

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования "Национальный исследовательский университет  
"Высшая школа экономики"

*На правах рукописи*

Недосекин Павел Геннадьевич

**Исследование и разработка сенсора на основе монокристаллического  
алмаза для измерения радиационных потоков космического излучения**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор  
Каперко Алексей Федорович

Москва - 2021

## **Актуальность темы**

Исследование ближнего и дальнего космического пространства, его дальнейшее освоение в настоящем и прогнозируемом будущем приводит к тенденции улучшения и поиска новых конструкционных и технологических решений для реализации построения ракетно-космических, транспортно-космических аппаратов и систем с целью обеспечения надежной защиты от окружающих негативных факторов.

Одним из негативных факторов, с которым сталкиваются разработчики ракетно-космической техники (РКТ) при ее эксплуатации в космическом пространстве (КП), это защита живого организма и электронных компонентов функционирующей электроники от пагубного влияния ионизирующего излучения (ИИ) в КП. На данный момент освоение КП прогнозирует увеличение сроков эксплуатации ракетно-космических аппаратов сроком до 20 лет и более. Тенденция увеличения сроков пребывания в не благоприятной среде приводит к поиску альтернативных решений для защиты от ИИ. Одним из способов предотвратить влияние ИИ является постоянный контроль радиационного фона внутри и снаружи ракетно-космических аппаратов, прогнозирование увеличения радиационного фона и своевременное реагирование на изменение ситуации с целью защиты электронного оборудования и живых организмов от пагубного влияния ИИ.

Основополагающей задачей радиационной безопасности в мире является контроль нанесенного вреда, который получает живой организм при воздействии источников ИИ на него, при нормальном их использовании и во время аварийных ситуаций. Следовательно, для предотвращения и контроля «вреда» от радиации, неощутимой для органов чувств человека, необходимы приборы и элементы регистрации и исследования ИИ, которые умеют обрабатывать и передавать сигнал в понятной для обработки и понимания форме.

Существует множество способов регистрации радиационного излучения (РИ): ионизационный (ионизационные камеры, газоразрядные счетчики);

сцинтилляционный; полупроводниковый; фотографический; люминесцентный; химический; трековый; активационный; тепловой.

Для ракетно-космических аппаратов (РКА) и транспортных космических систем (ТКС) регистрацию ИИ можно разделить на: регистрации внутреннюю – от источников ИИ внутри и внешнюю ИИ, воздействующую извне на объекты РКА и ТКС.

Внутреннее ИИ – это ядерные технологии, устанавливаемые в РКА и ТКС. В основном электроснабжение ракетно-космических аппаратов - ядерные реакторы и ядерные двигатели, либо источники радиации, используемые в качестве обогрева РКА и ТКС. Возможно рассмотрение вариантов исследовательского оборудования и комплексов для исследования и анализа поверхности материала/объекта путем использования методов облучения ИИ.

Внешние ИИ - это радиационные потоки (РП) в КП, представляющие собой: первичное излучение, которое делится на галактические космические лучи (ГКЛ) и солнечные космические лучи (СКЛ); вторичное излучение, которое относится к радиационному поясу земли (РПЗ) - планет, звезд и небесных тел.

К первичному излучению относятся потоки быстрых заряженных частиц (преимущественно протонов) с энергией до  $10^{10}$  -  $10^{12}$  МэВ. Вторичное излучение проявляется на высотах ниже 20 км, причем его высокоэнергетическая составляющая представлена в основном малыми заряженными частицами с энергией  $\sim 100$  МэВ, а низкоэнергетическое излучение составляют электронно-позитронные пары и  $\gamma$ -кванты.

Распределение кинетических энергий ГКЛ идет в широком диапазоне и зависит от вида иона и фазы солнечного цикла с максимумами энергий около 1000 МэВ, протонов 500-600 МэВ и для более тяжелых ядер с хвостами распределений достигающими гораздо более высоких энергий.

Нейтроны от солнечных вспышек с энергией  $E$  преодолевают огромные расстояния КП (1 астрономическая единица  $\approx 150\,000\,000$  км) и влияют на радиационную обстановку: 0,2 ГэВ,  $S \approx 1$  а. е.; 1,0 ГэВ,  $S \approx 3$  а. е.; 2,5 ГэВ,  $S \approx 6$  а. е.; 10 ГэВ,  $S \approx 20$  а. е.

