

УДК 552.18

DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-3-5

**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***Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,  
Институт минералогии, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; liena-safina@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 24.11.2020 г., принята к печати 22.06.2021 г.

**THORIUM, URANIUM AND RARE EARTH MINERALIZATION IN ROCKS  
OF THE UGAKHAN GOLD DEPOSIT, BODAIBO ORE REGION****E.V. Shepel, N.R. Ayupova, M.A. Rassomakhin, P.V. Khvorov***South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Institute of Mineralogy, Miass,  
Chelyabinsk district, 456317 Russia; liena-safina@mail.ru*

Received 24.11.2020, accepted 22.06.2021

**Аннотация.** В статье рассмотрены результаты исследований рудовмещающих пород Угаханского золоторудного месторождения (Бодайбинский район), представленных метапесчаниками, метаалевролитами и углеродистыми сланцами. В минеральном составе пород установлены кварц, полевые шпаты (альбит, ортоклаз), железисто-магнезиальный хлорит, слюды (мусковит, серицит) и карбонаты (кальцит, доломит, анкерит), из акцессорных минералов – титанит, рутил, турмалин, циркон, апатит. Во всех изученных породах встречаются фрагменты микрофитоцитов с хорошо выраженной концентрической зональностью в виде чередования темных (углеродистое вещество) и светлых (карбонатно-слюдистый материал) слоев. От метапесчаников к углеродистым сланцам увеличивается содержание слюдистой составляющей и углеродистого вещества (до 3 мас. %), степень регенерации обломков турмалина и циркона. РЗЭ минерализация представлена силикатами (РЗЭ-содержащий эпидот, торит), карбонатами (анкилит), фторкарбонатами (бастнезит) и фосфатами (монацит, ксенотим), которые находятся в тесной пространственной связи с минералами урана (уранинит, коффинит). Установлено, что бастнезит, анкилит и торит образовались за счет разложения более раннего РЗЭ-содержащего эпидота, а ксенотим и монацит – апатита. Предполагается, что уранинит образовался при литификации цемента углеродсодержащих пород, а коффинит развивается по ураниниту. Результаты термического анализа и использования хлоритового термометра (296–371 °С) указывают на преобразование пород в серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации метаморфизма.

**Ключевые слова:** минералы редкоземельных элементов, тория и урана, микрофоссилии, термический анализ, метаосадочные породы, золоторудное месторождение, Бодайбинский район.

**Abstract.** The paper reports on the results of studies of ore-bearing rocks of the Ugakhan gold deposit (Bodaybo district): metasandstones, metasiltsstones and carbonaceous shales. The rocks consist of quartz, feldspar (albite, orthoclase), Fe-Mg chlorite, mica (muscovite, sericite) and carbonates (calcite, dolomite, ankerite) and accessory titanite, rutile, tourmaline, zircon and apatite. All rocks contain fragments of microfossils exhibiting striking concentric zonation with alternated dark (carbonaceous matter) and light (carbonate-mica material) layers. In a range from metasandstones to carbonaceous shales, the rocks exhibit an increase in mica amount and the content (up to 3%) of carbonaceous matter, as well as the formation of regeneration rims around relict tourmaline and zircon. The REE mineralization includes silicates (REE-bearing epidote, thorite), fluorocarbonates (bastnesite) and phosphates (monazite, xenotime, ankylite), which are closely related to U minerals (uraninite, coffinite). Bastnesite, ankylite and thorite formed due to the decomposition of earlier REE-bearing epidote, whereas monazite and xenotime are the products of decomposition of apatite. Uraninite formed during lithification of matrix of carbon-bearing rocks and is replaced by coffinite. The thermal analysis of carbonaceous matter and the formation temperature of chlorite calculated using chlorite geothermometer

(296–371 °C) indicate the transformation of rocks under conditions of sericite-chlorite subfacies of greenschist facies of metamorphism.

**Keywords:** REE, Th and U minerals, microfossils, DTA analysis, metasedimentary rocks, gold deposit, Bodaybo region.

---

**Для цитирования:** Шепель Е.В., Аюпова Н.Р., Рассомахин М.А., Хворов П.В. Торий-уран-редкоземельная минерализация Угаханского золоторудного месторождения в углеродистых сланцах, Бодайбинский рудный район (Иркутская обл.). Минералогия, 7(3), 78–93. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-3-5.

**For citation:** Shepel E.V., Ayupova N.R., Rassomakhin M.A., Khvorov P.V. Thorium, uranium and rare earth mineralization in rocks of the Ugakhan gold deposit, Bodaibo ore region. Mineralogy, 7(3), 78–93. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-3-5.

---

## Введение

В докембрийских черносланцевых толщах Байкало-Патомского нагорья, наряду с гигантским месторождением Сухой Лог, локализованы десятки крупных и мелких месторождений золота (Буряк, Бакулин, 1998; Large et al., 2009; Meffre et al., 2008; Юдовская и др., 2011; Паленова и др., 2013, Паленова, 2015; Бабяк и др., 2019). В последние годы при расшифровке эволюции золотого оруденения на этих объектах большое внимание уделяется исследованиям парагенезисов акцессорных, прежде всего, РЗЭ минералов, среди которых распространены флоренсит, монацит, ксенотим и алланит (РЗЭ-содержащий эпидот) (Буряк, Бакулин, 1998; Юдовская и др., 2011; Паленова и др., 2013, 2015). Другие потенциальные носители РЗЭ в породах района представлены магнезиально-железистыми карбонатами (брейнерит, сидерит, минералы ряда анкерит–доломит), а также акцессорными минералами аллотигенного происхождения (Буряк, Бакулин, 1998). Предполагается, что в черных сланцах растворенные РЗЭ первоначально сорбируются на глинистых минералах и органическом веществе, а при дальнейших процессах преобразования осадка РЗЭ переходят в фосфаты и карбонаты. Вклад детритового материала может широко варьировать в зависимости от состава области сноса и режима осадконакопления, а среди обломочных минералов, содержащих РЗЭ – наилучшей сохранностью отличаются циркон, минералы группы эпидота и фосфаты (Юдович, Кетрис, 1994).

В настоящей статье рассмотрены РЗЭ минеральные ассоциации в породах Угаханского месторождения, которые представлены силикатами (РЗЭ-содержащий эпидот, торит), карбонатами и фторкарбонатами (анкилит, бастнезит) и фосфата-

ми (монацит, ксенотим) в тесной пространственной связи с минералами урана (уранинит, коффеинит). Выявленные ранее неизвестные ассоциации минералов РЗЭ в породах Бодайбинского рудного района могут быть использованы для уточнения последовательности процессов рудоотложения.

## Геологическая характеристика месторождения

Угаханское золоторудное месторождение расположено в пределах Бодайбинской структурно-формационной зоны (рис. 1), занимающей внутреннюю часть Байкало-Патомской металлогенической провинции. Согласно современным представлениям территория рассматривается как неопротерозойская терригенно-карбонатная толща, формировавшаяся на пассивной окраине Сибирского кратона в палеобассейне (Палеоазиатском океане), заложение которого связывают с развитием окраинно-континентального рифтогенеза, вызванного распадом суперконтинента Родиния около 800–700 млн лет назад (Немеров, Станевич, 2001; Li et al., 2008; Немеров и др., 2010; Гладкочуб и др., 2013).

Угаханское месторождение приурочено к ядерной части и крыльям запрокинутой к югу Верхне-Угаханской антиклинали (Иванов и др., 2010ф). На юге антиклиналь ограничена Гохтачинско-Угаханской, на севере – Хомолхинской синклиналими. В геологическом строении месторождения принимает участие мощная толща углеродистых карбонатно-терригенных отложений ныгринской серии венда, включающей бужуйхтинскую, угаханскую, хомолхинскую и имняхскую свиты (Немеров и др., 2010; Чумаков и др., 2013; Palenova et al., 2019). Бужуйхтинская свита, согласно залегающая на породах бодайбокской свиты балаганахской серии сред-

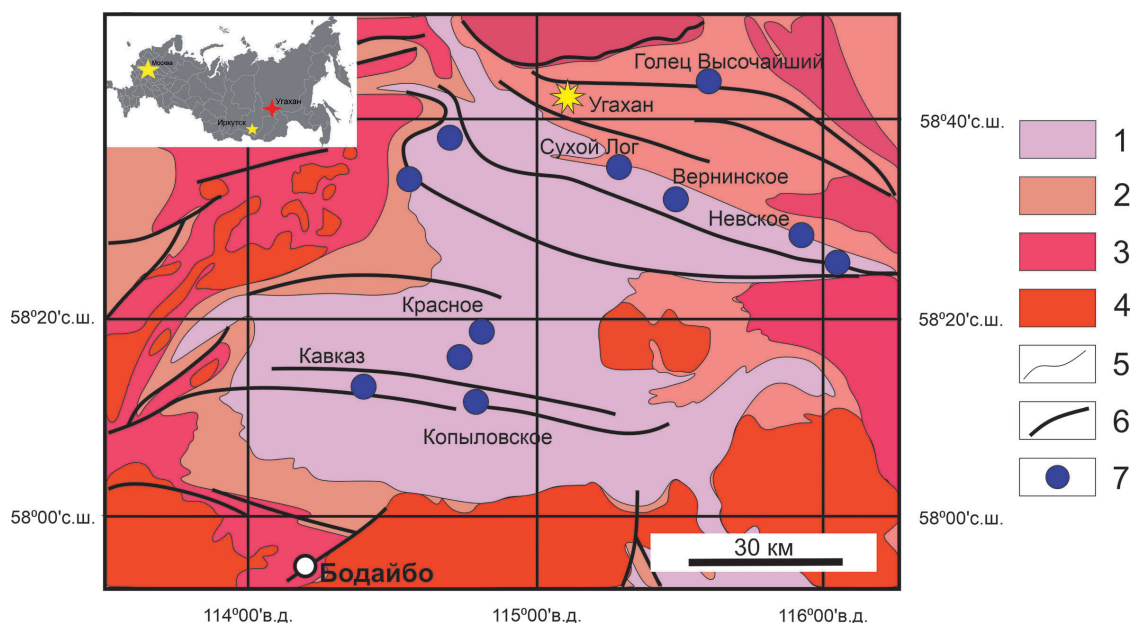


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Бодайбинского рудного района по (Иванов, 2008) с упрощениями.

