

На правах рукописи

Гурковский Борис Вячеславович

**ПОРТАЛЬНЫЙ МОНИТОР ИСТОЧНИКОВ АЛЬФА- И
БЕТА-РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ОСНОВЕ
ГАЗОРАЗРЯДНОГО СЧЁТЧИКА ОТКРЫТОГО ТИПА**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Автор: 

Москва 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель:

кандидат технических наук

Симаков Андрей Борисович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, заместитель генерального директора по инновациям и производству АО «Научно-исследовательский институт приборов»

Таперо Константин Иванович

кандидат технических наук, ведущий специалист ОАО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники и завод «Микрон»

Вавилов Владимир Алексеевич

Ведущая организация:

ФГКУ «12 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации

Защита состоится 11 октября 2018 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.13 в НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» и на сайте <http://ods.mephi.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 года

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Д.С. Веселов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена растущей в мире загрязнённостью окружающей среды опасными для человека альфа- и бета-радиоактивными нуклидами. Эти процессы связаны с: а) техногенными радиационными катастрофами последних лет (Чернобыль, Фукусима); б) военными действиями (бронебойные снаряды с урановым сердечником, Югославский синдром, войны в Заливе и Сирии), в) пропажей медицинских и технических радиоизотопов (согласно данным Международного агентства по атомной энергии только в Европейском союзе ежегодно теряется до 70 источников) и т.д. Не менее тревожная проблема – опасность радиационного терроризма и реальная возможность применения для массового поражения людей альфа- и бета-радиоактивных нуклидов. Это может быть, например, аэрозольное распыление жидких солей плутония или взрыв так называемой «грязной бомбы». Отдельно стоят актуальные проблемы обеспечения радиационной безопасности на объектах ядерно-энергетического и ядерно-оружейного комплексов. В ряде стран, например, в Германии, происходит демонтаж отработавших блоков атомных электростанций, а в других странах, таких как Турция и Индия, строятся новые мощности атомной энергетики. Особенное место занимает радиационная безопасность на военных ядерных объектах: утилизация атомных реакторов атомных подводных лодок и надводного флота, работа с ядерным оружием и т.д. Наконец, строгий контроль над нераспространением ядерных материалов на контрольно-пропускных пунктах предприятий атомной промышленности требует создания новых автоматизированных систем обнаружения радиационного загрязнения персонала предприятий, а именно: пешеходных порталных мониторов, шлюзовых кабин с возможностями дистанционного контроля, в первую очередь, альфа-радиации. Так, согласно СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)", допустимый уровень загрязнения поверхности неповреждённой кожи, спецбелья, полотенца, внутренней поверхности лицевых частей средств индивидуальной

защиты равен 2 част/см²·мин (примерно $0,7 \cdot 10^{-11}$ г ²³⁹Pu) для альфа-активных нуклидов, и 200 част/см²·мин (40 част/см²·мин для источника ⁹⁰Sr + ⁹⁰Y) для бета-активных нуклидов. А для одежды, обуви и поверхности помещений постоянного пребывания – 5 част/см²·мин и 2000 част/см²·мин соответственно. В то время как существующие мониторы, позволяющие оперативно регистрировать альфа-излучение (по сопутствующему гамма- или нейтронному излучению), не позволяют обнаружить источники с небольшой активностью (например, для приборов высшей категории I П_γ, согласно ГОСТ Р 51635-2000, порог обнаружения составляет 0,03 г или около $6,83 \cdot 10^7$ Бк ²³⁹Pu).

Высокочувствительные порталные мониторы на основе сцинтилляционных детекторов (например, TwoStep-Exit™ компании MIRION с диапазоном измеряемой плотности потока бета-частиц с поверхности равным $1 - 1 \cdot 10^4$ част/см²·мин (15 Бк для ⁹⁰Sr + ⁹⁰Y, 35 Бк для ¹³⁷Cs (β-распад)), 20 Бк – ²⁴¹Am (α-распад)) являются эффективными только для измерения бета-радиоактивных загрязнений из-за небольшой длины пробега альфа-частиц в воздухе, в то время как по условной шкале биологической радиационной опасности действие альфа-радиации в 20 раз превышает действие бета- и гамма-излучений.

Большинство современных детекторов и индикаторов регистрируют либо непосредственно альфа-частицу на её пробеге, либо сопутствующее альфа-распаду гамма-излучение (см. Таблицу 1). Первый метод нельзя назвать дистанционным, второй имеет крайне малую чувствительность. Здесь могут найти применение дистанционные методы обнаружения источников ионизирующего излучения. Разработанные в Лос-Аламосе (США) методы дистанционной регистрации альфа-радиации по измерению ионизационного тока в воздушном зазоре (Макартур Д.В., Болтон Р.Д., Алландер К.С.) не обладают высокой селективностью к другим видам ионизации и не позволяют проводить обследования труднодоступных мест, например, поверхностей сложного профиля.

Попытки обнаруживать треки альфа-частиц в воздухе по рекомбинационному свечению (Ханнуксела В., Тоивонен Дж., Тоивонен Х.) также пока не достигли практической значимости. Прибор на основе дистанционного оптического детектирования,

связанный с флуоресценцией в ближнем ультрафиолетовом диапазоне, при специально подобранном освещении позволяет обнаружить альфа-источник с активностью 1 кБк на расстоянии в 40 см. Так как метод основан на регистрации фотонов, то регистрация возможна только в зоне прямой видимости.