Следовательно, для контроля, анализа и прогнозирования изменения ИИ внутри и снаружи РКА и ТКС устанавливают модули контроля РП космического излучения (КИ), прибор осуществляет постоянный мониторинг КП в реальном времени. Одним из важных узлов модуля контроля РП КИ является сенсор регистрации ИИ, устройство измерения, которое осуществляет преобразование энергии полученной в результате взаимодействия ИИ с объемом вещества чувствительного элемента сенсора в электрических сигнал, для дальнейшей обработки модулем контроля радиации.

Применение прибора контроля РП КИ и узла(ов) сенсора, как и других функциональных приборов, применяемых в РКА и ТКС, ограничено и задается жесткими рамками: масса-габаритные параметры; стойкость к окружающим агрессивным факторам среды: радиационная стойкость (накопленная доза от 80 до 300 крад, воздействие тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) с пороговым значением линейной передачи энергией (ЛПЭ) более  $60 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ ), стойкость к термовакуумным факторам (температура от  $-60$  до  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ , ультрафиолетовое излучение, невесомость, вакуум); высокое требование надежности (наработка на отказ не менее 150000 часов, не ремонтпригодность аппаратуры); ограничение по электроснабжению ( от 24В до 100В) и повышение сроков активного существования прибора до 20 лет и более.

Современные устройства контроля РП КИ и устройства радиационного контроля, используемые в составе РКА и ТКС, обладают критическими недостатками, т.к. не предназначены для обеспечения функционирования при интенсивном радиационном воздействии, особенно таких факторов, как потоки ТЗЧ и/или воздействие спец факторов, в основном эти приборы базируются на использовании кремниевых сенсоров для регистрации ИИ. К типичным недостаткам применения кремниевых сенсоров можно отнести их невысокую радиационную стойкость и невозможность применения при повышенных температурах без специализированных систем охлаждения. Использование для этих целей газоразрядных счетчиков и сцинтилляционных сенсоров имеет серьезные ограничения по масса-габаритным параметрам, наличию высоких

уровней напряжения питания (сотни и тысячи вольт), общего энергопотребления, а также ограничения по максимальному потоку излучения, что делает неоптимальным их использование в условиях высоких уровней РП КИ.

Альтернативными материалами для изготовления чувствительного элемента сенсора регистрации РП КИ, которые удовлетворяют критериям отбора для РКА и ТКС – это алмазные и алмазоподобные материалы, они лишены многих недостатков аналогичных изделий на основе традиционных полупроводников (кремний, германия, арсенид галлия и др.), а также могут использоваться без вспомогательных систем обеспечения и защиты, при температурах в несколько сотен градусов Цельсия и более (в открытом космосе до 500-1000<sup>0</sup>С), в диапазоне потоков частиц до 10<sup>20</sup> см<sup>2</sup> с<sup>-1</sup>. Основные преимущества сенсора на основе алмаза заключается в одновременной регистрации всех типов ИИ, наличия высокой стойкости к радиационному воздействию и химически агрессивным явлениям. Сами сенсоры, изготовленные из алмаза, обладают малыми размерами и массой, аппаратный блок электроники для измерения сигнала, создаваемого в сенсоре регистрации ИИ на основе алмаза, достаточно прост конструкционно и технологически в изготовлении, что немаловажно для массогабаритных свойств изделия, которые применяются для ракетно-космических аппаратов и систем.

Заметим, что напряжение питания бортовой сети аппаратуры РКА и ТКС на данный момент составляет не более 100 вольт и ниже - до 24 вольт в зависимости от размера и цели использования КА. Следовательно, аппаратура детектирования и сенсор ИИ должны оптимально укладываться в диапазоны электроснабжения космического аппарата.

Таким образом, чтобы решить обозначенные задачи, необходимо последовательно выполнить ряд работ, используя методы моделирования, математического анализа и последующего практического эксперимента для подтверждения полученных научных результатов. Для этого необходимо провести исследования материала алмаза и сравнительный анализ материалов алмаза с основными полупроводниковыми материалами Si и Ge, применяемых для изготовления чувствительных элементов сенсора РП, а также провести

проверку их эффективности регистрации от энергии ИИ. Проанализировать и исследовать взаимодействие ИИ в объеме чувствительного элемента алмазного сенсора (АС) вариативной толщины, проверить зависимость изменения эффективности регистрации ИИ от температуры для АС. Разработать, провести построение и исследование, проанализировать полученные данные для модели сенсора с целью оптимизации конструкции АС, с целью повышения диапазона эффективности регистрации ИИ, счетной эффективности и при этом не меняя рабочего напряжения цепи на контактах электродах самого сенсора. Последним этапом провести разработку конструктивного решения многоэлементного АС для регистрации РП КИ, с заданными параметрами с последующим исследованием и анализом полученных научных данных.

