Сибирского кратона в протерозое // ДАН, т. 470, № 5, с. 562–565, DOI: [10.7868/S0869565216290181](https://doi.org/10.7868/S0869565216290181).
- 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, DOI: [10.31857/S0869-56524843335-339](https://doi.org/10.31857/S0869-56524843335-339).
- Будяк А.Е., Тарасова Ю.И., Чугаев А.В., Горячев Н.А., Веливецкая Т.А., Игнатьев А.В. (2024а). 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. (2024б). 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.
- Буряк В.А., Бакулин Ю.И. (1998). Металлогения золота. Владивосток, Дальнаука, 402 с.
- Буряк В.А., Гончаров В.И., Горячев Н.А. (2002). Эволюционный ряд крупнообъемных золото-платиновых месторождений в углеродистых толщах // ДАН, т. 387, № 4, с. 512–515.
- Валл Г.А., Воропаева Е.В. (1986). Прямое атомно-абсорбционное определение металлических примесей в растворимых органических веществах // II региональная конференция «Аналитика Сибири – 86», ч. 1, с. 44.
- 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, 0575, DOI: [10.5800/GT-2022-13-1-0575](https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-1-0575).
- 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).
- Варшал Г.М., Велюханова Т.К., Кошечева И.Я., Баранова Н.Н., Козеренко С.В., Галузинская А.Х., Сафронов Н.С., Банных Л.Н. (1994). О концентрировании благородных металлов углеродистым веществом пород // Геохимия, № 6, с. 814–824.
- Варшал Г.М., Кошечева И.Я., Хашватова Б.Д., Холин Ю.В., Данилова В.Н., Тацкий Ю.Г., Велюханова Т.К., Быков И.В., Тютюнник О.А., Галузинская А.Х. (1998). Взаимодействие ртути с гуминовыми кислотами как определяющий фактор механизма и концентрирования в объектах окружающей среды // Разведка и охрана недр, № 3, с. 29.

- Васильева И.Е., Шабанова Е.В., Развозжаева Э.А. (2012).** Благородные металлы в нерастворимом углеродистом веществе черносланцевых пород и руд по данным прямого атомно-эмиссионного анализа // *Геохимия*, № 9, с. 860–866.
- Вилор Н.В., Волкова М.Г., Будяк А.Е., Горячев Н.А., Павлова Л.А., Спиридонов А.М., Брянский Н.В., Данилов Б.С. (2021).** Сульфидоарсенидное оруденение с золотом в зоне смятия на Восточно-Забайкальской ветви Монголо-Охотской сутуры (месторождение Погромное, Восточное Забайкалье, Россия) // *Тихоокеанская геология*, т. 40, № 4, с. 33–50, DOI: [10.30911/0207-4028-2021-40-4-33-50](https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-4-33-50).
- Виноградов В.И., Пичугин Л.П., Быховер В.Н., Головин Д.И., Муравьев В.И., Буякайтэ М.И. (1996).** Изотопные признаки и время эпигенетических преобразований верхнедокембрийских отложений Уринского поднятия // *Литология и полезные ископаемые*, № 1, с. 68–78.
- 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).
- Ганжа Г.Б., Развозжаева Э.А. (2014).** Органическое вещество в осадочных породах Вернинского золоторудного месторождения, Патомское нагорье // *Руды и металлы*, № 3, с. 65–73.
- Гиндин Л.М. (1984).** Экстракционные процессы и их применение. М., Наука, 144 с.
- Гладкочуб Д.П., Станевич А.М., Мазукабзов А.М., Донская Т.В., Писаревский С.А., Николь Г., Мотова З.Л., Корнилова Т.А. (2013).** Ранние этапы развития Палеоазиатского океана: данные по LA-ICP-MS датированию детритовых цирконов из позднедокембрийских толщ южного фланга Сибирского кратона // *Геология и геофизика*, т. 54, № 10, с. 1472–1490, EDN: [RFXDKV](https://www.edn.ru/RFXDKV).
- Глязнецова Ю.С., Зуева И.Н., Чалая О.Н., Лифшиц С.Х. (2005).** Применение ИК-спектроскопии для контроля качества отбора проб для битуминологических и экологических исследований // *Наука и образование*, № 4, с. 68–71.
- Гольдберг И.С. (1990).** Нафтаметаллогенетические провинции мира и генезис рудных концентраций в тяжелых нефтях и битумах // *Геология нефти и газа*, № 3, с. 2–7.