Таблица 1 – Сравнительная таблица существующих порталных мониторов источников альфа- и бета-радиоактивных загрязнений

Основные характеристики	Зарубежные приборы			Отечественные аналоги продукции/технологии		
	CPM-PGN Monitor (Canberra)	TSA PM700 (Raiscan Systems)	GEM-5 Gamma Exit Monitor (Mirion Technologies)	ТСРМ82 (ВНИИА им. Н.Л. Духова)	ППМ-01 АРКА (АО «Интра»)	Янтарь-2П (ЗАО «АС-ПЕКТ»)
Порог обнаружения (α -нуклиды), г	10 (^{235}U); 0,3 (^{239}Pu)	3 (^{235}U); 0,08 (^{239}Pu)	–	1,8 (^{235}U); 0,15 (^{239}Pu)	1,0 (^{235}U); 0,03 (^{239}Pu)	10 (^{235}U); 0,3 (^{239}Pu)
Порог обнаружения (β -нуклиды), кБк	менее 37 (^{60}Co); менее 37 (^{137}Cs)	30 (^{60}Co); 170 (^{133}Ba); 120 (^{137}Cs)	0,555 (^{60}Co); 0,83 (^{137}Cs)	87 (^{60}Co); 102 (^{137}Cs); 70 (^{241}Am); 107 (^{226}Ra)	56 (^{241}Am); 11 (^{133}Ba); 10 (^{137}Cs); 5 (^{60}Co)	11 (^{133}Ba); 11 (^{137}Cs); 7 (^{60}Co)
Время обнаружения, с	1	3	8	3	10	1–2
Дистанция обнаружения, см	40	40	менее 5	50	45	70

На сегодняшний день не существует порталных мониторов, позволяющих одновременно удовлетворять требованиям ГОСТ Р 51635-2000 «Мониторы радиационные ядерных материалов» и СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009» (Рисунок 1).

- 1) ГОСТ Р 51635-2000 «Мониторы радиационные ядерных материалов»
2) СанПиН 2.6.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009»

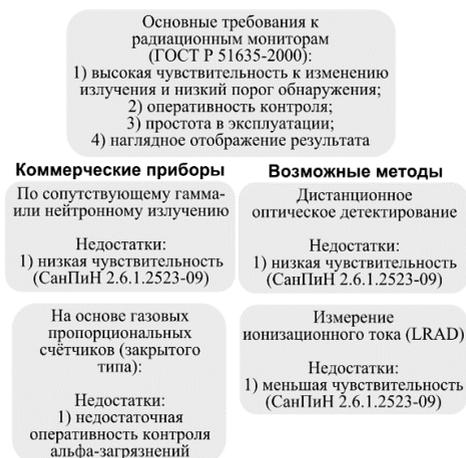


Рисунок 1 – Требования и существующие решения

В НИЯУ МИФИ был предложен практический метод дистанционной газоразрядной регистрации альфа-частиц, обладающий большей чувствительностью и селективностью по сравнению с упомянутыми выше подходами (Мирошниченко В.П., Родионов Б.У., Чепель В.Ю.). В предложенном методе кластеры лёгких аэроионов, возникающие на треках альфа-частиц в воздухе, транспортируются специально сформированным воздушным потоком в газоразрядную камеру открытого типа, где происходит лавинный разряд на высоковольтном нитяном аноде счётного детектора. Среднее время жизни лёгких аэроионов составляет от 5 с (для сильно запылённого воздуха) до 1000 с, что и позволяет их перемещать на расстояние значительно большее, чем длина пробега самой частицы. В отличие от метода на основе

измерения ионизационного тока, усиление сигнала происходит, помимо использования электронного усиления, также за счёт газового усиления, что делает развитие данного метода наиболее подходящим при решении актуальной проблемы оперативной регистрации низкоактивных радионуклидов.

Цель и задачи

Целью диссертационного исследования является разработка методов и средств дистанционной оперативной регистрации поверхностных низкоактивных источников альфа- и бета-радиоактивных загрязнений в замкнутом объёме портального монитора для применения в контрольно-пропускных системах радиационной безопасности на ядерно опасных объектах и системах предупреждения радиационного терроризма.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. проведение сравнительного анализа современных методов и средств дистанционной регистрации ионизирующих излучений для выбора подходящего метода;

2. исследование аэроионного метода как основного метода решения проблемы оперативного обнаружения поверхностных низкоактивных источников альфа- и бета-радиоактивных загрязнений, и выработка технических требований и рекомендаций по проектированию аппаратно-программных средств для регистрации загрязнений в замкнутом объёме портальной кабины на поверхностях сложного профиля;

3. разработка алгоритма расчёта и оптимизации конструкции газоразрядного счётчика открытого типа для повышения эффективности регистрации альфа- и бета-радиоактивных загрязнений в стационарных портальных системах;

4. разработка системы управления портальным монитором на основе газоразрядного счётчика открытого типа для работы в условиях изменяющихся параметров окружающей среды;

5. разработка алгоритмов идентификации низкоактивных источников альфа- и бета-радиоактивных загрязнений

аэроионным методом, и программных средств обработки и отображения информации;

6. разработка прототипа портального пешеходного монитора для регистрации поверхностных низкоактивных источников альфа- и бета-радиоактивных загрязнений;

7. проведение исследований компонентов стационарной портальной системы.

Теоретическая и методологическая компоненты диссертационной работы основываются на анализе результатов исследований и разработок отечественных и зарубежных учёных в области дистанционных методов обнаружения ионизирующих излучений, радиационных мобильных, поисковых и стационарных портальных мониторов.

Информационную базу составляют монографические работы, материалы научно-технических конференций, статьи в периодических изданиях и научных сборниках по исследуемой проблеме, предметный патентный и интернет-поиск.

Научная новизна

1. Предложен метод одновременной дистанционной оперативной регистрации поверхностных низкоактивных источников радиоактивных загрязнений в замкнутом воздушном объёме аэроионным способом, позволяющий регистрировать как альфа-, так и бета-радиоактивные загрязнения.

2. Разработан алгоритм расчёта конструктивных параметров газоразрядных счётчиков открытого типа, который позволяет сократить время создания, а также повысить эффективность газоразрядных детекторов открытого типа для работы в составе портальных мониторов.

3. Разработан метод и компьютерные алгоритмы распознавания типа регистрируемого радиоактивного загрязнения на основе искусственной нейронной сети.

4. Разработана методика проведения обследования в камере портального монитора.

Практическая значимость работы

1. Экспериментальные исследования структурных и конструктивных вариантов газоразрядных детекторов позволили создать серию высокочувствительных детекторных систем, предназначенных для стабильной и надёжной работы при различных условиях окружающей среды.

2. Расчётные и экспериментальные результаты выполненных в диссертации исследований на базе разработанной системы управления позволили выработать технические требования к конструкции, комплектации, режимам работы и метрологическим характеристикам порталной шлюзовой кабины, обеспечивающей оперативное обнаружение поверхностных альфа- и бета-радиоактивных загрязнений персонала в составе интеллектуальных роботизированных систем контроля и управления доступом на ядерных и радиационно-опасных объектах, а также предложены автоматические системы калибровки, управления воздушным потоком, отображения информации и аварийного оповещения, позволяющие поддерживать стабильный процесс регистрации в режиме реального времени.

