

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 202\_ г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ ПРОЕКТА  
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

**1. Общие сведения о проекте**

**1.1. Шифр темы** (для продлеваемых проектов) – *шифр темы включает дату открытия, дата окончания не указывается, т. к. она определяется сроками завершения проектов в теме.*

04-9-1077-2009

**1.2. Шифр проекта** (для продлеваемых проектов и подпроектов)

**1.2. Лаборатория**

Лаборатория радиационной биологии

**1.3. Научное направление**

Радиационные исследования в науках о жизни

**1.4. Наименование проекта**

Радиационно-биофизические и астробиологические исследования

**1.5. Руководитель(и) проекта**

Чижов Алексей Владимирович, Розанов Алексей Юрьевич

**1.6. Заместитель(и) руководителя проекта (научный руководитель проекта)**

**2. Научное обоснование и организационная структура**

**2.1. Аннотация**

Наличие в ОИЯИ широкого спектра источников ионизирующих излучений, в особенности пучков тяжелых ионов различных энергий, предоставляет уникальную возможность для решения целого ряда фундаментальных проблем радиобиологии и астробиологии, а также практических задач, связанных с исследованиями космоса и развитием радиационной медицины.

В связи с высокой сложностью и стоимостью проведения биологических экспериментов на ускорительных комплексах первостепенное значение имеет совершенствование методик эксперимента, обеспечение дозиметрии и радиационной безопасности, а также проведение соответствующего компьютерного моделирования. Наиболее актуальными проблемами здесь являются необходимость экспериментального воспроизведения энергетического и спектрального состава космических и иных видов ионизирующих излучений, поиск способов

неразрушающего анализа уникальных образцов и автоматизированной обработки данных биологических экспериментов, а также высокая сложность и ресурсоемкость компьютерного моделирования процессов в живых системах.

Настоящий проект направлен на решение комплекса вышеперечисленных проблем, возникающих в радиобиологических и астробиологических исследованиях. В ходе его реализации предполагается провести разработку новых установок для облучения и систем дозиметрии, внедрить методы неразрушающего анализа уникальных образцов, разработать и протестировать системы для автоматизированной компьютерной обработки биологических данных, сформулировать новые математические модели и вычислительные подходы для радиобиологии, биоинформатики и радиационной медицины, выявить механизмы и пути каталитического синтеза пребиотических соединений при действии радиации.

## **2.2. Научное обоснование (цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски)**

### **Радиационно-биофизические исследования**

Ионизирующие излучения фотонной и корпускулярной природы принципиально отличаются по механизмам, обуславливающим их биологическое действие на живые организмы. Это связано как с особенностями физико-химических процессов, протекающих при прохождении частиц через клетки, так и с различиями в спектре индуцируемых повреждений ДНК и путями их репарации. В отличие от электромагнитных видов ионизирующих излучений, энергия которых равномерно распределяется по объему ядра облучаемой клетки, при прохождении ускоренных тяжёлых ионов через вещество энергия распределяется вдоль трека частицы, вызывая трудно репарируемые кластерные повреждения ДНК. Эти особенности необходимо учитывать при решении как фундаментальных проблем, связанных с изучением механизмов биологического действия ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками, так и решением ряда практических задач, связанных с совершенствованием методов радиационной терапии опухолей и оценках радиационных рисков на Земле и в условиях космоса.

Радиобиологические эксперименты на ядерно-физических установках Института будут нацелены на изучение механизмов действия ионизирующих излучений с различными физическими характеристиками на молекулярном, клеточном, тканевом и организменном уровнях биологической организации. Особое внимание будет уделено разработке новых подходов к повышению биологической эффективности излучений, применяемых в радиационной терапии опухолей, и исследованиям механизмов функциональных нарушений в работе мозга при действии радиации с целью оценки риска радиационного воздействия на организм космонавтов при осуществлении межпланетных полётов, а также учета возможных побочных эффектов, возникающих при лучевой терапии злокачественных новообразований.

Основной целью данной части проекта является научно-методическое обеспечение проведения вышеуказанных радиобиологических исследований по совершенствованию методик облучения и обработки экспериментальных данных, обеспечению дозиметрии и радиационной безопасности, а также проведению соответствующего компьютерного моделирования.

Источники фотонных видов ионизирующих излучений применяют в качестве референсных для определения относительной биологической эффективности (ОБЭ) при проведении радиобиологических экспериментов. Также пучки фотонов являются золотым стандартом в онкологических центрах при проведении и моделировании дистанционной лучевой терапии.