1–3 – рифейско-вендские отложения: 1 – бодайбинская серия, венд; 2 – ныгринская серия (бужуихтинская, угаханская, хомолхинская, имняхская свиты), венд; 3 – баллаганакская серия, средний рифей; 4 – верхнепалеозойские гранитоиды конкудеро-мамаканского комплекса; 5 – геологические границы; 6 – разрывные нарушения; 7 – золоторудные месторождения.

Fig. 1. Schematic geological map of the Bodaybo ore region, simplified after (Ivanov, 2008).

1–3 – Riphean to Vendian sedimentary rocks: 1 – Vendian Bodaibo Group; 2 – Vendian Nygri Group (Buzhuikhta, Ugakhan, Khomolkho, Imnyakh formations); 3 – Middle Riphean Ballaganakh Group; 4 – granitoids of the Late Paleozoic Konkudera-Mamakan complex; 5 – geological boundaries; 6 – faults; 7 – gold deposits.

него рифея, слагает ядерную часть одноименной антиклинали и является рудовмещающей для месторождения (рис. 2). По литологическим особенностям и соотношениям пород она подразделена на две подсвиты: 1) нижнюю, сложенную в нижней и верхней части переслаивающимися углеродистыми сланцами и метаалевролитами с преобладанием кварцевых и кварц-карбонатных метапесчаников в средней части подсвиты (мощность 250–300 м), и 2) верхнюю подсвиту, которая характеризуется существенно песчаным составом с прослоями углеродистых сланцев и метаалевролитов. Выше по разрезу на отложениях бужуихтинской свиты согласно залегают карбонатизированные метапесчаники угаханской свиты, слагающие крылья одноименной антиклинали.

Магматические породы в районе месторождения представлены скрытым на глубине 3–4 км Угаханским гранитным плутоном конкудеро-мамаканского гранитоидного комплекса (ранний-средний карбон) (Лишневицкий, Дистлер, 2004). Центральную часть плутона занимает Константиновский шток, который вскрывается на некотором удалении от месторождения. Считается, что метаморфиче-

ские преобразования на месторождении происходили в регионально метаморфический этап развития территории и при внедрении гранитоидов: в регионально-метаморфический этап началось формирование жильно-прожилковых зон, а с постмагматическим рудным этапом связаны жильно-прожилковое окварцевание, сульфидизация, мусковитизация и образование железо-магнезиальных карбонатов (Иванов и др., 2010ф).

### Рудная минерализация

Рудная минерализация локализована в верхней подсвите бужуихтинской свиты, которая представляет собой согласное чередование полевошпатово-кварцевых метапесчаников с серицит-кальцитовым и кальцит-серицитовым цементом, метаалевролитов и углеродистых филлитовых сланцев. Рудные тела выделяются по результатам опробования, бортовое содержание Au 0.2 г/т (Иванов и др., 2010ф; Бабяк и др., 2019). Распределение золота неравномерное, разброс содержаний составляет от десятых долей до 13.74 г/т. Рудные залежи имеют пластообразную форму, субсогласное залегание с вмеща-

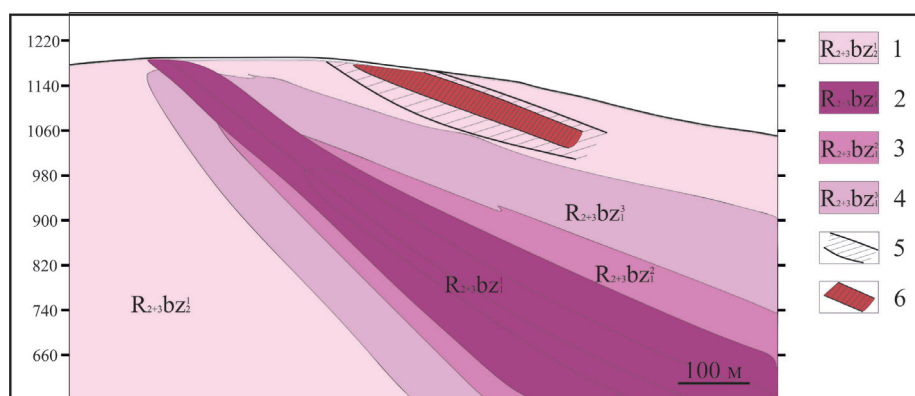


Рис. 2. Геологический разрез месторождения Угахан по (Иванов и др., 2010ф).

1 – переслаивание углеродистых сланцев и метаалевролитов с кварцевыми и полевошпатово-кварцевыми метапесчаниками; 2 – углеродистые слюдисто-кварцевые сланцы, прослои метаалевролитов и кварцевых метапесчаников; 3 – кварцевые и известковые метапесчаники, прослои углеродистых сланцев и метаалевролитов; 4 – углеродистые сланцы с прослоями кварцевых и известковых метапесчаников; 5 – минерализованная зона, представленная сланцами и метаалевролитами с прослоями метапесчаников; 6 – рудная зона, сложенная кварцевыми и известковыми метапесчаниками с подчиненными прослоями углеродистых сланцев.

Fig. 2. Cross-section of the Ugakhan deposit after (Ivanov et al., 2010).

1 – intercalation of carbonaceous shale and metasiltstone with quartz and feldspar-quartz metasandstones; 2 – carbonaceous mica-quartz shale, interlayers of metasiltstone and quartz metasandstone; 3 – quartz and calcareous metasandstone, interlayers of carbonaceous shale and metasiltstone; 4 – carbonaceous shale with layers of quartz and calcareous metasandstone; 5 – mineralized area represented by shale and metasiltstone with layers of metasandstone; 6 – ore zone composed of quartz and calcareous metasandstone with subordinate layers of carbonaceous shale.

ющими породами, полого падают на север-северо-восток под углами 15–29° и располагаются ясно. Длина рудных тел по простиранию достигает 4 км, а по падению – 600 м. Общие запасы месторождения оцениваются: руда 32968 тыс. т., среднее содержание золота 1.35 г/т, металл – 44533.1 кг (Бабяк и др., 2019).

Руды характеризуются прожилково-вкрапленной текстурой. Сульфидная минерализация представлена, в основном, пирротинном, содержание которого в породах варьирует от первых долей процента до 10 %. Пирит имеет резко подчиненное значение, развит, как правило, в виде монокристаллов или катаклазированных и брекчированных обломков в пирротиновой массе. В аксессуарных количествах встречены халькопирит, сфалерит, арсенопирит и галенит, редко молибденит. Золото в аншлифах располагается в интерстициях нерудных минералов (кварца, карбонатов анкерит-доломитового ряда), редко ассоциирует с пирротинном, пиритом, галенитом. Золото имеет округлую, изометричную, удлиненную форму в сечениях, размеры достигают 0.005–0.007 мм, реже до 0.01–0.02 мм. В рудах преобладает мелкое золото – более 90 % золотин имеют размер менее 0.25 мм.

## Материалы и методы исследования

Материал для исследований отобран на Угаханском золоторудном месторождении, принадлежащем группе компаний ПАО «Высочайший» (GV Gold). В карьере месторождения отобрано 12 штучных образцов метапесчаников, метаалевролитов и углеродистых сланцев с сульфидной минерализацией, кварцевыми и карбонатными прожилками. Для детального макроскопического описания использованы полированные образцы размером до 15 × 20 см. Оптико-микроскопическое изучение шлифов проводилось на микроскопе ПОЛАМ Р-312, аншлифов – на микроскопе Olympus BX51. Количественный минеральный состав пород определен рентгеноструктурным методом с помощью автоматизированного прибора ДРОН-2.0 (Cu-анод, графитовый монохроматор, аналитик П.В. Хворов). Содержания минералов рассчитаны методом постоянных коэффициентов, полученных экспериментальным путем для конкретного прибора и условий съемки (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс). Термограммы получены на дериватографе Q-1500D (аналитик П.В. Хворов). Для определения степени преобразования углеродистого вещества проанализированы навески измельченных (но не истертых



в пыль) штуфных образцов пелитовых пород. Акцессорная минерализация изучена на СЭМ Tescan Vega 3 sbu с ЭДС Oxford Instruments X-act, диаметр электронного пучка 1 мкм, ток 15 нА, ускоряющее напряжение 20 кВ, время счета 120 с (аналитик М.А. Рассомахин). Количественный анализ проведен с использованием эталонов сертифицированного стандарта № 1362 (Microanalysis Consultants Ltd), MINM25-53 (Astimes Scientific Limited, серийный номер 01-044) и НЭРМА.ГЕО1.25.10.7417.

### Результаты исследований

#### Петрографическая характеристика пород.

Метапесчаники представляют собой мелкозернистые темно-серые окварцованные породы сланцеватой текстуры. Сульфидная минерализация визуально представлена пирротинном и пиритом и составляет 2–3 % от всего объема пород. Пирротин ферромагнитный, в породе образует линзовидные обособления, скопления и гнезда размером до 2 см. Пирит представлен как линзовидными скоплениями, так и кубическими кристаллами размером до 0.5 см.

В шлифах метапесчаники характеризуются сланцеватой текстурой и лепидогранобластовой, лепидобластовой, гранобластовой структурой. Количество обломочного материала колеблется от 20 до 65 об. %. Обломки размером от 0.1 до 0.5 мм слабо окатаны и представлены кварцем, полевыми шпатами (альбитом и ортоклазом) и слюдами (мусковитом и серицитом) в разных соотношениях (табл. 1, рис. 3а). Из акцессорных минералов отмечаются единичные обломки турмалина зеленовато-бурого до желтовато-зеленого цвета размером до 0.1 мм и циркона овальной формы размером до 0.1 мм (рис. 3б, в). Для циркона характерна труд-

но различимая тонкая (1–2 мкм) новообразованная кайма.

Цемент метапесчаников кварцево-слюдистый ( $\pm$ карбонаты, хлорит), поровый. Наблюдается замещение обломочного материала цементом. Песчаники содержат микрофитоциты разнообразной формы размером до 0.3 мм, состоящие из карбонатного материала и углеродистого вещества. Углеродистое вещество (УВ) присутствует в цементе в виде пылеватой массы (до 1 %), которая, в основном, связана со слюдистыми агрегатами (рис. 4а). Основная масса УВ изотропна либо обладает слабой анизотропией с прямым или облачным погасанием. Из-за высокого содержания кальцита в пробе (~9%), органическое вещество (ОВ) не обнаружено при дифференциально-термическом анализе (вероятно, экзоэффект маскируется диссоциацией кальцита) (рис. 4б).

