

ЧЕРНЕВЫЕ ФОСФАТНЫЕ УРАНОВЫЕ РУДЫ ВИТИМСКОГО ПЛАТО (БУРЯТИЯ)

© 2020 г. О. А. Дойникова*, Н. Н. Тарасов, П. М. Карташов, В. А. Петров

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35*

**e-mail: doa@igem.ru*

Получена 05.06.2019, после доработки 02.12.2019, принята к публикации 05.12.2019

Дисперсная радиоактивная рудная минерализация (урановые черни) на палеодолинных месторождениях Витимского урановорудного района (Республика Бурятия) изучена комплексом методов аналитической электронной микроскопии (SEM, TEM). Рудный компонент – фосфат четырехвалентного урана нингиоит – в виде микронных кристаллических и минералоидных выделений представлен во всех типах вмещающих пород (пески, граниты фундамента, перекрывающие базальты). Фосфатно-черневые урановые руды, малоизвестные ранее, представляют новый для России тип промышленных руд.

Ключевые слова: урановые черни, нингиоит, черневая урановая руда, палеорусловые месторождения

DOI: 10.31857/S0033831120040097

В мировой добыче урана преобладают месторождения урана песчаникового типа. Они наиболее экономически выгодны для отработки методами выщелачивания *in situ* (ISL). В 2015 г. более 55% мировой добычи урана было извлечено из месторождений песчаникового промышленного типа [1]. Эти экзогенные месторождения формируются в самых верхних слоях земной коры. Руды урана здесь образуются в результате окисления осадочных отложений кислородсодержащими грунтовыми/пластовыми водами. По классификации МАГАТЭ 2013 г. среди песчаниковых месторождений урана наиболее широко представлены три подтипа: таблитчатые (*tabular*), ролловые (*roll-front*) и базально-русовые (*basal channel*). Их типичные примеры соответственно: Чехия (Страж) и Болгария (Маришское рудное поле); Казахстан (Чу-Сарысуйская урановорудная провинция); Япония (Нингио-Того, Тоно), Канада (Британская Колумбия), Аргентина (Мендоса) и др. В России известны базально-русовые месторождения со средними запасами. Отечественные геологи обычно называют их палеодолинные/палеорусловые.

Два из трех действующих российских предприятий по добыче урана – АО «Далур» и АО «Хиагда» – разрабатывают палеорусловые месторождения песчаникового типа. Промышленная эксплуатация ведется экологически чистым способом скважинного подземного выщелачивания ISL. АО «Далур»

(Далматовский район, Курганская обл.) ведет промышленную эксплуатацию и разработку урановых месторождений Зауральского района. Сюда входят месторождения в обрамлении Западно-Сибирской плиты со средними запасами: Далматовское (12000 т), Хохловское (11000 т) и Добровольное (8000 т) [2]. В 2017 добыча урана составила 592 т. Кроме того, в Мариинском районе Зауралья известны небольшие месторождения и рудопроявления такого же типа – Малиновское, Новое, Пригородное, Ледяшевское и др. [3]. АО «Хиагда» в Забайкалье (Республика Бурятия) ведет промышленную эксплуатацию и разведку урановых месторождений Витимского рудного района. Основная ресурсная база – Хиагдинское рудное поле (ХРП) – расположена на Витимском плато (Северо-Восточное Забайкалье). Это группа разведанных палеодолинных месторождений в районе р. Витим: Дыбын, Намару, Коретконде, Тетрах, Хиагда, Вершинное, Источное, Количикан. Месторождения ХРП были открыты в 1980-е гг. Месторождение Хиагда изучалось первым из этой группы, по его имени в дальнейшем было названо все рудное поле. Все месторождения ХРП локализованы в палеодолинах, врезаемых в кристаллический фундамент (рис. 1). Кроме того, в северной и южной частях Витимского рудного района (за пределами ХРП) расположено несколько небольших месторождений и рудопроявлений такого же типа (Джи-

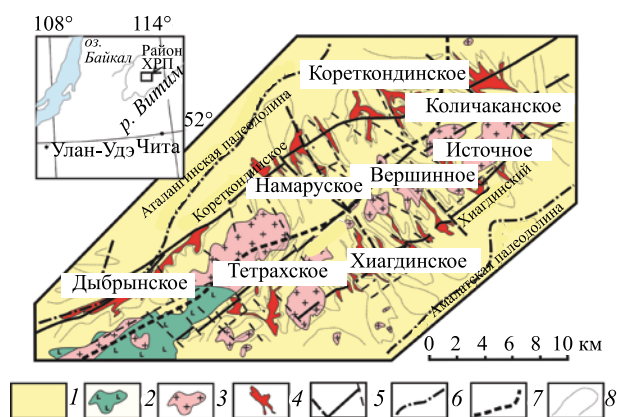


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Хиагдинского рудного поля (по данным работы [3]). 1, 2 – N-Q отложения: 1 – терригенные, вулканогенно-осадочные, 2 – платобазальты; 3 – породы фундамента (граниты); 4 – проекции урановорудных залежей на поверхность; 5 – разрывные нарушения; 6 – оси палеодолин; 7 – ось Байсыханского поднятия; 8 – контуры палеооврагов.

линдинское и др.). В настоящее время в северной части региона ведутся геологоразведочные работы. На территории России (Республика Калмыкия) в миоценовых палеодолинных отложениях р. Дон известно также песчаниковое базально-руслевое месторождение Балковское (запасы 15 000 т) [2].

