

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПИЛ ПГЗРО В НИЖНЕКАНСКОМ МАССИВЕ

А. В. Сафонов¹, К. А. Болдырев²

¹Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина РАН, Москва

²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 30 апреля 2019 г.

В статье представлен план изучения влияния биогенных и биогенно-опосредованных процессов на стабильность барьеров безопасности и миграцию компонентов РАО в ближней зоне пункта захоронения в условиях подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве Красноярского края. Проведена оценка результатов более чем 30-летних исследований биогенных процессов в зарубежных лабораториях, определен перечень наиболее важных из них для условий захоронения ПГЗРО НКМ, включая газообразование, изменение материалов барьера (сталь, цемент, глина, скальный массив), увеличение мобильности радионуклидов в составе биогенных комплексов, коллоидов и псевдоколлоидов, изменение геохимических параметров среды.

Ключевые слова: биогенные процессы, подземная исследовательская лаборатория, Нижнеканский массив, геохимия, биокоррозия, барьеры безопасности.

Современный подход к обращению с радиоактивными отходами (РАО) высокой активности (HLW — High Level Waste) во многих странах подразумевает их захоронение в глубинных геологических формациях. В ряде стран, например Бельгии и Франции, для этих целей рассматриваются глинистые массивы. Кристаллические формации для захоронения таких отходов исследуются в Российской Федерации, Канаде, Швеции, Финляндии, Японии и Швейцарии. В Российской Федерации в качестве района размещения пункта глубинного захоронения (ПГЗРО) РАО 1 и 2 класса выбран участок «Енисейский», расположенный в Нижнеканском гнейсовом кристаллическом массиве (Енисейский кряж), (НКМ) на расстоянии около 6 км от г. Железногорска (Красноярский край) и 4,5 км от Енисея, на глубине около 500 м.

ПГЗРО будет представлять собой сооружение, состоящее из системы тоннелей и скважин, для

размещения подготовленных к окончательной изоляции РАО. Данный участок рассматривается с начала 90-х годов прошлого века [1], практические работы уже ведутся. При проектировании и создании хранилища, безусловно, необходимо использовать более чем тридцатилетний опыт зарубежных специалистов.

Как и во многих подобных проектах, требующих максимальной надежности, для всестороннего анализа и обоснования безопасности глубинного захоронения долгоживущих РАО, на начальном этапе на объекте планируется создание подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), в которой в реальных условиях предполагается провести принципиально важный и трудозатратный объем научно-исследовательских работ.

Главной целью создания ПИЛ является подтверждение пригодности массива пород для безопасного захоронения РАО, а также реализуемости принятых проектных решений. В ПИЛ в

целях уточнения характеристик массива пород и подземных вод в зоне захоронения РАО будет проводиться ряд исследований, важных для оценки долговременной безопасности ПГЗРО. Для этого в натуральных и лабораторных условиях должен быть выполнен комплекс геодинамических, геомеханических, геофизических, геологических, гидрогеологических, гидрогеохимических, радиометрических и микробиологических исследований. Последнее направление исследований применительно к вопросам захоронения радиоактивных отходов начало активно развиваться в мире в 80-х годах прошлого века и уже к 2000-м годам являлось обязательной частью программ исследований при создании хранилищ РАО в Швеции, Финляндии, Швейцарии [2–5]. Главным обоснованием активного изучения микробиологических факторов при оценке безопасности ПГЗРО является требование к сверхдолгому хранению отходов, содержащих актиниды и некоторые долгоживущие продукты деления, например технеций. При этом если на протяжении первых сотен лет компоненты РАО будут контактировать с искусственными барьерами, выбранными в соответствии с концепцией многобарьерной защиты при проектировании ПГЗРО, то после их постепенной деградации начнет увеличиваться вклад внешних геохимических процессов.

Целью настоящей работы является постановка задач для исследований биогенных процессов в ПИЛ ПГЗРО НКМ и разработка плана работ в рамках создания единой модели оценки долговременной безопасности.

Биогенные процессы в подземном пространстве

Согласно современным представлениям о геосфере и истории ее формирования, одним из важных механизмов ее преобразования за последние 3 млрд лет были микроорганизмы. На сегодняшний день жизнеспособные микроорганизмы были обнаружены в пробах, отобранных при бурении с глубины до 5 км при температурах до 120 °С. В экологии явление приспособления организмов для обитания в экстремальных условиях называется экстремофилией. Обоснованием высокой активности микроорганизмов на значительных глубинах в экстремальных условиях является разнообразие типов метаболизма (возможность дыхания с использованием различных окислителей (акцепторов электронов): нитратов, трехвалентного железа, сульфатов, селенатов, арсенатов и т. д.; возможность потреблять в качестве доноров

электронов в процессе дыхания двухвалентное железо, метан, водород, угарный газ и другие магматические газы) [6]. Помимо этого, анаэробные микроорганизмы имеют относительно простой генетический аппарат, позволяющий быстро приспосабливаться к меняющимся условиям и вырабатывать механизмы устойчивости к широкому спектру факторов (радиорезистентность (LD_{100} 5–20 кГр), солевой фон — до 300 г/л, температура 5–120 °С). Важной особенностью некоторых микроорганизмов-экстремофилов является способность образовывать сверхпрочные споры и находиться в состоянии анабиоза неограниченно длительное время, активируясь при наступлении благоприятных условий. Таким образом, в барьерных материалах, приготовленных на поверхности, даже подвергшихся химической и температурной обработке, могут содержаться малоактивные формы микроорганизмов, способные активироваться в условиях захоронения при поступлении широкого спектра химических соединений.

