

УДК 553.4

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУДОВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УГАХАН, БОДАЙБИНСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН

Шепель Елена Вячеславовна¹,
liena-safina@mail.ru

Аюпова Нурия Радитовна^{1,2},
ayupova@mineralogy.ru

¹ Институт минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН, Россия, 456317, г. Миасс, тер. Ильменский заповедник.

² Филиал Южно-Уральского государственного университета в г. Миассе, Россия, 456318, г. Миасс, пр. Октября, 16.

Актуальность исследования обусловлена возрастающим интересом к запоторудным месторождениям, находящимся в Бодайбинском рудном районе. Изучение этого района отражено в многочисленных публикациях, несмотря на это, отсутствует единое представление о происхождении месторождений золота в черносланцевых толщах. В связи с тем, что месторождение Угахан является единственным золоторудным объектом Бодайбинского рудного района, локализованным в породах бужухтинской свиты, детальное минералого-геохимическое изучение вмещающей толщи позволяет оценить золотое оруденение с генетической точки зрения и уточнить перспективность бужухтинской свиты для поиска новых золоторудных объектов.

Цель: выяснение условий литогенеза в концентрации металлов в сульфидсодержащих метаосадочных породах бужухтинской свиты.

Объектом исследования является месторождение Угахан, расположенное в Иркутской области Бодайбинского района.

Методы. Оптико-минералогическое изучение пород выполнено с использованием микроскопа Olympus BX51, оснащенного камерой для фотографирования. Для изучения акцессорной минерализации применен сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega 3 sби с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act. Содержание основных оксидов в породах (9 проб) определено силикатным анализом на 12 компонентов. Содержания элементов-примесей (6 проб, на 40 элементов), в том числе и редкоземельных элементов, изучены методом ИСП-МС (масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой) на спектрометре ICP-MS Agilent 7700х (Япония). Исследования выполнены в Южно-Уральском федеральном научном центре минералогии и геоэкологии УрО РАН.

Результаты. Рудовмещающие породы на месторождении Угахан представлены переслаиванием метапесчаников, метаалевролитов и углеродистых сланцев, обломочный материал которых сложен слабоокатанными зернами кварца, полевых шпатов (альбитом и ортоклазом) и фрагментами микрофоссилий в основной слюдиисто-хлорит-карбонатной массе. Из акцессорных минералов установлены зерна турмалина, циркона, рутила, апатита, титанита, многочисленные минералы редкоземельных элементов – монацит, ксенотим, РЗЭ-содержащий эпидот, бастнезит, анкилит, РЗЭ-содержащие торит, уранинит и коффинит. Последовательность минералообразования свидетельствует о перераспределении первично накопленного вещества и его концентрировании с образованием минеральных форм РЗЭ, Th и U на всех этапах литогенеза и метаморфогенно-идротермальной стадии преобразования первичных углеродсодержащих осадков. Сравнительный анализ химического состава метаосадков показывает, что в ряду метапесчаники → метаалевролиты → углеродистые сланцы уменьшение содержания SiO₂ сопровождается повышением содержания Al₂O₃, MgO, TiO₂, FeO*, K₂O и P₂O₅. В этом же ряду наблюдается возрастание содержания Sc, V, Cr, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Th, U и редкоземельных элементов. Отличительной чертой метаосадков бужухтинской свиты являются высокие содержания V, Co, Ni, Th, U, Mo, Ba, Sr и редкоземельных элементов, что вызвано участием органического вещества в диагенетических процессах. Рассчитанные петрохимические модули и их корреляционные зависимости свидетельствуют о единой природе осадочного материала и возможном влиянии на формирование осадков вулканогенного материала.

Ключевые слова:

Метаосадочные породы, минеральные ассоциации, элементы-примеси, золоторудное месторождение, Бодайбинский рудный район.

Введение

В пределах Байкало-Патомской (Ленской) металлогенической провинции восточной Сибири располагается Бодайбинский золотоносный рудный район, сложенный комплексами, сформировавшимися в рифее – позднем палеозое в условиях последовательной смены палеотектонических режимов от окраинно-континентального осадконакопления (ранний рифей – венд) до коллизионных процессов (кембрий – ранний карбон) [1–3]. В геологическом отношении он охватывает северо-восточную, наименее метаморфизованную, часть Мамско-Бодайбинского мегасинклинария, представленную

верхнепротерозойскими углеродсодержащими карбонатно-терригенными отложениями, смятыми в линейные складки и прорванными позднепалеозойскими гранитоидами [1, 4]. В районе зафиксированы три рудных узла: Хомолхинский (месторождения Угахан, Голец Высочайший), Маракано-Тунгусский (месторождения Ожерелье, Невское, Сухой Лог, Первальное, Вернинское) и Южно-Бодайбинский (месторождения Красное, Кавказ, Копыловское, Догалдынская Жила) и два потенциальных золоторудных узла: Анангро-Ауникитский и Кулибриянский с невыявленными к настоящему времени месторождениями золота [4, 5] (рис. 1).

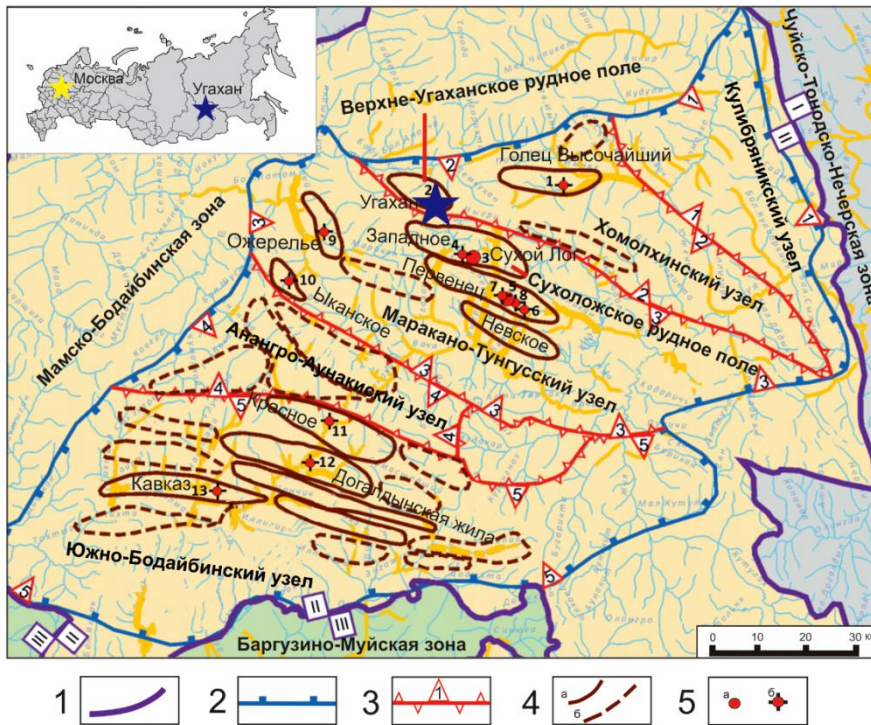


Рис. 1. Схема металлогенического районирования Бодайбинского рудного района на рудное золото [5]: 1 – границы структурно-металлогенических зон; 2 – граница Бодайбинского рудного района; 3 – границы рудных узлов; 4 – границы рудных полей (а – рудных полей, б – потенциальных рудных полей); 5 – месторождения золота (а – крупные, б – средние и мелкие)

Fig. 1. Scheme of metallogenetic zones of the Bodaibo gold-ore region [5]: Boundaries of: 1 – structural-metallogenic zones; 2 – Bodaibo ore region; 3 – ore nodes; 4 – ore fields (a – ore fields, б – potential ore fields); 5 – gold deposits (a – large, б – medium and small)

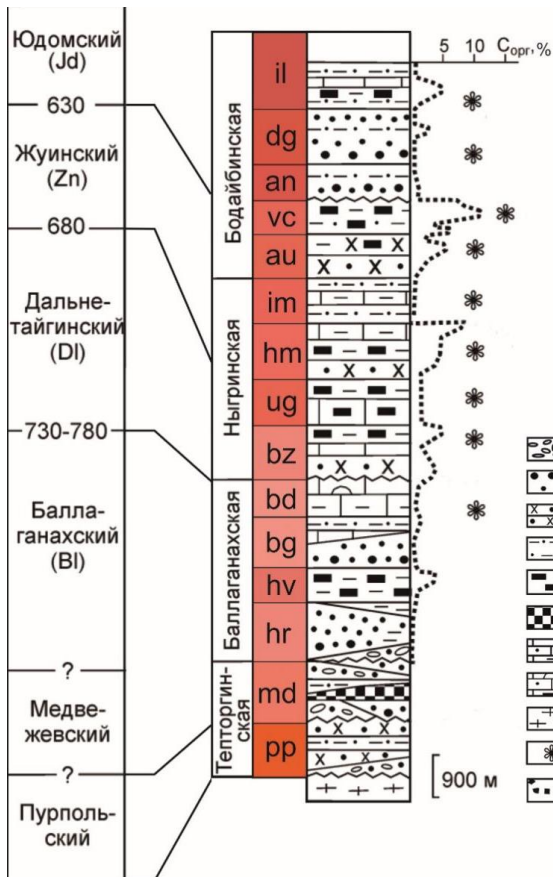


Рис. 2. Стратиграфическая колонка докембрийских отложений Бодайбинского рудного района [2]. Обозначения свит: au – аунakitская; bd – бодайбоканская; bg – бугариктинская; bz – бужуихтинская; dg – догалдынская; hm – хомолхинская; hv – хайвергинская; im – имняхская; md – медвежеская; pp – пурпольская; ug – угаханская; vc – вачская. 1 – конгломераты; 2 – гравелиты, песчаники полимиктовые, аркозовые; 3 – песчаники кварцевые, полевошпатово-кварцевые; 4 – алевропелитовые отложения; 5 – углеродсодержащие отложения; 6 – вулканические породы основного состава; 7 – известняки, известняки песчаные; 8 – известняки фитолиитовые (строматолитовые и микрофитолиитовые), известняки песчаные; 9 – граниты, гнейсы, кристаллические сланцы нижнего докембрия; 10 – местонахождения микрофоссилий; 11 – содержание $C_{орг}$

Fig. 2. Stratigraphic column of Precambrian sedimentary rocks of the Bodaibo gold-ore region [2]. Suites: au – Aunakit; bd – Bodaibokan; bg – Bugarikhta; bz – Buzhuikhta; dg – Dogaldyn; hm – Khomolkho; hv – Khaiverga; im – Imnyakh; md – Medvezhevsk; pp – Purpol; ug – Ugakhan; vc – Vacha. 1 – conglomerates; 2 – gravelites, polymictic sandstones, arkose; 3 – quartz and feldspar-quartz sandstones; 4 – siltstones; 5 – carbonaceous sediments; 6 – volcanic rocks of the basic composition; 7 – limestones, sandy limestones; 8 – phylolitic limestones (stromatolite and microphytolite), sandy limestones; 9 – granites, gneisses, crystalline shales of the Lower Precambrian; 10 – locations of microfossils; 11 – C_{org} contents

Данные рудные узлы относятся по геологическим особенностям и слагающим их углеродсодержащим литолого-фациальным толщам с золоторудной минерализацией к различным стратиграфическим уровням, представленным отложениями баллаганакской, ныгринской и бодайбинской серий эдиакарского периода (~540 – ~770 млн лет) неопротерозоя [4, 6–12] (рис. 2). Характерной чертой района является зональное изменение степени метаморфизма рудовмещающих пород от низов амфиболитовой фации в краевой части района до серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации в центральной [7]. В зависимости от степени метаморфизма меняется минеральный состав, морфологические особенности и типоморфные свойства минералов, состав элементов-примесей рудовмещающей толщи.