Метаалевролиты – это сланцеватые породы темно-серого цвета, пелитовой структуры, с темно-зелеными участками, обусловленными наличием хлорита. Сланцеватость пород проявлена преимущественно вдоль слоистости, которая устанавливается по ориентировке обломков. Прожилки молочного белого кварца мощностью до 1 см согласны со сланцеватостью. Сульфидная минерализация представлена магнитным пирротинном в виде вытянутых линз и гнезд размером до 0.5 мм и составляет около 2–3 % от объема образцов.

Метаалевролиты в поляризационном свете характеризуются лепидогранобластовой структурой, линзовидно-очковой текстурой с характерными удлинёнными «очками» кварца (размер от 0.05 до 1.5 мм), расположенными по сланцеватости, и тонкосвиляватой микротекстурой, обусловленной ориентированными чешуйками слюды вокруг

Таблица 1

Минеральный состав метаосадочных пород Угаханского месторождения по результатам количественного рентгеноструктурного анализа

Table 1

Mineral composition of metasedimentary rocks of the Ugakhan deposit according to quantitative X-ray diffraction analysis

Породы	Минеральный состав (мас. %)					
	Кварц	Плагиоклаз	КПШ	Кальцит	Слюда	Хлорит
Метапесчаник	48	30	–	9	11	3
Метаалевролит*	16	22	5	1	53	3
Углеродистый сланец	7	10	4	–	70	8

Примечание. \* – в пробе содержится >20 % рентгеноаморфной составляющей; прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. \* – the sample contains >20 % of X-ray amorphous component; dash – below detection limit.

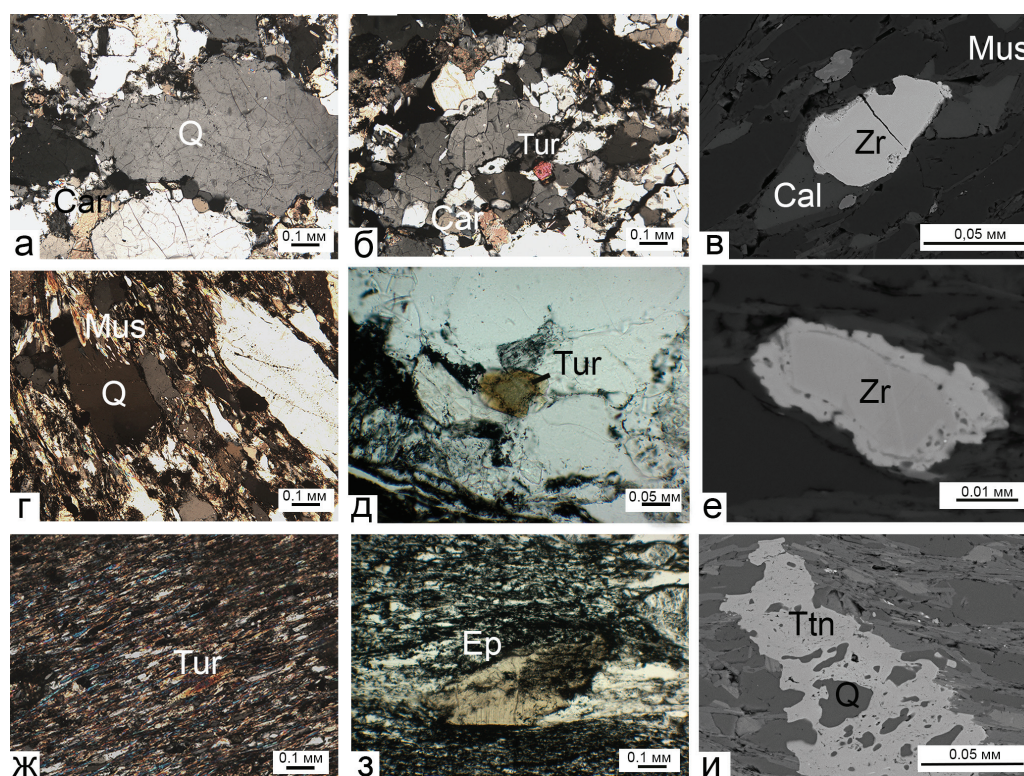


Рис. 3. Минеральный состав метаседиментных пород месторождения Угахан:

а–в – метапесчаники: а – обломочные зерна кварца (Q), окруженные карбонат-слюдистым цементом (Car); б – турмалин (Tur) в межзерновом пространстве кварца; в – обломок циркона (Zr) между зернами кальцита (Cal) и мусковита (Mus); г–е – метаалевролиты: г – зерна кварца, окруженные укрупненными чешуйками мусковита; д – зерно турмалина с каймой регенерации; е – зональное зерно циркона; ж–и – углеродистые сланцы: ж – турмалин в лепидогранобластовой структуре углеродистого сланца; з – укрупненный кристалл РЗЭ-содержащего эпидота (Ep) на границе с метаалевролитом; и – изометричные выделения титанита (Ttn) в кварц-слюдистой основной массе. Поляризационный свет.

Fig. 3. Mineral composition of metasedimentary rocks of the Ugakhan deposit:

а–в – metasandstone: а – clastic quartz (Q) grains in carbonate-mica matrix (Car); б – interstitial tourmaline (Tur) in quartz; в – zircon (Zr) clast between grains of calcite (Cal) and muscovite (Mus); г–е – metasiltstone: г – quartz grains surrounded by large muscovite scales; д – tourmaline grain with regeneration margin; е – zonal zircon grain; ж–и – carbonaceous shale: ж – tourmaline in lepidogranoblastic carbonaceous shale; з – large REE-bearing epidote crystal (Ep) at the boundary with metasiltstone; и – isometric titanite (Ttn) in quartz-mica matrix. Polarized light.

«очков» кварца. Породы сложены тонкозернистыми агрегатами (размер до 0.2) кварца, полевыми шпатами (альбит и ортоклаз), слюдами (мусковит и серицит) и карбонатами (кальцит, анкерит). В составе метаалевролитов изредка отмечаются турмалин, циркон и рутил (табл. 1, рис. 3г). Кристаллы зеленовато-желтого турмалина размером до 0.1 мм удлиненно-округлой и призматической формы с типичным треугольным сечением. В некоторых кристаллах отмечается более светлая регенерационная кайма с включениями УВ (рис. 3д). Зерна циркона размером до 20–30 мкм характеризуются зональным строением в виде дорастания обломков новообразованной пористой каймой мощностью

от 5 до 10 мкм с включениями минералов основной массы (рис. 3е). В составе обломочного циркона отмечается примесь  $\text{HfO}_2$  до 1.71 мас. %, а в регенерационной кайме содержания  $\text{HfO}_2$  достигают 2.05 мас. % и присутствует  $\text{UO}_2$  (0.37 мас. %). Рутил сростается с пиритом, размер его зерен достигает 0.05 мм, форма сечений овальная, ксеноморфная.

В метаалевролитах встречаются фрагменты микрофитоцитов округлой, овальной, иногда сложной формы (диаметр 0.5 мм) с хорошо выраженной концентрической зональностью, проявленной в чередовании темных (углеродистое вещество) и светлых (карбонатно-слюдистый материал) сло-



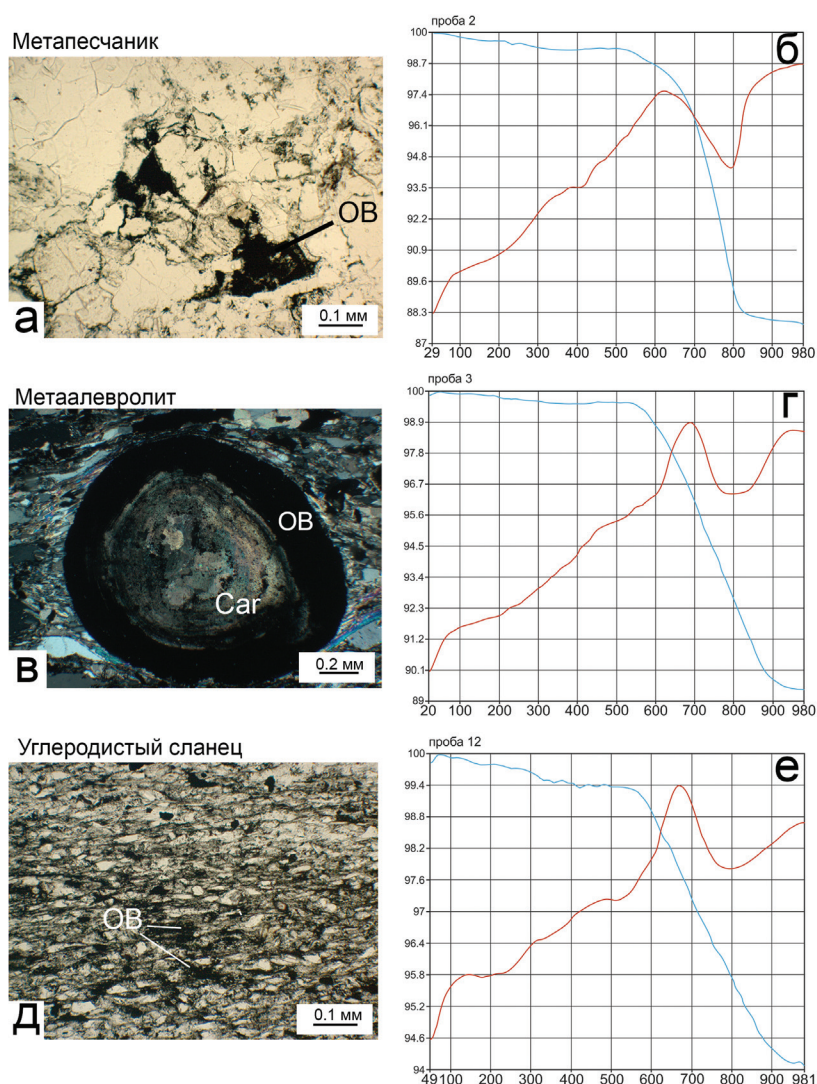


Рис. 4. Углеродистое вещество в метаосадках Угаханского месторождения (а, в, д) и соответствующие термограммы (б, г, е):

а – метапесчаник; б – термограмма УВ из метапесчаника, навеска 1159 мг, общая потеря веса 58 мг (5 %), ОВ не обнаружено, возможно, экзоэффект маскируется диссоциацией кальцита (содержание кальцита в пробе по данным QXRD составляет 10 %); в – концентрически-зональный микрофитолит с УВ и карбонатно-слюдистыми слоями в метаалевролите; г – термограмма УВ из метаалевролита, навеска 798 мг, общая потеря веса 25 мг (3 %), с учетом потери конституционной воды в мусковите (по данным QXRD проба содержит 53 % мусковита) количество ОВ в пробе составляет 1 %; д – УВ из углеродистого сланца, е – термограмма УВ из углеродистого сланца, навеска 1054 мг, общая потеря веса 58 мг (5.5 %), с учетом потери конституционной воды в мусковите (по данным QXRD проба содержит 70 % мусковита) количество ОВ составляет 3 %.