Особо важной экологической группой микроорганизмов при захоронении РАО первого класса являются термофильные бактерии, характеризующиеся высокими скоростями роста и высокими уровнями метаболических процессов [7], что может привести к значительной интенсификации процессов разрушения барьеров безопасности на протяжении первых сотен лет захоронения, когда повышенные температуры будут характерны для ближней зоны объекта, подвергающейся длительному нагреву за счет радиоактивного распада радионуклидов, содержащихся в РАО.

Одним из наиболее перспективных материалов для инженерных барьеров безопасности (ИББ) для изоляции РАО 1 класса является бентонит. Хорошие гидроизолирующие и сорбционно-осадительные свойства бентонита предполагают его использование в качестве одного из инженерных барьеров, однако наряду с этим в бентоните могут присутствовать также и значимые количества органических соединений, железа и биогенных элементов, необходимых для развития бактерий, а также и большое количество клеток и спор неаборигенных бактерий. Поэтому большое внимание зарубежных исследователей было уделено коррозии стали под влиянием термофильной микрофлоры при использовании бентонитовых барьеров [8, 9]. При этом жизнеспособность микроорганизмов находится в значительной зависимости от плотности бентонита. Так, в работе [10] показано, что при плотности бентонита в 1,9 кг/дм³ микроорганизмы находятся только на поверхности материала. Также в работе [11] указано,

что активность сульфатовосстанавливающих бактерий прекращается при плотности сухого бентонита 1,5 кг/дм³. В работе [12] указывалось, что давление набухания бентонита более 2 МПа предотвращает биологическую активность. Такое давление соответствует плотности насыщенного бентонита в 1,8 кг/дм³. Исследования, проведенные в работе [13], показали, что в смеси песка и бентонита в соотношении 30/70 при плотности сухого материала 1,6 кг/дм³ не обнаруживается значительной сульфатредукции.

Для оценки роли всевозможных биологически опосредованных процессов при захоронении РАО, несомненно, следует обратиться к богатому международному опыту, полученному при изучении исторических хранилищ РАО, мест будущих локаций РАО и в специальных модельных экспериментах в подземных исследовательских лабораториях.

Работы, проведенные на существующих исторических хранилищах. В ходе микробиологических исследований ближней зоны хранилища высокоактивных отходов в Хэнфорде, США, загрязненной в 1962 году щелочами, нитратами, алюминатами, хроматами, а также радионуклидами ¹³⁷Cs и ⁹⁹Tc, были определены аэробные гетеротрофные бактерии различных родов. Среди выделенных грамположительных бактерий доминировали виды бактерий *Arthrobacter*, *Rhodococcus* и *Nocardia* [14], способные выдерживать дозовые нагрузки до 20 кГр, восстанавливать нитрат-ионы до молекулярного азота, а радионуклиды (U, Tc) и хромат-ионы — до низших малорастворимых форм, а также окислять широкий спектр органических соединений.

В ходе микробиологических исследований в объекте хранилища «Юкка Маунтин» обнаружены бактерии родов: *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Cellulomonas*, *Corynebacterium*, *Pseudomonas*, *Staphylococcus*, *Xanthomonas* и *Flavobacterium*, способные образовывать органические кислоты в аэробных и анаэробных условиях, окислять Fe(II) и восстанавливать сульфаты до сульфидов, приводя к процессам коррозии углеродистой стали [15].

При проведении исследований в хранилищах РАО в Национальной лаборатории в Саванна-Ривер (США) подробно изучен процесс биогенно-индуцированной коррозии алюминиевых поверхностей контейнеров в биопленках, в первую очередь за счет контакта с биогенным сульфидом. Установлен высокий уровень биообращения алюминиевых поверхностей, причем его рост коррелировал с интенсивностью развития питтингов на поверхности [16].

В Российской Федерации проводились исследования по биокоррозии цемента в

приповерхностном хранилище ФГУП НПО «Радон». Так, в цементных компаундах, полученных при отверждении нитратсодержащих жидких радиоактивных отходов, были обнаружены бактерии, представители рода *Pseudomonas*, способствующие образованию азота, углекислого газа, ацетат-, пропионат- и бутират-ионов. Было обнаружено, что биогенные процессы негативно действуют на портландцементную матрицу, наблюдается карбонизация и нейтрализация основных минералов цементного камня с образованием растворимых и вымываемых водой солей [17].

Геобиологические программы для будущих хранилищ. Наиболее широко представлены работы по изучению мест размещения будущих ПГЗРО. Наиболее крупная программа ведется OECD NEA и объединяет 38 стран [18–21].

В данных работах исследуются не только биогеохимические особенности мест будущей локализации РАО, но и микробиологические характеристики современных барьерных материалов. Особое внимание уделяется глинистым барьерным материалам, как одним из наиболее перспективных.

