

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ИМ. М. Г. МЕЩЕРЯКОВА

На правах рукописи

**Гордеев Иван Сергеевич**

**Моделирование смешанных радиационных полей в  
космических аппаратах и на ускорителях заряженных частиц**

Специальность: 1.2.2 — Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна — 2024

Работа выполнена в Лаборатории радиационной биологии Объединенного института ядерных исследований

**Научный руководитель:** **Бугай Александр Николаевич**  
доктор физико-математических наук

**Официальные оппоненты:** **Пшеничнов Игорь Анатольевич**,  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник Лаборатории  
релятивистской ядерной физики Отдела экс-  
периментальной физики Института ядерных  
исследований Российской академии наук

**Феофилов Григорий Александрович**,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
заведующий Лабораторией физики сверх-  
высоких энергий Санкт-Петербургского  
государственного университета

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
ОИЯИ.05.01.2022.П,  
доктор физ.-мат. наук

Е. В. Земляная

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Осуществление межпланетных полётов, в частности, полёта к Марсу, является одной из наиболее амбициозных мировых научных задач современности. Главным препятствующим фактором для пилотируемых экспедиций является космическая радиация [1; 2], в особенности, галактические космические лучи (ГКЛ), представленные, в основном, стабильными тяжёлыми заряженными частицами (ТЗЧ) от протонов до сверхтяжёлых ядер с крайне широким диапазоном энергий, простирающимся вплоть до  $10^{20}$  эВ [3].

Внутри космических аппаратов формируется сложное радиационное поле излучения в результате взаимодействия ядер ГКЛ с оболочкой космического аппарата, основные компоненты внутреннего радиационного поля — это заряженные частицы от протонов вплоть до ядер никеля. Подобное поле излучения является многокомпонентным и смешанным, количественно и качественно отличается от земного: в земных условиях практически отсутствует возможность облучения ядрами с  $Z > 2$  (за редким исключением углеродной терапии рака) с высокими энергиями. Эти ядра обладают очень большой линейной передачей энергии (ЛПЭ) и высокой относительной биологической эффективностью (ОБЭ), что значительно повышает радиационный риск, связанный с возможным развитием в последствии онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний у космонавтов [4]. В последние годы в радиационные риски стали включать новую категорию, определяемую воздействием ТЗЧ на органы центральной нервной системы (ЦНС) и влияющую на операторскую деятельность космонавтов непосредственно в период миссии. Таким образом, оценка радиационного риска для космонавтов — важнейшая задача космической радиобиологии [5].

В настоящее время основным способом исследования радиационной обстановки в межпланетном корабле является компьютерное моделирование, направленное на установление детальных физических характеристик компонентов внутреннего радиационного поля космического аппарата: энергетических спектров плотности потока частиц и величин ЛПЭ. Эти характеристики необходимы для оценки эффективных доз, получаемых космонавтами за время пилотируемых экспедиций в условиях дальнего космоса. Поэтому одной из задач диссертационного исследования является установление наиболее детальных характеристик поля излучения при помощи компьютерного моделирования.

Экспериментальные исследования в области космической радиобиологии в силу специфичности космической радиации ведутся в земных условиях на ускорителях заряженных частиц, т. к. на данный момент нет иных способов получения столь высокоэнергетичных ядер, входящих в состав ГКЛ. Однако, при проведении экспериментов, обнаруживается ряд существенных проблем, из которых можно сделать вывод о том, что достаточно точно воспроизводить радиационные условия космоса всё ещё не удаётся. Так, биологический объект в экспериментах подвергается, как правило, кратковременному воздействию моноэнергетическими пучками частиц одного типа с относительно

большими мощностями дозы [2, с. 503], существует не столь большое количество экспериментов с несколькими типами частиц, например, альфа-частицами и рентгеновским излучением [6], что является недостаточным для полного воссоздания радиационных условий космоса. В космосе же облучение происходит одновременно различными типами частиц, изотропно и в широчайшем энергетическом диапазоне, поэтому принципиально возможно существование комбинированного действия, например, синергетического эффекта [7]. Кроме того, в космосе облучение носит хронический характер, мощность дозы в таком поле излучения крайне низкая. Облучение пучками частиц на ускорителях приводит к тому, что та доза, которая будет набираться за счёт ГКЛ годами при осуществлении межпланетного полёта, воспроизводится в экспериментах за минуты, а для биологических объектов мощность дозы также крайне важна в связи с процессами репарации.

Отсюда очевидна актуальность разработки новых методов создания смешанных полей излучений для облучения биологических объектов. Необходимы новые подходы, которые позволяли бы в земных условиях осуществить симуляцию воздействия ГКЛ, а также вторичного излучения, возникающего при межпланетных полётах. Кроме того, на данный момент принципиально неразрешимым остаётся вопрос об экспериментах с хроническим облучением.

Прорывной способ решения проблемы симуляции был предложен в Лаборатории Космической Радиации при НАСА в Брукхейвене (США) на бустере коллайдера RHIC. Было объявлено о создании специального «симулятора ГКЛ», способного последовательно доставлять к облучаемому объекту протоны и тяжёлые ядра для моделирования смешанного поля ГКЛ в диапазоне энергий до 1 ГэВ/н [8; 9]. Принципиально иная схема симулятора была предложена в работе [10], где предлагается использовать только один пучок ядер  $^{56}\text{Fe}$  с энергией 1 ГэВ/н и сложный полиэтиленовый преобразователь, подобный тем, которые используются в радиотерапии для формирования расширенного пика Брэгга [11]. Ещё один симулятор ГКЛ был позже предложен в GSI [12], где используется гибридный подход, совмещающий активную смену пучка частиц ускорителя и замену различных преобразователей во время облучения. Тем не менее, предложенные подходы не лишены ряда недостатков, поэтому разработка новых методов моделирования смешанного поля излучения является крайне актуальной задачей, решаемой в рамках диссертационной работы.

В связи с отсутствием достаточно точного и при этом простого способа создания смешанного излучения, схожего по своим характеристикам со сложным многокомпонентным радиационным полем космических аппаратов, существует необходимость в разработке нового метода, с одной стороны опирающегося

на уже существующие подходы, но с другой стороны задействующего принципиально иной способ создания смешанного и однородного поля излучения для проведения радиобиологических экспериментов.

**Целью** диссертационной работы является исследование методами компьютерного моделирования внутреннего радиационного поля космического аппарата при полётах вне магнитосферы Земли для оценки радиационного риска космонавтов и развитие на этой основе новых методов к воспроизведению схожего по характеристикам смешанного радиационного поля в земных условиях на ускорителях ТЗЧ, позволяющих проводить уникальные экспериментальные исследования в области космической радиобиологии.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Проведён сравнительный анализ существующих численных моделей для определения спектров частиц галактических космических лучей и разработано программное обеспечение, реализующее алгоритм вычислений по модели Немецкого аэрокосмического центра.
2. Проведён анализ существующих детерминистических и статистических методов расчёта переноса ионизирующих излучений через вещество, а также программных комплексов, реализующих данные методы. С применением программного комплекса FLUKA, реализующего метод статистических испытаний Монте-Карло выполнено компьютерное моделирование взаимодействия частиц ГКЛ с моделью космического аппарата, установлены характеристики внутреннего поля излучения.
3. На основе расчётных данных определены эффективные дозы для космонавтов, от всех учитываемых при моделировании компонентов радиационного поля, обосновано применение специальных коэффициентов конверсии флюенс-эффективная доза. Проведён сравнительный анализ рассчитанных доз с существующими литературными данными по измеренным дозам в космосе.
4. При помощи компьютерного моделирования разработаны подходы к созданию смешанных радиационных полей адронов. На основании разработанной компьютерной модели предложена новая схема установки для создания смешанного поля излучения (симулятор ГКЛ) на пучках тяжёлых ионов высокой энергии для создаваемых в рамках проекта NISA каналов прикладных экспериментов на нуклотроне ОИЯИ.
5. Проведён сравнительный анализ характеристик поля излучения симулятора ГКЛ с расчётными данными внутреннего радиационного поля модели космического аппарата, а также с имеющимися в литературе данными измерений (распределение флюенса по энергии и ЛПЭ).
6. Разработаны комплексы программ, позволяющие осуществлять оптимизацию параметров модели симулятора ГКЛ и визуализировать исходные и результирующие данные модели.

## **Научная новизна:**

1. Установлены детальные характеристики внутреннего поля излучения для модели обитаемого модуля космического аппарата, обусловленного взаимодействием частиц ГКЛ широкого энергетического спектра с оболочкой аппарата в минимуме и максимуме солнечной активности; на основании полученных результатов оценены эффективные дозы для космонавтов за время полёта Земля-Марс-Земля.
2. На основе проведенного компьютерного моделирования предложен новый метод создания нуклонного поля, сходного по спектральным характеристикам с внутренним радиационным полем космического аппарата, совершающего межпланетный полёт.
3. Предложены новый метод и схема устройства создания сложного смешанного поля излучения, сходного по составу и энергиям с внутренним радиационным полем космического аппарата, находящегося за пределами магнитосферы Земли.
4. Методами математического моделирования выполнено оригинальное исследование возможности применения симулятора ГКЛ для постановки экспериментов в рамках комплекса NISA ОИЯИ.