Синяя линия – TG (кривая потери веса), красная – DTA (дифференциальный термический анализ).

Fig. 4. Carbonaceous matter of metasedimentary rocks of the Ugakhan deposit (a, в, д) and corresponding DTA curves (б, г, е):

а – metasandstone; б – DTA curve of carbonaceous matter from metasandstone, sample 1159 mg in weight, the total weight loss is 58 mg (5 %), no OM is detected, exoeffect is probably masked by dissociation of calcite (its amount in sample is 10 % according to QXRD data); в – concentrically zoned microphytolite with carbonaceous matter and carbonate-micaceous layers in metasiltstone; г – DTA curve of carbonaceous matter from metasiltstone, sample 798 mg in weight, the total weight loss is 25 mg (3 %), taking into account the loss of constitutional water in muscovite (according to QXRD, sample contains 53 % of muscovite), the OM content of sample is 1 %; д – carbonaceous matter from carbonaceous shale; е – DTA curve of carbonaceous shale, sample 1054 mg in weight, the total weight loss is 58 mg (5.5 %), taking into account the loss of constitutional water in muscovite (according to QXRD, sample contains 70 % of muscovite), the OM content of sample is 3 %.

Blue line – TG (weight loss curve), red line – DTA (differential thermal analysis).

ев, которые состоят из мельчайших кристаллов или шаровидных зерен кальцита, напоминающих фоссилизированные клетки бактерий (рис. 4в). По результатам термического анализа содержание ОВ в пробе составляет ~1 мас. %, его выгоранию соответствует экзотермический эффект в диапазоне температур от 550 до 750 °С, максимум находится на 670 °С (рис. 4г).

Углеродистые сланцы представлены мелкозернистыми темно- до голубовато-серыми породами с темно-зелеными пятнами хлорита. Вдоль сланцеватости изредка наблюдаются прожилки карбонатов молочно-белого цвета шириной 0.1–1 см. В образцах присутствует ферромагнитный пирротин в виде вкрапленников, линзовидных и гнездобразных скоплений размером до 0.5 см. Сульфидная минерализация занимает около 5–10 % объема породы.

В шлифах углеродистые сланцы состоят из взаимно параллельных ориентированных тонких чешуек мусковита, серицита и подчиненных им зерен кварца и полевого шпата, кальцита, редко хлорита. Структура сланцев лепидогранобластовая, тонкозернистая за счет преобладания (до 50 мас. %) слюдистого материала (табл. 1, рис. 3ж). Зерна кварца образуют «очки» удлиненной формы размером до 0.1 мм, которые располагаются своим длинным сечением в плоскости сланцеватости породы. Вокруг «очков» кварца развиваются чешуйки слюды размером до 0.05 мм, облекающие зерно со всех сто-

рон. Хлорит в углеродистых сланцах представлен железисто-магнезиальной разновидностью ( $Fe / Fe + Mg = 0.38–0.76$ ). Температуры его образования, рассчитанные при помощи хлоритового термометра, составляют 296–371 °С (табл. 2).

В углеродистых сланцах присутствуют многочисленные зерна турмалина удлиненно-призматической формы размером до 0.1 мм, окруженные каймой регенерации (рис. 3ж). В редких случаях встречается обломочный циркон (размер зерен до 50 мкм), для которого характерна новообразованная кайма мощностью до 7 мкм. В составе обломочного циркона, также, как и в алевролитах, установлена примесь  $HfO_2$  до 1.51 мас. %. Рутил располагается согласно сланцеватости породы в виде мелких и тонких иголок размером до 0.02–0.03 мм. Титанит обнаружен в виде ксеноморфных выделений размером до 1.2 мм (рис. 3и). Апатит встречается в виде обломков, размер которых варьирует от 10 мкм до 100 мкм. В составе апатита обнаружены F (до 4.42 мас. %) и SrO (до 0.92 мас. %).

Характерной особенностью пород является присутствие крупных призматических кристаллов РЗЭ-содержащего эпидота (размер до 0.3 мм по удлинению) и их многочисленных мелких фрагментов, расположенных параллельно сланцеватости (рис. 3з). Для кристаллов характерны двойники и штриховка вдоль удлинения. Часто кристаллы имеют отколотые углы, встречаются сглажено-угловатые вплоть до окатанных форм. Большинство

Таблица 2

Химический состав хлорита из углеродистых сланцев и метаалевролитов (мас. %)

Table 2

Chemical composition of chlorite from carbonaceous shale and metasiltstone (wt. %)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	Сумма	Si	Al <sup>IV</sup>	Al <sup>VI</sup>	Fe	Mg	Fe / (Fe + Mg)	T, °
1	26.75	22.61	21.08	17.66	88.10	2.75	1.25	1.48	1.81	2.70	0.40	312
2	23.90	22.42	38.05	6.60	90.97	2.60	1.40	1.47	3.46	1.07	0.76	371
3	27.20	20.43	24.64	15.73	88.01	2.85	1.15	1.38	2.16	2.46	0.47	296
4	27.22	22.44	19.80	17.92	87.36	2.81	1.19	1.53	1.71	2.76	0.38	301
Кристаллохимические формулы												
1	$(Mg_{2.70}Fe_{1.81}Al_{1.48})_{5.99}(Si_{2.75}Al_{1.25})_4O_{10}(OH)_8$											
2	$(Fe_{3.46}Al_{1.47}Mg_{1.07})_{6.00}(Si_{2.60}Al_{1.40})_4O_{10}(OH)_8$											
3	$(Mg_{2.46}Fe_{2.16}Al_{1.38})_{6.00}(Si_{2.85}Al_{1.15})_4O_{10}(OH)_8$											
4	$(Mg_{2.76}Fe_{1.71}Al_{1.53})_{6.00}(Si_{2.81}Al_{1.19})_4O_{10}(OH)_8$											

**Примечание.** Структурная формула хлорита  $(Mg,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$  рассчитана на 10 катионов. Температура образования хлорита рассчитывалась по геотермометру (Kranidiotis, MacLean, 1987) на восемь ионов Si в тетраэдрической позиции с корректировкой Al<sup>IV</sup> на Fe / (Fe + Mg):  $T^{\circ}C = 106Al_{кор.}^{IV} + 18$ , где  $Al_{кор.}^{IV} = Al^{IV} + 0.7 \times Fe / (Fe + Mg)$ .

**Note.** The formula of chlorite  $((Mg,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$  is recalculated to 10 cations. The formation temperature of chlorite was calculated using a geothermometer of (Kranidiotis, MacLean, 1987) based on eight Si ions in tetrahedral position with correction of Al<sup>IV</sup> for Fe / (Fe + Mg):  $T^{\circ}C = 106Al_{cor}^{IV} + 18$ , where  $Al_{cor}^{IV} = Al^{IV} + 0.7 \times Fe / (Fe + Mg)$ .



крупных образований РЗЭ-содержащего эпидота наблюдается на контакте углеродистых сланцев и песчаников.

УВ в сланцах присутствует в виде пылевидной тонкорассеянной вкрапленности, не имеющей четких границ распространения (рис. 4д). Его содержание в породе достигает 3 мас. %. На термограммах выгоранию ОВ соответствует экзотермический эффект в диапазоне температур от 600 до 750 °С, а максимум находится на 690 °С (рис. 4е).

**Торий-уран-редкоземельная минерализация** месторождения характеризуется наличием разнообразных по составу минералов РЗЭ, Th и U (рис. 5). Максимальное количество минеральных видов приурочено к углеродистым сланцам и представлено РЗЭ-содержащим эпидотом, бастнезитом, анкилитом, монацитом и ксенотимом. Торий встречается в силикатной форме – в виде торита, а минералы урана – в оксидной (уранинит) и силикатной (коффинит) формах.

РЗЭ-содержащий эпидот  $(\text{Ca}, \text{REE})_2(\text{Al}, \text{Fe})_3(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)(\text{O}, \text{OH})$  встречается в основной карбонат-кварцево-слюдистой массе металаввролитов и углеродистых сланцев в виде 1) крупных призматических кристаллов (размер до  $100 \times 300$  мкм) с неоднородным внутренним строением, часто с тонкой каймой бастнезита (рис. 5а), 2) ксеноморфных зерен с признаками замещения анкилитом и бастнезитом (рис. 5б) и 3) микровключений кристаллографических очертаний размером до  $10 \times 30$  мкм в пирите (рис. 5в). Его кристаллы и их фрагменты, как правило, несут на себе следы изменения и замещения минералами РЗЭ более поздних стадий минералообразования.

Содержания основных компонентов в РЗЭ-содержащем эпидоте сильно варьируют в зависимости от содержаний РЗЭ (мас. %):  $\text{SiO}_2$  (30.56–33.92),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (17.77–22.64),  $\text{CaO}$  (8.82–15.64) и  $\text{FeO}$  (6.56–11.25). Среди РЗЭ преобладает  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (6.53–11.26 мас. %), почти в два раза превышающий по содержанию  $\text{La}_2\text{O}_3$  (3.43–5.51 мас. %); в заметных количествах присутствует  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  (2.21–4.60 мас. %). В некоторых анализах наблюдаются примеси  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  до 1.30 мас. %,  $\text{ThO}_2$  до 1.77 мас. % и  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  до 1.01 мас. % (табл. 3).

Бастнезит  $(\text{Ce}, \text{La}, \dots)\text{CO}_3\text{F}$  образует каймы толщиной 2–10 мкм вокруг кристаллов РЗЭ-содержащего эпидота (рис. 5а) и псевдоморфозы по его мелким кристаллам (рис. 5г). В основной карбонат-кварцево-слюдистой массе металаввролитов и углеродистых сланцев также наблюдается замеще-

ние РЗЭ-содержащего эпидота бастнезитом в ассоциации с анкилитом (рис. 5д).

