

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук Желтоножской Марины Викторовны
на тему: «Новые методические подходы к определению активности
радионуклидов, распадающихся без испускания гамма-излучения,
для решения задач радиационного мониторинга»
по специальности 1.5.1. Радиобиология
(физико-математические науки)

Диссертационная работа Желтоножской М.В. посвящена актуальной проблеме современной радиоз экологии - разработке новых методологических основ и подходов для оценки активности сложно-детектируемых радионуклидов, к которым относятся чистые альфа- и бета-излучатели. В настоящее время в России и во всем мире мониторинг радиационной обстановки стал играть ключевую роль не только в сфере ядерной энергетики. Его значение выходит за рамки применения только для контроля предприятий ядерного топливного цикла, военно-промышленного комплекса и возрастает, когда речь идет о реабилитации радиационно-загрязненных территорий, включая полигоны для испытания ядерного оружия и очаги радиоактивного загрязнения, возникшие в результате крупных радиационных аварий. Процесс мониторинга радиационной обстановки включает в себя деятельность, направленную на получение данных об источниках ионизирующего излучения, их распространении, миграции, накоплении, а также о неблагоприятном воздействии радиации на человека и объекты биоты. Для решения этих задач необходимы измерения концентраций основных радиологически значимых радионуклидов. Поэтому совершенствование существующих и разработка новых неразрушающих методов определения активности радионуклидов представляют собой

важную задачу, особенно с учетом темпов внедрения радиационных технологий и масштабов техногенного загрязнения.

Работа прошла апробацию на авторитетных международных и российских конференциях. Основные результаты диссертации отражены в 40 публикациях, в том числе в 21 статье в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus.

Диссертационная работа Желтоножской Марины Викторовны состоит из введения, пяти глав, заключения и выводов.

Первая глава представляет собой краткий обзор состояния современной системы мониторинга радиационной обстановки. Детально описываются решаемые ею задачи и излагаются применяемые методы исследования активности критических для оценки радиационной безопасности радионуклидов. Акцентируется внимание на проблемах, связанных с использованием современных методов радиационного мониторинга.

Во **второй главе** рассмотрен новый методический подход к определению активности долгоживущих α -радиоактивных изотопов $^{238-240}\text{Pu}$ по сопутствующему характеристическому L_X -излучению урана. Для реализации этого подхода Желтоножская М.В. исследовала выходы L_α - и L_β -групп урана, связанных с альфа-распадом плутония. Для обработки сложных рентгеновских спектров разработан алгоритм, реализованный в программном пакете WinSpectrum. В качестве образцов в данном исследовании использовались горячие топливные частицы, образовавшиеся в результате аварии на Чернобыльской АЭС, а также частицы, образовавшиеся в результате ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне. Для апробации предлагаемого подхода проводились измерения контрольных образцов разрезов почв с использованием методов радиохимии. Наибольшую точность определения содержания изотопов $^{238-240}\text{Pu}$ (10-15%) новая методика демонстрирует при активности образцов свыше 100 Бк, для низкоактивных образцов (активность менее 100 Бк) точность снижается (20-30%).

Третья глава посвящена разработке неразрушающих методов определения ^{90}Sr в образцах. Подробно описаны химические и ядерно-физические свойства ^{90}Sr , а также существующие подходы, использующиеся для определения его концентрации, и их недостатки. Предлагаемый метод основан на измерении полного энергетического спектра β -распада изотопов ^{40}K , ^{90}Sr и ^{137}Cs в образце. Измерения проводились с помощью разработанной для этой цели установки из сцинтилляционного спектрометра с детектором CsI(Tl). В качестве калибровочных источников для проверки эффективности регистрации излучения использовались источники ^{40}K , ^{90}Sr и ^{137}Cs , аналогичные измеряемым образцам по плотности и геометрии. Алгоритм обработки спектров, реализованный в программном обеспечении Beta+ включал в себя аппроксимацию пиков и фона кубическими сплайнами для последующей обработки экспериментального спектра. Эффективность нового метода оценивалась с помощью β -спектрометрии и радиохимического анализа образцов почвы радиоактивно-загрязненных территорий. Важным достоинством методики является возможность прижизненного исследования концентрации ^{90}Sr в живых организмах. Для учёта неточности измерений, возникающей вследствие эффекта самопоглощения излучения внутри тканей животных предложена поправка на массу тела. Метод верифицирован с помощью радиохимического подхода, продемонстрировал хорошую эффективность при одновременном измерении активности ^{90}Sr и ^{137}Cs у мелких животных с массой тела до 50 г с погрешностью не более 20%. Для однородных образцов погрешность метода составляет 10-15%, что достаточно для проведения полевых измерений.