- Гордиенко И.В., Метелкин Д.В. (2016).** Эволюция субдукционного магматизма на неопротерозойской и венд-раннепалеозойской активных окраинах Палеоазиатского океана // *Геология и геофизика*, т. 57, № 1, с. 91–108, DOI: [10.15372/GiG20160105](https://doi.org/10.15372/GiG20160105), EDN: [TDCHPQ](https://www.edn.ru/TDCHPQ).
- Горжевский Л.И., Карцев А.А., Павлов Л.И., Голева Г.А., Калинин М.К., Блох А.М., Богашова Л.Г., Добровольская М.Г., Лонец А.И., Лобзова Р.В., Лэк А.А., Шадлун Т.Н. (1990).** Парагенезис металлов и нефти в осадочных толщах нефтегазоносных бассейнов. М., Недра, 262 с.
- Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Будяк А.Е., Тарасова Ю.И. (2019).** Опыт применения локального анализа изотопного состава серы сульфидов руд Крупнейших месторождений Бодайбинского Синклинория (Восточная Сибирь) // *ДАН*, т. 484, № 4, с. 460–463, DOI: [10.31857/S0869-56524844460-463](https://doi.org/10.31857/S0869-56524844460-463).
- Дамдинов Б.Б., Дамдинова Л.Б., Жмодик С.М., Миронов А.Г. (2019).** Состав и условия формирования золотоносных пирротиновых руд Восточного Саяна (на примере рудопроявления Ольгинское) // *Геология и геофизика*, т. 60, № 5, с. 666–687, DOI: [10.15372/GiG2019028](https://doi.org/10.15372/GiG2019028), EDN: [FCPVIC](https://www.edn.ru/FCPVIC).
- Дистлер В.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К., Коваленкер В.А., Мохов А.В., Семейкина Л.К., Юдовская М.А. (1995).** Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия) // *Геология рудных месторождений*, т. 38, № 6, с. 467–484.
- Дубинина Е.О., Чугаев А.В., Иконникова Т.А., Авдеев 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, DOI: [10.7868/S0869590314040037](https://doi.org/10.7868/S0869590314040037).
- Евсеев В.В., Немеров В.К., Серебренникова О.В. (2008).** Особенности состава органического вещества и распределения редких металлов в древних черносланцевых формациях Сибири // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*, № 1, с. 25, EDN: [RQBJFL](https://www.edn.ru/RQBJFL).
- Жмодик С.М., Бондаренко П.М., Немировская Н.А. (1991).** Авторадиографическое изучение перераспределения урана при метаморфизме и деформации углеродисто-кремнистых сланцев // *Докл. АН СССР*, т. 318, № 1, с. 207.
- Жмодик С.М., Постников А.А., Буслов М.М., Миронов А.Г. (2006).** Геодинамика Саяно-Байкало-Муйского аккреционно-коллизийного пояса в неопротерозое–раннем палеозое, закономерности формирования и локализации благороднометаллового оруденения // *Геология и геофизика*, т. 47, № 1, с. 183–197, EDN: [NDLLHJ](https://www.edn.ru/NDLLHJ).
- Зорин Ю.А., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Пресняков С.Л., Сергеев С.А. (2008).** Силурийский возраст главных складчатых деформаций рифейских отложений Байкало-Патомской зоны // *ДАН*, т. 423, № 2, с. 228–233.
- Иванов А.И. (2014).** Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы). М., ФГУП ЦНИГРИ, 215 с.
- Константинов М.М. (2010).** Ленская золоторудная провинция. Золоторудные месторождения России. М., Акварель, 371 с.
- Конторович А.Э. (2008).** Геология нефти и газа. Избранные труды (1960–1989 гг.). Т. I. Геология нефти и газа Сибири. Новосибирск, СНИИГГиМС, 540 с.
- Конторович А.Э., Борисова Л.С., Меленевский В.Н. (1987).** Некоторые важнейшие черты геохимии асфальтенов нефтей // *Геохимия*, № 10, с. 1423–1432.
- Корчагина Ю.И., Четверикова О.П. (1976).** Методы исследования рассеянного органического вещества осадочных пород. М., Недра, 229 с.
- Кряжев С.Г., Устинов В.И., Гриненко В.А. (2009).** Особенности флюидного режима формирования золоторудного месторождения Сухой Лог по изотопно-геохимическим данным // *Геохимия*, 2009, № 10, с. 1108–1118.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Спиридонов А.И., Немеров В.К., Иванов А.И., Митрофанов Г.Л. (2006).** Геодинамические условия формирования золоторудных месторождений Бодайбинского неопротерозойского прогиба // *ДАН*, т. 407, № 6, с. 793–797, EDN: [HTGDHR](https://www.edn.ru/HTGDHR).