Спектр РЗЭ элементов в бастнезите наследуется от состава РЗЭ-содержащего эпидота. Для химического состава бастнезита характерно резкое преобладание  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (27.39–28.54 мас. %), содержание которого в два раза выше, чем содержание  $\text{La}_2\text{O}_3$  (13.81–15.40 мас. %) (табл. 3). Из других РЗЭ элементов в заметных количествах присутствуют (мас. %):  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  11.38–11.80 и  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  2.49–2.97, в некоторых анализах обнаружены  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  (до 1.39) и  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (до 1.16). В бастнезите содержания (мас. %):  $\text{ThO}_2$  не превышают 2.35,  $\text{CaO}$  составляют 3.38–4.34 и F варьируют от 2.06 до 3.22. Присутствие воды (2.77–3.00 мас. %) в составе изученных бастнезитов позволяет отнести их к гидроксилбастнезитам (табл. 3).

Анкилит  $(\text{Sr}, \text{REE})(\text{CO}_3)_2(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$  тесно ассоциирует с РЗЭ-содержащим эпидотом и уранинитом (рис. 5д). В пирите установлены выделения анкилита размером до 50 мкм с кристаллическими очертаниями, окруженные РЗЭ-содержащим эпидотом, а также прожилки, мощность которых не превышает 10 мкм (рис. 5е, ж). В ассоциации с органическим веществом анкилит развивается по ураниниту (рис. 5з). Химический состав анкилита (мас. %):  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  25.65–27.01,  $\text{La}_2\text{O}_3$  13.71–14.21,  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  2.50–3.06,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  8.817–9.55,  $\text{SrO}$  8.36–12.58,  $\text{CaO}$  3.11–4.14, иногда  $\text{FeO}$  до 2.35 мас. % и F до 0.41 мас. % (табл. 3).

Монацит  $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \dots)\text{PO}_4$  представлен включениями кристаллов размером до 30 мкм в пирите (рис. 5е) и сростками с апатитом в основной кварц-карбонат-слюдистой массе металаввролитов и углеродистых сланцев (рис. 5и). По составу монацит соответствует Ce-разновидности (мас. %):  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  30.88–36.50,  $\text{La}_2\text{O}_3$  13.86–15.46,  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  3.28–3.74,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  12.93–13.09,  $\text{P}_2\text{O}_5$  28.23–29.93. Минерал содержит незначительные примеси (мас. %):  $\text{SiO}_2$  0.11–0.25,  $\text{CaO}$  0.25–0.38,  $\text{ThO}_2$  до 1.77 и  $\text{FeO}$  до 0.35 (табл. 3).

Ксенотим  $(\text{Y}, \text{REE})\text{PO}_4$  принадлежит иттриевой разновидности, встречается в тесном сростании с апатитом, а также образует каймы вокруг апатита. Размер выделений ксенотима колеблется от 0.2 мкм до 10 мкм (рис. 5к). Химический состав минерала (мас. %):  $\text{Y}_2\text{O}_3$  47.26–48.44,  $\text{P}_2\text{O}_5$  34.69–35.59,  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  1.69–2.05,  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  3.29–3.42,  $\text{Er}_2\text{O}_3$  4.68–5.06,  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  5.75–6.17,  $\text{UO}_2$  0.57–0.67,  $\text{Ho}_2\text{O}_3$  до 1.72,  $\text{CaO}$  до 0.11 (табл. 4).

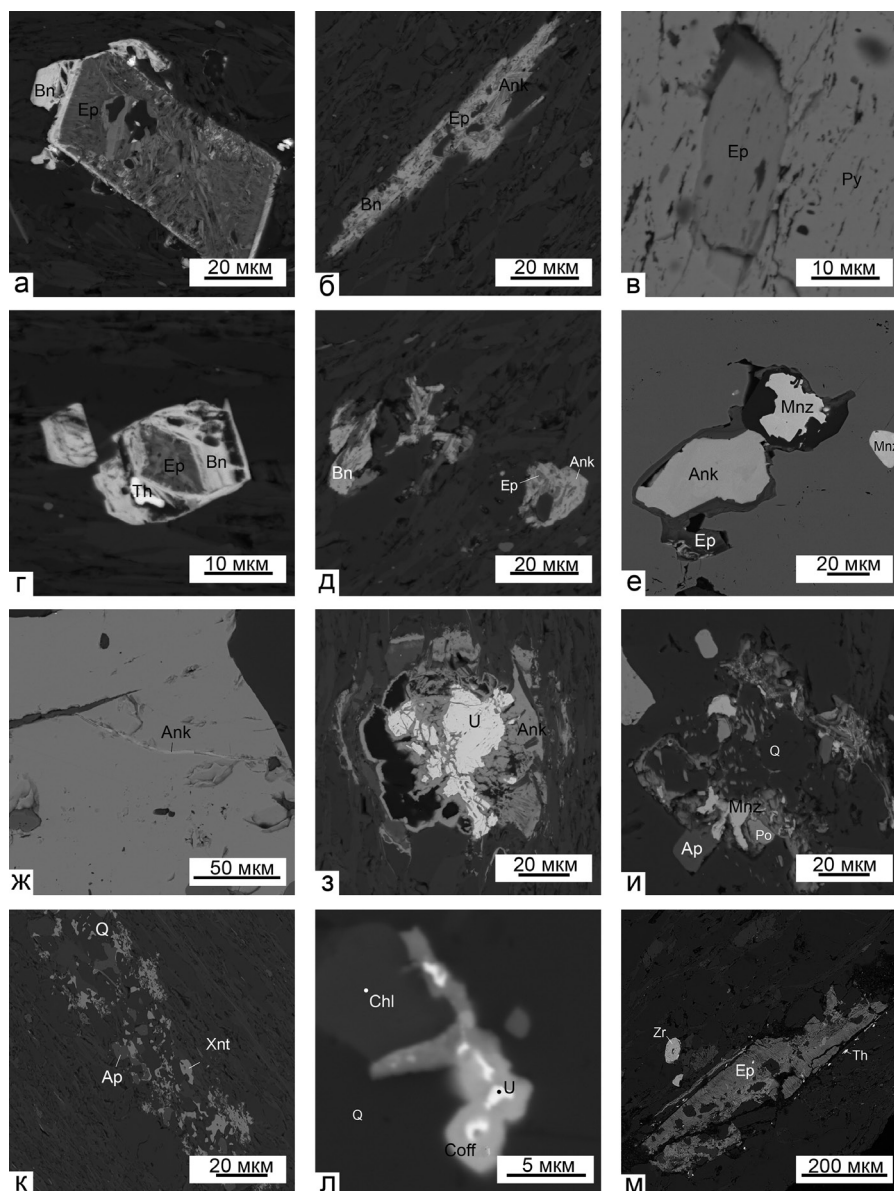


Рис. 5. Торий-уран-редкоземельная минерализация в рудовмещающих отложениях Угаханского месторождения: а – кайма бастанезита (Bn) вокруг кристаллов РЗЭ-содержащего эпидота (Ep); б – ксеноморфные зерна РЗЭ-содержащего эпидота в срастании с анкилитом (Ank) и бастанезитом; в – включение РЗЭ-содержащего эпидота в пирите (Py); г – замещение РЗЭ-содержащего эпидота бастанезитом и включения торита (Th) в бастанезите; д – бастанезит в ассоциации с анкилитом и РЗЭ-содержащим эпидотом; е – включения монацита (Mnz) и анкилита в ассоциации с РЗЭ-содержащим эпидотом в пирите; ж – прожилки анкилита в кристалле пирита; з – углеродистое вещество ( $C_{орг}$ ) в ассоциации с уранинитом (U) и анкилитом; и – монацит в ассоциации с апатитом (Ap); к – замещение ксенотимом (Xnt) апатита (Ap); л – кайма коффинита (Coff) вокруг уранинита; м – цепочка из зерен торита вокруг кристалла РЗЭ-содержащего эпидота (All).

Q – кварц, Chl – хлорит, Zr – циркон. BSE фото.

Fig. 5. Th-U-REE mineralization in ore-bearing metasedimentary rocks of the Ugakhan deposit:

a – bastnesite (Bn) rim around REE-bearing epidote crystals (Ep); б – anhedral grains of REE-bearing epidote intergrown with ankylite (Ank); в – inclusion of REE-bearing in pyrite (Py); г – replacement of REE-bearing epidote by bastnesite and inclusion of thorite (Th) in bastnesite; д – bastnesite in assemblage with ankylite and REE-bearing epidote; е – inclusions of monazite (Mnz) and ankylite in assemblage with REE-bearing epidote in pyrite; ж – ankylite veins in pyrite crystal; з – organic matter ( $C_{org}$ ) in assemblage with uraninite and ankylite; и – monazite in assemblage with apatite (Ap); к – replacement of apatite by xenotime (Xnt); л – coffinite (Coff) rim around uraninite; м – chain of thorite (Th) grains around REE-bearing epidote crystal.

Q – quartz, Chl – chlorite, Zr – zircon. BSE photo.

Таблица 3

Table 3

## Химический состав РЗЭ минералов (мас. %)

## Chemical composition of REE minerals (wt. %)

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeO	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ThO <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	SrO	F	CO <sub>2</sub> расч	H <sub>2</sub> O расч	Сумма	
РЗЭ-содержащий эпидот																							
1	32.89	20.20	11.38	9.38	4.91	10.26	1.30	4.38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.58	96.28
2	33.92	22.64	15.64	8.39	3.43	6.53	—	2.21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.67	94.43
3	31.20	17.77	8.82	6.56	4.05	8.56	1.08	3.13	1.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.38	83.92
4	30.56	18.3	11.52	9.62	5.34	11.26	1.17	4.6	0.63	—	1.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.52	95.53
5	32.54	19.85	11.45	11.25	5.51	9.94	—	3.48	1.77	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.59	97.38
Бастнезит																							
6	1.08	—	4.34	—	15.40	28.54	2.49	11.80	0.66	1.16	1.28	—	—	—	—	—	—	—	0.93	3.22	21.00	2.77	94.67
7	2.16	1.34	4.27	0.75	13.81	27.82	2.59	11.48	0.85	0.46	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.14	21.80	2.94	93.41
8	—	—	3.38	1.67	14.22	27.39	2.97	11.38	2.35	—	1.39	—	—	—	—	—	—	—	—	2.06	19.30	3.00	89.11
Анкилит																							
9	—	—	4.14	—	13.71	27.01	3.06	9.55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8.36	—	21.10	4.30	91.23
10	—	—	3.11	2.35	14.21	25.65	2.50	8.81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13.48	0.41	23.25	4.76	98.53
Торит																							
11	16.55	2.14	2.04	1.12	1.87	3.61	2.22	1.15	40.86	5.36	3.39	—	1.30	—	—	2.63	—	—	—	—	—	—	84.26
12	14.97	1.93	1.96	3.95	3.22	6.64	—	3.42	27.1	6.00	1.07	3.33	1.33	0.96	5.38	—	—	—	—	—	—	—	81.23
Кристаллохимические формулы																							
1. [Ca <sub>1,16</sub> (Ce <sub>0,36</sub> La <sub>0,17</sub> Nd <sub>0,15</sub> Pr <sub>0,04</sub> ) <sub>0,72</sub> Al <sub>2,26</sub> Fe <sub>0,74</sub> Si <sub>3,00</sub> O <sub>11</sub> (O,OH)																							
2. [Ca <sub>1,51</sub> (Ce <sub>0,22</sub> La <sub>0,11</sub> Nd <sub>0,07</sub> ) <sub>0,40</sub> ] <sub>1,91</sub> (Al <sub>4,03</sub> Fe <sub>0,63</sub> Si <sub>3,05</sub> O <sub>11</sub> (O,OH)																							
3. [Ca <sub>1,03</sub> (Ce <sub>0,34</sub> La <sub>0,16</sub> Nd <sub>0,12</sub> Pr <sub>0,04</sub> Th <sub>0,03</sub> ) <sub>0,67</sub> Al <sub>2,28</sub> Fe <sub>0,60</sub> Si <sub>3,39</sub> O <sub>11</sub> (O,OH)																							
4. [Ca <sub>1,22</sub> (Ce <sub>0,41</sub> La <sub>0,19</sub> Nd <sub>0,16</sub> Pr <sub>0,04</sub> Sm <sub>0,03</sub> Th <sub>0,01</sub> ) <sub>0,85</sub> Al <sub>2,13</sub> Fe <sub>0,79</sub> Si <sub>3,01</sub> O <sub>11</sub> (O,OH)																							
5. [Ca <sub>1,16</sub> (Ce <sub>0,34</sub> La <sub>0,19</sub> Nd <sub>0,12</sub> Th <sub>0,04</sub> ) <sub>0,69</sub> Al <sub>2,20</sub> Fe <sub>0,89</sub> Si <sub>3,07</sub> O <sub>11</sub> (O,OH)																							
6. (Ce <sub>0,36</sub> La <sub>0,20</sub> Ca <sub>0,16</sub> Nd <sub>0,15</sub> Sr <sub>0,15</sub> Y <sub>0,02</sub> Pr <sub>0,02</sub> Sm <sub>0,02</sub> Th <sub>0,01</sub> Si <sub>3,04</sub> O <sub>11</sub> (F, OH)																							
7. (Ce <sub>0,34</sub> La <sub>0,17</sub> Ca <sub>0,15</sub> Nd <sub>0,14</sub> Si <sub>0,07</sub> Al <sub>0,05</sub> Pr <sub>0,03</sub> Fe <sub>0,02</sub> Y <sub>0,01</sub> Th <sub>0,01</sub> )CO <sub>3</sub> (F, OH)																							
8. (Ce <sub>0,38</sub> La <sub>0,20</sub> Nd <sub>0,15</sub> Ca <sub>0,14</sub> Fe <sub>0,05</sub> Pr <sub>0,04</sub> Sm <sub>0,02</sub> Th <sub>0,02</sub> )CO <sub>3</sub> (F, OH)																							
9. (Ce <sub>0,69</sub> La <sub>0,35</sub> Sr <sub>0,34</sub> Ca <sub>0,31</sub> Nb <sub>0,24</sub> Pr <sub>0,08</sub> ) <sub>2,00</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> OH · H <sub>2</sub> O																							
10. (Ce <sub>0,59</sub> Sr <sub>0,49</sub> La <sub>0,33</sub> Ca <sub>0,21</sub> Nd <sub>0,20</sub> Fe <sub>0,12</sub> Pr <sub>0,06</sub> ) <sub>2,00</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (F,OH) · H <sub>2</sub> O																							
11. (Th <sub>0,44</sub> Y <sub>0,13</sub> Ca <sub>0,10</sub> Ce <sub>0,06</sub> Sm <sub>0,05</sub> Fe <sub>0,04</sub> Pr <sub>0,04</sub> La <sub>0,03</sub> Nd <sub>0,02</sub> Dy <sub>0,02</sub> ) <sub>0,94</sub> (Si <sub>0,78</sub> Al <sub>0,12</sub> P <sub>0,10</sub> )O <sub>4</sub>																							
12. (Th <sub>0,36</sub> Fe <sub>0,19</sub> Y <sub>0,18</sub> Ce <sub>0,14</sub> Ca <sub>0,12</sub> Nd <sub>0,07</sub> La <sub>0,07</sub> U <sub>0,06</sub> Zr <sub>0,03</sub> Sm <sub>0,02</sub> Dy <sub>0,02</sub> ) <sub>1,18</sub> (Si <sub>0,86</sub> Al <sub>0,14</sub> )O <sub>4</sub>																							

Примечание. Кристаллохимические формулы рассчитаны на сумму катионов, равную восемь (РЗЭ-содержащий эпидот), два (анкилит) и один (бастнезит и торит). Note. Formulas are recalculated to cation sum of eight (REE-bearing epidote), two (ankylite) and one (bastnesite and thorite).



Таблица 4

Химический состав монацита, ксенотима, уранинита и коффинита (мас. %)

Table 4

Chemical composition of monazite, xenotime, uraninite and coffinite (wt. %)

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeO	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ThO <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO	U <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	F	Сумма	
Монацит																							
1	0.11	—	0.25	—	13.86	36.5	3.74	12.93	—	—	2.12	—	—	—	—	—	—	—	—	29.93	—	—	97.34
2	0.25	—	0.38	0.35	15.46	30.88	3.28	13.09	1.77	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28.23	—	—	95.79
Ксенотим																							
3	—	—	0.11	—	—	—	—	—	—	47.26	—	1.69	3.42	1.72	4.68	5.75	—	0.57	34.69	—	—	—	99.89
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	48.44	—	2.05	3.29	—	5.06	6.17	—	0.67	35.59	—	—	—	101.26
Апатит																							
5	—	—	53.49	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40.46	—	3.33	95.61
Уранинит																							
7	—	—	—	0.57	—	—	—	—	—	1.91	—	—	—	—	—	—	—	4.6	92.92	—	—	—	100.0
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.20	—	—	—	—	—	—	5.27	88.06	—	—	—	93.33
Коффинит																							
9	25.66	0.96	1.07	2.38	—	—	—	1.23	—	4.04	—	2.56	0.77	—	—	—	—	—	56.78	—	3.88	—	100.52

Кристаллохимические формулы

1. (Ce<sub>0,53</sub>La<sub>0,20</sub>Nd<sub>0,18</sub>Pr<sub>0,05</sub>Ca<sub>0,01</sub>)<sub>0,97</sub>(P<sub>0,996</sub>Si<sub>0,004</sub>O<sub>4</sub>)

2. (Ce<sub>0,47</sub>La<sub>0,24</sub>Nd<sub>0,19</sub>Pr<sub>0,05</sub>Sm<sub>0,03</sub>Ca<sub>0,02</sub>Th<sub>0,02</sub>)<sub>0,99</sub>(Si<sub>0,01</sub>O<sub>4</sub>)

3. (Y<sub>0,86</sub>Yb<sub>0,06</sub>Er<sub>0,05</sub>Dy<sub>0,04</sub>Ho<sub>0,02</sub>Gd<sub>0,02</sub>U<sub>0,005</sub>)<sub>0,88</sub>PO<sub>4</sub>

4. (Y<sub>0,86</sub>Yb<sub>0,06</sub>Er<sub>0,05</sub>Dy<sub>0,04</sub>Gd<sub>0,02</sub>U<sub>0,005</sub>)<sub>0,88</sub>PO<sub>4</sub>

5. Ca<sub>5,02</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>4</sub>F<sub>3,00</sub>

7. (U<sub>0,89</sub>Pb<sub>0,05</sub>Y<sub>0,04</sub>Fe<sub>0,02</sub>)<sub>1,00</sub>O<sub>2,00</sub>

8. (U<sub>0,93</sub>Pb<sub>0,07</sub>)<sub>1,00</sub>O<sub>2,00</sub>

9. (U<sub>0,43</sub>Y<sub>0,07</sub>Fe<sub>0,04</sub>Gd<sub>0,03</sub>Nd<sub>0,02</sub>Dy<sub>0,01</sub>Sm<sub>0,01</sub>Al<sub>0,02</sub>S<sub>0,10</sub>)O<sub>4</sub>

Кристаллохимические формулы

1.  $(\text{Ce}_{0.53}\text{La}_{0.20}\text{Nd}_{0.18}\text{Pr}_{0.05}\text{Ca}_{0.01})_{0.97}(\text{P}_{0.996}\text{Si}_{0.004}\text{O}_4)$
2.  $(\text{Ce}_{0.47}\text{La}_{0.24}\text{Nd}_{0.19}\text{Pr}_{0.05}\text{Sm}_{0.03}\text{Ca}_{0.02}\text{Th}_{0.02})_{1.03}(\text{P}_{0.99}\text{Si}_{0.01}\text{O}_4)$
3.  $(\text{Y}_{0.86}\text{Yb}_{0.06}\text{Er}_{0.05}\text{Dy}_{0.04}\text{Ho}_{0.02}\text{Gd}_{0.02}\text{U}_{0.005})_{0.88}\text{PO}_4$
4.  $(\text{Y}_{0.86}\text{Yb}_{0.06}\text{Er}_{0.05}\text{Dy}_{0.04}\text{Gd}_{0.02}\text{U}_{0.005})_{0.88}\text{PO}_4$
5.  $\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_3\text{F}_{0.92}$
7.  $(\text{U}_{0.89}\text{Pb}_{0.05}\text{Y}_{0.04}\text{Fe}_{0.02})_{1.00}\text{O}_{2.00}$
8.  $(\text{U}_{0.93}\text{Pb}_{0.07})_{1.00}\text{O}_{2.00}$
9.  $(\text{U}_{0.43}\text{Y}_{0.07}\text{Fe}_{0.04}\text{Ca}_{0.04}\text{Gd}_{0.03}\text{Nd}_{0.02}\text{Dy}_{0.01}\text{Sm}_{0.01})_{0.68}(\text{Si}_{0.88}\text{Al}_{0.02}\text{S}_{0.10})\text{O}_4$

*Примечание.* Кристаллохимические формулы монацита, ксенотима, уранинита и коффинита рассчитаны на сумму катионов, равную одному. Формула апатита рассчитана по кислороду, с поправкой на кислород  $\text{O} \equiv \text{F}_2$  : –1.665.