Использование АС в приборах регистрации РП КИ для мониторинга КП внутри и снаружи РКА, ТКС, а также своевременное прогнозирование чрезвычайных ситуаций при превышении допустимых доз радиации позволяет не только существенно продлить функциональный срок эксплуатации РКА и ТКС, но и обезопасить живые объекты от критического влияния радиационных эффектов, что, безусловно, может представлять высокую ценность и определяет актуальность темы данной работы.

### **Цель исследования**

Целью исследования является разработка алмазного сенсора регистрации радиационных потоков космического излучения для применения в приборах мониторинга и прогнозирования радиационной обстановки внутри, а также снаружи РКА и ТКС с длительным сроком функционирования в космическом пространстве сроком до 20 лет и более.

Для достижения поставленной цели определены следующие **задачи исследования:**

- 1) Разработка методики проектирования сенсора на базе монокристаллического алмаза для регистрации РП КИ.

- 2) Поиск и анализ материала для изготовления активного чувствительного элемента ионизационного сенсора высокой радиационной стойкостью, который будет стабильно работать в агрессивных условиях и повышенных температурах от  $-60$  до  $+125$   $^{\circ}\text{C}$ . Активный элемент ионизационного сенсора должен удовлетворять оптимальным масса-габаритными параметрами для использования на РКА и ТКС.
- 3) Поиск конструктивного и технологического решения, с целью улучшения характеристик ионизационного сенсора, при регистрации радиационного потока космического излучения, таких как: скорость счета, абсолютная эффективность регистрации, энергетическое разрешение, шум детектора.
- 4) Поиск решения для применения сенсора с расширенным диапазоном регистрацией ИИ, при питающем напряжении не более 100 В, без потерь эффективности работы сенсора.
- 5) Исследование эффективности регистрации ионизирующего излучения сенсором: электронов, протонов и гамма излучения с заданной энергией.
- 6) Исследование эффективности регистрации ИИ от толщины сенсора.
- 7) Исследование влияния температуры на стабильную работу и эффективность регистрации ИИ сенсором.

**Объектом исследования** является многоэлементный сенсор на базе монокристаллического алмаза 2А типа для регистрации РП КИ.

**Предметом исследования** являются взаимодействие ИИ в объеме многоэлементного сенсора для регистрации КИ.

### **Степень проработанности темы исследования**

До настоящего момента конструкционные и технологические решения построения сенсоров для регистрации потоков КИ сводятся к нескольким решениям, описанным в литературном обзоре данной диссертационной работы. Одно из них - применение сенсора для регистрации определенного вида ИИ и/или применение сенсоров ИИ разных групп в пределах своего регистрирующего функционала при создании гибридных комплексов для регистрации РП КИ.

Следующее, что стоит отметить, изменение толщины чувствительной области сенсора и/или повышение питающего напряжения на контактах электродах сенсора регистрации ИИ.

Использование селективных радиаторов/фильтров/дегрейдеров для создания отсеков, зон по входящим энергиям ИИ, которые ограничивают диапазон измерения энергий для выбранных под них сенсоров регистрации РП КИ.

### **Теоретическая значимость**

- 1) Изучены данные, полученные в результате температурного эксперимента при нагреве исследуемого макета сенсора на базе алмаза до температуры  $T=500^{\circ}\text{C}$ , на основании чего можно сделать вывод незначительного влияния температуры на показания и эффективную работу алмазного сенсора при регистрации ИИ.
- 2) Рассмотрены данные компьютерного моделирования в GEANT4 и проведен анализ взаимодействия ИИ с материалом сенсора на базе алмаза, Ge, Si. Используя полученные данные моделирования построены и проанализированы графики спектров пика полного поглощения энергии объемом сенсора в зависимости от толщины и количества активных элементов сенсора в диапазоне энергий: электронов - 0,3; 0,5; 1 и 5 МэВ; протонов - 0,1; 0,5; 2,5; 10; 25; 50 и 200 МэВ; гамма излучения - 662 кэВ; ТЗЧ (ион гелия) - 5; 10; 20 и 50 МэВ. Полученные данные позволяют определить и подобрать необходимый ЧЭ для измерения определенного параметра энергии заряженных частиц и/или диапазона энергий ИИ.