3. Впервые был разработан прототип пешеходного порталного монитора дистанционной оперативной регистрации альфа- и бета-радиоактивных загрязнений на основе газоразрядного счётчика открытого типа, позволяющий повысить эффективность регистрации загрязнений для соответствия требованиям СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009».

4. Результаты экспериментальных исследований показали, что экспериментальный образец пешеходного порталного монитора по порогу обнаружения альфа-радиоактивных нуклидов превосходит используемые в настоящее время стационарные радиационные мониторы, в которых используются гамма-детекторы: расчётный порог обнаружения поверхностного альфа-радиоактивного загрязнения – меньше 20 Бк (для точечного источника альфа-излучения) и время полного обследования человека меньше 15 секунд.

5. Разработанный алгоритм распознавания регистрируемого излучения позволяет определять тип радиоактивного загрязнения: альфа- или бета-загрязнение.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод регистрации поверхностных низкоактивных источников альфа- и бета-радиоактивных загрязнений аэроионным способом в замкнутом объёме пешеходного портального монитора, позволяющий оперативно обнаруживать малые концентрации загрязняющих веществ.

2. Метод распознавания типа регистрируемого низкоактивного излучения по плотности ионизации на основе газоразрядного счётчика открытого типа и искусственной нейронной сети.

Реализация и внедрение результатов работы

Экспериментальный образец пешеходного портального монитора успешно прошёл экспериментальные исследования, проведённые в АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон», ведущем предприятии госконцерна «Росатом» в области создания аппаратуры для обеспечения радиационной безопасности на предприятиях отрасли. Получены акты о внедрении у ведущих предприятий России и Германии, разрабатывающих приборы для контроля радиоактивных загрязнений, таких как АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» и SARAD GmbH.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается проведенными исследованиями с высокой степенью воспроизводимости результатов; сопоставлением результатов исследований, полученных разными методами с помощью различного оборудования, а также сравнением с аналогичными результатами, полученными другими авторами.

Участие в проекте «Разработка технологии и портативного прибора для оперативного обнаружения альфа-радиоактивных

загрязнений газоразрядным методом» по государственному контракту №16.525.12.5004 с Министерством образования и науки РФ в НИЯУ МИФИ. В соавторстве получен патент на изобретение RU 0002598695 С2.

Имеется сертификат Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии №РОСС RU.АЕ68.А16608. Работа по диссертационному исследованию велась на основании проекта «Разработка пешеходного портального монитора для оперативного дистанционного контроля наружного альфа-радиоактивного загрязнения персонала на объектах атомной промышленности и обнаружения источников альфа-радиоактивного излучения при ликвидации последствий техногенных катастроф и угрозах радиационного терроризма» по государственному контракту №14.515.11.0058 с Министерством образования и науки РФ совместно с крупнейшим в стране объединением по созданию систем безопасности для важных государственных объектов АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон».

Часть работ по созданию электронных узлов была выполнена в рамках стажировки в Тюбингенском университете (Германия, г. Тюбинген) (проект «Разработка электроники для газочувствительных датчиков»).

Часть исследований разработанных электронных узлов была проведена в рамках стажировки в Дрезденском техническом университете (Германия, г. Дрезден) и в немецкой научно-производственной компании радиационного экологического приборостроения SARAD GmbH (Германия, г. Дрезден) (проект «Исследование нового метода для дистанционного обнаружения альфа- и бета-радиоактивного загрязнения»).

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных семинарах и конференциях:

- IEEE Симпозиум по экологическим, энергетическим и структурным системам мониторинга «EESMS» (Италия, г. Милан, 2017);
- 8-я международная конференция «8th Dresden Symposium Hazards Detection and Management» (Германия, г. Дрезден, 2015);
- 29-я международная конференция «Eurosensors» (Германия, г. Фрайбург-им-Брайсгау, 2015);

- 3-я международная конференция по тематике нанотехнологий и биомедицинского инжиниринга ICNBME, (Республика Молдова, г. Кишинёв, 2015);
- 6-я международная конференция по сенсорным системам и программному обеспечению S-CUBE, (Италия, г. Рим, 2015);
- 2-я международная конференция по передовым исследованиям изотопов ARIS, (Япония, г. Токио, 2014);
- ежегодные научные сессии НИЯУ МИФИ (Россия, г. Москва, 2012-2015).

Личный вклад автора

Основные результаты диссертации получены автором лично или при непосредственном его участии. Часть исследований проведена совместно с сотрудниками кафедры микро- и нанозлектроники НИЯУ МИФИ Е.М. Онищенко и В.П. Мирошниченко. Часть программ и электронных узлов разработана совместно с сотрудниками кафедры микро- и нанозлектроники НИЯУ МИФИ Д.Л. Осиповым и А.В. Поляковым. Совместно с научным руководителем обсуждались цели работы.

Опубликованные результаты

По теме диссертационного исследования опубликовано 11 печатных работ, в том числе 2 – в российских периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 – в журналах и сборниках трудов конференций, включённых в базы данных SCOPUS и Web of Science, 3 – в журналах и сборниках трудов конференций и 1 патент на изобретение.

Структура и объём диссертации

Диссертация содержит 153 страницы, в том числе 89 рисунков, 10 таблиц и состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 94 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении обоснована актуальность темы, определена цель диссертационного исследования. Поставлены задачи исследования и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

1. Дистанционные методы обнаружения альфа- и бета-радиоактивного загрязнения

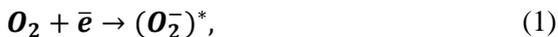
Имеющиеся в настоящее время радиационные портальные мониторы обнаруживают альфа-радиоактивные нуклиды в основном по сопутствующему гамма-излучению (радиационные мониторы гамма-излучения способны обнаруживать ядерные материалы в меньших количествах по сравнению с мониторами нейтронного излучения) или посредством газовых пропорциональных счётчиков, что ограничивает дальность регистрации альфа-частиц длиной пробега. Даже наиболее чувствительные из радиационных мониторов не способны зафиксировать на расстоянии поверхностное загрязнение тела или одежды малым количеством альфа-активных нуклидов (пылью), что, тем не менее, создает реальную опасность здоровью обследуемых людей. При этом приборы, способные регистрировать альфа-активные нуклиды непосредственно по излучению альфа-частиц, должны быть расположены от места загрязнения на расстоянии, не превышающем длину свободного пробега альфа-частицы в воздухе, т.е. 3–5 см, что не позволяет строить на их основе пешеходные (и транспортные) радиационные мониторы, которые должны обеспечивать достаточно быстрое обнаружение загрязнения альфа- и бета-активными нуклидами.