**Научно-практическая значимость.** Компьютерное моделирование позволило детально установить компоненты смешанного поля излучения для модели космического аппарата. На основе полученных результатов удалось произвести оценки суммарных эффективных доз, получаемых космонавтами для различных сценариев полёта на Марс при различной солнечной активности, что позволяет оценить риски, связанные с воздействием космической радиации за время пилотируемых межпланетных полётов и выявить компоненты смешанного излучения, вносящие наибольший вклад в суммарную дозу излучения.

Разработана и исследована математическая модель симулятора ГКЛ. Полученные результаты демонстрируют, что предлагаемая модель может быть реализована на одном из проектируемых в рамках комплекса NISA каналов для прикладных исследований на нуклотроне ЛФВЭ ОИЯИ. Предлагаемая схема симулятора является универсальной и может быть задействована на синхротронах, способных ускорять тяжёлые ядра до релятивистских энергий.

**Методология и методы исследования:** результаты диссертационной работы получены при помощи компьютерного моделирования с применением современных программ транспорта излучений через вещество методом Монте-Карло, а также программ, написанных диссертантом самостоятельно. Результаты расчётов с использованием программ переноса излучения через вещество были верифицированы на доступных в литературе экспериментальных данных, была проведена перекрёстная проверка полученных результатов. Для создания

модели симулятора ГКЛ использовались методы математической оптимизации. Программные комплексы и алгоритмы реализованы на языках Fortran и Python.

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

1. Результаты численного моделирования взаимодействия частиц ГКЛ с моделью космического аппарата: энергетические спектры плотности потока частиц, распределение плотности потока частиц по ЛПЭ, позволяющие произвести детальный расчёт эффективных доз для космонавтов.
2. Результаты расчёта эффективных доз для космонавтов при различных сценариях полёта Земля-Мартс-Земля, позволяющие оценить влияние радиации на космонавтов.
3. Новая методика создания на пучках тяжёлых ионов высокой энергии полей смешанного излучения: математическая модель симулятора ГКЛ, способного воспроизводить смешанное поле излучения в космическом аппарате при межпланетных полётах, результаты численного моделирования, подтверждающие состоятельность методики.
4. Программные комплексы: для моделирования спектров частиц ГКЛ, настройки конфигурации и визуализации данных компьютерной модели симулятора ГКЛ.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается выбором актуальных транспортных кодов для обеспечения расчётов. Была проведена перекрёстная проверка результатов для тестовых расчётов с использованием различных программ переноса излучения через вещество и верификация тестовых расчётов с доступными в литературе экспериментальными данными. Результаты находятся в согласии с результатами, приведёнными другими авторами.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались автором на научных мероприятиях: ежегодной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов государственного университета «Дубна» в 2017, 2018 и 2019 годах; VIII Съезде по Радиационным Исследованиям 2021 года в Москве; XXVI международной научной конференции молодых ученых и специалистов в 2022 году (AYSS-2022); рабочем совещании «Прикладные исследования на комплексе НИКА: перспективы сотрудничества РСО-Алания – ОИЯИ» в 2023 году; Третьем Международном форуме «Физика — 2024» (Самарканд, Узбекистан); общелабораторном семинаре ЛИТ ОИЯИ в 2024 году.

За результаты, изложенные в диссертационной работе, соискатель был удостоен первой премии ОИЯИ «За научно-технические прикладные работы» за 2021 год. Соискатель является победителем конкурса «Научных работ молодых ученых и преподавателей государственного университета «Дубна» в 2023 году за представленный на конкурс цикл работ, изложенный в диссертации.

**Личный вклад.** Выносимые на защиту результаты и положения полностью отражают персональный вклад автора. Публикации по теме диссертации подготовлены в соавторстве с коллегами и научным руководителем на основе

выполненных автором расчётов при определяющем вкладе автора в обработку и анализ численных результатов. Программная реализация необходимых для компьютерного моделирования алгоритмов, их тестирование и апробация выполнены лично соискателем.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** В диссертационной работе представлены теоретические исследования, направленные на изучение физических явлений и процессов, в частности, взаимодействия галактического космического излучения с моделью космического аппарата. Полученные результаты необходимы для разработки принципиально новых экспериментальных методов, а также обоснования предлагаемой схемы новой установки для экспериментальных исследований. Разработана математическая модель симулятора ГКЛ, исследование которой подтверждает состоятельность предлагаемого подхода. Диссертационное исследование содержит все три составляющих названия специальности. Представленные в работе результаты исследований соответствуют пунктам 3, 4 и 8 паспорта специальности 1.2.2 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Соответствие диссертации физико-математической отрасли науки определяется объектом исследования и преобладанием численных методов в качестве аппарата исследований.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 публикациях, изданных в рецензируемых научных изданиях, соответствующих требованиям к публикациям Положения о присуждении ученых степеней в ОИ-ЯИ (пр. ОИЯИ от 11.02.2022 №132). Получен 1 патент на изобретение и 3 свидетельства о государственной регистрации программ для электронных вычислительных машин.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 1 приложения. Полный объём диссертации составляет 169 страниц, включая 59 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 122 наименования.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость, приводятся положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена обзору объекта и предмета исследования: космической радиации, в частности, обоснован выбор компоненты галактического космического излучения, как представляющего наибольший интерес для компьютерного моделирования и оценки радиационной нагрузки на космонавтов, обусловленной данным излучением. Обсуждаются существующие математические модели спектров частиц ГКЛ. Обоснован выбор модели Немецкого



аэрокосмического центра [13] для воспроизведения энергетических спектров частиц ГКЛ с целью дальнейшего использования в качестве входных данных для компьютерного моделирования переноса частиц в модели космического аппарата. Согласно модели Немецкого аэрокосмического центра, дифференциальный энергетический спектр мощности флюенса  $\Phi_i(\mathbf{r}, t, E)$  (интегрированный по всему телесному углу) для частицы ГКЛ типа  $i$ , с кинетической энергией  $E$  в момент времени  $t$  в космическом пространстве за пределами магнитосферы Земли может быть рассчитан по формуле:

$$\begin{aligned} \Phi_i(\mathbf{r}, t, E) &= \int_{4\pi} \Phi_i(\mathbf{r}, t, E, \Omega) d\Omega = \\ &= \frac{C_i \beta^{\alpha_i}}{R_i(E)^{\gamma_i}} \left[ \frac{R_i(E)}{R_i(E) + (0.37 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot W(t)^{1.45})} \right]^{b \cdot W(t) + c} \frac{A_i}{Z_i} \frac{1}{\beta}. \quad (1) \end{aligned}$$

Здесь

- $R_i(E) = \frac{A_i}{Z_i} \sqrt{E^2 + 2EE_0}$  — магнитная жёсткость частицы типа  $i$  с кинетической энергией  $E$ ,  $E_0$  — энергия покоя на нуклон (протона);
- $A_i$  и  $Z_i$  — массовое и зарядовое число атомного ядра частицы ГКЛ типа  $i$ ;
- $\beta$  — отношение скорости частицы к скорости света;
- $C_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $\gamma_i$  — параметры из модели стандарта ISO 15390 [14], специфичные для каждой частицы типа  $i$ ;
- $W(t)$  отвечает за модуляцию спектра ГКЛ в гелиосфере (число Вольфа) в момент времени  $t$ .

Алгоритм вычислений реализован соискателем в рамках программного обеспечения GCRs Spectra<sup>1</sup>. Реализация данной модели в программном виде позволяет автоматизировать расчёты и подготовить необходимые входные данные для последующего моделирования взаимодействия частиц ГКЛ с компьютерной моделью космического аппарата с использованием программных комплексов, основанных на методе Монте-Карло. Графический пользовательский интерфейс программы показан на рисунке 1. На программу диссертантом получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [A1].

Во **второй главе** описываются основные физические процессы и реакции, обуславливающие сложное многокомпонентное внутреннее радиационное поле космического аппарата. Обоснован выбор частиц (а также их энергий), учитываемых при компьютерном моделировании переноса ИИ в оболочке космического аппарата. Приведены основные физические величины, характеризующие поле излучения, которые находятся в результате численного моделирования. Спектры внутреннего радиационного поля модели космического аппарата оцениваются через сумму отрезков длин путей, пройденных частицами внутри детекторов

<sup>1</sup>Исходный код программы представлен в репозитории GitHub по ссылке: [https://github.com/Gordonice/GCRs\\_Spectra](https://github.com/Gordonice/GCRs_Spectra)

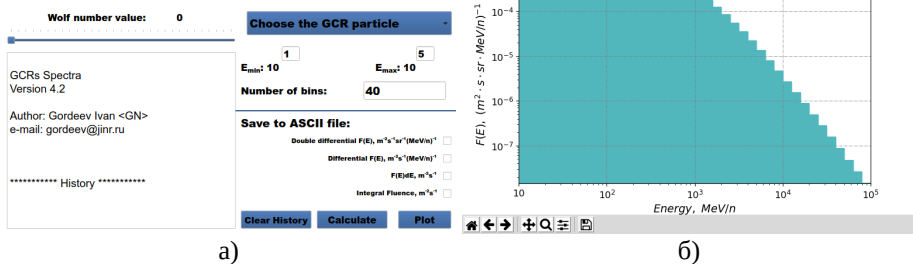


Рис. 1 — Графический пользовательский интерфейс программы GCRs Spectra: главное окно (а), окно с примером результата выполнения (б)

(оценка по длине пробега):

$$\bar{\Phi}_V(E) \equiv \frac{1}{V} \int_V dV \int_{4\pi} \Phi(\mathbf{r}, E, \Omega) d\Omega \simeq \frac{1}{NV\Delta E} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} W_i^j s_i^j, \quad (2)$$

где  $N$  — общее количество первичных частиц,  $n_i$  — число раз, когда  $i$ -я частица проходит через выпуклый объём  $V$ ,  $s_i^j$  — это  $j$ -я длина трека в объёме, а  $W_i^j$  — это математический вес частицы, при вхождении в объём детектора  $V$  в  $j$ -й раз.

