

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)

Целью диссертационной работы М.В. Желтоножской является разработка эффективных методик определения активности  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучающих техногенных радионуклидов с особым акцентом на их применение в контексте радиационного контроля и мониторинга.

Фундаментальное значение исследований и разработок в области методов радиационного контроля трудно переоценить, если принять во внимание необходимость обеспечения безопасности, содействия технологическому прогрессу и создания парадигмы устойчивого развития в контексте растущего использования радиационных технологий.

Диссертационная работа изложена на 304 страницах печатного текста и включает 68 рисунков и 36 таблиц. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и выводов. Список литературы включает 456 наименований.

В главе 1 соискатель рассматривает многоуровневую систему радиационного контроля. В условиях интенсивного использования источников излучения в атомной энергетике, медицине и промышленности значение радиационного контроля как основного инструмента обеспечения экологической безопасности трудно переоценить. В главе дана комплексная оценка современного состояния системы, включающая анализ регламентов контроля, объектов (источники излучения, загрязненные территории) и задач (например, предотвращение аварий, управление рисками и т. д.), обоснована

необходимость оптимизации существующих и создания новых методических подходов к определению активности источников ионизирующего излучения.

В главе 2 представлена новая методология определения активности изотопов плутония в образцах почвы на основе характеристического рентгеновского излучения. Предлагаемый подход имеет ряд преимуществ, включая минимизацию процессов пробоподготовки, относительно высокую скорость измерений по сравнению с радиохимическими исследованиями, возможность проведения анализа *in situ* и снижение затрат. Также можно отметить хорошую корреляцию данных для гомогенных образцов почвы, полученных разработанным способом и радиохимическими методами, а также приемлемую точность для применения в полевых условиях. Несмотря на определенные ограничения, использование этого подхода может способствовать увеличению числа измерений и более эффективному сбору данных для решения задач радиационного мониторинга.

Глава 3 содержит описание двух методов определения активности  $^{90}\text{Sr}$  в образцах различного состава и степени однородности. Первый новый неразрушающий метод, основан на анализе полного  $\beta$ -спектра образца почвы или небольшого организма, включая вклад электронов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Соискателем предложена конструкция спектрометра, отличающаяся от обычных сцинтилляционных спектрометров толщиной  $\text{CsI(Tl)}$  кристалла (0,1-1 мм) и наличием тонкого входного окна, пропускающего  $\beta$ -частицы с энергией от 100 до 2500 кэВ. Кратко приводится разработанный алгоритм обработки данных, включающий процесс математической «подгонки» эталонных  $\beta$ -спектров калибровочных образцов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , геометрия и плотность которых аналогичны образцам, к экспериментальному  $\beta$ -спектру, в результате чего одновременно рассчитывается активность и  $^{90}\text{Sr}$ , и  $^{137}\text{Cs}$ . Разработанное специализированное программное обеспечение Beta+ обеспечивает автоматизацию анализа.

Можно отметить следующие преимущества разработанного метода. Во-первых, возможность сохранения целостности образца, что позволяет

проводить повторные измерения образцов или измерения активности  $^{90}\text{Sr}$  в живых организмах. Во-вторых, относительная оперативность метода - результаты измерений можно получить в течение нескольких часов, а не дней. Также в работе продемонстрирована пригодность предложенного подхода для массового скрининга загрязненных территорий. Внедрение неразрушающего метода определения  $^{90}\text{Sr}$  путем анализа полного  $\beta^-$ -спектра может решить ключевые проблемы радиационного мониторинга: устранить необходимость трудоёмкой пробоподготовки, повысить скорость и доступность анализа, что важно для своевременного выявления загрязнений и контроля радиационных рисков.

Второй метод, основанный на характеристическом рентгеновском излучении  $\text{Y/Zr}$ , возникающего при автоионизации атомов  $^{90}\text{Y}$  и  $^{90}\text{Zr}$  в ходе  $\beta^-$ -распада  $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y} \rightarrow ^{90}\text{Zr}$ , наряду с ранее описанным подходом для изотопов плутония, может дополнить арсенал средств радиационного мониторинга и открывает возможности для изучения топливных матриц и радиоактивных горячих частиц без риска их повреждения.

В главе 4 описывается новый фотоактивационный подход для оценки активности долгоживущих радиоизотопов, распадающихся без испускания гамма-излучения, в конструкционных материалах и РАО атомных электростанций. Новая методика включает облучение образцов на ускорителях электронов с последующим измерением индуцированной активности на полупроводниковых спектрометрах. Затем активность радиоизотопа рассчитывается по отношению к активности  $^{60}\text{Co}$  или  $^{94}\text{Nb}$ , которые присутствуют в тех же материалах и испускают легко обнаруживаемое гамма-излучение. Среди достоинств метода можно выделить высокую чувствительность ( $10^{-9}$ - $10^{-3}$  Бк/г), возможность одновременного облучения порядка сотни образцов на ускорителе электронов, что более эффективно с точки зрения времени и ресурсов, чем радиохимические методы. Необходимо подчеркнуть практическую применимость метода для контроля и сертификации РАО - важнейшего аспекта обеспечения

безопасности атомных электростанций. Следует также отметить, что метод может быть использован для различных материалов и типов отходов, демонстрируя тем самым высокую степень универсальности.

