

МИНЕРАЛОГИЯ, ПЕТРОГРАФИЯ, ЛИТОЛОГИЯ

ФОСФАТНЫЙ СОСТАВ УРАНОВЫХ ЧЕРНЕЙ
КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ИХ БИОГЕННОГО ГЕНЕЗИСА

О.А. ДОЙНИКОВА

*Институт геологии рудных месторождений, геохимии, минералогии и петрографии (ИГЕМ) РАН
119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., 35; e-mail: doa@igem.ru*

Биогенный аспект формирования минерализации четырехвалентного урана в месторождениях песчаного типа в зоне гипергенеза рассмотрен в свете современных данных геомикробиологии и экологической минералогии, изучающей продукты бактериальной биорекультивации. Из анализа литературных и авторских данных о фосфате четырехвалентного урана — нингиоите, следует, что источником фосфора при образовании нингиоита является органический материал разложившихся растительных остатков в осадочных толщах. Минерализация U^{4+} обусловлена жизнедеятельностью бактериальной микрофлоры; аэробно-анаэробное сообщество микроорганизмов необходимо рассматривать наравне с сугубо геохимическими характеристиками среды как важнейший компонент уранового черного рудообразования.

Ключевые слова: урановые черны; нингиоитовые руды; фосфатный комплекс; окислительно-восстановительный ролловый фронт; микроорганизмы; бактериальное сообщество; биогенный характер минералообразования.

PHOSPHATE COMPOSITION OF URANIUM BLACKS (SOOTIES)
AS INDICATOR OF THEIR BIOGENIC NATURE

O.A. DOYNIKOVA

*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS (IGEM)
119017, Russia, Moscow, Staromonetny per., 35; e-mail: doa@igem.ru*

The biogenic aspect of tetravalent uranium mineral-formation in a hypergenesis' zone is considered in the light of the up-to-date data of a geomicrobiology and environmental-mineralogy, studying products of bacterial biorecultivation. The analysis of literary and author's data on phosphate U^{4+} ningyoite is led to the following conclusions: the source of phosphorus for ningyoite formation is organic material of the decomposed plant debris in sedimentary rock strata; mineralization U^{4+} is caused by the activity of a bacterial microflora; the aerobic-anaerobic community of the microorganisms needs to be considered on an equal basis with especially geochemical characteristics of the environment as the most important component of uraniumsooty ore formation.

Keywords: uranium blacks (sooty); ningyoite ores; phosphate complex; sandstone roll-type deposits; redox roll-front; microorganisms; bacterial community; biogenic nature of mineral genesis.

Урановые черны — это дисперсный продукт минерализации четырехвалентного урана, который формируется в восстановительных условиях при деятельности редокс процессов выветривания и представлен практически во всех месторождениях урана в зоне гипергенеза. Рассмотрение образова-

ния в осадочных толщах минералов четырехвалентного урана, слагающих так называемые урановые черны, невозможно без привлечения основ геохимии ландшафтов и понятия «геохимические барьеры», сформулированного А.И. Перельманом, которое основано на сходстве процессов концентриро-

вания элементов в земной коре. «Окислительно-восстановительная зональность в почвах является моделью более грандиозных процессов, протекающих в других биокосных системах...» [11, 12]. Вопрос участия живых организмов в процессах гипергенного уранового рудообразования и важнейшей их роли в геологических процессах заставляет обращаться к работам А.И. Перельмана, заложившим основы геохимии зоны гипергенеза [2, 11, 12]. Известно активное участие микроорганизмов практически во всех геологических процессах, формирующих осадочный чехол; показаны бактериальная природа образования ряда месторождений железа, марганца, золота, меди [29]; решающее значение микроорганизмов в формировании руд песчаниковых U-месторождений (уранинита, коффинита) отмечена в [23, 31].

Отечественными геологами выявлена значительная роль микроорганизмов в образовании восстановительных геохимических барьеров при формировании руд U^{4+} , установлена связь урана с воднорастворённым органическим веществом [8], что лежит в основе классических взглядов на образование инфильтрационных месторождений урана [2, 7]. В современных публикациях [12, 30] отмечена подвижность U^{4+} в виде уран-органических комплексов фульвокислот. Коллоидный перенос U^{4+} установлен в поровых водах месторождений [10]; в неорганической химии известны его коллоидные полимеры для очень кислых сред [24].