В работах [22, 23] показано, что природные глины содержат крайне богатое и разнообразное микробное сообщество. В работе [24] рассматривался вопрос биокоррозии медных канистр в контакте с бентонитовым барьером. Установлена роль сульфатредуцирующих бактерий, приводящих к коррозии меди за счет биогенного сульфида. В публикациях [25, 26] проведен анализ изменения сорбционных свойств глин под воздействием микробных процессов.

Мировой опыт проведения биологических экспериментов в ПИЛ. Наиболее интересными являются эксперименты, проведенные *in situ* в подземных исследовательских лабораториях.

Один из таких экспериментов проводился на протяжении 20 лет в ПИЛ при хранилище Mont Terri, на глубине 300 м. В этих экспериментах стимулировались процессы образования водорода в качестве донора электронов для микрофлоры и были определены 6 потенциально возможных процессов: образование сульфида за счет литотрофной сульфатредукции (с использованием водорода в качестве восстановителя), гетеротрофная сульфатредукция с использованием ацетата и микробная коррозия стали. В работе [27] изучались процессы микробного газообразования, переноса радионуклидов с биогенными комплексами и роль биопленок в миграции радионуклидов.

В таблице 1 представлен международный опыт микробиологических исследований в ПИЛ.

Таблица 1. Международный опыт микробиологических исследований в ПИЛ

Пункт	Страна	Примечания	Литературный источник
OLKILUOTO, ONKALO	Финляндия	Микробиологические исследования 1997–2010 гг., глубина до 800 м, оценка микробного превращения железа и изменение сорбционной емкости пород	[28]
Гранит Стрипа	Швеция	Микробиологические исследования, глубина проб 812–820 м и 970–1240 м. Оценка ролей микробной трансформации железа и серы в миграции радионуклидов, образование метана	[29]
Asse	Германия	Микробиологические исследования	[30]
Grimsel Test Site	Швейцария	<i>In situ</i> эксперименты, микробные тесты устойчивости барьеров, сульфатредукция, коррозия стали. Эксперимент FEBEX (Full-scale Engineered Barrier EXperiment)	[31]
Mont Terri Rock Laboratory	Награ, Швейцария	20-летние натурные испытания, коррозия стали, газообразование, разрушение глин	[27]
HADES underground laboratory	Бельгия	<i>In situ</i> эксперименты по коррозии стали	[32]
Лаборатория Aspö,	Оскархамн, Швеция	Проект Microbe Project 2001. <i>In situ</i> эксперименты. Эксперименты по коррозии стали, изменению свойств глин, определение параметров газообразования, определение параметров сульфатредукции	[33]

Направления экспериментальных исследований по определению влияния биогенных процессов в ПИЛ ПГЗРО НКМ

Контакт планируемых для захоронения в ПГЗРО НКМ РАО с геологической средой, вне сомнения, будет проходить в присутствии микрофлоры как аборигенной, так и привнесенной извне. При этом велика вероятность интенсификации микробных процессов за счет температурных эффектов разогрева среды, выхода радиолитических газов — доноров электронов в микробных процессах дыхания (водород, метан, СО и др.), выхода биогенных элементов из матриц: фосфатов из стекломатриц, железа из стальных контейнеров, калия, натрия и кальция, а также органического вещества из глинистых материалов и матриц, содержащих отходы.

Также необходимо упомянуть, что бактериальная деятельность может приводить к образованию коллоидных частиц, что может явиться причиной коллоидного переноса радионуклидов.

Проектный контейнер изолирующий (КИ) для РАО 1 класса представляет собой мультибарьерную систему, включающую: бидон — первичная упаковка РАО в остеклованной форме, чехол, пенал и контейнер из углеродистой стали (между чехлом и внешней стенкой КИ помещены слои бентонита и алюминатного бетона), с внешней стороны КИ, между стенкой КИ и нарушенной при бурении зоной, помещается тиксотропный шликер. Зоны биогенных процессов в этой системе схематически представлены на рис. 1.

Программа исследования биогенных процессов в ПИЛ ПГЗРО НКМ должна обеспечить

получение данных о роли биогенных процессов в условиях объекта:

- генерации газов (метан, углекислый газ);
- ускорении коррозии стальных материалов при помощи продуцирования коррозионно-активных компонентов (сульфидов, кислот, комплексонов);
- продуцировании метаболитов, образующих комплексные соединения с радионуклидами;
- изменении геохимического окружения (изменение макрохимических параметров воды, рН, Eh);
- изменении подвижности радионуклидов;
- изменении характеристик ИББ на основе глинистых материалов.

На основании всего вышесказанного нами предлагается 9 направлений экспериментов по исследованию влияния биогенных процессов в ПИЛ на барьеры и перенос радионуклидов:

1. Исследование состава и физиологического разнообразия микробного сообщества в зоне кристаллического массива;
2. Исследование процессов коррозии в присутствии и с участием живой микрофлоры в условиях анаэробной среды;
3. Исследование влияния облучения на микрофлору (эксперименты с отобранными образцами микрофлоры и ее естественной среды в лабораторных условиях);
4. Исследование активности микроорганизмов в материале барьеров в объектовых условиях, уделяя особое внимание исследованию сероокисляющих и серовосстанавливающих, а также железокисляющих и железовосстанавливающих микроорганизмов;

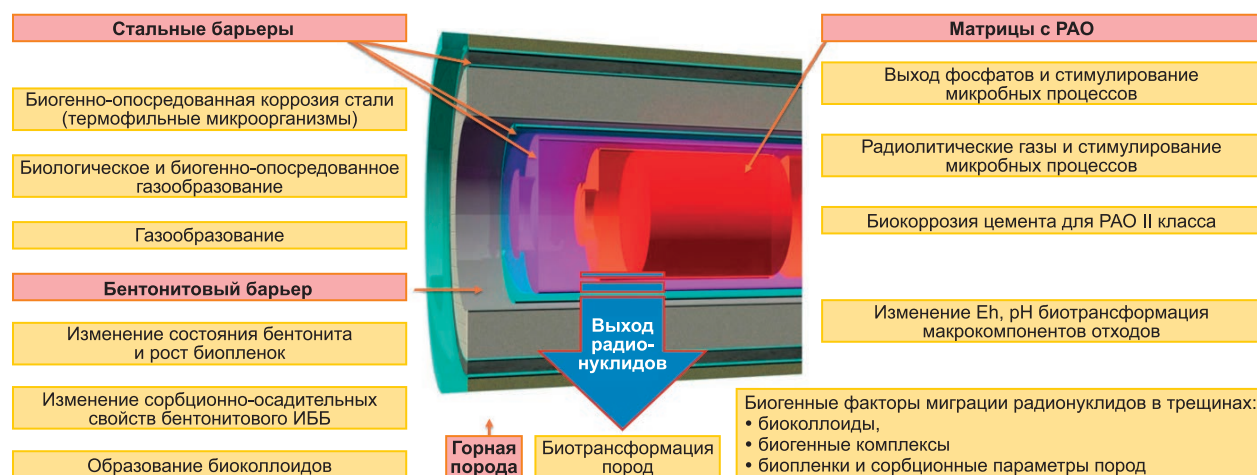


Рис. 1. Зоны биогенных процессов в проектной суперконтейнере РАО 1 класса ПГЗРО НКМ

5. Изменение сорбционных и диффузионных свойств породы при наличии микробиологических пленок;
6. Исследование процессов формирования биокolloидов;
7. Исследование влияния продуктов выщелачивания матрицы РАО 1 класса и матрицы РАО 2 класса на биогенные процессы;
8. Оценка влияния аборигенной микрофлоры на ИББ и перенос радионуклидов;
9. Оценка влияния привноса неаборигенной микрофлоры на функции и свойства ИББ и перенос радионуклидов.

Основные ожидаемые результаты, получаемые в ходе запланированных экспериментов, — подтверждение свойств и качества материалов ИББ на предмет их стойкости к воздействию биогенных процессов в натуральных условиях в процессе эксплуатации ПИЛ для моделирования сценариев развития системы мультибарьерной защиты проектируемого ПГЗРО.

В качестве объекта исследований рассматриваются породы вмещающего массива, материалы ИББ: бентонит, материалы изолирующего контейнера, материалы матриц, включающие РАО.

Запланированные эксперименты в ПИЛ ПГЗРО НКМ разделяются на три основных подтипа:

1. Отбор проб и идентификация локальной микрофлоры:
 - идентификация аборигенной микрофлоры как в массиве породы, так и в материале трещин;
 - исследование структуры, свойств и направлений воздействия микробиологического сообщества в зоне массива.
2. Лабораторные эксперименты (проводимые в ПИЛ на установках):
 - исследование процессов коррозии, в том числе газообразования и поглощения кислорода, в присутствии и с участием живой микрофлоры;

- исследование влияния облучения на микрофлору (эксперименты с отобранными образцами микрофлоры и ее естественной среды в лабораторных условиях);
- исследование активности микроорганизмов в материале барьеров в объектовых условиях и их влияния на бентонит, в том числе оценка влияния продукции водорода на биоту).

3. Натурные *in situ* эксперименты:

- изменение сорбционных и диффузионных свойств породы при наличии микробиологических пленок;
- исследование процессов формирования биокolloидов;
- оценка влияния привноса неаборигенной микрофлоры по вышеуказанным направлениям;
- исследования переноса микроорганизмов сквозь материал ИББ;
- исследование влияния продуктов выщелачивания натрийалюмофосфатной матрицы РАО 1 класса на биогенные процессы;
- исследование влияния продуктов выщелачивания боросиликатной матрицы РАО 1 класса на биогенные процессы;
- исследование влияния продуктов выщелачивания матрицы РАО 2 класса на биогенные процессы.

Характеристики/параметры предмета измерений заключаются в оценке филогенетического разнообразия микроорганизмов на основе анализа генов 16S рРНК, численности микроорганизмов различных физиологических групп, скоростей биогенных процессов газообразования, коррозии стали, коррозии бентонита.