Детальная геологическая разведка группы месторождений ХРП началась с 2009 г. дочерней компанией урановой холдинговой компании «Атомредметзолото» (АРМЗ), которая входит в состав Российской государственной корпорации «Росатом». Большая часть разведочных и буровых работ была проведена через геологоразведочную компанию ARMZ, Rusburmash. В 2014 г. завершена основная разведка и оценка ресурсов для группы урановых месторождений ХРП с общими запасами более 45 тыс. т. Объем добычи урана в 2017 г. 693 т. Выход на мощность добычи 1000 т/год ожидается в 2019 г. [1]. В настоящее время разрабатываются месторождения Хиагда и Источное, идет подготовка к эксплуатации Вершинного [3]. Результаты геологического изучения ряда месторождений ХРП опубликованы ранее [3, 6, 7]. Порошковые черневые руды ХРП считались настуран-коффинитовыми до начала детальной разведки в 2009 г., когда методы аналитической электронной микроскопии (АЭМ) были привлечены в минералогическую практику. Наше первое оценочное изучение руд Хиагды в начале 1980-х гг. диагностировало преобладающий рудный компонент как Ca-U^{4+} -фосфат нингиоит. Другими исследователями этот минерал до последнего времени отмечался как подчиненный по значимости

в составе настуран-коффинитовых руд как этого, так и других месторождений ХРП. Первые публикации о фосфатном составе U-руд были в 2014 г. [8, 9]. Наши исследования подтвердили дисперсность рудного материала (микронные размеры) и преобладающий фосфатный состав черневых руд, что характерно для всех месторождений ХРП. Результаты выявили новый для России промышленный тип урановых руд – фосфатные черневые [8]. Месторождения с нингиоитовыми рудами относятся к пластово- и грунтово-инфильтрационному генетическому типу по классификации [10].

Все палеодолинные месторождения России относятся к песчаниковому промышленному типу. Дисперсные рыхлые руды таких месторождений сложены минералами четырехвалентного урана: уранинитом UO_2 , коффинитом USiO_4 , нингиоитом $\text{CaU}(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [4, 5]. В практике российских геологов такие руды называются «черневые», а их рудное вещество – «урановые черни». В зарубежной геологии, несмотря на установленный нами ранее полиминеральный состав таких руд, используют термин «sooty uraninite» – сажистый уранинит. Наш опыт многолетнего изучения таких рыхлых черневых руд показывает, что для их эффективного изучения требуется привлечение локальных методов АЭМ. Детальное минералогическое АЭМ-исследование урановых руд ХРП составляет основу данной работы. Данные о минеральном составе руд важны для выбора оптимальной технологии их отработки.

Образцы и методы. Получены минералогические данные о рудах месторождений: Дыбрын, Намару, Коретконде, Хиагда, Вершинное, Источное, Количакан. Изучались образцы наиболее богатых рудных проб из керна скважин, различные литологические разновидности рудовмещающих пород, среди которых преобладали терригенно-осадочные. На первых шести месторождениях были изучены все виды рудовмещающих пород: светлые и темные пески, алевролиты, граниты, базальты. На последнем – только несколько образцов из песчаника.

Изученные рудные образцы представляют собой рыхлый слабосцементированный материал. Сыпучий характер образцов, их мелкая зернистость и дисперсность рудных минералов обусловили выбор метода АЭМ для изучения минерального состава уранового рудного вещества. Радиография использовалась как метод предварительного просмотра образцов. Оснащение АЭМ: JSM-5610LV + INCA-450, 25 кВ; JEM-2100 +

ИЕТЕМ INCA-250, 100 кВ. Диагностика рудных минералов выполнена комплексом методов сканирующей и просвечивающей АЭМ – микродифракция (SAED), элементный состав (EDS), морфология (BSE-изображение).

Использовалось различное препарирование образцов: изучались отдельные, отобранные вручную зерна, прозрачно-полированные шлифы и полированные срезы (аншлифы).

Геологическая обстановка. Хиагдинское рудное поле расположено на левобережье р. Витим в пределах обширного Амалатского плато базальтов, приурочено к Байсыханскому поднятию, которое прослеживается по выходам гранитоидов фундамента в поле базальтового покрова (рис. 1). Положение месторождений контролируется крупными палеодолинами и их притоками, которые врезаются в породы кристаллического фундамента на склонах поднятия и перекрыты мощным базальтовым покровом. Рудные залежи приурочены к палеорусловым отложениям палеодолин и их притоков.

Общие черты геологического строения для всех месторождений ХРП: структурные условия локализации оруденения, литолого-фациальный состав рудовмещающих пород, минеральный состав руд. Различия: размер палеорусел и рудных залежей в них. Оруденение на всех месторождениях локализуется преимущественно в терригенных и вулканогенно-осадочных отложениях, реже в перекрывающих базальтах и гранитоидных породах фундамента. Породы фундамента имеют повышенные содержания урана [в среднем $(5.5-6.0) \times 10^{-4}$] и большинством исследователей рассматриваются как источник урана для данных месторождений [2].

Вмещающие оруденение породы – неоген-четвертичные отложения. Это делювиально-пролювиальные буроватые щебни, сероцветные песчано-глинистые породы, а также аллювиальные пески, озерно-болотные глинистые алевриты, глины и торфяники. Породы обогащены органическим веществом в виде растительных остатков и тонко рассеянного углистого детрита. Среднее содержание $C_{орг}$ в осадках 0.1–0.3%, в обогащенных участках – первые проценты. В верхней части разреза осадки содержат примесь вулканогенного материала: пепел, лапилли, обломки вулканитов. Осадочные породы на всей площади практически полностью перекрыты мощными покровами (до 200 м) базальтов и туфо-базальтов (Амалатское плато); отдельные выходы фундамента есть на водоразделах.

Как во всех инфильтрационных месторождениях урана песчаникового типа, на ХРП проявлены классические закономерности формирования ролловых рудных тел на редокс-границе в проницаемых осадочных толщах. Это граница неизмененных сероцветных пород с эпигенетически измененными, обеленными (белесая окраска бывших сероцветных пород является результатом прохождения по ним фронта эпигенетических редокс-процессов). Предполагается, что оруденение формировалось на геохимическом восстановительном барьере, который создавался при участии бактериального разложения органического вещества рудовмещающих пород. Положение и морфология редокс-границы в разрезе и в плане определяется литологическим составом рудовмещающих пород, их эффективной пористостью и проницаемостью.

Рудные залежи линзовидной и более сложной формы приурочены к осевым частям палеорусел. В терригенных и вулканогенно-осадочных породах рудные тела расположены обычно в первичных сероцветных породах вблизи контакта с обеленными, реже в самих обеленных. Лентообразные в плане и линзовидные в поперечном сечении (мощность $n \approx 20$ м) рудные тела преобладают. Они объединяются в залежи (от сотен метров до 8 км). Реже – рудные тела неправильной столбообразной формы, которые прослеживаются на всю мощность осадочной толщи, захватывая частично породы фундамента и перекрывающих базальтов. Предполагается, что локализация таких тел обусловлена поступлением из фундамента в рудовмещающую толщу углекислых вод в зонах крупных разломов [7, 11].