Современные геомикробиологические исследования подтверждают высвобождение широкого круга металлов в процессах биовыщелачивания, доказывая, что микробно катализируемые окислительно-восстановительные (ОВ) процессы играют важную роль в формировании гипергенных месторождений [27, 29]. В «классических гипергенных системах», где выветривание стимулируется микробной деятельностью, ролловые залежи урана рассматриваются как латеральное развитие от аэ-

робного выветривания до анаэробного обогащения [29]. Использование бактерий для фиксации радионуклидов (в том числе U) в загрязненной приповерхностной среде рассматривается как альтернатива затратным технологиям рекультивации [14, 22]. Продукты иммобилизации урана изучаются в рамках экологической минералогии, важной и для разработки руд с использованием микроорганизмов [18]. Дисперсные минеральные формы U^{4+} диагностированы современными методами (EXAFS, HRTEM, XRD, EDS и др.); наряду с уранинитом и нингиоитом выявлена некристаллическая форма U^{4+} — наноразмерные «биогенные частицы» UO_2 [19, 21, 25]. В обзоре работ по микробной иммобилизации урана [26] показано, что фиксация урана часто происходит в виде фосфатов, реже — уранинита.

Несмотря на широкую изученность в отечественных исследованиях фосфатного компонента урановых черней — нингиоита, его происхождение и источник фосфора остаются недостаточно выясненными; в свете современных данных геомикробиологии и минералогии о нингиоите рассмотрен биогенный аспект черного рудообразования.

Черневая урановая (U^{4+}) минерализация

Дисперсная U^{4+} -минерализация в зоне гипергенеза представлена практически на всех месторождениях урана. Черневые урановые руды характерны для инфильтрационных месторождений роллового типа, где в виде тёмной рыхлой массы слагают цементирующий материал песчаников. Известно три минеральные формы рудной U^{4+} -минерализации: оксидная (уранинит разной степени кристалличности), силикатная (коффинит) и фосфатная (нингиоит). Другие минералы четырехвалентного урана отмечены как редкие находки. Минеральный состав урановых черней изучен локальными методами АЭМ [4, 5]. Для U^{4+} -минералов характерны микронные/субмик-

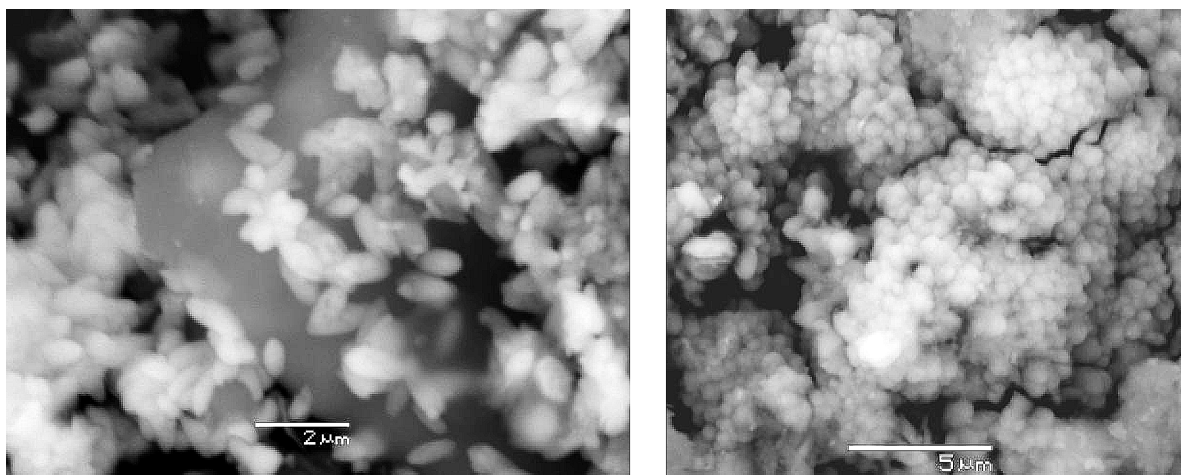


Рис. 1. Кристаллы и агрегаты кристаллов нингиоита; Хиагдинское рудное поле, Россия. СЭМ-изображение

ронные размеры кристаллов (рис. 1) и гелеподобных выделений; колломорфные и кристаллические скопления редко достигают размера $n \cdot 10$ мкм. Нингиоит — фосфат четырёхвалентного урана $\text{CaU}(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — может присутствовать в составе черневых руд в различных соотношениях с коффинитом и уранинитом.

