

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию Сафонова Алексея Владимировича

на тему: «Биогеохимический *in situ* барьер в загрязненных подземных водах на предприятиях ядерно-топливного цикла», представленную на соискание

ученой степени доктора химических наук

по специальности 1.4.13 – «Радиохимия»

Актуальность избранной темы. Диссертационная работа Алексея Владимировича Сафонова посвящена практическому решению проблемы загрязнения подземных вод и прилегающих к предприятиям ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) территорий радиоактивными отходами низкого уровня активности (НАО). На сегодняшний день в РФ в водоемах-хранилищах различного типа накоплено более 500 млн м³ НАО, большая часть которых представляют рудные отвалы, содержащие природные изотопы ²³⁸U, ²³²Th, ²²⁴Ra. Помимо собственно радиоактивных отходов большую экологическую опасность представляет загрязнение подземных вод макрокомпонентами радиоактивных отходов - нитрат-, сульфат- и карбонат-ионами, ионами аммония, повышенная концентрация которых способствует миграции радиоактивных элементов, растворимых форм долгоживущих радионуклидов: актинидов (U, Np, Pu, Am), а также продуктов деления и активации радиоактивных элементов (Cl, Cs, Se, Sr, Tc). На сегодняшний день большинство предприятий ЯТЦ расположены вблизи населенных пунктов и используют поверхностные хранилища для размещения твердых и гетерогенных радиоактивных отходов, представляя, таким образом, существенную экологическую опасность для населения и окружающей среды. Поскольку приоритетность консервации поверхностных хранилищ РАО определяется Стратегией Экологической безопасности РФ, утвержденной Указом Президента РФ №176 от 19 апреля 2017 г., актуальность выбранной автором темы не вызывает никаких сомнений.

Научная новизна результатов. Работа, представленная диссертантом является уникальной, т.к. представляет собой междисциплинарное исследование, выполненное на стыке радиохимии, микробиологии и геологии, направленное на решение конкретной экологической задачи, имеющей высокую степень актуальности – создание биогеохимического барьера, способствующего инаktivации радиоактивных элементов и долгоживущих радионуклидов, а также самоочистке подземных вод от повышенных содержаний окисленных форм азота и сульфатов. Автором изучены роль микробных процессов в коллоидном и псевдоколлоидном транспорте актинидов, выявлены условия формирования биогеохимических барьеров, разработаны методики биоремедиации подземных вод в лабораторных и полевых экспериментах, получены активные накопительные и чистые культуры бактерий, участвующих в этом процессе. Важно отметить, что эффективность предложенных методик и их экономическая выгода доказана апробацией на шести предприятиях ЯТЦ. Таким образом, помимо научной новизны полученные данные имеют высокую практическую значимость.

Достоверность научных положений и выводов работы. Обоснованность полученных результатов доказана репрезентативной группой исследованных – это пробы загрязненных подземных вод, отобранные с глубины 10-20 м в районе урановых шламохранилищ четырех предприятий переработки урановых и полиметаллических руд, хранилища РАО бассейна Б2 и хранилища Сублиматного завода АО «СХК», а также пробы болотных вод вблизи шламохранилища ПАО «НЗХК». При выполнении работ диссертантом был использован широкий спектр аналитических методов, оценивающих химический состав растворов, методов, позволяющих получить объективную информацию о фазовом составе и структуре твердых образцов, а также традиционные и современные методы микробиологического анализа, позволяющие адекватно оценить не только филогенетическое разнообразие исследуемых микробных сообществ накопительных и чистых культур, но и их

функциональное разнообразие и метаболический потенциал. Достоверность полученных результатов подтверждается комплексным характером диссертационной работы, числом экспериментов, проведенных на отдельных этапах исследования, адекватной статистической обработкой фактических данных и не вызывает сомнений.

Анализ структуры и содержания диссертации. Диссертация А.В. Сафонова построена по традиционному плану и состоит из введения, обзора литературы, главы материалов и методов, пяти глав собственных результатов с выводами, заключения, представляющего собой отдельную главу, общих выводов, списка работ, опубликованных автором, списка использованных сокращений, списка использованной литературы, включающей 443 наименования, опубликованных на русском (46) и английском (397) языках. Работа изложена на 307 страницах, содержит 98 таблиц и 113 рисунков.

