

Белорусский государственный университет

УДК 53.082.79:519.245

ЖУКОВСКИЙ  
АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ *IN SITU*  
ИЗМЕРЕНИЙ АКТИВНОСТИ  $^{134}\text{CS}$  И  $^{137}\text{CS}$  В ПОЧВАХ И  
ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.11.10 – приборы и методы для измерения ионизирующих  
излучений и рентгеновские приборы

Минск, 2019

Работа выполнена на Научно-производственном унитарном предприятии «АТОМТЕХ» ОАО «МНИПИ» и в УО «Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова» Белорусского государственного университета.

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ: **Чудаков Владимир Андреанович**,

кандидат технических наук, доцент;

**Кутень Семен Адамович**,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией теоретической физики и моделирования ядерных процессов НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: **Линев Владимир Николаевич**

доктор технических наук, профессор,

Генеральный директор частного унитарного предприятия «АДАНИ»;

**Гурачевский Валерий Леонидович**,

кандидат физико-математических наук, доцент, начальник учебно-научного и информационного центра по радиологии и качеству продукции сельского хозяйства Института повышения квалификации и переподготовки кадров АПК УО «Белорусский государственный аграрный технический университет».

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –

**ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – СОСНЫ»**

**НАН Беларуси.**

Защита состоится **27 декабря 2019 года в 10.00** на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.10 при Белорусском государственном университете по адресу: *Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.* Телефон ученого секретаря 209-57-09.

*Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.*

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан **«20» ноября 2019** года.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук

А.Ф. Романов

## ВВЕДЕНИЕ

Радиационные аварии на предприятиях ядерной энергетики и ядерно-топливного цикла могут приводить к загрязнению территорий, объектов сельского, лесного и водного хозяйства, что обуславливает необходимость проведения радиационного контроля и мониторинга окружающей среды. Так, для Беларуси, несмотря на 30 с лишним лет, минувших после аварии на ЧАЭС, проведение таких работ, в том числе без отбора проб (*in situ*), до сих пор остается актуальной широкомасштабной задачей.

Обследование протяженных участков радиоактивно-загрязненных территорий осуществляется с использованием аппаратных средств и методов аэро-гамма-съёмки на базе пилотируемых и беспилотных летающих аппаратов. По результатам подобного дистанционного сканирования загрязненных территорий с измерением мощности дозы гамма-излучения составляется карта радиационного загрязнения местности. Получаемые при этом данные характеризуют радиационное поле у поверхности, но не позволяют оценить степень радиационного загрязнения почвы различными радионуклидами. А проведение обследования донных отложений таким методом вообще не представляется возможным.

Для оценки степени радиоактивного загрязнения почв широко используется переносная гамма-спектрометрическая аппаратура с коллимированным детектором, располагаемая, как правило, на одном метре от загрязненной поверхности. Значительный вес и необходимость наличия априорной информации о толщине загрязненного радионуклидами слоя вызывает определенные трудности при использовании такого оборудования.

Отсутствие необходимости в коллиматоре и предварительном определении характера распределения радионуклидов по профилю почвы и донных отложений повысит эффективность портативных гамма-спектрометров в области *in situ* измерений. В то же время возможность проведения локальных *in situ* измерений с целью оперативного получения информации о радиоактивном загрязнении почв и донных отложений существенно актуализировалась после радиационной аварии на АЭС Фукусима-1, вызвавшей загрязнение территорий региона Тохоку, Япония, радионуклидами  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

Современное оборудование для локальных *in situ* измерений, позволяющее оперативно и с заданной точностью получать полную информацию о характере радиоактивного загрязнения, о типах радионуклидов, об уровнях их активности и толщине загрязненного слоя играет важную роль в процессе принятия обоснованных решений и соответствующих мер по радиационной защите населения. Его наличие и использование позволяет значительно снизить

уровень материальных затрат и степень негативных последствий от радиационных аварий.

Несмотря на высокий уровень аппаратного оснащения, а также метрологического и методического обеспечения в области радиационных измерений, отсутствует должное теоретическое обоснование и практические решения в области локальных *in situ* измерений радиоактивного загрязнения почв и донных отложений.

Данная работа направлена на создание приборной, теоретической и экспериментальной базы в области локальных *in situ* измерений активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах и донных отложениях.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема диссертационной работы соответствует пункту 10 «Экология и природопользование» приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь 12.03.2015 № 190.

Диссертационная работа выполнялась в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по заданиям «Разработка новой модификации портативного спектрометра МКС-АТ6101ДР на основе существующей модификации МКС-АТ6101Д» (А. И. Жуковский – главный конструктор НИОКР) и «Разработка РКД, изготовление опытных образцов и проведение испытаний глубоководного спектрометра МКС-АТ6104ДМ» (А. И. Жуковский – заместитель главного конструктора НИОКР по научной работе).

Результаты диссертационной работы использованы при создании опытных и серийных образцов портативных гамма-спектрометров: многофункционального гамма-спектрометра МКС-АТ6101ДР, погружного гамма-спектрометра МКС-АТ6104ДМ.

### Цель и задачи исследования

**Цель работы** - разработать, теоретически обосновать и апробировать оборудование, методическое и метрологическое обеспечение для локальных *in situ* измерений загрязненных радионуклидами  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  почв, акваторий и донных отложений.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. разработать модели устройств детектирования и определить функции отклика спектрометров к радионуклидам  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почве и донных

отложениях, к основным дозообразующим гамма-излучающим радионуклидам в воде с использованием моделирования методом Монте-Карло;

2. определить поле обзора спектрометра при *in situ* измерениях почв и донных отложений в геометрии измерения «устройство детектирования расположено на поверхности источника гамма-излучения»;

3. определить требования к конструктивным элементам устройств детектирования, метрологические параметры в заданных геометриях измерения, разработать алгоритмы анализа аппаратурных спектров, разработать и обосновать методическое и метрологическое обеспечение гамма-спектрометров для *in situ* измерений удельной активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ;

4. провести экспериментальные исследования и апробацию разработанных портативных спектрометров, моделей и методик.

**Объект исследования.** Приборы для *in situ* измерений, позволяющие определять удельную активность радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах, акваториях и донных отложениях без отбора проб, коллимирующих устройств и вспомогательного оборудования.

**Предмет исследования.** Метрологические параметры спектрометров, модели, алгоритмы и методики *in situ* измерений содержания радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах, акваториях и донных отложениях.

### Научная новизна

Разработаны и изготовлены функционально-законченные портативные спектрометры для локальных *in situ* измерений удельной активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах и донных отложениях, соответствующее методическое и метрологическое обеспечение.

Разработана и реализована в портативных спектрометрах методика определения толщины загрязненного радиоцезием слоя почвы и донных отложений.

Разработаны методики локальных *in situ* измерений удельной активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах и донных отложениях.