В настоящее время наиболее широко применяются детекторы для прямой регистрации частиц, например, сцинтилляционные счетчики, полупроводниковые и газовые ионизационные детекторы. Фотоэмульсионные детекторы и твердотельные трековые ядерные детекторы используются, в основном, для решения исследовательских задач. Потеря энергии альфа-частиц происходит в рабочем объеме детектора. Перспективным является также дистанционное оптическое детектирование, однако при таком методе сложно выделить

слабый флуоресцентный сигнал при наличии искусственного освещения, а также данный метод эффективен только в области прямой видимости.

2. Исследование аэроионного метода на основе газоразрядного счётчика открытого типа

Аэроионный метод, основанный на регистрации кластеров аэроионов, которые возникают в воздухе при прохождении альфа- и бета-частиц, позволяет обеспечить эффективный оперативный контроль в труднодоступных местах, а также на значительном расстоянии. На Рисунке 2 изображён принцип работы газоразрядного счётчика открытого типа. Лёгкие аэроионы (2) образуются на треках ионизирующих частиц источника (1). Наиболее вероятным механизмом захвата электронов является захват кислородом при тройных соударениях:



- где X – любая молекула, в том числе и кислорода;
 $(O_2^-)^*$ – возбуждённое колебательное состояние иона кислорода;
 E – энергия.

К образовавшимся таким образом ионам под действием поляризационных сил присоединяются нейтральные молекулы газов, входящие в состав воздуха, которые и осуществляют перенос электронов. Вентилятор (5) нагнетает аэроионы в рабочую камеру. Фильтр (3) очищает воздух от пыли, затем в газоразрядной камере происходит лавинное размножение электронов, которые попадают на анод (4). Скорость потока воздуха и длина трубки рассчитываются таким образом, чтобы как можно большее количество аэроионов попало в рабочую область детектора.

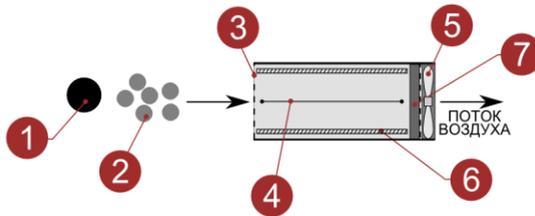


Рисунок 2 – Принцип работы детектирующей ячейки:
 1 – α - или β -радиоактивный источник, 2 – лёгкие аэроионы,
 3 – электростатический фильтр, 4 – анод, 5 – вентилятор,
 6 – катод, 7 – усилитель и формирователь импульсов

Для селективной регистрации аэроионов от α -частиц пороговый уровень устанавливается на величину U_{th} (Рисунок 3). Для регистрации всех аэроионов обрезается только шумовой сигнал в режиме измерения фона по квантилю 0,998.

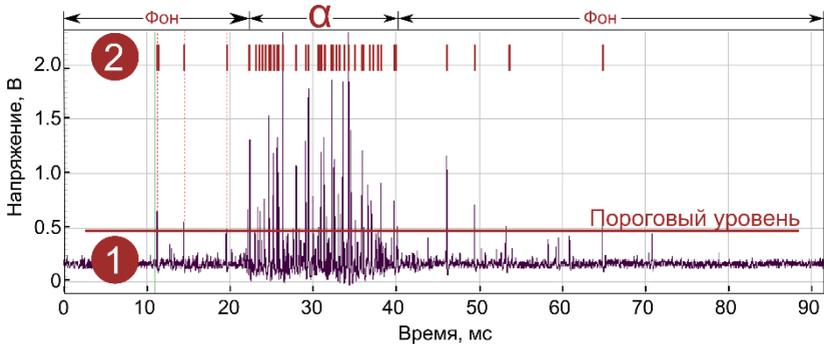


Рисунок 3 – Напряжение на аноде (1) и соответствующие импульсы, полученные после формирователя импульсов (2) в момент, когда ионный кластер попадает в камеру

Конструкция прототипа многодетекторного блока показана на Рисунке 4. Такая конструкция предназначена для более эффективного сбора аэроионов по сравнению с однодетекторным вариантом.

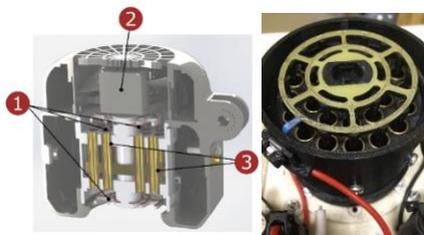


Рисунок 4 – Вариант исполнения многодетекторного блока, где 1 – позолоченные аноды, 2 – вентилятор, 3 – позолоченные катоды

3. Разработка аппаратно-программного комплекса

На Рисунке 5 показано использование детектора в пешеходном порталном мониторе альфа- и бета-радиоактивного загрязнения. Объём камеры порталного монитора позволяет собирать ионы с треков β -частиц.

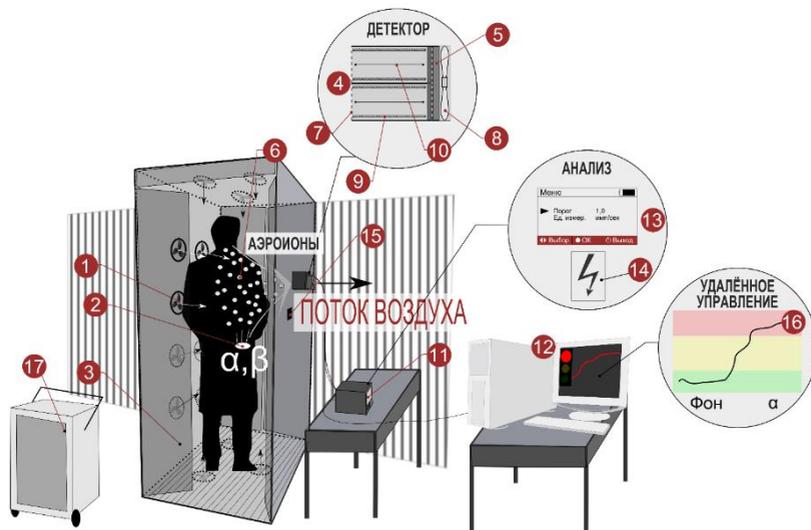


Рисунок 5 – Использование детектора в пешеходном порталном мониторе: 1 – система направления потока воздуха, 2 – источник ионизирующего излучения (α , β), 3 – двери, 4 – увеличенный вид детектора, 5 – зарядочувствительный усилитель и формирователь