В данной работе приведена характеристика минералого-геохимических особенностей рудовмещающей толщи месторождения Угахан Хомолхинского рудного узла, единственного золоторудного объекта в отложениях бужуихтинской свиты ($R_{2+3}bz$) (рис. 2). Изучение минералогии и литогеохимических особенностей метаосадочных пород месторождения может дополнить сведения об источниках вещества, минералого-геохимических ассоциациях, чувствительных к процессам преобразования исходных терригенных пород. Полученные результаты исследований могут быть полезными в оценке перспективности бужуихтинской свиты для поиска новых золоторудных объектов.

Геологическая характеристика месторождения

Месторождение Угахан расположено в 150 км от г. Бодайбо в северной части Бодайбинского рудного района в пределах Хомолхинского рудного узла (рис. 1). Оруденение приурочено к висячему крылу запрокинутой к югу Верхне-Угаханской антиклинальной структуры, которая сложена отложениями бужуихтинской свиты [6, 13] (рис. 3).

Бужуихтинская свита сложена переслаивающимися углеродистыми сланцами, метаалевролитами и метапесчаниками, в которых имеются зоны сульфидной вкрапленной и кварц-сульфидной прожилково-вкрапленной минерализации. Выше по разрезу, на отложениях бужуихтинской свиты, согласно залегают карбонатизированные метапесчаники угаханской свиты, слагающие крылья одноименной антиклинали. Породы бужуихтинской свиты подвержены региональному метаморфизму серицит-хлоритовой субфации фации зеленых сланцев [13].

На месторождении оконтурены пять рудных залежей с содержанием 0,2 г/т Au, которые расположены в нижних горизонтах верхне-бужуихтинской подсвиты в виде кварцево-жильной и прожилково-

вкрапленной сульфидной минерализации [13]. Руды сульфидами насыщены слабо (мало- и убогосульфидные). Среднее суммарное содержание сульфидов на рудную зону составляет 1032 г/т, что составляет чуть больше 0,1 % объема породы [13]. По данным пробирного анализа содержание золота в интервале минерализованной зоны (мощность 50 м, 49 бороздовых проб) колеблется от 0,01 до 9,16 г/т при среднем содержании 1,08 г/т, а содержания $Ag < 1,00$ г/т [13].

Материалы и методы исследования

Для минералого-геохимических исследований были отобраны штучные образцы метапесчаников, метаалевролитов и углеродистых сланцев, содержащие сульфидную минерализацию, кварцевые и карбонатные прожилки в карьере месторождения Угахан. Петрографическое изучение метаосадков выполнено с использованием микроскопа Olympus BX51, оснащенного камерой для фотографирования. Для изучения акцессорной минерализации применен сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega 3 sbu с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act (диаметр электронного пучка 1 микрон, ток пучка 15 нА, ускоряющее напряжение 20 кВ, время счета 120 с для пиков, время задержки 10–15 % для пиков). Количественный анализ химического состава минералов проведен с использованием эталонов зарегистрированного стандарта № 1362 (Microanalysis Consultants Ltd), а также были использованы MINM25-53 (Astimes Scientific Limited, серийный номер 01-044) и НЭРМА.ГЕО1.25.10.7417 (аналитик М.А. Рассомахин). Использованная модификация оборудования содержания CO_2 и ОН групп не определяет.

Пробы для анализов были подготовлены из образцов, представляющих собой однородные слои метапесчаников, метаалевролитов и углеродистых сланцев, которые были отобраны на различных уровнях в карьере месторождения. Содержание основных оксидов в породах (9 проб) определено силикатным анализом на 12 компонентов. Содержания элементов-примесей (6 проб, на 40 элементов), в том числе и редкоземельных элементов (РЗЭ), изучены методом ИСП-МС (масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой) на спектрометре ICP-MS Agilent 7700x (Япония) путем разложения образцов растертой породы с помощью кислотного разложения на плитке (аналитик К.А. Филиппова). Для анализа использовались навески образцов массой 0,1 г. Интерпретация состава пород месторождения Угахан проводилась по стандартным петрохимическим параметрам (модулям), рассчитываемым по силикатным анализам [14]. Полученные результаты анализов сопоставлены с данными из литературных источников [15, 16].

Результаты исследования

Минеральный состав метасадков

Метасадочные породы (метапесчаники, металевролиты и углеродистые сланцы) характеризуются текстурами от сланцеватой до линзовидно-очковой и лепидогранобластовой, лепидобластовой, гранобластовой структурами (рис. 4, а, б). Количество обломочного материала в метапесчаниках и металевролитах варьирует от 20 до 65 об. % и уменьшается в углеродистых сланцах до 2–3 об. %. Обломочный материал в основном представлен слабоокатанными зернами кварца и полевыми шпатами (альбитом и ортоклазом), а основная масса – слюдястым материалом (мусковитом и серицитом), хлоритом и карбонатами в разных соотношениях (рис. 4, в). Фрагменты микрофоссилий округлой, овальной и сложной формы (диаметр до 1,5 мм), иногда с хорошо выраженной концентрической зональностью, проявленной в чередовании темных (углеродистое вещество) и светлых (карбонатно-слюдястый материал) слоев, являются характерным признаком всех изученных типов пород (рис. 4, з). По результатам термического анализа содержание органического вещества в пробах составляет 1–3 мас. % [17].

Из аксессуарных минералов установлены зерна турмалина, циркона, рутила, апатита и титанита. Для циркона и турмалина отмечается тонкая новообразованная кайма мощностью от 1–3 до 10 мкм. Апатит обычно замещается минералами РЗЭ (монацитом, ксенотимом и анкилитом). Титанит встречается в межобломочном пространстве.

Редкоземельная минерализация в изученных породах представлена РЗЭ-содержащим эпидотом, бастнезитом, анкилитом, РЗЭ-содержащим торитом, монацитом и ксенотимом. Подробное описание редкоземельных минералов приведено в работе [17]. Количество и разнообразие минералов РЗЭ возрастает от метасадочников к углеродистым сланцам. Основным концентратом РЗЭ является РЗЭ-содержащий эпидот (Σ РЗЭ 12,17–24,01 мас. %), который обнаружен в виде обломков (рис. 4, а) и кристаллов, частично замещенных более поздними карбонатами РЗЭ – бастнезитом и анкилитом (рис. 4, д, е). Повсеместно в каймах вокруг кристаллов РЗЭ-эпидота в ассоциации с бастнезитом наблюдаются многочисленные включения торита размером 10–15 мкм (рис. 4, д). В составе торита содержание РЗЭ варьирует от 18,9 до 25,01 мас. %. Более поздние тонкие прожилки (мощность до 10 мкм) анкилита обнаружены в пирите. Наблюдается замещение монацитом, ксенотимом и анкилитом апатита. Апатит также встречается в тесном сростании с ксенотимом (рис. 4, ж). В ассоциации с минералами РЗЭ установлены минералы урана – уранинит и коффинит – в виде редких самостоятельных образований размером до 30 мкм в основной массе. Для уранинита характерно образование коллоидно-почковидных выделений в ассоциации с органическим веществом (рис. 4, з). Наблюдается замещение уранинита анкилитом. Коффинит обычно образует оторочку вокруг уранинита.

В изученных породах наблюдается сульфидная минерализация от единичных вкрапленных зерен пирита до образования сульфидных прожилков мощностью до 1 см при содержании сульфидов в породах до 2 %. Преобладающими сульфидными минералами являются пирротин и пирит, редко встречаются халькопирит, сфалерит, галенит, арсенопирит и молибденит. Породы местами пронизаны сетью тонких кварцевых прожилков и жилами кварца мощностью до 5 см. Самородное золото округлой, изометричной, удлиненной и таблитчатой формы обычно расположено в промежутках между нерудными минералами, встречается в сростках с хлоритом, мусковитом, кварцем, редко с сульфидами.

Геохимия метасадков

Основные породообразующие компоненты. В химическом составе метасадочных пород месторождения Угахан проявляется общая закономерность в вариациях породообразующих оксидов (рис. 5, а). Метасадочники характеризуются повышенными содержаниями (мас. %) SiO_2 (66,92–76,00) и пониженными Al_2O_3 (11,67–13,32). По сравнению с метасадочниками в углеродистых сланцах содержания SiO_2 снижаются (мас. %) (51,40–57,26), а содержания Al_2O_3 (20,56–22,17) и TiO_2 (1,01–1,10) увеличиваются. В металевролитах отмечаются их промежуточные значения (табл. 1). Содержания MgO (мас. %) в изученных породах варьируют. В углеродистых сланцах и металевролитах определены повышенные содержания $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$, K_2O и P_2O_5 по сравнению с метасадочниками (табл. 1). Наблюдаются варьирующие содержания CaO в метасадочниках (мас. %) (до 4,26), тогда как для углеродистых сланцев они достаточно низкие (0,28–0,48). Преобладание Na_2O над K_2O характерно для метасадочников, а обратные соотношения – для углеродистых сланцев (рис. 5, а). Низкие содержания MnO – типичная черта всех типов изученных пород. Среднее значение содержаний основных породообразующих компонентов в изученных породах сопоставимо с опубликованными данными [15, 16] (табл. 1). Некоторые колебания в содержаниях FeO^* и CaO отражает слоистый характер пород и незначительные различия в степени их сульфидизации ($S_{\text{сульф}}$ до 3,97 мас. %) и карбонатизации (CO_2 до 3,75 мас. %).

Элементы-примеси. Распределение элементов-примесей в метасадочных породах представлено в табл. 2. Наблюдается более чем двукратное увеличение содержаний Sc, V, Cr, Ga, Rb, Ba, Zr, Th, U в ряду: метасадочники → металевролиты → углеродистые сланцы (табл. 2, рис. 5, б). Повышенные содержания (г/т) Cu (63,4–130), Ni (77,6–171), Co (19,9–51,4) характерны для металевролитов и углеродистых сланцев. В углеродистых сланцах выявлены наиболее высокие содержания Zn (125–190 г/т). Повышенные содержания W (до 20,4 г/т) обнаружены в метасадочниках и металевролитах (рис. 5, б). Крайне низкие содержания Be, Se, Mo (менее 3 г/т) и Cd, Te, Tl (менее 0,50 г/т), аномально высокие содержания Ba (879–3006 г/т) и Sr (118–387 г/т), равномерное распределение содержаний As (20,0–57,5 г/т) – характерная чер-

та всех разновидностей изученных пород. Повышенные содержания халькофильных элементов (Cu, Co, Ni, As, Mo, W) в изученных породах по сравнению с

данными по [15, 16] обусловлены присутствием значительного количества сульфидной минерализации в метаалевролитах и углеродистых сланцах.