### **Практическая значимость**

Представлена конструкция многоэлементного (трехэлементного) сенсора регистрации РП КИ, изготовленного из монокристаллического алмаза 2А типа. Данная конструкция позволяет расширить диапазон работы сенсора по энергиям ИИ, повысить его эффективность регистрации и амплитуду выходного сигнала, что осуществляется увеличением его активного рабочего объема регистрации ИИ,



при этом питающее напряжение не повышается на токовых контактах и осуществляется за счет использования нескольких тонких активных чувствительных элементов, послойно собранных между собой и реализованных в виде отдельной монолитной конструкции.

Полученные результаты применялись в прикладных научных исследованиях (ПНИ) в рамках приоритетного направления «Транспортные и космические системы» федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 год». Основанием для проведения ПНИ является Соглашение о предоставлении субсидии № 14.605.21.0001 от «08» июля 2014 г. между Министерством образования и науки Российской Федерации и НИУ ВШЭ по теме «Создание модулей контроля параметров потоков космического излучения на базе широкозонных полупроводниковых сенсоров для перспективных транспортных космических систем с длительным сроком функционирования».

### **Методы исследования**

Исследование базируется на методах теории взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, экспериментальную модель, компьютерное моделирование и математические методы расчета.

- 1) Метод компьютерного моделирования и математического расчета дает возможность провести исследование, оценить, сравнить и получить научные данные взаимодействие ИИ с материалом ЧЭ сенсора регистрации при заданных параметрах, таких как: зависимость толщины чувствительного элемента на общую эффективность и чувствительность сенсора; зависимость поглощенной энергии материалом чувствительного элемента сенсора от энергии электронов, протонов, гамма и ТЗЧ испущенного источником ИИ.
- 2) Экспериментальный метод позволяет получить реальные данные с исследуемого объекта и те данные, которые не всегда возможно точно промоделировать, а также влияние и зависимость высоких температур

на эффективную регистрацию сенсора ИИ. В то же время он позволяет подтвердить данные, полученные методом расчета и моделирования.

### **Личный вклад автора в разработку проблемы**

Личный вклад автора состоит в выполнении анализа имеющихся источников литературы, подбора и обоснования выбора материала сенсора, его исследование и сравнительный анализ с другими материалами, применяемыми для изготовления сенсоров регистрации ИИ.

Разработана методика проектирования сенсора на базе алмаза для регистрации радиационных потоков космического излучения.

Проведено моделирование, математический расчет и систематизация полученных научных данных с целью разработки и оптимизации конструкции алмазного сенсора.

Поставлены экспериментальные исследования взаимодействия гамма излучения, бета и температурных факторов на исследуемый образец – макет сенсора на базе природного монокристаллического алмаза 2А типа.

Построена модель взаимодействия ИИ в многоэлементном алмазном сенсоре с целью увеличения его активного объема регистрации без увеличения питающего напряжения на электрических контактах сенсора.

Разработан и исследован экспериментальный макет многоэлементного алмазного сенсора для регистрации радиационных потоков космического излучения.

Сформулированы выводы и результаты диссертационной работы, выполненной лично автором.

### **Основные результаты исследования**

- 1) Предложена математическая модель расчета и моделирования эффективности регистрации ИИ сенсором регистрации на базе монокристалла алмаза: электронов, протонов и гамма излучения с заданной энергией.

В процессе исследования получены результаты моделирования процесса взаимодействия ИИ с алмазом и проведено сравнение характеристик эффективности регистрации с основными полупроводниковыми материалами Si, Ge, из которых в мире изготавливаются сенсоры регистрации ИИ.

Полученные данные исследования позволяют сделать вывод, что алмаз превосходит Si, Ge в целях применения, как материала для изготовления сенсора регистрации РП КИ.

- 2) Предложена математическая модель и проведено моделирование эффективности регистрации ИИ от толщины сенсора на базе монокристалла алмаза.