Малоизвестная ранее нингиоитовая минерализация, обнаруженная нами через два десятилетия после первооткрывателей, была установлена в рудах с чёткой положительной корреляцией урана и фосфора. Были изучены нингиоитовые руды ряда месторождений: Косачинское (Северный Казахстан); Момино, Хасково, Навысен (Болгария); Хиагда (Россия) [4–6]. К 2000-м гг. стало очевидно, что месторождения с нингиоитовыми рудами не редки, и представляют собой новый фосфатный тип черневой урановой минерализации, характерный для палеоорусловых месторождений [3]. Наши исследования привели к выводам о близонейтральном pH растворов, преобладании слабощелочной среды и активной роли H^+ при образовании нингиоита [4]; в ассоциации с нингиоитом часто встречаются органические остатки. Во всех публикациях, где приведены литологические характеристики рудных толщ, отмечается присутствие озёрно-болотных отложений [6, 17, 20], что можно считать характерной чертой месторождений нингиоитовых руд.

Источник фосфора для образования нингиоита

Минералогические наблюдения [17] и наши данные по электронно-микроскопическому изучению многочисленных образцов нингиоита свидетельствуют о второстепенной роли обломочного апатита как источника фосфора в растворах, поскольку отсутствуют следы растворения обломочных зёрен апатита в тесной ассоциации с нингиоитом.

Фосфор, как один из наиболее важных биогенных элементов, входит в состав всех органических соединений (среднее содержание в живом веществе $n \cdot 10^{-2} \%$). Организмы усваивают фосфор из почв и водных растворов; процессы концентрации фосфора в земной коре связаны с биогенной миграцией. Его водная миграция, по данным А.И. Перельмана, ограничена: «Лишь небольшая часть подвижного Р поступает в природные воды, так как он легко покидает их, входя в состав нерастворимых минералов или захватываясь организмами» [12]. В осадочные породы и почву фосфор поступает главным образом с растительными и животными остатками в форме органических соединений, где Р присутствует в виде радикалов фосфорной кислоты PO_4^3 и в этой форме активно участвует в различных биохимических превращениях [9], входит в состав гумусовых кислот. Комплекс PO_4^3 высвобождается из органических и органоминеральных

соединений фосфобактериями, которые переводят фосфор из органических соединений в неорганические. Переводить нерастворимые фосфатные соединения в растворимое состояние способны многие микроорганизмы.

Первые предположения геохимиков о появлении фосфора в рудных толщах в результате деятельности микроорганизмов [20] или фильтрации подземных вод через органонасыщенные осадки [17] получили подтверждение в экспериментах современных микробиологов. Процессы трансформации фосфатного комплекса в водной среде осадочных отложений детализированы в работах по иммобилизации радионуклидов и биорекультивации. На примере урана показано, что биологически обусловленное осаждение радионуклидов (минеральные формы U^{6+} и U^{4+}) всегда связано с микробным высвобождением PO_4^3 из органических клеток микроорганизмов [26]. Многочисленные эксперименты с разными видами бактерий свидетельствуют, что бактериальная фиксация урана происходит, как правило, в виде фосфатов [22, 26]. Осаждение окисленной формы урана U^{6+} с биогенными фосфатными лигандами ведёт к накоплению урана внутри клеток или на их поверхности (рис. 2, 3), или к образованию минеральных осадков (отенит). Некоторые факультативные микроорганизмы могут накапливать фосфор внутриклеточно (рис. 2) при аэробных условиях роста, а затем при анаэробных условиях высвобождать неорганический фосфат из клеток [26]; при этом осаждается аморфный UO_2 и/или нингиоит. Возможно ферментативное и косвенное (через продукты жизнедеятельности) микробное восстановление U^{6+} [28].

Эксперименты по ферментативному и абиотическому восстановлению урана U^{6+} в условиях, восстановительных для железа, доказывают, что к восстановлению урана способно множество суль-

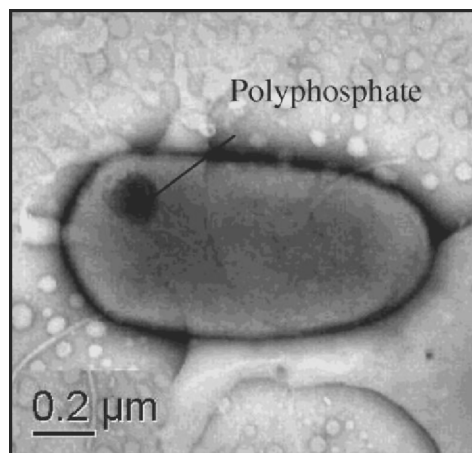


Рис. 2. Препарат целой клетки (штамм ES6) демонстрирует плотные, подобные полифосфату, внутриклеточные гранулы (из [26]). ПЭМ-изображение