Ураново-рудная минерализация месторождений ХРП. Общий баланс урана в песчаниковых урановых рудах складывается из минералов урана, акцессорных минералов и минералов сорбентов. На всех изученных месторождениях урановая минерализация однотипна. Визуально, по морфологии выделений руды характеризуется как урановые черни. Рудовмещающие породы различные: светлые пески, темные пески и алевриты, граниты, базальты. Изученные рудные образцы из терригенных осадочных пород представляют собой песок или песчано-глинистый слабо сцементированный, рыхлый материал серого и темно-серого цвета, что связано с углефицированными растительными остатками. Оруденелые вулканиты представлены измененными пористыми базальтами и их туфами. Рудные образцы из фундамента – выветрелые

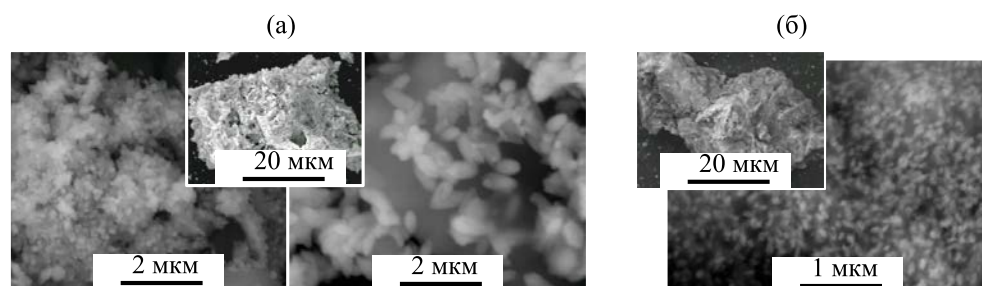


Рис. 2. Зерна рудного песка (на врезках) и увеличенные их участки: а – корки и агрегаты веретеновидных кристаллов нингиюита (светлое, белое), б – игольчатый субмикронный нингиюит в Al,Si-массе (здесь и далее BSE-изображения).

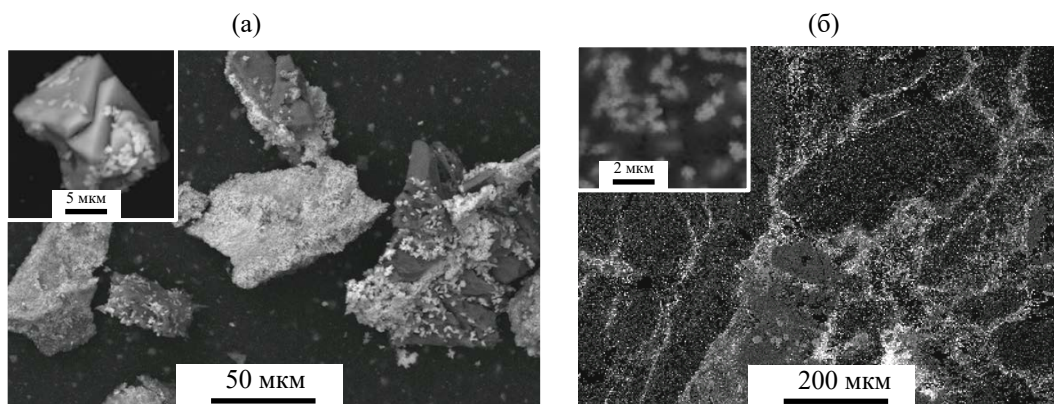


Рис. 3. Характер выделения урановой минерализации (яркое, светлое): а – в богатой руде гранитов, кристаллы нингиюита на поверхности минеральных агрегатов и зерен, на пирите (врезка); б – в базальте нингиюит-сульфидные выделения (светлые) декорируют пути поступления растворов, на врезке – сросстки субмикронных кристаллов нингиюита в стекловидном материале (светлый «поток» в центре шлифа).

граниты. Урановая минерализация в базальтах и гранитах выполняет трещины и пустоты, отмечена также в прожилках с хлоритом и глинистыми минералами.

Общие характеристики рудного вещества месторождений ХРП: фосфатный состав урановой U^{IV} -минерализации, высокая дисперсность и цементирующий характер рудных выделений (рис. 2–4), который проявлен во всех разностях рудовмещающих пород, и тесная ассоциация с сульфидами (рис. 5). В песках рудный минерал образует каймы и «рубашки» на обломочных зернах, развивается по трещинам измененных полевых шпатов. По данным радиографии, более 50% оруденения в осадочных породах приурочено к глинистому цементу песчанников, меньше – присутствует в виде пленок на обломочных породообразующих минералах; наиболее контрастное рудное проявление приурочено к растительным остаткам.

В составе руд ХРП существенно преобладает фосфатная минерализация четырехвалентного

урана. Во всех разностях вмещающих пород рудный компонент диагностирован как минерал U^{4+} нингиюит $CaU(PO_4)_2 \cdot (1-2)H_2O$ минеральной группы рабдофана и его изоморфные разновидности, содержащие Fe и S [7]. Преобладает разновидность нингиюита с идеализированной формулой $(Ca,U,Fe) \cdot [(P,S)O_4] \cdot (1-2)H_2O$. В составе минерала часто присутствуют Ce, La, Nd, реже примеси Sr, Y, Zr и Ti. В крупных кристаллах 2% Ce, 1% La, 1% Sr.

