

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 решению проблемы загрязнения подземных вод на предприятиях ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), загрязненных естественными и долгоживущими техногенными радионуклидами: актинидами (U, Np, Pu, Am), продуктами деления и активации радиоактивных элементов (Cl, Cs, Se, Sr, Tc), а также макрокомпонентами радиоактивных отходов - нитрат-, сульфат- и карбонат-ионами, ионами аммония. Поскольку большинство предприятий ЯТЦ расположены вблизи населенных пунктов, то загрязнение подземных вод представляет существенную экологическую опасность для населения, поэтому актуальность выбранной автором темы не вызывает сомнений. Важно отметить, что результаты, полученные автором, могут быть использованы при консервации поверхностных хранилищ как жидких, так и твердых РАО.

Научная новизна результатов. Работа, представленная диссертантом, представляет собой междисциплинарное исследование, выполненное на стыке радиохимии, микробиологии и геологии, направленное на решение важной экологической задачи - создания биогеохимического барьера, способствующего разрушению соединений азота и иммобилизации радиоактивных элементов. Автором изучена роль микробных процессов в коллоидном и псевдоколлоидном транспорте актинидов, выявлены условия формирования биогеохимических барьеров, разработаны методики биоремедиации подземных вод, опробованные в лабораторных и полевых

экспериментах. Эффективность предложенных методик и их экономическая выгодность 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 проб загрязненных подземных вод, отобранных с глубины 10-20 м в районе урановых шламохранилищ четырех предприятий переработки урановых и полиметаллических руд, хранилища ПАО бассейна Б2 и хранилища Сублиматного завода АО «СХК», а также проб 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 функциональное разнообразие и метаболический потенциал микроорганизмов. Достоверность полученных результатов подтверждается также адекватной статистической обработкой фактических данных и не вызывает сомнений.

Анализ структуры и содержания диссертации. Диссертация А.В. Сафонова состоит из введения, обзора литературы, главы материалов и методов, пяти глав собственных результатов с выводами, заключения, списка работ, опубликованных автором, списка использованных сокращений, списка использованной литературы, включающей 443 наименования. Работа изложена на 309 страницах, содержит 98 таблиц и 113 рисунков.

В диссертационной работе сформулировано 6 защищаемых положений, констатирующих основные результаты, полученные автором. Все защищаемые положения обоснованы, и достоверность полученных А.В. Сафоновым результатов не вызывает сомнений.

Выводы, приведенные в диссертационной работе, сформулированы в краткой форме и излагают наиболее существенные итоги исследования, выполненного в соответствии с поставленными целями и задачами.

Значимость для практики выводов и рекомендаций. Работа А.В. Сафонова имеет как фундаментальный, так и прикладной характер, что делает ее особенно ценной в современных реалиях, и ее значение для раздела радиохимии, занимающегося реабилитацией территорий, загрязненных радиоактивными отходами низкого уровня активности, сложно переоценить. Диссертантом сформулированы конкретные рекомендации по использованию отходов пищевого производства для активации аутигенной микрофлоры подземных вод, способствующей формированию 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.

По моему мнению, большие перспективы практического использования предложенные в работе методы биоремедиации имеют при создании барьера в донных отложениях водоемов с радионуклидными и химическими загрязнениями. Автор только упомянул (раздел 8.4.3.) о такой области применения разработанных им подходов. Если в результате процесса биоремедиации радионуклиды в донных отложениях перейдут в минерализованные трудно выщелачиваемые формы, то это позволит решить проблемы многих открытых хранилищ ЖРО, включая ТКВ ПО «Маяк».

Подтверждение опубликованных результатов диссертации в научной печати. Материалы диссертационной работы полностью отражены в автореферате. Список публикаций автора по теме диссертации включает 47

печатных работ, в журналах, входящих в международные базы данных Web of science и Scopus.

Достоинства и недостатки диссертационной работы, замечания по работе, вопросы. Диссертантом впервые в России выполнено систематическое исследование процесса биоремедиации природных вод, загрязненных и радионуклидами и токсичными стабильными соединениями азота. Проведена огромная работа, включающая лабораторные эксперименты, полевые исследования и длительные испытания на объектах предприятий ЯТЦ. Для их проведения автор освоил комплекс методов классической и молекулярной микробиологии, а интерпретация полученных результатов потребовала не только практических навыков, но и высокой степени осведомленности в области биологических наук.