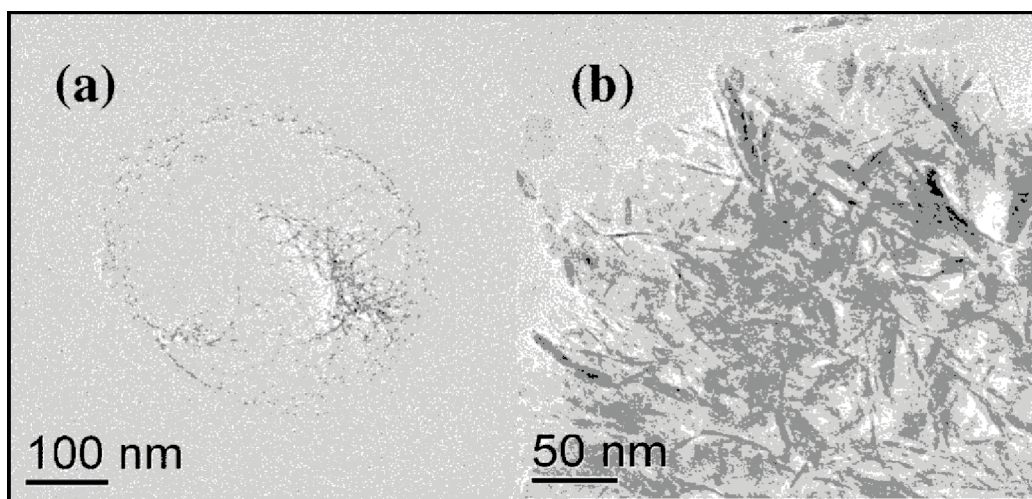


Рис. 3. ПЭМ-изображение: *a* — тонкий срез клетки штамма ES6, замещенной ураном; *b* — осадок уранилфосфата — пластинчатые образования нанометрового размера (из [26])

фат- и металлвосстанавливающих бактерий [15]. Микробное восстановление урана при термофильной (50–70 °C) железоредукции показало [13], что для получения энергии роста микроорганизмы способны использовать в качестве акцептора электронов минерал уранила (урамфит). При внеклеточном ферментативном восстановлении урана (в результате роста бактерий) образуется нингиоит [14]. Фосфат урана рассматривается как более обычный продукт восстановления, чем уранинит, и как преобладающий продукт микробного восстановления урана в близповерхностных условиях [16]. Сульфатредукция в иловых отложениях и заиленных грунтах — доминирующий анаэробный терминальный процесс в разрушении органического вещества [13]. Бактерии-сульфатредукторы встречаются в пресноводных водоёмах с разлагающейся органикой, обитают в донных морских осадках, на заиленных грунтах. Прослежена ведущая роль микроорганизмов при удалении радионуклидов в водоёмах микробным сообществом илов [14]. Озёрно-болотные отложения и пойменные почвы гумидных ландшафтов, где мигрирует и накапливается фосфор, представляют собой среду с высокой биологической активностью [12], что объясняет их тесную связь с нингиоитовыми рудами.

Работы микробиологов по иммобилизации урана природными бактериями (в виде фосфатных минералов) убедительно показали, что источником фосфатных ионов в водных растворах являются растительные клетки, точнее продукты бактериальной переработки разнообразных фосфорсодержащих органических соединений. Данные геолого-минералогических наблюдений и экспериментов по восстановлению урана бактериями приводят к заключению: при формировании нингиоита источником фосфора в природных растворах являются продукты разложения органического вещества.

Количество фосфора, трансформированного преимущественно из растительных остатков, лимитировано содержанием детрита в рудовмещающей толще. Возможный вклад абиогенного растворения фосфатных минералов несущественен.

Формирование фосфатных нингиоитовых руд, при сохранении общих закономерностей черногого U^{4+} -минералообразования в осадочных пластах, требует повышенной активности фосфатного иона, как отмечалось в [17]. Механизм этой активности на сегодняшний день объясняется жизнедеятельностью микробного сообщества в среде рудообразования, что обеспечивает поступление P в раствор. Главной причиной появления именно фосфатной U^{4+} -минерализации является, вероятно, обилие в рудовмещающей толще гумусовых веществ — продуктов микробного преобразования растительных остатков. Отмечается характерная приуроченность нингиоитовых руд к толщам, насыщенным органическим материалом: аллювиальным палеорусловым отложениям или зрелым корам выветривания. Очевидно, доминирование продуктов переработки флоры в рудовмещающих толщах обеспечивает поступление в водную среду «строительного материала» (PO_4^{3-}) для формирования нингиоита. Озёрно-болотные отложения с захоронённым гумусовым и сапропелевым органическим веществом (фитобиопланктон) служат своеобразной кладовой, снабжающей осадочные толщи различными микроорганизмами — агентами переработки детрита, а также PO_4 -ионами — продуктами разрушения органических клеток.