В ОИЯИ для облучения биологических объектов пучками фотонов будут использоваться рентгеновские установки CellRad производства Precision X-ray Inc. (USA) и Small Animal Radiation Research Platform (SARRP) производства Xstrahl (UK). Установка CellRad предназначена для облучения биологических культур высокоэнергетическим излучением рентгеновской трубки с регулируемым напряжением от 30 до 130 кВ и током до 5 мА с автоматическим контролем дозы. SARRP представляет собой многофункциональный комплекс для полного моделирования на мелких лабораторных животных цикла лучевой терапии с помощью пучков фотонов. Данная установка позволяет проводить конформное облучение заданной области тела животного с точностью до 1 мм коллимированным пучком фотонов от рентгеновской трубки с регулируемым от 5 до 225 кВ напряжением и током до 30 мА, размещенной на вращающейся гэнтри. Имеется система позиционирования и анестезии животного. Планирование облучения и разметка дозы достигается с помощью встроенных откалиброванных систем дозиметрии и системы рентгеновской компьютерной томографии. В дальнейшем предполагается развитие системы дозиметрии и спектрометрии низкоэнергетичной части спектра рентгеновского излучения (<30 кэВ), что вызвано недостаточной изученностью его биологической эффективности.

В ходе работ по проекту планируется расширение возможностей системы SARRP дополнительными модулями, которые помогут обеспечить мультимодальную томографию мелких лабораторных животных. Совместно с коллективом ЛЯП предполагается развивать цветную рентгеновскую томографию, ОФЭКТ и ПЭТ томографию. Также будут исследованы возможности применения оптической томографии с использованием флуоресцентных меток и оптоакустической томографии. Это позволит проводить прижизненные исследования каждого лабораторного животного в разные сроки после облучения, не прибегая к эвтаназии, что например, требуется для изучения динамики регрессии опухолей, фармакокинетики препаратов, выявления отдаленных нарушений в структурах центральной нервной системы и других критических органов. В результате возможно будет четко определить влияние индивидуальных особенностей животного в статистической выборке при изучении ответа организма на действие излучений с разными физическими характеристиками.

Облучение клеточных культур и мелких лабораторных животных ускоренными заряженными частицами будет проводиться на следующих существующих и строящихся установках Института: линейном ускорителе Линак-200 (электроны до 200 МэВ), сверхпроводящем медицинском циклотроне MSC230 (протоны до 230 МэВ) в ЛЯП, циклотроне У400М (ускоренные многозарядные ионы до 50 МэВ/нуклон) в ЛЯП и на прикладных пучках ARIADNA комплекса NICA (станция SIMBO, ускоренные многозарядные ионы до 600 МэВ/нуклон) в ЛФВЭ.

Согласно техническим проектам предполагается, что пользовательские станции для облучения биологических образцов на ускорителях адронов ЛЯП и ЛФВЭ будут иметь необходимую инфраструктуру для размещения объектов, диагностики пучков и контроля за параметрами облучения.

Для обеспечения проведения радиобиологических экспериментов на У400М инженерами ЛЯР и ЛРБ будет проведен очередной этап модернизации установки «Геном-3» (Рис. 1). Данная установка ЛРБ предназначена для автоматического облучения биологических образцов (клеток в питательном растворе, образцов крови, и др.) в специализированном контейнере. Облучение каждого образца производится в плоском однородном поле частиц с характерным диаметром 35 мм, чтобы распределение поглощенной дозы было равномерно во всем образце. Значения поглощенных доз могут меняться от единиц сГр до десятков Гр.

Для решения задачи облучения ионами легких элементов (включая радиоактивные пучки) зоны неглубоко залегающей опухоли у мелких лабораторных животных (крысы, мыши) на том же канале будет установлено дополнительное оборудование для получения узких (диаметром менее 1 мм) коллимированных пучков. Животные должны быть зафиксированы в процессе облучения в специальных устройствах с возможностью анестезии. Размер поля облучения может варьироваться как в ширину, так и в глубину в зависимости от индивидуального объема опухоли. При этом максимальная глубина пробега ионов в опухоли может достигать 5-8 мм.

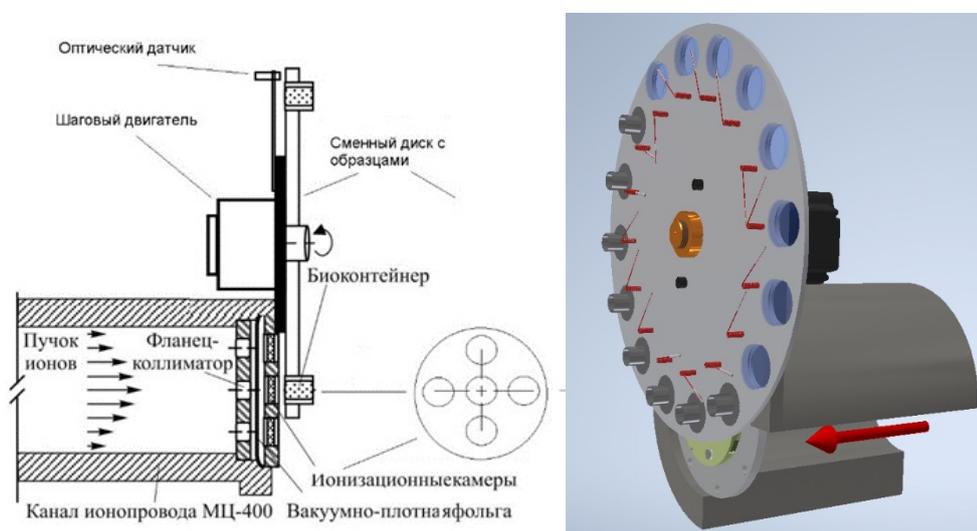


Рис. 1 Схема установки «Геном-3» и позиционера для автоматизированного облучения образцов