В качестве ещё одного метода определения ^{90}Sr предложено рассмотрение характеристического рентгеновского излучения иттрия и циркония, возникающего в результате автоионизации при β -распаде. Для минимизации ошибок измерений, возникающих из-за неоднородности образцов, предлагается введение поправки с учетом активности ^{241}Am , который присутствует во всех топливосодержащих материалах. Вероятность

протекания этого процесса невелика, поэтому наиболее перспективно использовать этот подход для исследования образцов с высокой удельной активностью ^{90}Sr , включая высокоактивные РАО, топливосодержащие материалы и частицы.

В четвертой главе автор предлагает использовать фотоактивационный подход для определения активности долгоживущих радиоизотопов в облученных конструкционных материалах АЭС, которые распадаются посредством β -распада и электронного захвата. Активность этих радионуклидов может быть определена относительно активности другого долгоживущего радиоизотопа, который распадается, испуская γ -излучение. В качестве такого изотопа-маркера автор предлагает ^{60}Co , вклад которого в общую активность радиоактивных материалов остаётся значительным даже на протяжении десятка лет, после остановки реактора. Автором получены итоговые выражения для вычисления активности ^{36}Cl , ^{41}Ca , $^{59,63}\text{Ni}$, ^{93}Mo , ^{93}Zr относительно активности ^{60}Co , основанные на активационных уравнениях образования целевых радиоизотопов и ^{60}Co . Фотоактивационный подход предлагается использовать для получения соотношения между исходным количеством атомов, из которых шло образование целевых радиоизотопов в ходе нейтронного захвата и количества атомов ^{59}Co . Для реализации метода автором проведено исследование средневзвешенных по потоку тормозного излучения выходов реакций $^Z_X(\gamma, n)_{M-1}^Z X$ и $^{59}\text{Co}(\gamma, n)^{58}\text{Co}$. Отдельный упор автором сделан на способе определения активности ^{10}Be . Прогнозирование распределения концентрации ^{10}Be в радиоактивных отходах затруднено, поскольку он образуется не только из бериллия, но и из бора в составе борной кислоты, которая в двухконтурных водно-водяных реакторах используется для контроля скорости деления ядерного топлива, в реакциях $^9\text{Be}(n, \gamma)^{10}\text{Be}$ и $^{10}\text{B}(n, p)^{10}\text{Be}$. В качестве долгоживущего изотопа-маркера для определения активности ^{10}Be предлагается использование ^{94}Nb с периодом полураспада $2.03 \cdot 10^4$ лет. Для верификации метода автором были проведены измерения активности образцов с использованием разработанного подхода и методов

радиохимического анализа. Чувствительность разработанной методики составляет около 10^{-3} Бк/г, что значительно ниже предельно допустимой концентрации для чистых бета-излучателей в облученных материалах АЭС. Предложенная методика отличается возможностью использования небольшой массы образца, как правило, до нескольких граммов, что позволяет одновременно изучать значительное количество образцов. Эта особенность существенно повышает эффективность предложенного подхода по сравнению с традиционными методами радиохимии.