Для природных вод зоны гипергенеза, богатых гумусовыми веществами, наиболее характерна коллоидная форма миграции урана U^{4+} — важная форма переноса урана в восстановительной среде [11]. Накопление в биосфере коллоидов пропорционально интенсивности и длительности про-

текания процессов развития ландшафта [12]. Пример — месторождение Косачиное, Северный Казахстан. Здесь нингиоитовые (вторичные) руды образованы в значительно проработанной коре выветривания, в мощных (150 м) «карманах», что свидетельствует о глубине воздействия гипергенных процессов. Рыхлые промышленные руды обогащены $S_{орг}$ (15%) по сравнению с первичными рудами и вмещающими породами, демонстрируя значительный вклад анаэробной бактериальной деятельности [3]. С учётом биогенного фактора генезис промышленных руд Косачиное следует рассматривать как результат коллоидной миграции урана U^{4+} , которая известна и для других природных объектов [30]. Очевидно, образование нингиоитовых руд в корах выветривания (Северный Казахстан, Болгария) позволяет говорить о *решающей роли коллоидов в U^{4+} -фосфатном минералообразовании*. Обилие органического материала и микроорганизмов в озёрно-болотных слоях обеспечивая образование коллоидов, способствует миграции U и P. Локализация месторождений нингиоита и присутствие озёрно-болотных отложений указывают на накопление рудовмещающих толщ в климатических условиях с повышенной влажностью, что соответствует известной закономерности роста значенности коллоидной миграции во влажных ландшафтах.

Часто нингиоитовые руды приурочены к вулканогенно-осадочным толщам, где обогащение вод кальцием обеспечивается легким выветриванием вулканического пепла в гумидных ландшафтах [12]. Обилие иона Ca^{2+} в рудообразующих растворах отмечено в [17, 20]. Весьма характерный для ландшафтов, богатых живым веществом, гидрокарбонатно-кальциевый состав вод [12] (как на месторождениях Хиагдинского рудного поля) объясняет источник кальция для формирования Ca-U-фосфата.

Мононингиоитовый состав руд типичен для месторождений палеодолинного типа: Нингио-Тоге (Япония); Близард, Тайи (Канада); Момино, Хасково (Болгария); Хиагдинское рудное поле (Россия) [4, 6]. В составе нингиоитовых руд месторождений грунтово-пластового типа в подчинённом количестве присутствует коффинит и аморфный уранинит. Это отмечено в рудных телах туфогенно-осадочных толщ Болгарии (Навысен, Марица), рудах стратиформных месторождений Чешско-Богемского массива, рудах месторождения Косачиное. В случае преобладания уранинита над нингиоитом в составе черневых руд (Сугралы, Кызылкуп) углистые органические остатки нами не встречены.

Биогенный аспект уранового рудообразования в зоне гипергенеза

При обсуждении закономерностей черневого рудообразования в зоне гипергенеза не следует забывать о принадлежности этой зоны к биосфере

Земли. Более полувека назад А.И. Перельман обосновал понятие о водоносном горизонте как биокосной системе, развивая идеи В.И. Вернадского и Б.Б. Полюнова о ведущей роли живого вещества в геохимических процессах биосферы. Условия образования фосфатной U^{4+} -минерализации характеризуют и среду образования U-черней в целом (отличаясь лишь активностью фосфатного иона), что позволяет говорить о биогеохимической природе черневых руд. Это наглядное проявление закона, который А.И. Перельман назвал законом В.И. Вернадского, о прохождении всех химических реакций биосферы в среде, созданной живыми организмами [11]. Полевые наблюдения свидетельствуют о приуроченности рудной U^{4+} -минерализации к границе максимального развития микрофлоры, где наиболее интенсивно развиты биохимические ОВ процессы [2]. Публикации по геохимии пластовых месторождений урана лишь пополняют список анаэробных бактерий, установленных в рудной зоне, рассматривая *анаэробы* главными агентами, создающими резковосстановительную обстановку, а роль *аэробной* микрофлоры практически остается незаметной. Приоритет в осаждении урана отдан процессам геохимическим, роль микрофлоры ограничена «вспомогательной» функцией.