В диссертационной работе сформулировано 6 защищаемых положений, констатирующих основные результаты, полученные автором в ходе проведенных экспериментальных работ, как лабораторных, так и полевых, выполненных на предприятиях ЯТЦ. Все защищаемые положения обоснованы и достоверность полученных А.В. Сафоновым результатов не вызывает сомнений.

Наиболее ценным научным результатом диссертационной работы А.В. Сафонова следует признать предложенную им модель биогеохимического барьера, действующего в водоносных горизонтах с комплексным загрязнением, формирующегося после закачки растворов, содержащих как органические соединения, служащие субстратами для аутигенной микрофлоры, так и неорганических (например, сульфатов), которые используются в качестве акцепторов электронов. Автором доказано, что компоненты биогеохимического барьера имеют четко выраженное временное распределение, обусловленное химическими особенностями поллютантов, кинетикой протекающих микробиологических процессов и физико-

химическими параметрами водоносных горизонтов, прежде всего окислительно-восстановительным потенциалом, минеральным составом водовмещающих пород и грунтов и формирующихся в результате деятельности микроорганизмов аутигенных минералов. А. В. Сафонов на основании обширного ряда лабораторных и полевых экспериментов выделил шесть последовательно формирующихся и перекрывающихся компонентов биогеохимического барьера и определил условия, необходимые для, иммобилизации радиоактивных элементов, актинидов, а также восстановления или окисления макрокомпонентов, загрязняющих подземные воды на территории хранилищ предприятий ЯТЦ – соединений азота, карбонат- и сульфат- ионов.

Выводы, приведенные в конце диссертационной работы, сформулированы достаточно четко и в краткой форме излагают наиболее существенные и обоснованные главные итоги исследования, выполненного в соответствии с поставленными целями и задачами.

Значимость для практики выводов и рекомендаций. Работа А.В. Сафонова имеет большое прикладное значение особенно в области радиохимии, занимающейся реабилитацией территорий, загрязненных радиоактивными отходами низкого уровня активности, что делает ее особенно ценной в современных реалиях. Диссертантом предложены и опробованы технологии, способствующие очистке подземных вод. Выработаны конкретные рекомендации по использованию отходов пищевого производства для активации автохтонной микрофлоры подземных вод, способствующей восстановлению нитратов, формированию восстановленных минеральных фаз (прежде всего, минералов железа), инактивирующих радиоактивные отходы, проведена оценка стоимости материалов для очистки подземной воды на примере полевого эксперимента на одном из предприятий ЯТЦ. Автором показано, что использование автохтонной микрофлоры является экономически оправданным и эффективным методом очистки подземных вод,

показана возможность реализации мер, направленных на формирование биогеохимического барьера для различных объектов с комплексным загрязнением, включая зоны аэрации в болотах и приповерхностных водах с комплексным загрязнением, в донных отложениях искусственных и природных водоемов, в водоносных горизонтах, используемых для закачки жидких радиоактивных отходов. В результате полевых испытаний проведена очистка более 600 м³ подземных вод и получен акт о внедрении метода от АО «СХК». Предложенные разработки защищены 4-мя патентами.

Подтверждение опубликованных результатов диссертации в научной печати. Материалы диссертационной работы полностью отражены в автореферате. Список публикаций автора по теме диссертации включает 53 печатные работы, в журналах, входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации. Содержание автореферата в полной мере отражает основные идеи, этапы и выводы диссертационной работы, которые прошли экспертизу и нашли отражение в публикациях автора в ведущих мировых и отечественных научных изданиях.

Достоинства и недостатки диссертационной работы, замечания по работе, вопросы. Основным и несомненным достоинством работы является ее междисциплинарность. Диссертантом проведена огромная работа, включающая как лабораторные эксперименты, так и полевые исследования и длительные эксперименты на объектах предприятий ЯТЦ. Для их проведения было необходимо освоить комплекс методов классической и молекулярной микробиологии, а интерпретация полученных результатов требует не только практических навыков, но и высокой степени осведомленности в указанной области биологических наук. Представленные в работе результаты свидетельствуют о том, что А.В. Сафоновым с успехом освоена практическая

микробиология, а имеющиеся знания в области экологии микроорганизмов позволили сделать представленные в работе выводы.