Приводятся вычисляемые дозиметрические величины, обосновывается необходимость применения метода расчёта эффективной дозы через распределение флюенса по энергии и применение специальных коэффициентов конверсии флюенс-эффективная доза [15]. Данные коэффициенты учитывают узкий круг лиц космонавтов, как правило, более радиорезистентных, что является более состоятельной оценкой радиационного риска экипажа космического аппарата. Таким образом, эффективная доза  $D_{\text{эфф}}$ . (или мощность эффективной дозы) определяется непосредственно из дифференциальных энергетических спектров плотности потока частиц, через операцию свёртки спектров:

$$D_{j,\text{эфф}} = \int_0^{E_{\text{макс.}}} \Phi_j(E) c_j(E) dE, \quad (3)$$

где  $\Phi_j(E)$  — непрерывный энергетический флюенс частицы типа  $j$ , а  $c_j(E)$  — соответствующая функция энергетической зависимости коэффициентов конверсии для частицы типа  $j$ . Спектры частиц рассчитываются на энергетической сетке  $\{E_k\}$  и представляются гистограммами, имеющими  $N$  энергетических интервалов (бинов), с шириной  $\Delta E_k = E_{k+1} - E_k$ , поэтому формула для свёртки в

пригодном для вычислений виде имеет вид:

$$D_{j,\text{эфф.}} = \sum_k^N \Phi_{j,k}(E_k) c_{j,k}(E_k) \Delta E_k, \quad (4)$$

где  $\Phi_{j,k}(E_k)$  — значение флюенса частицы типа  $j$  в бине  $k$ , а  $c_{j,k}(E_k)$  — соответствующее значение коэффициента конверсии для частицы типа  $j$  в бине  $k$ .

**Третья глава** посвящена описанию и сравнению существующих подходов (детерминистических и статистических) к математическому моделированию радиационных условий космоса при межпланетных перелётах. Обосновывается преимущество использования статистического метода Монте-Карло и построенных на его базе комплексов программ транспорта ионизирующего излучения FLUKA и RHITS. Расчёт внутренних радиационных полей модели космического аппарата производился с применением транспортного кода FLUKA, подробно описывается методика расчёта. Необходимые для построения компьютерной модели симулятора ГКЛ расчёты производились с применением программы переноса излучения через вещество RHITS. Выбор программы RHITS для этих целей был обусловлен утилитарными соображениями, т. к. данный код, в отличие от FLUKA, позволяет производить параллельные вычисления с использованием технологий MPI и OpenMP, что является более эффективным в вычислительном плане. Результаты расчётов по программам FLUKA и RHITS сверяются и валидируются при помощи доступных в литературе экспериментальных данных.

В качестве модели обитаемого модуля космического корабля был принят полый цилиндр диаметром 6 м и длиной 12 м ( $V = 339.3 \text{ м}^3$ ) с алюминиевой оболочкой толщиной  $15 \text{ г/см}^2$  ( $\rho_{\text{Al}} = 2.7 \text{ г/см}^3$ ). Внутри модуль заполнен сухим воздухом. Эта модель является приближением помещения, в котором космонавты будут проводить большую часть времени. Габариты выбранной модели обитаемого модуля превышают габариты отдельных сегментов МКС, учитывая большую продолжительность полёта и сравнимы с общим жилым объёмом МКС (порядка  $400 \text{ м}^3$ ). Предлагаемая толщина оболочки модуля превышает среднюю толщину оболочек сегментов МКС в силу того, что она должна обеспечивать защиту при прохождении через радиационный пояс Земли и от большей части солнечной радиации за пределами магнитосферы Земли. Максимальная толщина защиты МКС составляет примерно  $15 \text{ г/см}^2$  алюминия.

В используемой модели намеренно не учитывается внутреннее заполнение, ввиду отсутствия точных данных о конфигурации модуля, который будет использоваться в реальности. По этой же причине не учитывается также расположение топливных баков и запасов воды снаружи модуля. Стоит отметить, что модель может быть усложнена при необходимости, общая методика проводимых расчётов изменится только в части задания геометрии. Используемая при моделировании геометрия модуля, а также детектирующие области, в которых определяются характеристики поля излучения, показаны на рисунке 2.

Для проведения всех вычислений была задействована гетерогенная платформа HynriLIT [16] Лаборатории информационных технологий (ЛИТ) ОИЯИ

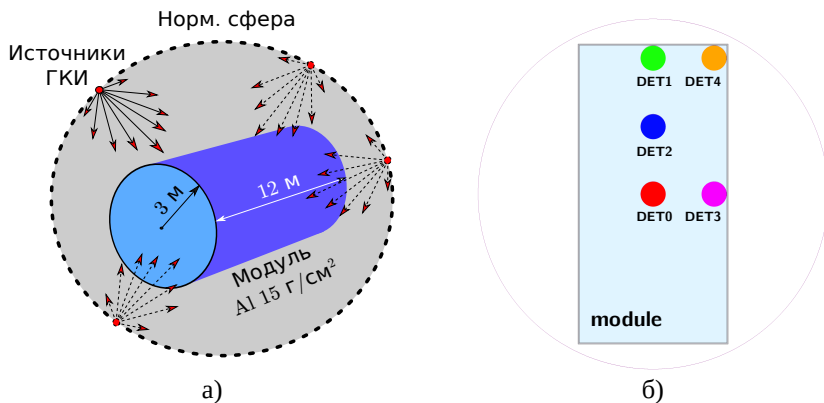


Рис. 2 — Геометрия используемой при расчётах модели обитаемого модуля космического аппарата: а) общий вид с нормирующей сферой и источниками ГКЛ; б) вид в разрезе с обозначением детектирующих областей (детекторов)

и сервера Лаборатории радиационной биологии (ЛРБ) ОИЯИ. Компьютерное моделирование проходило в несколько этапов в соответствии с приведённой на рисунке 3 блок-схемой, данные этапы условно выделены на рисунке блоками различного цвета: синий блок — этап расчёта спектров ГКЛ по авторской программе GCRs Spectra; зелёный блок — этап Монте-Карло моделирования транспорта частиц ГКЛ через геометрию модели модуля космического аппарата, на этом этапе обеспечиваются основные результаты расчётов; красный блок — заключительный этап расчётов, в котором по полученным спектрам плотности потока частиц подсчитываются эффективные дозы и распределение флюенса частиц по ЛПЭ, для чего используются данные по тормозной способности (неограниченной ЛПЭ) из кода АТМА [17] всех учитываемых в расчёте заряженных частиц и специальные коэффициенты конверсии флюенс-доза [15], учитывающие радиорезистентность космонавтов.

Поле излучения задавалось изотропным, характеризовалось заранее подготовленными по программе GCRs Spectra спектрами частиц ГКЛ при выбранных минимуме и максимуме солнечной активности, которым соответствуют числа Вольфа  $W = 0$  и  $W = 190$  соответственно. В каждом из детекторов «DET0–DET4», показанных на рисунке 26, а также во всём внутреннем объёме «module», рассчитывались спектры дифференциальной по энергии плотности потока всех интересующих частиц: нуклонов,  $\gamma$ ,  $e^\pm$ ,  $\mu^\pm$ ,  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ , d, t и ядер с Z от 2 до 28. Нижний порог для энергий нейтронов,  $\gamma$  и  $e^\pm$  установлен в 1 МэВ, а для всех остальных частиц — 10 МэВ/н. Выбор частиц и их энергий был обусловлен происходящими в оболочке модуля реакциями, обсуждаемыми во второй главе диссертации.



Рис. 3 — Общая блок-схема методики расчёта радиационного поля для модели космического аппарата с целью прогнозирования радиационного риска для космонавтов

Полученные результаты показывают, что суммарная величина флюенса флуктуирует в зависимости от положения внутри модуля, отклоняясь от среднего значения по модулю при минимуме СА в пределах от -15 % до +8.6 % и от -22.7 % до +11.4 % при максимуме СА. Причём, вне зависимости от СА, наименьшее значение суммарной плотности потока находится в центральной части, т. е. вдали от стенок (детекторы «DET0» и «DET2»), а наибольшее в углах («DET4»). Это обусловлено расположением детекторов: у стенок наблюдается бóльшая плотность потока нейтронов,  $e^\pm$  и гамма-квантов, чем в отдалении от них. При этом, плотность потока более тяжёлых ядер (от лития до никеля) напротив, имеет увеличенное значение вдали от стенок, тем не менее, по абсолютной величине их мало, поэтому наибольшую разницу создают именно нейтроны,  $e^\pm$  и гамма-кванты, а все остальные частицы дают различие менее 2 процентов.