Исследования позволили получить и набрать статистические данные взаимодействия ИИ в диапазоне энергий потоков РП КИ: электронов, протонов, ТЗЧ и гамма излучения с объемом алмаза, при изменении его толщины. Данные исследования позволяют проанализировать работу алмазного сенсора регистрации ИИ для построения оптимальной конструкции сенсора, с целью регистрации радиационного потока КИ.

- 3) Предложено конструктивное решение с целью улучшения характеристик сенсора регистрации ИИ из монокристалла алмаза для регистрации РП КИ, таких как скорость счета, абсолютная эффективность регистрации, энергетическое разрешение, шум детектора.

Выполненное конструктивное решение в виде многоэлементной конструкции, которая дает возможность расширить диапазон регистрируемого излучения по мощности ИИ.

Проведено моделирование многоэлементной конструкции в заданных диапазонах РП КИ, по данным исследования видно увеличение эффективного диапазона регистрации ИИ АС.

Проведены испытания, по результатам которых можно сделать вывод: улучшение абсолютной эффективности работы АС, счетной эффективности, амплитуды выходного сигнала и точности регистрации.

- 4) Разработана методика проектирования АС ИИ при питающем напряжении не более 100 вольт, без потерь эффективной работы сенсора ИИ и увеличение его чувствительной области объема регистрации ИИ.
- 5) Предложена методика экспериментальных исследований алмазного ионизационного сенсора с учетом влияния температуры на стабильность регистрации РП КИ.

Построена физическая модель сенсора регистрации ИИ на базе алмаза, проведено моделирование и эксперимент закономерности влияния температуры на чувствительный элемент сенсора, а также на саму конструкцию сенсора в целом.

Полученные данные позволяют утверждать, что повышение температуры до 500 °С на активном ЧЭ сенсора из монокристалла алмаза, не значительно влияет на показания регистрации ИИ и погрешность составляет около 5%. Но, температура влияет на конструктивные материалы самого сенсора, что приводит к появлению тока утечек, стоит подбирать соответствующее температуростойкие конструкционные материалы для изготовления корпуса сенсора, например, сапфир.

Многоэлементный сенсор на базе монокристаллического алмаза для регистрации РП КИ удовлетворяет масса-габаритным, температурным параметрам и пригоден для использования в специальных условиях, что подтверждается результатами проведенных исследований.

Данное конструктивное решение позволяет исключить технологические сложности производства в изготовлении сложных структур сенсоров, так как технология изготовления одинарных однотипных элементов на одной алмазной пластине с двумя электрическими контактами в виде конденсатора, используется достаточно часто и повсеместно.

## Научная новизна работы

- 1) Разработана методика проектирования сенсора из монокристалла алмаза для регистрации радиационных потоков космического излучения, которая позволяет провести исследование и построить рабочий вариант сенсора регистрации на базе алмаза.
- 2) Разработана математическая модель и компьютерная модель в GEANT4 для анализа взаимодействия ИИ с объемом многоэлементного (трехэлементного) АС. Параметры математического расчета и компьютерной модели задавались по параметрам физической модели АС.
- 3) Разработана математическая модель применимая к сенсорам для регистрации ИИ с целью компьютерного моделирования в среде GEANT4 для анализа прохождения элементарных частиц через чувствительный элемент сенсора. Научное исследование проводилось для заданной модели сенсора из материала алмаза (C), Ge и Si, с заданными габаритными параметрами активного чувствительного элемента 5x5x2,5мм и источником ИИ: электронов - 0.5, 1 и 5 МэВ; протонов - 0.5, 2.5, 25 и 200 МэВ;  $\gamma$  – квантов - 0.5, 2.5, 25 и 200 МэВ.
- 4) Расчетным и экспериментальным путем получены сравнительные данные параметров и характеристик сенсоров ИИ, построенных на основе материалов алмаза (C), Ge и Si, анализ научных данных показал преимущества сенсоров на основе монокристаллического алмаза.
- 5) Разработана модель в среде моделирования GEANT4 для исследования взаимодействия ИИ с объемом сенсора из алмаза при разной толщине сенсора и различных энергиях взаимодействия ИИ. По результатам моделирования и анализа построены графики взаимодействия ИИ в объеме активного элемента сенсора из алмаза с заданными габаритными параметрами активного чувствительного элемента 5x5xdмм, где толщина чувствительного элемента  $d = 0,1; 0,3; 0,5; 1; 2,5; 5$  мм, а источник излучения заряженных частиц: электронов - 0,3; 0,5; 1 и 5 МэВ; протонов - 0,1; 0,5; 2,5;

10; 25; 50; 100 и 200 МэВ;  $\gamma$ -квантов - 0,1; 0,5; 2,5; 10; 25; 50; 100 и 200 МэВ; ТЗЧ (ион гелия) - 5; 10; 20 и 50 МэВ.