- Лавров Н.П., Чернышев И.В., Чугаев А.В., Байрова Э.Д., Гольцман Ю.В., Дистлер В.В., Юдовская М.А. (2007).** Этапы формирования крупномасштабной благороднометаллового оруденения месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь): результаты изотопно-геохронологического изучения // *ДАН*, т. 415, № 2, с. 236–241.
- Мартихаева Д.Х., Макрыгина В.А., Воронцов А.Е., Развозжаева Э.А. (2001).** Углеродистое вещество метаморфических и гидротермальных пород. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 127 с.
- Мельников Ф.П. (1989).** Термобарогеохимия гидротермального процесса в связи с выявлением роли углеводородов в эндогенном минералообразовании: автореф. дис. ... д.г.-м.н. М., МГУ, 51 с.
- Меньшиков В.И., Хлебникова А.А., Цыханский В.Д., Малых В.Д. (1977).** Атомно-абсорбционное определение микроколичества золота в геохимических образцах с использованием импульсных атомизаторов // *Журнал аналитической химии*, т. 32, № 5, с. 954–959.
- Методы битуминологических исследований и пути их разработки. (1975).** Ред. В.А. Успенский. Л., Недра, 319 с.
- Немеров В.К., Станевич А.М. (2001).** Эволюция рифей-вендских обстановок биолитогеоза Байкальской горной области // *Геология и геофизика*, т. 42, № 3, с. 456–470.

- Немеров В.К., Развозжаева Э.А., Спиридонов А.М., Сухов Б.Г., Трофимов Б.А. (2009). Нанодисперсное состояние металлов и их миграция в углеводородных природных средах // ДАН, т. 425, № 2, с. 233–236.
- 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.
- Неручев С.Г., Смирнов С.В. (2007). Оценка потенциальных ресурсов углеводородов на основе моделирования процессов их генерации и формирования месторождений нефти и газа // Нефтегазовая геология. Теория и практика, т. 2, с. 3.
- Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Плотинская О.Ю., Новоселов К.А., Масленников В.В., Котляров В.А., Блинов И.А., Кузьменко А.А., Грибоедова 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, DOI: [10.7868/S0016777015010025](https://doi.org/10.7868/S0016777015010025).
- Покровский Б.Г., Буякайте М.И. (2015). Геохимия изотопов С, О и Sg в неопротерозойских карбонатах юго-западной части Патомского палеобассейна, юг Средней Сибири // Литология и полезные ископаемые, № 2, с. 159, DOI: [10.7868/S0024497X15010048](https://doi.org/10.7868/S0024497X15010048).
- Полякова И.Д. (1996). Металлы в нафтидогенезе // Геология и геофизика, т. 37, № 3, с. 62–67.
- Поспелов Г.Л. (1967). Элементы геологического подобия нефтяных и флюидогенных рудных месторождений // Геология и геофизика, № 11, с. 3–22.
- Развозжаева Э.А. (1983). Метод фракционирования нерастворимого органического вещества осадочно-метаморфических пород // Литология и полезные ископаемые, № 3, с. 133.
- Развозжаева Э.А. (2015). Геохимия углерода и благородных металлов в осадочно-метаморфических комплексах складчатого обрамления Сибирской платформы // Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 135 с.
- Развозжаева Э.А., Прокофьев В.Ю., Спиридонов А.М., Мартихаев Д.Х., Прокопчук С.И. (2002). Благородные металлы и углеродистое вещество в рудах месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия) // Геология рудных месторождений, т. 44, № 2, с. 116.
- Развозжаева Э.А., Немеров В.К., Спиридонов А.М. (2003). Асфальтены – реликтовые носители металлов углеродистых осадочно-метаморфических комплексов: материалы междунар. конф. Сыктывкар, с. 111–112.
- Развозжаева Э.А., Спиридонов А.М., Таусон В.Л., Будяк А.Е. (2011). Формы золота в геополимерах углистых сланцев (Патомское нагорье, Восточная Сибирь) // Геохимия, № 9, с. 998–1004.
- Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Прокопчук С.И. (2013). Сорбционная активность нерастворимого углеродистого вещества черносланцевых образований в процессе регионального метаморфизма (Байкало-Патомское нагорье) // Геохимия, № 1, с. 92–96.
- 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).
- Скибицкая Н.А., Навроцкий О.К., Бурханова И.О., Большаков М.Н., Зекель Л.А. (2016). Содержание металлов в высокомолекулярных компонентах нефти ранней стадии нефтегенерации (на примере Оренбургского НГМК) // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина, т. 283, № 2, с. 23–34.