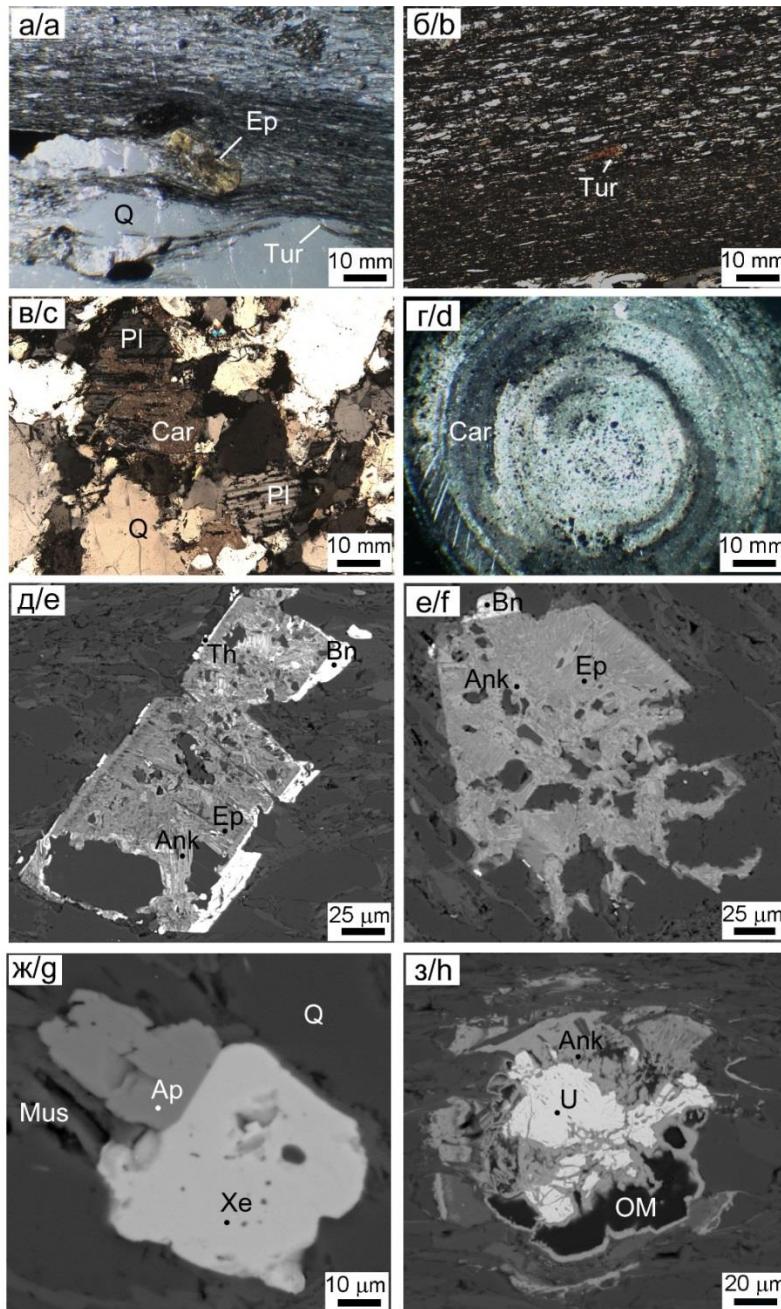


Рис. 4. Минеральный состав метасадочных пород бужуйкхтинской свиты месторождения Угахан: а) РЗЭ-содержащий эпидот (Ep) на контакте слоев углеродистых сланцев и метапесчаников; б) зерна турмалина (Tur) в слоях метаалевролитов и углеродистых сланцев; в) развитие карбоната (Car) по таблитчатым зернам плагиоклаза (Pl); г) концентрически-зональное строение микрофоссилии; д) кайма из бастнезита (Bn) с включениями РЗЭ-содержащего торита (Th) вокруг РЗЭ-содержащего эпидота (Ep); е) развитие анкилита (Ank) по РЗЭ-содержащему эпидоту; ж) тесное срастание ксенотима (Xe) с апатитом (Ap); з) органическое вещество (OM) в ассоциации с уранинитом (U) и анкилитом. Q – кварц, Mus – мусковит. Фотографии а) в поляризованном свете; б–г) с анализатором; д–з) BSE фото

Fig. 4. Minerals in metasedimentary rocks from the Buzhuikhta formation of the Ugakhan deposit: a) REE-bearing epidote (Ep) at the contact between layers of carbonaceous shales and metasandstones; b) tourmaline (Tur) grains in meta-siltstone and carbonaceous shale layers; c) replacement of tabular plagioclase (Pl) by carbonate (Car); d) clearly concentric-zoned texture of microfossil; e) tabular grain of REE-epidote (Ep) with a bastnesite (Bn) rim containing thorite inclusions (Th); f) replacement of REE-epidote (Ep) by ankylite (Ank); g) intergrowths of xenotime (Xe) and apatite (Ap); h) organic matter (OM) in association with uraninite (U) and ankylite. Q – quartz, Mus – muscovite. Photos: a) polarized light; b–d) with analyzer; e–h) BSE photo

Таблица 1. Химический состав метасадков бужуйхтинской свиты на месторождении Угахан (мас. %)

Table 1. Chemical composition of metasedimentary rocks of Buzhuikhta formation in the Ugakhan deposit (wt. %)

Компоненты Components	Метаспесчаники Metasandstones			Метаалевролиты Metasiltstones			Углеродистые сланцы Black shales			Среднее/Average		
	n=9	по [15], n=31	по [16], n=26	n=9	по [15], n=31	по [16], n=26	n=9	по [15], n=31	по [16], n=26	n=9	по [15], n=31	по [16], n=26
SiO ₂	69,14	76,00	66,92	64,40	59,60	61,24	51,40	57,26	55,34	62,37	55,67	55,7
TiO ₂	0,62	0,41	0,63	0,60	0,51	0,87	1,08	1,10	1,01	0,76	0,76	0,56
Al ₂ O ₃	12,19	11,67	13,32	12,26	16,70	11,66	22,17	20,56	20,97	15,72	13,91	13,91
FeO*	2,86	2,74	6,52	11,93	3,55	8,39	9,39	9,08	10,49	7,22	3,56	4,67
MnO	0,04	0,01	0,02	0,02	0,05	0,11	0,01	0,13	0,11	0,06	0,04	0,04
MgO	0,76	0,82	0,53	0,52	1,33	2,86	1,70	0,73	0,76	1,11	0,88	1,04
CaO	4,26	1,55	4,06	1,66	5,00	4,39	0,48	0,28	0,37	2,45	8,09	8,09
Na ₂ O	3,08	2,34	3,53	2,02	2,01	2,96	1,44	1,46	1,17	2,22	1,67	1,77
K ₂ O	1,44	1,68	1,42	1,62	2,92	0,86	5,15	4,12	3,48	2,52	2,36	2,72
P ₂ O ₅	<0,05	<0,05	<0,05	0,13	0,08	0,22	0,07	0,08	0,26	0,11	0,08	0,08
п.п.п.	3,30	2,02	2,48	4,26	3,90	5,78	6,64	4,70	5,34	4,27	–	–
CO ₂	2,00	0,32	0,45	0,96	3,75	2,76	0,13	<0,10	0,40	1,22	–	–
S _{сульф}	0,65	0,60	0,47	3,21	0,15	2,37	3,97	2,45	3,10	1,89	–	1,57
Сумма	99,74	99,61	99,93	100,38	99,55	99,54	99,66	99,60	99,70	–	–	–

Примечание. FeO* – FeO+Fe₂O₃; п.п.п. – потери веса пробы при ее прокаливании; «–» – нет данных; n – количество анализов

Note: FeO* – FeO+Fe₂O₃; p.p.p. – weight loss of the sample when it is calcined; «–» – no data; n – number of analyzes.

Таблица 2. Содержания элементов-примесей в метасадочных породах бужуйхтинской свиты Угаханского месторождения (г/т)

Table 2. Contents of trace elements in the metasedimentary rocks of the Buzhuikhta formation of the Ugakhan deposit (g/t)

Элементы-примеси Impurity elements	Метаспесчаники Metasandstones		Метаалевролиты Metasiltstones		Углеродистые сланцы Black shales		Среднее/Average		
	n=6	по [15], n=32	по [16], n=26	n=6	по [15], n=32	по [16], n=26	n=6	по [15], n=32	по [16], n=26
Li	16,3	18,6	16,3	54,1	42,5	53,7	33,58	–	–
Be	0,80	0,89	0,85	1,41	2,46	1,53	1,32	–	–
Sc	7,78	7,44	8,13	15,06	21,3	21,02	13,46	–	–
V	61,8	51,8	86,6	106	177	168	108	206	166
Cr	50,9	52,6	50,9	78,7	152	148	88,85	98,32	93,44
Co	6,56	4,54	51,4	19,9	38,5	20,2	23,52	8,01	8,01
Ni	20,7	16,6	171	124	102	77,6	85,32	38,44	38,4
Cu	16,6	15,8	130	79,8	88,5	63,4	65,68	36,57	36,57
Zn	39,8	30,3	46,2	36,1	190	125	77,9	74,46	74,61
Cd	0,24	0,15	0,29	0,12	0,31	0,22	0,22	–	–
Ga	12,3	13,8	12,3	16,4	32,5	21,1	18,07	–	–
As	26,3	57,5	20,0	29,4	41,7	32,9	34,63	–	5,20
Rb	59,8	69,7	66,8	80,6	180	152	101	–	93,8
Sr	387	118	229	145	167	130	196	–	840
Y	9,47	3,76	7,45	7,11	15,2	5,63	8,1	–	–
Zr	122	72,9	81,4	107	134	167	114	172	–
Mo	2,25	2,62	1,60	1,13	2,87	0,97	1,91	8,72	8,72
Ba	943	1016	879	546	3006	693	1180	1361	1360
W	9,89	20,4	20,3	16,3	4,15	2,36	12,23	1,81	–
Pb	7,24	3,34	16,4	10,3	7,97	15,8	10,18	13,95	–
Th	8,33	4,11	6,55	5,04	12,1	5,70	6,97	8,65	–
U	1,65	0,95	1,16	1,00	2,26	0,99	1,34	3,12	3,61
La	18,4	10,4	37,3	30,1	46,8	39,1	30,35	–	–
Ce	36,3	21,5	72,3	63,7	93,7	86,3	62,3	–	–
Pr	4,04	2,3	8,11	6,52	10,6	9,2	6,8	–	–
Nd	14,7	8,51	30,1	35,8	40,2	37,4	27,79	–	–
Sm	2,68	1,53	5,47	6,51	7,57	6,87	5,11	–	–
Eu	0,88	0,67	1,25	1,09	2,01	1,99	1,32	–	–
Gd	2,42	1,38	4,16	3,93	5,35	4,65	3,65	–	–
Tb	0,34	0,16	0,46	0,41	0,66	0,61	0,44	–	–
Dy	1,82	0,85	1,85	1,73	3,14	2,89	2,05	–	–
Y	9,47	3,76	7,45	8,65	15,2	10	9,09	–	–
Ho	0,37	0,15	0,29	0,42	0,56	0,65	0,41	–	–
Er	1,13	0,71	0,81	1,30	1,63	1,56	1,19	–	–
Tm	0,16	0,06	0,11	0,22	0,25	0,31	0,19	–	–
Yb	1,11	0,45	0,76	1,49	1,6	1,86	1,21	–	–
Lu	0,18	0,07	0,14	0,23	0,5	0,2	0,22	–	–
сумма РЗЭ	94	52	170	162	229	203	151,67	–	–
V/Cr	1,21	0,99	1,70	1,34	1,16	1,14	1,26	–	–
V/(V+Ni)	0,75	0,75	0,33	0,46	0,63	0,68	0,6	–	–
Eu/Eu*	1,52	2,02	1,15	0,95	1,39	1,55	1,43	–	–
Ce/Ce*	0,49	0,39	0,69	0,63	0,78	0,77	0,63	–	–

Примечание/Note. Содержания/Contents Se<0,50, Te<0,30, Tl<0,50, Au<0,20, Ag<1,00.