Кристаллическая форма U^{IV} -фосфата представлена наравне с минералоидной. Размер сплошных скоплений нингиюита редко достигает $n \cdot 100$ мкм. Характерная особенность этого фосфата – микронная размерность кристаллов (рис. 6). Самые крупные кристаллы нингиюита (7–8 мкм) найдены в микрополостях крупного углистого обломка из глинистого прослоя (рис. 4, а). Здесь определена ранее неизвестная отражательная способность нингиюита, близкая значениям кварца. Обычные размеры кристаллов этого фосфата – не

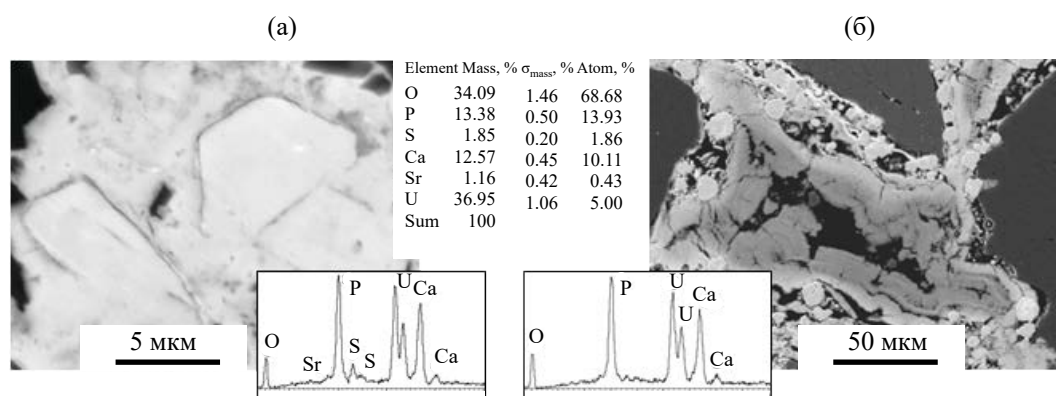


Рис. 4. Минералоидная форма нингиюита: а – уран-сульфидная масса (светло-серое) с крупными кристаллами нингиюита внутри (светлое), спектр состава и результат анализа кристалла; б – нингиюитовая оторочка (спектр состава внешнего слоя) и фрамбонды пирита (округлые) в цементе богатых песков.

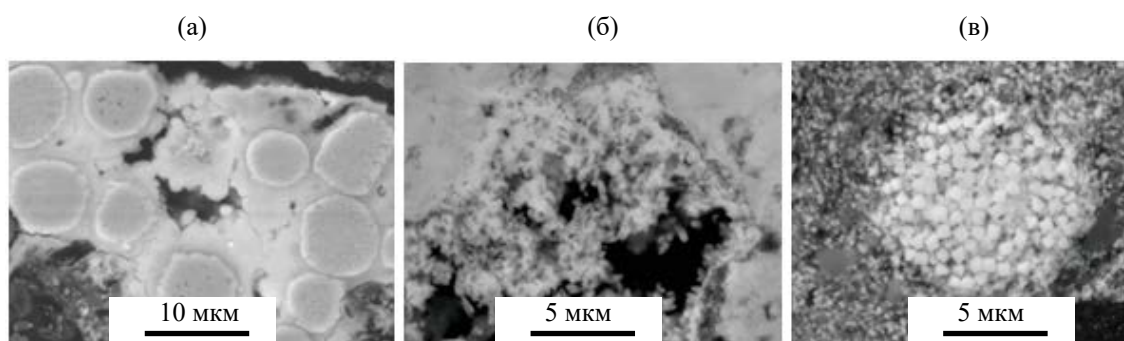


Рис. 5. Нингиюит (светлое) в участках пиритизации: а – вокруг фрамбондов пирита (серое); б – скопления и корки микрокристаллов в интерстициях; в – цементирующая масса (светло-серое) внутри фрамбонда из кристаллов пирита (яркое) и субмикронная вкрапленность в окружающей массе.

более нескольких микрон (рис. 2, а; 3, а; 5, а, б). Вкрапления микронных кристаллов нингиюита встречаются в сильно измененных зернах титаната (рис. 7). Субмикронные кристаллы нингиюита (рис. 2, б; 3, б; 5, в) установлены в цементирующей Al,Si-массе рудных песков (каолинит – гидрослюдистый материал), в углистых обломках.

Минералоидная форма нингиюита – твердый урановорудный минеральный гель – часто присутствует в изученных рудах. Морфология таких выделений – их изогнутый характер – указывает на первичную пластичность рудного материала (рис. 4, б). Они образуют самостоятельные выделения или выполняют фито- и псевдоморфозы. Часто встречаются бесформенные минералоидные образования слабо дифференцированной минеральной массы. Размер выделений редко превышает $n \cdot 10$ мкм. Их состав U–P–Ca–Fe–S (нередко с Al и Si) обычно неоднороден. Участки с различным соотношением нингиюитового и пиритового компонента представлены в колломорфной руд-

ной массе без видимых фазовых границ. Минералоидная форма «чистого» беспримесного нингиюита встречена как редкое исключение. Анализ достаточно крупных минералоидных выделений (где нет вклада ассоциирующих сульфидных минералов) показывает относительное постоянство «сульфидного вклада» в состав, подтверждая преобладание Fe,S-содержащей разновидности нингиюита. Вклад Al,Si-компонента в состав минералоида всегда различен.

TR-нингиюит (содержащий Y и редкоземельные элементы REE) встречается во всех типах рудных толщ (пески, граниты, базальты). Это агрегаты игольчатых микрокристаллов размером от нескольких десятых микрона до нескольких микрон или сульфидно-нингиюитовая масса. Сумма REE достигает 10%; иногда отмечается до 1% Sr. В кристаллах нингиюита $\sum \text{TR}(\text{REE} + \text{Y}) \approx 2\text{--}13$ мас % (Ce – максимум 6%); соотношение REE: Ce > Y > La > Nd > Pr. Размер наиболее крупных агрегатов из кристаллов TR-нингиюита $n \cdot 10$ мкм (Дыбры).