импульсов, 6 – аэроионы, 7 – проволочная сетка и фильтр, 8 – вентилятор, 9 – катод, 10 – анод, 11 – система обработки данных, 12 – удалённый компьютер, 13 – система управления оператором и дисплей, 14 – прецизионный источник высокого напряжения, 15 – датчики температуры, давления и влажности, 16 – удалённое управление портальным монитором, 17 – система микроклимата

На Рисунке 6 изображён внешний вид прототипа портального монитора, а также вид изнутри. При нахождении человека в камере с источником альфа- или бета-радиоактивного загрязнения, скорость счёта становится выше критической (Рисунок 7).

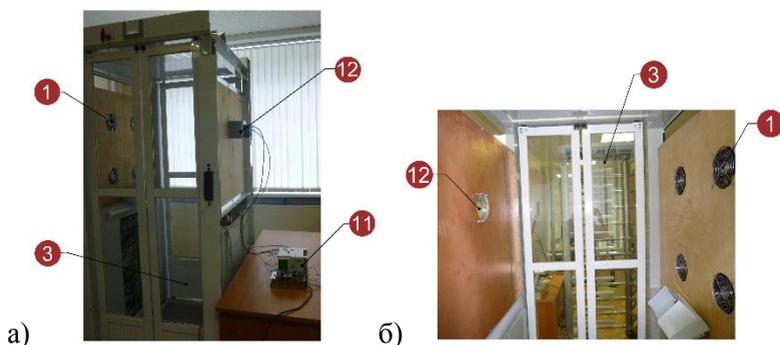


Рисунок 6 – Внешний вид портального монитора (а) и вид изнутри (б), где 1 – система управления воздушным потоком, 3 – двери, 11 – система обработки данных, 12 – детектор

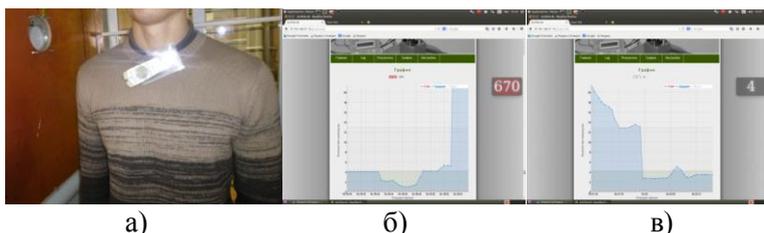


Рисунок 7 – Изменение скорости счёта импульсов в режиме «Поиск», в моменты, когда объект с α -радиоактивным источником (а) входит в (б) или покидает (в) портальный монитор

Блок управления и блок-диаграмма системы управления прибором приведены на Рисунках 8 и 9. Система измерения портального монитора позволяет оперативно обнаруживать альфа-источники с очень маленькими активностями (20 Бк).



Рисунок 8 – Блок управления в режиме «Калибровка» и его вид изнутри

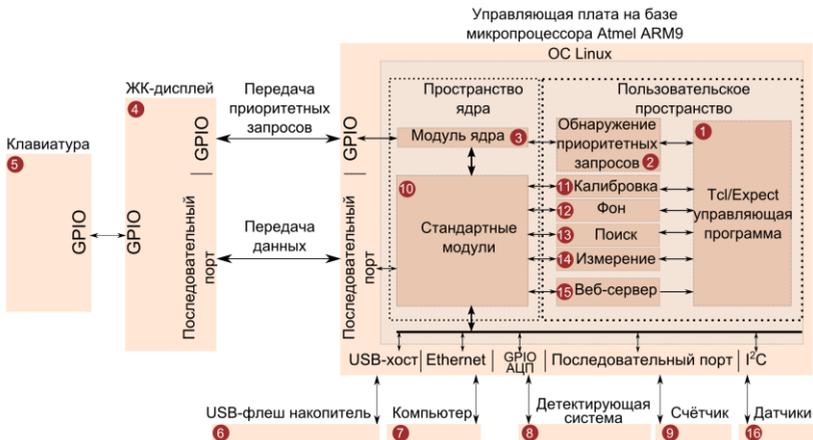


Рисунок 9 – Блок-диаграмма системы управления прибором

Для экспериментальной рабочей камеры объёмом 73,92 л со встроенным вентилятором и одним детекторным блоком уже при плотностях потока $2,5 \pm 0,2 \text{ с}^{-1}\text{см}^2$ (для α -источника ^{239}Pu) и $30,2 \pm 1,2 \text{ с}^{-1}\text{см}^2$ (для β -источника ^{90}Sr) значение количества импульсов

превышает соответствующее фоновое значение приблизительно в 5 раз ($T=22\pm 2$ °C, $RH=34\pm 2$ %, $p=998\pm 3$ гПа).

4. Изучение особенностей работы прибора в счётном режиме

На Рисунках 10 и 11 показана эффективность регистрации скорости счёта в зависимости от положения источника в камере портального монитора.