Экспериментальные исследования в области космической радиобиологии в силу специфичности космической радиации ведутся в наземных условиях на ускорителях заряженных частиц, так как на данный момент нет других способов получения столь высокоэнергетичных заряженных частиц. Как правило, наземные эксперименты ведутся с использованием моноэнергетических пучков частиц определенного типа, что не соответствует реальному составу космических лучей, в особенности, наиболее опасного для живых организмов галактического космического излучения, обладающего сложным энергетическим и зарядовым спектром многозарядных ионов. В связи с отсутствием достаточно точного и при этом простого способа создания смешанного излучения, моделирующего сложное многокомпонентное радиационное поле внутри космического аппарата или на небесном теле, возникает необходимость в разработке специальной установки. В мире предложено и активно разрабатывается всего три подхода к моделированию комплексных радиационных полей. Один из них был предложен и реализован в объединенной лаборатории NASA Space Radiation Laboratory (NSRL) и Brookhaven National Laboratory (BNL) в Брунхейвене (USA) на базе бустера

коллайдера RHIC. Ещё один симулятор был позже предложен в Центре по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца (GSI). Разработанное и запатентованное коллективом ЛРБ ОИЯИ симулятор для моделирования комплексных радиационных полей, выгодно отличается простотой и точностью от существующих аналогов.

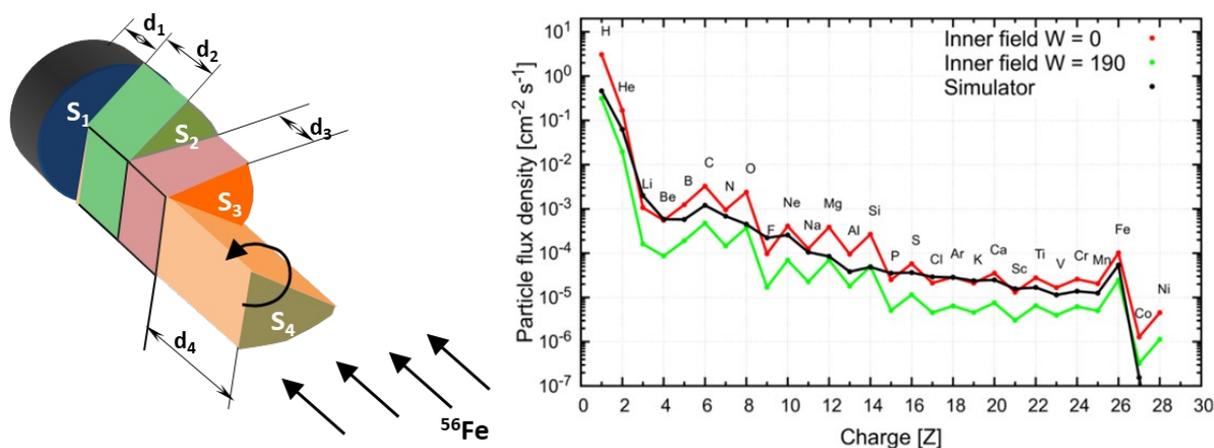


Рис. 2 Схема симулятора галактического космического излучения (слева) и сравнение спектров на симуляторе со спектром космического излучения внутри космического аппарата при разных числах Вольфа W (справа). S<sub>i</sub> и d<sub>i</sub> - площади и толщины компонент конвертера, соответственно.

Компьютерная модель разработанного симулятора (Рис.2) в варианте для пучка ядер <sup>56</sup>Fe с энергией 1 ГэВ/нуклон воспроизводит в правильном соотношении все компоненты радиационного поля внутри космического аппарата, усредненные по солнечной активности. В дальнейшем предполагается провести оптимизацию вариантов симулятора космического излучения для различных типов ускоренных тяжелых ионов, разработку программного обеспечения, а также опытно-конструкторские работы по изготовлению и тестированию прототипа на пучках тяжелых ионов комплекса NICA. В ходе тестирования предполагается проведение цикла работ по измерению энергетических спектров компонентов смешанного поля за симулятором.

В ходе работ по проекту также предполагается провести исследования по дозиметрии смешанных полей гамма-излучения и нейтронов, необходимые для проведения радиобиологических экспериментов на установке ИРЕН в ЛНФ.