- 6) Разработана физическая модель АС и проведена оценка влияния высокой температуры  $T=500$  °С на характеристики регистрации ИИ АС. По результатам эксперимента построен график взаимодействия ИИ  $Sr^{90}Y^{90}$  с энергией  $E$  налетающих электронов 545,9 кэВ и 2,74МэВ с объемом активного элемента сенсора из алмаза при температуре  $T= 25$  °С и 500 °С. В результате анализа измерений наблюдается не значительное изменение показаний.
- 7) Разработана технология изготовления многоэлементного алмазного сенсора и физическая модель двухэлементного АС для реализации задачи увеличения активной чувствительной зоны регистрации ИИ, с целью повысить диапазон эффективной работы сенсора, не увеличивая напряженность поля между электрическими контактами сенсора.
- 8) Разработана физическая модель многоэлементного (трехэлементного) АС для регистрации КИ, с расширенным диапазоном регистрации энергии ИИ и повышенными счетными характеристиками, за счет увеличения рабочего чувствительного объема регистрации ИИ, не превышая исходное рабочее напряжение на токовых контактах АС.
- 9) Получены экспериментальные научные данные о взаимодействии гамма излучения  $^{137}Cs$ , энергией гамма-квантов 662 кэВ, с физической моделью многоэлементного АС регистрации РП КИ. Анализ полученных измерений показывает увеличение эффективности регистрации гамма излучения от количества используемых активных слоев в алмазном сенсоре.

#### **Положения, выносимые на защиту**

- 1) Физическая модель и моделирование эффективности регистрации ионизирующего излучения алмазным сенсором: электронов, протонов и гамма излучения с заданной энергией.
- 2) Математическая модель и моделирование эффективности регистрации ионизирующего излучения от толщины сенсора.

- 3) Конструктивные решения с целью улучшения характеристик ионизационного сенсора при регистрации радиационного потока космического излучения, таких как: скорость счета, абсолютная эффективность регистрации, энергетическое разрешение, шум детектора.
- 4) Методика проектирования алмазного сенсора ИИ при питающем напряжении на токовых контактах сенсора не более 100 вольт, без потерь эффективности работы сенсора ИИ и увеличение его чувствительной области объема регистрации ИИ.
- 5) Методика экспериментальных исследований АС с учетом влияния температуры на стабильность работы и эффективную регистрацию ИИ.

### **Апробация работы**

Достоверность полученных результатов в диссертационном исследовании подтверждается:

- 1) достаточным для практических расчетов совпадением результатов моделирования с экспериментальными данными и данными, полученными математическим расчетом;
- 2) данными опубликованных аналогичных работ отечественных и зарубежных специалистов, подтверждающими результаты, полученные в диссертации.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- 1) XVII Международная научно-практическая конференция «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» (ИНФО-2020), г. Сочи, Россия, с 1 по 10 октября 2020г. «Моделирование регистрации гамма излучения трехслойным сенсором из монокристаллического алмаза».
- 2) Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е.В. Арменского, Москва, Россия, с 25 февраля по 4 марта 2020г. «Моделирование процесса регистрации энергии протонов и электронов коаксиальным детектором из алмаза».