Недостатки работы. Существенным недостатком представленной работы, зачастую мешающим восприятию и без того довольно объемного и сложного материала, является небрежность его изложения. Видно, что основные усилия были потрачены автором на вычитку автореферата, хотя и он содержит погрешности стилистического характера, опечатки и неточности. Чтение диссертации никак нельзя назвать легким: текст изобилует пунктуационными ошибками (зачастую отсутствуют точки между предложениями), неряшливостью в ссылках на литературу (приводятся или полные ссылки или ссылки цифрами), многочисленными стилистическими погрешностями, неудачными переводами фрагментов из англоязычной литературы, зачастую приводящими к превратному пониманию текста, описками и ошибками в названиях рисунков и таблиц (например Рис. 3, 5, 16, 19, табл. 98 и т.д.), отсутствием легенд к таблицам, позволяющим понять использование в них цвета (Таблицы 33, 35, 40, 43, 44, 80, рис. 39). В диссертации много научных жаргонизмов, англиканизмов («ресолюбилизация» с. 38 и т.п.). В таксономических названиях прокариот часто отсутствует курсив (например, Табл. 53, с. 174), филумы автором упорно называются типами (с. 67). Раздел 1.8 в литературном обзоре, посвященный микроорганизмам подземных вод написан для неспециалиста избыточно подробно, здесь нужно было сделать акцент на экологии микроорганизмов, не вдаваясь в биохимические особенности метаболизма отдельных групп, которые для работы не важны, но написаны недостаточно аккуратно. В целом, функциональные возможности бактерий оцениваются диссертантом с избыточной категоричностью. В качестве примера на странице 259 автор пишет, что род *Thiobacillus* состоит из облигатных аэробов. Однако, род *Thiobacillus* состоит не только из облигатно аэробных бактерий. В него входят и факультативно анаэробные виды, например, *Thiobacillus thiophilus*

(Kellermann, Griebler, 2009). Действительно ли автор полагает, что к этому роду относится *Sulfurifurela plumbofilus* и *Sulfurifurela multivorans*?

Чрезмерное количество таблиц (98) и рисунков (113) отнюдь не облегчает восприятие текста, поскольку их обсуждению автор уделяет минимум внимания и предоставляет читателю самому проводить анализ представленного в них фактического материала. Кстати, в них тоже встречаются ошибки (например, Рисунок 38 Archaea - это домен, а не филум; Рисунок 109. Как определялась скорость сульфатредукции? Концентрация чего приведена по оси ординат?). В некоторых случаях обсуждение рисунков и таблиц и ссылки на них следуют после их появления в тексте (например, рис. 39). Следует заметить, что диссертационная работа – это, прежде всего, обобщение полученных результатов и, на мой взгляд, задача диссертанта заключается в правильном расставлении акцентов, позволяющих обосновать сделанные в конце выводы, пусть даже и за счет сокращения имеющихся в его распоряжении фактических данных. В данном случае присутствует перекокс на избыточном, по моему мнению, анализе разнообразия микробных сообществ с применением различных методов в ущерб данным, которые существенно облегчили бы восприятие основных результатов, связанных с иммобилизацией радиоактивных отходов.

По тексту диссертации имеется ряд вопросов и замечаний.

1. Существенным недостатком является отсутствие в диссертации четкого описания условий и методик пробоотбора и закачки органических смесей с последующим пробоотбором в опытах на предприятиях ЯТЦ. В тексте не приведены геологические разрезы и нет никаких сведений о скважинах на исследованных объектах (нет конструкций, сведений об их техническом состоянии, не приведено расположение кустов скважин в плане и разрезе), что делает приведенную нумерацию скважин мало что значащими абстрактными понятиями. Между тем эта информация является критически важной для адекватной оценки наблюдаемых процессов. На основании чего сделаны выводы о скоростях движения подземных вод в водоносных

горизонтах? Имеются ли в распоряжении автора какие-то данные по «оценке скорости движения подземных вод, определения зон разгрузки горизонта» (с. 246, 252, табл. 94 - В целом, правильнее было бы дать количественную оценку в столбце Проблема)? Каким образом определялся состав водовмещающих пород? Как отбирались пробы грунтов? Какие расстояния между скважинами? Что подразумевается под «приповерхностным горизонтом» с. 210. С какой глубины отобрана проба если в целом работы велись с неглубокими скважинами (10-20 м)?

2. Правильно ли я поняла, что сведения о численности основных групп сделаны на основании работы с селективными средами методом десятикратных разведений? Если это так, то какое отношение к реальности имеют, например, полученные результаты, представленные на рисунке 30 для скважин 70 и 79, с рН 9.0-10.0, если для определения численности физиологических групп использованы среды (см. методы) с близнейтральными значениями рН? В целом насколько, по мнению автора, может быть значима роль алкалофильных микроорганизмов в исследуемых процессах? С чем связаны колебания значений рН в исследованных водоносных горизонтах, в частности, столь существенные в скважинах АО «АЭХК» и ОАО «ПО ЭХЗ» (Таблица 30)? Почему щелочные условия были проигнорированы автором в экспериментах с накопительными культурами?

3. Раздел 7.5. Как проводился отбор проб из скважин? На чем основано утверждение, что снижение концентрации марганца (с. 200) связано с образованием сульфидных фаз? Геохимически этот вывод представляется необоснованным.

4. Эксперименты по «выщелачиванию железа» (раздел 7.8.4) проводились в анаэробных условиях? При каких значениях рН? В исследованных минералах железо имеет разную степень окисления (+2) пирит и сидерит и (+3) гематит. Какова роль железовосстанавливающих бактерий в случае пирита и сидерита? К эксперименту с каким минералом относится рисунок 91 и таблица 84? В таблице 86 есть данные по биотиту. Были ли

проведены с ним эксперименты, аналогичные трем вышеуказанным минералам?

5. Таблица 90, Рисунок 99. Имеет ли место пространственное зонирование компонентов биогеохимического барьера или оценивалась только временная составляющая?

6. Из таблицы 91 следует, что большинство перечисленных в ней факторов могут способствовать как мобилизации, так и иммобилизации актинидов. Такое положение требует, как минимум, дополнительных пояснений, в противном случае, приведенные данные свидетельствуют о том, что лишь подщелачивание среды и восстановительные условия с образованием сульфидов являются значимыми факторами их иммобилизации.

7. Раздел 8.4.3. Для каких водоемов и в каких условиях (лабораторных или полевых) проведена эта оценка? Как проводилась оценка развития биопленки здесь и в экспериментах представленных на рисунке 53?

Хотя высказанные замечания несколько снижают общее положительное впечатление от работы, они не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.4.13 – «Радиохимия», а именно следующим ее направлениям: реабилитация территорий, загрязненных радионуклидами; научные основы проблемы обращения с радиоактивными отходами; формы существования и миграции радионуклидов в природных средах, а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения «О присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова». Диссертация оформлена согласно требованиям Положения «О совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова».

Таким образом, соискатель Алексей Владимирович Сафонов заслуживает присуждения ученой степени доктора химических наук по специальности 1.4.13 – «Радиохимия».

Официальный оппонент:

Кандидат геолого-минералогических наук, доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории метаболизма экстремофильных прокариот, Федерального исследовательского центра «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук

ЗАВАРЗИНА Дарья Георгиевна

02.09.2024 г.

Контактные данные:

тел.: 7(916)1121071, e-mail: zavarzinatwo@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

1.5.11 – Микробиология

Адрес места работы:

117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, д.7, корп.2.

«Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук»,

Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского

Тел.: +7(499)1354458; e-mail: info@fbras.ru

Собственноручную подпись с.н.с., д.б.н. Заварзиной Д.Г. удостоверяю

Ученый секретарь ФИЦ Биотехнологии РАН

к.б.н. Орловский А.Ф.



02.09.2024 г.