В ходе ряда радиобиологических исследований требуется проведение экспериментов с радионуклидными метками и радиофармпрепаратами. В связи с этим в ЛРБ в ходе выполнения проекта планируется спроектировать и оборудовать специализированные помещения для радиобиологических исследований, оснащенные по третьему классу радиохимической лаборатории. Комплекс работ будет включать рациональное размещение, планировку и отделку помещений; эффективные системы вентиляции и канализации; контроль за соблюдением норм и правил радиационной безопасности; организацию системы транспортировки, получения, хранения и учёта радиоактивных изотопов, сбора и удаления радиоактивных отходов; выбор и отработку технологических режимов, защитной техники и оборудования; разработку прогноза возможных аварийных ситуаций и мер по их ликвидации.

При организации радиобиологических исследований на ускорителях высоких энергий ОИЯИ одними из важных проблем являются обеспечение дозиметрии биологических образцов непосредственно в зоне облучения, а также радиационной безопасности персонала,

находящегося за радиационной защитой. В дальнейшем основное внимание предполагается уделить развитию расчетных и экспериментальных методов дозиметрии биологических объектов в сложных полях излучений.

В различных режимах работы ускорителей высоких энергий при взаимодействии пучка с мишенями и материалами защиты возникают поля от вторичного и рассеянного излучений, а также наведенная радиоактивность. Для расчета таких радиационных полей будут использованы модели, основанные на решении уравнений переноса и диффузии методом Монте-Карло в том числе с использованием программных кодов GEANT4, MCNP, FLUKA и RHITS. Для комплексной оценки радиационных полей также требуется разработать метод восстановления карт плотности поверхностного радиоактивного загрязнения помещений по результатам измерений мощности амбиентного эквивалента дозы. Реализацию метода предполагается выполнить методом обратной задачи, основанной на численном решении уравнения Фредгольма 1-го рода, в том числе с применением возможностей параллельных вычислений на суперкомпьютере ОИЯИ «Говорун».

Другой важной задачей обеспечения радиационного контроля является измерение дозы нейтронов с энергиями более 10-15 МэВ поскольку вклад таких нейтронов в полную дозу излучения за защитами ускорителей может быть весомым (до десятка процентов). Поэтому актуальной является задача проектирования и тестирования дозиметров для нейтронного излучения такого диапазона энергий.

В рамках совместной программы исследований с ИКИ РАН и ЛНФ ОИЯИ будет продолжено функционирование экспериментального стенда “DAN” (Dynamic Albedo Neutrons) и участие в работах по созданию, тестированию и градуировке приборов ядерной планетологии для исследования элементного состава поверхности небесных тел Солнечной системы с помощью генератора нейтронов с энергией 14 МэВ.

Ожидаемые результаты:

- Обеспечение дозиметрии и организация облучения биологических образцов на ускорителях ОИЯИ;
- Модернизация и введение в эксплуатацию установки «Геном-3»;
- Развитие мультимодальной системы томографии мелких лабораторных животных;
- Оборудование помещения для радиобиологических экспериментов с использованием радионуклидов;
- Создание прототипа симулятора космического излучения;
- Разработка и тестирование приборов дозиметрии и спектрометрии нейтронов.

#### *Автоматизация обработки данных радиобиологических экспериментов*

В ходе обработки результатов радиобиологических экспериментов исследователи часто сталкиваются с необходимостью обработки вручную значительного объема данных и их последующей систематизации. Например, при проведении исследований гистологических срезов получение изображений нервной ткани на световом микроскопе и проведение вручную морфологического анализа занимает в среднем около месяца в зависимости от числа исследуемых структур. Метод видео регистрации при наблюдении за поведением экспериментального животного в арене установки также широко применяется в современных физиологических исследованиях. Для этих целей используют цифровые видеокамеры и компьютерные программы для анализа данных, например, EthoVision XT (Noldus). Несмотря

на наличие возможности определения в коммерческих программах такого типа ряда параметров, остается немало элементов поведения, которые автоматически не регистрируются и исследователю приходится обрабатывать видеоматериал повторно вручную.

Автоматизация обработки результатов экспериментов позволит получить качественно более точные данные, выявить новые закономерности, отражающие характер изменений после воздействия ионизирующих излучений с разными характеристиками, позволят снизить вероятность ошибок в классификации и сроки получения значимых научных результатов. Одним из наиболее перспективных направлений решения этих задач является разработка и внедрение методов машинного и глубокого обучения для создания решений на базе нейросетевых подходов.

Работы по разработке систем автоматизации планируется вести силами сложившегося коллектива сотрудников ЛИТ и ЛРБ. В результате предполагается разработать программную среду для решения задач радиобиологических исследований с применением высокопроизводительных вычислительных систем. Обработка изображений и видеоматериалов в данной системе базируется на совокупности классических методов компьютерного зрения и методик использования глубоких сверточных нейросетевых архитектур нескольких типов. На основе накопленных и оцифрованных экспериментальных данных будет создана и размечена база изображений и видео для обучения нейросетевых моделей. Разрабатываемая информационная система на базе методов машинного и глубокого обучения и нейросетевых подходов также позволит обеспечить централизованное хранение и доступ к экспериментальным данным в удобной для комплексного статистического анализа форме.