**Глава 5** демонстрирует обзор научных результатов, полученных соискателем в том числе и с использованием разработанных методических подходов. Показано, что спустя почти 40 лет после аварии на ЧАЭС, на территориях с самой высокой плотностью радиоактивных выпадений трансурановые элементы (Pu, Am),  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  являются основными долгосрочными источниками риска. Полученные данные о параметрах миграции ключевых антропогенных радионуклидов и периодах полураспада верхних горизонтов почв позволяют определять зоны вторичного загрязнения, например, при эрозии почв или лесных пожарах, прогнозировать распространение долгоживущих радионуклидов в грунтовых водах и растениях, оценивать сроки естественной санации почв и являются основой для управления радиоактивно-загрязненными территориями и минимизации их воздействия на экосистемы и человека.

Полученные соискателем новые результаты о составе и трансформации горячих топливных частиц под воздействием внешних факторов помогут понять, как антропогенные радионуклиды высвобождаются в биодоступной форме. А данные о вертикальной миграции частиц в разных типах почв могут быть использованы не только для калибровки математических моделей, что повышает точность прогнозов на сотни лет вперед, но и позволят выбрать эффективные стратегии реабилитации пострадавших территорий

Детальный анализ изотопных соотношений в донных отложениях водоема-охладителя ЧАЭС позволил получить новые сведения о местонахождении выпадений, связанных с первоначальным взрывом. Эти результаты позволяют прогнозировать вторичное загрязнение в случае изменения гидрологического режима и закладывают основу для развития технологий, способствующих безопасной утилизации радиоактивных осадков.

Исследования почвенных микромицетов, выделенных в почвах пострадавших от аварии на ЧАЭС территорий, показали, что они являются важными участниками процесса деструкции горячих топливных частиц. В зонах радиоактивного загрязнения эти организмы приспособились к высоким дозам радиации, приобретя уникальные свойства. В представленной работе продемонстрировано, что микромицеты, которым долгое время не уделялось должного внимания в радиоэкологических моделях, играют значительную роль в ускорении разрушения топливных частиц, что, в свою очередь, повышает риск распространения опасных антропогенных радионуклидов. Поэтому сделан вывод о необходимости учитывать биологические факторы при разработке реалистичных сценариев реабилитации загрязненных территорий и прогнозировании долгосрочных последствий аварий на АЭС.

Бета-излучение (электроны) представляют собой ключевой компонент радиационного фона на территориях, загрязненных в результате топливных выпадений. Экспериментальные данные об их вкладе в суммарную дозу облучения видов-биоиндикаторов важны для построения корректных моделей радиационного воздействия. Короткий жизненный цикл и высокая скорость размножения мышевидных грызунов делают их чувствительными к воздействию радиации. Накопление дозы у грызунов отражает динамику загрязнения и его влияние на всю экосистему. Коэффициенты перехода, полученные автором для трофической цепи «почва → животное», могут быть использованы для прогнозирования накопления радионуклидов в пищевых цепях. Полученные результаты о вкладе внешних и внутренних электронов в суммарную дозу важны для понимания радиационных рисков в экосистемах и разработки научно обоснованных мер по защите биоразнообразия и человека.

**В Заключение и Выводах** обобщены основные результаты исследования.

Ключевым научным достижением данной работы, лежащей на стыке радиобиологии, радиоэкологии и ядерной физики является разработка серии неразрушающих методов контроля  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучающих техногенных

радионуклидов в различных образцах и средах. Автором разработаны новые методические подходы к определению содержания изотопов  $^{238-240}\text{Pu}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в образцах. Оценка активности проводится по характеристическому рентгеновскому излучению, сопровождающему распад этих радионуклидов, и применяются полупроводниковые спектрометры с HPGe-детекторами с тонким входным окном. Предложен новый метод одновременного определения активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в живых организмах, пробах почв и воды, основанный на измерении всего энергетического спектра  $\beta$ -частиц. Разработан принципиально новый подход к характеристике облученных конструкционных материалов и РАО АЭС, основанный на облучении перечисленных материалов на ускорителях электронов с последующим измерением наведенной активности на полупроводниковых спектрометрах.