На рисунке 4 показано отношение флюенсов частиц ГКЛ к соответствующим флюенсам внутренних частиц с Z от 1 до 28. Флюенс тяжёлых ядер во внутреннем радиационном поле снижается по мере роста Z, особенно в минимуме СА (для ядер Fe и Ni в 6 раз), а количество протонов и лёгких ядер (лития и бериллия) увеличивается. Снижение количества тяжёлых ядер внутри модуля

преимущественно обусловлено фрагментацией тяжёлых ядер ГКЛ, что приводит также к увеличению количества лёгких частиц, а кроме того, возникновению нейтронов, пионов, мюонов и других вторичных частиц.

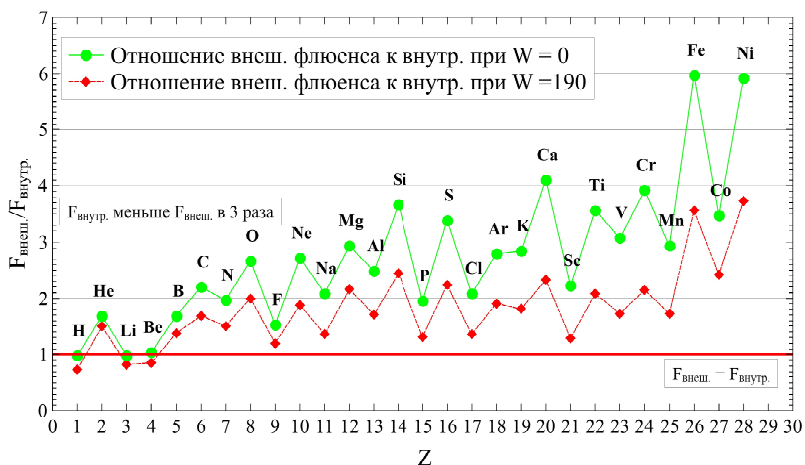


Рис. 4 — Отношение флюенсов частиц ГКЛ (внешний флюенс) и частиц внутри модуля (внутренний флюенс) при минимуме ( $W = 0$ ) и максимуме ( $W = 190$ ) СА

Результаты проведённого моделирования позволили установить вклад частиц каждого типа в смешанное внутреннее радиационное поле: можно заключить, что протоны, вторичные нейтроны, а также фотоны и  $e^{\pm}$  вносят наибольший вклад в суммарный флюенс поля излучения. Вклад нейтронов во внутреннем поле составляет 30 % по суммарному флюенсу и слабо меняется от СА. В реальности вклад от нейтронов и фотонов стоит ожидать большим, т. к. при моделировании учитывались только энергии свыше 1 МэВ (фотоны от реакций захвата тепловых нейтронов также не учитывались). Присутствие мюонов во внутреннем поле обусловлено главным образом распадом пионов.

Суммарные спектры плотности потока по ЛПЭ в воде для всех заряженных частиц внутреннего радиационного поля космического аппарата показаны на рисунке 5 при минимуме и максимуме СА. Для максимума СА показаны также наиболее значимые парциальные вклады от протонов,  $e^{\pm}$ ,  ${}^4\text{He}$ , Li, Be, B, C, O и Fe, для суммарного спектра при минимуме СА наблюдается аналогичная ситуация.

Спектры ЛПЭ являются широкими и можно различить несколько пиков, соответствующих конкретным типам частиц: в области низкой ЛПЭ (0.15–0.3 кэВ/мкм): чётко различимы пики от вклада протонов и  $e^{\pm}$ , при этом, спектр протонов является крайне широким и достигает значений ЛПЭ

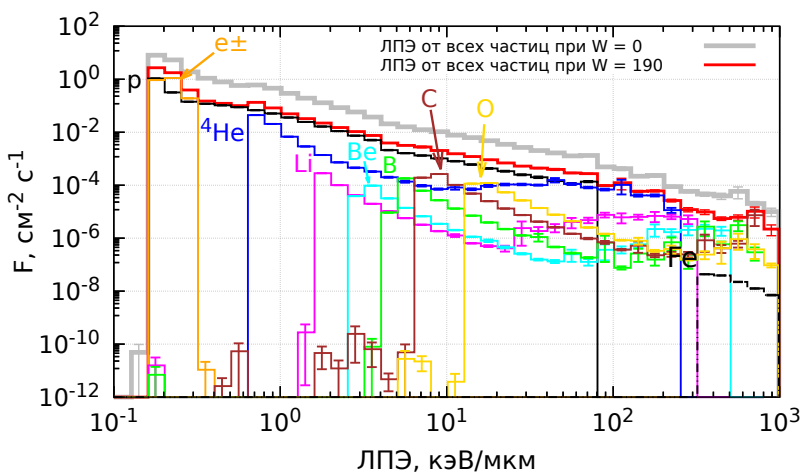


Рис. 5 — Суммарные спектры ЛПЭ в воде плотности потока всех заряженных частиц внутреннего радиационного поля космического аппарата при минимуме ( $W = 0$ ) и максимуме ( $W = 190$ ) СА, с парциальными вкладами  $p$ ,  $e\pm$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  $\text{Li}$ ,  $\text{Be}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{Fe}$  в общий спектр при максимуме СА

вплоть до 79 кэВ/мкм. Небольшой, но различимый пик от ядер  $\text{He}$  находится вблизи  $\sim 0.63\text{--}1.25$  кэВ/мкм, спектр ядер гелия также является широким и простирается уже до значений 251 кэВ/мкм. Наиболее интересным результатом моделирования является то, что спектры даже относительно лёгких ядер  $\text{Be}$ ,  $\text{B}$ , а также более тяжёлых  $\text{C}$  и  $\text{O}$  достигают крайне высоких значений ЛПЭ: вплоть до 500–1000 кэВ/мкм. Это объясняется широкими спектрами флюенса по энергии: низкие значения ЛПЭ для ядер обусловлены их высокими энергиями в энергетических спектрах плотности потока. Наиболее тяжёлые частицы с  $Z$  от 20 до 28 вносят вклад только в ЛПЭ свыше 125 кэВ/мкм. Это означает, что данные ядра должны иметь наибольшую биологическую эффективность. В целом, спектры ЛПЭ по форме мало отличаются при различной СА, основное различие состоит в величине плотности потока частиц при двух крайних значениях чисел Вольфа.

На рисунке 6 приведено сравнение рассчитанных спектров ЛПЭ с имеющимися данными измерений с детектора  $\text{RAD}^2$ , программы «Марсианской научной лаборатории» НАСА, которые были получены за время перелёта на Марс в период с 11 июня по 14 июля 2012, что примерно соответствует числам Вольфа  $W \approx 60\text{--}90$  [18]. Кроме того, рассчитанные спектры хорошо согласуются с распределением ЛПЭ, измеренным дозиметрическим модулем «Люлин-МО» во время полёта на Марс миссии  $\text{ExoMars}$  [19], что также показано на рисунке 6. Существующие отличия могут быть обусловлены различием в толщине защиты на аппаратах, которая варьируется в пределах:  $\sim 20\text{--}27.5$  г/см<sup>2</sup>

<sup>2</sup>англ. «Radiation assessment detector» — «Детектор оценки радиации»

для RAD и  $1-70 \text{ г/см}^2$  (в среднем  $\sim 10 \text{ г/см}^2$ ) для «Люлин-МО» и толщиной оболочки, принятой в расчёте  $15 \text{ г/см}^2$ , а также периодом СА и соответствующим общим флюенсом частиц ГКЛ в измерениях и в расчёте. Кроме того, данные RAD и «Люлин-МО» для ЛПЭ в воде получаются путём конвертации поглощённой энергии в энергию, потерянную на единицу длины пути  $dE/dx$  в кремнии. А для перевода  $dE/dx$  в кремнии в ЛПЭ в воде используется постоянный коэффициент  $1.38 \pm 0.08$  [19, с. 62].

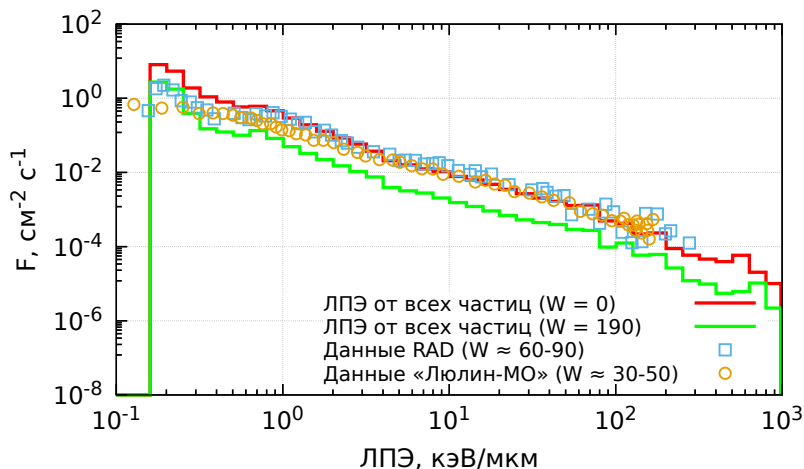


Рис. 6 — Сравнение расчётных суммарных спектров ЛПЭ в воде плотности потока всех заряженных частиц внутреннего радиационного поля космического аппарата при минимуме ( $W = 0$ ) и максимуме ( $W = 190$ ) СА с измерениями RAD [18] и «Люлин-МО» [19]

Полученные результаты опубликованы автором в соавторстве с научным руководителем в статьях [A2; A3]. В диссертационной работе приводятся более точные данные последующих перерасчётов, которые, тем не менее, согласуются с ранее опубликованными данными.