### Положения, выносимые на защиту

1. Разработаны и изготовлены портативные спектрометры для *in situ* измерений удельной активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах и донных отложениях, функционирующие на основе предложенной и реализованной методики определения толщины загрязненного слоя объекта измерения, основанной на сравнении экспериментального спектра с теоретическими, полученными путем моделирования процесса измерения методом Монте-Карло.

2. Разработанная и реализованная методика локальных *in situ* измерений удельной активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах, за счет

теоретически и экспериментально обоснованной геометрии измерения, обеспечивает нижнюю границу диапазона 50 Бк/кг за время экспозиции 5 минут с погрешностью не более  $\pm 30\%$ , в том числе от неравномерности распределения радионуклидов по вертикальному профилю до  $\pm 10\%$  и от вариативности плотности почвы менее  $\pm 5\%$ .

3. Предложена и реализована методика *in situ* измерений удельной активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  с погрешностью до  $\pm 50\%$  за время экспозиции 5 минут в донных отложениях с нижней границей диапазона 100 Бк/кг, преимущества которой заключаются в ограниченности влияния вариативного характера распределения радионуклидов по профилю не более  $\pm 10\%$ , теоретическом и экспериментальном обосновании расположения устройства детектирования и его возможного заглубления в загрязненный радионуклидами донный слой.

### **Личный вклад соискателя**

Результаты, выносимые на защиту, получены соискателем лично. Автор определил требования к конструктивным элементам устройств детектирования и их моделям; предложил, теоретически обосновал и экспериментально подтвердил методику локальных *in situ* измерений активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах и донных отложениях без предварительного определения характера и глубины распределения радионуклидов по профилю и коллимирующих устройств; определил зависимость эффективного радиуса участка почвы и донных отложений для заданного распределения радионуклидов по профилю от эффективной толщины загрязненного слоя, применительно к локальным *in situ* измерениям без средств коллимации излучения; разработал методику определения эффективной толщины загрязненного радионуклидами слоя почвы и донных отложений, которая используется при проведении обследований загрязненных территорий в прилегающих зонах к АЭС Фукусима-1 и Чернобыльской АЭС; разработал методики выполнения измерений с помощью разработанных в рамках работы устройств в геометриях измерения  $2\pi$  и  $4\pi$ . Автор участвовал в научно-исследовательских экспедициях по обследованию загрязненных территорий (населенных пунктов, полей, лугов и пр.) Гомельской (Полесский государственный радиационно-экологический заповедник) и Минской (Воложинский район) областей Республики Беларусь, а также в обследовании донных отложений оросительных прудов на территории региона Тохоку, Япония.

Научные руководители Чудаков В.А. и Кутень С.А. принимали участие в постановке задачи и обсуждении результатов.

Автор признателен соавторам: директору УП «АТОМТЕХ» канд. техн. наук ст.н.с. В.А. Кожемякину, канд. техн. наук О.М. Аншакову, В.А. Чирикало,

В.Д. Гузову, А.О. Ничипорчуку, А.Н. Толкачеву, Е.А. Коновалову, А.М. Бирило, А.В. Савицкому (УП «АТОМТЕХ»); канд. физ.-мат. наук ст.н.с. А.А. Хрущинскому (НИИ ЯП БГУ); В.И.Макаревичу (БелГИМ); проф. Н. Ishii (Фукусимский университет); Ph.D (Nuclear Engineering) Н. Sugai и М. Mogi («Rad-Solutions», Фукусима, Япония); А. Hara и Т. Yamada («Advanced Fusion Technology», Токио, Япония).

Результаты, полученные соавторами, не вошли в диссертацию.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании результатов**

Материалы диссертационной работы были представлены на:

Международном совещании «ППСР-2011»: Прикладные проблемы спектрометрии и радиометрии (г. Санкт Петербург, 2011);

14-ой Международной конференции «Сахаровские чтения 2014 год: Экологические проблемы XXI века», (г. Минск, 2014);

LXIV International Conference «Nucleus 2014»: Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies, (г. Минск, 2014);

4-ой Международной конференции «ИСМАРТ 2014»: Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии, (г. Минск, 2014);

Международном совещании «ППСР-2015»: Прикладные проблемы спектрометрии и радиометрии (г. Санкт Петербург, 2015);

5-ой Международной конференции «ИСМАРТ 2016»: Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии (г. Минск, 2016);

17-ой Международной конференции «Сахаровские чтения 2017 год: Экологические проблемы XXI века» (г. Минск, 2017);

Международном совещании «ППСР-2017»: Прикладные проблемы спектрометрии и радиометрии (г. Москва, 2017).

Результаты диссертационной работы использованы в процессе разработки и серийного выпуска многофункционального гамма-спектрометра МКС-АТ6101ДР и погружного гамма-спектрометра МКС-АТ6104ДМ в Научно-производственном унитарном предприятии «АТОМТЕХ», ОАО «МНИПИ» (получены два патента [19, 20]). Разработана методика определения эффективной толщины загрязненного радионуклидами слоя почвы и донных отложений, которая реализована в программном обеспечении указанных спектрометров, что подтверждено одним актом о внедрении.

Разработаны, метрологически аттестованы и внесены в Государственный Реестр Республики Беларусь и Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений Российской Федерации три методики выполнения измерений [21 - 23], применение которых подтверждено одним актом о внедрении в РНИУП «Институт радиологии» и одним актом о внедрении в УП «АТОМТЕХ».

### **Опубликованность результатов диссертации.**

Основные результаты диссертации опубликованы в 18 научных работах, из них 8 статей в рецензируемых научных журналах в соответствии п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 4,5 авторских листа), 2 статьи в сборниках материалов научных конференций, 8 тезисов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, основной части (пять глав), заключения, библиографического списка и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 164 страницы, в том числе 81 рисунок занимает 38 страниц, 24 таблицы на 9 страницах, два приложения занимают 6 страниц. Библиографический список содержит 142 (72 на иностранном языке) наименования, включая собственные публикации соискателя ученой степени.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**В первой главе** представлен обзор литературы по теме исследований. Анализ литературных источников показал, что для проведения периодического и постоянного радиационного контроля и мониторинга объектов окружающей среды на объектах ядерно-топливного цикла и загрязненных в результате радиационных аварий территориях требуется разработка новых моделей, алгоритмов функционирования и методик проведения измерений. Как для населенных пунктов, так и для сельскохозяйственных угодий, оросительных прудов, зачастую требуется проведение детального обследования с периодическим уточнением уровня и масштаба загрязнения с целью принятия решения возможности их дальнейшего использования (неиспользования) и определения способов и механизмов проведения реабилитационных мероприятий. На основе анализа научных публикаций показана необходимость проведения исследований в области локальных *in situ* измерений радиоактивного загрязнения почв и донных отложений. Обоснован выбор направления исследований.

**Вторая глава** посвящена разработке приборов, структурных схем многофункциональных *in situ* спектрометров, основных схемотехнических решений оборудования и оценке метрологических характеристик блоков детектирования.