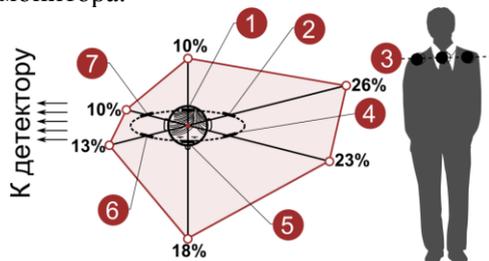


Рисунок 10 – Эффективность регистрации скорости счёта детектором при размещении калибровочного источника альфа-излучения на уровне плеч (3) в следующих местах: спина (1), тыльная сторона левого плеча (2), передняя сторона левого плеча (4), грудь (5), передняя сторона правого плеча (6), задняя сторона правого плеча (7)

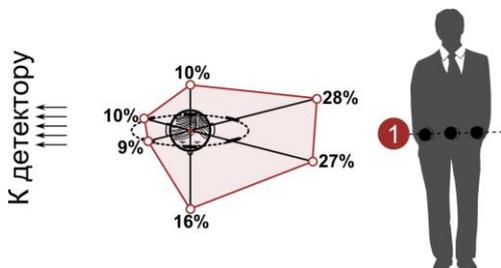


Рисунок 11 – Эффективность регистрации скорости счёта детектором при размещении калибровочного источника альфа-излучения на уровне пояса (1)

Принцип автокалибровки на основе нескольких детектирующих ячеек изображён на Рисунке 12.

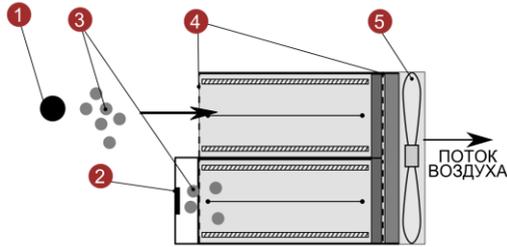


Рисунок 12 – Принцип автокалибровки на основе нескольких детекторов (вид сверху): 1 – α - или β -источник; 2 – калибровочный α -источник (^{239}Pu , 760 Бк); 3 – аэроионы; 4 – проволочная сетка и фильтр; 5 – вентилятор

На Рисунке 13 показаны кривые для различных типов ионизации. Фоновое излучение можно охарактеризовать как нерегулярное, с небольшой частотой импульсов малой амплитуды, тогда как ионизация от альфа-частиц характеризуется нерегулярностью при небольшой активности, кучностью импульсов (большим их количеством на определённом интервале), большой амплитудой (большой мощностью амплитудного спектра). Для ионизации от бета-частиц характерны регулярность и средняя по величине мощность амплитудного спектра.

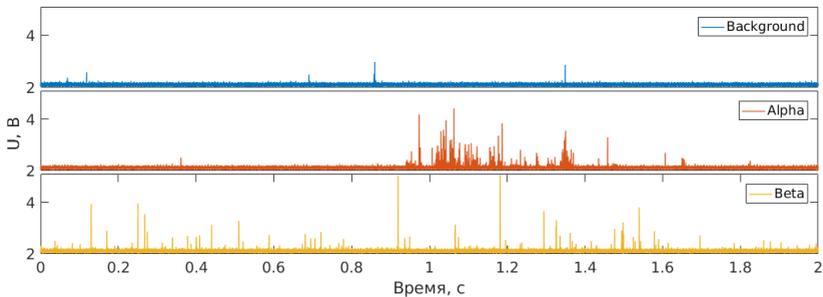


Рисунок 13 – Осциллограмма импульсов на выходе усилителя для различных источников ионизации на коротком интервале времени

Механизм формирования импульсов для аэроионов, образованных альфа- и бета-частицей показан на Рисунке 14. Так как длина пробега альфа-частицы составляет несколько

сантиметров, то импульсы на счётчике будут характеризоваться кучностью (при небольшой активности альфа-источника). Из-за большой длины пробега бета-частицы (порядка нескольких метров) и замкнутости объёма портального монитора аэроионы распределяются более равномерно.

Особенностью аэроионного метода является его использование только для индикации наличия в портальном мониторе источников радиоактивного загрязнения, а не точного численного измерения активности источников. Учитывая это, а также ряд других факторов: непостоянство температуры, влажности, давления, наличие фоновых излучений, загрязнённость анода, невозможность точной воспроизводимости характеристик детектора, различное рабочее напряжение (см. Рисунок 15), зависимость формы импульсов от усилителя, конвективный теплообмен внутри камеры портального монитора, удалённость ионизирующего источника от детектора, однозначно определить количественные характеристики не представляется возможным.

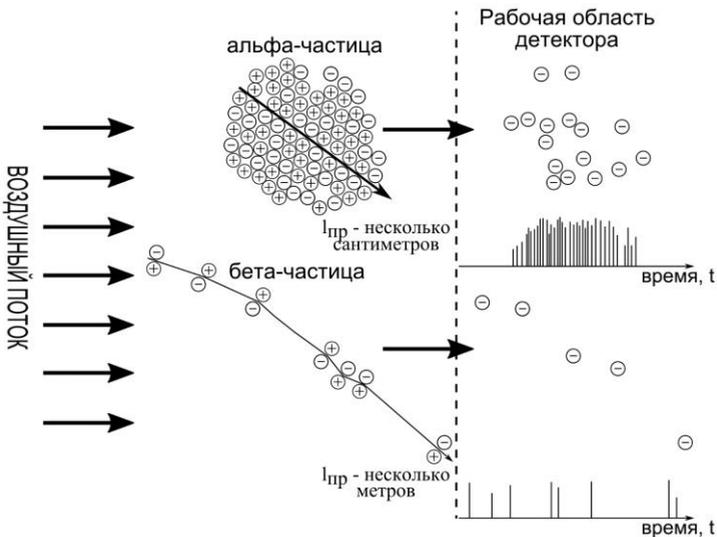


Рисунок 14 – Механизм формирования импульсов для аэроионов, образованных альфа- и бета-частицей

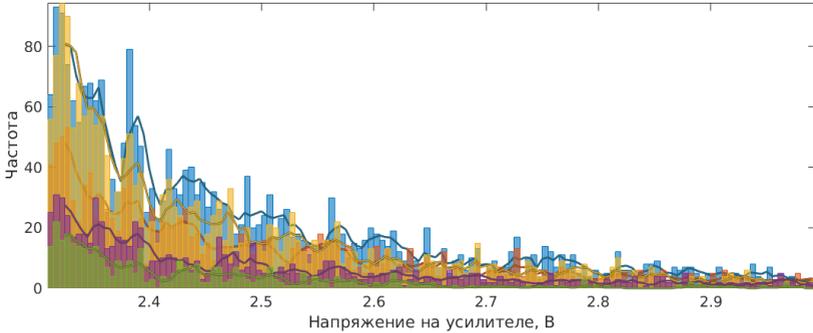


Рисунок 15 – Амплитудный спектр ионов альфа-излучения при понижении рабочего напряжения детектора

Для решения данной задачи подходит использование искусственной нейронной сети в качестве элемента, оценивающего вероятность соотнесения набора характеристик с определённым классом (фон, альфа, бета) (см. Рисунок 16). Для придания системе нелинейности используется сигмоидальная функция активации. Количество характеристик нейронной сети – 37.