В состав информационной системы также предполагается включить модуль по обработке данных мультимодальной компьютерной томографии и электроэнцефалографии мозга лабораторных животных. Это вызвано необходимостью работы с потоками гетерогенных экспериментальных данных (конвертация, транспортирование, хранение, обработка, математическое моделирование, нейровизуализация, статистический анализ, и прочее) и получения целостной картины нарушения функционирования центральной нервной системы после облучения.

Ожидаемые результаты:

- Развитие информационной системы работы с экспериментальными данными в виде двумерных изображений, данных компьютерной томографии и видеозаписей;
- Разработка протоколов разметки двумерных изображений и видеоматериалов, формирование размеченной базы данных;
- Тестирование реализованных алгоритмов анализа, разработка и регистрация программного обеспечения, предназначенного для автоматизированной обработки данных.

#### *Математическое моделирование радиационно-индуцированных эффектов*

Методы математического моделирования и вычислительного эксперимента приобретают все большее значение в современной радиобиологии. В первую очередь это связано с необходимостью систематизации и экстраполяции ограниченного набора данных радиобиологических экспериментов на различные виды ионизирующих излучений в широком диапазоне физических характеристик. Кроме того, ряд быстропротекающих процессов при взаимодействии излучения с веществом очень сложно измерить экспериментально. Наконец,

высокая сложность и иерархичность организации живых систем требует существенных вычислительных затрат при проведении вычислительного эксперимента, что лишь в последнее время удается преодолеть в связи со стремительным с ростом производительности компьютерной техники.

Главной целью будущих исследований является создание иерархии моделей, позволяющих систематизировать экспериментальные данные и изучать пути, которыми радиационно-индуцированные патологии развиваются на разных уровнях организации (от молекул до популяций клеток) и во временных рамках (острые и отдаленные последствия). При этом потребуются привлечение широкого спектра расчётных методов из разных областей знаний (моделирования транспорта заряженных частиц через вещество, молекулярной динамики, биофизики полимеров, генетических регуляторных сетей, моделей динамики клеточных популяций, обработки и передачи информации в нейронных сетях мозга), а также вычислительных ресурсов суперкомпьютера ОИЯИ.

Базовой задачей при моделировании радиобиологических эффектов является изучение взаимодействия ионизирующих излучений с веществом клетки. На основе первичных быстропротекающих физико-химических процессах при прохождении частиц будет рассчитан спектр возникающих молекулярных повреждений, в первую очередь генетического аппарата, в нормальных и опухолевых клетках млекопитающих и человека. Формирование и репарация основных типов повреждений ДНК (в первую очередь, двунитевых разрывов как прямой, так и энзиматической природы) будут смоделированы с использованием специализированной программной среды GEANT4-DNA. Воспроизведение дальнейшей цепочки событий позволит рассчитать вероятности ошибочной репарации ДНК, приводящей к формированию мутаций и хромосомных aberrаций, для чего потребуются применение аппарата квантовой химии и молекулярной динамики. С применением методов молекулярной динамики также предполагается исследовать нарушения структуры и функций мутантных и окислированных форм белков. На основе полученных данных о повреждениях ДНК будут сформулированы модели радиационно-индуцированной гибели нормальных и опухолевых клеток и проведена их валидация на основе известных экспериментальных данных.

Полученные наработки предполагается применить для решения двух важнейших задач, связанных с поиском новых подходов к повышению биологической эффективности излучений для радиационной терапии опухолей и исследованиям механизмов функциональных нарушений в работе мозга при действии радиации.

В ходе выполнения проекта будут смоделированы сценарии дистанционной и радионуклидной лучевой терапии с применением различных источников ионизирующих излучений. В отличие от традиционных подходов, используемых для планирования терапии, будет получено детальное распределение в опухоли повреждений ДНК, а не только поглощенной дозы. При этом предполагается также более детально оценить повреждения не только в опухолевых клетках, но и в прилегающих нормальных тканях. Будут сформулированы детальные модели роста опухоли и исследована ее динамика после облучения. Данный подход планируется обобщить на случай нескольких перспективных механизмов усиления эффективности терапии. Будут рассмотрены как современные физические механизмы повышения биологической эффективности ионизирующих излучений (адресная доставка наночастиц, усиливающих энерговыделение при взаимодействии с терапевтическим пучком), так и наиболее перспективные биологические механизмы (использование ингибиторов синтеза ДНК и иных молекулярных агентов). Предполагается провести поиск оптимальных параметров

такой терапии с учетом концентраций активных веществ, выбора параметров пучка, терапевтической дозы, ее фракционирования и т. д.