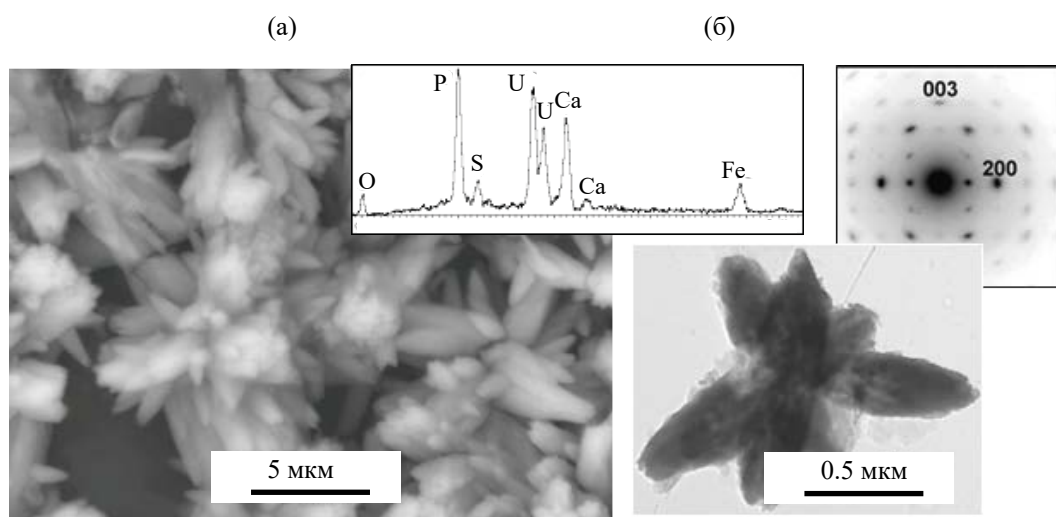


Рис. 6. Сrostки кристаллов нингионита: а – BSE-изображение и спектр состава, б – ТЕМ-изображение и характерная картина микродифракции, плоскость (010).

Состав $(\text{Ca}_{0.67}\text{U}_{0.25}\text{TR}_{0.08})\text{PO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Идеализированная формула $(\text{Ca}, \text{TR}, \text{U})[\text{PO}_4] \cdot n\text{H}_2\text{O}$, где TR = Ce, Y, La, Nd.

В рудных песках среди продуктов изменения темноцветных минералов гранита (хлоритизированный биотит) встречен рудный метакolloид, в составе которого присутствует Th (брокитовая составляющая). Состав такого вещества нингионит-брокит-сульфидный. Подобные фазы более сложного состава в виде натечных почковатых скоплений $n \cdot 10$ мкм присутствуют в гранитах (в гранитной гальке песков).

Сорбированная форма урана, помимо минеральной и минералоидной формы, установлена в

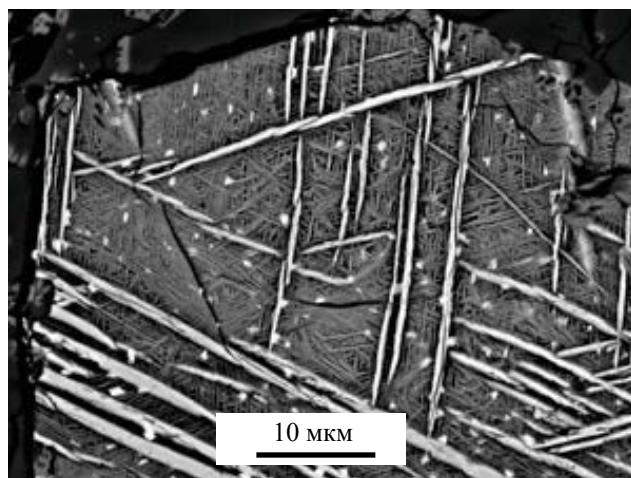


Рис. 7. Микронные кристаллы нингионита (яркие точки) среди сагенитовой решетки измененного зерна титаната, крупные ламели – титаномagnetит(?); аншлиф.

рудных образцах с обильным гетитовым цементом. Тщательные поиски урановых фаз методами ЭМ в таких образцах с повышенным (!) содержанием урана были безуспешными. Присутствие урана в гетите в сорбированной форме было выявлено только по данным цифровой авторадииграфии (альфа-детектирование) (рис. 8). В такой же форме уран присутствует, вероятно, на глинистом и углистом материале. Наличие сорбированной формы урана во вмещающих породах проявляется в образовании желтых налетов (уранильные фазы) на поверхности рудного зерна после его высухания.

Уранильная минерализация встречается в резко подчиненном количестве; минеральные частицы имеют явно выраженную слоистость или волокнистую морфологию (рис. 9), характеризующую U^{VI} -минералы. В спектрах состава таких

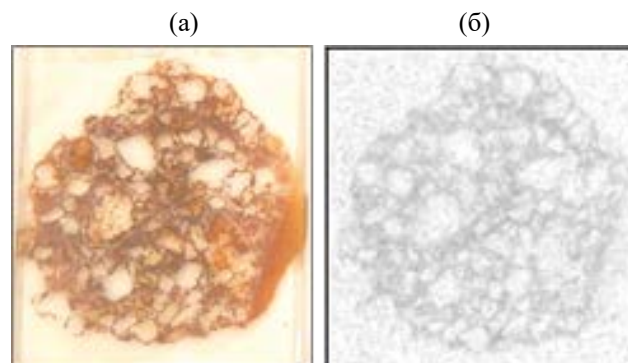


Рис. 8. Шлиф рудного образца с гетитовым цементом и цифровая авторадииграфия, показывающая присутствие сорбированного урана.

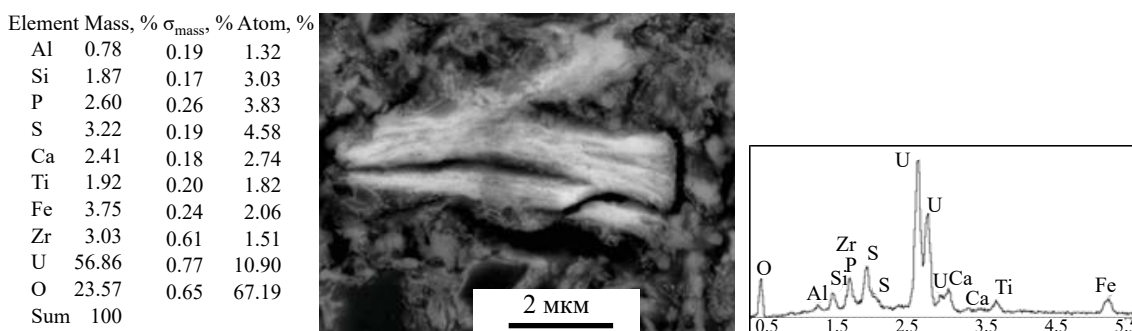


Рис. 9. Кристалл уранильного минерала (светлое) с четко выраженной слоистостью, результат анализа и спектр состава.