Результаты по эффективным дозам зависят от положения внутри модуля космического аппарата. Связано это с конкуренцией вкладов в суммарную дозу от ядер  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ , C, O, Mg, Si, Fe с одной стороны, а с другой, вклада от  $n$ ,  $\pi^\pm$ ,  $e^\pm$ ,  $\gamma$ . В детекторах «ДЕТ0» и «ДЕТ2», которые находятся в центре, т. е. дальше всего от стенок (расположение детекторов указано на рисунке 26). Так, при минимуме СА снижение вклада от лёгких частиц компенсируется увеличением вклада от более тяжёлых ядер и даже приводит к незначительному увеличению суммарной дозы (на уровне 2–2.5 %), а при максимуме СА, вклад от тяжёлых частиц не может полностью компенсировать потерю в дозе от лёгких частиц, что приводит к незначительному снижению суммарной дозы (на уровне 1.5–1.8 %).



Для детекторов «ДЕТ3» и «ДЕТ4», расположенных у длинной стенки модуля и в углу, соответственно, ситуация обратная: вклад от  $n$ ,  $\pi^\pm$ ,  $e^\pm$ ,  $\gamma$  приводит к незначительному снижению суммарной дозы при минимуме СА, одновременно с этим происходит снижение вклада от тяжёлых ядер. При максимуме СА снижение от вклада со стороны тяжёлых ядер компенсируется увеличением вклада от  $n$ ,  $\pi^\pm$ ,  $e^\pm$ ,  $\gamma$  и даже приводит к незначительному увеличению суммарной дозы.

Таким образом, суммарная доза по всем частицам при различных положениях внутри модуля меняется незначительно, в пределах от  $-1.8$  до  $2.5$  %, как результат рассмотренного выше баланса вкладов в дозу от  $n$ ,  $\pi^\pm$ ,  $e^\pm$ ,  $\gamma$  и более тяжёлых ядер. Отсюда можно сделать вывод о том, что усреднение результатов расчёта по всему объёму модуля оказывается оправданным, а конкретное положение внутри объёма слабо сказывается на суммарной дозе, хотя и приводит к перераспределению парциальных вкладов от частиц различного типа.

Произведена оценка риска для космонавтов за время миссии Земля–Марс–Земля при наихудшем (минимуме СА) и наилучшем (максимуме СА) сценарии при совершении долгосрочной миссии с общим перелётом длительностью в 360 дней и пребыванием на Марсе 500 дней. Полученные расчётным путём результаты позволяют утверждать, что даже в наихудшем сценарии, суммарная доза, полученная космонавтами в ходе марсианской миссии не превысит 1 Зв и составит  $0.71-0.76$  Зв.

Сравнение полученных в расчёте результатов с измерениями RAD [20, с. 7] приведено в таблице 1. Задача расчёта дозы для пребывания на Марсе в рамках диссертационной работы не ставилась, поэтому дозы для пребывания в обоих случаях взяты из результатов измерений [20, с. 7] (выделено звездой в таблице). Необходимо заметить, что значения измерений RAD приводятся для минимума СА в период с 28 ноября 2019 по 3 октября 2020 года, а для максимума СА в период с 7 августа 2012 по 1 июня 2013 года. Средние значения чисел Вольфа за эти периоды составляют  $W \sim 6$  и  $W \sim 86$  для минимума и максимума СА соответственно. Для максимума СА в расчёте число Вольфа было выбрано равным  $W = 190$ , поэтому расчётные значения дозы будут априори занижены по сравнению с результатом измерения RAD при максимуме СА. Для минимума СА было выбрано значение  $W = 0$ , что уже сопоставимо с измерением RAD при  $W \sim 6$ . Тем не менее, видно, что расчётное значение дозы здесь почти в два раза ниже.

Оценки на основе полученных значений доз показывают, что радиационный риск для долгосрочной миссии не превысит 2.7 %, а в наиболее благоприятном, при максимуме СА — 1.5 %. Это означает, что при отсутствии в период миссии мощных протонных событий на Солнце суммарный риск космонавтов за всю миссию не превысит регламентированного НАСА 3-х процентного значения (3 % REID — «Risk of Exposure Induced Death»). Приведённые результаты по прогнозированию дозовой нагрузки на космонавтов за время перелёта Земля–Марс–Земля были опубликованы диссертантом в соавторстве с научным руководителем в статье [A4].

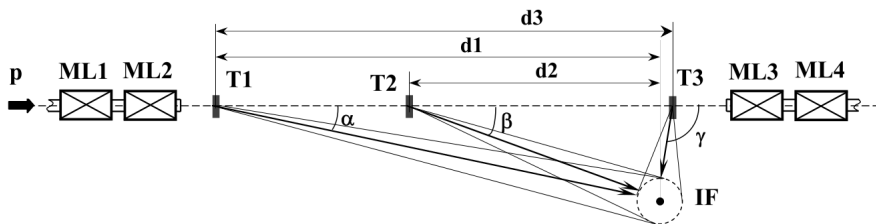
Таблица 1 — Сравнение полученных в результате компьютерного моделирования доз с измерениями детектора RAD при различных солнечных активностях [20]

	Мин. СА ( $W \sim 6$ ) RAD	Мин. СА ( $W = 0$ ) расчёт	Макс. СА ( $W \sim 86$ ) RAD	Макс. СА ( $W = 190$ ) расчёт
Транзит ( $2 \times 180$ дней)	0.64–0.80 Зв	0.35–0.4 Зв	0.57 Зв	0.09–0.1 Зв
Пребывание (500 дней)	0.36 Зв	0.36* Зв	0.32 Зв	0.32* Зв
Суммарная доза	1–1.2 Зв	0.71–0.76 Зв	0.9 Зв	0.41–0.42 Зв

В **четвертой главе** обсуждаются основные существующие на момент написания диссертации методы моделирования сложного многокомпонентного космического излучения в земных условиях на ускорителях заряженных частиц [8; 10; 12; 21; 22]. Общий принцип заключается в использовании пучков ускорителей, при помощи которых возможно формировать поле излучения, которое является приближенным либо к полю излучения частиц ГКЛ в космосе, либо к внутреннему радиационному полю космического аппарата (с учётом корпуса). При этом, на пучке может быть задействована специальная установка, так называемый «симулятор ГКЛ». В главе изложено два авторских метода моделирования внутреннего радиационного поля космического аппарата: для воспроизведения только нуклонной компоненты и новый уникальный метод, позволяющий воспроизводить также вклад от ТЗЧ, предложена концепция симулятора ГКЛ на основе данного метода, обсуждаются перспективы реализации подхода в рамках комплекса NICA ОИЯИ.

Простейшая схема симулятора ГКЛ, предложенная диссертантом в соавторстве с коллегами [A5], способна воспроизводить спектры наиболее распространённых компонентов (нуклонов) внутреннего радиационного поля космического аппарата. В данном подходе предлагается использовать пучок протонов энергии 12 ГэВ нуклотрона ОИЯИ с тремя специально подобранными мишенями. Параметры мишеней подбираются путём компьютерного моделирования, таким образом, чтобы в некоторой области в стороне от пучка формировалось необходимое смешанное радиационное поле. Данное поле является суперпозицией вторичного излучения от облучаемых последовательно мишеней, расположенных на оси пучка (см. рисунок 7).

Актуальность моделирования именно нуклонной компоненты обусловлена тем, что результаты расчётов для внутреннего поля модели космического аппарата показывают: наибольший вклад в общую дозу внутреннего радиационного поля космического аппарата вносят протоны и нейтроны, а также ядра гелия и заряженные  $\pi$ -мезоны. В предлагаемом подходе энергетические спектры частиц создаваемого поля облучения (обозначается как «IF» на рисунке 7) являются линейной комбинацией спектров от трёх мишеней, из которых частицы вылетают под определёнными фиксированными углами в направлении области облучения.



ML — квадрупольные линзы, Т — мишени, IF — сечение области воспроизводимого радиационного поля, которое имеет форму тороида в силу аксиальной симметрии

Рис. 7 — Схематичное изображение простейшего симулятора ГКЛ для воспроизведения нуклонного поля излучения

Таблица 2 — Параметры мишеней для создаваемого поля облучения в области IF

Мишень	Материал	Толщина, см	Расстояние, см	Угол вылета, градусы
T1	$(C_2H_4)_n$	8	$d1 = 300$	$6 \pm 1$
T2	Be	4	$d2 = 54.6$	$30 \pm 4$
T3	Be	4	$d3 = 311.5$	$110 \pm 8.6$

При этом, в виду аксиальной симметрии, область облучения IF является тором. Характеристики создаваемого радиационного поля зависят от количества мишеней, их положения на пучке, материала, толщин, углов вылета вторичных частиц из мишеней и времени облучения каждой мишени.