- 3) XVI Международная научно-практическая конференция «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» (ИНФО-2019), г. Сочи, Россия, с 1 по 10 октября 2019г. «Моделирование прохождения электронов с начальной энергией 300 кэВ, 500 кэВ, 1 МэВ и 5 МэВ через алмаз толщиной 0,3 мм методом Монте-Карло».
- 4) XVI Международная научно-практическая конференция «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» (ИНФО-2019), г. Сочи, Россия, с 1 по 10 октября 2019г. «Использование искусственной нейронной сети в исследовании радиационных потоков на базе алмазных датчиков».
- 5) XV Международная научно-практическая конференция «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» (ИНФО-2018), г. Сочи, Россия, с 1 по 10 октября 2018г. «Моделирование абсолютной эффективности детектора монокристалла алмаза толщиной от 0,03 до 1см и источником гамма-квантов с энергией от 0,6 до 5000 эВ».
- 6) Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е.В. Арменского, Москва, Россия, с 17 февраля по 1 марта 2017г. «Высокотемпературный детектор ионизирующих излучений с алмазным чувствительным элементом».
- 7) XII International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Москва, Россия, с 12 по 14 мая 2016г. «Review the space radiation CVD diamond multi-layer detector».
- 8) Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е.В. Арменского, Москва, Россия, с 3 по 13 февраля 2015г. «Об особенностях построения узла сенсоров для регистрации космического излучения на основе монокристаллического алмаза».



- 9) XV Всероссийская научно-техническая конференция, г. Воронеж, Россия, с 5 по 17 октября 2014г. «Новые структуры на основе алмазных детекторов для космических транспортных систем».
- 10) XI Международная научно-практическая конференция «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий» (ИНФО-2014), г. Сочи, Россия, с 1 по 10 октября 2014г. «Инновационные технические решения при разработке спектрометров космического излучения на основе алмазных детекторов».

**Список опубликованных статей, где отражены основные результаты диссертации.**

Основные положения диссертации представлены в работах, опубликованных автором в ведущих рецензируемых научных журналах. Публикации в журналах/изданиях, индексируемых в базах цитирования Web of Science и Scopus:

- 1) Bolshakov A.P., Zyablyuk K.N., Kolyubin V.A., Dravin V.A., Khmel'nitskii R.A., Nedosekin P.G., Pashentsev V.N., Tyurin E.M., Ralchenko V.G. Thin CVD diamond film detector for slow neutrons with buried graphitic electrode. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. Volume 871, 1 November 2017. P. 142-147.
- 2) Gladchenkov E., Zakharchenko K. V., Kapenko A., Kolyubin V., Kulagin V., Nedosekin P. A Diamond Detector for Registration of Ionizing Radiation with Low Linear Energy Transfer. // Measurement Techniques. 2017. Vol. 60. No. 1. P. 75-81.
- 3) Gladchenkov, E.V., Ibragimov, R.F., Kolyubin, V.A., Nedosekin P. A, Tyurin, E.M., Zaharchenko, K.V. A Investigation of the diamond based detectors characteristics with different thickness of the sensor element. // Journal of Physics: Conference Series. 2017. 798(1). 012173. P. 1-6.
- 4) Gladchenkov E., Zakharchenko K. V., Ibragimovich R., Kapenko A., Kolyubin V., Kulagin V., Nedosekin P., Tyurin E. Experimental Investigations and Mathematical Simulation of the Operation of Ionizing-

Radiation Diamond Detectors. // Instruments and Experimental Techniques 2017. Vol. 60. No. 3. P. 339-344.

- 5) Nedosekin P., Gladchenkov E., Zakharchenko K. V., Kolyubin V. Review the space radiation CVD diamond multi-layer detector. // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Vol. 502. June 2016. P. 600-604.
- 6) Zyablyuk, K.N., Kolyubin, V.A., Pashentsev, V.N., Nedosekin, P.G., Tyurin, E.M., Afanas'ev, S.A. Gamma sensitivity of single-crystal CVD diamond neutron detectors. // Inorganic Materials. Vol. 52. I. 3. March 2016. P. 262-267.
- 7) Ibragimov R. F., Tyurin E. M., Kadilin V. V., Kolyubin V., Zakharchenko K. V., Nedosekin P. Research of work stability of diamond detectors used in SCR DDIR. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 675. 042013. P. 1-4.
- 8) Altukhov A. A., Zakharchenko K. V., Kolyubin V., Lvov S. A., Nedosekin P., Tyurin E. M., Ibragimov R. F., Kadilin V. V., Nikolaev I. V. Selective detector of cosmic particles based on diamond sensitive elements. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 675. No. 4. 042027. P. 1-4.
- 9) Kaperko A. F., Kolyubin V. A., Kulagin V. P., Lvov S.A., Nedosekin P. G., Chumachenko E. N., Zakharchenko K.V. Spectrometric Diamond Detector of Fluxes of Ionizing Radiation for Space Transportation Systems. // Measurement Techniques. 2015. Vol. 58. No. 6. P. 713-718.
- 10) Gulyaev Yu. V., Mityagin A. Yu., Chucheva G. V., Afanas'ev M. S., Zyablyuk K. N., Talipov N. Kh., Nedosekin P. G., Nabiev A. E. FET on hydrogenated diamond surface. // Journal of Communications Technology and Electronics. March 2014. Vol. 59. I. 3. P. 282–287.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, входящих в список журналов высокого уровня, подготовленный в НИУ ВШЭ:

- 1) Каперко А.Ф., Недосекин П.Г. Модель алмазного коаксиального сенсора для регистрации протонов и электронов. //Датчики и Системы. 2020г. №6 с. 45-51.
- 2) Недосекин П. Трехслойный детектор гамма излучения на основе алмаза. // Датчики и Системы. 2019г. №4. с. 20-26.
- 3) Кадилин В.В., Колюбин В.А., Львов С.А., Недосекин П.Г., Идалов В.А., Тюрин Е.М., Колесников С.В., Самосадный В.Т. Перспективы применения алмазных детекторов для регистрации заряженных частиц космического излучения. // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. 5. № 2. С. 138-144.

### **Содержание и структура работы**

Подготовленная диссертационная работа включает введение, 4 главы и заключение.

**В первой главе** приведен аналитический обзор современного состояния работ по существующим технологическим и конструкционным решениям, и подходам в части разработки, исследование сенсоров и приборов регистрации ИИ КП и методов проверки их основных параметров. Рассмотрены факторы и параметры космического излучения. Проведен анализ современных российских и зарубежных средств и методов регистрации и мониторинга РП КИ, а также их структура и варианты реализации. Проводится сравнение сенсоров регистрации ИИ КП, выполненных из кремния и германия, перспективных разработок на базе CdTe, HgI<sub>2</sub> и алмаза(C). И на основании выполненного анализа конструкций и характеристик сенсоров из разных материалов, делается заключение, что наиболее перспективными сенсорами регистрации потоков ИИ КП, являются алмазные сенсоры.

**Во второй главе** приведен выбор и обоснование направления исследований. Приводятся принципы построения приборов мониторинга радиационной обстановки, освещаются основные проблемы и затруднения при регистрации РП КИ, рассматривается проблема аттестации средств измерений регистрации

частиц, а также описывается возможность применения искусственной нейронной сети (ИНС) для восстановления выходных спектров РП КИ. Сделано заключение о необходимости регистрации и мониторинга потоков РП КИ, метрологической аттестации средств измерений, а также необходимости разработки физико-математической модели для обеспечения точности регистрации РП КИ и применения ИНС для восстановления спектров РП КИ из результатов измерений.

**В третьей главе** приведена методика проектирования алмазного сенсора регистрации РП КИ с последующим проектированием устройства по представленной методике. А именно рассмотрен выбор материала для изготовления сенсора регистрации РП КИ, проведен анализ эффективности регистрации ИИ для выбранного материала с использованием математического моделирования в программе GEANT4, сделан выбор конструкции сенсора, проведено экспериментальное исследование влияния высокой температуры на эффективную работу сенсора, выполнена оптимизация сенсора с использованием математического моделирования в программе GEANT4 для разных видов ионизирующих излучений, проведено математическое моделирование взаимодействия с построенной физической моделью двухэлементного сенсора на основе алмаза. На основании полученных результатов экспериментальных исследований и моделирования делается вывод о необходимости использования не менее двух чувствительных элементов сенсора на базе алмаза, так как это позволяет расширить диапазон измерений, увеличить амплитуду выходного сигнала и повысить скорость счета сенсора при сохранении напряжения питания.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования физической модели многоэлементного (трехэлементного) сенсора из алмаза для регистрации электронов, протонов и гамма-квантов с использованием программы GEANT4. По полученным результатам взаимодействия гамма излучения с многоэлементным сенсором из алмаза, разработана математическая модель, позволяющая оценивать эффективность регистрации сенсора. Приводится сравнение результатов моделирования многоэлементного алмазного сенсора с результатами,

полученными при экспериментальном исследовании многоэлементного алмазного сенсора с использованием изотопа  $^{137}\text{Cs}$ . По результатам сравнения моделирования и эксперимента, делается подтверждение об увеличении производительности АС при увеличении количества рабочих элементов.

**В заключении** диссертации изложены итоги проведенной научной работы, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.