Система анализа энергетических распределений  $\gamma$ -излучения исследуемых радиоактивных источников включает:

- сцинтиллок  $\gamma$ -излучения, реализованный на основе детектора NaI(Tl) размером  $\varnothing 63 \times 63$  мм или  $\varnothing 63 \times 160$  мм (для погружного *in situ* спектрометра);

- блок адаптивного усиления и формирования импульсов напряжения, обусловленных случайным потоком выходных сигналов сцинтиблока на входе параметрического преобразователя;

- измерительного устройства параметрического преобразователя амплитудных значений импульсов случайного потока сигналов сцинтиблока на основе ПЛИС и оперативного представления соответствующих им статистических распределений цифровых величин при максимальной загрузке не менее  $10^5$  имп/с<sup>-1</sup> в энергетическом диапазоне от 50 до 3000 кэВ на 1024 каналах, обеспечивающее интегральную нелинейность шкалы менее 1%;

- структурные элементы контроля, светодиодной стабилизации и термокомпенсации измерительного тракта, которые обеспечивают требуемую стабильность измерений и сохранность нормируемых характеристик спектрометров энергий в температурном диапазоне от минус 20°C до плюс 50°C.

Прибор для *in situ* измерений почв (МКС-АТ6101ДР) представляет собой устройство детектирования и портативный компьютер [19]. Специализированное программное обеспечение «АТDR», установленное на портативном компьютере, позволяет использовать МКС-АТ6101ДР в дозиметрическом, спектрометрическом и радиометрическом режимах. Беспроводная связь устройства детектирования с портативным компьютером осуществляется с помощью Bluetooth модуля, также размещенного в герметичном контейнере (рисунок 1а).



**Рисунок 1. – Общий вид гамма-спектрометров для *in situ* измерения радионуклидов <sup>134</sup>Cs и <sup>137</sup>Cs в почвах а), в акваториях и донных отложениях б)**

Погружной гамма-спектрометр (МКС-АТ6104ДМ) для *in situ* измерений акваторий и донных отложений (рисунок 1б) исполнен в виде термоударопрочного водонепроницаемого контейнера из нержавеющей стали, внутри которого расположен сцинтилляционный блок детектирования и

устройство обработки [20]. Спектрометрическая информация по глубоководному кабелю передается на интерфейсный адаптер, связь которого с планшетом осуществляется по технологии Bluetooth.

Функциональные возможности МКС-АТ6104ДМ позволяют использовать его для измерения амплитудного распределения импульсов гамма-излучения, идентификации радионуклидного состава акваторий и донных отложений, а также измерения активности идентифицированных радионуклидов в воде с использованием зависимости эффективности регистрации от энергии (геометрия измерения  $4\pi$ ) и удельной активности изотопов цезия и естественных радионуклидов в донных отложениях (геометрия измерения  $2\pi$ ) с использованием коэффициентов чувствительности, рассчитанных в зависимости от толщины загрязненного радиоцезием донного слоя.

**Третья глава** посвящена разработке функциональной связи детектора и источника для определения влияния размеров сцинтилляционного кристалла на поле обзора детектора, применительно к локальным *in situ* измерениям [2] и результатам моделирования методов Монте-Карло, используемого для нахождения функций отклика спектрометров в заданных геометриях измерения [4, 7].

Расчетным методом, использованным для описания прохождения нерассеянного гамма-излучения, показано слабое влияние размера сцинтилляционного кристалла на поле обзора устройства детектирования. Влияние максимально (порядка 9 %) для загрязнения с толщиной загрязненного слоя  $d=2$  см и, практически исчезает уже для толщины загрязненного слоя более 5 см. Для устройства детектирования, расположенного на поверхности источника показана тенденция к уменьшению поля обзора детектора (зоны влияния) при увеличении толщины слоя почвы с равномерно распределенным радионуклидом.

Моделирование методом Монте-Карло (далее моделирование) процесса переноса гамма-излучения осуществлялось в геометриях измерения  $2\pi$  и  $4\pi$ .

В ходе выполнения поставленных задач для моделирования разработаны и верифицированы модели устройств детектирования спектрометров и источников.

Модель равномерно загрязненного слоя почвы или донных отложений представляет собой цилиндр толщиной  $d$  и радиусом  $r$ . При фиксированной толщине с ростом радиуса число гамма-квантов, вылетевших из областей источника, расположенных на значительном расстоянии относительно устройства детектирования, быстро увеличивается, но при этом их вероятность попасть в детектор и зарегистрироваться становится пренебрежимо мала. При моделировании размеры источника следует ограничить некоторым эффективным радиусом  $r_{eff}$ , при котором показания спектрометра практически

не будут изменяться относительно источника с радиусом  $r \gg r_{eff}$ , а теоретический спектр будет по форме и интенсивности соответствовать экспериментальному. Количественной характеристикой измеряемой области в этом случае будет эффективный объем  $V_{eff}$ , в котором равномерно распределены стартовые позиции разыгрываемых частиц.

Теоретический спектр  $I(E)$  определяется суммарным числом гамма-квантов заданной энергии  $E_0$ , квантовым выходом  $P_\gamma$  и может быть представлен в виде

$$I(E) = \eta(E, E_0) A_v V P_\gamma, \quad (1)$$

где  $\eta(E, E_0)$  – энергетический спектр, полученный путем моделирования процесса переноса гамма-излучения с энергией  $E_0$  в заданной геометрии измерения.

Скорость счета импульсов  $I_{FEP}$  в области пика полного поглощения (ППП) в диапазоне  $\pm 3\sigma$  с ростом радиуса  $r$  при фиксированной толщине  $d$  будет стремиться к насыщению и аппроксимируется простейшей функцией насыщения

$$I_{FEP}(r) = a + b(1 - \exp(-r / r_0)) \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $r_0$  – коэффициенты, которые определяются путем аппроксимации результатов моделирования [2].

Для определения эффективного радиуса целесообразно использовать допустимое относительное отклонение  $\beta$  показаний  $I_{FEP}(r)$  для заданного радиуса источника  $r$  относительно показаний спектрометра для источника условно бесконечной протяженности  $I_{det}(\infty)$  [2, 4, 7]. По определению величина  $\beta$  может быть представлена в виде

$$\beta = \frac{I_{FEP}(\infty) - I_{FEP}(r)}{I_{FEP}(\infty)}. \quad (3)$$

Значение радиуса  $r$ , используемое в выражении (3) может рассматриваться как эффективный радиус  $r = r_{eff}$  для допустимого относительного отклонения  $\beta$ .

С учетом выражений (2, 3) величину  $r_{eff}$  можно представить в виде

$$r_{eff} = r_0 \ln \left( \frac{b}{\beta \cdot (a + b)} \right), \quad (4)$$

В зависимости от толщины загрязненного слоя все параметры в формуле (2) индивидуальны для каждого значения  $d$ .