На основании компьютерного моделирования методом Монте-Карло диссертантом была подобрана подходящая комбинация мишеней и их размещения на пучке, для воспроизведения расчётного внутреннего радиационного поля для модели космического аппарата. Параметры мишеней для воспроизведения внутреннего поля излучения в области IF приведены в таблице 2.

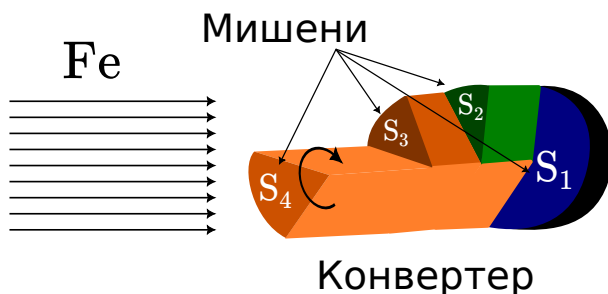
Таким образом, необходимая область облучения IF создаётся линейной комбинацией трёх полей от мишеней в результате их последовательного облучения пучком протонов:

$$\Phi_j(E) = I \sum_i^3 t_{i,j} f_{i,j}(E), \quad (5)$$

где  $f_{i,j}(E)$  — дифференциальный энергетический спектр флюенса частицы  $j$  в области облучения от  $i$ -ой мишени. Такая линейная комбинация означает, что в области облучения воспроизводятся необходимые характеристики смешанного поля излучения и суммарная доза от протонов, нейтронов и пионов при облучении мишеней протонами интенсивности  $I$ . Коэффициенты  $t_{i,j}$  отвечают за время экспозиции. Например, если соотношение коэффициентов  $t_{1,j} : t_{2,j} : t_{3,j}$

составляет 2 : 1 : 5, то при интенсивности пучка  $10^{11}$  протонов в секунду, доза, сопоставимая с эффективной дозой для космонавтов в 1 Зв будет набираться примерно за 10 минут, при этом необходима быстрая автоматическая смена мишеней. Результаты расчётов позволяют утверждать, что предлагаемая схема облучения позволяет воссоздать спектры протонов и нейтронов внутреннего радиационного поля космического аппарата.

Описанный выше подход является достаточно тривиальным и при простоте в реализации имеет главный недостаток: нет возможности учесть вклад в дозу от тяжёлых ядер. Поэтому, соискателем в соавторстве с научным руководителем был предложен новый тип симулятора ГКЛ [A6]. В предлагаемом новом подходе, как и в варианте симулятора ГКЛ, предложенном Джеффом Ченселлором и коллегами [10], планируется использовать однородный пучок ядер железа энергии 1 ГэВ/н. С тем отличием, что пучок облучает специальные цилиндрические конвертеры. Данные конвертеры представляют собой набор секторальных сегментов (мишеней) различной длины, как это показано на рисунке 8. Конвертеры могут быть полностью произведены из одного материала, либо быть гетерогенными, с включением материалов различного типа. Наиболее актуальные материалы — полиэтилен и железо.



$S_i$  — занимаемая  $i$ -ой мишенью площадь сектора

Рис. 8 — Схема конструкции конвертера из 4-х мишеней для производства в месте облучения за симулятором ГКЛ смешанного радиационного поля. На симулятор падает широкий однородный пучок ядер  $^{56}\text{Fe}$  с энергией 1 ГэВ/н

В процессе облучения конвертер должен вращаться вокруг оси пучка. Это является фундаментальным отличием от симуляторов, предложенных другими авторами и позволяет добиться однородности поля излучения в области облучения. При падающем однородном поле ядер железа на круговой сектор (мишень) фиксированной толщины, генерируется поле требуемых фрагментов в области за этой мишенью. Когда круговой сектор мишени вращается, поле фрагментов заполняет всю площадь круга конвертера. Это верно для каждого сектора, включенного в конвертер. При постоянном однородном пучке  $^{56}\text{Fe}$ , который падает

на торец вращающегося конвертера, отношение флюенсов вторичных частиц от секторальных мишеней в поле за конвертером пропорционально отношению площадей этих секторов. Таким образом, отношение площади мишени с определённой толщиной к площади всей поверхности торца конвертера является математическим весом для данной мишени в их линейной комбинации [A6], а предлагаемая соискателем модель симулятора ГКЛ описывается системой линейных алгебраических уравнений вида:

$$f_w \mathbf{P} = \mathbf{J}, \quad (6)$$

где

$$f_w = \begin{pmatrix} \frac{f_{1,D_1}}{F_{1,ref}} & \frac{f_{1,D_2}}{F_{1,ref}} & \cdots & \frac{f_{1,D_N}}{F_{1,ref}} \\ \frac{f_{2,D_1}}{F_{2,ref}} & \frac{f_{2,D_2}}{F_{2,ref}} & \cdots & \frac{f_{2,D_N}}{F_{2,ref}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{f_{26,D_1}}{F_{26,ref}} & \frac{f_{26,D_2}}{F_{26,ref}} & \cdots & \frac{f_{26,D_N}}{F_{26,ref}} \end{pmatrix}, \mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_{D_1} \\ P_{D_2} \\ \vdots \\ P_{D_N} \end{pmatrix}, \mathbf{J} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Матрица  $f_w$  описывает взвешенные с референсными значениями флюенсы частиц, образующихся за мишенями различного типа. Под референсными значениями понимаются значения, которые необходимо получить в области облучения, в данном случае это флюенсы частиц внутреннего поля модели космического аппарата [A2]. Вектор  $\mathbf{P}$  является искомым параметром, он отвечает за площади секторов и время облучения конвертера. При этом накладывается ограничение, потому как значения должны быть неотрицательными. Результаты для вектора столбца  $\mathbf{P}$  нормированы следующим образом:

$$I = \sum_{i=1}^N P_{D_i}, \mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_{D_1} \\ P_{D_2} \\ \vdots \\ P_{D_N} \end{pmatrix} I^{-1}.$$

Число  $I$  обладает физическим смыслом и является интенсивностью ( $\text{с}^{-1}$ ) гипотетического пучка ускорителя, при которой обеспечивается необходимое радиационное поле для выбранных значений  $F_{Z,ref}$ , т. к. все значения  $f_{Z,D_i}$  нормированы на одно начальное ядро железа, а  $F_{Z,ref}$  — это создающаяся внутри аппарата в космосе плотность потока частиц.

Задача нахождения наиболее оптимальных параметров решается путём математической оптимизации (метод неотрицательных наименьших квадратов):

$$\arg \min_p \|f_w \mathbf{P} - \mathbf{J}\|_2, \quad p \geq 0 \quad (7)$$

Симулятор ГКЛ может быть построен по типу револьверного барабана, состоящего из некоторого числа конвертеров (см. рисунок 9). Это связано с тем,

что одним конвертером воспроизвести спектры всех частиц внутреннего радиационного поля космического аппарата может быть затруднительно технически, т. к. необходим набор из большого количества мишеней-секторов, веса многих из них (особенно тех, которые отвечают за образование самых тяжёлых фрагментов) будут очень малы по сравнению с весами мишеней, которые генерируют в основном протоны и альфа-частицы. Конвертеры могут иметь различное время экспозиции при постоянной интенсивности пучка.

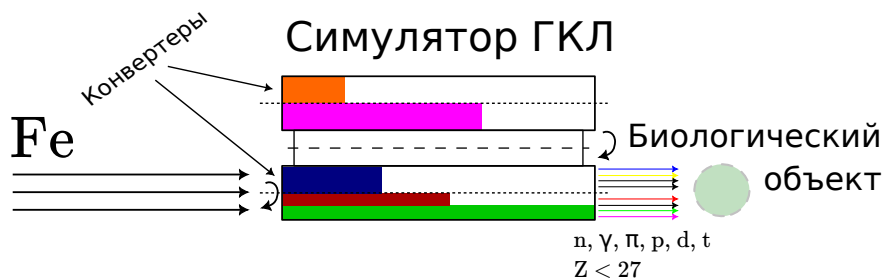


Рис. 9 — Общая схема симулятора ГКЛ с несколькими конвертерами в составе

Облучение конвертеров происходит последовательно, но их смена может происходить быстро (порядка нескольких секунд), между импульсами ускорителя, что позволяет говорить о практически одновременном воздействии смешанным полем частиц: нейтронами, протонами,  $\pi$ -мезонами,  $\gamma$ -квантами, лёгкими и тяжёлыми ядрами. Каждый конвертер воссоздаёт при этом энергетические спектры группы частиц и подбирается так, чтобы при его вращении и облучении воссоздавались наиболее близкие к референсным характеристики смешанного поля излучения.