*Note.* Formulas of monazite, xenotime, uraninite and coffinite are recalculated to the cation sum of one. For apatite, the calculation is based on oxygen, with correction for oxygen  $\text{O} = \text{F}_2$  : –1.665.

Уранинит  $\text{UO}_2$  и коффинит  $\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$  обнаружены в виде редких зерен размером до 30 мкм в основной массе. Зерна уранинита ксеноморфные, с заливами и выступами. Коффинит образует оторочку вокруг уранинита (рис. 5л). Для минералов урана характерна ассоциация с углеродистым веществом (рис. 5з). Химический состав уранинита (мас. %):  $\text{UO}_2$  88.06–92.92,  $\text{PbO}$  4.60–5.27,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  до 1.91,  $\text{FeO}$  до 0.57; коффинита (мас. %):  $\text{UO}_2$  56.78,  $\text{SiO}_2$  25.66,  $\text{FeO}$  2.38,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  4.04,  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  2.56,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  1.23,  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  0.77,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  1.20,  $\text{CaO}$  0.7,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0.96 (табл. 4).

Торит  $(\text{Th}, \text{REE})\text{SiO}_4$  образует включения размером до 7 мкм в бастнезите (рис. 5г), а также цепочки субмикронных зерен вокруг кристаллов РЗЭ-содержащего эпидота (рис. 5м). В составе торита обнаружены примеси преимущественно ЛРЗЭ и  $\text{Y}_2\text{O}_3$  5.36–6.00 мас. %, а также отмечается присутствие  $\text{UO}_2$  до 5.38 мас. % (табл. 3).

### Обсуждение

Существуют две основные гипотезы формирования золоторудных месторождений в черносланцевых толщах Бодайбинского района: 1) постмагматически-гидротермальная, согласно которой основной этап концентрирования золота в рудах и привнос части цветных и благородных металлов отвечает становлению постметаморфических интрузий (Кондратенко, 1977; Русинов и др., 2008; Лаверов и др., 2007) и 2) метаморфогенно-гидротермальная, которая предполагает, что рудообразующие растворы генерировались при региональном метаморфизме исходно металлоносных углеродистых толщ с первичным накоплением золота в УВ и осадочном и диагенетическом пирите (Буряк, 1982; Буряк, Бакулин, 1998; Large et al., 2007; Meffre et al., 2008). Роль осадочных толщ как источника рудных компонентов подтверждается теоретической возможностью связывания металлов при осадконакоплении путем адсорбции сингенетичными сульфидами и органическим веществом (Юдович, Кетрис, 1994). Основными факторами, влияющими на минералогию черных сланцев и распределению в них микроэлементов, являются диагенетические и метаморфические процессы.

Распределение ОВ в породах месторождения Угахан неравномерное и наибольшей его концентрацией характеризуются углеродистые сланцы и металаевролиты. Обнаруженные микрофитоциты свидетельствуют о биопродуктивности первичных осадков палеобассейна (Станевич и др., 2006; Не-

меров и др., 2010). Однако фоссилизированные остатки микроорганизмов, участвовавшие в формировании микрофитоцитов, плохо сохранены или полностью превращены в темное ОВ. Термический анализ показывает, что ОВ в метаосадках Угаханского месторождения прошло все стадии катагенетического преобразования (Иванова и др., 1974). Эти данные подтверждаются расчетом температур (Kranidiotis, MacLean, 1987) образования хлорита в широком интервале температур (296–371 °С) в условиях серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации метаморфизма.

Особенностью метаосадочных пород Угаханского месторождения, в отличие от других месторождений района, является разнообразие РЗЭ минералов в ассоциации с U-Th минералами, количество которых возрастает от метапесчаников к углеродистым сланцам. Флоренсит, являющийся типоморфным акцессорным минералом РЗЭ на ряде месторождений Бодайбинского района (Буряк, 1982; Паленова, 2015), нами в отложениях бужуйхтинской свиты не установлен. Основным концентратором РЗЭ на Угаханском месторождении является РЗЭ-содержащий эпидот, который обнаружен в виде обломков, кристаллов и ксеноморфных выделений, частично замещенных более поздними карбонатами РЗЭ. Обломочные и новообразованные эпидот и алланит в ассоциации с мусковитом и апатитом в Бодайбинском рудном районе установлены в отложениях более древней михайловской толщи на месторождении Чертово Кoryто (Yudovskaya et al., 2016). Замещение обломочного РЗЭ-содержащего эпидота бастнезитом и анкилитом, вероятно, происходило при метаморфогенно-гидротермальных процессах, как и образование кайм регенераций циркона и турмалина. Бастнезит чаще всего образуется в результате разрушения РЗЭ силикатов, в особенности, алланита (Сердюченко и др., 1967; Berger et al., 2008). Присутствие примеси Th в РЗЭ-содержащем эпидоте указывает на образование торита в результате разложения эпидота.

На месторождении монацит и ксенотим, в основном, встречаются в тесном срастании с апатитом и образуют каймы вокруг обломочного апатита и присутствуют в виде включений в пирите. Можно предполагать, что источником вещества для новообразованных монацита и ксенотима служили обломки апатита, обогащенного РЗЭ. Однако новообразованный монацит в метапелитовых породах может кристаллизоваться как в условиях зе-

леносланцевой фации метаморфизма (Rasmussen et al. 2001), так и диагенеза (Evans, Zalasiewicz, 1996; Evans et al. 2002). Тесная пространственная ассоциация пирита с монацитом, содержащим повышенные концентрации  $\text{ThO}_2$  (до 1.77 мас. %), может свидетельствовать о присутствии гидротермального монацита (Meffre et al., 2008; Юдовская и др., 2011). Обломочные фосфаты в изученных породах не обнаружены, их отсутствие, вероятно, связано с неустойчивостью обломочных зерен во время регионального метаморфизма зеленосланцевой фации и свидетельствует о ряде деструктивных реакций, зависящих от валового состава породы и исходного состава монацита (Muhling, Rasmussen, 2009).

Известно, что уран и РЗЭ накапливаются в углеродистых осадках в процессе их образования (Юдович, Кэтрис., 1994). Образование уранинита может быть обусловлено литификацией осадков. Появление коффинита, вероятно, соответствует стадии образования обогащенных ураном торита и кайм регенерации циркона, которые связаны с метаморфогенно-гидротермальными процессами. Таким образом, перераспределение первично накопленного вещества и его концентрирование с образованием минеральных форм РЗЭ, Th и U происходило на всех этапах литогенеза и метаморфогенно-гидротермальной стадии преобразования первичных углеродсодержащих осадков.

### Выводы

1. Вмещающие породы Угаханского месторождения золота метаморфизованы в условиях серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации метаморфизма, что подтверждается их структурно-текстурными особенностями, составом породообразующих и аксессуарных минералов, а также термическими свойствами углеродистого вещества и расчетами температуры образования железисто-магнезиального хлорита. Обнаруженные микрофитолиты важны для определения мелководных палеоусловий накопления осадков.

2. Основным минералом-концентратором РЗЭ на месторождении является обломочный РЗЭ-содержащий эпидот, который служил источником металлов для образования бастнезита, анкилита и торита при метаморфогенно-гидротермальном преобразовании первично-осадочных пород. Монацит и ксенотим являются новообразованными продуктами. Генезис уранинита и коффинита может быть обусловлен литификацией и метаморфогенной перекристаллизацией цемента первичных осадков.

3. В связи с возрастанием использования для локальных датировок аксессуарных минералов, установленные в отложениях бужуйхтинской свиты новообразованные монацит, циркон, ксенотим и уранинит могут быть использованы для абсолютного датирования золоторудной минерализации на Угаханском месторождении при дальнейших исследованиях.

### Литература

- Бабяк В.Н., Блинов А.В., Тарасова Ю.И., Бундяк А.Е. (2019) Новые данные о геолого-структурных особенностях золоторудных месторождений Ожерелье, Ыканское, Угахан и Голец Высочайший. *Науки о Земле и недпользование*, **42**(4), 388–412.
- Буряк В.А. (1982) Метаморфизм и рудообразование. Москва, Недра, 256 с.
- Буряк В.А., Бакулин Ю.И. (1998) Металлогения золота. Владивосток, Дальнаука, 403 с.
- Гладкочуб Д.П., Станевич А.М., Мазукабзов А.М. (2013) Ранние этапы развития Палеоазиатского океана: данные по LA-ICP-MS датированию детритовых цирконов из позднедокембрийских толщ южного фланга Сибирского кратона. *Геология и геофизика*, **54**(10), 1472–1490.
- Иванов А.И. (2008) Месторождение «Ожерелье» – новый тип коренных месторождений золота в Бодайбинском рудном районе. *Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*, **6**(32), 14–26.
- Иванов А.И., Агеев Ю.Л., Калинин Д.И. (2010ф) Поисковые работы на рудное золото в северной части Кропоткинского рудного поля (Иркутская область). Иркутск, филиал ФГУ «ТФГИ по Сибирскому федеральному округу», 159 с.
- Иванова В.П., Касатов Б.К., Красавина Т.Н., Розинова Е.Л. (1974) Термический анализ минералов и горных пород. Л., Недра, 399 с.
- Кондратенко А.К. (1977) Магматические комплексы центральной части Ленской провинции и их металлогеническая специализация. Москва, Недра, 144 с.
- Лавров Н.П., Чернышев И.В., Чугаев А.В., Бairoва, Э.Д., Гольцман, Ю.В., Дистлер, В.В., Юдовская, М.А. (2007) Этапы формирования крупномасштабной благороднометальной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия): результаты изотопно-геохронологического изучения. Доклады Академии наук, **415**(2), 236–241.
- Лишневский Э.Н., Дистлер В.В. (2004) Глубинное строение земной коры района золото-платинового месторождения Сухой Лог по геолого-геофизическим данным (Восточная Сибирь). *Геология рудных месторождений*, **46**(1), 88–104.
- Немеров В.К., Станевич А.М. (2001) Эволюция рифей-вендских обстановок биолитогенеза в бассейнах Байкальской горной области. *Геология и геофизика*, **42** (3), 456–470.