Используя моделирование процесса переноса гамма-излучения в системе «источник-детектор» рассчитаны средние значения эффективного радиуса участка почв и донных отложений для заданных толщин загрязненного радионуклидами  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  слоя. При расчете значений эффективного радиуса моделирование позволило учесть рассеянные на атомах среды гамма-кванты. Увеличение более чем на 20% значения эффективного радиуса для

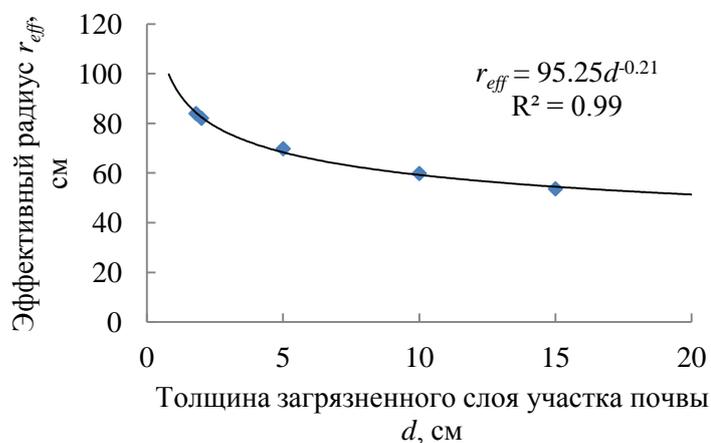
$\beta=10\%$  относительно значений  $r_{eff}$  без учета рассеянного гамма-излучения наблюдается для всех рассматриваемых толщин загрязненного слоя почвы.

Модели устройств детектирования спектрометров и источника гамма-излучения позволили получить теоретические спектры в геометрии измерения  $2\pi$  для различных толщин загрязненного радионуклидами  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  слоя почвы и донных отложений с учетом значений эффективного радиуса источника [3, 7].

#### *Измерение радионуклидов $^{134}\text{Cs}$ и $^{137}\text{Cs}$ в почвах*

Расположение устройства детектирования непосредственно на почве позволяет определить эффективную толщину загрязненного слоя участка почвы, что необходимо учитывать, в том числе и в процессе определения требований к комплексу реабилитационных мероприятий [4, 6]. Высокая чувствительность спектрометра к радионуклидам  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в предлагаемой геометрии измерения позволяет выполнять измерения значений удельной активности в пределах нижней границы диапазона 50 Бк/кг с заданной погрешностью не более  $\pm 30\%$  за время не более 5 минут.

Результат анализа данных моделирования, представленный на рисунке 2 в виде зависимости эффективного радиуса  $r_{eff}$  от толщины загрязненного слоя почвы  $d$  говорит об отсутствии необходимости учета толщины загрязненного слоя при *in situ* измерениях в случаях, когда ее значение превышает 25 см [4].



**Рисунок 2. – Зависимость эффективного радиуса участка от толщины однородно загрязненного слоя почвы (♦) и их аппроксимация (—)**

В процессе естественной миграции на некультивируемых почвах радионуклиды неравномерно распределяются по почвенному профилю. Результаты моделирования позволили определить погрешность результатов измерения удельной активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почве, обусловленную неравномерным распределением радионуклидов по почвенному профилю.

Теоретический спектр, формируемый слоем источника с неравномерно заглубленными радионуклидами по профилю, имеет схожую форму и интенсивность по отношению к теоретическому спектру для случая с равномерным распределением радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в источнике некоторой толщины.

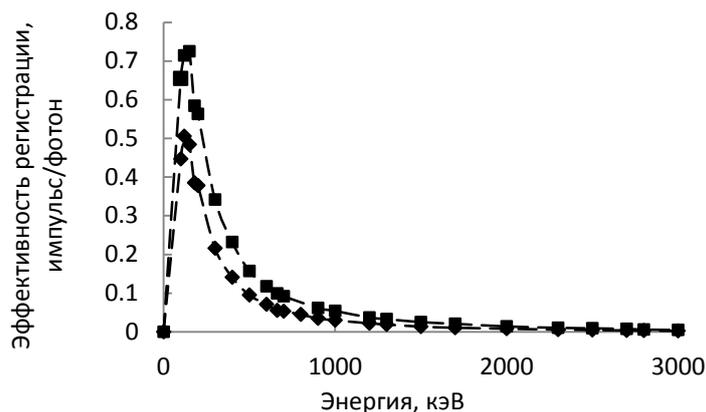
Показано, что для неравномерного (экспоненциального) заглубления радионуклидов до 3 см, 5 см, 7 см и 12 см формирование экспериментального спектра обеспечивается за счет гамма-излучения из эффективной толщины загрязненного слоя почвы, в котором содержится более 90% радионуклидов. Учитывая относительное содержание радиоцезия в эффективном слое и степень ослабления гамма-квантов в зависимости от заглубления радионуклидов, погрешность результата измерения удельной активности  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , обусловленная их неравномерным распределением по почвенному профилю, не будет превышать  $\pm 10\%$  [6, 16].

Исследовано влияние изменения плотности почвы в диапазоне от  $1,3 \text{ г/см}^3$  до  $1,8 \text{ г/см}^3$  на результаты измерения удельной активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Эффект ослабления гамма-излучения, в том числе зависящий и от плотности почвы, компенсируется изменением  $r_{eff}$  источника, при этом масса пробы, обеспечивающая формирование амплитудного распределения импульсов, изменяется в пределах  $\pm 2\%$ . Приведенное на единицу массы показание спектрометра в области ППП ( $\pm 3\sigma$ ) изменяется в пределах  $\pm 5\%$  в диапазоне от  $1,3 \text{ г/см}^3$  до  $1,8 \text{ г/см}^3$  относительно показания спектрометра при плотности почвы  $1,5 \text{ г/см}^3$ .

Установлено пренебрежимо малое влияние непостоянной плотности почвы по профилю [6]. При изменении плотности почвы в сторону увеличения в диапазоне от  $1,1 \text{ г/см}^3$  до  $1,8 \text{ г/см}^3$  с шагом  $0,2 \text{ г/см}^3$  на один сантиметр глубины, показания спектрометра при измерении почвы с различной по профилю плотностью относительно показаний спектрометра при фиксированной плотности почвы на уровне  $1,5 \text{ г/см}^3$  находятся в пределах  $\pm 1\%$ .

#### *Геометрия измерения $4\pi$ для погружного гамма-спектрометра*

В ходе выполнения исследований для погружного спектрометра с целью разработки методики измерения удельной активности основных дозообразующих гамма-излучающих радионуклидов в воде, определены зависимости эффективности регистрации в геометрии измерения  $4\pi$  (рисунок 3). Для заданного значения энергии гамма-излучения учитывался эффективный объем воды, который определяется значением эффективного радиуса – радиуса загрязненной сферы, обеспечивающей формирование амплитудного распределения импульсов, интегральное значение которого превышает 90 % относительно показаний спектрометра при измерении условно бесконечного источника [5].



**Рисунок 3. – Зависимость эффективности регистрации от энергии гамма-излучения в геометрии измерения  $4\pi$  для УД на основе сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) размерами  $\text{Ø}63 \times 63$  мм (-♦-) и  $\text{Ø}63 \times 160$  мм (-■-)**

Возможность обнаружить, идентифицировать и определить активность техногенных радионуклидов в воде является важным этапом измерения радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях в геометрии измерения  $2\pi$ .