Также планируется оценить влияние заряженных частиц на работу нейронных сетей критических отделов головного мозга. Особое внимание планируется уделить оптимизации моделей клеток центральной нервной системы (ЦНС), представляющим собой затруднительную для расчета мишень ввиду сложной геометрии. Будут рассмотрены сценарии как острого локального облучения (оценка безопасности лучевой терапии), так и тотального хронического (задача о действии космических лучей на клетки в ходе межпланетных полетов). В последнем случае планируется впервые рассмотреть действие спектра частиц с различными энергиями и флюенсами на выход повреждений ДНК и динамику клеточных популяций. Для дальнейшей оценки возможных патологий в ЦНС после облучения будут проведены работы по исследованию различных мутантных и окислированных форм синаптических рецепторов, обеспечивающих межнейронное взаимодействие, динамики нейрогенеза и глиогенеза. Полученные данные будут систематизированы и включены в моделирование функциональной активности различных отделов головного мозга. Это позволит оценить вероятность сбоя в работе памяти и обучения, что критически важно для теоретической оценки радиационных рисков.

Ожидаемые результаты:

- Разработать математические модели формирования различных типов повреждений ДНК и их репарации, модели формирования мутаций и хромосомных aberrаций;
- Провести моделирование нарушений структуры и функций мутантных и окислированных форм белков методом молекулярной динамики;
- Разработать математические модели радиационно-индуцированной гибели опухолевых клеток и прогнозирования роста опухолей в ходе применения перспективных методов лучевой терапии;
- Провести теоретическую оценку радиационно-индуцированных нарушений работы ЦНС на основе математических моделей нейронных сетей с учетом повреждения синаптических рецепторов, окислительного стресса, нарушения нейрогенеза и глиогенеза.

### **Астробиологические исследования**

Одним из перспективных направлений в современной астробиологии является поиск следов внеземной жизни в виде органических соединений или микробных окаменелостей (микрофоссилий).

В последние десятилетия благодаря успехам в области бактериальной палеонтологии удалось идентифицировать в метеоритах микрофоссилии – окаменелые остатки микроорганизмов. Особенно богатый материал был получен в ходе исследования углистых хондритов. Весьма перспективным при изучении вещества метеоритов является применение ядерно-физических методов таких как сканирующая электронная микроскопия, рентгеновская микротомография, нейтронно-активационный и рентгеноспектральный анализ. Одними из важнейших проблем здесь являются сопоставление находок в метеоритах с земными аналогами и подтверждение отсутствия земной контаминации.

Предполагается, что метеориты могут являться переносчиками органических молекул, которые формируются в космических условиях. Например, в межзвездной среде наиболее распространенным трехатомным органическим соединением является цианистоводородная кислота HCN, а самым распространенным трехатомным неорганическим соединением является

вода  $H_2O$ . В результате их соединения происходит образование формамида ( $NH_2COH$ ). Формамид обнаружен в больших количествах в межзвездной среде, в различных уголках Вселенной. В продолжение этой цепочки возникает вопрос о возникновении более сложных пребиотических соединений, необходимых для существования жизни. Большинство экспериментов по абиогенному пребиотическому синтезу не уделяют достаточно внимания такому важнейшему энергетическому фактору, как частицы высоких энергий, входящие в состав космического излучения. Поэтому весьма перспективным является исследование соответствующих процессов с помощью ускорителей заряженных частиц.

Таким образом, астробиологические исследования в данном проекте будут нацелены на выявление механизмов абиогенного синтеза пребиотических соединений при действии радиации и изучение космического вещества методами ядерной физики, поиск микрофоссилий и органических соединений в метеоритах.

### *Исследование абиогенного синтеза пребиотических соединений*

В пионерских экспериментах, проведенных ЛРБ ОИЯИ совместно с коллегами из университета Тушии (г. Витербо, Италия), по облучению водных растворов формамида 170 МэВ протонами и 500 МэВ/нуклон ионами углерода в присутствии метеоритов в качестве катализаторов, впервые наблюдали синтез большого числа пребиотических соединений: аминокислот, карбоновых кислот, сахаров, нуклеиновых оснований и даже нуклеозидов. Эти соединения ранее не были обнаружены в экспериментах с воздействиями другого типа.

Дальнейшие исследования будут направлены на моделирование последовательности процессов, которые могут привести к образованию полной, химически активной пребиотической среды в комплексе с метеоритами либо древними земными горными породами. Планируется продолжить эксперименты по облучению системы формамид + катализаторы излучениями с разными физическими характеристиками, чтобы найти оптимальные условия и пути синтеза пребиотических соединений, а также условия, при которых могут образовываться олиго- и полимерные биомолекулы. Для идентификации органических веществ в получившейся сложной смеси будут использованы методы газовой хроматографии и масс-спектрометрии.

### *Поиск микрофоссилий и органических соединений в метеоритах*

Исследование метеоритов при помощи сканирующей электронной микроскопии позволяет проводить морфологический анализ и классификацию найденных объектов. С помощью электронного сканирующего микроскопа Tescan Vega 3 в секторе астробиологии ЛРБ изучено более 30 образцов метеоритов и земных горных пород. Получено и проанализировано несколько сотен изображений ископаемых микроорганизмов и опубликован первый в мире атлас находок в метеорите Оргей.