Редкоземельные элементы. Содержания РЗЭ уменьшаются в ряду: углеродистые сланцы (203–229 г/т) → метаалевролиты (162–170 г/т) → метапесчаники (52–94 г/т). Спектры распределения РЗЭ, нормированные на североамериканский сланец (NASC), для всех изученных пород характеризуются преобладанием легких лантаноидов над тяжелыми: $LREE/HREE=4,53-11,72$ (рис. 5, в). На спектре РЗЭ отчетливо проявлена положительная Eu-аномалия $Eu/Eu^*=Eu_N/(Sm_N^*/Gd_N)^{1/2}$ [18] и заметная отрицательная Ce-аномалия $Ce/Ce^*=0,39-0,78$ ($Ce/Ce^*=Ce_N/(La_N+Nd_N)^{1/2}$ [18]).

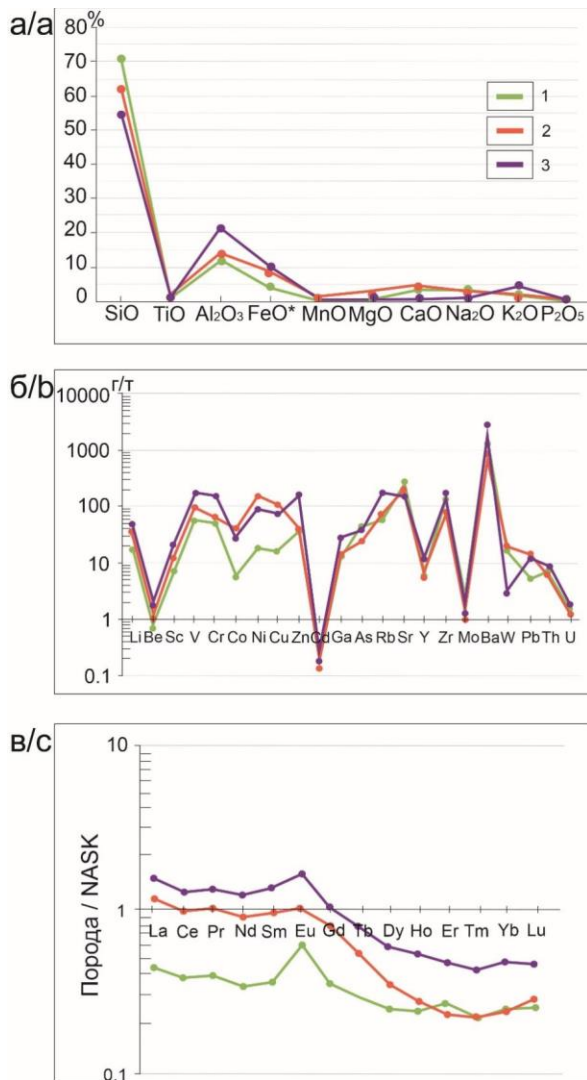


Рис. 5. Графики распределения средних содержаний основных породообразующих оксидов (а), элементов-примесей (б) и спектры распределения РЗЭ, нормированные на NASC [19] (в) в метасадочных породах месторождения Угахан: 1 – метапесчаники; 2 – метаалевролиты; 3 – углеродистые сланцы

Fig. 5. Main oxide (a) and trace element (b) contents and NASC [19] normalized REE plot (c) of metasedimentary rocks from the Buzhuikhta Formation in the Ugakhan deposit: 1 – metasandstones; 2 – metasiltstones; 3 – black shales

Обсуждение результатов исследования

Существуют две основные теории происхождения золоторудных месторождений в черносланцевых толщах Бодайбинского района: 1) постмагматическо-гидротермальная, согласно которой основной этап концентрирования золота в рудах и привнос части цветных и благородных металлов отвечает становлению постметаморфических интрузий и сопровождается метасоматическими преобразованиями пород [20–22] и 2) метаморфогенно-гидротермальная, согласно которой рудообразование связано с региональным метаморфизмом металлоносных углеродистых толщ с первичным накоплением золота в органическом веществе и осадочном и диагенетическом пирите, где значительная роль отводится к гидротермально-осадочным процессам, представленным жильно-прожилковым окварцеванием, сульфидизацией, мусковитизацией и образованием железомagneзиальных карбонатов [7, 10, 11, 23, 24]. Для метаморфогенно-гидротермальной модели рудообразования важно выявление разнообразных минеральных ассоциаций и литохимических особенностей золотоносных углеродистых пород, связанных с условиями седиментогенеза, характером и полнотой проявления последующих стадий литогенеза.

Вмещающие породы бужуйхтинской свиты Угаханского месторождения золота метаморфизованы в условиях серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации метаморфизма [13], что подтверждается их текстурно-структурными особенностями, составом породообразующих минералов и присутствием аксессуарной минерализации, связанной с различными стадиями эволюции первичных осадков. В пределах месторождения гидротермально-метасоматические изменения выражены появлением сульфидной минерализации, редкой железомagneзиальной карбонатизации и мусковитизации. Околорудные метасоматиты на месторождении отсутствуют.

Характерной чертой изученных метаосадочных пород, в отличие от других месторождений Бодайбинского района, является разнообразие РЗЭ-минералов (монацит, ксенотим, бастнезит, анкилит, РЗЭ-содержащий эпидот-алланит) в ассоциации с U-Th минералами (РЗЭ-содержащие торит, уранинит, коффинит) [17], количество которых возрастает от метапесчаников к углеродистым сланцам. Наличие реликтовых и новообразованных форм минералов свидетельствует о перераспределении первично накопленного вещества и его концентрировании в виде минеральных форм на всех этапах литогенеза и метаморфогенно-гидротермальной стадии преобразования первичных углеродсодержащих осадков, которая сопровождалась консолидацией пирротин-пиритовых прослоев и перераспределением золота.

Содержания основных породообразующих компонентов изученных пород бужуйхтинской толщи характеризуются закономерным распределением и в целом сопоставимы с таковыми в метаосадочных породах Бодайбинского района [8, 15, 16]. Отсутствие

значимых различий в содержании породообразующих компонентов между рудной залежью и окружающими породами рудоносной толщи может свидетельствовать о незначительных метасоматических изменениях пород, связанных с рудообразованием [25]. Для интерпретации полученных химических анализов пород в работе использовались значения петрохимических модулей [14, 26, 27], вариации которых показаны на диаграммах (рис. 6).

По значениям гидролизатного модуля ($GM = TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + MnO / SiO_2$) состав метапесчаников, метаалевролитов и углеродистых сланцев месторождения Угахан варьирует от силитов до гидролизатов (табл. 3), значения которых указывают на зрелые осадочные породы, которые практически не подвергались выветриванию [14]. Эти значения постепенно увеличиваются от 0,20–0,31 для метапесчаников, до 0,34–0,39 для метаалевролитов и 0,54–0,69 для углеродистых сланцев (рис. 6, а). Подобные содержания продуктов гидролиза в осадках указывают на большее количество в них терригенного материала и близость источника продуктов вулканической деятельности [14, 26].

Значения алюмокремниевого модуля ($AM = Al_2O_3 / SiO_2$) подтвердили интерпретацию значений GM: метапесчаники и метаалевролиты попадают в область песчаных пород ($AM = 0,15–0,28$), а углеродистые сланцы – в поле глинистых пород ($AM = 0,36–0,43$) [14]. Значимая положительная корреляция между AM и GM ($r = 0,94$) (табл. 3) может свидетельствовать о единой природе осадочного материала для всех указанных пород (рис. 6, а), что также характерно для метаосадков из других месторождений Бодайбинского района (например, [28]).

Показатели фемического модуля ($FM = Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO / SiO_2$) от 0,05 до 0,22

(табл. 3, рис. 6, б) могут указывать на возможное влияние вулканического материала при их формировании [27, 29], что согласуется с данными [3] о присутствии вулканического материала среднего состава в метаосадках Бодайбинского рудного района.

Следует отметить, что между значениями GM–ФМ ($r = 0,710$) и GM–AM ($r = 0,893$), в которых параметры нормированы по SiO_2 , наблюдаются высокие позитивные корреляции (табл. 4). Однако эти данные не являются информативными в плане генетической интерпретации, так как обусловлены формой модулей (распределение первого параметра полностью симбатно с распределением второго).

Показатели титанового модуля $TM = TiO_2 / Al_2O_3$ (0,04–0,07) (табл. 3, рис. 6, в) указывают на то, что накопление исходных осадков происходило в условиях гумидного климата в прибрежных мелководных бассейнах [27].

Модуль нормированной щелочности ($NKM = (Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$) представляет информацию о соотношении двух главных типов щелочных алюмосиликатов в составе пород: пониженные значения свидетельствуют о преобладании слюд, а повышенные – о преобладании полевых шпатов [27]. Значения НКМ для метаосадков месторождения близки к значению мусковитовой нормы 0,22–0,30, что подтверждается преобладанием мусковита в их минеральном составе. Однако негативная корреляция между значениями НКМ–GM ($r = -0,80$) и НКМ–AM ($r = -0,74$) (табл. 4, рис. 6, г) и значения $NM = Na_2O / Al_2O_3$ (0,12–0,27) и $KM = K_2O / Al_2O_3$ (0,07–0,17) в песчаниках и алевролитах (рис. 6, д, е) отвечает, что по минеральному составу эти породы относятся к менее гидрослюдистым породам с примесью полевых шпатов [27].