Каталитическая роль микроорганизмов в процессах гидрогенного уранового рудообразования подтверждена микробиологическими экспериментами по бактериальной иммобилизации урана, детализирующими ферментативный характер восстановительного преобразования уранил-ионов в водных растворах. Показано осаждение урана как в окисленной U^{6+} форме (уранильной), так и в форме U^{4+} -минералов (оксид, фосфат), чаще отмечается поверхностная бактериальная сорбция урана [26].

Современная природоведческая микробиология рассматривает микробное сообщество как систему взаимодействующих между собой разных, функционально разнородных организмов; анаэробная среда является трофической структурой микробного сообщества (когда энергия и вещество одних организмов потребляются другими организмами). Общеизвестно, что создание восстановительной среды обусловлено суммарным действием микробиологических процессов, т. е. анаэробное окисление органического вещества в осадочных толщах неразрывно связано с аэробным процессом. Поэтому, рассматривая в целом процесс биогенного черневого уранового рудообразования, *учитывая единство микробного сообщества в экосистеме, необходимо оценивать деятельность как анаэробов, так и тесно связанных с ними аэробных бактерий* (активно действующих на начальном этапе окисления органических остатков). При современном уровне знаний учитывать деятельность исключи-

тельно анаэробной микрофлоры в формировании U^{4+} -оруденения представляется недостаточно объективным. Целостный взгляд на деятельность аэробно-анаэробного бактериального сообщества в процессах биогенного рудообразования на урановых месторождениях, где механизм рудонакопления рассматривается в полном диапазоне редокс барьера, приведён в [1]. Полагается, что именно *аэробные* бактерии, окисляя органическое вещество, продуцируют обилие органических кислот и таким образом обеспечивают появление восстановительной среды, создавая (подготавливая) условия для жизнедеятельности *анаэробов*. Современному накоплению урана в торфяниках и углистых сланцах на ОВ барьере сопутствует локальное формирование богатых рудоносных растворов («содержание урана достигает сотен мг/литр»), причём предполагается фиксация урана бактериальными клетками [1]. Это согласуется с известными данными о локальном накоплении в растворе активных восстановителей и резком понижении Eh [8]. Можно допустить, что дальнейшее преобладание анаэробов над аэробами (в развитие бактериальной среды) приведет к осаждению восстановленных форм урана в виде наноразмерных «биогенных» частиц на зёрнах песка [21, 25]. Жизнедеятельность микробного сообщества в рудообразующей среде (восстановительная зона ОВ границы) ведёт к дальнейшему накоплению U^{4+} с образованием его минеральных форм, создавая межзерновую цементующую массу.

Микронные размеры минералов в черневых рудах логично рассматривать как следствие подвижности среды минералообразования. Осадительная для урана геохимическая среда, где образуются U^{4+} -минералы, возникает локально на границе ОВ условий и перемещается вместе с ролловым фронтом. Такое перемещение обусловлено гидродинамическим фактором и существенно зависит от вклада микробного сообщества, разлагающего детрит и создающего таким образом условия для осаждения U^{4+} . Можно предположить, что широко известное затухание деятельности анаэробов, установленное за границей рудоотложения [2, 7, 8], происходит в результате расходования питательных веществ, подготовленных аэробами. Тогда *продвижение зоны U^{4+} -минерализации будет происходить по мере расходования питательной базы*. В обобщенной модели роллового фронта время существования условий для осаждения ураново-рудной фазы в конкретном объёме непродолжительно (в геологическом масштабе) по причине продвижения зоны рудоотложения. Временной интервал формирования рудных минералов ограничен и определяется скоростью перемещения ОВ фронта, которая будет зависеть от количества питательных веществ, «подготовленных» аэробами. Естественно предположить, что микронный размер кристаллов

ураново-рудных фаз определяется длительностью существования (в данном объёме) условий для осаждения, а продолжительность детерминирована количеством органического материала в пластах.