В ходе достижения целей работы должны применяться следующие технологии:

- высокопроизводительное секвенирование ДНК (генов 16S рРНК);

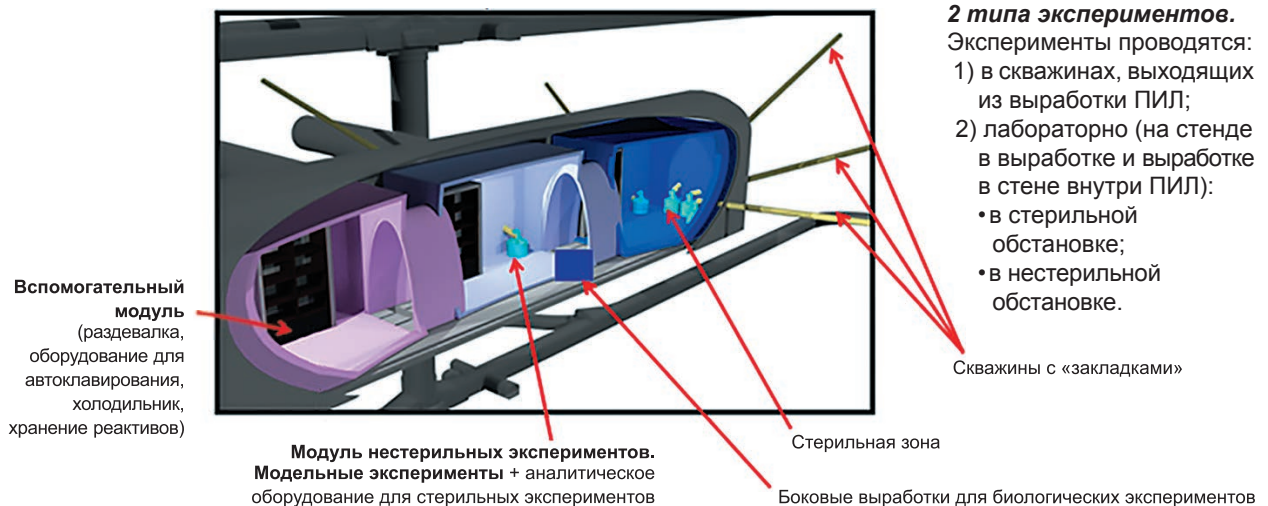


Рис. 2. Предлагаемая схема разделения экспериментов в ПИЛ ПГЗРО НКМ по биогенным направлениям

- посев природных проб на селективные питательные среды для определения численности микроорганизмов;
- лабораторные эксперименты для оценки скоростей биогенных процессов деструкции материалов и газообразования;
- натурные эксперименты для оценки скоростей биогенных процессов деструкции материалов и газообразования (отслеживается постоянно).

Ориентировочная схема разделения экспериментов в ПИЛ по биогенным направлениям отображена на рис. 2. Выработка должна затронуть ненарушенную в естественных условиях зону массива и зону трещиноватости. Требуется, чтобы зона исследования была пройдена как по трещиноватым породам, так и в ненарушенном массиве (слаботрещиноватые породы). Необходимо использовать выработки, натуральный макет скважины захоронения РАО класса 1, а также выработки для захоронения РАО класса 2.

Запланированный ряд исследований находится в тесной связи с проектами исследований, связанными с переносом коллоидов, а также миграцией радионуклидов в ближней и дальней зонах.

Выводы

В статье представлен план проведения экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния биогенных процессов, которые предполагается выполнить в условиях подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве Красноярского края. Описаны пути и процессы влияния биогенных процессов в условиях захоронения ПГЗРО НКМ.

Предложены три типа экспериментов ПИЛ ПГЗРО НКМ — отбор проб и идентификация локальной микрофлоры, лабораторные

эксперименты (проводимые в ПИЛ на установках) и натурные *in situ* эксперименты.

Литература

1. Подземная исследовательская лаборатория в Нижнеканском массиве. [Электронный ресурс] URL: http://www.norao.ru/about/underground/?fbclid=IwAR2pjBI3S5ow1yAs-rNIEORNZcvAyDTeKt4P-PQ-UkzGAJ1-NFM4AiW_og ПИЛ (дата обращения: 05.03.2019).
2. Cooper M. J., Tasker P. W. The Nirex Safety Assessment Research Programme; Annual Report for 1987/88. Nirex Rpt NSS R-102 (1988).
3. West J. M., Hooker P. J., McKinley I. G. Geochemical Constraints on the Microbial Contamination of a Hypothetical UK Deep Geological Repository. Br. Geological Survey, FLPU 84-8 (1984).
4. European microbiology related to the subsurface disposal of nuclear waste. N Christof, JC Philp - Microbiology of the Deep Subsurface. CRC ..., 1997.
5. West J. M., Grogan H. A., McKinley I. G. The Role of Microbiology in the Geological Containment of Radioactive Wastes. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88900-3.50024-2/>.
6. Penny S. Amy, Dana L. Halderman. Microbiology of the Terrestrial Deep Subsurface Microbiology of Extreme & Unusual Environments CRC Press, 1997. ISBN 0849383625, 9780849383625.
7. Microbial processes in radioactive waste disposal Pedersen, Karsten Apr 2000; 97 p; ISSN 1404-0344.
8. Necib S. et al. Corrosion of carbon steel in clay environments relevant to radioactive waste geological disposals, Mont Terri rock laboratory (Switzerland) // Mont Terri Rock Laboratory, 20 Years. Birkhäuser, Cham, 2018. С. 331—344.
9. Smart N. R. et al. The anaerobic corrosion of carbon steel in compacted bentonite exposed to natural