частиц соотношение пиков $U > P \gg Ca$. По волокнистой морфологии минерал предположительно диагностирован как скупит; допускается наличие в смеси отенита.

U-содержащая минерализация часто встречается на измененных в разной степени зернах титанатов помимо уже отмеченных вкраплений микрокристаллов нингиюита. Это урансодержащая Ti-оксидная фаза (гидроанатаз?) в виде коллоидных образований – тонких корочек. В их составе переменные количества U (до 2%), до 4% Fe, 1–2% P, 0.1–0.3% Ca; редко 1.5–2% Zr (при наличии обломочного циркона в песках). Такая фиксация U, Ca и P в составе аморфной урансодержащей Ti фазы рассматривается как начальная стадия уран-фосфатного минералообразования. Такое же содержание примесей «рудных» компонентов U, Ca, P ($\approx 1\%$) довольно стабильно в составе измененных зерен циркона.

Сопутствующая минерализация урановых руд ХРП. Присутствие **REE-минерализации** (иногда с примесью U и Th) в рудах изученных месторождений четко проявлено во всех типах рудовмещающих пород. Она также была рассмотрена, поскольку попутное извлечение REE из промышленных растворов снижает себестоимость добычи урана. Выявлено 3 типа концентрирования REE: 1) собственные минералы – монацит $CePO_4$ и ксенотим YPO_4 (обломочные зерна акцессорных минералов гранита), 2) новообразования гипергенных TR-минералов – рабдофан (монацит?), 3) значительные примеси REE в составе рудных фаз. Обломочные зерна монацита (до $n \cdot 10$ мкм) в богатых рудных образцах, часто растрескавшиеся со следами растворения, изменены в разной степени. В зернах первичного (из гранита) акцессорного монацита наблюдаются признаки позднего изменения с привнесом Ca, Th и U (до 10%). Зерна ксенотима более мелкие ($n \cdot$ мкм), встречаются

реже, степень их сохранности выше. По А.И. Перельману [12–14], такая различная устойчивость Се- и Y-фосфатов указывает на сильноокислую среду преобразующих гипергенных процессов, в которой подвижны LREE + Y и не мигрируют HREE.

Новообразованные **TR-содержащие минералы** группы рабдофана представлены редкими вкраплениями в песках (рис. 10). Присутствие этих минералов в рудах указывает на вынос REE рудоносными растворами вместе с ураном из гранитоидных пород фундамента (открытых денудацией в верховьях оврагов), их перенос и фиксацию в условиях, близких к образованию нингиюита.

Сульфиды Fe, Zn, (Cu) тесно ассоциируют с урановой минерализацией. Следует отметить преимущественное развитие нингиюита в участках обильной пиритизации (рис. 5). Это служит своеобразным поисковым признаком урановой фазы под ЭМ. Часто это фрамбоиды пирита, пирит-грейгита, марказита, пирит-марказита. Найдены новообразованные идиоморфные микрокристаллы сульфидов: пирита, марказита, грейгита, сфалерита, галенита, пирротина. Кроме того, в составе руд встречаются минералы: иордизит (коллоидная разновидность молибденита), ильменит, рутил, фтор-апатит, циркон, титанит, самородная медь и медно-оловянные интерметаллиды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Природа формирования черневых U-руд. Наш многолетний опыт изучения черневых урановых руд доказал их полиминеральный характер: в составе в разных пропорциях могут встречаться нингиюит, уранинит (настуран) и коффинит [4, 5]. Все три минеральные формы урана – фосфатная, оксидная и силикатная – образованы в сходной среде, что позволяет обобщать условия образования черневых урановых (U^{IV}) руд в месторождениях песчаникового типа. Ролловые формы рудных

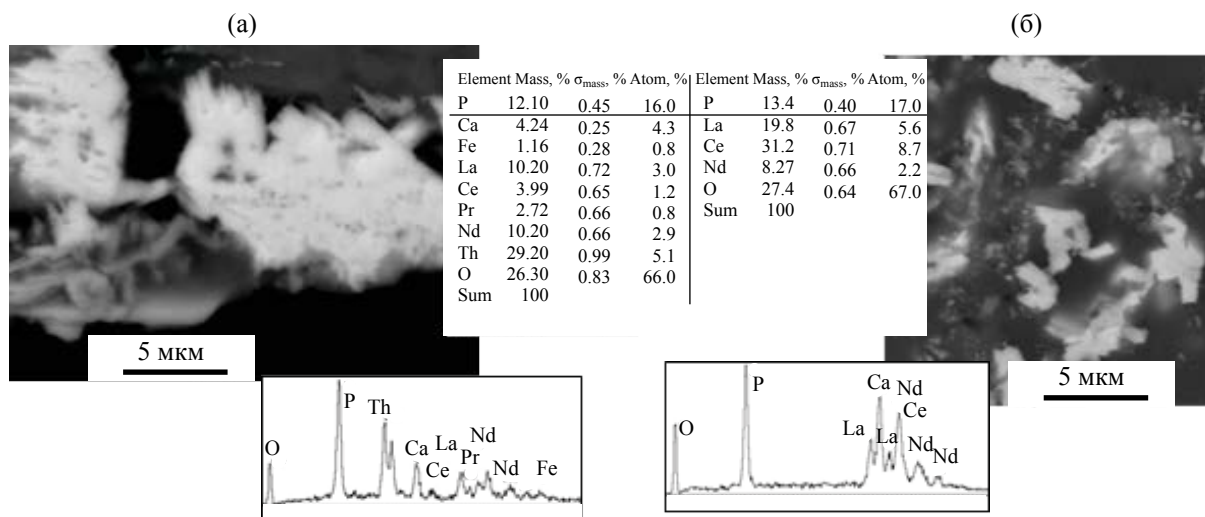


Рис. 10. Новообразования TR-минералов: а – кристаллы REE-брокита (яркое) в межзерновой полости гранитной гальки из песков, результат анализа и спектр состава; б – рабдофан (белое) в кварц-карбонатной массе, результат анализа и спектр состава (образец околорудного сидерита).