Обсуждение

Первые геолого-минералогические выводы о биогенной природе урановых руд в песчаниковых месторождениях роллового типа [8] подтверждены новыми сообщениями об образовании уранинита и коффинита при участии микроорганизмов [23, 31]. Эксперименты по бактериальному восстановлению урана убедительно демонстрируют, что *образование черневой U^{4+} -минерализации в природных водах, насыщенных органическим веществом, вызвано деятельностью микроорганизмов*. Это заключение, с учётом биогенного источника фосфора, относится к фосфатной (нингиоитовой) минерализации, а также к оксидной и силикатной формам U^{4+} , которые ассоциируют с нингиоитом в чернях. Формирование урановых черневых руд в водоносных горизонтах зоны гипергенеза демонстрирует биогенный характер минералообразования. Вероятно, и «рыхлость» черневых урановых руд здесь можно рассматривать как косвенное доказательство участия микроорганизмов в рудообразовании. Ответ на вопрос о причинах образования конкретной минеральной формы U^{4+} (оксидной, силикатной, фосфатной), очевидно, следует искать в особенностях микробиологических процессов.

Сравнение географических характеристик инфильтрационных месторождений, сложенных рудами разного состава, — типичных палеодолинных месторождений Хиагдинского рудного поля (нингиоитовые руды) и широко известных месторождений чу-сарысуйского типа Притяньшаньской мегапровинции (уранинит-коффинитовые руды) — выявляет различие климатических условий осадконакопления и последующего рудообразования при общем песчаниковом типе вмещающих пород. Климат, как важнейший внешний фактор гипергенных процессов, при формировании черневых урановых руд определяет и биогеохимическую специфику минералообразования.

При рассмотрении биогенной миграции А.И. Перельман выбрал за основу процесс, общий для всех частей биосферы — разложение органических веществ [12]. Аридные и гумидные климатические условия отличаются накоплением мортмассы (массы мертвого органического вещества в экосистеме). Запасы мортмассы в аридных областях всегда меньше запасов накопленной здесь же фитомассы. При недостатке тепла разложение растительных остатков замедляется, они не успевают разрушаться, и в ландшафте накапливается избыточная мортмасса. Упомянутое выше предварительно переработанное, окисленное аэробами органическое ве-

щество (питательная среда анаэробов), вероятно, следует соотносить с мортмассой в рудовмещающих толщах. Возможно, именно преобладание мортмассы в палеорусловых отложениях и более холодные, чем в Притяньшань, гумидные условия задают повышенные концентрации биогенного фосфатного комплекса, определяя формирование U^{4+} фосфата — нингиита.

В инфильтрационных месторождениях урана органические остатки во вмещающих осадочных толщах всегда обеспечивают питательную среду для микробов. *Сама природа накопления осадочных толщ обеспечивает наличие восстановительных агентов, которые при фильтрации кислородных ураноносных растворов могут служить рудообразующим осадительным барьером.* Современные исследования биогенного осаждения урана в процессах сульфат- и железоредукции показали, что рудообразование, сопровождая бактериальную деятельность, может продолжаться до настоящего времени [13, 17].

Анализ известных фактов требует расширить понятие «рудолокализирующий барьер». В структуру барьера естественно входят не только восстановительная, но и окислительная зоны. Такой взгляд дополняет существующую теорию экзогенного уранового рудообразования. Формирование черных U^{4+} -руд в условиях гипергенеза, где биогенная миграция четырехвалентного урана связана с органическими производными биосферы, наглядно демонстрирует проявление одного из основных зако-

нов геохимии — закона В.И. Вернадского, отражая все положения этого закона о непосредственном участии живого вещества в геохимической деятельности и в создании среды миграции химических элементов.

Заключение

Продвижение роллового фронта, заданное гидродинамическим градиентом, проявлено в результате совокупной деятельности аэробно-анаэробных микроорганизмов; микронные размеры урановых минералов обусловлены перемещением восстановительной среды вместе с ОВ фронтом. *Жизнедеятельность аэробно-анаэробного бактериального сообщества приводит к созданию биогеохимических барьеров, восстанавливающих уран, и их продвижению по мере расходования питательной базы.* Микробное сообщество, наряду с геохимическими характеристиками среды, необходимо рассматривать как важнейший компонент рудообразования, задающий условия осаждения U^{4+} -минерализации. *Только активным участием микрофлоры в процессах разложения органического вещества можно объяснить как поступление фосфора из растительных остатков в раствор, так и подвижность урана в виде органических комплексов и коллоидов.* Источником фосфора при образовании нингиита является органическое вещество (мортмасса) растительных остатков в осадочных толщах.