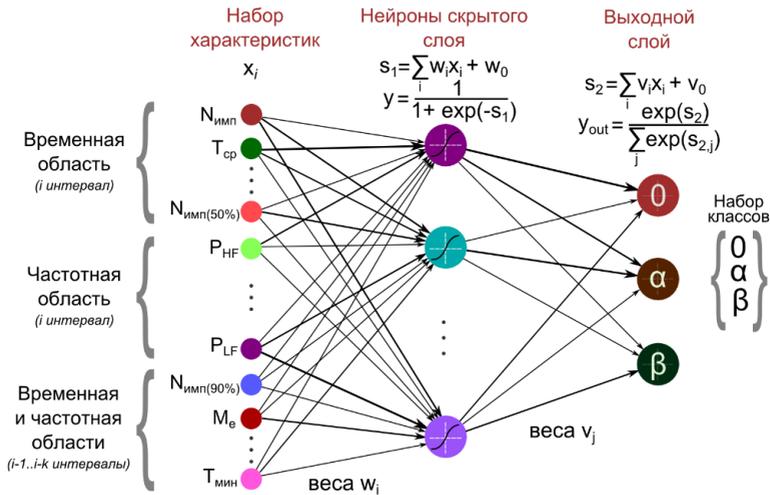


Рисунок 16 – Принципиальная схема нейронной сети для классификации событий

Основными характеристиками являются количество импульсов, а также минимальный и средний интервал между импульсами (остальные характеристики являются производными для различных значений амплитуды сигнала, а также для предыдущих интервалов). Некоторые параметры и их производные приведены на Рисунке 17.

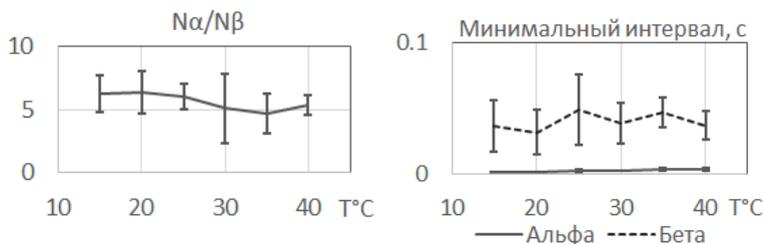


Рисунок 17 – Значения соотношения количества импульсов и минимального интервала (на 1-секундном ненулевом интервале) для источников 4550 Бк ^{239}Pu и 9200 Бк ^{90}Sr при осуществлении калибровки

Матрица ошибок (см. Рисунок 18) показывает, что для произвольного тестового множества (Test Confusion Matrix) точность определения интервалов с воздействием альфа-излучения составляет 97%, бета-излучения – 90%. Гистограмма ошибок показывает, что ошибки имеют небольшую величину и распределены в узком интервале.

Однако, как видно из различных матриц ошибок, нейронная сеть с данным набором характеристик не распознаёт фоновые интервалы (относит их к воздействию альфа-радиоактивного излучения). Здесь полезным оказывается применение статистических методов обработки результатов (см. Рисунок 19) (в частности, метода скользящего окна) для каждого интервала, так как фоновое излучение не является регулярным, т.е. если среди большого количества фоновых интервалов (имеет смысл определять статистически, для разных приборов – разные уровни) сеть распознала ионизацию от бета-частиц, то это свидетельствует о том, что это, скорее всего, ошибка. Или, например, если среди альфа-интервалов попало очень малое количество бета-

интервалов, то следует полагать, что здесь имеем дело только с альфа-излучением.

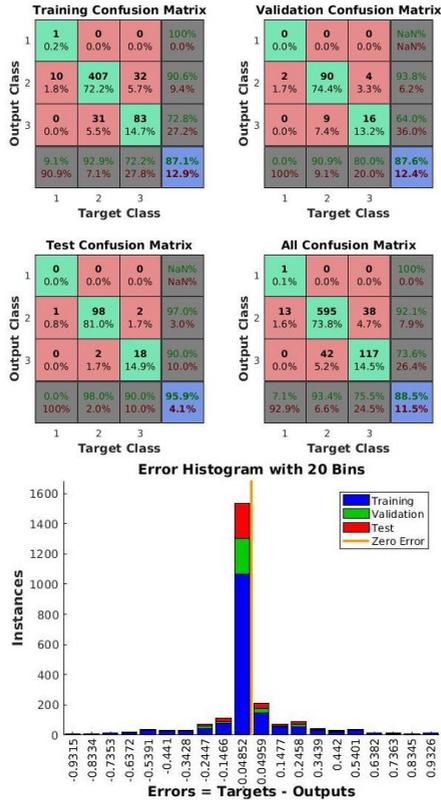


Рисунок 18 – Результаты в среде MATLAB. Общее количество интервалов: 3000; с наличием импульсов: 806; из них 14 – фоновых; 637 – альфа; 155 – бета

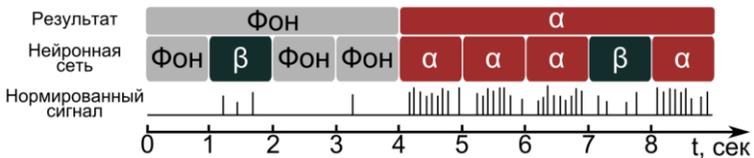


Рисунок 19 – Принцип распознавания видов излучений

Алгоритм работы портального монитора изображён на Рисунке 20. Переходя в простой счётный режим и устанавливая соответствующее пороговое значение, можно повысить селективность регистрации альфа-радиоактивных загрязнений до 98%.