Наиболее важным фундаментальным результатом работы, на мой взгляд, является впервые разработанная модель биогеохимического барьера для водоносных горизонтов с комплексным загрязнением, формирующегося после закачки растворов, содержащих органические и неорганические соединения, служащие субстратами для аутигенной микрофлоры. Автором доказано, что компоненты биогеохимического барьера имеет четко выраженное временное распределение, обусловленное химическими свойствами загрязнителей, 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 – соединений азота и сульфат-ионов. С использованием комплекса

методов, включая геохимическое моделирование, автор обосновал устойчивость биогеохимического барьера в меняющихся геохимических условиях и показал, что и в окислительных средах барьер будет эффективно задерживать актиниды и технеций. Впервые была сформулирована роль микробных биопленок, являющихся основой для накопления сульфидных, железистых и фосфатных фаз, способствующих долговременной иммобилизации радионуклидов. Важно отметить, что автор уделил значительное внимание поведению в окружающей среде технеция – проблемного, но малоисследованного компонента многих РАО.

Еще одной важной, на мой взгляд, стороной работы Сафонова А.В., определяющей ее фундаментальную значимость, является оценка взаимодействия урана и технеция с биомассой с использованием моделей. Например, автором выделен полисахарид с поверхности клеток, и с использованием методов ЯМР-спектроскопии определен характер его взаимодействия с уранил-ионами. Модель взаимодействия пертехнетата с биомассой сделана на основе полученных комплексов с азотистыми основаниями, изученными рентгено-структурными методами.

Недостатки работы. К недостаткам текста диссертации следует отнести небрежность в описании и представлении результатов, многочисленные опечатки и излишнее количество англицизмов. Например, в примечаниях к таблицам 17-19 и далее указана погрешность определения 10 или 2%, а экспериментальные данные приведены с 4-5 значащими цифрами; на с. 62 и 89 равноценными окислителями упомянуты кислород, нитрат и сульфат-ионы; в таблицах 13 и 14 приведены величины ХПК в мг кислорода на литр субстрата, но не сказано, при какой концентрации субстратов они получены; в таблице 76 появляются образцы с нерасшифрованными условными обозначениями ВМ, ВМО, ВМГ и т.д. Эти оформительские недочёты затрудняют восприятие чрезвычайно интересных научных результатов работы.

По материалу диссертации есть несколько вопросов и замечаний.

1. Автором было показано, что для активного роста биомассы необходимо наличие в питательной среде органических соединений и фосфора (думаю, что и калия тоже). Но все скрининговые эксперименты по выбору наиболее эффективных субстратов были проведены на реальных пробах вод с различным содержанием фосфора. Не может ли недостаток фосфора в некоторых пробах послужить причиной низкой скорости восстановления нитрата микроорганизмами? В таблице 39, например, наибольшую эффективность проявили молочная сыворотка и пивная дробина, в которых помимо органических соединений много фосфора и калия.
2. Практическая значимость и экономическая эффективность разработанных автором методов биоремедиации не вызывает сомнений и подтверждена расчётами, приведенными в табл. 93. Но сама таблица составлена не лучшим образом (в тексте упоминаются три субстрата: ацетат натрия, молочная сыворотка и сахар, а в таблице ацетата натрия нет), и не приведены оценки капитальных затрат на бурение и оборудование нагнетательных скважин. С каким интервалом нужно бурить эти скважины для создания эффективного биогеохимического барьера? Из данных табл. 93 видно, что стоимость реагентов чрезвычайно низка – всего 42 рубля (25000:600) за кубометр очищенных РАО, и это великолепный результат! Но хотелось бы знать полные затраты на очистку воды.

Высказанные замечания не снижают общее положительное впечатление от прекрасной работы. 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:

Смирнов Игорь Валентинович

19.05.2025 г.

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

02.00.14 Радиохимия

Адрес места работы:

194021, С.-Петербург, 2-й Муринский проспект, д. 28

Рабочий e-mail, рабочий телефон: +7(812)3469029 доб. 4132

E-mail: igor_smirnov@khlopin.ru