

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»

Диссертационная работа Алексея Владимировича Сафонова посвящена решению проблемы комплексного загрязнения подземных вод компонентами радиоактивных отходов (РАО) низкого уровня активности (НАО) на прилегающих к предприятиям ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) территориях. В диссертации изучены формы существования и факторы миграции радионуклидов в подземных водах и разработаны научные основы технологии иммобилизации долгоживущих радионуклидов и удаления азотсодержащих поллютантов *in situ*, что полностью соответствует паспорту специальности 1.4.13 – «Радиохимия». Используемый автором подход иммобилизации радиоактивных элементов в биогенных анаэробных геохимических осадках (геохимических барьерах) является «природоподобной технологией», поскольку данный процесс имел место на протяжении геотформирования нашей планеты. Предложенные Сафоновым А.В. геохимические барьеры за счет многократного ускорения микробных процессов формируются на протяжении нескольких месяцев, и могут обеспечивать надежную и долговременную иммобилизацию радионуклидов длительное время в изменяющихся геохимических условиях. Развитие природоподобных (конвергентных) технологий в нашей стране является одной из основополагающих стратегий развития науки, согласно указу Президента РФ № 818 от 02.11.2023 г.

Актуальность выбранной темы.

В настоящее время поверхностные хранилища РАО подлежат консервации, важным этапом которой является ремедиация компонентов окружающей среды, включая подземные воды, что определяется Стратегией Экологической безопасности РФ, утвержденной Указом Президента РФ №176 от 19 апреля 2017 г. Современные подходы к консервации поверхностных хранилищ предполагают их захоронение «на месте». Для предотвращения миграции поллютантов в подземных водах создают проницаемые или непроницаемые инженерные барьеры в грунте или проводят иммобилизацию загрязнителей в пласте *in situ* путем создания реактивных барьеров. Последний метод выбран для разработки как наиболее экономически выгодный. Одним из вариантов очистки, подходящим для удаления соединений азота и серы, является *in situ* биоремедиация, которую проводят путем нагнетания недорогих растворимых субстратов для активации микробного сообщества. Таким образом, цель работы - разработка научных основ технологии создания биогеохимического барьера *in situ* для очистки подземных вод с комплексным загрязнением компонентами радиоактивных отходов является актуальной.

Научная новизна исследований и полученных результатов

Впервые на территории Российской Федерации проведен комплексный мониторинг подземных вод верхних водоносных горизонтов в районе урановых шламохранилищ предприятий переработки урановых и полиметаллических руд, учитывающий совокупность данных микробиологического, геохимического и геологического анализа. Впервые описана возможность самоочистки подземных вод с высоким уровнем аммонийного и нитратного загрязнения с участием анаммокс бактерий. Впервые были проведены систематические полевые испытания *in situ* биоремедиации подземных вод, что привело к формированию биогеохимических барьеров в различных условиях. На основании лабораторных и полевых исследований выявлены и систематизированы

основные геохимические и геологические процессы формирования биогеохимического барьера для комплексных загрязнений, включая восстановленные и окисленные формы азота, серы, U, Pu, Np, Am, Tc, Sr.

Практическая значимость работы. Результаты, полученные в данной работе, являются фундаментальной базой для *in situ* очистки подземных вод вблизи предприятий ядерного цикла путем создания комплексного биогеохимического барьера, способствующего удалению растворимых макро- и микрокомпонентов отходов (радионуклидов, тяжелых металлов). Результаты работы испытаны в подземных водоносных горизонтах с комплексным загрязнением в районе урансодержащих шламохранилищ предприятий переработки урановых и полиметаллических руд ОАО «Чепецкий механический завод», АО «Электролизно-химический комбинат», а также вблизи хранилища радиоактивных отходов Сибирского химического комбината, что подтверждается актом о внедрении, полученным от АО «СХК».

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, приложения, списка рисунков, списка сокращений, списка использованной литературы (428 наименований); – изложена на 309 страницах машинописного текста, содержит 98 таблиц и 113 рисунков.

Во введении сформулирована актуальность темы работы, поставлены цели и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость, а также представлены положения, выносимые на защиту.

В главе 1 изложены данные критического анализа литературных источников, посвященных промышленно применяемым методам *in situ* очистки водоносных горизонтов с комплексным загрязнением. Приведены основные закономерности миграции актинидов, технеция и других продуктов деления в подземных водоносных горизонтах. **В главе 2** приведено описание объектов и методов исследования.

В главе 3 “Особенности комплексного загрязнения водоносных горизонтов на объектах ядерно-топливного цикла” представлены результаты анализа комплексного загрязнения проб подземных вод на объектах ядерного цикла. Показано, что основными анионами являются сульфаты и нитраты.