- Opalinus Clay porewater containing native microbial populations // Corrosion Engineering, Science and Technology. 2017. Vol. 52. sup1. P. 101–112.
10. *Pusch R.* Mobility and survival of sulphate-reducing bacteria in compacted and fully water saturated bentonite – microstructural aspects. SKB TR-99-30. Svensk Kärnbränslehantering AB. 1999.
 11. *Pedersen K.* Microbial processes in radioactive waste disposal. SKB TR-00-04. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2000.
 12. *Stroes-Gascoyne S., Hamon C. J., Dixon D. A.* The effects of dry density and porewater salinity on the physical and microbiological characteristics of highly compacted bentonite. Ontario Power Generation Report No. 06819-REP-01200-10016-R00. 2006.
 13. JNC, H12: Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan. Supporting Report 2. Repository design and engineering technology. JNC TN1410 2000-003, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Tokai, Japan. 2000.
 14. *Fredrickson J. K., Zachara J. M., Balkwill D. L., et al.* Geomicrobiology of high-level nuclear waste-contaminated vadose sediments at the Hanford site, Washington state // *Appl Environ Microbiol.* 2004 Jul; 70 (7):4230-41.
 15. *Whonchee Lee, Zbigniew Lewandowski, Per H. Nielsen & W. Allan Hamilton.* Role of sulfatereducing bacteria in corrosion of mild steel: A review // *The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research.* 1995. Volume 8, Issue 3. Pages 165–194. <https://doi.org/10.1080/0892701950937827>
 16. *Moreno D. A., Ibars J. R., Ranninger C., De Mele M. F. L., Videla H. A.* Evaluation of Stainless Steel Susceptibility to Microbiologically Influenced Corrosion: An Updated Review. In: Llewellyn G.C., Dashek W.V., O'Rear C.E. (eds) *Mycotoxins, Wood Decay, Plant Stress, Biocorrosion, and General Biodeterioration.* Biodeterioration Research, vol 4. Springer, Boston, MA. 1994.
 17. Microbiological Aspects of Radioactive Waste Storage // *Radiationnaia biologii, radioecologii.* 2015. 55(3) 015, c. 293–301 DOI: 10.7868/S0869803115020125.
 18. Report 2016 Äspö Hard Rock Laboratory Annual Report 2016. SKB TR-17-10.
 19. The Microbe project Achievements of a 10-year research programme. SKB R-13-49.
 20. *Edlund J. et al.* Microbial Investigations During Infiltration Experiment (INEX) Phase 2 // Posiva Working Report. 2016. Vol. 38. P. 1–39.
 21. *Olivier X. Leupin, Rizlan Bernier-Latmani, Alexandre Bagnoud, Hugo Moors, Natalie Leys, Katinka Wouters, Simcha Stroes-Gascoyne.* Fifteen years of microbiological investigation in Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory (Switzerland) // *Swiss J Geosci* (2017) 110:343–354.
 22. *Stroes-Gascoyne S., Pedersen K., Haveman S. A., Dekeyser K., Arlinger J., Daumas S., Ekendahl S., Hallbeck L., Hamon C. J., Jahromi N., Delaney T.-L.* Occurrence and identification of microorganisms in compacted clay-based buffer material designed for use in a nuclear fuel waste disposal vault // *Can. J. Microbiol.*, Dec;43(12):1133-46. (1997).
 23. *Stroes-Gascoyne S, West J. M.* Microbial studies in the Canadian nuclear fuel waste management program // *FEMS Microbiol Rev.* 1997 Jul; 20(3-4):573-90.
 24. *Pedersen K.* Analysis of copper corrosion in compacted bentonite clay as a function of clay density and growth conditions for sulfate-reducing bacteria // *Journal of applied microbiology.* 2010. Vol. 108. No. 3. P. 1094–1104.
 25. *Pedersen K., Motamedi M., Karnland O., Sandén T.* Mixing and sulphate-reducing activity of bacteria in swelling, compacted bentonite clay under high-level radioactive waste repository conditions // *J Appl Microbiol.* 2000 Dec; 89(6):1038-47.
 26. Clays sorption capacity changes. Microbial Influence on the Performance of Subsurface, Salt-Based Radioactive Waste Repositories. Nuclear Energy Agency (NEA) 46, quai Alphonse Le Gallo 92100 Boulogne-Billancourt, France.
 27. *Alexandre Bagnoud Karuna Chourey, Robert L., Hettich et al.* // *Nature Communications*, volume 7, Article number :1 2770 (2016).
 28. *Pedersen K.* Microbial Analytics, Sweden. Title SUMMARY REPORT, MICROBIOLOGY OF OLKILUOTO AND ONKALO GROUNDWATER. ISBN 978-951-652-222-0.
 29. *Ekendahl S, Arlinger J, Ståhl F, Pedersen K.* Characterization of attached bacterial populations in deep granitic groundwater from the Stripa research mine by 16S rRNA gene sequencing and scanning electron microscopy // *Microbiology.* 1994 Jul;140 (Pt 7):1575-83.
 30. *Zirnstein I, Arnold T, Roeske K.* Identification of the Microbial Community in Salt Sumps of the Asse II Pit, a Former Salt Mine Used as a Deep Geological Repository for Intermediate and Low Level Radioactive Waste.
 31. *Ino K, Konno U, Kouduka M.* Deep microbial life in high-quality granitic groundwater from geochemically and geographically distinct underground boreholes // *Environ Microbiol Rep.* 2016 Apr;8(2):285-94. doi: 10.1111/1758-2229.12379.
 32. International co-operation and partnerships at the Hades underground research facility (MOL, BELGIUM) A. Sneyers, G. Volckaert, Belgian Nuclear Research Centre SCKCEN Boeretang 200, B-2400 Mol.
 33. Äspö Hard Rock Laboratory – Annual Report 2002 (SKB TR-03-10).