**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*, **51**(5), 729–747.

**Паленова Е.Е.** (2015) Минералогия месторождений золота Копыловское, Кавказ, Красное (Артемовский рудный узел, Бодайбинский район). Автореферат диссертации на соискание степени кандидата геолого-минералогических наук. Миасс, 20 с.

**Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Заботина М.В.** (2013) Минералого-геохимическая характеристика углеродистых толщ золоторудных объектов Артемовского узла (Бодайбинский район). *Геология, поиски и разведка рудных месторождений*, **43**(2), 29–36.

**Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев С. Г., Щегольков Ю.В., Алышева Э. И., Борисовский С. Е.** (2008) Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе. *Геология рудных месторождений*, **50**(1), 3–46.

**Сердюченко Д.П., Лутц Б.Г., Минеев Д.А., Кочетков О.С., Павлов В.А.** (1967) Редкие элементы в породах различных метаморфических фаций. Москва, Наука, 199 с.

**Станевич А.М., Немеров В.К., Чатта Е.Н.** (2006) Микрофоссилии протерозоя Саяно-Байкальской складчатой области. Обстановки обитания, природа и классификация. Новосибирск, Гео, 200 с.

**Чумаков Н.М., Семихатов М.А., Сергеев В.Н.** (2013) Опорный разрез вендских отложений юга Средней Сибири. Стратиграфия. *Геологическая корреляция*, **21**(4), 26–52.

**Юдович Я.Э., Кетрис М.П.** (1994) Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург, Наука «Урал», 303 с.

**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 аксессуарных минералов. *Геология рудных месторождений*, **53**(1), 32–64.

**Berger A., Gnos E., Janots E., Fernandez A., Giese J.** (2008). Formation and composition of rhabdophane, bastnasite and hydrated thorium minerals during alteration: Implications for geochronology and low-temperature processes. *Chemical Geology*, **254** (3–4), 238–248.

**Evans J., Zalasiewicz J.** (1996) UPb, PbPb and SmNd dating of authigenic monazite: implications for the diagenetic evolution of the Welsh Basin. *Earth and Planetary Science Letters*, **144** (3), 421–433

**Evans J.A., Zalasiewicz J.A., Fletcher I., Rasmussen B., Pearce N.J.G.** (2002) Dating diagenetic monazite in mudrocks: constraining the oil window? *Journal of Geological Society London*, **159**, 619–622.

**Kranidiotis P., MacLean W.H.** (1987) Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*, **82**, 1898–1911.

**Large R.R., Danyushevsky L., Hollit C., Maslennikov V., Meffre S., Gilbert S., Bull S., Scott R., Emsbo P., Thomas H., Singh B., Foster J.** (2009) 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*, **104**, 635–668.

**Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins F.S.** (2008) Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis. *Precambrian Research*, **160**(1–2), 179–210.

**Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V., Hergt J.M.** (2008) Age and pyrite Pb isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **72**, 2377–2391.

**Muhling J.R., Rasmussen B.** (2009) Differentiating detrital and metamorphic monazite in greenschist-facies sandstones from the Witwatersrand Supergroup. *American Geophysical Union*, **23**, 90–102.

**Palenova E.E., Yudovskaya M.A., Frei D., Rodionov N.V.** (2019) 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*, **174**, 37–58.

**Rasmussen B., Fletcher I.R., McNaughton N.J.** (2001) Dating low-grade metamorphic events by SHRIMP U–Pb analysis of monazite in shales. *Geology*, **29**(10), 963–966.

**Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiyev N.N.** (2016) Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*, **7**(3), 453–481.

## References

**Babyak V.N., Blinov A.V., Tarasova Y.I., Budyak A.E.** (2019) [New data on geological and structural features of gold deposits of the Ozherel'e, Ykan, Ugakhan and Golets Vysoky]. *Nauki o Zemle i nedropolzovanie [Earth Sciences and Mineral Resources Management]*, **42**(4), 388–412. (in Russian)

**Berger A., Gnos E., Janots E., Fernandez A., Giese J.** (2008). Formation and composition of rhabdophane, bastnasite and hydrated thorium minerals during alteration: Implications for geochronology and low-temperature processes. *Chemical Geology*, **254** (3–4), 238–248.

**Buryak V.A.** (1982) [Metamorphism and ore formation]. Moscow, Nedra, 256 p. (in Russian)

**Buryak V.A., Bakulin Y.I.** (1998) [Metallogeny of gold]. Vladivostok, Dalnauka, 403 p. (in Russian)

**Chumakov N.M., Semikhatov M.A., Sergeev V. N.** (2013) [Reference section of Vendian deposits of the south of Central Siberia]. *Stratigraphy and Geologicheskaya korrelyatsiya [Stratigraphy and Geologic Correlation]*, **21**(4), 26–52. (in Russian)

**Gladkochub D.P., Stankevich A.M., Mazukabzov A.M.** (2013) [Early evolution of the Paleoasian Ocean:

LA-ICP-MS dating of detrital zircons from Late Precambrian sequences of the southern margin of the Siberian craton]. *Russian Geology and Geophysics*, **54**(10), 1150–163.

**Evans J., Zalasiewicz J.** (1996) UPb, PbPb and SmNd dating of authigenic monazite: implications for the diagenetic evolution of the Welsh Basin. *Earth and Planetary Science Letters*, **144** (3), 421–433

**Evans J.A., Zalasiewicz J.A., Fletcher I., Rasmussen B., Pearce N.J.G.** (2002) Dating diagenetic monazite in mudrocks: constraining the oil window? *Journal of Geological Society London*, **159**, 619–622.

**Ivanov A. I.** (2008) [The Ozherel'e deposit is a new type of primary gold deposits in the Bodaibo ore district]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya RAEN. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdeniy* [Bulletin of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. *Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*]. **6**(32), 14–26.

**Ivanov A.I., Ageev Y.L., Kalinina D.I.** (2010) [Prospecting for gold in the northern part of the Kropotkinskoe ore field (Irkutsk region)]. Irkutsk, filial FGU «TFGI po Sibirskomu federalnomu okrugu», 159 p. (in Russian)

**Ivanova V.P., Kasatov B.K., Krasavina T.N., Rozinova E.L.** (1974) [Thermal analysis of minerals and rocks]. Leningrad, Nedra, 399 p. (in Russian)

**Kondratenko A.K.** (1977) [Igneous complexes of the central part of the Lena province and their metallogeny]. Moscow, Nedra, 144 p. (in Russian)

**Kranidiotis P., MacLean W.H.** (1987) Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*, **82**, 1898–1911.

**Large R.R., Danyushevsky L., Hollit C., Maslennikov V., Meffre S., Gilbert S., Bull S., Scott R., Emsbo P., Thomas H., Singh B., Foster J.** (2009) 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*, **104**, 635–668.

**Laverov N.P., Chernyshev I.V., Chugayev A.V., Bairova, E.D., Goltsman, Yu.V., Distler, V.V., Yudovskaya, M.A.** (2007) [Formation stages of the large-scale noble metal mineralization in the Sukhoi Log deposit, East Siberia: results of isotope-geochronological study]. *Doklady Akademii nauk [Doklady Earth Sciences]*, **415**(2), 236–241. (in Russian)

**Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins F.S.** (2008) Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis. *Precambrian Research*, **160**(1–2), 179–210.

**Lishnevsky E.N., Distler V.V.** (2004) [Deep structure of the Earth's crust in area of the Sukhoi Log gold-platinum deposit according to the geological and geophysical data (Eastern Siberia)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, **46**(1), 88–104. (in Russian)

**Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V., Hergt J.M.** (2008) Age and pyrite Pb isotopic composition

of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **72**, 2377–2391.

**Muhling J.R., Rasmussen B.** (2009) Differentiating detrital and metamorphic monazite in greenschist-facies sandstones from the Witwatersrand Supergroup. *American Geophysical Union*, **23**, 90–102.

**Nemerov V.K., Stanevich A.M.** (2001) Evolution of the Riphean-Vendian biolithogenesis settings in the basins of the Baikal mountain region. *Geology and Geophysics*, **42** (3), 456–470.

**Nemerov V.K., Stanevich A.M., Razvozhayeva E.A., Budyak A.E., Kornilova T.A.** (2010) [Biogenic sedimentation factors of mineralization in the Neoproterozoic strata of the Baikal-Patom region]. *Russian Geology and Geophysics*, **51**(5), 572–586.

**Palenova E.E.** (2015) [Mineralogy of in Kopylovskiy, Kavkaz and Krasnoe gold deposits (Artemovskiy ore cluster, Bodaybo region)]. Abstract of Dissertation of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences. Miass, 20 p. (in Russian).

**Palenova E.E., Belogub E.V., Novoselov K.A., Zabolotina M.V.** (2013) [Mineralogical and geochemical characteristics of carbonaceous strata of gold ore objects of the Artemovskiy cluster (Bodaibo district)]. *Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdeniy [Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits]*, **43**(2), 29–36. (in Russian)

**Palenova E.E., Yudovskaya M.A., Frei D., Rodionov N.V.** (2019) 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*, **174**, 37–58.

**Rasmussen B., Fletcher I.R., McNaughton N.J.** (2001) Dating low-grade metamorphic events by SHRIMP U–Pb analysis of monazite in shales. *Geology*, **29**(10), 963–966.

**Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shchegolkov Yu.V., Malysheva E.I., Borisovsky S.E.** (2008) [Near-ore metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore district]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, **50**(1), 3–46. (in Russian)

**Serdychenko D.P., Lutz B.G., Mineev D.A., Kochetkov O.S., Pavlov V.A.** (1967) [Rare elements in rocks of various metamorphic facies]. Moscow, Nauka, 199 p. (in Russian)

**Stanevich A.M., Nemerov V.K., Chatta E.N.** (2006) [Proterozoic microfossils of the Sayano-Baikal fold region. Habitat, nature, classification]. Novosibirsk, Geo, 200 p. (in Russian)

**Yudovich Y.E., Ketris M.P.** (1994) [Trace elements in black shales]. Yekaterinburg, Nauka «Ural», 303 p. (in Russian)

**Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S. A.** (2011) [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]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, **53**(1), 32–64. (in Russian)