В главе 4 Особенности разнообразия микробного комплекса подземных вод с различным типом и уровнем загрязнения приведены микробиологические параметры проб пластовой жидкости. В областях с высоким содержанием сульфата и нитрата обнаружены преимущественно сульфатредуцирующие и нитрифицирующие бактерии, в области средних загрязнений наблюдалось присутствие аэробных органотрофных и денитрифицирующих бактерий. Материалы 3 и 4 глав полностью обосновывают **первое защищаемое положение.**

В главе 5 Лабораторное моделирование процесса биоремедиации приведены результаты лабораторного эксперимента по удалению нитрат-, аммоний- и сульфат-ионов. При добавлении органических веществ и водорода в изолированные пробы подземных вод наблюдали снижение концентрации нитрат-ионов.

В главе 6 Результаты полевых работ по *in situ* очистке водоносных горизонтов приведены результаты полевых работ по *in situ* очистке водоносных горизонтов на территории АО «ЧМЗ» (2020 г.), АО «ЭХЗ» (2019 г.), ОАО «СХК» Б2 (2015 г.) и С3 (2018 г.). Приведены составы органических растворов, закачанных в водоносные горизонты.

Для водоносных горизонтов ЧМЗ с высоким содержанием нитрат-ионов и ионов аммония были использованы смеси, содержащие сложные и простые субстраты и гидрофосфат калия. Материалы, изложенные в главах 5 и 6 полностью обосновывают **третье и четвертое защищаемые положения.**

В главе 7 Поведение радионуклидов при биоремедиации приведены данные оценки поведения радионуклидов в условиях

стимулирования биологических процессов на основании лабораторных и полевых экспериментов. Показано, что стимулирование микробных процессов добавлением молочной сыворотки в изолированных пробах подземной воды привело к перераспределению содержания радионуклидов между твердой и жидкой фазами. Наиболее ярко этот эффект наблюдался для U, Np и Pu, более 90% которых перешло в осадок. Обнаружено осаждение 20-30% Sr и 76-84% Tc, в зависимости от пробы. Для Cs значительного удаления из раствора не наблюдалось.

В главе 8 Заключение описана последовательность процессов формирования *in situ* биогеохимического барьера в водоносных горизонтах с комплексным загрязнением. Материалы глав 7 и 8 полностью обосновывают **пятое и шестое** защищаемые положения.

Таким образом, **выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, представляются обоснованными.**

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, определяется большим объемом экспериментальных данных, решением методических вопросов экспериментальными методами. Исследования выполнены с использованием современной аппаратуры и современными методами.

Разработка научных основ формирования *in situ* биогеохимического барьера в водоносных горизонтах с комплексным загрязнением имеет большую **значимость для науки и практики**. Эти результаты позволяют воспроизвести природоподобные технологии для безопасного управления радиоактивными отходами.

В целом, текст диссертации обладает внутренним единством и свидетельствует о большом личном вкладе автора в науку. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации. Большой объем экспериментальных исследований позволил получить новые и оригинальные данные. Теоретические обобщения работы имеют огромное значение для понимания поведения радионуклидов.

Вместе с тем, работы вызывает ряд замечаний.

1. Литературный обзор в работе необоснованно большой, содержит много справочной и общеизвестной информации, что затрудняет восприятие работы.

2. При описании отбора проб из хранилищ РАО полностью проигнорирована геологическая ситуация. В работе отсутствуют геологические разрезы, строение водоносных горизонтов и даже схемы отбора проб. Результаты исследования воды изложены в нескольких разрозненных таблицах, что затрудняет сопоставление состава с параметрами растворов. E_h и pH представлены лишь как интервалы значений, что неинформативно.

3. При анализе поведения азота во многих местах работы предполагается, что нитрат может быть потенциал определяющим компонентом, даже показана диаграмма E_h - pH . В реальности кинетические барьеры в реакции между газообразным азотом и нитратом столь велики, что эти процессы не могут протекать абиогенно. Если бы это равновесие могло бы установиться, то океаны Земли содержали бы азотную кислоту с концентрацией 0.1 моль/кг, что показывает термодинамический расчет.

4. В работе приведено много иллюстраций и таблиц. Однако, как правило, их обсуждению в тексте уделяется недостаточно внимания. Многие обозначения на рисунках и в таблицах (особенно, выделение цветом) нерасшифровано.

5. Присутствуют орфографические ошибки, в частности, в названиях минералов. Так, троилит пишется с одной «л».

Однако эти замечания не снижают общей высокой оценки 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, критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения «О присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова», а также 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: доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, заведующий кафедрой геохимии геологического факультета

Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова
БЫЧКОВ Андрей Юрьевич

20 мая 2025 года

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 25.00.09 – геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Адрес места работы: 119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
геологический факультет. Тел.: 7 (495) 939-4962; e-mail: dean@geol.msu.ru