

РУДОФОРМИРУЮЩИЙ БИОГЕННЫЙ ФАКТОР ОБРАЗОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА ПЕСЧАНИКОВОГО ТИПА

© 2022 г. О. А. Дойникова^а, *, В. А. Петров^а

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, Ж-17, 119017 Россия

*e-mail: doa_07@list.ru

Поступила в редакцию 21.12.2021 г.

После доработки 28.03.2022 г.

Принята к публикации 06.04.2022 г.

Геологическая среда рудообразования в месторождениях урана песчаникового типа рассмотрена в свете современных данных геомикробиологии и экологической (environmental) минералогии, связанных с решением экологических проблем биорекультивации (очистки приповерхностной среды путем бактериальной фиксации радионуклидов). Анализ литературных данных показывает возможную рудообразующую роль биогенного фактора в формировании инфильтрационных месторождений урана песчаникового типа, что рассмотрено здесь на примере их палеоруслового подтипа с широким развитием фосфатно-черневых урановых руд. Бактериальный фактор предлагается как один из основных механизмов возникновения и перемещения окислительно-восстановительного фронта в ходе проявления гипергенных процессов в рудовмещающих осадочных песчаниковых толщах.

Ключевые слова: черневые урановые руды, данные геомикробиологии, микробное сообщество, палеодолинные месторождения урана

DOI: 10.31857/S0016777022040025

ВВЕДЕНИЕ

На месторождения урана песчаникового типа приходится более половины мировой добычи урана, поскольку они наиболее выгодны экономически для отработки способом подземного выщелачивания *in situ* (ISL). К песчаниковому промышленному типу относится самое большое количество крупных месторождений урана с запасами >50 тыс. т (Тарханов, Бугриева, 2012).

Эти экзогенные инфильтрационные месторождения формируются в самых верхних слоях земной коры. Руды урана образуются в результате окисления осадочных отложений грунтовыми/пластовыми водами, содержащими кислород и уран. Песчаниковые месторождения урана по классификации МАГАТЭ (Geological Classification..., 2018) представлены следующими подтипами: 1) базально-русловые (*basal channel*), 2) таблитчатые (*tabular*), 3) ролловые (*roll-front*), 4) тектоно-литологические (*tectonic-lithologic*) и 5) связанные с мафическими дайками и силлами в горизонтах песчаников (*mafic dykes/sills in sandstone*). Наиболее широко распространены первые три подтипа песчаниковых месторождений урана.

Базально-русловые месторождения урана известны в Японии (провинции Нингио-Тоге и Тонно), в Канаде (Британская Колумбия), Аргентине (Мендоса), Австралии (Беверли) и др. В России базально-русловые песчаниковые месторождения урана, расположенные в Зауралье (Далматовский район, Курганская область) и в Северо-Восточном Забайкалье (республика Бурятия, Витимское плато), являются объектами промышленной разработки. Отечественные геологи обычно называют такие месторождения палеорусловыми или палеодолинными.

Типичные примеры месторождений таблитчатого подтипа представлены в Чехии (Страж), Болгарии (Маришское рудное поле), Нигере (Арлит), США (Амброзия Лейк и Солт Ваш). Широко известны так называемые пластово-инфильтрационные, ролловые, месторождения Казахстана (Чу-Сарысульская урановорудная провинция) и США (бассейн Вайоминг и южный Техас). Тектоно-литологические месторождения распространены во Франции (бассейн Лодев) и Нигере (бассейн Францвилль), а связанные с мафическими дайками и силлами имеются в Австралии (Вестморленд) и Канаде (Матосу).

Разработка большинства месторождений урана песчаникового типа ведется экологически наиболее чистым и экономически выгодным способом добычи — скважинное подземное выщелачивание (СПВ). Рентабельность песчаниковых месторождений урана объясняет важность их изучения и востребованность информации об условиях их формирования. Поисковые работы опираются на глубокую изученность “классических” песчаниковых месторождений Притяньшаньской урановорудной мегапровинции отечественными геологами в 60–80 гг. прошлого века (Экзогенные..., 1965; Перельман, 1968; Лисицин, 1975; Гидрогенные..., 1980 и др.).

Значительный и решающий вклад в исследование песчаниковых месторождений урана Средней Азии и создание теоретических основ гидрогенного уранового рудообразования внесли сотрудники Среднеазиатской экспедиции (САЭ) и Экспедиции № 1 ИГЕМ АН СССР, авторы названных выше коллективных основополагающих трудов: А.И. Перельман, Б.И. Омеляненко, А.К. Лисицин, И.А. Кондратьева, Л.Н. Белова, В.И. Данчев, О.И. Зеленова, Г.В. Комарова, Н.П. Стрелянов, С.Г. Батулин и др. Детально изученная эпигенетическая зональность таких месторождений урана позволила рассматривать зоны пластового окисления как основной их поисковый признак. Разработанное А.И. Перельманом учение о геохимических барьерах и выводы об условиях миграции и концентрации урана в условиях гипергенеза (вместе с рядом других химических элементов), приведенное в многочисленных публикациях (1972, 1975, 1977, 1982 и др.), помогает оценить геохимическую среду рудообразования.

Изучению закономерностей размещения урановых руд в Среднеазиатском регионе и доказательству инфильтрационного генезиса месторождений урана посвящена первая обобщающая монография (Экзогенные..., 1965), в составлении которой приняли участие сотрудники ИГЕМА и ВИМСа. Дальнейшее исследование условий формирования инфильтрационных месторождений урана отражено в монографии, подготовленной специалистами ИГЕМ и ВСЕГЕИ (Гидрогенные..., 1980). Разработанная здесь авторским коллективом теория гидрогенного уранового рудообразования лежит в основе всех современных исследований.

Специалистами ВСЕГЕИ во главе с Г.В. Грушевым была доказана высокая перспективность на уран Чу-Сарысуйской депрессии в Южном Казахстане, что активно поддержало становление Притяньшаньской урановорудной мегапровинции. Изучение ураноносных осадочных бассейнов, приуроченных к чехлам платформ (Миронов, Грушевой, 2008), способствует выяснению закономерностей локализации промышленных экзо-

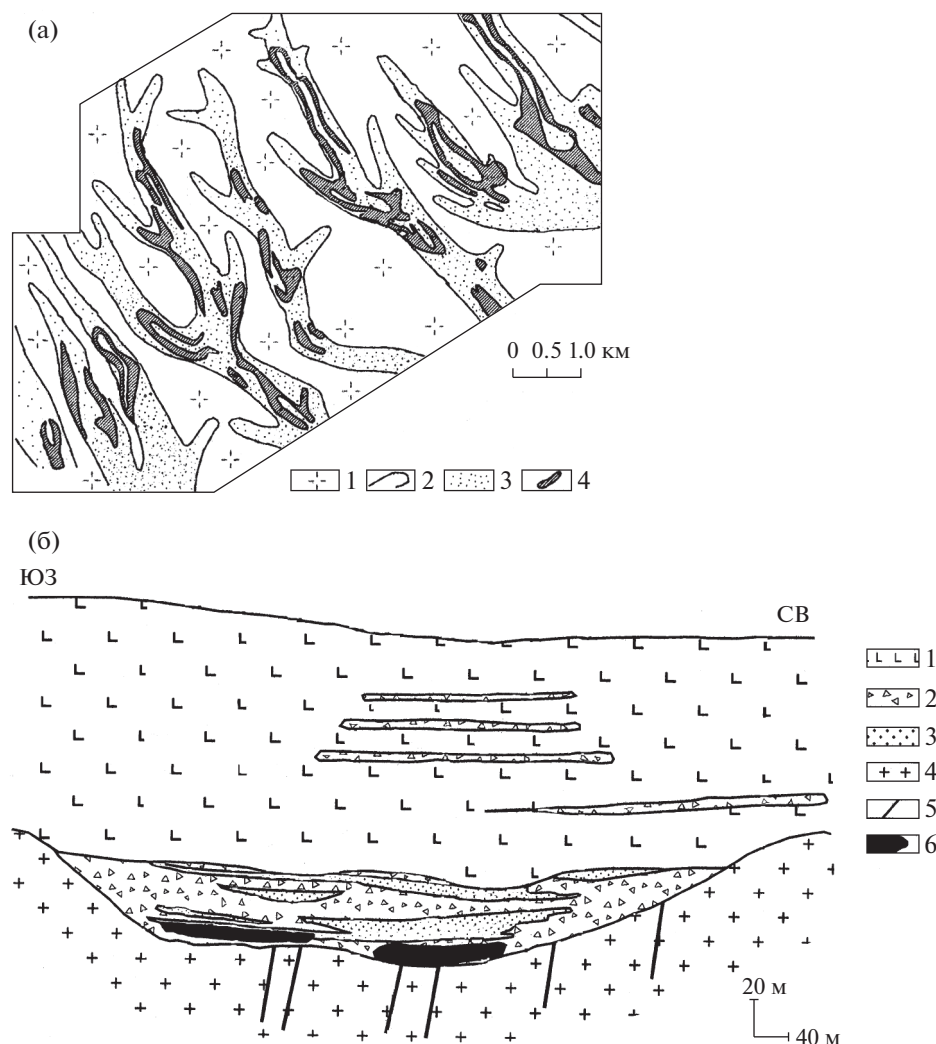
генных урановых месторождений. Совершенствованию теории формирования гидрогенных месторождений по результатам комплексного изучения многочисленных урановых объектов и рудных районов посвящены работы сотрудников ВИМС (Кисляков, Щеточкин, 2000; Печенкин, Кондратьева, 2013; Халезов, 2017, 2018 и др.).

Общие закономерности и условия формирования инфильтрационных месторождений урана рассмотрены в монографии (Кондратьева и др., 2011), где принята типизация пластово-грунтовых месторождений по масштабности порождающих их артезианских бассейнов и палеодолинный тип отнесен к проявлениям малых артезианских бассейнов. Данные по геологии урана, включая песчаниковые месторождения, приведены в монографиях (Машковцев и др., 2010; Тарханов, Бугриева, 2012).

В настоящее время два из трех действующих в России предприятий по добыче урана ведут разработку палеодолинных месторождений песчаникового типа, поэтому объектам такого подтипа далее уделяется наибольшее внимание. Особенности месторождений урана в структурах речных палеодолин рассмотрены в обзорной монографии А.Б. Халезова (2017). Отмечено, что месторождения урана в таких структурах известны во многих странах мира. На территории России палеодолинные месторождения урана известны в Уральском регионе, в пределах южного обрамления Западно-Сибирской низменности. Они “локализованы в эрозионных структурах речных палеодолин мезокайнозойского и палеозойского возраста” и сформированы древними зонами грунтово-пластового окисления. К палеорусловому типу относятся месторождения в Витимском урановорудном районе Забайкалья (фиг. 1). Подобные месторождения известны на Русской платформе в Калмыкии.

Для восполнения минерально-сырьевой базы урана требуется разведка новых песчаниковых месторождений (Бортников и др., 2021). Важные для эффективности поисковых работ знания об условиях формирования песчаниковых урановых руд базируются на выяснении геохимических обстановок концентрирования рудного вещества. Данные об условиях образования отражены в кристаллохимических характеристиках рудных минералов.

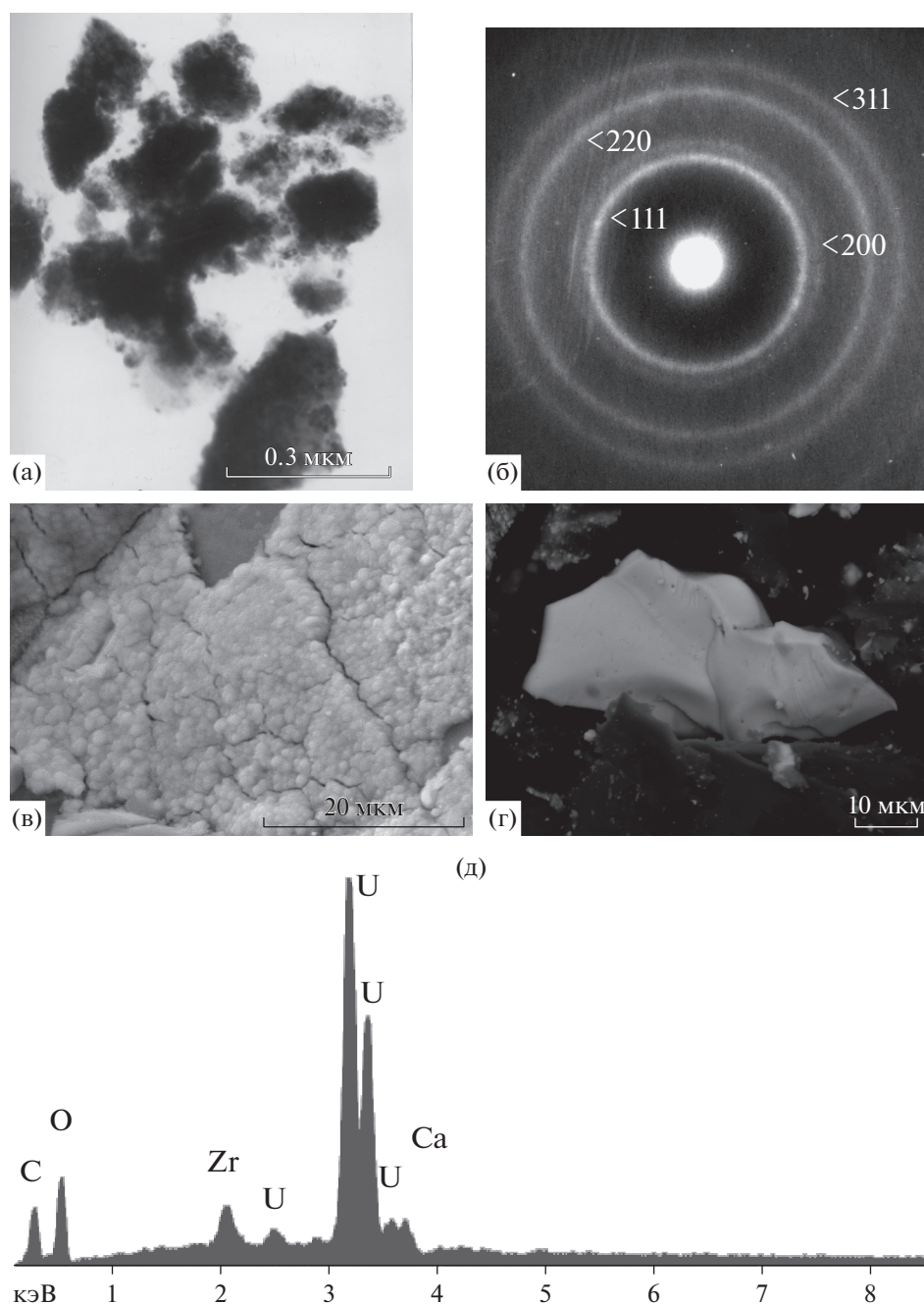
Изучение таких характеристик для урановой минерализации песчаниковых месторождений требует применения локальных методов минералогии по причине высокой дисперсности и микронной размерности рудного вещества. Руды таких месторождений — так называемые урановые черни — это рыхлый темный порошок серого, черного, коричневатого цвета, слабо цементирующий песчаные зерна. Эта порошковая минера-



Фиг. 1. Месторождение Хиагдинское (по Машковцев и др., 2010). а – Геолого-структурный план. 1 – граниты кристаллического фундамента; 2 – палеоврезы в фундаменте; 3 – осадочные породы, выполняющие палеоврезы; 4 – проекция на дневную поверхность рудных залежей. б – Геологический разрез. 1 – базальты, трахибазальты и их туфы; 2 – хлидолиты; 3 – песчаники, алевролиты; 4 – граниты кристаллического фундамента; 5 – тектонические нарушения; 6 – рудные тела.

лизация состоит из микронных образований четырехвалентного урана. Она сложена, по крайней мере, тремя минеральными формами: оксидной (уранинит, настуран), силикатной (коффинит) и фосфатной (нингиоит). Опыт многолетнего изучения рудной минерализации из различных гидrogenных месторождений урана (Дойникова, 2012; Doynikova, 2021) показал, что эффективным методом диагностики и кристаллохимического изучения дисперсного урановорудного вещества этих рыхлых руд является аналитическая электронная микроскопия (АЭМ). На результаты исследования руд методами АЭМ опираются публикации последних десятилетий по изучению палеодолинных месторождений урана на территории России (Дойникова и др., 2014, 2018, 2020; Тарханова и др., 2014, 2017; Халезов, 2017, 2018 и др.).

Локальными методами АЭМ установлено, что черневая минерализация урана, которой сложены руды в осадочных толщах, имеет полиминеральный характер (фиг. 2–4): в составе в разных пропорциях могут присутствовать уранинит (настуран), коффинит и нингиоит (Дойникова и др., 2003). С конца 1970-х гг. до настоящего времени продолжают наши находки малоизвестного ранее Ca-U^{4+} -фосфата нингиоита в составе урановых черневых руд. К 2000-м годам стало очевидно, что месторождения с черневыми рудами фосфатного состава (нингиоитовые) представляют новый минеральный тип промышленных урановых руд. Литературный обзор (Дойникова, 2007) показал, что мононингиоитовый состав руд характерен для базально-русловых (палеорусловых) месторождений песчаникового типа: Нингио-

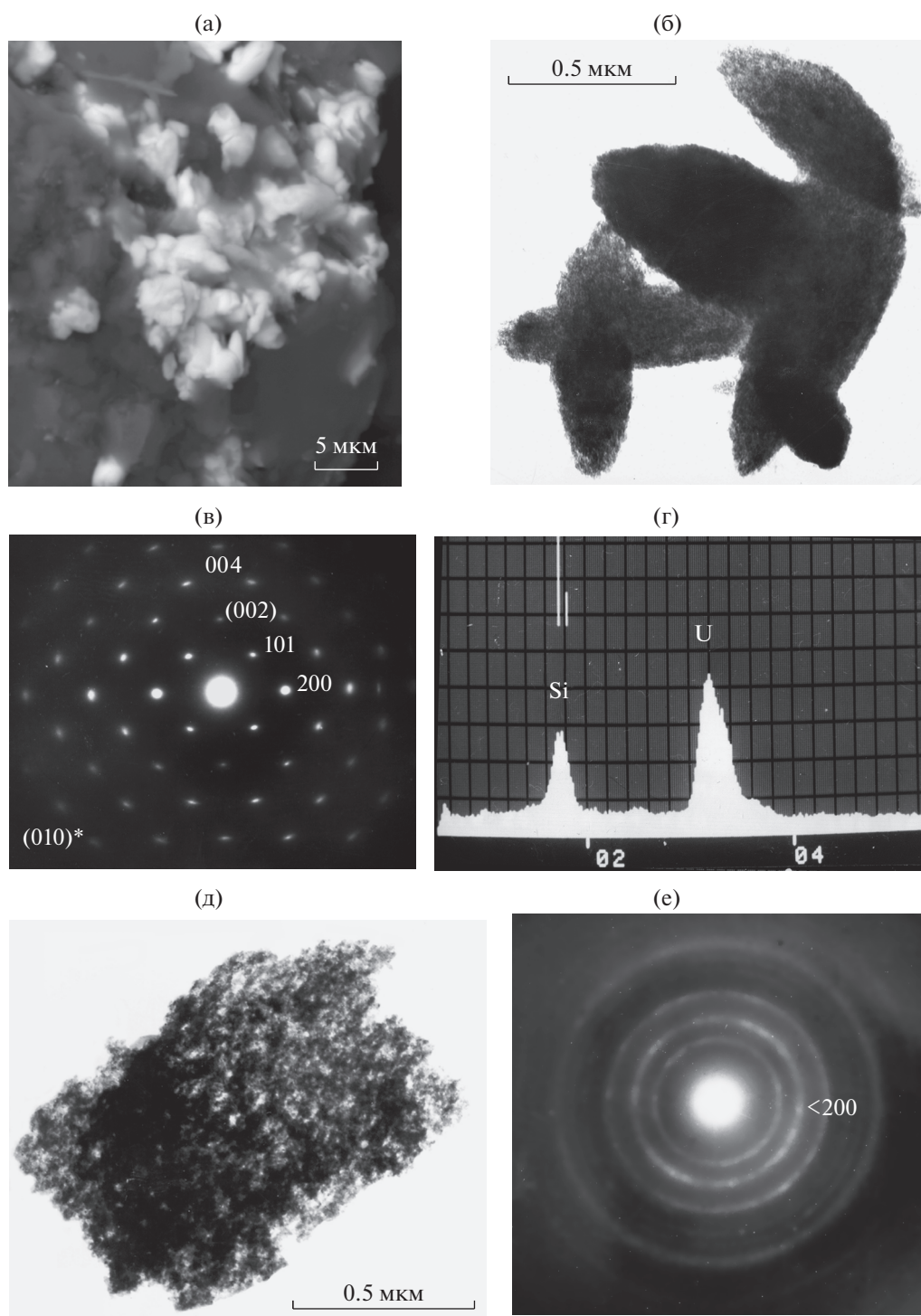


Фиг. 2. Уранинит: а — частицы оксида урана в суспензионном препарате (ПЭМ), б — кольцевая электронограмма SAED; в — корочка на частице песка, г — стекловидный обломок в песке (СЭМ), д — спектр его состава.

Тогэ (Япония); Близзард, Тайи (Канада); Момино, Хасково (Болгария); группа месторождений Хиагдинского рудного поля (ХРП) в России.

Долгое время оставался недостаточно выясненным вопрос об источнике фосфора в составе нингиюита, несмотря на широкую изученность этого фосфата в отечественных исследованиях. Выяснить этот вопрос помог обзор современных литературных данных по экологической (environmental) минералогии и геомикробиологии, связан-

ных с решением экологических проблем (Дойникова, 2017). Проведенный анализ публикаций эколого-биохимического и микробиологического профиля позволяет с новой “биогенной” точки зрения посмотреть на условия формирования черневой урановой минерализации. Эти взгляды лежат в основе настоящей статьи, а выводы позволяют обобщенно говорить о биогенной природе формирования урановых руд на инфильтрационных месторождениях песчаникового типа.

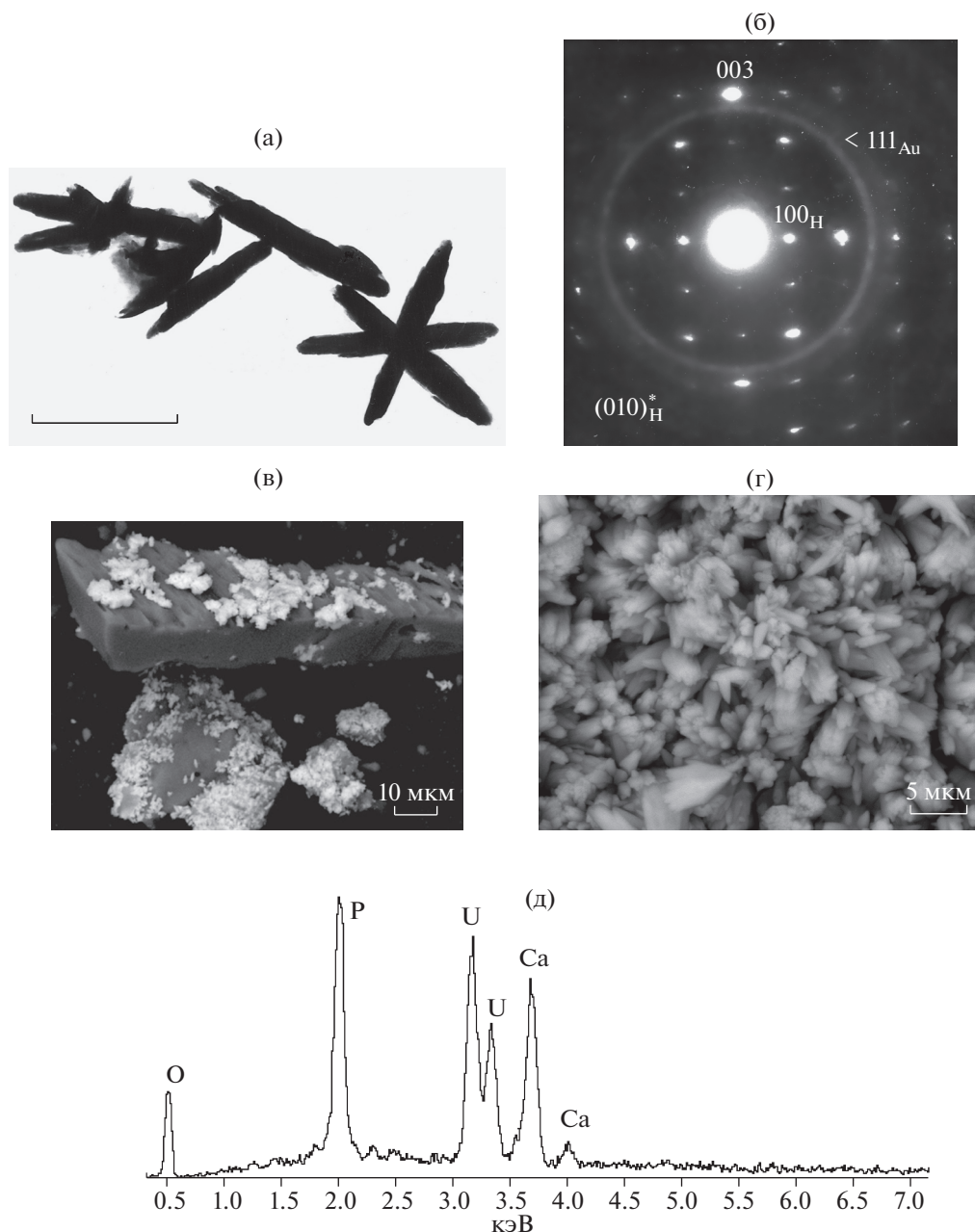


Фиг. 3. Коффинит: а – кристаллы силиката урана в песке (СЭМ); б – сростки кристаллов (ПЭМ) и характерная точечная электронограмма (v); г – спектр состава; д – частица в суспензионном препарате и кольцевая электронограмма (е).

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ПАЛЕОРУСЛОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

Месторождения палеодолинного (палеоруслового) подтипа характеризуются, как правило, не-

большими запасами. Их эксплуатация рентабельна благодаря применению эффективного способа добычи СПВ, что позволяет отрабатывать разобщенные рудные залежи и тела с низкими содержаниями урана, часто образующие целые рудные районы с общими ресурсами до 50–100 тыс. т ура-



Фиг. 4. Нингиоит: а — кристаллы фосфата урана в суспензионном препарате (ПЭМ), б — характерная точечная электронограмма (кольцевые рефлексы — эталон Au); в, г — корочки из кристаллов на зернах песка; д — спектр состава (СЭМ).

на. Попутно с ураном могут добываться и другие полезные компоненты, которые нередко присутствуют в значительных количествах — рений, скандий, иттрий и другие элементы (Халезов, 2017).

Разработку палеодолинных месторождений песчаного типа в России производит урановый холдинг “Атомредметзолото” (АРМЗ), горнодобывающее подразделение госкорпорации “Росатом”. Эксплуатация песчаных месторождений урана

ведется добывающими компаниями “Далур” и “Хиагда” холдинга АРМЗ с использованием экологических методов СПВ.

Компания “Далур” ведет промышленную эксплуатацию и разработку месторождений Зауральского урановорудного района, в который входят месторождения юго-западного обрамления Западно-Сибирской плиты. Общая сырьевая база рудного района оценивается в 18.5 тыс. т урана. Запасы основных отрабатываемых месторожде-

ний, по данным (Машковцев и др., 2010): Далматовское (12000 т), Хохловское (11000 т) и Добровольное (8000 т).

Наиболее крупное Далматовское месторождение разрабатывается с 80-х гг. (~45 т в год). На сравнимом с ним по масштабам месторождении Добровольное в настоящее время завершены геологоразведочные работы, обустроен опытно-промышленный участок СПВ и начата отработка. Общая протяженность здесь уранового оруденения (лентовидные рудные тела) около 18 км. На Хохловском месторождении с 2015 г. эксплуатируется локальный сорбционный участок и в настоящее время отрабатываются Центральная и Западная залежи. Летом 2021 года началось вскрытие Восточной залежи месторождения, что позволит увеличить объем добычи на 15%. Также планируется освоение Дальневосточной залежи. Как следует из годового отчета ГК “Росатом”, отработка залежей Хохловского месторождения позволит сохранить общий объем добычи урана на уровне 585 тонн урана (данные на 2020 год). Здесь планируется добывать основной объем урана, и мощности компании “Далур” планируется перебазировать с Далматовского месторождения на Хохловское. Кроме того, в Мариинском районе Зауралья известны небольшие месторождения и рудопроявления такого же типа: Малиновское, Новое, Пригородное, Ледяшевское и др. (Тарасов и др., 2018).

Компания “Хиагда” ведет промышленную эксплуатацию и разведку урановых месторождений Витимского рудного района на северо-востоке Забайкалья (Республика Бурятия). Основная ресурсная база — Хиагдинское рудное поле (ХРП). Это 8 разведанных палеодолинных месторождений в районе р. Витим: Дыбын, Намару, Коретконде, Тетрах, Хиагда, Вершинное, Источное, Количикан. Из этой группы месторождений, открытых в 80-е годы XX века, первым изучалось месторождение Хиагда. По его имени в дальнейшем было названо все рудное поле с суммарными запасами около 48 тыс. т урана. Все месторождения ХРП приурочены к отложениям захороненных речных палеодолин неогенового возраста, врезанных в кристаллический фундамент.

В настоящее время отрабатываются месторождения Хиагдинское (10.8 тыс. т) и Источное (>2 тыс. т), готово к освоению Вершинное (>4.6 тыс. т). В 2021 г. начато промышленное освоение месторождения Количиканское, на очереди Дыбынское. В перспективе предполагается освоение Намаруского, Кореткондинского и Тетрахского месторождений. По данным годовых отчетов ГК “Росатом”, на плановые показатели добычи 1000 т “Хиагда” вышла с 2019 года (1.021 тыс. т в 2020 г.).

Эта компания первой в России стала уранодобывающим предприятием, применяющим цифровые технологии. Здесь внедрена технология эксплуатации с использованием системы “умного полигона” — интеллектуального управления добычей на всем производственном цикле. На базе комплексной геологической информации создана исходная 3D-модель месторождения Источное. Планируется, что Дыбынское станет первым урановым месторождением в России, полностью переведенным на цифровые технологии.

В северной и южной частях Витимского рудного района, за пределами ХРП, расположено еще несколько небольших песчаниковых урановых месторождений и рудопроявлений палеоруслового типа (Джилдинское и др.). В настоящее время геологоразведочные работы ведутся в северной части региона. На территории России (Республика Калмыкия) в миоценовых палеодолинных отложениях р. Дон известно также песчаниковое базально-русловое месторождение Балковское (запасы 15000 т) (Машковцев и др., 2010).

ФОСФАТНЫЙ СОСТАВ ЧЕРНЕВЫХ УРАНОВЫХ РУД — ПОКАЗАТЕЛЬ ИХ БИОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Преобладающим рудным минералом фосфатно-черневых урановых руд, характерных для палеорусловых месторождений, является дисперсный фосфат нингиоит. В рудах этот минерал представлен кристаллами (размеры $n \times$ мкм) и/или колломорфными массами ($n \times 10$ мкм) (Дойникова и др., 2014). Присутствие озерно-болотных отложений в осадочных толщах, вмещающих нингиоитовые руды, является характерной особенностью таких месторождений (Дойникова, 2007, 2012). В песчаниковых месторождениях урана пластовой/грунтовой инфильтрации в составе руд, кроме нингиоита, в подчиненном количестве присутствует коффинит и аморфный уранинит. Таков, например, состав промышленных вторичных руд Грачевского рудного поля (Косачинское), руд стратиформных месторождений Чешско-Богемского массива, рудных тел в туфогенно-осадочных толщах Болгарии (Навысен, Марица) и др.

Опираясь на типы концентрирования химических элементов на геохимических барьерах (по А.И. Перельману), исходя из кристаллохимических данных нингиоита и коффинита, был установлен близонейтральный характер pH растворов и преобладание глеевой (без H_2S) обстановки при образовании этих U^{4+} -минералов (Дойникова, 2003). Глеевый характер рудообразующей среды указывает на ее органическую природу, предполагая подвижность U^{4+} в виде органических комплексов. Активная роль H^+ при кристаллизации

Са—U⁴⁺-фосфата нингиоита следовала из анализа возможных изоморфных замещений в его структуре. К рассмотрению условий образования нингиоита привлечены геомикробиологические данные из работ, связанных с биорекультивацией.

Вопрос об источнике фосфора при его образовании долгое время оставался открытым. Его решение привело к рассмотрению с новой точки зрения условий образования рудной U⁴⁺-минерализации в целом (Дойникова, 2016, 2017). Выяснить источник фосфора помогли данные геомикробиологии, связанные с проблемами биорекультивации, а именно очистки приповерхностной среды путем бактериальной фиксации радионуклидов (в том числе U). Обзор публикаций по удалению радионуклидного загрязнения в почвах, осадках и грунтовых водах (Lovley et al., 1991; Khijniak et al., 2005; Suzuki et al., 2005; Sivaswamy et al., 2011; Li et al., 2019; Stetten et al., 2020) выявил биогенную природу фосфатного комплекса в природных водах. Анализ литературы показал решающую роль бактерий в осаждении урана и других радионуклидов, а также в создании восстановительной глеевой среды, необходимой для образования U⁴⁺-минералов.

Бактериальное восстановление урана (Behrends, Cappellen, 2005; Cerrato et al., 2013) демонстрирует, что образование U⁴⁺-минералов (уранинит, нингиоит) в природных водах, насыщенных органическим веществом, вызвано деятельностью микроорганизмов. На примере урана микробиологические эксперименты показали, что разложение растительных остатков всегда сопровождается бактериальным восстановлением U⁶⁺, обеспечивая подвижность урана U⁴⁺ в виде органических комплексов и коллоидов. Это биологически обусловленное осаждение радионуклидов всегда связано с микробным высвобождением PO₄³⁻ из клеток микроорганизмов. При этом источником фосфора в природных растворах являются растительные клетки, а именно — продукты бактериальной переработки разнообразных P-содержащих органических соединений в этих клетках (Suzuki et al., 2005; Sivaswamy et al., 2011).

Причина повышенной активности фосфатного иона, долгое время остававшаяся невыясненной, на сегодняшний день объясняется механизмом бактериальной переработки флоры в рудовмещающих толщах в результате жизнедеятельности микробного сообщества (микробиома). Насыщение водной среды кальцием (минералообразующий для нингиоита) обеспечивается его легким выветриванием из пепла (вулканогенно-осадочных толщ) в гумидных ландшафтах, согласно данным (Перельман, Касимов, 1999). Накоплению фосфат-ионов в водонасыщенных осадочных толщах способствует присутствие озерно-болотных отложений, ко-

торые являются средой с высокой биологической активностью (там же). Они насыщены захороненным гумусовым и сапропелевым органическим веществом (фитопланктон), что обеспечивает водную среду продуктами разрушения органических клеток (гуминовые кислоты, фульвокислоты, аминокислоты). Постоянное присутствие в толщах с нингиоитовыми рудами биологически активных отложений (илистых, лагунных, дельтовых, озерно-болотных) поддерживает заключение о биогенном факторе как основном, задающем происхождение фосфатно-черневых урановых руд.

По данным (Слободкин, 2008), при термinalном (окончательном) разрушении органического вещества в иловых отложениях (заиленных грунтах) сульфатредукция является доминирующим анаэробным процессом. Бактерии-сульфатредукторы обитают в донных морских осадках или в пресноводных водоемах, богатых разлагающейся органикой. Это объясняет тесную ассоциацию как нингиоита, так и других рудных U⁴⁺-минералов с пиритом в толщах с органическим материалом, также становятся более понятными процессы образования здесь сульфидов.

Лабораторные эксперименты по восстановлению U⁶⁺ в восстановительных для железа условиях (Behrends, Cappellen, 2005) показали, что к восстановлению урана способно множество сульфат- и металл-редуцирующих бактерий. В процессах термофильной (50–70°C) железоредукции (Слободкин, 2008) восстановление урана показало, что микроорганизмы для получения энергии роста способны использовать в качестве акцептора электронов уранильный минерал. При внеклеточном (ферментативном) восстановлении U⁶⁺ до U⁴⁺ в результате роста бактерий образуется осадок нингиоита (Khijniak et al., 2005). Этот фосфат рассматривается как более обычный продукт восстановления, чем уранинит. В близповерхностных условиях он может быть доминирующим продуктом микробного восстановления урана (Bernier-Latmani et al., 2010).

Таким образом, при выяснении источника фосфора для уранового рудообразования стали очевидны “геологические” результаты жизнедеятельности сообщества микроорганизмов, присутствующих в осадочных рудовмещающих толщах. Процессы микробной жизнедеятельности задают насыщение пластовых вод фосфатными комплексами, создают восстановительную глеевую среду, обеспечивая при этом восстановление урана, его миграцию (в виде органических комплексов и коллоидов) и осаждение различных его минеральных форм.

Нингиоит осаждается и кристаллизуется из природных растворов, поэтому называть биогенным сам минерал будет неправильно. Биогенной является только среда, несущая минералообразующие компоненты (U, Ca, PO₄). Биогенным являет-

ся также источник фосфора — органическое вещество растительных остатков в осадочных толщах. При рассмотрении биогенной природы нингиоита нами обсуждаются только особенности формирования среды, необходимой для его образования.

БИОГЕННЫЙ АСПЕКТ УРАНОВОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ В ЗОНЕ ГИПЕРГЕНЕЗА

Все три минеральные формы четырехвалентного урана — оксидная, силикатная и фосфатная, ассоциирующие в составе черневых урановых руд (в различных пропорциях), образованы в сходной геохимической среде минералообразования. Опираясь на основы геохимии — учение А.И. Перельмана о миграции элементов в биосфере и законы миграции урана в гипергенных условиях — ранее была установлена глеевая среда образования коффинита и нингиоита (Дойникова, 2003). Глеевые условия осаждения урана показывают и многочисленные эксперименты микробиологов при осаждении из природных растворов урана в оксидной (настуран) и фосфатной (нингиоит) формах. Подробнее рассмотрим дальше роль микробного сообщества водонасыщенных осадочных толщ в геологических процессах, формирующих черневые урановые (U^{4+}) руды песчаниковых месторождений урана.

Черневые урановые руды в осадочных толщах формируются в зоне действия гипергенных процессов (в биосфере Земли), поэтому рассмотрение вопроса их генезиса невозможно без привлечения данных А.И. Перельмана по геохимии урана в зоне гипергенеза, без введенных им понятий “геохимический барьер” и “подвижность” элементов. В его геохимической классификации элементов по особенностям их миграции в ландшафтах и биосфере Земли элементы разделены на воздушные и водные мигранты, а также рассмотрено поведение каждого из них (Перельман, 1972, 1975). В работе (Перельман, Касимов, 1999) отмечено, что “организмы выступают в качестве важнейшего фактора миграции элементов, определяющего всю геохимию земной коры — формирование кислородной атмосферы, образование известняков, гранитов и других горных пород”.

А.И. Перельман сформулировал закон о подвижности элементов в биосфере и предложил называть его законом В.И. Вернадского, поскольку именно в его работах был показан суммарный эффект деятельности живого вещества за геологическую историю. “Миграция химических элементов в биосфере осуществляется при непосредственном участии живого вещества (биогенная миграция), или протекает в среде, геохимические особенности которой (O_2 , CO_2 , H_2S и т.д.) обусловлены живым веществом — тем, что в настоящее время населяет биосферу, и тем, что дей-

ствовало на Земле в течение всей геологической истории” (Перельман, Касимов, 1999, стр. 101). Формирование черневых U^{4+} -руд в условиях гипергенеза — это наглядное проявление закона В.И. Вернадского о прохождении всех химических реакций биосферы в среде, созданной живыми организмами.

К настоящему времени микроорганизмы найдены на глубинах $n \times 100 - n \times 1000$ м от земной поверхности, установлено их активное участие практически во всех геологических процессах, формирующих осадочный чехол. Геологическую роль живого вещества можно представить по месторождениям угля, нефти, карбонатных пород. За последние десятилетия показана ключевая роль микробиологического (бактериального) фактора в формировании ряда месторождений железа, марганца, золота, меди (Марков, 2015; Zammit et al., 2015). Изучение рудных минералов (уранинита, коффинита) из песчаниковых месторождений урана показало, что эти минералы осаждены именно микроорганизмами, а бактериальное восстановление урана при образовании коффинита может являться первичным рудоформирующим процессом (Min et al., 2005; Cai et al., 2007; Wülser et al., 2011).

Современная микробиология рассматривает микробное сообщество как систему взаимодействующих между собой разнообразных, функционально разнородных организмов (Заварзин, Колотилова, 2001; Заварзин, 2003). Анаэробная среда рассматривается как трофическая структура микробиома (когда энергия и вещество одних организмов потребляются другими организмами). Существует единство микробного сообщества в экосистеме.

Анаэробная восстановительная обстановка в осадочных толщах возникает как результат суммарного действия микробиологических процессов (Кораго, 1992). Как следствие, в водоносных горизонтах осадочных отложений зона окисления является неотъемлемой частью структуры рудообразующего барьера. В осадочных толщах анаэробное окисление органического вещества неразрывно связано с предшествующими аэробными процессами, создавая благоприятную (питательную) среду для размножения анаэробных микроорганизмов, продолжающих окисление органики. В пространстве роллового фронта аэробные и анаэробные микроорганизмы существуют совместно.

Эти факты объясняют установленную геологами рудоконтролирующую зональность, характерную для инфильтрационных (в т.ч. палеодолинных) песчаниковых месторождений урана: “закономерное сосуществование двух основных зон: окислительной и восстановительной (сульфидной или глеевой)” (Кондратьева и др., 2011). В монографии отмечено, что такая зональность является “наиболее общей закономерностью ура-

нового рудообразования, протекающего под воздействием кислородсодержащих инфильтрационных (грунтовых, пластовых, трещинных) вод”. В основу выделения зон положены преобладающие формы железа, как “индикатора гидрогеохимической обстановки”. Для описания полной зональности в рудовмещающих пластах авторами используется термин “окислительная эпигенетическая”. Обстановка, восстановительная для урана (и др. рудных элементов), называется авторами зоной “биохимического окисления органических веществ”. Такая формулировка, правильная по сути происходящих процессов, не отражает (маскирует) существование здесь области восстановительных преобразований пород. Для геологического рассмотрения полной зональности целесообразно применять термин “окислительно-восстановительная” (redox), что подчеркивает единство сосуществующих геохимических зон в рудовмещающих пластах. Как закономерный компонент рудоносных отложений авторы монографии обоснованно рассматривают углистое вещество (детрит и органические вещества углистого ряда), а также битумы и их производные.

В работе (Виниченко, 2004) деятельность аэробно-анаэробного бактериального сообщества рассматривается как причина формирования урановых руд в осадочных толщах на “окислительно-восстановительном” (redox) барьере. Предполагается, что именно аэробные бактерии, окисляя органическое вещество, продуцируют обилие органических кислот и таким образом обеспечивают возникновение восстановительной среды, создавая (подготавливая) условия для жизнедеятельности анаэробов. Такое рассмотрение полностью охватывает динамику развития рудоформирующего redox барьера, осадительного для урана.

Поскольку водоносные горизонты являются биокосной системой биосферы (Перельман, 1982), закон В.И. Вернадского применим для подавляющей части минеральных форм четырехвалентного урана, формирующихся в условиях гипергенеза, где биогенная миграция U^{4+} связана с органическими производными биосферы. Микрообноактивный органический материал и микроорганизмы в рудовмещающих толщах обеспечивают также образование коллоидных растворов в рудовмещающей толще, способствуя миграции урана (и фосфора). Коллоидная миграция урана U^{4+} характерна для природных вод зоны гипергенеза, богатых высокомолекулярными гумусовыми веществами (Перельман, Касимов, 1999), что показано для ряда природных объектов (Malkovsky, 2011; Priyadarshini et al., 2014; Wang et al., 2014).

Известно, что урановые руды в осадочных толщах формируются в восстановительных условиях из кислородсодержащих ураноносных пластовых/грунтовых вод за счет восстановления ше-

стивалентного урана и осаждения его на восстановительном геохимическом барьере (Гидрогенные..., 1980), который существует на фронте деятельности окислительно-восстановительных процессов выветривания. В “классических гипергенных системах” ролловые залежи урана рассматриваются как результат латерального развития гипергенных процессов от аэробного выветривания до анаэробного обогащения, принимая микробную деятельность как несомненный стимул (некий триггер) для процессов выветривания (Erlach, Newman, 2008; Zammit, 2015).

Следует отметить, что впервые важная роль микроорганизмов в образовании восстановительных геохимических барьеров, локализирующих накопление урана, была выявлена А.К. Лисициным (1967). Им сделан вывод, что пирит на выклинивании зон пластового окисления не может быть причиной осаждения урана (Лисицин, 1962). Современными работами подтверждаются выводы А.К. Лисицина о бактериальной природе высокого восстановительного потенциала, осаждающего уран, о связи значительной части урана с растворенным органическим веществом. В те же годы лабораторные эксперименты (Германов, Пантелеев, 1968) показали, что большая часть кислорода пластовых вод поглощается биохимическим путем, образуя уранорганические соединения, которые разрушаются в анаэробной среде при участии микроорганизмов, осаждая уран.

Однако в последующих работах вплоть до настоящего времени роль бактерий и микроводорослей в рудовмещающих пластах рассматривается как “вспомогательная”, каталитическая, а приоритет в осаждении урана отдается процессам сугубо геохимическим. В публикациях по геохимии пластовых месторождений урана, если и отмечается участие микроорганизмов, то как главные агенты, осаждающие уран, рассматриваются различные анаэробные бактерии, а роль аэробной микробиоты практически остается незаметной.

Каталитическая роль микроорганизмов в процессах гидрогенного уранового рудообразования подтверждена экспериментами по бактериальной иммобилизации урана. Эти работы детализируют ферментативный характер восстановительного преобразования уранил-ионов в водных растворах. В обзорной работе по микробной иммобилизации урана (Sivaswamy et al., 2011) показано возможное осаждение урана как в окисленной (уранильной) форме, так и в форме U^{4+} -минералов (оксид, фосфат). Фиксация урана часто происходит в виде фосфатов, реже — уранинита. Часто отмечается поверхностная бактериальная сорбция урана. Дисперсные минеральные формы микробially восстановленного урана определяются локальными методами (EXAFS, HRTEM, XRD, EDS-VDS-анализ и др.). Наряду с уранинитом и

нингитоном диагностирована некристаллическая “неминеральная” форма урана U^{4+} – наноразмерные “биогенные частицы” UO_2 (Singer et al., 2009; Morin et al., 2016). Биогенный уранинит отмечен во многих работах микробиологического и эколого-биохимического профиля (Cerrato et al., 2013; и др.).

С учетом вышесказанного, механизм формирования рудной U^{4+} -минерализации представляется следующим. Среда образования U^{4+} -минералов возникает локально на границе redox-условий в среде, подготовленной аэробами, т.е. в восстановительной зоне биогеохимического redox-барьера, в зоне “биохимического окисления органических веществ” по (Кондратьева и др., 2011). Развитие бактериальной среды в результате жизнедеятельности микробиома в водонасыщенных осадочных пластах (когда анаэробы начинают преобладать над аэробами) ведет к осаждению восстановленных форм урана U^{4+} в виде наноразмерных “биогенных” частиц на поверхности зерен песка (Singer et al., 2009; Lezama-Pacheco et al., 2015). Продолжение жизнедеятельности микробного сообщества в среде рудообразования (восстановительная зона redox-границы) ведет к дальнейшему накоплению U^{4+} с образованием его минеральных форм, создавая межзерновую (цементирующую) массу. Это подтверждается геологическими наблюдениями: все образцы черневых руд демонстрируют цементирующий характер дисперсной урановой минерализации.

Продолжающийся рост аэробных бактерий (за счет разложения детрита) создает питательную среду для сосуществующих в пространстве барьера анаэробов. Вероятно, так обеспечивается продвижение зоны восстановления (обогащенной анаэробами) по осадочным толщам в направлении водной фильтрации. В работе (Дойникова, 2016) предполагается, что продвижение такого биогеохимического redox-барьера происходит по мере расходования питательной базы бактериального сообщества. При этом широко известное геологам затухание деятельности анаэробов, установленное за границей рудоотложения (Лисицин, 1975; Гидрогенные..., 1980; Кисляков, Щеточкин, 2000), происходит в результате расходования питательных веществ, подготовленных аэробами. Микронная размерность U^{4+} -минералов черневых руд рассматривается как следствие подвижности среды минералообразования, поскольку эта среда (восстановительная зона redox-барьера) перемещается вместе с ролловым фронтом. Факт подвижности роллового фронта в инфильтрационных песчаниковых месторождениях урана в настоящее время признается всеми геологами.

Правомерность обобщения условий формирования урановых руд в песчаниковых толщах (независимо от состава руд) поддерживается и

характерной ролловой формой рудных тел, что подчеркивает общность закономерностей рудоотложения урана в области гипергенеза.

О причинах различия черневых руд в песчаниковых месторождениях урана

Рассматривая биогенный аспект черневого рудообразования, причины образования конкретной минеральной формы U^{4+} (оксидной, силикатной, фосфатной) следует искать, очевидно, в особенностях микробиологических процессов и миграции элементов в гипергенных условиях.

При рассмотрении биогенной миграции А.И. Перельман выбрал за основу процессы, общие для всех частей биосферы – разложение органических веществ (Перельман, Касимов, 1999). В ландшафтоведении известно, что аридные и гумидные условия отличаются накоплением мортмассы (массы мертвого органического вещества в экосистеме). Запасы мортмассы в аридных областях всегда меньше запасов накопленной здесь же фитомассы. В гумидных областях мортмасса преобладает над фитомассой. Предварительно переработанное, окисленное аэробами органическое вещество (питательная среда анаэробов), вероятно, следует соотносить с мортмассой в рудовмещающих толщах. Климат является важнейшим внешним фактором гипергенных процессов, формирующих в том числе и песчаниковые месторождения урана.

Различие климатических условий осадконакопления и дальнейшего формирования рудных толщ рассматриваются здесь как причина формирования различного состава черневых урановых руд. Согласно учению А.И. Перельмана (1968, 1999): повышенное поступление в раствор фосфат-ионов характерно для гумидного климата; климат как внешний фактор гипергенных процессов, ответственных за формирование черневых урановых руд, определяет биогеохимическую специфику минералообразования.

Причиной появления именно фосфатной U^{4+} -минерализации представляется насыщенность рудоносных толщ растительными остатками (палеорусловой аллювий) или продуктами их микробного преобразования – гумусом. Так, фосфатные урановые руды палеодолинных месторождений ХРП сформированы в аллювиальных отложениях в условиях умеренно теплого и влажного климата (Кочкин и др., 2017). Крупные ролловые песчаниковые месторождения Притяньшаньской мегапровинции (Чу-Сарысуйский тип) с окисдно-силикатными урановыми рудами приурочены к областям аридного климата и сформированы в отложениях прибрежного морского бассейна (Uranium..., 2016). Обусловленное климатом, преобладание растительного детрита в палеорусловых отло-

жениях Витимского плато обеспечило преобладающее образование фосфатной U^{4+} -минерализации, в отличие от настуран-коффинитовых урановых руд Средней Азии.

Различие состава черневых урановых руд среди однотипных палеодолинных месторождений рассматривается как результат воздействия внешнего “около-климатического” фактора. Сравним, например, фосфатные руды ХРП и настуран-коффинитовые в Зауралье (Далматовское, Хохловское и др.). Такое различие состава сложилось, вероятно, благодаря внешнему значительному термическому воздействию — региональному прогреву рудовмещающих Витимских толщ мощными покровными базальтами. Прогрев активизировал жизнедеятельность бактериального сообщества в осадочных толщах, что привело к более глубокой терминальной переработке биомассы и повышенной активности фосфат-ионов в рудообразующей водной среде.

ОБСУЖДЕНИЕ

Современные геомикробиологические исследования показывают высвобождение широкого круга металлов в процессах биовыщелачивания, что наглядно демонстрирует важную роль микроорганизмов в формировании различных гипергенных месторождений (Southam, Sanders, 2005; Zammit et al., 2015; Labrado et al., 2019). Заключение этих авторов: микробно катализируемые redox-процессы перераспределения металлов в земной коре могут произвести значительное, часто экономически значимое, обогащение металлом.

Из рассмотрения биогенного аспекта формирования черневых урановых руд (на примере нингиюита) следует, что осадительные условия для урановых черневых руд, как и подвижность урана, обеспечиваются жизнедеятельностью микробиома в осадочных толщах. При этом продвижение роллового фронта, заданное гидродинамическим градиентом, осуществляется в результате совокупной деятельности сообщества микроорганизмов (аэробов и анаэробов). Рыхлый характер черневых урановых руд и микронные размеры рудных минералов косвенно подтверждают участие микроорганизмов в процессах рудообразования.

В инфильтрационных месторождениях урана органические остатки, содержащиеся во вмещающих осадочных толщах, всегда обеспечивают питательную среду для микробов. Во всех случаях оруденения аллювиальных отложений (палеодолинных, палеорусловых) фиксируется обогащение углефицированными растительными остатками. Так, например, содержание C_{org} достигает 7% в рудных толщах палеодолинного месторождения Семизбай на юге Западно-Сибирской плиты (Кондратьева и др., 2011), а в породах ХРП C_{org}

может достигать 15% в отдельных прослоях (Тарасов и др., 2018). Сама природа накопления осадочных толщ обеспечивает наличие восстановительных агентов, которые при фильтрации кислотных ураноносных растворов могут формировать рудообразующий осадительный барьер.

Рассматривая в целом процесс уранового рудообразования в зоне гипергенеза, учитывая его биогенный аспект, необходимо оценивать деятельность, как анаэробов, так и тесно связанных с ними аэробных бактерий, активно действующих на начальном этапе окисления органических остатков. Сегодня представляется недостаточно объективным учитывать деятельность исключительно анаэробных микроорганизмов при формировании уранового оруденения. Очевидна необходимость расширить понятие “рудолокализирующий барьер”, так как в его структуру органически входит как восстановительная, так и окислительная зоны.

Становятся более ясными механизм и причины возникновения восстановительной глеевой среды в водонасыщенных (рудовмещающих) осадочных толщах с растительным детритом. Создание такой среды обусловлено жизнедеятельностью микробного аэробно-анаэробного сообщества, порождающего возникновение redox-барьера при разложении растительных остатков. Поэтому микробиом осадочных толщ, наряду с геохимическими характеристиками среды, необходимо рассматривать как важнейший компонент рудообразующих процессов в месторождениях урана песчаникового типа.

Эксперименты по бактериальному восстановлению урана убедительно демонстрируют, что образование черневых урановых руд, т.е. черневой U^{4+} -минерализации, в природных растворах с органическим веществом вызвано деятельностью микроорганизмов. Современные исследования биогенного осаждения урана в процессах сульфат- и железо-редукции показывают, что рудообразование, сопровождая бактериальную деятельность, может продолжаться до настоящего времени (Iwatsuki et al., 2003; Behrends, Cappellen, 2005; Слободкин, 2008; Suzuki et al., 2016).

В настоящее время микроорганизмы используются для разработки руд методами биогидрометаллургии (Calas et al., 2015 и др.). Так, бактериальное выщелачивание, помимо урана, широко применяется для извлечения меди, цинка, золота и др. Эти вопросы, наряду с применением технологий биорекультивации, начиная с 1980-х гг. активно освещаются с разных сторон в зарубежных публикациях, где находят место минералогические разделы. Это, например, многократное переиздание монографии Geomicrobiology (Erlach, Newman, 2008) и ряд научных журналов (Geomicrobiology Journal; International Journal of Environ-

mental Science & Technology; Biotechnology & Bioengineering; Applied & Environmental Microbiology; Elements; Economic Geology и др.). В этом контексте связанные с активностью бактерий технологии биогидрометаллургии и процессы уранового рудообразования создают широкое поле для сравнительного анализа и практического применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дана новая интерпретация геологической среды рудообразования для месторождений урана песчаникового типа. Предложена гипотеза биогенных процессов, обеспечивающих формирование черневых урановых руд, основанная на факте биогенных источников фосфора (на примере фосфатных руд палеорусловых месторождений урана).

Жизнедеятельность бактериального микробиома в осадочных толщах рассматривается как важнейший фактор, создающий восстановительную геохимическую обстановку, что ведет к восстановлению урана из природных растворов, обеспечивает его подвижность и локализацию в виде дисперсной U^{4+} -минерализации — черневых урановых руд. Бактериальный фактор предлагается как основной механизм возникновения и перемещения окислительно-восстановительного фронта в ходе гипергенных процессов.

Биогенный фактор следует рассматривать как ведущий рудоформирующий при образовании месторождений урана песчаникового типа.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН “Тектонодинамические обстановки и физико-химические условия формирования минеральных систем основных промышленно-генетических типов урановых месторождений”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бортников Н.С., Петров В.А., Машковцев Г.А., Печенкин И.Г. Минерально-сырьевая база атомной отрасли // Академия наук и атомная отрасль. Научные сессии Общего собрания членов РАН и Общих собраний отделений РАН. Декабрь 2020 г. М.: Российская академия наук, 2021. С. 286–306.
- Виниченко П.В. Теория биогенного рудообразования на примере урановых месторождений. Иркутск: Сосновгеология, 2004. 215 с.
- Германов А.И., Пантелеев В.М. Поведение органического вещества в инфильтрационном эпигенезе // Изв. АН СССР. 1968. Сер. геол. № 1. С. 113–120.
- Гидрогенные месторождения урана. Основы теории образования / Ред. Перельман А.И. Авт.: Батулин С.Г., Грушевой Г.В., Зеленова О.И. и др. М.: Атомиздат, 1980. 270 с.
- Дойникова О.А. Генетическая кристаллохимия минеральных компонентов урановой черны // Геохимия. 2003. № 12. С. 1325–1331.
- Дойникова О.А. Месторождения урана с новым типом черневой минерализации: фосфатным // Геология руд. месторождений. 2007. Т. 49. № 1. С. 89–96.
- Дойникова О.А. Минералогия урана восстановительной зоны гипергенеза (по данным электронной микроскопии). М.: Физматлит, 2012. 216 с.
- Дойникова О.А. Фосфатный состав урановых черней как показатель их биогенного генезиса // Геология и разведка. Изв. ВУЗов. 2016. № 5. С. 17–29.
- Дойникова О.А. Биогенный аспект образования урановых черней (проявление закона имени В.И. Вернадского) // Сб. Геохимия ландшафтов. К 100-летию А.И.Перельмана. М.: АПР. 2017. С. 524–543.
- Дойникова О.А., Белова Л.Н., Горшков А.И., Сивцов А.В. Урановая чернь: вопросы генезиса и минерального состава // Геология руд. месторождений. 2003. Т. 45. № 6. С. 514–530.
- Дойникова О.А., Тарасов Н.Н., Карташов П.М. Урановая минерализация палеодолинных месторождений Витима, Россия // Разведка и охрана недр. 2018. № 12. С. 24–30.
- Дойникова О.А., Тарасов Н.Н., Карташов П.М., Петров В.А. Черневые фосфатные урановые руды Витимского плато (Бурятия) // Радиохимия. 2020. Т. 62. № 4. С. 349–358.
- Дойникова О.А., Тарасов Н.Н., Мохов А.В. Новый фосфатный тип урановых руд в России // Доклады РАН. 2014. Т. 457. № 4. С. 1–5.
- Заварзин Г.А., Колотилова Н.Н. Введение в природоведческую микробиологию. М.: Книжный дом “Университет”. 2001. 256 с.
(<http://lib4all.ru/base/B1967/B1967Content.php>)
- Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. М.: Наука, 2003. 348 с.
- Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н. Гидрогенное рудообразование. М.: Геоинформмарк, 2000. 608 с.
- Кондратьева И.А., Печенкин И.Г., Гаврюшов А.В. Условия формирования инфильтрационных месторождений урана и гидрогеохимические методы их изучения // Минеральное сырье. № 24. М.: ВИМС, 2011. 77 с.
- Кораго А.А. Введение в биоминералогия. СПб.: Недра, 1992. 280 с.
- Кочкин Б.Т., Тарасов Н.Н., Андреева О.В., Асадулин Э.Э., Голубев В.Н. Полигенность и полихронность урановой минерализации на месторождениях Хиагдинского рудного поля (Бурятия) // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59. № 2. С. 124–140.
<https://doi.org/10.7868/S0016777017020022>
- Лисицин А.К. О формах нахождения урана в подземных водах и условиях его осаждения в виде UO_2 // Геохимия. 1962. № 9. С. 763–769.
- Лисицин А.К. Гидрогеохимия рудообразования (на примере экзогенных эпигенетических урановых руд). М.: Недра, 1975. 247 с.
- Лисицин А.К., Кузнецова Э.Г. О роли микроорганизмов в образовании восстановительных геохимических барьеров на выклинивании зон пластовой лимонитизации // Изв. АН СССР. 1967. Сер. геол. № 1. С. 31.

- Марков А. Рождение сложности. Эволюционная биология сегодня: неожиданные открытия и новые вопросы. М.: АСТ: CORPUS, 2015. 527 с.
- Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К. и др. Уран Российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.
- Миронов Ю.Б., Грушевой Г.В. Роль новейших геодинамических процессов в формировании гидрогенного уранового оруденения на юге Евразийского континента // Уран Казахстана. Алматы: Казатомпром, 2008. С. 92–98.
- Перельман А.И. Геохимия эпигенетических процессов (зона гипергенеза). М.: Недра, 1968. 331 с.
- Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. 288 с.
- Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа. 2-е изд. 1975. 242с.
- Перельман А.И. Биокосные системы Земли. М.: Наука, 1977. 160 с.
- Перельман А.И. Геохимия природных вод. М.: Наука, 1982. 154 с.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрейя-2000, 1999. 768 с.
- Печенкин И.Г., Кондратьева И.А. Условия формирования инфильтрационных месторождений. Минеральное сырье. Серия методическая, № 12. М.: ВИМС, 2013. 60 с.
- Слободкин А.И. Термофильные железовосстанавливающие прокариоты. Дис. ... докт. наук. 03.00.07. М: Ин-т Микробиологии РАН, 2008. 336 с.
- Тарасов Н.Н., Кочкин Б.Т., Величкин В.И., Дойникова О.А. Урановые месторождения Хиагдинского рудного поля, Бурятия: Условия образования и факторы рудо-контроля // Геология руд. месторождений. 2018. Т. 60. № 4. С. 392–400.
- Тарханов А.В., Бугриева Е.П. Крупнейшие урановые месторождения мира. М.: ВИМС, 2012. 118 с.
- Тарханова Г.А., Дубинчук В.Т., Чистякова Н.И. и др. Особенности минерального состава и условий формирования руд Вершинного месторождения // Разведка и охрана недр. 2014. № 6. С. 7–13.
- Тарханова Г.А., Прохоров Д.А. Генетические особенности формирования уранового оруденения “витимского” типа // Разведка и охрана недр. 2017. № 11. С. 47–59.
- Халезов А.Б. Месторождения урана в речных палеодолинах Уральского региона. Разновидности месторождений типа “несогласия” в фанерозое // Минеральное сырье. № 34. М.: ВИМС, 2017. 194 с.
- Халезов А.Б. Далматовское месторождение урана // Минеральное сырье. № 36. М.: ВИМС, 2018. 130 с.
- Хижняк Т.В. Бактериальная трансформация и иммобилизация тяжелых металлов и радионуклидов. Дис. ... канд. наук: 03.02.03. М.: 2013.
- Экзогенные эпигенетические месторождения урана / Ред. Перельман А.И. Авт.: Батулин С.Г., Головин Е.А., Зеленова О.В., и др. М.: Атомиздат, 1965. 324 с.
- Behrends T., Cappellen P. Competition between enzymatic and abiotic reduction of uranium (VI) under iron reducing conditions // Chemical Geology. 2005. 220. P. 315–327.
- Bernier-Latmani R., Veeramani H., DallaVecchia E. et al. Non-uraninite Products of Microbial U (VI) Reduction // Environ. Sci. Technol. 2010. 44. P. 9456–9462.
- Cai C., Li H., Qin M. et al. // Ore Geol. Rev. 2007. 32. P. 262–274.
- Calas G., McMillan P.F., Bernier-Latmani R. Environmental Mineralogy: New Challenges, New Materials // Elements. 2015. V. 11. P. 247–252.
- Cerrato J.M., Ashner M.N., Alessi D.S. et al. Relative reactivity of biogenic and chemogenic uraninite and biogenic non-cristalline U(IV) // Environ. Sci. Technol. 2013. 47. P. 9756–9763.
- Doynikova O.A. Uranous Mineralogy of Hypergene Reduction Region (Using electron microscopy data). 2021. Springer Mineralogy, 210 p.
- Erlich H.L., Newman D.K. Geomicrobiology (5-th edition). 2008. CRC Press, Boca Ration, 628 p.
- Geological Classification of Uranium Deposits and Description of Selected Examples. IAEA-TECDOC. Series-1842. Vienna, 2018. 415 p.
- Iwatsuki T., Murakami Y., Naganuma T., Hama K. Redox buffer capacity of sedimentary rocks around uranium deposit (Study of water-mineral-microbe system at the Tono uranium deposit, Japan) // Chikyukagaku (Geochemistry). 2003. 37. P. 71–82.
- Khijniak T.V., Slobodkin A.I., Coker V., et al. Reduction of uranium (VI) phosphate during growth of the thermophilic bacterium Thermoterra-bacterium ferrireducens // Appl. Environ. Microbiol. 2005. 71 (10). P. 6423–6426.
- Labrado A.L., Brunner B., Bernasconi S.M. and Peckmann J. Formation of Large Native Sulfur Deposits Does Not Require Molecular Oxygen. Front. Microbiol. 2019. 10:24. doi:10.3389/fmicb.2019.00024
- Lezama-Pacheco J.S., Cerrato J.M., Veeramani H., et al. Long-Term in Situ Oxidation of Biogenic Uraninite in an Alluvial Aquifer: Impact of Dissolved Oxygen and Calcium // Environ. Sci. Technol. 2015. 49. P. 7340–7347. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00949
- Li P., Wu W., Phillips D. H. et al. Uranium sequestration in sediment at an iron-rich contaminated site at Oak Ridge, Tennessee, via bioreduction followed by reoxidation // J. Environ. Sci. 2019. 85, P. 156–167. https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.05.028
- Lovley D.R., Phillips E.J.P., Gorby Y.A., Landa E.R. Microbial reduction of uranium // Nature. 1991. V. 350. P. 413–416.
- Malkovsky V. Theoretical analysis of colloid-facilitated transport of radionuclides by groundwater // Actinide nanoparticles research / Ed. by Kalmykov S.N. and Dennecke M.A. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. P. 195–243.
- Min M., Xu H., Chen J., Fayek M. Evidence of uranium biomineralization in sandstone-hosted roll-front uranium deposits, northwestern China // Ore Geol. Rev. 2005. 26. P. 198–206.
- Morin G., Mangeret A., Othmane G., et al. Mononuclear U(IV) complexes and ningyoite as major uranium species in lake sediments // Geochemical Perspectives Letters. 2016. V. 2. P. 95–105. DOI: . https://doi.org/10.7185/geochemlet.1610
- Priyadarshini N., Sampath M., Shekhar K., et al. Probing Uranium (IV) Hydrolyzed Colloids and Polymers by Light Scattering // J. Nuclear Chemistry. 2014. V. 2. Article ID 232967. https://doi.org/10.1155/2014/232967

- Singer D.M., Farges F., Brown G.E.* Biogenic nanoparticulate UO_2 : Synthesis, characterization, and factors affecting surface reactivity // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2009. 73 (12). P. 3593–3611.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.03.031>
- Sivaswamy V., Boyanov M.I., Peyton B.M. et al.* Multiple Mechanisms of Uranium Immobilization by *Cellulomonas* sp. Strain ES6 // *Biotech. Bioeng.* 2011. 108 (2). P. 264–276.
- Southam G., Sanders J.A.* The geomicrobiology of ore deposits // *Economic Geology*. 2005. 100. P. 1067–1084.
- Stetten L., Lefebvre P., Le P. et al.* Experimental redox transformations of uranium phosphate minerals and mononuclear species in a contaminated wetland // *J. Hazard. Mater.* 2020. 384 (22):121362.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121362>
- Suzuki Y., Kelly S.D., Kemner K.M., Banfield J.F.* Direct microbial reduction and subsequent preservation of uranium in natural near-surface sediment // *Appl. Environ. Microbiol.* 2005. 71 (4). P. 1790–1797.
- Suzuki Y., Mukai H., Ishimura T. et al.* Formation and Geological Sequestration of Uranium Nanoparticles in Deep Granitic Aquifer // *Sci. Rep.* 2016. 6.22701.
[DOI.org/10.1038/srep22701](https://doi.org/10.1038/srep22701)
- Uranium 2016: Resources, Production and Demand. OECD (2016) NEA/IAEA / 7301
- Wang Y., Frutschi M., Bagnoud A. et al.* Geochemical controls on the formation of U(IV)-bearing colloids in a mining-impacted natural wetland // *Goldschmidt Abstracts*. 2014. P. 2647.
- Wülser P.-A., Brugger J., Foden J., Pfeifer H.-R.* The sandstone-hosted Beverley uranium deposit, Lake Frome Basin, South Australia: Mineralogy, geochemistry, and a time-constrained model for its genesis // *Economic Geology*. 2011. 106. P. 835–867.
- Zammit C.M., Shuster J.P., Gagen E.J., Southam G.* The Geomicrobiology of Supergen Metal Deposits // *Elements*. 2015. V. 11. P. 337–342.