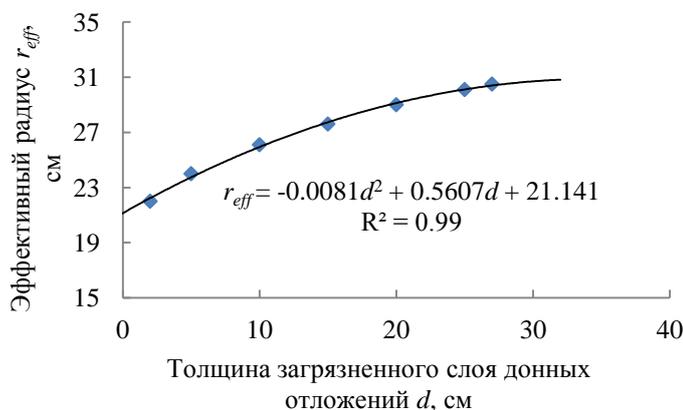
*Измерение радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях в геометрии измерения  $2\pi$*

Результаты исследований показали преимущества проведения измерений радиационного загрязнения донных отложений при горизонтальном расположении устройства детектирования на поверхности источника [5]. Такое расположение устройства детектирования, оснащенного встроенным гироскопом, позволяет наиболее полно обеспечить прослеживаемость и повторяемость измерений в реальных условиях обследования водоемов с непостоянным горизонтальным профилем дна. Для снижения нижней границы диапазона измерения удельной активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  целесообразно использовать удлиненный детектор. При горизонтальном расположении устройства детектирования на основе такого детектора существенно возрастает чувствительность спектрометра к гамма-излучающим радионуклидам в геометрии измерения  $2\pi$ .

Представленная на рисунке 4 зависимость радиуса  $r_{eff}$  от толщины  $d$  при измерении донных отложений показывает, что при равномерном распределении контролируемого радионуклида в толщине  $d$  более 25 см изменение отклика детектора относительно его показаний при  $d=25$  см не превышает 2 %, что объясняется высокой вероятностью рассеяния и поглощения гамма-квантов в воде на пути к детектору [4].

Увеличение эффективного радиуса при увеличении толщины загрязненного слоя донных отложений объясняется наличием водной среды, в

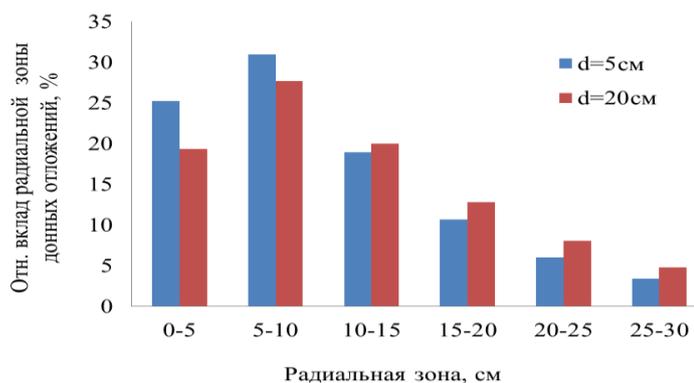
которой рассеиваются и поглощаются гамма-кванты на пути к детектору, что также объясняет и небольшое значение  $r_{eff}$ .



**Рисунок 4.** – Зависимость эффективного радиуса от толщины загрязненного слоя донных отложений (♦) и ее аппроксимация (—)

Исследовано влияние заглубления УД в активный слой донных отложений. При заглублении устройства детектирования в донные отложения на 1-2 см, относительно границы раздела сред, показания спектрометра изменяются в пределах  $\pm 5\%$  для толщин загрязненного слоя донных отложений от 5 см. Незначительное изменение скорости счета в области ППП ( $\pm 3\sigma$ ) теоретического спектра радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  обусловлено уменьшением эффективного радиуса загрязненного слоя донных отложений при заглублении устройства детектирования [8].

Установлено, что при локальных *in situ* измерениях донных отложений, участки источника, расположенные в радиусе 20 см, обеспечивают основной вклад в показание спектрометра вне зависимости от толщины загрязненного слоя (рисунок 5).



**Рисунок 5.** – Относительный вклад загрязненного участка в зависимости от его удаления от центра детектора

Очевидно, при практической реализации *in situ* измерений рельеф дна должен отвечать принятой модели, что вполне выполнимо в пределах относительно небольшой, как в данном случае, зоны влияния [8].

**В четвертой главе** представлены математические алгоритмы обработки аппаратных спектров, использование которых позволяет определять активность  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах и донных отложениях без специального вспомогательного оборудования.

Для обеспечения *in situ* измерений разработаны функции преобразования аппаратных спектров с целью уменьшения статистических выбросов; алгоритмы поиска и идентификации ППП; функции, позволяющие описать информативные участки аппаратного спектра с минимальным отклонением от аппаратного спектра и определять основные параметры ППП, в том числе составляющих сложные мультиплеты [1].

Для решения задач радиационного контроля и мониторинга почв и донных отложений с использованием *in situ* измерений разработана методика определения толщины загрязненного слоя источника в процессе измерения экспериментального спектра в заданной геометрии измерения. Определение толщины осуществляется путем сравнительного анализа измеряемого экспериментального спектра с теоретическими [4, 7], полученными с использованием моделирования для устройств детектирования с реальными метрологическими характеристиками, и включает следующие этапы:

- вычит фоновой составляющей, обусловленной собственным фоном устройства детектирования и космическим излучением;
- поиск и идентификация ППП естественных и техногенных радионуклидов;
- определение параметров найденных ППП (положение центроида пика, полная ширина пика на полувысоте, площадь пика за вычетом фонового пьедестала);
- построение суммарного теоретического спектра с учетом всех идентифицированных радионуклидов и нормированных теоретических спектров для заданных толщин загрязненного слоя донных отложений;
- определение расхождения каждого суммарного теоретического спектра в заданном энергетическом интервале относительно экспериментального спектра;
- нахождение функции, аппроксимирующей расхождения, и определение значения толщины загрязненного слоя почвы или донных отложений техногенными радионуклидами.
- определение объема загрязненных контролируемые радионуклидами донных отложений, обуславливающего формирование амплитудного распределения импульсов, с использованием зависимости эффективного радиуса участка от толщины слоя;
- вычисление эффективности регистрации для объема загрязненного слоя почвы или донных отложений путем интерполяции и экстраполяции

калибровочных значений, полученных для фиксированных геометрий измерения на стадии градуировки спектрометра;

- определение плотности загрязнения или удельной активности контролируемых радионуклидов в почве или донных отложениях с использованием зависимости эффективности регистрации от энергии гамма-излучения с учетом всех найденных и идентифицированных линий гамма-излучения.

**В пятой главе** изложены результаты экспериментальной апробации и верификации разработанных спектрометров, моделей и методик.

Приведены результаты экспериментальной апробации и верификации на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварий на АЭС Фукусима-1 (регион Тохоку: г. Ичиносеки, г. Фукусима, г. Корияма.) и ЧАЭС (Гомельская область, ПГРЗ; Воложинский район, д. Сивица). Отклонения результатов обследования почв и донных отложений относительно результатов измерений на основе классического пробоотборного метода и спектрометров на основе детекторов из особо чистого германия, LaBr(Ce) и пластического сцинтиллятора до  $\pm 30\%$  подтверждают работоспособность предложенных алгоритмов и методов. Экспериментальные исследования показывают возможность и эффективность их использования для определения радиоактивности почв и донных отложений, загрязненных в результате аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-1.

Экспериментально подтверждены результаты теоретических исследований по определению эффективного радиуса участка почвы.

Экспериментальные исследования подтвердили заявленные метрологические параметры спектрометров (диапазон измерений удельной активности и границы погрешности) и показали необходимость определения эффективной толщины загрязненного слоя почвы и донных отложений при *in situ* измерениях [3, 7].

На основе результатов исследований разработаны и метрологически аттестованы методики выполнения измерений с использованием гамма-спектрометров в геометриях измерения  $2\pi$  и  $4\pi$  с регламентированными диапазонами измеряемых величин и доверительными границами погрешности [21-23].

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Разработаны и изготовлены приборы для локальных *in situ* измерений удельной активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах и донных отложениях, основных дозообразующих гамма-излучающих радионуклидов в

акваториях с методическим и метрологическим обеспечением. Калибровка осуществляется без объемных стандартных образцов по разработанным и утвержденным инструкциям и основана на использовании разработанной в работе модели процесса переноса гамма-излучения в  $2\pi$  и  $4\pi$  геометриях измерения [3, 5, 19-23].

2. Найдены и экспериментально подтверждены аналитические зависимости поля обзора детектора гамма-излучения от эффективной толщины загрязненного радионуклидами слоя почвы и донных отложений применительно к локальным *in situ* измерениям при расположении устройства детектирования непосредственно на поверхности объекта измерения [4, 7]. Показано малое влияние размера сцинтилляционного кристалла на поле обзора детектора [2]. Определена энергетическая зависимость эффективности регистрации погружного гамма-спектрометра в воде, с учетом эффективного радиуса зоны влияния в зависимости от энергии гамма-излучения для блоков детектирования на основе NaI(Tl) размерами  $\varnothing 63 \times 63$  мм и  $\varnothing 63 \times 160$  мм [5].

3. Разработана и реализована в портативных спектрометрах методика определения толщины загрязненного слоя почвы и донных отложений, в котором распределено более 90% радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , в рамках выполнения локальных *in situ* измерений за время не более 1 минуты с момента начала измерения аппаратурного спектра в геометрии измерения  $2\pi$  [4, 7, 13, 16-18].

4. Разработаны методики выполнения измерений, позволяющие определять удельную активность радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах с нижней границей диапазона 50 Бк/кг за время не более 5 минут с погрешностью до  $\pm 30\%$  и донных отложениях с нижней границей диапазона 100 Бк/кг за время не более 5 минут с погрешностью до  $\pm 50\%$  [6, 8, 21, 23].

5. Разработаны и реализованы в средствах измерений алгоритмы обработки аппаратурных спектров, позволяющие решать задачи радиационного контроля почв, акваторий и донных отложений без использования какой-либо априорной информации об объекте контроля. Совокупность разработанных алгоритмов позволила создать функционально законченные средства измерений для обеспечения локальных *in situ* измерений [1, 7, 21-23].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Результаты диссертационных исследований позволили разработать и изготовить функционально законченное оборудование для *in situ* измерений, что подтверждено двумя патентами на серийные промышленные образцы гамма-спектрометров (многофункциональный гамма-спектрометр МКС-АТ6101ДР пат. № 2657 Республики Беларусь и погружной гамма-спектрометр МКС-АТ6104ДМ пат. № 3278 Республики Беларусь).

2. Разработанные, метрологически аттестованные и внесенные в Государственный реестр Беларуси и Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений Российской Федерации три методики выполнения измерений [21 – 23] используются в составе гамма-спектрометра МКС-АТ6101ДР и погружного спектрометра МКС-АТ6104ДМ для определения радиоактивности почв, акваторий и донных отложений, пострадавших в результате аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-1, что подтверждается двумя актами о внедрении.

3. Представленные математические алгоритмы обработки аппаратурных спектров реализованы в ряде других серийных промышленных образцах гамма-спектрометров, включая оборудование, предназначенное для решения задач обеспечения системы радиационной безопасности на АЭС и других предприятиях ЯТЦ.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

*Статьи в научных журналах, соответствующих п. 18 Положения о присуждении и присвоении ученых званий в Республике Беларусь*

1. Спектрометр для измерения активности гамма-излучающих радионуклидов в легких взрослого человека. Часть 2. Математическое обеспечение СКГ-АТ1316А / А. И. Жуковский, А. Н. Толкачев, Е. А. Коновалов, В. Д. Гузов, А. А. Хрущинский, С. А. Кутень, В. А. Чудаков // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2. – С. 5–11.

2. Оценка области влияния загрязненного участка почвы при решении задач радиационного мониторинга методом *in situ* / А. И. Жуковский, С. А. Кутень, А. А. Хрущинский, А. Н. Толкачев, В. Д. Гузов, В. А. Кожемякин, В. А. Чудаков // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 1. – С. 119–125.

3. Жуковский, А. И. Портативный гамма-спектрометр МКС-АТ6101ДР для измерения методом *in situ* / А. И. Жуковский, В. И. Макаревич, В. Д. Гузов // Метрология и приборостроение. – 2015. – Т. 3, № 40 – С. 9–12.

4. Жуковский, А. И. Измерение радиоактивности почв методом *in situ* / А. И. Жуковский, К. Моги, С. А. Кутень // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 3. – С. 105–110.

5. Gamma-spectrometer for water and bottom sediment radiation monitoring / A. Zhukouski, O. Anshakou, A. Birila, V. Chirikala, Y. Kanavalau, A. Nichyparchuk, A. Savitski, A. Khrutchinsky, S. Kutsen // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 3. – С. 256–261.

6. The influence of soil density and the character of radioactive  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  pollution`s distribution on *in situ* measurements / A. Zhukouski, O. Anshakou,

A. Nichyparchuk, P. Marozik, S. Kutsen // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 40–47.

7. Zhukouski, A. *In situ* measurement of radioactive contamination of bottom sediments / A. Zhukouski, O. Anshakou, S. Kutsen // Appl. Radiation a. Isotopes. – 2018. – № 139. – P. 114–120.

8. Влияние заглубления устройства детектирования погружного гамма-спектрометра в радиоактивно загрязненный радионуклидами цезия слой донных отложений на оценку их удельной активности / А. И. Жуковский, А. Н. Толкачев, О. М. Аншаков, С. А. Кутень // АНРИ: аппаратура и новости радиацион. измерений. – 2018. – № 4. – С. 2–7.

*Статьи в сборниках материалов научных конференций*

9. Гамма-спектрометр МКС-АТ6104ДМ для радиационного контроля водоемов и донных отложений / А. И. Жуковский, А. О. Ничипорчук, С. В. Крук, В. А. Чудаков // Сахаровские чтения 2014: экологические проблемы XXI века : материалы 14-й междунар. науч. конф., Минск, 29–30 мая 2014 г. / Междунар. гос. экол. ун-т ; под общ. ред. В. И. Дуная, С. С. Позняка, Н. А. Лысухо. – Минск, 2014. – С. 193.

10. Влияние неравномерного заглубления радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  на результаты *in situ* измерений / А. И. Жуковский, А. О. Ничипорчук, О. М. Аншаков, А. А. Хрущинский, М. С. Морозик, Л. Ф. Бабичев, С. А. Кутень // Сахаровские чтения 2017: экологические проблемы XXI века : материалы 17-й междунар. науч. конф., Минск, 18–19 мая 2017 г. : в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ун-т ; под общ. ред. С. А. Маскевича, С. С. Позняка. – Минск, 2017. – Ч. 2. – С. 86–87.

*Тезисы докладов*

11. Многофункциональный портативный гамма-спектрометр МКС-АТ6101ДР для радиоэкологического мониторинга окружающей среды / А. М. Бирило, В. Д. Гузов, А. И. Жуковский, В. А. Кожемякин, О. А. Нахайчук, В. А. Чирикало // Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии : тез. докл. 12 междунар. совещ. «ППСР–2011», Санкт-Петербург, 10–14 сент. 2011 г. / под общ. ред. В. Н. Даниленко [и др.]. – СПб., 2011. – С. 45.

12. The results of numerical simulation of the detection device and measurement geometry for deep radiation monitoring / A. Zhukouski, U. Chirikalo, D. Abalonski, S. Kruk, S. Kuten, A. Khrutschinsky, V. Guzov, V. Kozhemyakin, V. Chudakov // Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies : LXIV Intern. conf. «Nucleus 2014» : book of abstr., Minsk, July 1–4, 2014 / Research Inst. for Nuclear Problems of Belarus State Univ. [et al.] ; ed. A. K. Vlasnikov. – Minsk, 2014. – P. 205.

13. *In situ* monitoring of soil contamination by multifunctional AT6101DR portable gamma-spectrometer taking into account radionuclide depth / A. Zhukouski,

A. Nichyparchuk, A. Tolkachev, S. Kuten, A. Khrutschinsky, V. Guzov, V. Kozhemyakin, V. Chudakov // Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies : LXIV Intern. conf. «Nucleus 2014» : book of abstr., Minsk, July 1–4, 2014 / Research Inst. for Nuclear Problems of Belarus State Univ. [et al.] ; ed. A. K. Vlasnikov. – Minsk, 2014. – P. 219.

14. Гамма-спектрометр МКС-АТ6104ДМ для радиационного контроля водной среды и придонных отложений / А. И. Жуковский, В. А. Чирикало, С. В. Крук, В. Д. Гузов, В. А. Кожемякин // Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии: ИСМАРТ 2014 : 4-я междунар. конф., Минск, 12–16 окт. 2014 г. : тезисы / Ин-т ядер. проблем Белорус. гос. ун-та, Ин-т сцинтилляцион. материалов НАН (Украина), Объед. ин-т ядер. исслед. (Россия) ; ред. М. В. Коржик – Минск, 2014. – С. 74.

15. Численное моделирование радиоактивного загрязнения почвы и измерений *in situ* / А. И. Жуковский, С. А. Кутень, А. А. Хрущинский, А. О. Ничипорчук, В. Д. Гузов, В. А. Кожемякин // Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии: ИСМАРТ 2014 : 4-я междунар. конф., Минск, 12–16 окт. 2014 г. : тезисы / Ин-т ядер. проблем Белорус. гос. ун-та, Ин-т сцинтилляцион. материалов НАН (Украина), Объед. ин-т ядер. исслед. (Россия) ; ред. М. В. Коржик. – Минск, 2014. – С. 75.

16. АТ6101DR gamma-spectrometer for soil radiation control and monitoring by *in situ* as a result of Belarus and Japan cooperation in overcoming the consequences of the accident at the nuclear power plant in Fukushima / A. Zhukouski, A. Nichyparchuk, V. Chirikalo, V. Guzov, V. Kozhemyakin, S. Kuten, A. Khrutschinsky, M. Mogi, K. Mogi, T. Fukuhara, T. Yajima, H. Ishii, V. Chudakov // Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии : тез. докл. 13-ого междунар. совещ. «ППСР–2015», Санкт-Петербург, 5–8 окт. 2015 г. / под ред. В. Н. Даниленко [и др.]. – СПб., 2015. – С. 160–163.

17. АТ6104DM gamma spectrometer for radiation monitoring water areas and bottom sediments. Results of mathematical and experimental researches / A. Zhukouski, V. Chirikalo, V. Guzov, V. Kozhemyakin, S. Kuten, A. Khrutschinsky, T. Fukuhara, T. Yajima, M. Mogi, K. Mogi, V. Chudakov // Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии : тез. докл. 13-ого междунар. совещ. «ППСР–2015», Санкт-Петербург, 5–8 окт. 2015 г. / под ред. В. Н. Даниленко [и др.]. – СПб., 2015. – С. 164–167.

18. Gamma-spectrometer for radiation monitoring water areas and bottom sediment / A. Zhukouski, V. Chirikalo, S. Kuten, A. Khrutschinsky // Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии: ИСМАРТ 2016 : пятая междунар. конф., Минск, 26–30 сент. 2016 г. : сб. тез. докл. / Inst. for nuclear problems of Belarusian state univ., Inst. for scintillation materials of Nat.

acad. of sciences (Ukraine), Joint Inst. for nuclear research (Russia). – Минск, 2016. – С. 142.

### *Патенты*

19. Гамма-спектрометр : пат. ВУ 2657 / В. Д. Гузов, А. М. Бирило, А. И. Жуковский, В. А. Чирикало, А. Н. Семеняко, Е. В. Быстров. – Оpubл. 28.02.2013.

20. Спектрометр погружной : пат. ВУ №3278 / А. М. Бирило, В. А. Чирикало, А. И. Жуковский. – Оpubл. 03.11.2014.

### *Методики выполнения измерений*

21. Методика выполнения измерений поверхностной и удельной активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почве с использованием спектрометра МКС-АТ6101ДР (разработчики: А. И. Жуковский, В. Д. Гузов). МВИ.МН 5278-2015: утв. директором Научно-производственного унитарного предприятия «АТОМТЕХ» ОАО «МНИПИ» 10.07.2015. – Минск, 2015. – 16 с.