Таким образом, предлагаемая схема симулятора ГКЛ обладает рядом преимуществ в сравнении с аналогами. Во-первых, предлагаемый метод позволяет воспроизводить все ядра ГКЛ с  $Z$  в диапазоне от 1 до 27 с необходимой распространённостью. Во-вторых, симулятор воспроизводит непрерывные и широкие энергетические спектры частиц ГКЛ (максимальная энергия будет определяться энергией пучка ускорителя), что также определяет правильное суммарное распределение флюенса по ЛПЭ, а также парциальные вклады в суммарную эффективную дозу. В-третьих, вращением конвертеров обеспечивается однородность полей вторичных частиц за симулятором. В-чвёртых, хотя конвертеры облучаются последовательно, каждый конвертер воспроизводит смешанное поле излучения, поэтому облучение происходит одновременно множеством частиц различного типа. Наконец, предлагаемая схема установки относительно проста в реализации в сравнении с другими симуляторами и может использоваться на ускорителях, способных выдавать однородный пучок железа с энергией 1 ГэВ/н

и не подразумевает дополнительной перестройки и наладки всей ускорительной системы, что значительно сокращает трудозатраты.

Для получения пучка ядер  $^{56}\text{Fe}$ , возможно задействовать базовую установку ОИЯИ — сверхпроводящий синхротрон «нуклотрон». Модернизированный нуклотрон будет работать в составе комплекса NICA<sup>3</sup>. Тяжелоионный синхротрон способен ускорять ионы вплоть до  $^{197}\text{Au}$  с энергией 4.5 ГэВ/н. В рамках проекта NICA планируется создание специальной инфраструктуры для прикладных исследований. В измерительном павильоне корпуса №1 ЛФВЭ создаются каналы транспортировки и прикладные станции: исследований медико-биологических объектов (СИМБО) для радиобиологических исследований (диапазон энергии 500–1000 МэВ/н) и Испытательная Станция Компонентов Радиоэлектронной Аппаратуры (ИСКРА) [23; 24]. Равномерное поле ядер  $^{56}\text{Fe}$  с необходимым диаметром (порядка 10 см) может формироваться с применением сканирующих магнитов станции СИМБО. Симулятор ГКЛ может быть установлен на пучке за магнитами, за симулятором будут располагаться облучаемые биологические объекты.

Симулятор ГКЛ может формироваться из 13 мишеней с различными толщинами, которые группируются в 4 конвертера. Это оптимальное количество конвертеров, необходимое для формирования внутреннего радиационного поля, усреднённого по солнечной активности. Подбор коэффициентов на начальном этапе разработки был осуществлён эмпирически, а затем при помощи специально разработанного диссертантом программного обеспечения (ПО), в котором реализуется компьютерная модель установки и алгоритм оптимизации.

Изложенный выше принцип работы симулятора и предложения по его реализации в рамках комплекса NICA опубликованы диссертантом в соавторстве с научным руководителем в работах [A6; A7], на «Устройство моделирования на пучках тяжелых ионов высокой энергии полей смешанного излучения для целей экспериментальной радиобиологии» был получен патент [A8].

Математическая модель симулятора ГКЛ реализована в специально разработанном диссертантом программном комплексе, который включает весь необходимый функционал для обработки полученных из Монте-Карло программ данных, приведения их в нужный формат, составления и решения на их основе СЛАУ, оптимизации параметров и определения качества модели, а также имеет встроенные средства для визуализации, построения графиков и автоматической генерации отчёта по полученным результатам. Исходный код написан на языке программирования высокого уровня Python версии 3.8 в объектно-ориентированной парадигме. По сути, ПО является Python пакетом (имеющим название `gcrs`), который содержит набор специальных модулей с функциями, отвечающими за различные аспекты моделирования, а также классами, описывающими характеристики модели симулятора. Описание математической модели и разработанного кода приведено диссертантом в публикации [A9].

---

<sup>3</sup>аббрев. «Nuclotron-based Ion Collider FAcility»

Структура кода пакета `gcrs` показана на рисунке 10. Пакет содержит 6 модулей, каждый из которых отвечает за определённую часть функционала. Пакет имеет в своём составе файл настроек в JSON формате и табличные исходные данные в формате TSV.

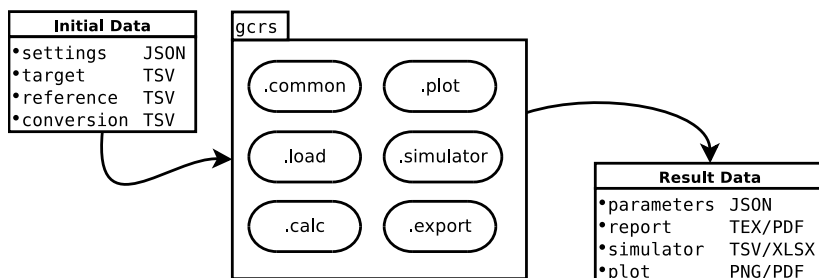


Рис. 10 — Схема структуры исходного кода программного обеспечения для компьютерного моделирования симулятора ГКЛ

На разработанный диссертантом исходный код были получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ [A10; A11]. В дальнейшем планируется развивать пакет `gcrs`, с тем чтобы иметь универсальный инструмент, способный подбирать и оптимизировать параметры модели симулятора для других ядер кроме железа и с тем чтобы иметь возможность поддерживать данные других программ переноса излучения в качестве исходных.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы, а также перспективы использования данных результатов.

Проанализированы существующие полуэмпирические модели частиц ГКЛ. Разработана программа `GCRs Spectra` для расчёта спектров частиц ГКЛ с  $Z$  от 1 до 28 при различных  $CA$ , алгоритм работы программы основан на модели Немецкого аэрокосмического центра, демонстрирующей наилучшее согласие с экспериментальными данными измерений при рассматриваемой в работе солнечной активности.

С применением численных методов Монте-Карло, при помощи программы транспорта излучений в веществе `FLUKA`, выполнено моделирование с целью установления дифференциальных энергетических спектров плотности потока частиц внутреннего смешанного радиационного поля излучения для модели обитаемого модуля космического аппарата при взаимодействии частиц ГКЛ в условиях минимума и максимума солнечной активности.

Компьютерное моделирование позволило определить парциальные значения мощности эффективной дозы от всех рассчитанных компонентов внутреннего поля излучения, на основании проведённых расчётов произведены оценки суммарной дозы космонавтов за время полёта Земля-Марс-Земля в минимуме и максимуме солнечной активности. Произведена верификация произведённых



оценок доз с имеющимися данными измерений детектора RAD. Для распределений по ЛПЭ выполнена верификация полученных результатов на доступных данных измерений RAD и «Люлин-МО».

На основе анализа результатов моделирования показано, что корпус космического аппарата толщиной  $15 \text{ г/см}^2$  не является достаточной защитой от ГКЛ и приводит к заметному увеличению внутри модуля общего количества лёгких частиц, в особенности: протонов, ядер лития и бериллия, а также к возникновению новых частиц:  $n$ ,  $\gamma$ ,  $e^\pm$ ,  $\mu^\pm$ ,  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ .

Исследование компьютерной модели показало, что при общем снижении доз от тяжёлых ядер, наблюдается также значительный вклад в дозу от вторичных частиц, в частности, нейтронов и пи-мезонов, которых изначально не было в составе ГКЛ. Вклад в суммарную эффективную дозу от нейтронов составляет 12%–13%, а от пи-мезонов 5%–10%.

Предложен новый метод создания сложного многокомпонентного радиационного поля, схожего по своим характеристикам с возникающим смешанным полем излучения внутри космического аппарата за время межпланетного полёта. Разработана математическая модель симулятора ГКЛ, установки, при помощи которой на ускорителях заряженных частиц возможно воспроизводить необходимое смешанное поле излучения. Состоятельность предлагаемых подходов обоснована полученными результатами при помощи программ транспорта излучений в веществе, реализующих численные методы Монте-Карло.

Предложен и обоснован путём компьютерного моделирования вариант симулятора смешанного поля космического излучения с применением пучка ядер  $^{56}\text{Fe}$  нуклотрона ОИЯИ с энергией 1 ГэВ/н. Показано, что симулятор возможно реализовать в рамках комплекса NICA на одной из станций для прикладных исследований, например, на прикладной станции исследований медико-биологических объектов (СИМБО).

Следует отметить, что предлагаемые подходы к моделированию космического излучения на ускорителях заряженных частиц в настоящее время подтверждены на основе проведённого компьютерного моделирования ядерных взаимодействий в веществе методом Монте-Карло. В будущем необходимо подтвердить экспериментально предлагаемый в рамках диссертационной работы новый метод создания сложного многокомпонентного поля излучения и создать прототип симулятора ГКЛ. Соответствие смешанного поля излучения за симулятором референсному полю излучения может быть экспериментально подтверждено путём измерения выходов вторичных частиц из толстых мишеней и измерением спектров частиц в области планируемого облучения, что является независимой комплексной экспериментальной задачей.