тел подчеркивают общие закономерности рудоотложения урана.

Черневые руды формируются в восстановительных условиях из кислородсодержащих ураноносных пластовых вод за счет восстановления урана и осаждения его на восстановительном геохимическом барьере [12–14], на фронте деятельности редокс-процессов выветривания. Западные исследователи [15] также рассматривают ролло-вые залежи урана в гипергенных системах как латеральное развитие гипергенных процессов от аэробного выветривания до анаэробного обогащения, принимая микробную деятельность как несомненный стимул выветривания.

Известно, что аэробное окисление органического вещества создает благоприятную среду для размножения анаэробных микроорганизмов, продолжающих окисление органики. Анаэробная восстановительная обстановка возникает как результат суммарного действия микробиологических процессов в пространстве редокс-барьера, где совместно существуют аэробные и анаэробные микроорганизмы. Следовательно, зона окисления по сути является неотъемлемой частью структуры рудообразующего барьера. В работах [16, 17] предполагается, что продвижение такого биогеохимического редокс-барьера происходит по мере расходования питательной базы бактериального сообщества, а микронная размерность U^{IV} -минералов рассматривается как следствие подвижности среды минералообразования (барьера).

Фосфатная черневая минерализация. Для минералогического изучения всех известных в

природе проявлений нингиоита применялся метод АЭМ, что обусловлено характерной микронной размерностью этого минерала в составе дисперсных черневых урановых руд. К 2000-м гг. стало очевидно, что месторождения с нингиоитовыми рудами не являются редкостью, как считалось ранее, а представляют собой новый фосфатный тип черневой урановой минерализации. Наши данные и литературный обзор [18] показали, что мононингиоитовый состав руд характерен для палеорусловых месторождений палеодолинного типа: Нингио-Тогэ, Япония; Близард, Тайи, Канада; Момино, Хасково, Болгария. Сюда же относятся руды месторождений Хиагдинского рудного поля [8]. Кроме нингиоита, в месторождениях пластово- и грунтово-инфильтрационного типа в подчиненном количестве присутствует коффинит и аморфный уранинит. Пример – промышленные вторичные руды Грачевского рудного поля (Косачинское), руды стратиформных месторождений Чешско-Богемского массива, рудные тела в туфогенно-осадочных толщах Болгарии (Навысен, Марица, Момино). В случае преобладания уранинита над нингиоитом в составе руд (Сугралы, Кызылкум) углистые остатки нами не встречены.

Биогенный аспект формирования U^{IV} -минералов в месторождениях песчаникового типа, в том числе на месторождениях ХРП, рассмотрен при анализе современных литературных данных по экологической (environmental) минералогии и геомикробиологии [16]. Обзор публикаций по проблемам иммобилизации радионуклидов в приповерхностной среде [19–21] показал решающую

роль бактерий в их осаждении и создании восстановительной глеевой среды, необходимой для образования нингионита. Бактериальное восстановление урана [22, 23] демонстрирует, что образование U^{IV} -минералов (уранинит, нингионит) в природных водах, насыщенных органическим веществом, вызвано деятельностью микроорганизмов. На примере урана микробиологические эксперименты показали, что разложение растительных остатков всегда сопровождается бактериальным восстановлением U^{VI} , обеспечивая подвижность урана в виде органических комплексов и коллоидов. При этом источником фосфора в природных растворах являются органические клетки – продукты распада органического (растительного) вещества [20].

Главной причиной появления фосфатно-черневой минерализации представляется значительное преобладание в осадочной толще растительных остатков (палеорусловой аллювий) и/или продуктов их микробного преобразования – гумусовых органических веществ, например, в сильно проработанной коре выветривания с обилием гумуса, где образованы нингионитовые руды месторождения Косачиное, северный Казахстан [18]. Из этой обзорной публикации следует характерное наличие озерно-болотных отложений во вмещающих толщах, что обеспечивает повышенное поступление в раствор фосфат-ионов при разложении растительных остатков. Биогенная природа фосфора указывает на повышенную активность PO_4 -иона при формировании U^{IV} -фосфатных руд, что подтверждают как геологические наблюдения (присутствие биологически активных озерно-болотных отложений), так и минералогические данные (фосфатный состав урановых руд).

Причины различия состава черневых руд. Различие климатических условий осадконакопления и дальнейшего формирования рудных толщ рассматриваются нами как причина формирования различного состава черневых урановых руд. Согласно учению А.И. Перельмана [12, 14] о геохимических барьерах и подвижности элементов, повышенное поступление в раствор фосфат-ионов характерно для гумидного климата. Климат является внешним фактором гипергенных процессов, формирующих, в том числе, и песчаниковые месторождения урана.

Палеодолинные месторождения ХРП с фосфатными рудами сформированы в аллювиальных отложениях в условиях умеренно теплого и влажного климата [6]. Крупные ролловые песчаниковые месторождения Притяньшанской мегапровинции

(чу-сарысуйский тип) с черневыми уранинит-коффинитовыми рудами приурочены к областям аридного климата и сформированы в отложениях прибрежного морского бассейна [1]. Обусловленное климатом, преобладание растительного детрита в витимских толщах обеспечило преобладающее образование здесь фосфатной U^{4+} -минерализации, в отличие от черневых U руд Средней Азии.

Различие состава черневых U -руд среди однотипных (палеодолинных) месторождений мы рассматриваем как результат воздействия внешнего «около-климатического» фактора. Например, фосфатные руды ХРП и настур-коффинитовые – в Зауралье (Далматовское, Хохловское и др.). Такое различие состава сложилось, вероятно, благодаря внешнему термическому воздействию – региональному прогреву рудовмещающих витимских толщ мощными покровами базальтов. Прогрев активизировал жизнедеятельность бактериального сообщества, что привело к более глубокой терминальной (окончательной) переработке биомассы и повышенной активности фосфат-ионов в рудообразующей водной среде. По данным работы [24], при терминальном разрушении органического вещества в иловых отложениях (заиленных грунтах) сульфатредукция является доминирующим анаэробным процессом; это объясняет тесную ассоциацию нингионита с пиритом в толщах с озерно-болотными отложениями, где локализованы нингионитовые руды.