Информация об авторах:

Сафонов Алексей Владимирович, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН (119071, Москва, Ленинский проспект, д. 31, корпус 4), e-mail: alexeysafonof@gmail.com.

Болдырев Кирилл Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., 52), e-mail: kaboldyrev@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Сафонов А. В., Болдырев К. А. Исследование биогенных процессов в ПИЛ ПГЗРО в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 2 (7). — С. 92—100. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-92-100.

URL IN THE NIZHNEKANSKIY MASSIF: STUDYING BIOGENIC PROCESSES UNDER HLW DISPOSAL PROJECT

Safonov A. V.¹, Boldyrev K. A.²

¹A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of RAS, Moscow, Russia

²Nuclear Safety Institute of RAS, Moscow, Russia

Article received 30 April 2019

The plan of carrying out the pilot studies directed to studying of impact of biogenic processes which are supposed to be executed in the conditions of underground research laboratory in the Nizhnekansky massif of Krasnoyarsk Krai is presented in article. The literary review which described results of researches of biogenic processes in foreign laboratories is carried out. Ways and processes of impact of biogenous processes in the conditions of the URL of the high-level waste disposal facilities at the Nizhnekanskiy massif are described.

Keywords: biogenic processes, indigenous microflora, biocorrosion, underground research laboratory, Nizhnekansky massif, geochemistry, safety barriers.

References

1. URL: http://www.norao.ru/about/underground/?fbclid=IwAR2pjBI3S5ow1yAs-rNIEORNZcvAyDTekt4PPQ-UkzGAj1-NFM4AiW_ogПИЛ (accessed: 05.03.2019).
2. Cooper M. J., Tasker P. W. The Nirex Safety Assessment Research Programme; Annual Report for 1987/88. Nirex Rpt NSS R-102 (1988).
3. West J. M., Hooker P. J., McKinley I. G. *Geochemical Constraints on the Microbial Contamination of a Hypothetical UK Deep Geological Repository*. Br. Geological Survey, FLPU 84-8 (1984).
4. European microbiology related to the subsurface disposal of nuclear waste. N Christof, JC Philp — Microbiology of the Deep Subsurface. CRC ..., 1997.
5. West J. M., Grogan H. A., McKinley I. G. The Role of Microbiology in the Geological Containment of Radioactive Wastes. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88900-3.50024-2/>.
6. Penny S. Amy, Dana L. Halderman. *Microbiology of the Terrestrial Deep Subsurface Microbiology of Extreme & Unusual Environments* CRC Press, 1997. ISBN 0849383625, 9780849383625.
7. Microbial processes in radioactive waste disposal Pedersen, Karsten Apr 2000; 97 p; ISSN 1404-0344.
8. Necib S. et al. Corrosion of carbon steel in clay environments relevant to radioactive waste geological disposals, *Mont Terri rock laboratory* (Switzerland). Mont Terri Rock Laboratory, 20 Years. Birkhäuser, Cham, 2018. С. 331—344.
9. Smart N. R. et al. The anaerobic corrosion of carbon steel in compacted bentonite exposed to natural Opalinus Clay porewater containing native microbial populations. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2017, vol. 52, sup1, p. 101—112.
10. Pusch R. Mobility and survival of sulphate-reducing bacteria in compacted and fully water saturated bentonite — microstructural aspects. SKB TR-99-30. Svensk Kärnbränslehantering AB. 1999.
11. Pedersen K. Microbial processes in radioactive waste disposal. SKB TR-00-04. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2000.
12. Stroes-Gascoyne S., Hamon C. J., Dixon D. A. The effects of dry density and porewater salinity on the physical and microbiological characteristics of highly compacted bentonite. Ontario Power Generation Report No. 06819-REP-01200-10016-R00. 2006.