В пятой главе с использованием разработанных автором подходов проведен анализ радиационной обстановки на территориях, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Можно отметить, что исследования большого массива данных – соискателем проанализировано более 2500 проб почв – позволили получить новые научные результаты и уточнить прогнозные оценки. Отмечено преобладание ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{241}Am и изотопов плутония на этих территориях в качестве основных загрязняющих радионуклидов. Обнаружение в составе верхних слоев исследованных почв ближней зоны ЧАЭС после 2019 г. техногенных радионуклидов, характерных для облученных конструкционных материалов, дало основание автору выдвинуть обоснованное предположение об их появлении вследствие строительных работ на объекте «Укрытие» для установки второго конфайнмента «Арка». На гистограммах распределения активности ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{241}Am и изотопов плутония в зависимости от глубины автор отметил похожее поведение этих радионуклидов из чего сделал обоснованный вывод о миграции горячих частиц в виде субмикронных структур в вертикальных профилях почв. Для расчета параметров вертикального переноса соискатель использовал модифицированную конвективно-диффузионную модель Иванова Ю.А. Уточненные значения параметров миграции стали основой расчётов периодов получищения корнеобитаемых слоев почв исследовательского полигона «Рыжий лес» для ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{241}Am и изотопов плутония. Выполнен анализ дисперсного и радионуклидного состава горячих

топливных частиц, отобранных в почвах ближней 5-км зоны ЧАЭС. Описан новый тип частиц с повышенным содержанием ^{241}Am . Также в пятой главе представлено исследование изотопных отношений в донных отложениях пруда-охладителя ЧАЭС, что позволило определить глубину местонахождения выпадений, связанных с первым по времени взрывом на ЧАЭС.

Отдельной важной частью главы являются радиобиологические исследования, посвященные рассмотрению взаимодействия почвенных микроскопических грибов с горячими топливными частицами. Автором проведены масштабные исследования деструктивных способностей различных штаммов микромицетов, выделенных в почвах территорий, загрязненных чернобыльскими выпадениями, которые могут способствовать переходу радиоактивных изотопов в растворимую форму.

Завершается глава исследованиями радиоактивного загрязнения и дозовой нагрузки одного из видов животных – био-индикаторов, представленных мышевидными грызунами, обитающими на территориях, загрязненных топливными выпадениями в результате аварии на ЧАЭС.

В **Заключении** изложены основные положения проведенных исследований, предназначенные для дальнейшего развития данного научного направления и подчеркнута их практическое значение. В **Выводах** обобщены основные результаты, полученные в диссертации.

Автор диссертационной работы, Желтоножская Марина Викторовна, продемонстрировала высокий научный уровень, разработав серию новых спектрометрических методов проведения радиационного мониторинга, которые могут значительно упростить проведение масштабных радиоэкологических и радиобиологических исследований.

Предложенный соискателем фотоактивационный подход к определению характеристик облученных конструкционных материалов реакторов и РАО АЭС имеет важное прикладное значение для российской атомной отрасли. Использование подобных методик способно заметно сократить финансовые

затраты, связанные с классификацией облученных конструкционных материалов реакторов, выводимых из эксплуатации, и радиационно-опасных РАО АЭС. Это, в свою очередь, будет способствовать выбору наиболее безопасной и экономичной стратегии обращения с ними.

Созданные Желтоножской М.В. методики и подходы были успешно применены на практике, получен большой массив новых научных результатов. Уточненные параметры вертикальной миграции техногенных радионуклидов в почвенных профилях загрязненных территорий могут быть использованы для прогностических оценок. Кроме того, они могут служить научной основой для создания более точных математических моделей прогнозирования радиационной обстановки в аналогичных условиях.

Новые экспериментальные данные, согласно которым почвенные микрогрибы (микромикеты) могут оказывать существенное влияние на подвижность трансурановых радионуклидов в процессе миграции, способны оказать существенное влияние на оценку подвижности трансурановых радионуклидов в окружающей среде. Автор успешно воспроизвел в лабораторных условиях экологическую ситуацию, сложившуюся в первые годы после аварии в почвах загрязненных территорий. На основании результатов проведенных экспериментов было сделано утверждение о том, что при наличии в почвах определенных штаммов микрогрибов, способных разрушать топливные горячие частицы, время их деструкции может заметно сократиться, примерно в 3-5 раз.