- Скибицкая Н.А., Навроцкий О.К., Бурханова И.О., Зекель Л.А., Большаков М.Н. (2018). Распределение микроэлементов в высокомолекулярных компонентах нефти ранних стадий нефтегенерации в газонасыщенной части продуктивных отложений западной и восточной частей Оренбургского НГМК // Актуальные проблемы нефти и газа, вып. 3, № 22, с. 1–12, DOI: [10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art6](https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art6).
- Соколина Н.В., Онищенко С.А., Исаенко С.И. (2016). Флюидный режим формирования золоторудного месторождения Голец Высочайший (Ленский золотоносный район) // Вестник института геологии Коми научного центра УрО РАН, № 7 (259), с. 3–9, DOI: [10.19110/2221-1381-2016-7-3-9](https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-7-3-9), EDN: WLSWVF.
- Соколов Б.А., Холодов В.Н. (1993). Флюидогенез и флюидодинамика осадочных бассейнов – новое направление геологии // Отечественная геология, № 11, с. 64–75.
- Станевич А.М., Мазукабзов А.М., Постников А.А., Немеров В.К., Писаревский С.А., Гладкокуб 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: HYIVYZ.
- Станевич А.М., Машук И.М., Мазукабзов А.М., Постников А.А., Корнилова Т.А. (2010). Южный фрагмент Сибирского кратона: ландшафтная история за два миллиарда лет // Геодинамика и тектонофизика, т. 1, № 1, с. 103–118, EDN: NTPBFV.
- 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. (2022). Типоморфизм, типохимизм и изотопно-геохимические характеристики сульфидов железа месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь) // Записки Российского минералогического общества, т. 150, № 1, с. 63–75, DOI: [10.31857/S0869605521010123](https://doi.org/10.31857/S0869605521010123).
- Таусон В.Л., Немеров В.К., Развозжаева Э.А., Спиридонов А.М., Липко С.В., Будяк А.Е. (2009). Парагенетические отношения пирита, углерода и золота на месторождении Сухой Лог и типоморфизм поверхности пирита // ДАН, т. 426, № 4, с. 528–532, EDN: KFPLSF.
- Таусон В.Л., Кравцова Р.Г., Акимов В.В., Липко С.В., Спиридонов А.М., Будяк А.Е., Воронова И.Ю., Белозерова О.Ю., Арсентьев К.Ю. (2018). Формы нахождения углерода, серы и благородных металлов на месторождениях черносланцевой формации (пример золоторудного месторождения Дегдекан, Северо-Восток РФ) // ДАН, т. 478, № 2, с. 221–228, DOI: [10.7868/S0869565218020214](https://doi.org/10.7868/S0869565218020214).
- Холодов В.Н. (1983). Постседиментационные преобразования в элизионных бассейнах. М., Наука, 152 с.
- Холодов В.Н. (2006). Геохимия осадочного процесса. М., ГЕОС, 608 с.
- Цыганков А.А., Матуков Д.И., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Посохов В.Ф., Цыренов Б.Ц., Хромов А.А., Сергеев С.А. (2007). Источники магм и этапы становления позднепалеозойских гранитоидов Западного Забайкалья // Геология и геофизика, т. 48, № 1, с. 156–180, EDN: HYIWBH.
- 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.
- 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, т. 11, с. 1027–1040, DOI: [10.7868/S0016752517110048](https://doi.org/10.7868/S0016752517110048).
- Чугаев А.В., Плотинская О.Ю., Чернышев И.В., Котов А.А. (2014). Неоднородность изотопного состава Pb в сульфидных различных парагенетических ассоциаций на золоторудном месторождении Вернинское (Байкало-Патомское нагорье, Россия) // ДАН, т. 457, № 3, с. 337–342, DOI: [10.7868/S0869565214210191](https://doi.org/10.7868/S0869565214210191).

- Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В., Дубинина Е.О., Гареєв Б.И., Шатагин К.Н., Тарасова Ю.И., Горьчев 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., Капитонов И.Н., Семихатов М.А., Леонов М.В., Рудько С.В. (2011). Вендский возраст верхней части Патомского комплекса Средней Сибири: U-Pb LA-ICPMS датировки обломочных цирконов никольской и жербинской свит // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, т. 19, № 2, с. 115–119.
- Чумаков Н.М., Семихатов М.А., Сергеев В.Н. (2013). Опорный разрез вендских отложений юга Средней Сибири // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, т. 21, № 4, с. 26–52, DOI: [10.7868/S0869592X13040029](https://doi.org/10.7868/S0869592X13040029).
- 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.
- Ярмолюк В.В., Будинко С.В., Коваленко В.И., Антипин В.С., Горегляд А.В., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Козаков И.К., Ковач В.П., Яковлева С.З., Бережная Н.Г. (1997). Геохронология и геодинамическая позиция Ангаро-Витимского батолита // *Петрология*, т. 5, № 5, с. 451–466.
- Buchler J.W. (1978). Syntheses and Properties of Metalloporphyrins, in: Dolphin D. (Ed.) *The Porphyrins*. Academic Press, New York, v. 1, p. 389–483, DOI: [10.1016/B978-0-12-220101-1.50017-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-220101-1.50017-2).
- Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Y.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Y.I., Gareev B.I., Batalin G.A., Ras-sokhina 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, 104855, 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).
- Frezzotti M.L., Tesce F., Casagli A. (2012). Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis // *J. Geochem. Explor.*, v. 112, p. 1–20, DOI: [10.1016/j.gexplo.2011.09.009](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.009).
- Fuchs S., Schumann D., Williams-Jones A.E., Vali H. (2015). The growth and concentration of uranium and titanium minerals in hydrocarbons of the Carbon Leader Reef, Witwatersrand Supergroup, South Africa // *Chem. Geol.*, v. 393–394, p. 55–66, DOI: [10.1016/j.chemgeo.2014.11.018](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.11.018).
- Haack U., Heinrichs H., Boneß M., Schneider A. (1984). Loss of metals from pelites during regional metamorphism // *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 85, p. 116–132, DOI: [10.1007/BF00371702](https://doi.org/10.1007/BF00371702).
- Kerrick D.M., Caldeira K. (1998). Metamorphic  $\text{CO}_2$ , degassing from orogenic belts // *Chem. Geol.*, v. 145, p. 213–232, DOI: [10.1016/S0009-2541\(97\)00144-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00144-7).
- 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 Gold Province, 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).
- Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins F.S., Davidson A., De Waele B., Ernst R.E., Fitzsimons I.C.W., Fuck R.A., Gladkochub D.P., Jacobs J., Karlstrom K.E., Lu S., Natapov L.M., Pease V., Pisarevsky S.A., Thrane K., Vernikovsky V. (2008). Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis // *Precambrian Res.*, v. 160 (1–2), p. 179–210, DOI: [10.1016/j.precamres.2007.04.021](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.021).
- Manning D.A.C., Gize A.P. (1993). The Role of Organic Matter in Ore Transport Processes, in: Engel M.H., Macko S.A. (Eds.). *Organic Geochemistry*. Springer, New York, p. 547–563, DOI: [10.1007/978-1-4615-2890-6\\_25](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2890-6_25).
- Meffre S., Large R.R., Scott R., 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).
- Melezhih 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 (1), p. 39–71, DOI: [10.1016/j.precamres.2015.05.015](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.015).
- Stepanov A.S. (2021). A review of the geochemical changes occurring during metamorphic devolatilization of metasedimentary rocks // *Chem. Geol.*, v. 568, 120080, DOI: [10.1016/j.chemgeo.2021.120080](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120080).
- Sugiyama I. (2015). Metal Transport by Oil: Application to Ore Genesis. MSc Thesis. McGill University, Montréal.
- Tarasova Yu.I., Sotskaya O.T., Skuzovatov S.Yu., Vanin V.A., Kulikova Z.I., Budyak A.E. (2016). Mineralogical and geochemical evidence for multi-stage formation of the Chertovo Koryto deposit // *Geodyn. Tectonophys.*, v. 7 (4), p. 663–677, DOI: [10.5800/GT-2016-7-4-0227](https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-4-0227).
- 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 Krasny 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).
- 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).
- Yakubchuk A., Stein H., Wilde A. (2014). Results of pilot Re–Os dating of sulphides from the Sukhoi Log and Olympiada orogenic gold deposits, Russia // *Ore Geol. Rev.*, v. 59, p. 21–28, DOI: [10.1016/j.oregeorev.2013.12.003](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.003).
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akiniev N.N. (2016). Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits // *Geosci. Front.*, v. 7 (3), p. 453–481, DOI: [10.1016/j.gsf.2015.07.010](https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010).
- Zhong R., Brugger J., Tomkins A.G., Chen Y., Li W. (2015). Fate of gold and base metals during metamorphic devolatilization of a pelite // *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 171, p. 338–352, DOI: [10.1016/j.gca.2015.09.013](https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.09.013).