Практическая значимость работы обосновывается увеличением количества атомных электростанций, проектный срок эксплуатации которых подходит к концу. Последующая процедура вывода из эксплуатации подразумевает описание радионуклидного состава конструкционных материалов реакторов. Для исследования радиоактивных отходов АЭС предложен комплекс фотоактивационных методов определения активности радионуклидов, распадающихся без испускания гамма-излучения. Для решения задач аварийного радиационного мониторинга разработаны новые подходы к измерению содержания радиоизотопов  $^{238-240}\text{Pu}$  и  $^{90}\text{Sr}$ . Все перечисленные методы прошли успешную апробацию в условиях крупнейшего техногенного загрязнения – зоны аварии на Чернобыльской атомной электростанции. Важным результатом работы является адаптация программы для обработки рентгеновских спектров и создание нового программного обеспечения обработки бета-спектров, что расширяет возможности использования разработанных методов и подходов в практической и образовательной деятельности.

Автореферат корректно отражает содержание диссертационной работы.

Работа апробирована на значительном числе международных и российских конференций, а ее результаты опубликованы в престижных научных журналах. Основные результаты диссертации отражены в 40 публикациях, в том числе в 21 статье в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus.

Достоверность результатов обеспечена использованием альфа-, бета-, гамма-спектрометрических и радиохимических методов, метода электронной микроскопии, а также хорошо известных математических методов. Все полученные данные автор приводит с указанием и обоснованием их погрешности, что существенно повышает их применимость в дальнейшей практике.

Диссертация Желтоножской Марины Викторовны представляет собой значимое научное исследование, соответствующее требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени доктора наук. Работа имеет существенную практическую ориентацию и большую научную ценность. Разработанные подходы, методы, алгоритмы и программные продукты вносят значительный вклад в развитие радиоэкологии и радиобиологии, открывая возможность для проведения масштабных исследований поведения техногенных радионуклидов в окружающей среде и живых организмах, а также разработке новых методических рекомендаций по характеристике облученных конструкционных материалов и РАО АЭС.

### **Замечания**

К сожалению, как и любой научный труд, работа не свободна от недостатков:

1. Метод, одновременного измерения активности  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , основанный на измерении полного бета-спектра образца, должен быть чувствителен к фоновой естественной активности, например, изотопов свинца, что может привести к увеличению погрешности результатов измерений. Хотелось бы прояснить, каким образом учитывается влияние фоновой активности при измерениях разработанным способом.

2. В главе 5 работы присутствует утверждение о значительном изменении соотношения  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в выпадениях за последние почти 40 лет, по сравнению с первичным. Однако утверждение это опирается на данные, полученные для горячих топливных частиц, отобранных как из самого 4-го энергоблока ЧАЭС, так в почвах полигонов, непосредственно примыкающих к нему. Корректно ли это утверждение для всех топливных выпадений чернобыльского выброса или, возможно, это соотношение поменялось из-за теплового и водного режима внутри самого саркофага и является локальным явлением?

3. В главе 5, в части, посвященной исследованиям донных отложений пруда-охладителя ЧАЭС, указывается, что осушение этого водоема может привести к вторичному загрязнению ранее стабилизированного водного биогеоценоза и подчеркивается необходимость определения местонахождения накопленных радиоактивных выпадений. Однако несмотря на то, что соискателем установлена глубина местонахождения в донных отложениях радиоактивных выпадений, связанных с первым по времени взрывом на 4-м энергоблоке ЧАЭС, в обсуждении и выводах не сделано никаких прогнозных оценок.

4. Отмечаются незначительные недостатки в оформлении рисунков – в отдельных рисунках диссертации некоторые обозначения указаны на английском языке (Рис. 2.3 на стр. 66, Рис. 3.4 на стр. 113, Рис. 4.1 на стр. 141, Рис. 4.4 на стр. 160, Рис. 4.6 на стр. 172, Рис. 4.7 на стр. 174, Рис. 4.9 на стр. 179, Рис. 4.12 на стр. 184, Рис. 4.15 на стр. 190, Рис. 5.15 на стр. 223).

5. Также хотелось бы отметить сложность восприятия больших массивов полученных экспериментальных результатов, приведенных в некоторых таблицах диссертационной работы (например Таблица 4.4 на стр. 182, Таблица 5.5 на стр. 214, Таблица 5.6 на стр. 215, Таблица 5.7 на стр. 215 и Таблица 5.15 на стр. 238). Желательно такие результаты представлять в графической форме.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования, а носят скорее характер пожеланий и направлений для дальнейших научных исследований.

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 медицинских наук, профессор,  
заместитель генерального директора  
Федерального государственного бюджетного учреждения  
«Государственный научный центр Российской Федерации –  
Федеральный медицинский биофизический центр  
имени А.И. Бурназяна»  
БУШМАНОВ Андрей Юрьевич

 2025

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

14.00.13 – нервные болезни

14.00.07 - гигиена

Адрес места работы:

123098, г. Москва, ул. Живописная, д. 46,

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный  
научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский  
биофизический центр имени А.И. Бурназяна» Федерального медико-  
биологического агентства