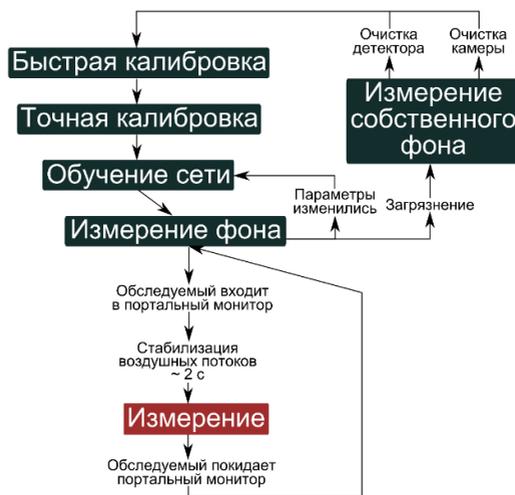


Рисунок 20 – Один из возможных алгоритмов работы портального монитора

Одним из вариантов является обучение сети в лабораторных условиях на базе тестового множества при использовании альфа- и бета-радиоактивных источников различной активности и измеренного в необходимом диапазоне значений параметров окружающей среды (при калибровке по различным коридорам значения скорости счёта импульсов). Наиболее нетребовательным к ресурсам является метод загрузки соответствующей матрицы весовых коэффициентов при изменении параметров окружающей среды.

Заключение

Был разработан метод регистрации поверхностного загрязнения низкоактивными альфа- и бета-радионуклидами в

замкнутом объёме, и впервые был разработан прототип пешеходного портального монитора дистанционной оперативной регистрации альфа- и бета-радиоактивных загрязнений на основе газоразрядного счётчика открытого типа, позволяющий повысить эффективность регистрации загрязнений для соответствия требованиям СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009».

Теоретические результаты

Предложен метод распознавания и идентификации низкоактивных альфа- и бета-радиоактивных загрязнений по плотности ионизации на основе анализа сигнала с газоразрядных счётчиков открытого типа с помощью искусственной нейронной сети.

Практические результаты

Разработанный экспериментальный образец пешеходного портального монитора превосходит мировые аналоги по чувствительности и оперативности регистрации альфа-радиоактивных веществ, многие технические решения, использованные в разработке, защищены полученными ранее патентами на изобретение.

Проведены экспериментальные исследования экспериментального образца пешеходного портального монитора на экспериментальной базе АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон», ведущего предприятия госконцерна «Росатом» в области создания аппаратуры для обеспечения радиационной безопасности на предприятиях отрасли. Разработанный экспериментальный образец пешеходного портального монитора по ряду важнейших параметров: по расчётному порогу обнаружения альфа-радиоактивных нуклидов – не более 20 Бк (для точечного наружного альфа-радиоактивного загрязнения), и времени обследования человека – время отклика составляет 5–15 с, превосходит используемые в настоящее время для решения аналогичной задачи стационарные радиационные мониторы, обнаруживающие альфа-радиоактивное загрязнение по сопутствующему излучению иной природы.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации, индексируемые в Web of Science, Scopus

1. Gurkovskiy B., Bocharov Y., Simakov A., Onishchenko E. Method for recognizing alpha and beta radioactive contamination in portal monitor using open-air gas-discharge counter // Proceedings of Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS). – 2017. – doi:10.1109/EESMS.2017.8052695
2. Gurkovskiy B., Onishchenko E., Miroshnichenko V., Simakov A., Samotaev N. Software Architecture for Remote Monitoring Systems of Surface Contamination by Alpha Radioactive Isotopes // Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST. – Vol. 170. – 2016. – P. 320–324. – doi:10.1007/978-3-319-47075-7_36
3. Samotaev N., Gurkovskiy B., Miroshnichenko V., Onishchenko E., Simakov A. Portal Monitor for Human Body Alpha-Radioactive Contamination Control // IFMBE Proceedings. – 2016. – Vol. 55. – P. 532–536. – doi:10.1007/978-981-287-736-9_125
4. Gurkovskiy B., Miroshnichenko V., Onishchenko E., Simakov A., Streil T. Long-distance detection of alpha-radioactivity: Method and device // Journal of Environmental Radioactivity. – 2015. – Vol. 149. – P. 150–157. – doi:10.1016/j.jenvrad.2015.07.019
5. Samotaev N., Gurkovskiy B., Miroshnichenko V., Onishchenko E., Simakov A. Alpha-Radioactive Isotopes Monitoring of Human Body Contamination by Trace of Air Ions Presence // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 120. – P. 874–877. – doi:10.1016/j.proeng.2015.08.749

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Бочаров Ю.И., Бутузов В.А., Гурковский Б.В., Мирошниченко В.П., Онищенко Е.М., Осипов Д.Л., Симаков А.Б., Сугрובה Т.А. Дистанционный индикатор для быстрого определения альфа-радиоактивного загрязнения местности // Датчики и системы. – 2012. – №11. – С. 14–16.
2. Симаков А.Б., Онищенко Е.М., Мирошниченко В.П., Водохлебов И.Н., Гурковский Б.В., Симаков М.А. Мобильный инструментальный комплекс для оперативного мониторинга

альфа-радиоактивного загрязнения местности // Датчики и системы. – 2018. – №2. – С. 66–70.

Статьи и материалы конференций

1. Gurkovskiy B., Miroshnichenko V., Onishchenko E., Simakov A. The influence of ambient air characteristics on effectiveness of the remote detection of the dot alpha- radioactive contamination // International Conference – 8th Dresden Symposium Hazards – Detection and Management. – 2015. – P. 30.

2. Gurkovskiy B., Miroshnichenko V., Onishchenko E., Simakov A. Air ion method for detecting alpha-radioactive surface contamination of nuclear industry personnel // International Conference – 8th Dresden Symposium Hazards – Detection and Management. – 2015. – P. 11.

3. Gurkovskiy B., Miroshnichenko V., Onishchenko E., Simakov A., Streil T. The Remote Detection of Alpha-Radioactive Nucleus Decay // Proceedings of the Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014). – 2015. – Vol. 1, N 3. – P. 141. – doi:10.7566/JPSCP.6.030141

Патенты

1. Пат. 2598695 Российская Федерация, МПК G 01 T 1/167. Устройство для дистанционного обнаружения источников альфа-излучения [Текст] / В.А. Бутузов, Ю.И. Бочаров, В.П. Мирошниченко, Б.В. Гурковский, Т.А. Сугрובה, М.А. Симаков, Е.М. Онищенко, А.Б. Симаков; заявитель и патентообладатель ООО «МИФИ-МИКРО». – №2013143710/28; заявл. 30.09.13; опубл. 27.09.2016, Бюл. № 27.