Совокупность наших результатов, микробиологических и геологических данных [25–27] указывает на ведущую роль биогенного фактора в формировании черневых руд в песчаниковых месторождениях урана. Таким образом, образование месторождений черневых урановых руд является частным примером формирования руд в результате природной бактериальной деятельности, что уже известно для ряда месторождений Fe, Mn, Au, Cu [15, 28, 29]. Жизнедеятельность бактериального сообщества, задающая в рудных осадочных толщах как подвижность урана, так и восстановительную геохимическую обстановку, рассматривается нами как фактор рудонакопления урана. Рыхлый характер черневых урановых руд и микронные размеры выделений радиоактивного вещества косвенно подтверждают участие микроорганизмов в процессах рудообразования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение черневых фосфатных урановых руд семи палеодолинных месторождений Витимского плато (ХРП) комплексом методов АЭМ показало,

что состав их высокодисперсного радиоактивного компонента – Ca-U^{IV} -фосфат нингиоит и его изоморфная Fe,S-содержащая разновидность. Эта минерализация, представленная на всех месторождениях ХРП и проявленная во всех разностях рудовмещающих пород (пески, перекрывающие базальты, подстилающие граниты), сложена микрокристаллами, их сростками и колломорфными образованиями. Урановая минерализация носит цементирующий характер и тесно ассоциирует с пиритом. Результаты нашего изучения палеодолонных месторождений Витима открыли ранее не известный в России тип промышленных урановых руд – фосфатные черневые.

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Статья подготовлена по Государственному заданию НИР ИГЕМ РАН (тема № 0136-2018-0017).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Uranium 2016: Resources, Production and Demand*. OECD (2016) NEA/IAEA/7301.
2. Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мизута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.Н. Уран российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.
3. Тарасов Н.Н., Кочкин Б.Т., Величкин В.И., Дойникова О.А. // Геология руд. месторождений. 2018. Т. 60, № 4. С. 392.
4. Дойникова О.А., Белова Л.Н., Горшков А.И., Сивцов А.В. // Геология руд. месторождений. 2003. Т. 45, № 6. С. 514.
5. Дойникова О.А. Минералогия урана восстановительной зоны гипергенеза (по данным электронной микроскопии). М.: Физматлит. 2012. 216 с.
6. Кочкин Б.Т., Тарасов Н.Н., Андреева О.В., Асадулин Э.Э., Голубев В.Н. // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59, № 2. С. 124.
7. Кочкин Б.Т., Солодов И.Н., Ганина Н.И., Рекун М.Л., Тарасов Н.Н., Шугина Г.А., Шулик Л.С. // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59, № 5. С. 349. doi 10.7868/S0016777017050033
8. Дойникова О.А., Тарасов Н.Н., Мохов А.В. // Докл. АН. 2014. Т. 457, № 4. С. 1.
9. Тарханова Г.А., Дубинчук В.Т., Чистякова Н.И., Никитина Е.С., Прохоров Д.А., Нечелюстов Г.Н., Ружицкий В.В. // Разведка и охрана недр. 2014. № 6. С. 7.
10. Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н. Гидрогенное рудообразование. М.: Геоинформмарк, 2000. 608 с.
11. Кочкин Б.Т., Новгородцев А.А., Тарасов Н.Н., Мартыненко В.Г. // Геология руд. месторождений. 2014. Т. 56, № 6. С. 539.
12. Перельман А.И. Геохимия эпигенетических процессов (зона гипергенеза). М.: Недра. 1968. 331 с.
13. Гидрогенные месторождения урана. Основы теории образования / Под ред. А.И. Перельмана. М.: Атомиздат. 1980. 270 с.
14. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 768 с.
15. Erlich H.L., Newman D.K. Geomicrobiology. Boca Raton: CRC, 2008. 628 p.
16. Дойникова О.А. // Геология и разведка. Изв. вузов. 2016. № 5. С. 17.
17. Дойникова О.А. // Геохимия ландшафтов. К 100-летию А.И. Перельмана. М.: АПР, 2017. С. 524.
18. Дойникова О.А. // Геология руд. месторождений. 2007. Т. 49, № 1. С. 89.
19. Lovley D.R., Phillips E.J.P., Gorby Y.A., Landa E.R. // Nature. 1991. Vol. 350. P. 413
20. Suzuki Y., Kelly S.D., Kemner K.M., Banfield J.F. // Appl. Environ. Microbiol. 2005. Vol. 71, N 4. P. 1790.
21. Sivaswamy V., Boyanov M.I., Peyton B.M., Viamajala S., Gerlach R., Apel W.A., Sani R.K., Dohnalkova A., Kemner K.M., Borch T. // Biotechnol. Bioeng. 2011. Vol. 108, N 2. P. 264.
22. Behrends T., Cappellen P. // Chem. Geol. 2005. Vol. 220. P. 315.
23. Cerrato J.M., Ashner M.N., Alessi D.S., Lezama-Pacheco J.S., Bernier-Latmani R., Bargar J.R., Giammar D.E. // Environ. Sci. Technol. 2013. Vol. 47. P. 9756.
24. Слободкин А.И. Дис. ... д.б.н. М.: Ин-т микробиологии РАН, 2008. 336 с.
25. Min M., Xu H., Chen J., Fayek M. // Ore Geol. Rev. 2005. Vol. 26. P. 198.
26. Wölser P.-A., Brugger J., Foden J., Pfeifer H.-R. // Econ. Geol. 2011. Vol. 106. P. 835.
27. Cai C., Li H., Qin M., Luo X., Wanf F., Ou G. // Ore Geol. Rev. 2007. Vol. 32. P. 262.
28. Zammit C.M., Shuster J.P., Gagen E.J., Southam G. // Elements. 2015. Vol. 11. P. 337.
29. Southam G., Sanders J.A. // Econ. Geol. 2005. Vol. 100. P. 1067.