## Публикации автора по теме диссертации

- A1. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Программа расчёта спектров первичных частиц галактического космического излучения при различной солнечной активности GCRs Spectra [Текст] / И. С. Гордеев ; Объединенный институт ядерных исследований (ОИ-ЯИ). — № 2024661642 ; заявл. 03.05.2024 ; опубл. 21.05.2024, 2024660135 (Рос. Федерация).*
- A2. *Timoshenko, G. N. Simulation of radiation field inside interplanetary spacecraft [Text] / G. N. Timoshenko, I. S. Gordeev // Journal of Astrophysics and Astronomy. — 2020. — Vol. 41, no. 1. — P. 5. — URL: <https://doi.org/10.1007/s12036-020-9620-3>. — (Scopus).*
- A3. *Timoshenko, G. N. Computation of linear energy transfer of space radiation in biological tissue analog [Text] / G. N. Timoshenko, I. S. Gordeev // Planetary and Space Science. — 2021. — Vol. 199. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032063321000295>. — (Scopus, WoS).*
- A4. *Timoshenko, G. N. Estimation of the Astronaut's Doses inside the Spacecraft Habitable Module in Deep Space [Text] / G. N. Timoshenko, I. S. Gordeev // Physics of Particles and Nuclei. — 2020. — Vol. 51, no. 5. — P. 988–993. — URL: <https://doi.org/10.1134/S106377962005007X>. — (Scopus).*
- A5. *Particle accelerator-based simulation of the radiation environment on board spacecraft for manned interplanetary missions [Text] / G. N. Timoshenko [et al.] // Radiation Measurements. — 2017. — Vol. 107. — P. 27–32. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448717305061>. — (Scopus, WoS).*
- A6. *Gordeev, I. S. A new type of ground-based simulator of radiation field inside a spacecraft in deep space [Text] / I. S. Gordeev, G. N. Timoshenko // Life Sciences in Space Research. — 2021. — Vol. 30. — P. 66–71. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214552421000389>. — (Scopus, WoS).*
- A7. *Timoshenko, G. N. Reference Radiation Field for GCR Chronic Exposure Simulation [Text] / G. N. Timoshenko, I. S. Gordeev // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2021. — Vol. 18, no. 7. — P. 799–805. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477121070128>. — (Scopus).*
- A8. *Устройство моделирования на пучках тяжелых ионов высокой энергии полей смешанного излучения для целей экспериментальной радиобиологии [Текст] : пат. 2021105845 RU : МПК G21K 5/00 / Г. Н. Тимошенко, И. С. Гордеев (RU) ; заявитель Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ). — № 2761376 ; заявл. 05.03.2021 ; опубл. 07.12.2021, Бюл. № 34 ; приоритет 26.04.2021 (RU). — 17 с. : ил. — URL: <https://www1.fips>.*

[ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/761/376/%D0%98%D0%97-02761376-00001/document.pdf](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465524002698) (дата обр. 06.03.2024).

- A9. *Gordeev, I. S.* Computer modeling of a new type galactic cosmic rays simulator [Text] / I. S. Gordeev, A. N. Bugay // Computer Physics Communications. — 2024. — Vol. 305. — P. 109346. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465524002698>.
- A10. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Программа определения и настройки конфигурации компьютерной модели установки для облучения смешанным полем излучения на ускорителях заряженных частиц [Текст] / И. С. Гордеев ; Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ). — № 2023686688 ; заявл. 10.10.2023 ; опубл. 08.12.2023, 2023680713 (Рос. Федерация).
- A11. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Программа визуализации данных компьютерной модели облучательной установки, имитирующей поле смешанного излучения на ускорителях заряженных частиц [Текст] / И. С. Гордеев ; Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ). — № 2024618617 ; заявл. 09.04.2024 ; опубл. 15.04.2024, 2024617460 (Рос. Федерация).

## Список литературы

1. Radiation in Space: Relevance and Risk for Human Missions [Text] / C. Hellweg [et al.]. — Springer, Cham, 07/2020. — 111 p.
2. *Chancellor, J. C.* Space Radiation: The Number One Risk to Astronaut Health beyond Low Earth Orbit [Text] / J. C. Chancellor, G. B. I. Scott, J. P. Sutton // Life. — 2014. — Vol. 4, no. 3.
3. *Simpson, J. A.* Elemental and Isotopic Composition of the Galactic Cosmic Rays [Text] / J. A. Simpson // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. — 1983. — Dec. — Vol. 33, no. 1. — P. 323—382. — URL: <https://doi.org/10.1146/annurev.ns.33.120183.001543>.
4. *Cucinotta, F. A.* Cancer risk from exposure to galactic cosmic rays: implications for space exploration by human beings. [Text] / F. A. Cucinotta, M. Durante // The Lancet. Oncology. — England, 2006. — May. — Vol. 7, issue 5. — P. 431—435.
5. *Grigor'ev, A. I.* The problem of the radiation barrier during piloted interplanetary flights [Text] / A. I. Grigor'ev, E. A. Krasavin, M. A. Ostrovsky // Herald of the Russian Academy of Sciences. — 2017. — Vol. 87, no. 1. — P. 63—66. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1019331617010014>.

6. Complex aberrations in lymphocytes exposed to mixed beams of  $^{241}\text{Am}$  alpha particles and X-rays [Text] / E. Staaf [et al.] // Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis. — 2013. — Vol. 756, no. 1. — P. 95—100. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383571813001216>.
7. Synergy Theory in Radiobiology. [Text] / D. W. Ham [et al.] // Radiation research. — United States, 2018. — Mar. — Vol. 189, issue 3. — P. 225—237.
8. NASA's first ground-based Galactic Cosmic Ray Simulator: Enabling a new era in space radiobiology research [Text] / L. C. Simonsen [et al.] // PLOS Biology. — 2020. — May. — Vol. 18, no. 5. — e3000669. — URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000669>.
9. Galactic cosmic ray simulation at the NASA space radiation laboratory - Progress, challenges and recommendations on mixed-field effects [Text] / J. L. Huff [et al.] // Life Sciences in Space Research. — 2022. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214552422000670>.
10. Targeted Nuclear Spallation from Moderator Block Design for a Ground-Based Space Radiation Analog [Text] / J. C. Chancellor [et al.]. — 2017. — URL: <https://arxiv.org/abs/1706.02727>.
11. *Bortfeld, T.* An analytical approximation of depth-dose distributions for therapeutic proton beams. [Text] / T. Bortfeld, W. Schlegel // Physics in medicine and biology. — England, 1996. — Aug. — Vol. 41, issue 8. — P. 1331—9.
12. *Schuy, C.* Hybrid Active-Passive Space Radiation Simulation Concept for GSI and the Future FAIR Facility [Text] / C. Schuy, U. Weber, M. Durante // Frontiers in Physics. — 2020. — Vol. 8. — URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2020.00337>.
13. A ready-to-use galactic cosmic ray model [Text] / D. Matthäi [et al.] // Advances in Space Research. — 2013. — Vol. 51, no. 3. — P. 329—338. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117712005947>.
14. ISO 15390:2004. Space environment (natural and artificial) — Galactic cosmic ray model [Text]. — 2004. — 6 p.
15. *Timoshenko, G. N.* Fluence-to-effective dose conversion coefficients for male astronauts. [Text] / G. N. Timoshenko, M. I. Belvedersky // Journal of radiological protection : official journal of the Society for Radiological Protection. — England, 2019. — Apr. — Vol. 39, issue 2. — P. 511—521.
16. IT-ecosystem of the HybriLIT heterogeneous platform for high-performance computing and training of IT specialists [Text] / G. Adam [et al.] // CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), Selected Papers of the 8<sup>th</sup> International Conference «Distributed Computing and Grid-technologies in Science and Education» (GRID 2018). Vol. 2267. — Dubna, Russia, 09/2018. — P. 638—644.

17. ATIMA [Electronic Resource] / GSI. — URL: <https://web-docs.gsi.de/~weick/atima/> (visited on 04/18/2022).
18. Mars' Surface Radiation Environment Measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover [Text] / D. M. Hassler [et al.] // Science. — 2014. — Jan. — Vol. 343, no. 6169. — P. 1244797. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1244797>.
19. Charged particles radiation measurements with Liulin-MO dosimeter of FRENDA instrument aboard ExoMars Trace Gas Orbiter during the transit and in high elliptic Mars orbit [Text] / J. Semkova [et al.] // Icarus. — 2018. — Vol. 303. — P. 53–66. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103517305705>.
20. The Martian surface radiation environment at solar minimum measured with MSL/RAD [Text] / B. Ehresmann [et al.] // Icarus. — 2022. — P. 115035. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103522001488>.
21. *Kim, M.-H. Y.* Issues for Simulation of Galactic Cosmic Ray Exposures for Radiobiological Research at Ground-Based Accelerators [Text] / M.-H. Y. Kim, A. Rusek, F. A. Cucinotta // Frontiers in Oncology. — 2015. — Vol. 5. — URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fonc.2015.00122>.
22. Reference field specification and preliminary beam selection strategy for accelerator-based GCR simulation [Text] : trans. from the English by / T. C. Slaba [et al.] // Life Sciences in Space Research. — 2016. — Vol. 8. — P. 52–67. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214552416000031>.
23. Construction of Stations for Applied Research at the NICA Accelerator Complex [Text] / A. Slivin [et al.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2022. — Vol. 19, no. 5. — P. 528–531. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477122050375>.
24. Progress on New Beam Lines Design and Construction for Applied Research at NICA [Text] / G. Filatov [et al.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2022. — Vol. 19, no. 5. — P. 513–516. — URL: <https://doi.org/10.1134/S154747712205017X>.

*Гордеев Иван Сергеевич*

Моделирование смешанных радиационных полей в космических аппаратах и на  
ускорителях заряженных частиц

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_