22. Методика выполнения измерений удельной активности радионуклидов  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  в водной среде без отбора проб с использованием спектрометра МКС-АТ6104ДМ или МКС-АТ6104ДМ1 (разработчики: А. И. Жуковский, В. Д. Гузов). МВИ.МН 5362-2015: утв. директором Научно-производственного унитарного предприятия «АТОМТЕХ» ОАО «МНИПИ» 23.10.2015. – Минск, 2015. – 15 с.

23. Методика выполнения измерений удельной активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  в донных отложениях без отбора проб с использованием спектрометра МКС-АТ6104ДМ (разработчик А. И. Жуковский). МВИ.МН 5806-2017: утв. директором Научно-производственного унитарного предприятия «АТОМТЕХ» ОАО «МНИПИ» 13.06.2017. – Минск, 2017. – 15 с.

## РЭЗІЮМЭ

Жукоўскі Аляксандр Іванавіч

### Метады і сродкі для лакальных *in situ* вымярэнняў актыўнасці $^{134}\text{Cs}$ і $^{137}\text{Cs}$ ў глебе і донных адкладаннях

**Ключавыя словы:** прыборы для *in situ* вымярэння глеб і донных адкладанняў, мадэляванне метадам Монтэ-Карла, эфектыўны радыус забруджанага ўчастка, таўшчыня забруджанага пласта.

**Мэта даследвання:** Распрацаваць, тэарэтычна абгрунтаваць і верыфікаваць прыборы, метадычнае і метралагічнае забеспячэнне для лакальных *in situ* вымярэнняў глебы і адкладанняў, забруджаных радыёнуклідамі  $^{134}\text{Cs}$  і  $^{137}\text{Cs}$ .

**Метады даследвання і апаратура:** У працэсе выканання работы выкарыстоўваліся разлікова-аналітычныя метады і мадэляванне метадам Монтэ-Карла, якія дазволілі атрымаць функцыі водгуку распрацаваных спектрометраў на аснове крысталаў  $\text{NaI(Tl)}$ . Праведзеныя тэарэтычныя і эксперыментальныя даследаванні дазволілі вызначыць патрабаванні да канструктыўных элементаў *in situ* спектрометраў, ацаніць іх метралагічныя параметры ў заданых геаметрыях вымярэння, атрымаць залежнасць эфектыўнага радыуса ўчастка глебы і донных адкладанняў ад таўшчыні забруджанага радыёнуклідамі пласта.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** Распрацаваны і выраблены функцыянальна-закончаныя партатыўныя спектрометры для лакальных *in situ* вымярэнняў ўдзельнай актыўнасці радыёнуклідаў  $^{134}\text{Cs}$  і  $^{137}\text{Cs}$  ў глебах і донных адкладаннях, адпаведнае метадычнае і метралагічнае забеспячэнне. Распрацавана і рэалізавана ў партатыўных спектрометрах метадыка вызначэння таўшчыні забруджанага пласта глебы і донных адкладаннях у геаметрыі вымярэння 2л. Распрацаваны метадыкі лакальных *in situ* вымярэнняў ўдзельнай актыўнасці радыёнуклідаў  $^{134}\text{Cs}$  і  $^{137}\text{Cs}$  ў глебах і донных адкладаннях.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** Распрацаваныя прыборы і метадыкі *in situ* вымярэнняў выкарыстоўваюцца для вызначэння радыеактыўнасці глебы, акваторый і донавых адкладаў, якія пацярпелі ў выніку аварый на АЭС Фукусіма і Чарнобыльскай АЭС.

**Галіна выкарыстання:** радыёэкалогія, маніторынг навакольнага асяродзя.

## РЕЗЮМЕ

Жуковский Александр Иванович

### Методы и средства для локальных *in situ* измерений активности $^{134}\text{Cs}$ и $^{137}\text{Cs}$ в почвах и донных отложениях

**Ключевые слова:** приборы для *in situ* измерения почв и донных отложений, моделирование методом Монте-Карло, эффективный радиус загрязненного участка, толщина загрязненного слоя.

**Цель исследования:** Разработать, теоретически обосновать и апробировать оборудование, методическое и метрологическое обеспечение для локальных *in situ* измерений загрязненных радионуклидами  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  почв, акваторий и донных отложений.

**Методы исследования и аппаратура:** В процессе выполнения работы использовались расчетно-аналитические методы и численное моделирование методом Монте-Карло, позволившие получить функции отклика разработанных спектрометров на основе кристаллов NaI(Tl). Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили определить требования к конструктивным элементам *in situ* спектрометров, оценить их метрологические параметры в заданных геометриях измерения, получить зависимость эффективного радиуса участка почвы и донных отложений от толщины загрязненного радионуклидами слоя.

**Полученные результаты и их новизна:** Разработаны и изготовлены функционально-законченные портативные спектрометры для локальных *in situ* измерений удельной активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах и донных отложениях, соответствующее методическое и метрологическое обеспечение.

Разработана и реализована в портативных спектрометрах методика определения толщины загрязненного слоя почвы и донных отложений в геометрии измерения  $2\pi$ .

Разработаны методики локальных *in situ* измерений удельной активности радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах и донных отложениях.

**Рекомендации по использованию:** Разработанные приборы и методики для *in situ* измерений используются для определения удельной активности и плотности загрязнения радионуклидами  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  почв, акваторий и донных отложений, пострадавших в результате аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-1.

**Область применения:** радиоэкология, мониторинг окружающей среды.

## SUMMARY

Zhukouski Aliaksandr Ivanavich

### **Methods and devices for local measurements of $^{134}\text{Cs}$ and $^{137}\text{Cs}$ activity in soil and bottom sediments by *in situ***

**Key words:** devices for *in situ* measurements of soil and bottom sediments, Monte-Carlo simulation, the effective radius of the contaminated site, the thickness of the contaminated layer.

**Objective:** To develop devices, methodological and metrological support for *in situ* measurements of contaminated with radionuclides  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  soil and bottom sediments.

**Methods of study and devices:** For investigation the analytical approach and Monte-Carlo simulation have been used, which allowed to calculate the simulated spectra of the developed *in situ* gamma-spectrometers, based on NaI(Tl) crystals. The theoretical and experimental studies made it possible to determine the requirements for construction elements of *in situ* spectrometers, to estimate their metrological parameters in the measurement geometries and to obtain the dependence of the effective radius of soil and bottom sediments on contaminated of layer thickness by radionuclides.

**Obtained results and their novelty:** Functionally completed portable spectrometers for local *in situ* measurements of the specific activity of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  radionuclides in soils and bottom sediments with methodological and metrological support were developed and manufactured.

The technique for determining the thickness of the contaminated soil layer and bottom sediments in  $2\pi$  measurement geometry was developed and implemented in portable spectrometers.

Methods have been developed for local *in situ* measurements of the specific activity of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  radionuclides in soils and bottom sediments.

**Recommendation for use** Developed devices and method for *in situ* measurements are used to determine the specific activity of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in soil, water areas and bottom sediments affected by Fukushima and Chernobyl NPP accidents.

**Field of application:** radioecology, environmental monitoring.