ЛИТЕРАТУРА

- Виниченко П.В. Теория биогенного рудообразования на примере урановых месторождений. Иркутск: Сосновгеология, 2004. 215 с.
- Гидрогенные месторождения урана / Под ред. А.И. Перельмана. М.: Атомиздат, 1980. 270 с.
- Дойникова О.А. Месторождения урана с новым типом черновой минерализации: фосфатным // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 1. С. 60–78.
- Дойникова О.А. Минералогия урана восстановительной зоны гипергенеза (по данным электронной микроскопии). М.: Физматлит, 2012. 216 с.
- Дойникова О.А., Белова Л.Н., Горшков А.И., Сивцов А.В. Урановая чернь: вопросы генезиса и минерального состава // Геология рудных месторождений. 2003. № 6. Т. 45.
- Дойникова О.А., Тарасов Н.Н., Мохов А.В. Новый фосфатный тип урановых руд в России // Доклады РАН. 2014. Т. 457. № 4. С. 434–438.
- Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н. Гидрогенное рудообразование. М.: Геоинформмарк, 2000. 608 с.
- Лисицин А.К. Гидрогеохимия рудообразования. М.: Недра, 1975. 247 с.
- Макаров М.И. Фосфор органического вещества почв. М.: ГЕОС, 2009. 370 с.
- Мальковский В.И., Петров В.А., Диков Ю.П., Александрова Е.В., Бычкова Я.В., Мохов А.В., Шулик Л.С. Анализ коллоидных форм переноса урана подземными водами на U-Мо месторождениях Стрельцовского рудного поля (Восточное Забайкалье) // Докл. РАН. 2014. Т. 454. № 1. С. 81–83.
- Перельман А.И. Геохимия эпигенетических процессов (зона гипергенеза). М.: Недра. 1968. 331 с.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрей-2000, 1999. 768 с.
- Слободкин А.И. Термофильные железовосстанавливающие прокариоты. Дис. ... докт. биол. наук: 03.00.07. М., 2008. 336 с.
- Хижняк Т.В. Бактериальная трансформация и иммобилизация тяжелых металлов и радионуклидов. Дис. ... докт. биол. наук: 03.02.03. М., 2013. 212 с.
- Behrends T., Cappellen P. Competition between enzymatic and abiotic reduction of uranium (VI) under iron reducing conditions // Chemical Geology. 2005. 220. 315–327.
- Bernier-Latmani R., Veeramani H., Dalla Vecchia E. et al. Non-uraninite Products of Microbial U (VI) Reduction // Environ. Sci. Technol. 2010. 44. 9456–9462.
- Boyle D.R., Littlejohn A.L., Roberts A.C. et al. Ningyote in Uranium deposits of south central British-Columbia first North American occurrence // Canad. Miner. 1981. V. 19. № 4. P. 325–331.
- 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 noncrystalline U (IV). Environ. Sci. Technol. 2013. 47: 9756–9763.
- Kajitani K. A geochemical study on the genesis of ningyote, the special calcium uranous phosphate mineral // Economic Geology. 1970. V. 65. P. 470–480.
- 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. 7340–7347. DOI: 10.1021/acs.est.5b00949
- Lovley D.R., Phillips E.J.P., Gorby Y.A., Landa E.R. Microbial reduction of uranium // Nature. 1991. V. 350. P. 413–416.
- Min M., Xu H., Chen J., Fayek M. Evidence of uranium biomineralization in sandstone-hosted roll-front uranium

- deposits, northwestern China // *Ore Geology Reviews*. 2005. 26: P. 198–206.
24. Priyadarshini N., Sampath M., Shekhar Kumar et al. Probing Uranium (IV) Hydrolyzed Colloids and Polymers by Light Scattering // *Journal of Nuclear Chemistry*. 2014. Volume 2014. Article ID 232967. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/232967>.
25. Singer D.M., Farges F., Brown G.E.Jr. Biogenic nanoparticulate UO_2 : Synthesis, characterization, and factors affecting surface reactivity // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2009. 73 (12): P. 3593–3611. DOI: 10.1016/j.gca.2009.03.031.
26. Sivaswamy V., Boyanov M.I., Peyton B.M. et al. Multiple Mechanisms of Uranium Immobilization by *Cellulomonas* sp. Strain ES6 // *Biotechnol. Bioeng.* 2011. 108(2): P. 264–276.
27. Southam G., Sanders J.A. The geomicrobiology of ore deposits // *Economic Geology*. 2005. 100: P. 1067–1084.
28. 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.
29. Zammit C.M., Shuster J.P., Gagen E.J., Southam G. The Geomicrobiology of Supergen Metal Deposits // *Elements*. 2015. V. 11. P. 337–342.
30. Wang Y., Fruttschi M., Suvorova E et al. R. Mobile uranium (IV)-bearing colloids in a mining-impacted wetland. *Nature Communications*. 2013. 4: DOI: 10.1038/ncomms3942.
31. Wulser 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.
-