Полученные автором новые данные о соотношении доз внутреннего и внешнего облучения от бета-частиц позволяют создать более точную модель воздействия радиации не только на популяцию грызунов, как вида-биоиндикатора, обитающего на загрязненных территориях, но и на экосистему в целом. Это имеет важное значение для прогнозирования долгосрочных последствий и разработки мер по реабилитации загрязненных радионуклидами территорий.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что диссертация Желтоножской Марины Викторовны представляет собой объемное научное исследование, соответствующее всем требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени доктора наук. Данная работа обладает научной новизной, масштабностью проведенных исследований и практической ценностью. Достоверность результатов подтверждена большим объемом экспериментальных данных, полученных разными физическими и радиохимическими методами с использованием поверенного оборудования. Обработка результатов проводилась стандартными математическими методами, их точность обоснована с указанием источников ошибок.

Однако, как и в любой исследовательской работе, в диссертации Желтоножской М.В. есть некоторые аспекты, которые потенциально могут быть улучшены. Ниже приводятся следующие замечания по работе:

1. В тексте диссертации многократно используются термины мониторинг и контроль, в ряде случаев как синонимы. Например: «В настоящий момент можно выделить две большие категории систем радиационного контроля – постоянный контроль радиоактивного загрязнения и аварийный радиационный мониторинг» (стр.4), «Автоматизированные системы радиационного контроля (АСМРО) предназначены для непрерывного мониторинга радиационной обстановки» (стр.23) и т.д. Мониторинг и контроль – разные понятия, было бы желательно привести их определения или авторскую интерпретацию.

2. На некоторых графиках встречаются обозначения на английском языке. В некоторых ссылках русский текст перемешан с английским.

3. В списке литературы трижды под разными номерами 13, 51 и 87 представлена публикация «Гос.ком. СССР по гидрометеорологии. Руководство по организации контроля состояния природной среды в районе расположения АЭС / ed. Махонько К.П.».

4. В ряде случаев таблицы, содержащие значительный объем уникальных экспериментальных данных, не включены в основной текст диссертации, а вынесены в приложения.

5. В главе 2 соискатель излагает разработанный им методический подход к определению активности изотопов плутония по характеристическому излучению. При этом в тексте часто использует термины «тонкие» и «толстые» образцы без необходимых пояснений. Желательно дать их расшифровку, хотя бы при первом использовании.

6. На рисунке 4.5 приводится сравнение спектров тормозного излучения, смоделированного автором и взятого из литературного источника. Видно, что качественно они совпадают – но различия не объяснены.

7. При оценке дозовой нагрузки на мышевидных грызунов в зоне отчуждения ЧАЭС было бы желательно оценить, наряду с рассмотренными путями облучения, дозу от ингаляции загрязненного воздуха и поглощения частиц грунта, а также учесть возможный вклад изотопов плутония в суммарную дозу. Было бы желательно сопоставить полученные оценки дозовых нагрузок с радиобиологическими эффектами, наблюдавшимися у мышевидных грызунов в чернобыльской зоне (см., например, международную базу радиоз экологических данных ЕРІС, монографии «Моделирование радиоз экологических процессов в окружающей среде» (М., 2022), «Радиоз экологические последствия чернобыльской аварии (М., 1991).

Вместе с тем, указанные замечания ни в коей мере не умаляют научной и практической значимости диссертационного исследования.

Диссертационная работа «Новые методические подходы к определению активности радионуклидов, распадающихся без испускания гамма-излучения, для решения задач радиационного мониторинга» отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.5.1. Радиобиология (физико-математические науки), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5

Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, 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. На основании вышеуказанного считаю, что соискатель Желтоножская Марина Викторовна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.5.1 Радиобиология (физико-математические науки).

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник
Института проблем мониторинга окружающей среды
Федерального государственного бюджетного учреждения
«Научно-производственное объединение «Тайфун»» Росгидромета,

Крышев Иван Иванович

21.05.2025