Изучение элементного и минерального состава метеоритов и земных горных пород возможно путем рентгеновского энергодисперсионного микроанализа. Исследование состава метеоритов позволит сделать выводы об их происхождении и об условиях, существовавших на родительском теле. В ходе исследования метеоритов необходимо уметь отличать родные для метеорита древние микрофоссилии от земных контаминантов и абиогенных структур. В связи с этим требуется сравнительное микропалеонтологическое изучение и древнейших земных горных пород. Для расширенного изучения находок в метеоритах предполагается также применение рентгеновской микротомографии, которая в отличие от сканирующей электронной

микроскопии, позволяет делать трехмерные изображения микрофоссилий без разрушения уникальных образцов.

Ожидаемые результаты:

- Выявление возможных путей и условий формирования пребиотических соединений при облучении космического вещества или земных горных пород в сочетании с простейшими органическими молекулами;
- Выполнить структурный и элементный анализ микрофоссилий и органических соединений в различных метеоритах ядерно-физическими методами.

### **Развитие исследовательской инфраструктуры**

По мере выполнения международной программы радиобиологических и астробиологических исследований по проекту необходимо поэтапное обновление оборудования и создание новых установок. Развитие исследовательской инфраструктуры предусматривает следующие составляющие:

- 1) проектирование, создание и ввод в эксплуатацию установки Геном-3, модернизация установки SARRP;
- 2) проектирование и ввод в эксплуатацию оборудования для мультимодальной томографии животных;
- 3) проектирование, строительство и лицензирование радиохимических блоков для исследований на клеточных культурах и лабораторных животных;
- 4) проектирование, изготовление и тестирование прототипа симулятора для моделирования сложных радиационных полей, приобретение спектрометров и дозиметрического оборудования.

### **Оценка рисков**

Важнейшую роль в обеспечении проекта играет предоставление необходимого времени работы на ускорителях ОИЯИ, а также ресурсов МИВК. Возможные сложности технического и организационного характера могут быть решены путем взаимодействия с координаторами от сотрудничающих Лабораторий ОИЯИ.

Финансовые риски могут быть обусловлены сложностями в поставках уникального высокотехнологичного оборудования, материалов и реагентов. В этом случае возможно временное использование оборудования организаций-участников проекта.

Риски кадрового дефицита не предвидятся. В состав участников входят как известные ученые с мировым именем, так и большое число молодых специалистов.

## **2.3. Предполагаемый срок выполнения**

2024-2028

## **2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ**

ЛЯР - Камински Г., Митрофанов С.В., Тетерев Ю.Г., Тимошенко К.Д., Павлов Л.А.

ЛНФ - Швецов В.Н., Пятаев В.Г., Удовиченко К.В., Кучерка Н., Чураков А.В., Зиньковская И., Фронтасьева М.В., Юшин Н.С.

ЛИТ - Стрельцова О.И., Нечаевский А.В., Зуев М.И., Хведелидзе А., Палий Ю.

ЛЯП - Глаголев В.В., Шелков Г.А., Рожков В.А., Сотенский Р., Иноятов А.Х., Карамышева Г.А., Мицын Г.В.

ЛФВЭ - Сыресин Е.М., Балдин А.А.

### 2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК

Вычислительные ресурсы	Распределение по годам				
	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Хранение данных (ТБ)					
- EOS	200	200	200	200	200
- Ленты	-	-	-	-	-
Tier 1 (ядро-час)	-	-	-	-	-
Tier 2 (ядро-час)	-	-	-	-	-
СК «Говорун» (ядро-час)					
- CPU	500 000	500 000	500 000	500 000	500 000
- GPU	70 080	70 080	70 080	70 080	70 080
Облака (CPU ядер)	-	-	-	-	-

### 2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
РАУ	Армения	Ереван	Мамасакхисов Е.Ш.	
Институт механики	Болгария	София	Витанов Н.К.	
НИИЯП БГУ	Беларусь	Минск	Кулагова Т.А.	программа сотр.
ГО НПЦ НАН Беларуси по материаловедению	Беларусь	Минск	Хасанов О.Х., Гусаков В.Е.	
Institute for Tropical Technology VAST	Вьетнам	Ханой	Tran Dai Lam Pham Thi Lan	
University of Tuscia	Италия	Витербо	Di Mauro E. Saladino R.	
Национальный университет Монголии	Монголия	Улан Батор	Лхагва О.	
ИФЗ РАН	Россия	Борок	Цельмович В.А.	
ДВФУ	Россия	Владивосток	Ширмовский С.Э.	
ФИЦ КазНЦ РАН	Россия	Казань	Калачев А.А. Никифоров В.Г. Семашко В.В.	
ИКИ РАН	Россия	Москва	Митрофанов И.Г.	
ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА	Россия	Москва	Барчуков В.Г. Крючков В.П.	
МГУ	Россия	Москва	Черняев А.П.	
ГАИШ МГУ	Россия	Москва	Бусарев В.В.	