Таблица 3. Петрохимические модули метаосадочных пород месторождения Угахан

Table 3. Petrochemical modules of metasedimentary rocks of the Ugakhan deposit

Петрохимические модули Petrochemical modules	Модули/Modules								
	GM HM	AM ASM	FM FM	HM SM	KM PM	NKM NAM	TM TM	ЩМ AM	ЖМ IM
Метапесчаники Metasandstone	0,23	0,18	0,05	0,25	0,12	0,37	0,05	2,14	0,23
	0,20	0,15	0,05	0,20	0,14	0,34	0,04	1,39	0,23
	0,31	0,20	0,11	0,27	0,11	0,37	0,05	2,49	0,47
Метаалевролиты Metasiltstone	0,39	0,19	0,19	0,16	0,13	0,30	0,05	1,25	0,93
	0,35	0,28	0,08	0,12	0,17	0,30	0,03	0,69	0,21
	0,34	0,19	0,19	0,25	0,07	0,33	0,07	3,44	0,68
Углеродистые сланцы Black shales	0,64	0,43	0,22	0,06	0,23	0,30	0,05	0,28	0,40
	0,54	0,36	0,17	0,07	0,20	0,27	0,05	0,35	0,43
	0,59	0,38	0,21	0,06	0,17	0,22	0,05	0,34	0,48
По данным/After data [15]	0,33	0,25	0,08	0,12	0,17	0,29	0,05	0,71	0,25
По данным/After data [16]	0,34	0,25	0,10	0,13	0,20	0,32	0,04	0,65	0,33

Примечание. Модули (расчитаны по [14]): Гидролизатный – $GM = TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + MnO / SiO_2$; Алюмокремниевый – $AM = Al_2O_3 / SiO_2$; Фемический – $FM = Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO / SiO_2$; Натриевый – $HM = Na_2O / Al_2O_3$; Калиевый – $KM = K_2O / Al_2O_3$; Нормированной щелочности – $NKM = (Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$; Титановый – $TM = TiO_2 / Al_2O_3$; Щелочной – $ЩМ = Na_2O / K_2O$; Железный – $ЖМ = (Fe_2O_3 + FeO + MnO) / TiO_2 + Al_2O_3$.

Note. Modules (calculated according to [14]): Hydrolyzate – $HM = TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + MnO / SiO_2$; Alumosilicic – $ASM = Al_2O_3 / SiO_2$; Femic – $FM = Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO / SiO_2$; Sodium – $SM = Na_2O / Al_2O_3$; Potassium – $PM = K_2O / Al_2O_3$; Normalized alkalinity – $NAM = (Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$; Titanium – $TM = TiO_2 / Al_2O_3$; Alcaline – $AM = Na_2O / K_2O$; Iron – $IM = (Fe_2O_3 + FeO + MnO) / TiO_2 + Al_2O_3$.

Таблица 4. Корреляционная матрица для петрохимических модулей метасадочных пород Угаханского месторождения

Table 4. Correlation matrix for petrochemical modules of metasediments from Ugakhan deposit

	ГМ HM	AM ASM	ФМ FM	HM SM	KM PM	HKM NAM	TM TM	ЩМ AM	ЖМ IM
ГМ HM	1,00								
AM ASM	0,94	1,00							
ФМ FM	0,84	0,63	1,00						
HM SM	-0,85	-0,89	-0,55	1,00					
KM PM	0,71	0,84	0,30	-0,89	1,00				
HKM NAM	-0,80	-0,74	-0,67	0,88	-0,56	1,00			
TM TM	0,17	-0,04	0,52	0,27	-0,44	0,03	1,00		
ЩМ AM	-0,66	-0,76	-0,27	0,93	-0,92	0,72	0,56	1,00	
ЖМ IM	0,23	-0,10	0,68	0,05	-0,31	-0,22	0,55	0,22	1,00

Примечание. Расшифровку петрохимических модулей см. Табл. 3.

Note. Interpretations of petrochemical modules see in Table 3.

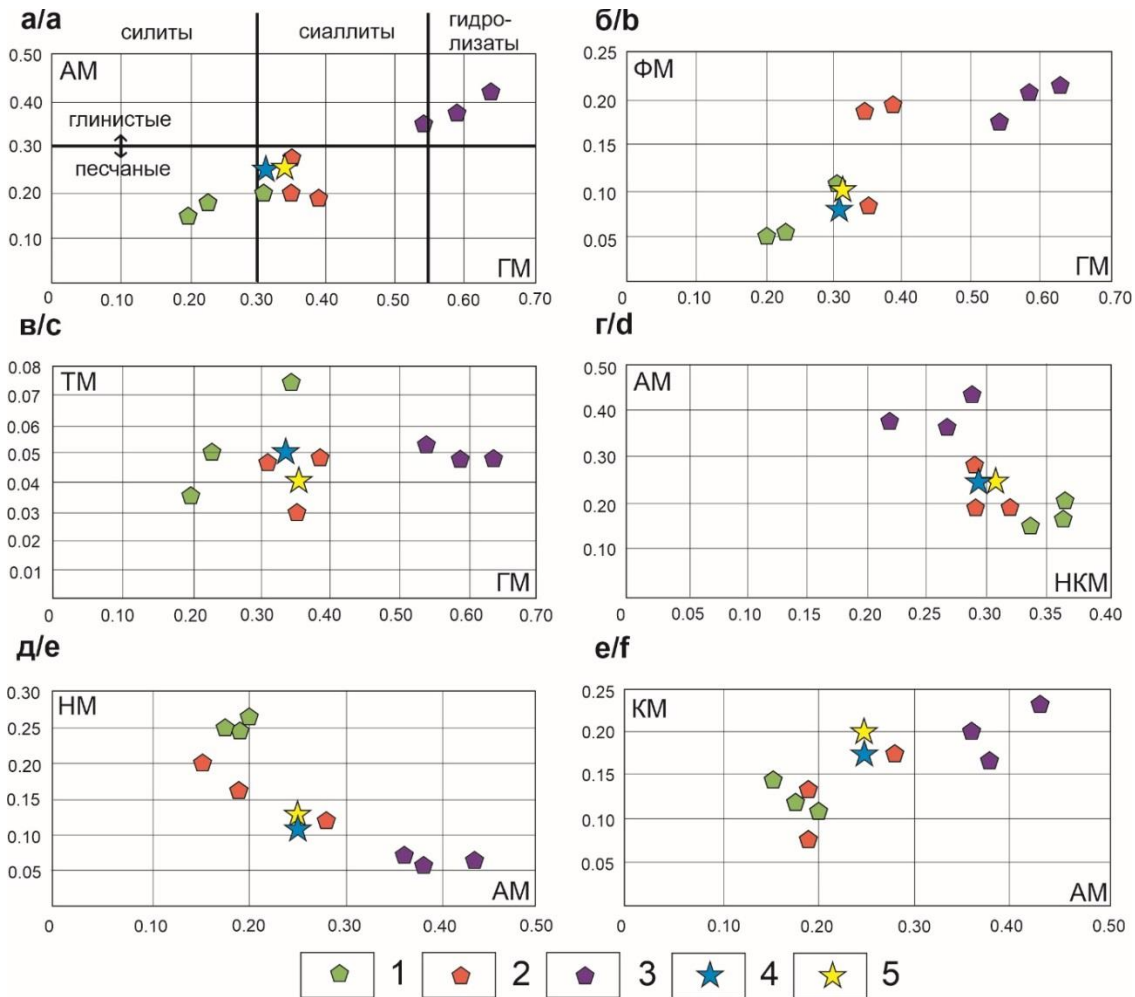


Рис. 6. Модульные диаграммы ГМ–AM (а), ГМ–ФМ (б), ГМ–ТМ (в), НКМ–AM (г), AM–HM (д) и AM–KM (е) для метасадочных пород месторождения Угахан: 1 – метапесчаники, 2 – метаалевролиты, 3 – углеродистые сланцы, 4 – данные по [16], 5 – данные по [15]

Fig. 6. HM–ASM (a), HM–FM (b), HM–TM (c), NAM–ASM (d), ASM–SM (e) and ASM–PM (f) module diagrams for metasedimentary rocks of the Ugakhan deposit: 1 – metasandstones, 2 – metasiltstones, 3 – black shales, 4 – after [16], 5 – after [15]

Для определения формационной принадлежности пород использована диаграмма ASC [30]. По параметрам, рассчитанным $A=1000 \cdot (Al_2O_3 - (CaO + K_2O + Na_2O))$, $S=1000 \cdot (SiO_2 - (Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + CaO + MgO))$ и $C=(CaO + MgO)$, металевролиты и углеродистые сланцы располагаются на границе карбонатно-углеродистой и терригенно-углеродистой формаций (рис. 7).

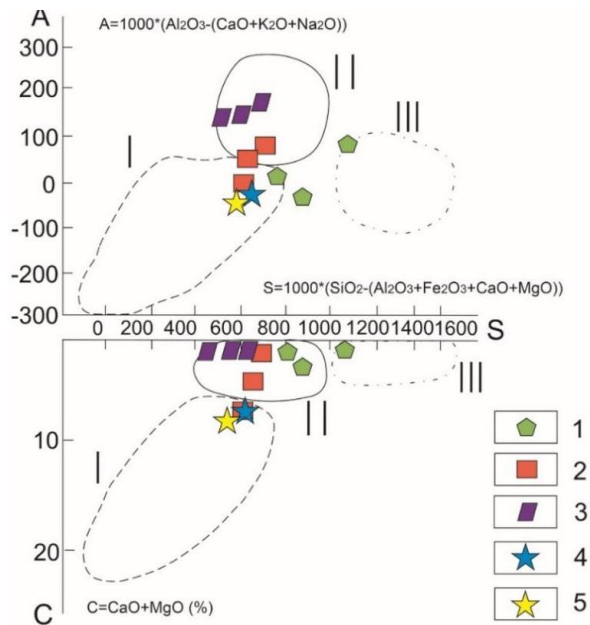


Рис. 7. Петрохимическая диаграмма ASC [30] для метаосадков месторождения Угахан: 1 – метапесчаники; 2 – металевролиты; 3 – углеродистые сланцы; 4 – данные по [16], 5 – данные по [15]. Поля составов осадочных формаций: I – карбонатно-углеродистой; II – терригенно-углеродистой; III – кремнисто-углеродистой (вулканогенно-кремнисто-углеродистой)

Fig. 7. Petrochemical ASC-diagram [6] for meta-sediments from the Ugakhan deposit: 1 – metasandstones; 2 – metasilstones; 3 – black shales; 4 – after [16], 5 – after [15]. The fields of sedimentary formations: I – carbonate-carbonaceous; II – terrigenous-carbonaceous; III – siliceous-carbonaceous (volcanogenic-siliceous-carbonaceous)

Элементы-примеси в метаосадках месторождения Угахан имеют сходные результаты, полученные для углеродсодержащих пород из других месторождений Бодайбинского рудного района [8, 15]. Увеличение содержаний большинства элементов-примесей от метапесчаников к углеродистым сланцам (табл. 1, 2) может быть объяснено как различной сорбционной способностью глинистых минералов [14], так и влиянием органического вещества на их аккумуляцию [3, 31]. Обогащение чувствительными к окислительно-восстановительному потенциалу элементами, такими как (г/т) V (до 177), Ni (до 171), Cr (до 152), Co (до 51,4), U (до 2,26), Mo (до 2,87), Cu (до 130), может быть связано с их адсорбцией на органическом материале отложений в восстановительных условиях диагенеза [31–33]. Значения отношений $V/(V+Ni)$ (0,33–0,75) и V/Cr ниже 2 (0,99–1,74) (табл. 2) указывают на

низкие содержания кислорода в бассейне седиментации [34]. Установлено, что эти элементы обладают повышенной растворимостью в окислительных условиях и пониженной растворимостью в восстановительных условиях, что приводит к обогащению пород, отложенных в условиях низкого содержания кислорода [32]. Кроме того, присутствие органического материала помогает дестабилизировать окисленные комплексы золота, тем самым фиксируя золото в иле морского дна [35]. Высокие значения Ва в метаосадках (до 3006 г/т), по мнению [27], возможно, связаны либо сульфидным диагенезом углеродистых осадков, либо с окислением накопленного в них пирита. В обоих случаях должны генерироваться дополнительные количества SO_4^{2-} , необходимые для фиксации Ba^{2+} в форме барита. По данным [1] также указывается, что бужихтинская свита характеризуется маркирующими высокими содержаниями Ва.

Появление повышенных содержаний W (до 20,4 г/т) в метапесчаниках объясняется присутствием акцессорного шеелита [4]. Повышенные содержания Rb (до 180 г/т) и Ga (до 32,5 г/т) в метаосадках, вероятно, связано с изоморфным вхождением их в структуру мусковита и характеризует наличие флюида в формировании пород, образование которого спровоцировано гранитоидным магматизмом [36]. Повышенные содержания Zr (до 167 г/т) и Th (до 12,1 г/т) отражают присутствие значительного количества терригенного компонента. Например, доказана способность Th сорбироваться органическими соединениями, однако решающее значение в его накоплении имеет состав терригенного материала [14]. Высокие содержания Sr в изученных породах объясняются его включением в диагенетический карбонат с образованием анкилита [19].

Повышенные содержания и преобладание легких (ЛРЗЭ) над тяжелыми (ТРЗЭ) РЗЭ в изученных породах связано с присутствием их собственных минеральных форм. ЛРЗЭ обычно входят в состав монацита, РЗЭ-эпидота, бастнезита, анкилита, а ТРЗЭ связаны с цирконом, ксенотимом, коффинитом, торитом, уранинитом. Оптимальные условия для высвобождения, миграции и фиксации РЗЭ в богатых органикой отложениях, вероятно, были достигнуты в диагенетических процессах.

Преобладание ЛРЗЭ над ТРЗЭ в спектре РЗЭ, нормированном на NASC, и наличие отрицательной аномалии Се ($Se/Se^*=0,39-0,78$) могут быть идентифицированы как присутствие преобразованной терригенной глинистой фракции в изученных отложениях [37]. Известно, что аномалии Се в древних отложениях являются эффективными индикаторами вековых изменений окислительно-восстановительных условий и определяются соотношением аутигенных и детритовых терригенных минералов, а также могут указывать на поступление терригенных пород в кислородную среду [35, 38].

Появление Eu-аномалии в спектре РЗЭ, по мнению [39, 40], может свидетельствовать об относительной восстановленности флюида. Фракционирование аллана в осадках также могло вызвать небольшие анома-

лии Eu [41]. Также известно, что при ИСП-МС анализах из-за электронного заряда и аналогичного радиуса катиона Eu^{2+} и Ba^{2+} в барите или Eu^{2+} и Sr^{2+} в составе магматических Са-плагиоклазов наблюдается положительная Eu-аномалия [42–45]. В связи с этим высокие содержания Ba (до 3006 г/т) и Sr (до 387 г/т) в пробах не отрицают влияние барита и полевых шпатов на положительную Eu-аномалию в изученных породах. Однако не исключается вероятность восстановления Eu^{3+} во время диагенеза, где существовало много органического углерода и восстановительного сульфата [46–49].

Таким образом, полученные минералого-геохимические исследования метаосадков изученных пород предполагают, что породы месторождения были отложены в условиях континентальной окраины за счет размыва и перетолжения материала древней платформы и продуктов вулканической деятельности. Участие органического вещества в процессах диагенеза первичных обломочных осадков и их дальнейшие преобразования под влиянием метаморфогенно-гидротермальных процессов являются основополагающими факторами при формировании метаосадков бужуйхтинской свиты.

Выводы

1. Метапесчаники, метаалевролиты и углеродистые сланцы бужуйхтинской свиты на месторождении Угахан, сложенные слабоокатанными зёрнами кварца и полевыми шпатами (альбитом и ортоклазом), сцементированными слюдястым материалом (мусковитом и серицитом), хлоритом и карбонатами в разных соотношениях, являются продуктами размыва, перетолжения и преобразования материала древней платформы и продуктов вулканической деятельности.
2. Характерной чертой метаосадков является присутствие многочисленных фрагментов микрофоссилий и аксессуарной минерализации (циркон, торит, уранинит, коффинит, анкилит, бастнезит, монацит, ксенотим, минералы ряда содержащих редкие земли эпидот и алланит, титанит, а также со-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Единая неопротерозойская-раннепалеозойская эволюция рудоносных осадочных комплексов юга сибирского кратона / А.Е. Будяк, С.Ю. Скузоватов, Ю.И. Тарасова, К.Л. Ванг, Н.А. Горячев // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 484. – № 3. – С. 335–339.
2. Немеров В.К., Станевич А.М. Эволюция рифей-вендских обстановок биолитогенеза Байкальской горной области // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 3. – С. 456–470.
3. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона / В.К. Немеров, А.М. Станевич, Э.А. Развозжаева, А.Е. Будяк, Т.А. Корнилова // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – № 5. – С. 729–747.
4. Иванов А.И. Золотоносность Байкало-Патомской металлогенической провинции: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 2010. – 348 с.
5. К методике оценки прогнозных ресурсов рудного золота в углеродистых карбонатно-терригенных отложениях Бодайбинского рудного района / В.Д. Конкин, А.И. Иванов, Е.Е. Котельников, В.Е. Васюков, И.О. Захаров // Отечественная геология. – 2017. – № 4. – С. 64–80.
6. Новые данные о геолого-структурных особенностях золото-рудных месторождений Ожерелье, Ыканское, Угахан и Голец

держащие редкие земли уранинит и коффинит), представленной как реликтовыми, так и новообразованными формами, отражающими изменения минерального состава первичных осадков от стадии седиментогенеза-диагенеза и завершая метаморфогенно-гидротермальными процессами.

3. Рудовмещающая толща месторождения характеризуется некоторыми колебаниями в содержании основных породообразующих компонентов, отражающими ее слоистый характер. Сравнительный анализ метаосадков показывает, что содержания большинства элементов-примесей увеличиваются в ряду метапесчаники → метаалевролиты → углеродистые сланцы. Маркирующими элементами-примесями в отложениях бужуйхтинской свиты являются повышенные содержания редокс-чувствительных элементов (V, Cr, Co, Ni, Th, U, Mo), аккумуляция которых происходила под влиянием органического вещества. Высокие содержания Rb и Ga в метаосадках являются свидетельством влияния флюида в их формировании, образование которого спровоцировано гранитоидным магматизмом. Аномально высокие содержания Ba, Sr и редких земель являются отличительной чертой бужуйхтинской свиты.
4. Последовательность образования редкоземельных минералов, а также их спектры (обогащение легкими редкоземельными элементами по сравнению с тяжелыми), наличие отрицательной Ce и положительной Eu аномалий показывают, что оптимальные условия для высвобождения, миграции и фиксации редкоземельной минерализации в богатых органикой отложениях были достигнуты в условиях диагенетических процессов с низким уровнем кислорода.

Авторы выражают благодарность научным сотрудникам ЮУ ФНЦ МиГ УрО кандидату геолого-минералогических наук Ксении Александровне Филипповой и Михаилу Анатольевичу Рассомахину за выполнение аналитических работ. Исследования выполнены в рамках государственной темы ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № 122031600292-6.

- Высочайший / В.Н. Бабяк, А.В. Блинов, Ю.И. Тарасова, А.Е. Будяк // Науки о Земле и недропользовании. – 2019. – Т. 42. – № 4. – С. 388–412.
7. Буряк В.А., Бакулин Ю.И. Металлогения золота. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 403 с.
8. Минералого-геохимическая характеристика углеродистых толщ золоторудных объектов Артемовского узла (Бодайбинский район) / Е.Е. Паленова, Е.В. Белогуб, К.А. Новоселов, М.В. Заботина // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской Академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2013. – Т. 43. – № 2. – С. 29–36.
9. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb изотопного SHRIMP-датирования аксессуарных минералов / М.А. Юдовская, В.В. Дистлер, Н.В. Родионов, А.В. Мохов, А.В. Антонов, С.А. Сергеев // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53. – № 1. – С. 32–64.
10. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits / R.R. Large, L. Danyushevsky, C. Hollit, V. Maslennikov // Economic Geology. – 2009. – V. 104. – P. 635–668.
11. Age and pyrite Pb isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia / S. Meffre, R.R. Large,

- R. Scott, J. Woodhead, Z. Chang, S.E. Gilbert, L.V. Danyushevsky, V. Maslennikov, J.M. Hergt // *Geochimica et Cosmochimica Acta* – 2008. – V. 72. – P. 2377–2391.
12. Detrital zircon U–Pb ages of Paleo- to Neoproterozoic black shales of the Baikal-Patom Highlands in Siberia with implications to timing of metamorphism and gold mineralization / E.E. Palenova, M.A. Yudovskaya, D. Frei, N.V. Rodionov. // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2019. – V. 174. – P. 37–58.
13. Поисковые работы на рудное золото в северной части Кропоткинского рудного поля (Иркутская область) / А.И. Иванов, Ю.Л. Агеев, Д.И. Калинина, А.В. Климанский. – Иркутск: филиал ФГУ «ТФГИ по Сибирскому федеральному округу», 2010. – 159 с.
14. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Элементы-примеси в черных сланцах. – Екатеринбург: Наука «Урал», 1994. – 303 с.
15. 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 / А.В. Чугаев, А.Е. Будяк, И.В. Чернышев, Е.О. Дубинина, Б.И. Гареев, К.Н. Шатагин, Ю.И. Тарасова, Н.А. Горячев, С.Ю. Скузоватов // *Петрология*. – 2018. – Т. 26. – № 3. – С. 213–244.
16. Блинов А.В., Тарасова Ю.И. Минералого-петрографическая характеристика Угаханского месторождения // *Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых*. – 2020. – Т. 43. – № 2. – С. 160–176.
17. Торий-уран редкоземельная минерализация Угаханского золоторудного месторождения в углеродистых сланцах, Бодайбинский рудный район (Иркутская обл.) / Е.В. Шепель, Н.Р. Аюпова, М.А. Рассомахин, П.В. Хворов // *Минералогия*. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 78–93.
18. Henderson P. Rare earth element geochemistry. – Oxford: *Developments in Geochemistry*, Elsevier, 1984. – 277 с.
19. The «North American shale composite»: its compilation, major and trace element characteristics / L.P. Gromet, R.F. Dymek, L.A. Haskin, R.L. Korotev // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1984. – V. 48. – P. 2469–2482.
20. Кондратенко А.К. Магматические комплексы центральной части Ленской провинции и их металлогенная специализация. – М.: Недра, 1977. – 144 с.
21. Этапы формирования крупномасштабной благороднометалльной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия): результаты изотопно-геохронологического изучения / Н.П. Лаверов, И.В. Чернышев, А.В. Чугаев, Э.Д. Баирова, Ю.В. Голыман, В.В. Дистлер, М.А. Юдовская // *Доклады Академии наук*. – 2007. – Т. 415. – № 2. – С. 236–241.
22. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / В.Л. Русинов, О.В. Русина, С.Г. Кражев, Ю.В. Щегольков, Э.И. Алышева, С.Е. Борисовский // *Геология рудных месторождений*. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–46.
23. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
24. 40Ar–39Ar and Rb–Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia) / A.V. Chugaev, A.E. Budyak, Yu. O. Larionova, I.V. Chernyshev, A.V. Travin, Yu.I. Tarasova, B.I. Gareev, G.A. Batalin, I.V. Rassokhina, T.I. Oleinikova // *Ore Geology Reviews*. – 2022. – V. 144. – P. 104855.
25. Онищенко С.А., Сокина Н.В. Особенности формирования золоторудного Черносланцевого месторождения Голец Высочайший (Бодайбинский рудный район) // *Геология рудных месторождений*. – 2021. – Т. 63. – № 2. – С. 154–173.
26. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. – СПб: Наука, 2000. – 479 с.
27. Юдович Я.Э. Курс геохимии осадочных пород (избранные главы). – Сыктывкар: Изд-во Сыктывкарского ун-та, 2001. – 284 с.
28. Паленова Е.Е. Минералогия месторождений золота Копыловское. Кавказ. Красное (Артемовский рудный узел. Бодайбинский район): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Миасс, 2015. – 202 с.
29. Юдович Я.Э., Беляев А.А., Кетрис М.П. Геохимия и рудогенез черных сланцев Пай-Хоя. – СПб: Наука, 1998. – 366 с.
30. Горбачев О.В., Созинов Н.А. Некоторые петрохимические и геохимические аспекты типизации углеродистых отложений докембрия // *Проблемы осадочной геологии докембрия*. – 1985. – № 10. – С. 46–57.
31. Algeo T.J., Maynard J.B. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothem // *Chemical Geology*. – 2004. – V. 206. – P. 289–318.
32. Brumsack H.J. Geochemistry of recent TOC-rich sediments from the Gulf of California and the Black Sea // *Geologische Rundschau*. – 1989. – V. 78. – № 3. – P. 851–882.
33. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies / N. Tribouillard, T.J. Algeo, T. Lyons, A. Riboulleau // *Chemical Geology*. – 2006. – V. 232. – P. 12–32.
34. Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indexes used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones // *Chemical Geology*. – 1994. – V. 111. – P. 111–129.
35. Tomkins A.G. On the source of orogenic gold // *Geology*. – 2013. – V. 41. – № 12. – P. 1255–1256. URL: <https://doi.org/10.1130/focus122013.1> (дата обращения 15.05.2022).
36. Petrology, geochemistry and petrogenesis of the Keping basalts and their Nd, Sr and Pb isotopic compositions / C.Y. Jiang, P.B. Zhang, D.R. Lu, K.Y. Bai, Y.P. Wang, S.H. Tang, J.H. Wang, C. Yang // *Geological Review*. – 2004. – V. 50. – P. 492–500.
37. Zhang K., Shields G.A. Sedimentary Ce anomalies: Secular change and implications for paleoenvironmental evolution // *Earth-Science Reviews*. – 2022. – V. 229. – P. 104015.
38. Evaluating the fidelity of the cerium paleoredox tracer during variable carbonate diagenesis on the Great Bahamas Bank / X.M. Liu, D.S. Hardisty, T.W. Lyons, P.K. Swart // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2019. – V. 248. – P. 25–42.
39. Луканин О.А., Дернов-Пегарев В.Ф. Основные факторы, определяющие появление европиевой аномалии во флюидах, образующихся при дегазации гранитных магм, вызванной снижением давления // *Вестник отделения наук о Земле РАН*. – 2009. – Т. 1. – № 27. – С. 1–3.
40. Bau M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid rock interaction and significance of the oxidation state of europium // *Chemical Geology*. – 1991. – V. 93. – № 3–4. – С. 219–230.
41. Fairbridge R.W. Syndiagenesis–anadiagenesis–epidiagenesis: phases of lithogenesis // *Diagenesis in Sediments and Sedimentary Rocks* / Eds. G. Larsen, G.V. Chilingar. – The Netherlands, Amsterdam: Elsevier, 1983. – V. 2. – P. 17–113.
42. Chao C., Fu Q., Wang X. Linear correlation of Ba and Eu contents by hydrothermal activities: a case study in the Hetang Formation, South China // *Geofluids*. – 2019. – V. 3. – P. 1–15.
43. Rare earth element geochemistry of feldspars: examples from Fe-oxide Cu–Au systems in the Olympic Cu–Au Province, South Australia / A. Kontonikas-Charos, C.L. Ciobanu, N.J. Cook, K. Ehrig, S. Krneta, V.S. Kamenetsky // *Mineralogy and Petrology*. – 2018. – V. 112. – P. 145–172.
44. McLennan S.M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes // *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. Reviews in mineralogy*. – 1989. – V. 21. – P. 169–200.
45. Morgan J.W., Wandless G.A. Rare earth element distribution in some hydrothermal minerals: Evidence for crystallographic control. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1980. – V. 44. – P. 973–980.
46. Diagenesis of the Vaca Muerta Formation, Neuquén Basin: Evidence from petrography, microthermometry and geochemistry / M.R. del Lanz, K. Azmy, N.N. Cesaretti, N.B. Fortunati // *Marine and Petroleum Geology*. – 2021. – V. 124. – P. 120–135.
47. MacRae N.D., Nesbitt H.W., Kronberg B.I. Development of a positive Eu anomaly during diagenesis // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1992. – V. 109. – P. 585–591.
48. Sverjensky D.A. Europium redox equilibria in aqueous solution // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1984. – V. 67. – P. 70–78.
49. Origin of early Cambrian black-shale-hosted barite deposits in South China: mineralogical and geochemical studies / S. Han, K. Hu, J. Cao, J. Pan, F. Xia, W. Wu // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2015. – V. 106. – P. 79–94.

Поступила: 01.06.2022 г.
Дата рецензирования: 14.10.2022 г.

Информация об авторах

Шепель Е.В., инженер-исследователь Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН.

Аюпова Н.Р., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН; доцент филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Миассе.

UDC 553.4

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF THE ORE BEARING STRATA OF THE UGAKHAN DEPOSIT FROM BODAIBO ORE REGION, RUSSIA

Elena V. Shepel¹,
liena-safina@mail.ru

Nuriya R. Ayupova^{1,2},
aupova@mineralogy.ru

¹ Institute of Mineralogy of South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Ilimensky reserve, Miass, 456317, Russia.

² South Ural State University, Branch in Miass, 16, Oktyabrya avenue, Miass, 456304, Russia.

The relevance of the study is caused by the interest in the gold deposits located in the Bodaibo ore region. The study of this area is reflected in numerous publications, despite this there is no unified idea of the origin of gold deposits formed in the black shale strata. The Ugakhan deposit is the only gold ore object of the Bodaibo ore region localized in the rocks of the Buzhuikhta Formation, and the detailed mineralogical and geochemical study of this ore host strata can be useful to clarify genetic type of gold mineralization and the prospects of the Buzhuikhta Formation for the search for new gold objects.

The main aim is clarification of the conditions of the lithogenesis in the concentration of metals in sulfide-bearing metasedimentary rocks of the Buzhuikhta Formation.

Objects of the research is the Ugakhan deposit, located in the Irkutsk region of the Bodaibo ore region.

Methods. The study of rocks was carried out using an Olympus BX51 optical microscope. The accessory mineralization was analyzed on a Tescan Vega 3 sbu scanning electron microscope equipped with an Oxford Instruments X-act energy dispersive spectrometer. The content of 12 basic oxides in rocks (9 samples) was determined by silicate analysis. The trace elements, including rare earth elements (6 samples, 40 elements), were studied by the ICP-MS method (inductively coupled plasma mass spectrometry) on the ICP-MS Agilent 7700x spectrometer (Japan). All mineralogical and geochemical researches were carried out at the Institute of Mineralogy of South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS (Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS, Miass).

Results. Ore-bearing rocks from the Ugakhan deposit are represented by intercalation of metasandstones, metasilstones and black shales. The detrital material in these rocks consists of weakly rounded quartz grains and feldspars (albite and orthoclase) and fragments of microfossils in the micaceous-chlorite-carbonate groundmass. The accessory minerals are tourmaline, zircon, rutile, apatite, titanite, numerous minerals of rare earth elements (monazite, xenotime, rare earth elements-bearing epidote, bastnaesite, ankyllite, rare earth elements-bearing thorite, uraninite and coffinite). The sequence of mineral formation testifies to the redistribution of the initially accumulated matter and its concentration with the formation of mineral forms of rare earth elements, Th and U at all stages of lithogenesis and the metamorphogenic-hydrothermal stage of primary carbonaceous sediment transformations. A comparative analysis of the chemical composition of metasediments shows that a decrease in SiO₂ contents is accompanied by an increase in Al₂O₃, MgO, TiO₂, FeO*, K₂O, and P₂O₅ contents in the range: metasandstones → metasilstones → black shales. In the same range, there is an increase in the contents of Sc, V, Cr, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Th, U and rare earth elements. A specific feature of metasediments of the Buzhuikhta Formation is the high content of V, Ba, Sr, rare earth elements, Th and U, which is caused by the participation of organic matter in diagenetic processes involving sulfides. The calculated petrochemical modules and their correlations testify to the common nature of sedimentary material and the possible influence of volcanogenic material in formation of sediments.

Key words:

Metasedimentary rocks, mineral associations, trace elements, gold deposit, Bodaibo ore district.

The authors are grateful to Cand. Sc. Ksenia A. Filippova for ICP-MS analyses and Mikhail A. Rassomakhin for SEM-EDS analyses. This work was supported by the State contract of Institute of Mineralogy of SU FRC MG of UB RAS no. 122031600292-6.

REFERENCES

- Budyak A.E., Skuzovatov S.Yu., Tarasova Yu.I., Wang K.-L., Goryachev N.A. Common Neoproterozoic–early Paleozoic evolution of ore-bearing sedimentary complexes in the southern Siberian craton. *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 484, no. 3, pp. 335–339. In Rus.
- Nemerov V.K., Stankevich A.M. Evolution of Riphean-Vendian environments of biolithogenesis of the Baikal mountain region. *Geology and geophysics*, 2001, vol. 42, no. 3, pp. 456–470. In Rus.
- Nemerov V.K., Stankevich A.M., Razvozhayeva E.A., Budyak A.E., Kornilova T.A. Biogenic-sedimentation factors of ore formation in Neoproterozoic strata of the Baikal-Patom region. *Geology and geophysics*, 2010, vol. 51, no. 5, pp. 729–747. In Rus.
- Ivanov A.I. *Zolotonosnost Baikalo-Patomskoy metallogenicheskoy provintsii*. Diss. Dokt. nauk [Gold content of the Baikal-Patom metallogenic province. Dr. Diss.]. Moscow, 2010. 348 p.
- Konkin V.D., Ivanov A.I., Kotelnikov E.E., Vasyukov V.E., Zakharov I.O. To the methodology of estimating the forecast resources of ore gold in carbonaceous carbonate-terrigenous deposits of the Bodaibinsky ore district. *Domestic Geology*, 2017, no. 4, pp. 64–80. In Rus.
- Babyak V.N., Blinov A.V., Tarasova Y.I., Budyak A.E. New data on the geological and structural features of the Ozherlie, Ykanskoie, Ugakhan and Golets Vysochaishy gold fields. *Earth sciences and subsoil use*, 2019, vol. 42, no. 4, pp. 388–412. In Rus.
- Buryak V.A., Bakulin Y.I. *Metallogeniya zolota* [Gold metallogeny]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1998. 403 p.
- Palenova E.E., Belogub E.V., Novoselov K.A., Zabotina M.V. Mineralogical and geochemical characteristics of carbonaceous strata of gold ore objects of the Artemovskiy node (Bodaibinsky district). *Proceedings of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology*,

- prospecting and exploration of ore deposits, 2013, vol. 43, no. 2, pp. 29–36. In Rus.
9. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. Correlation of metamorphism and ore formation processes at the Sukhoi Log gold black shale Deposit according to U-Th-Pb isotope SHRIMP Dating of accessory minerals. *Geology of ore deposits*, 2011, vol. 53, no. 1, 32–64. In Rus.
 10. Large R.R., Danyushevsky L.V., Hollit C., Maslennikov V. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: Implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits. *Economic Geology*, 2009, vol. 104, pp. 635–668.
 11. Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V., Hergt J.M. Age and pyrite Pb isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit. Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, vol. 72, pp. 2377–2391.
 12. Palenova E.E., Yudovskaya M.A., Frei D., Rodionov N.V. Detrital zircon U–Pb ages of Paleo- to Neoproterozoic black shales of the Baikal-Patom Highlands in Siberia with implications to timing of metamorphism and gold mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, vol. 174, pp. 37–58.
 13. Ivanov A.I., Ageev Y.L., Kalinina D.I., Klimansky A.V. *Poiskovye raboty na rudnoe zoloto v severnoy chasti Kropotkinskogo rudnogo polya – Irkutskaya oblast* [Prospecting for gold in the northern part of the Kropotkinskoe ore field (Irkutsk region)]. Irkutsk, Branch of the Federal State Institution «TFGI for the Siberian Federal district» Publ., 2010. 159 p.
 14. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Elementy-primesi v chernykh slantsakh* [Elements-impurities in black shales]. Yekaterinburg, Nauka «Ural» Publ., 1994. 303 p.
 15. Chugaev A.V., Budyak A.E., Chernyshev I.V., Dubinina E.O., Gareev B.I., Shatagin K.N., Tarasova Yu.I., Goryachev N.A., Skuzovatov S.Yu. Isotopic (Sm-Nd, Pb-Pb and $\delta^{34}\text{S}$) and geochemical characteristics of meta-sedimentary rocks of the Baikal-Atom belt (Northern Transbaikalia) and the evolution of the sedimentary basin in the Neoproterozoic. *Petrology*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 213–244. In Rus.
 16. Blinov A.V., Tarasova Yu.I. Mineralogical and petrographic characteristics of the Ugahan deposit. *Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits*, 2020, vol. 43, no 2, pp. 160–176. In Rus.
 17. Shepel E.V., Ayupova N.R., Rassomakhin M.A., Khvorov P.V. Thorium-uranium rare-earth mineralization of the Ugakhansk gold deposit in carbonaceous shales, Bodaibinsky ore district (Irkutsk region). *Mineralogy*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 78–93.
 18. Henderson P. *Rare earth element geochemistry*. Oxford, Developments in Geochemistry. Elsevier, 1984. 277 p.
 19. Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The «North American shale composite»: its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, vol. 48, pp. 2469–2482.
 20. Kondratenko A.K. *Magmaticheskie komplekсы tsentralnoy chasti Lenskoy provintsiy i ikhmetallo genicheskaya spetsializatsiya* [Magmatic complexes of the central part of the Lena province and their metallogenic specialization]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 144 p.
 21. Laverov N.P., Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Bairova E.D., Goltsman Yu.V., Distler V.V., Yudovskaya M.A. Formation stages of the largescale noble metal mineralization in the Sukhoi Log deposit, East Siberia: results of isotope-geochronological study. *Doklady Earth Sciences*, 2007, vol. 415, no. 2, pp. 236–241. In Rus.
 22. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shchegolkov Yu.V., Malysheva E.I., Borisovsky S.E. Near-ore metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore district. *Geology of Ore Deposits*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–46. In Rus.
 23. Budyak V.A. *Metamorfizm i rudoobrazovanie* [Metamorphism and ore formation]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p.
 24. Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Yu.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Yu.I., Gareev B.I., Batalin G.A., Ras-sokhina I.V., Oleinikova T.I. 40Ar-39Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia). *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 144, pp. 104855.
 25. Onishchenko S.A., Sokerin A.N.V. Features of the formation of the gold-ore Chernoslant deposit Golets the Highest (Bodaybinsky ore district). *Geology of ore deposits*, 2021, vol. 63, no. 2, pp. 154–173. In Rus.
 26. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Osnovy litokhimii* [Fundamentals of lithochemistry]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2000. 479 p.
 27. Yudovich Ya.E. *Kurs geokhimii osadochnykh porod (izbrannye glavy)* [Course of geochemistry of sedimentary rocks (selected chapters)]. Syktyvkar, Syktyvkar University Publ. house, 2001. 284 p.
 28. Palenova E.E. *Mineralogiya mestorozhdeniy zolota Kopylovskoe, Kavkaz, Krasnoe (Artemovskiy rudny uzel. Bodaybinskiy rayon)*. Diss. Kand. nauk [Mineralogy of gold deposits Kopylovskoe. Caucasus. Krasnoe (Artemovsky ore node. Bodaibinsky district). Cand. Diss.]. Miass, 2015. 202 p.
 29. Yudovich Ya.E., Belyaev A.A., Ketris M.P. *Geokhimiya i rudogenez chernykh slantsev Pay-Hoya* [Geochemistry and ore genesis of the Pai-Khoi black shales]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1998. 366 p.
 30. Gorbachev O.V., Sozinov N.A. Nekotorye petrokhimicheskie i geokhimicheskie aspekty tipizatsii uglerodistykh otlozheniy dokembriya [Some petrochemical and geochemical aspects of typification of Precambrian carbonaceous deposits]. *Problems of sedimentary geology of the Precambrian*, 1985, no. 10, pp. 46–57.
 31. Algeo T.J., Maynard J.B. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems. *Chemical Geology*, 2004, vol. 206, pp. 289–318.
 32. Brumsack H.J. Geochemistry of recent TOC-rich sediments from the Gulf of California and the Black Sea. *Geologische Rundschau*, 1989, vol. 78, no. 3, pp. 851–882.
 33. Tribouillard N., Algeo T.J., Lyons T., Riboulleau A. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies. *Chemical Geology*, 2006, vol. 232, pp. 12–32.
 34. Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indexes used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 1994, vol. 111, pp. 111–129.
 35. Tomkins A.G. On the source of orogenic gold. *Geology*, 2013, vol. 41, no. 12, pp. 1255–1256. Available at: <https://doi.org/10.1130/focus122013.1> (accessed 15 May 2022).
 36. Jiang C.Y., Zhang P.B., Lu D.R., Bai K.Y., Wang Y.P., Tang S.H., Wang J.H., Yang C. Petrology, geochemistry and petrogenesis of the Keping basalts and their Nd, Sr and Pb isotopic compositions. *Geological Review*, 2004, vol. 50, pp. 492–500.
 37. Zhang K., Shields G.A. Sedimentary Ce anomalies: Secular change and implications for paleoenvironmental evolution. *Earth-Science Reviews*, 2022, vol. 229, pp. 104015.
 38. Liu X.M., Hardisty D.S., Lyons T.W., Swart P.K. Evaluating the fidelity of the cerium paleoredox tracer during variable carbonate diagenesis on the Great Bahamas Bank. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, vol. 248, pp. 25–42.
 39. Lukanin O.A., Dernov-Pegarev V.F. The main factors determining the appearance of the europium anomaly in fluids formed during degassing of granitic magmas caused by a decrease in pressure. *Bulletin of the Earth Sciences Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2009, vol. 1, no. 27, pp. 1–3. In Rus.
 40. Bau M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid rock interaction and significance of the oxidation state of europium. *Chemical Geology*, 1991, vol. 93, no. 3–4, pp. 219–230.
 41. Fairbridge R.W. Syndiagenesis—an adidiagenesis—epidiagenesis: phases of lithogenesis. *Diagenesis in Sediments and Sedimentary Rocks*. Eds. G. Larsen, G.V. Chilingar. The Netherlands, Amsterdam, Elsevier, 1983. Vol. 2, pp. 17–113.
 42. Chao C., Fu O., Wang X. Linear correlation of Ba and Eu contents by hydrothermal activities: a case study in the Hetang formation, South China. *Geofluids*, 2019, vol. 3, pp. 1–15.
 43. Kontonikas-Charos A., Ciobanu C.L., Cook N.J., Ehrig K., Krneta S., Kamenetsky V.S. Rare earth element geochemistry of feldspars: examples from Fe-oxide Cu-Au systems in the Olympic Cu-Au Province, South Australia. *Mineralogy and Petrology*, 2018, vol. 112, pp. 145–172.
 44. McLennan S.M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. Reviews in mineralogy*, 1989, vol. 21, pp. 169–200.

45. Morgan J.W., Wandless G.A. Rare earth element distribution in some hydrothermal minerals: Evidence for crystallographic control. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, vol. 44, pp. 973–980.
46. Del Lanz M.R., Azmy K., Cesaretti N.N., Fortunatti N.B. Diagenesis of the Vaca Muerta Formation, Neuquén Basin: evidence from petrography, microthermometry and geochemistry. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, vol. 124, pp. 120–135.
47. MacRae N.D., Nesbitt H.W., Kronberg B.I. Development of a positive Eu anomaly during diagenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, vol. 109, pp. 585–591.
48. Sverjensky D.A. Europium redox equilibria in aqueous solution. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, vol. 67, pp. 70–78.
49. Han S., Hu K., Cao J., Pan J., Xia F., Wu W. Origin of early Cambrian black-shale-hosted barite deposits in South China: mineralogical and geochemical studies. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, vol. 106, pp. 79–94.

Received: 1 June 2022.

Reviewed: 14 October 2022.

Information about the authors

Elena V. Shepel, research engineer, Institute of Mineralogy of South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS.

Nuriya R. Ayupova, Cand. Sc., leading researcher, Institute of Mineralogy of South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS; associate professor, South Ural State University, Branch in Miass.