13. JNC, H12: Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan. Supporting Report 2. Repository design and engineering technology. JNC TN1410 2000-003, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Tokai, Japan. 2000.
14. Fredrickson J. K., Zachara J. M., Balkwill D. L., et al. Geomicrobiology of high-level nuclear waste-contaminated vadose sediments at the Hanford site, Washington state. *Appl Environ Microbiol.* 2004 Jul; 70 (7):4230-41.
15. Whonchee Lee, Zbigniew Lewandowski, Per H Nielsen & W Allan Hamilton. Role of sulfatereducing bacteria in corrosion of mild steel: A review. *The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, 1995, vol. 8, iss. 3, p. 165–194. <https://doi.org/10.1080/0892701950937827>
16. Moreno D.A., Ibars J.R., Ranninger C., De Mele M.F.L., Videla H. A. Evaluation of Stainless Steel Susceptibility to Microbiologically Influenced Corrosion: An Updated Review. In: Llewellyn G. C., Dashek W. V., O’Rear C. E. (eds) Mycotoxins, Wood Decay, Plant Stress, Biocorrosion, and General Biodeterioration. *Biodeterioration Research*, vol 4. Springer, Boston, MA. 1994.
17. Microbiological Aspects of Radioactive Waste Storage. *Radiatsionnaia biologii, radioecologii*. 2015. 55 (3) 015, c. 293–301 DOI: 10.7868/S0869803115020125.
18. Report 2016 Äspö Hard Rock Laboratory Annual Report 2016. SKB TR-17-10.
19. The Microbe project Achievements of a 10-year research programme. SKB R-13-49.
20. Edlund J. et al. Microbial Investigations During Infiltration Experiment (INEX) Phase 2. *Posiva Working Report*, 2016, vol. 38, p. 1–39.
21. Olivier X. Leupin, Rizlan Bernier-Latmani, Alexandre Bagnoud, Hugo Moors, Natalie Leys, Katinka Wouters, Simcha Stroes-Gascoyne. Fifteen years of microbiological investigation in Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory (Switzerland). *Swiss J Geosci* (2017) 110:343–354.
22. Stroes-Gascoyne S., Pedersen K., Haveman S.A., Dekeyser K., Arlinger J., Dumas S., Ekendahl S., Hallbeck L., Hamon C.J., Jahromi N., Delaney T.-L. Occurrence and identification of microorganisms in compacted clay-based buffer material designed for use in a nuclear fuel waste disposal vault. *Can J Microbiol.*, Dec; 43(12):1133-46. (1997).
23. Stroes-Gascoyne S, West J.M. Microbial studies in the Canadian nuclear fuel waste management program. *FEMS Microbiol Rev.* 1997 Jul; 20(3-4):573-90.
24. Pedersen K. Analysis of copper corrosion in compacted bentonite clay as a function of clay density and growth conditions for sulfate-reducing bacteria. *Journal of applied microbiology*, 2010, vol. 108, no. 3, p. 1094–1104.
25. Pedersen K., Motamedi M., Karnland O., Sandén T. Mixing and sulphate-reducing activity of bacteria in swelling, compacted bentonite clay under high-level radioactive waste repository conditions. *J Appl Microbiol*, 2000 Dec; 89(6):1038-47.
26. Clays sorption capacity changes. Microbial Influence on the Performance of Subsurface, Salt-Based Radioactive Waste Repositories. Nuclear Energy Agency (NEA) 46, quai Alphonse Le Gallo 92100 Boulogne-Billancourt, France.
27. Alexandre Bagnoud Karuna Chourey, Robert L., Hettich et al. *Nature Communications*, volume 7, Article number :1 2770 (2016).
28. Pedersen K. Microbial Analytics, Sweden. Title SUMMARY REPORT, MICROBIOLOGY OF OLKI-LUOTO AND ONKALO GROUNDWATER. ISBN 978-951-652-222-0.
29. Ekendahl S, Arlinger J, Ståhl F, Pedersen K. Characterization of attached bacterial populations in deep granitic groundwater from the Stripa research mine by 16S rRNA gene sequencing and scanning electron microscopy. *Microbiology*, 1994 Jul;140 (Pt 7):1575-83.
30. Zirnstein I, Arnold T, Roeske K. Identification of the Microbial Community in Salt Sumps of the Asse II Pit, a Former Salt Mine Used as a Deep Geological Repository for Intermediate and Low Level Radioactive Waste.
31. Ino K, Konno U, Kouduka M. Deep microbial life in high-quality granitic groundwater from geochemically and geographically distinct underground boreholes. *Environ Microbiol Rep*, 2016 Apr;8(2):285-94. doi: 10.1111/1758-2229.12379.
32. International co-operation and partnerships at the Hades underground research facility (MOL, BELGIUM) A. Sneyers, G. Volckaert, Belgian Nuclear Research Centre SCKCEN Boeretang 200, B-2400 Mol.
33. Äspö Hard Rock Laboratory — Annual Report 2002 (SKB TR-03-10).

Information about the authors

Safonov Aleksey Vladimirovich, PhD, Senior Researcher, A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS (31, Leninsky Av., Moscow, 119071), e-mail: alexeysafonof@gmail.com.

Boldyrev Kirill Aleksandrovich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tulsкая St., Moscow, 115191), e-mail: kaboldyrev@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Safonov A. V., Boldyrev K. A. URL in the Nizhnekanskiy Massif: Studying Biogenic Processes under HLW Disposal Project. *Radioactive Waste*, 2019, no.2(7), pp. 92–100. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-92-100. (In Russian).