ИГЕМ РАН	Россия	Москва	Шарков Е.В.	
ПИН РАН	Россия	Москва	Самылина О.С. Жегалло Е.А.	
НИЦ «Курчатовский институт»	Россия	Москва	Волков А.Е.	
Институт катализа СО РАН	Россия	Новосибирск	Снытников В.Н.	
ИФХиБПП РАН	Россия	Пушино	Алексеев А.О. Ривкина Е.М.	
ИЗМИРАН	Россия	Троицк	Рагульская М.В.	
ИСАН	Россия	Троицк	Наумов А.В.	
ЮУрГУ	Россия	Челябинск	Соколинский Л.Б.	соглашение
Институт ядерных наук «Винча»	Сербия	Белград	Чевизович Д., Здравкович С., Чосич М., Галович С.	программа сотр.
Университет Крагуевац	Сербия	Крагуевац	Маркович З.	программа сотр.
Институт материаловедения АН РУз	Узбекистан	Паркент	Раззоков Дж.	
ИЯФ АН РУз	Узбекистан	Ташкент	Кулабдуллаев Г., Ким А.А.	
iThemba LABS	ЮАР	Фаур	Vandervoorde Ch.	программа сотр.

**2.6. Организации-соисполнители** (те сотрудничающие организации/партнеры без финансового, инфраструктурного участия которых выполнение программы исследований невозможно. Пример — участие ОИЯИ в экспериментах LHC в CERN)

### 3. Кадровое обеспечение

#### 3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал, сумма FTE	Ассоциированный персонал, сумма FTE
1.	научные работники	24	-
2.	инженеры	6.5	-
3.	специалисты	-	-
4.	рабочие	-	-
	<b>Итого:</b>	<b>30.5</b>	-



### 3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ

№№ п/п	Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
1.	научные работники	-	-
2.	инженеры	-	-
3.	специалисты	-	-
4.	рабочие	-	-
	<b>Итого:</b>	-	-

## 4. Финансовое обеспечение

### 4.1. Полная сметная стоимость проекта

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП).  
Детализация приводится в отдельной форме.

3 310 000 \$

### 4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков — общий объем.

—

Руководители проекта

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

Дата представления проекта / подпроекта КИП в ДНОД \_\_\_\_\_

Дата решения НТС Лаборатории \_\_\_\_\_, номер документа \_\_\_\_\_

Год начала проекта / подпроекта КИП \_\_\_\_\_

(для продлеваемых проектов) — год начала работ по проекту \_\_\_\_\_

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления  
Проекта**

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам					
			1 год	2 год	3 год	4 год	5 год	
	Международное сотрудничество (МНТС)	310 k\$	50	50	70	70	70	
	Материалы	250 k\$	50	50	50	50	50	
	Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	2 100 k\$	400	450	450	400	400	
	Пуско-наладочные работы	-	-	-	-	-	-	
	Услуги научно- исследовательских организаций	-	-	-	-	-	-	
	Приобретение программного обеспечения	-	-	-	-	-	-	
	Проектирование/строительство	650 k\$	150	200	200	50	50	
	Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту)	-	-	-	-	-	-	
<b>Необходимые ресурсы</b>	<b>Нормо-час</b>	Ресурсы						
		- сумма FTE	152.5	30.5	30.5	30.5	30.5	
		- ускорителя/установки:						
		SARRP (ЛРБ)	240	48	48	48	48	
		У400М (ЛЯР)	200	40	40	40	40	
		Нуклотрон (станция SIMBO) (ЛФВЭ)	480	96	96	96	96	
		Линак-200 (ЛЯП)	150	30	30	30	30	
		ИРЕН (ЛНФ)	150	30	30	30	30	
- реактора								
<b>Источники финансирования</b>	<b>Бюджетные средства</b>	Бюджет ОИЯИ (статьи бюджета) ст.5, 6, 10, 14, 18, 19 ст.4	3 000 k\$ 310 k\$	600 50	700 50	700 70	500 70	500 70

<b>я</b>	<b>Внебюджет (доп. смета)</b>	Вклады соисполнителей	-	-	-	-	-	-
		Средства по договорам с заказчиками	-	-	-	-	-	-
		Другие источники финансирования	-	-	-	-	-	-

Руководители проекта

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/

Экономист Лаборатории

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/

# ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

## НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА

Радиационно-биофизические и астробиологические исследования

## УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА

### ШИФР ПРОЕКТА

### ШИФР ТЕМЫ

04-9-1077-2009

## ФИО РУКОВОДИТЕЛЕЙ ПРОЕКТА

Чижов Алексей Владимирович, Розанов Алексей Юрьевич

### СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
ИНСТИТУТА

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛИ ТЕМЫ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛИ ПРОЕКТА

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА