

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ПОЛЯРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ПГИ)

На правах рукописи

Маурчев Евгений Александрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С СИСТЕМАМИ ДЕТЕКТОРОВ И
АТМОСФЕРОЙ ЗЕМЛИ**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Балабин Ю.В.

Москва - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Полярном геофизическом институте (ПГИ)

Научный руководитель:

Балабин Юрий Васильевич

кандидат физико-математических наук,

зав. сектора «Космических лучей» Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Полярный геофизический институт», г. Апатиты

Официальные

Свирижевский Николай Саввович

оппоненты:

доктор физико-математических наук,

Высококвалифицированный главный научный сотрудник
Долгопрудненской научной станции Федерального
государственного бюджетного учреждения науки "Физический
институт им. П.Н. Лебедева", г. Москва

Янке Виктор Гугович

кандидат физико-математических наук,

заведующий отделом космических лучей Федерального
государственного бюджетного учреждения науки «Институт
земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.
Н. В. Пушкина» Российской академии наук, г. Москва

Ведущая

организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной
физики Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Иркутск

Защита состоится «14» марта 2022 г. в 12 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д.002.023.04 по защите докторских и кандидатских диссертаций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д.53., ФИАН, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук и на сайте института: www.lebedev.ru, с авторефератом – на сайте ФИАН www.lebedev.ru.

Автореферат разослан _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.023.04, д.ф.-м.н.

Баранов Сергей Павлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Космические лучи (КЛ) оказывают непрерывное воздействие на вещество атмосферы Земли, а также различные объекты через процесс образования каскадов. Причем это могут быть как частицы галактических КЛ (ГКЛ), так и солнечных КЛ (СКЛ), дифференциальные спектры которых заметно отличаются друг от друга в области энергий до единиц ГэВ. Вот уже много лет основные методы изучения характеристик вторичной компоненты КЛ заключаются в проведении различного рода экспериментов с реальным детектирующим оборудованием. Но в последнее время, благодаря развитию информационных технологий, возможности этих исследований существенно расширились. Представленная диссертационная работа посвящена дополнению существующей комплексной системы сбора данных, установленной на станции нейтронного монитора (НМ) ПГИ г. Апатиты, численными моделями актуального детектирующего оборудования. Также рассматривается модель прохождения протонов КЛ через атмосферу Земли, созданная для получения количественных характеристик воздействия частиц на окружающее их вещество. В ходе проведенного исследования были получены функции эффективности регистрации для стандартного НМ и сцинтилляционных детекторов NaI (Тl), а также произведена оптимальная параметризация нового прототипа узконаправленного нейтронного спектрометра (УНС). Также были получены энергетические и высотные зависимости потоков различных компонент вторичных КЛ, индуцированных протонами первичных КЛ с дифференциальными спектрами, соответствующими как ГКЛ, так и СКЛ во время событий возрастания приземного фона (GLE) № 65, 67, 69 и 70. На основе этих данных получены профили скорости ионизации для различных значений жесткости геомагнитного обрезания (для СКЛ – 0,65 ГВ и 3 ГВ).

Актуальность

КЛ оказывают значительное влияние на окружающую среду и технику; примером актуальных задач могут служить расчет эффективной дозы при осуществлении авиaperелетов через полярные области Земли или оценка негативного воздействия вторичного излучения на электронные устройства и даже технические сооружения во время событий возрастания приземного фона (Ground level enhancement – GLE). Также важными являются проблемы радиобиологической безопасности в целом. Чтобы, в конечном счете, уменьшить негативный эффект от взаимодействия КЛ с биологическими и техническими объектами, необходимо представлять механизмы прохождения этих частиц через вещество в зависимости от конкретных начальных условий (энергия и состав, высота расположения объекта в атмосфере Земли и т. д.). Самым распространенным методом на данный момент является экспериментальное исследование (различные комплексные установки, стратосферные измерения), однако такой подход не дает исчерпывающей информации о составе и характеристиках вторичных КЛ. Например, шар-зонд со счетчиком Гейгера не позволяет определить состав излучения, а дает только количественную оценку суммарного вклада преимущественно от заряженной компоненты, при этом возможности их запуска ограничены местом проведения эксперимента и, самое главное, относительно высокой стоимостью оборудования. Численный эксперимент в таком случае позволяет расширить возможности исследований, как посредством моделирования систем регистрации, так и при помощи сбора информации о потоках вторичных частиц в любой точке атмосферы Земли, причем для любых состояний источника первичного излучения. Наряду с этим реальные данные из экспериментальной базы отлично подходят для оценки точности модели, ее верификации.

Цель работы

Основным направлением диссертационной работы является всестороннее

исследование при помощи численных методов прохождения ГКЛ и СКЛ через различные системы детекторов, а также их взаимодействия с атмосферой Земли. В соответствии с этой целью были поставлены и решены следующие задачи:

1. Моделирование при помощи GEANT4 [1] детекторов нейтронов и гамма-квантов, входящих в состав комплексной системы приборов, установленных на станции нейтронного монитора Апатиты, и получения их функций эффективности регистрации.

2. Изучение особенностей образования каскадов вторичных частиц в случае использования модельного генератора первичного излучения с характеристиками, соответствующими спектрам протонов ГКЛ и СКЛ.

3. Исследование воздействия первичного и вторичного космического излучения на скорость ионизации вещества атмосферы Земли с учетом значения жесткости геомагнитного обрезания.

4. Верификация результатов вычислений посредством доступных на станции нейтронного монитора Апатиты экспериментальных данных.

Научная новизна

- Предложен и испытан метод получения функций эффективности регистрации действующего детектирующего оборудования, установленного на станции нейтронного монитора Апатиты и имеющего уникальную конфигурацию, при помощи параметризации моделей, выполненных на основе GEANT4. Полученные данные являются не только отличным методом калибровки уже существующих детекторов, но и используются при параметризации вновь разрабатываемых устройств.
- Впервые, при помощи численного метода Монте-Карло [2], получены результаты, доказывающие эффективность использования природного декагидрата тетрабората натрия ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) в качестве эффективного поглотителя нейтронов с энергией $0.025 \text{ эВ} < E < 1 \text{ МэВ}$ в составе детектирующего оборудования.

- Впервые, при помощи численного метода Монте-Карло, получены данные, позволяющие модельным путем оценить воздействие протонов ГКЛ на скорость ионизации атмосферы Земли в глобальном масштабе. На основе этих результатов построены соответствующие высотные и пространственные профили (срезы), и произведена их верификация при помощи экспериментальных данных.
- Впервые предложен метод использования данных о спектрах СКЛ, полученных по уникальной методике при помощи сети станций нейтронных мониторов [3], для оценки характеристик потоков вторичных частиц и скорости ионизации атмосферы во время событий GLE посредством соответствующего модуля RUSCOSMICS [4].

Научная и практическая значимость

1. Полученные в ходе моделирования оборудования для регистрации космического излучения результаты позволяют лучше понять особенности распространения частиц внутри системы рассматриваемого детектора и, в случае необходимости, производить калибровку или пересчет эффективных параметров.
2. Результаты, полученные в ходе ряда модельных экспериментов по расчету прохождения протонов КЛ через атмосферу Земли, позволяют получить количественную оценку потоков вторичного излучения, которая, в свою очередь, находит применение как в фундаментальных исследованиях (например, изучение широких атмосферных ливней), так и в прикладной области (радиационная безопасность).

Положения, выносимые на защиту

1. Проектирование и создание на основе пакета для разработки программ GEANT4 набора численных моделей для расчета характеристик

детекторов нейтронов и гамма-квантов, входящих в состав комплексной системы сбора нейтронного монитора Апатиты.

2. Полученные при помощи этих моделей результаты вычислений в виде функции эффективности регистрации НМ со свинцовым генератором и борными счетчиками, а также функций эффективности регистрации NaI (Тl) сцинтилляционных детекторов разных размеров.
3. Разработка и создание нового узконаправленного детектора нейтронов с предварительным проведением расчетов его функции эффективности регистрации.
4. Разработка и создание модуля программного комплекса RUSCOSMICS, предназначенного для моделирования взаимодействия протонов КЛ с атмосферой Земли, проведение вычислений потоков вторичных частиц в атмосфере, возникающих при прохождении протонов ГКЛ, а также сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными в ходе измерений при помощи запуска шаров-зондов на станции Апатиты.
5. Результаты вычислений при помощи программного комплекса RUSCOSMICS в виде скорости образования ионов в атмосфере Земли протонами ГКЛ и вторичной компонентой КЛ для периодов минимумов солнечной активности и диапазона значений жесткости геомагнитного обрезания от 0,05 ГВ до 14 ГВ.
6. Результаты вычислений при помощи программного комплекса RUSCOSMICS в виде скорости образования ионов в атмосфере Земли протонами СКЛ и вторичной компонентой КЛ во время событий GLE №65, GLE №67, GLE №69 и GLE №70 и для значений жесткости геомагнитного обрезания $R_c = 0.65$ ГВ и $R_c = 3$ ГВ

Достоверность результатов

Достоверность и обоснованность представленных в диссертационной

работе результатов следует из их тщательного анализа и верификации при помощи больших массивов экспериментальных данных. Рассчитанные значения потоков вторичных частиц в атмосфере хорошо согласуются с профилями, полученными при помощи шаров-зондов с установленными на них счетчиками Гейгера. Полученные в представленной работе данные используются на нейтронном мониторе Апатиты для расчета скорости ионизации атмосферы Земли протонами первичных КЛ, а также применяются другими группами авторов [5, 6, 7, 8, 9, 10] для решения широкого спектра задач в области физики космических лучей.

Личный вклад автора

В исследовании, изложенном в диссертационной работе, автор принимал непосредственное участие при постановке задачи, разработке методики, написании кода моделей, сборе, обработке и организации хранения данных, проектировании и реализации оборудования, участвовал в обсуждениях, интерпретации полученных результатов, представлении материала в научных статьях и на конференциях. Автором диссертации создан пакет программ, предназначенных для решения прикладных и фундаментальных задач в области физики КЛ и проведены расчеты различных параметров действующего детектирующего оборудования, параметров прототипа нового устройства (УНС) и взаимодействия протонов КЛ с атмосферой Земли. Автор внес значительный вклад в развитие методов исследования, применяемых на станции нейтронного монитора ПГИ Апатиты, объединив уже существующие подходы определения параметров потоков КЛ при помощи экспериментального оборудования с новыми решениями в виде численных моделей. Это позволило в полной мере выполнить диссертационную работу, а также заложить базу для множества будущих исследований.

Апробация работы

Основные результаты и выводы, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- 31-я (г. Москва, Россия, 2010 г.), 32-я (г. Москва, Россия, 2012 г.), 33-я (г. Дубна, Россия, 2014 г.), 34-я (г. Дубна, Россия, 2016 г.), 35-я (г. Барнаул, Россия, 2018 г.), 36-я (г. Москва, Россия, 2020 г.), Всероссийские конференции по космическим лучам (ВККЛ).
- 22-й (г. Турку, Финляндия, 2010 г.), 23-й (г. Москва, Россия, 2012 г.), 26-й (г. Белокуриха, Россия, 2018 г.) Европейские симпозиумы по космическим лучам (ECRS).
- 38-я (г. Бремен, Германия, 2010 г.), 39-я (г. Майсур, Индия, 2012 г.) и 40-я (г. Москва, Россия, 2014 г.) научные ассамблеи COSPAR.
- 32-я (г. Пекин, КНР, 2011 г.) и 35-я (г. Пусан, Корея, 2017 г.) международная конференция по космическим лучам (ICRC).
- 14-я (г. Иркутск, Россия, 2015 г.) и 16-я (г. Иркутск, Россия, 2019 г.) Байкальская школа по фундаментальной физике и конференция молодых ученых.
- Международный симпозиум по космическим лучам и астрофизике (ISCRA-2017), г. Москва, Россия, 2017 г.
- Международный симпозиум VarSITI (Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact), г. Иркутск, Россия, 2017 г.
- 5-я (г. Калининград, Россия, 2016 г.) и 6-я (г. Калининград, Россия, 2018 г.) международные конференции «Атмосфера, Ионосфера, Безопасность» (AIS).
- 9-я (ИКИ, г. Москва, Россия, 2013 г.), 16-я (ИКИ, г. Москва, Россия, 2019 г.), 17-я (ИКИ, г. Москва, Россия, 2020 г.), 18-я (ИКИ, г. Москва, Россия, 2021 г.) конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования».

- 13-я Русско-Китайская конференция по космической погоде, г. Якутск, Россия, 2016 г.
- 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44 ежегодные Апатитские семинары «Физика авроральных явлений» (2010 – 2021 гг., Апатиты).
- Конференция “Состояние и перспективы развития геофизических исследований в высоких широтах”, г. Апатиты, Россия, 2010 г.
- 2, 3, 4, 5, 6 школы молодых ученых «Высокоширотные геофизические исследования» (г. Апатиты, г. Мурманск, Россия, 2011-2017 гг.)

Международная научно-техническая конференция «Наука и образование – 2012», г. Мурманск, Россия, 2012 г.

Публикации

Соискатель имеет 30 опубликованных научных работ по теме диссертации, 16 из которых проиндексированы базой данных SCOPUS, 6 - Web of Science. Из них 8 статей в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, а также 3 работы в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. 14 работ опубликовано в материалах всероссийских и международных конференций, и симпозиумов.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, 3-х глав и заключения. Ее объем составляет 104 страницы. В диссертации содержится 51 рисунок и 4 таблицы. Список литературы содержит 108 наименований.

Во **введении** представлено обоснование актуальности выполненной диссертационной работы, обозначена цель исследования, приводится аргументирование научной новизны. Раскрывается научно-практическая

значимость и доказываются достоверность полученных результатов, сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту и приводится их апробация посредством ряда докладов, представленных на конференциях, и публикаций. В краткой форме изложены положения, отражающие содержание работы.

В **первой главе** представлен обзор современного состояния исследований прохождения КЛ через структуру актуальных детекторов и атмосферу Земли. Рассматриваются основные методы расчетов оборудования, включенного в состав комплексной системы сбора данных, установленной на станции НМ ПГИ г. Апатиты (раздел 1.2, 1.3), а также особенности построения модуля, предназначенного для моделирования прохождения протонов КЛ через атмосферу Земли, сбора данных о развитии каскадов вторичных частиц и получения профилей ионизации вещества (раздел 1.4). Рассматриваются основные положения по реализации представленных моделей при помощи языка C++ (раздел 1.5).

В первую очередь приводится описание использования метода Монте-Карло для расчета широко используемого в физике КЛ сцинтилляционного NaI (Tl) спектрометра. Рассматриваются используемые сечения взаимодействий для моделирования процессов фотоэффекта, эффекта Комптона и образования пар, выводятся условия приема или отклонения значений. В конце раздела представлены результаты в виде функций эффективности регистрации, полученные для кристаллов цилиндрической формы с конфигурациями $h_1=2$ см, $\varnothing_1=6,3$ см и $h_2=10$, $\varnothing_2=15$ см (рис. 1.). Также показано хорошее согласие при сравнении данных, полученных путем моделирования облучения сцинтиллятора изотопом ^{241}Am , с реально проведенным экспериментом. Принципиальным отличием от классического подхода, когда рассматривается начальное и конечное состояние гамма-кванта, и на основе этого принимается решение о количестве поглощенной энергии, является максимально приближенная к реальности конфигурация модели. Это выражается в учете сцинтилляционных эффектов, указании значения

световыхода, а также задания таблиц коэффициентов преломления на разделе сред для отражающих поверхностей. Таким образом, в конечном счете на выходе из рабочей области модели формируется пучок фотонов, регистрируемых соответствующим чувствительным объемом, при этом их количество прямо пропорционально количеству оставленной в кристалле энергии.

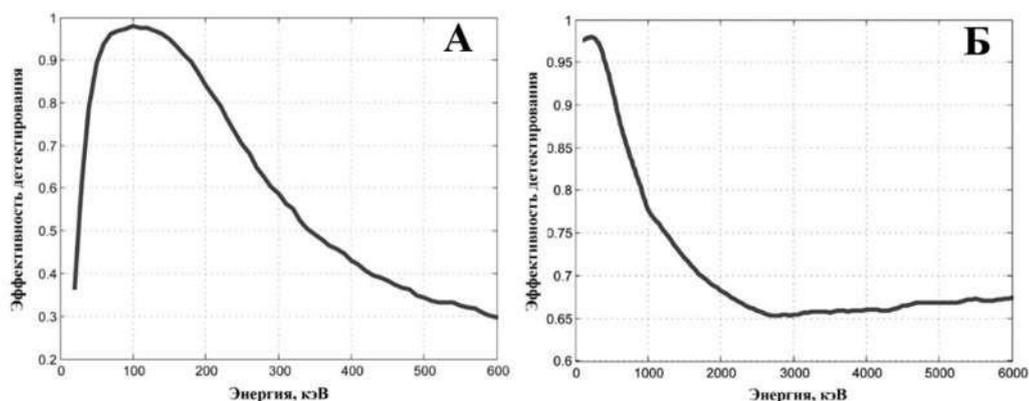


Рис. 1. Эффективности детектирования гамма-квантов, полученные в результате моделирования взаимодействий пучков моноэнергичных частиц с шагом 10 кэВ и 100 кэВ при прохождении через вещество сцинтилляционных детекторов цилиндрической формы размерами $h_1=2$ см, $\varnothing_1=6,3$ см (А) и $h_2=10$, $\varnothing_2=15$ см (Б).

Второе устройство, для которого была рассчитана не только эффективность регистрации, но и проведен ряд модельных экспериментов с целью получения детальной информации о взаимодействии излучения внутри его системы – это стандартный НМ. Начало раздела посвящено особенностям использования сечений ENDF/B [11,12], встроенных в GEANT4, для прикладной задачи, заключающейся в расчете взаимодействия нейтронов с водородосодержащими средами. В примитивной конфигурации рассматривалась система полиэтилен-свинец-полиэтилен с реализацией простого детектирующего объема, облучаемая моноэнергичными пучками нейтронов. Такой подход позволил получить спектральные характеристики нейтронов, достигающих счетчики. Для построения модели, максимально

приближенной к реальности, использовались геометрические параметры, соответствующие стандартному НМ.

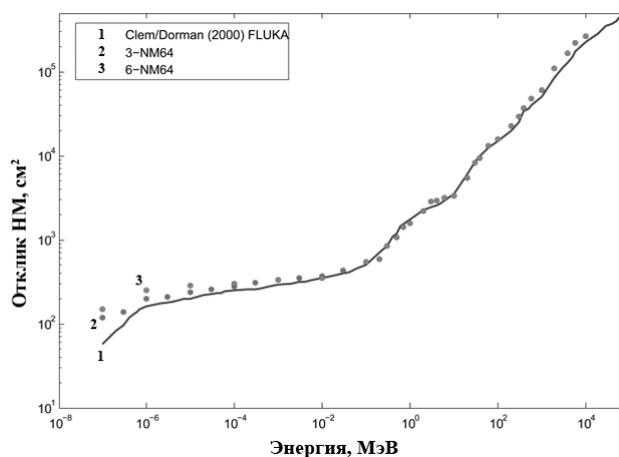


Рис. 2. Функция эффективности регистрации стандартного НМ, полученная в результате моделирования прохождения потоков моноэнергичных нейтронов через систему детектора. Приведено сравнение с полученным при помощи пакета FLUKA результатом, работа выполнена ранее другой группой авторов (Clem J.M., 2000), наблюдается хорошее совпадение.

Модельный источник нейтронов реализован как инкрементирующий генератор потоков моноэнергичных частиц, имеющих перпендикулярное детектору направление. Распределение по площади поверхности является равномерным, количество событий на каждый запуск равно 10000. Как результат таких расчетов была получена зависимость эффективности регистрации стандартного НМ от начальной энергии падающих нейтронов. Сравнение, проведенное с исследованиями, выполненными ранее [13], показало хорошее соответствие с незначительным расхождением в области низких энергий (рис. 2). Это означает, что модель построена корректно, применяет актуальные методы расчета взаимодействия частиц, соответствующие современным наборам сечений взаимодействий и может использоваться как базовая при расчете детекторов подобного типа.

Третий прибор является разработкой, в создании которой автор принимал непосредственное участие. Детектор представляет собой устройство, предназначенное для регистрации нейтронов, приходящих с

заданных направлений (узконаправленный нейтронный спектрометр - УНС). Перед началом компиляции УНС было проведено его моделирование с целью выявления оптимальных параметров. Источник первичных частиц реализован таким образом, чтобы его начальное положение и угловые распределения можно было менять. Как и в случае с НМ пучки нейтронов для одного запуска имели фиксированную энергию (один запуск равен 10000 частиц). Таким образом, первый этап расчетов заключался в исследовании эффективности регистрации от угла прихода частицы. Вторая часть моделирования была направлена на поиск эффективной толщины промежуточных пластин. Как результат были получены соответствующие зависимости (рис. 3), полностью характеризующие прибор, параметры которого отвечают поставленной задаче. На основе этих данных был собран полностью функционирующий прототип, при помощи которого на данный момент проводятся непрерывные измерения.

В разделе 1.4 рассматриваются принципы построения и оптимизации модели атмосферы Земли в модуле для расчета прохождения протонов КЛ, источника первичных частиц, а также детектирующих объемов, предназначенных для сбора информации о потоках вторичных частиц. Вначале описывается алгоритм создания слоев с заданным процентным соотношением массы вещества и расчета необходимых параметров при помощи NRLMSISE-00 [14]. На основе ряда проведенных тестовых вычислений аргументируется, почему целесообразнее использовать именно точечный источник частиц. Чувствительные объемы для сбора информации являются комбинированными, способными получать как прямые измерения ионизации, так и значения потоков интересующей компоненты (энергетические спектры, угловые и пространственные распределения). В разделе 1.5 описывается иерархия наследованных классов GEANT4, используемая в конечной компиляции кода.

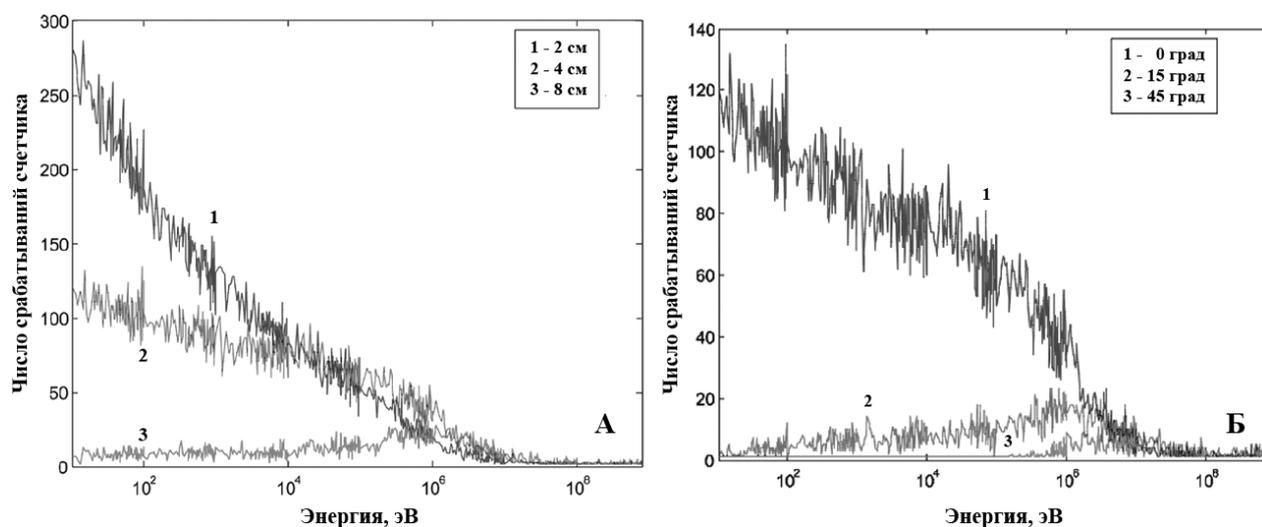


Рис. 3. Эффективность регистрации нейтронов, полученная в результате моделирования облучения детектора УНС потоком перпендикулярно падающих частиц в зависимости от толщины вещества промежуточного замедлителя (А) и наклонно падающих частиц при дополнительном условии отсутствия верхней замедляющей пластины (Б). В сносках указаны толщина пластины замедлителя и угол наклона генератора частиц.

Во **второй главе** рассматривается частный случай использования модели прохождения протонов через атмосферу Земли для ГКЛ во время минимума солнечной активности. Приводятся соответствующие энергетические спектры, выступающие в роли основной характеристики модельного источника первичных частиц. В ходе расчетов получен массив данных энергетических распределений вторичного излучения (электроны, позитроны, мюоны, протоны, нейтроны, гамма-кванты), представлены типовые графики и описание к ним. Также одним из наиболее важных результатов является набор высотных зависимостей суммарных потоков частиц. Путем сравнения этих наборов данных с профилями, полученными в ходе проведения стратосферных испытаний (при помощи счетчиков Гейгера, установленных на шарах-зондах) показано хорошее соответствие модели реально протекающим в атмосфере Земли процессам взаимодействия протонов КЛ с окружающим их веществом и последующего рождения каскадов. Это говорит о правильном выборе как

начальных условий, таки параметризации в целом.

Полученные распределения позволяют перейти от потоков частиц к оценке скорости ионизации в зависимости от высоты. Наряду с представленными результатами для локального значения жесткости геомагнитного обрезания 1,5 ГВ приводятся расчеты для глобальной модели с сеткой в 5 градусов, где начальные параметры жесткости вычислялись путем решения обратной задачи [15]. В целом, данные доступны для высот от 0 до 79 км с шагом 1 км, что позволяет как качественно, так и количественно оценивать мощность ионизационного воздействия потоков КЛ на окружающее вещество, пример представлен на рис. 4. В работе представлены типовые результаты для 2 км, 5 км, 12 км и 50 км, из которых хорошо видна зависимость скорости ионообразования для заданных географических координат от разных участков дифференциального спектра первичных частиц, генерируемых модельным источником и жесткости геомагнитного обрезания. Изучение полученных результатов показывает, что от 80 км до ~15-20 км протоны КЛ теряют свою энергию на ионизацию, причем наибольший вклад в эту область вносится из диапазона энергии $E \in (10 \text{ МэВ}; \sim 1 \text{ ГэВ})$. Поэтому количество образовавшихся пар ионов в единицу времени будет тем больше, чем меньше значение жесткости геомагнитного обрезания. Это полностью соответствует как современным представлениям о прохождении элементарных заряженных частиц через вещество, так и результатам множества экспериментальных наблюдений. При энергии протонов $E > 1 \text{ ГэВ}$ превалирующее воздействие КЛ на вещество атмосферы на высотах от 20 км до уровня моря происходит через образование каскадов вторичных частиц. Показано, что при увеличении глубины значения скорости ионизации для области полюсов и экватора начинают постепенно достигать одного порядка и на уровне моря становятся практически одинаковыми, что также соответствует результатам наземных измерений.

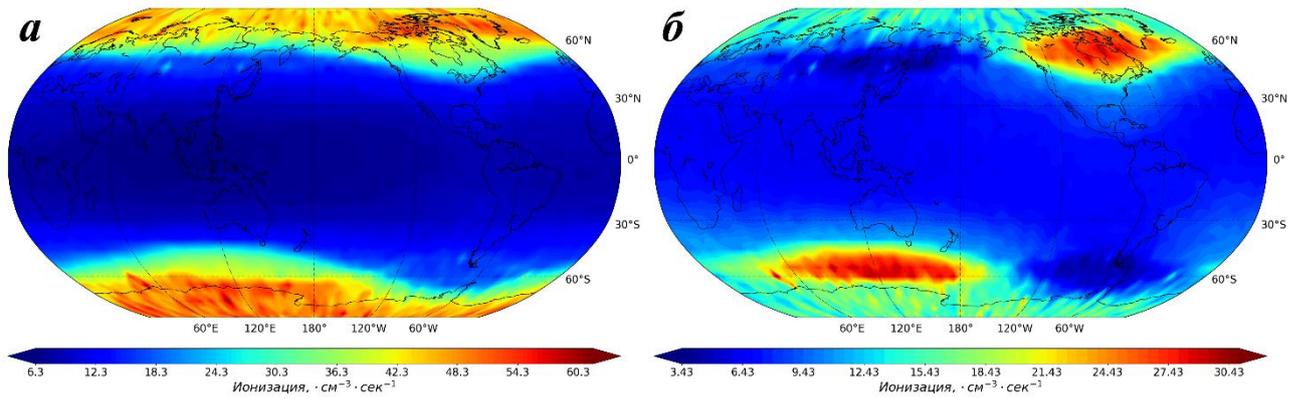


Рис. 4. Иллюстрация оценки скорости ионизации вещества протонами ГКЛ, соответствующие высотам 12 км (а) и 5 км (б) над уровнем моря. Результат получен при помощи глобальной модели и для источника первичных протонов, имеющих энергетический спектр первичных ГКЛ во время минимума солнечной активности.

Учет всех известных взаимодействий, а также возможность параметризации состояния любого начального условия (например, жесткость) является важной особенностью представленного в работе метода. Это и позволяет получить количественную оценку скорости образования пар ионов под воздействием ГКЛ в плотных слоях атмосферы для глобального масштаба. Также следует заметить, что благодаря использованию принципов объектно-ориентированного программирования и преимуществ параллельных вычислений достигнута высокая скорость расчетов. Так, чтобы получить корректные данные для участка, ограниченного длиной ребер в диапазоне от 1 градуса до 5 градусов (квадрат) и высотой 80 км, необходимо произвести запуск и расчет не менее чем 1500 первичных частиц. При установке таких минимальных параметров время моделирования на ПК с процессором Intel core i7 и ОЗУ 4 Гб составляет от 4 до 30 минут в зависимости от значения жесткости геомагнитного обрезания.

В третьей главе представлены результаты, полученные в случае моделирования прохождения протонов ГКЛ, модулированных солнечными частицами во время четырех событий GLE № 65, 67, 69, 70 для значений жесткости геомагнитного обрезания 0,65 ГВ и 3 ГВ.

Для инициализации модельного источника частиц необходимо применять дифференциальные энергетические спектры, поэтому в работе также предлагается использование результатов, полученных при помощи мировой сети НМ по методике, разработанной на станции НМ г. Апатиты [3]. Согласно этим исследованиям, в составе общего потока солнечных протонов присутствуют две компоненты, быстрая (PC) и медленная (DC), описываемые соответствующими зависимостями $J_{PC} = J_0 \exp(-E/E_0)$ и $J_{DC} = J_1 E^{-\gamma}$, где J_0 , E_0 , J_1 , γ – коэффициенты, которые различаются в зависимости от номера события GLE. Применяемые в диссертационной работе значения представлены в таблице.

Таблица

Параметры дифференциальных энергетических спектров СКЛ в событиях GLE №65, GLE №67, GLE №69, GLE №70

GLE №	Дата	Гелиоординаты	Параметры энергетических спектров			
			J0	E0	J1	γ
65	28.10.2003	S16 E08	1.2·10 ⁴	0.60	1.5·10 ⁴	4.4
67	02.11.2003	S14 W56	4.6·10 ⁴	0.51	9.7·10 ³	6.3
69	20.01.2005	N14 W61	2.5·10 ⁶	0.49	7.2·10 ⁴	5.6
70	13.12.2006	S06 W24	3.5·10 ⁴	0.59	4.3·10 ⁴	5.7

В ходе работы были рассчитаны профили ионизации для значения жесткости геомагнитного обрезания $R = 0,65$ ГВ и $R = 3$ ГВ, пример представлен на рис. 5. Модельным путем показано, что протоны СКЛ, которые в значительной степени (до нескольких порядков) преобладают над протонами ГКЛ в диапазоне энергий от сотен МэВ до единиц ГэВ, сильно влияют на ионизацию, до трех порядков увеличивая скорость образования пар ионов в области высоких широт. Для больших показателей жесткости геомагнитного обрезания эти значения становятся близкими или идентичными результатам, полученным путем расчета прохождения протонов ГКЛ через атмосферу Земли. Это полностью соответствует современным

представлениям физики взаимодействия частиц и подтверждается экспериментальным исследованием при помощи запуска шаров-зондов с установленным на них счетчиками Гейгера.

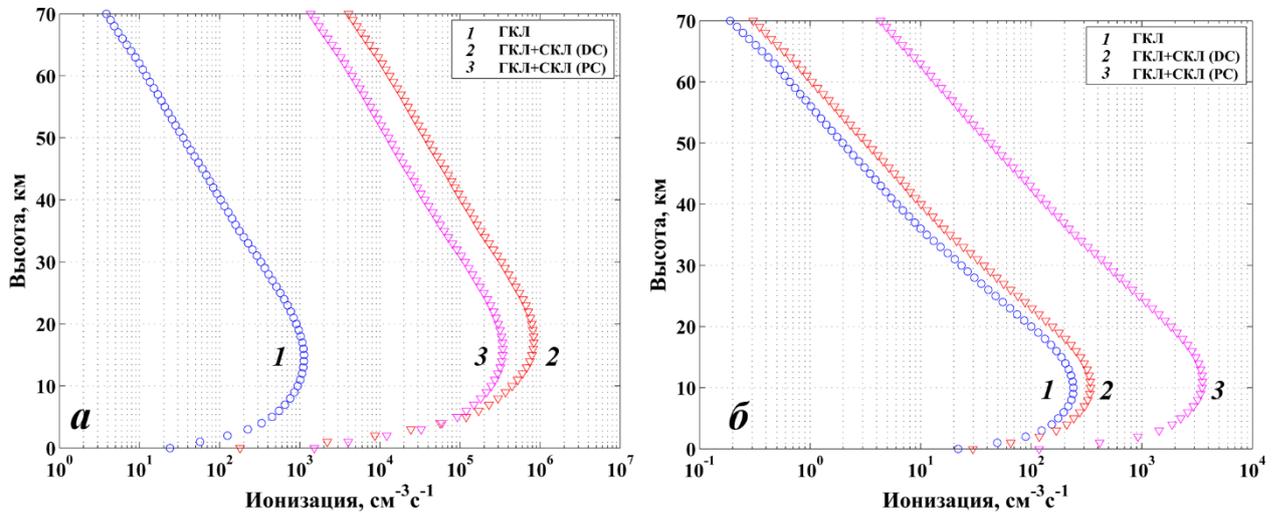


Рис. 5. Высотные профили скорости ионизации, полученные в результате моделирования прохождения первичных СКЛ через атмосферу Земли и образования в ней каскадов вторичных КЛ с использованием «плоской» геометрии. На графиках представлены данные для события GLE №69 и значений жесткости геомагнитного обрезания 0,65 ГВ (а) и 3 ГВ (б), Цифра 1 соответствует ГКЛ, цифры 2 и 3 – ГКЛ + СКЛ для медленной (DC) и быстрой (PC) компонент, соответственно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В **Заключении** приводятся основные результаты и формулируются выводы представленной диссертационной работы:

1. Посредством интеграции численных расчетов обновлены и усовершенствованы существующие в ПГИ методы по исследованию космических лучей в широком диапазоне. На базе GEANT4 созданы модели актуальных детекторов, а также разработан новый тип устройства с оптимальными параметрами для изучения направленности потока нейтронов с энергией до 1 МэВ. Создана усовершенствованная модель для расчета прохождения протонов КЛ через атмосферу Земли, позволяющая не только собирать информацию о вторичных потоках и производить оценку ионизации, но и решать специфические задачи, требующие дополнительной параметризации.
2. При помощи реализованных моделей исследованы особенности взаимодействия частиц КЛ с веществом как популярных детекторов, так и в новой установке. Получены их функции эффективности регистрации, а для УНС также и оптимальные геометрические параметры системы. Произведена валидация модели NaI(Tl) спектрометра при помощи существующих экспериментальных данных. Показано, что рассчитанные в работе значения хорошо совпадают с реальными характеристиками приборов. Это означает, что уже существующие модели могут выступать как базовые и применяться к новому оборудованию путем соответствующей параметризации.
3. При помощи разработанного модуля проведены множественные расчеты прохождения протонов первичных КЛ через атмосферу Земли. Как результат были получены зависимости частиц вторичной компоненты от энергии и глубины. На основе этих данных рассмотрены особенности развития каскадов, модельные высотные профили сравнивались с реальными, полученными экспериментально, показывая

хорошее согласие. Все количественные характеристики указывают на то, что до высот 12-20 км первичные протоны испытывают преимущественно ионизационные потери. В более плотных слоях начинают преобладать неупругие взаимодействия, в результате которых и начинается развитие каскадов. Это полностью соответствует современным представлениям физики КЛ и указывает на то, что модель является состоятельной и может успешно использоваться для решения широкого круга задач, связанных с оценкой потоков частиц в атмосфере Земли, индуцированных протонами первичных КЛ.

4. На основе полученных количественных характеристик потоков была рассчитана скорость ионизации вещества атмосферы Земли первичными протонами только галактических космических лучей в случае глобальной модели. В качестве примера в работе приводятся результаты в виде высотной зависимости для значения жесткости геомагнитного обрезания 1,5 ГВ и срезы для всех значений широты и долготы (шаг сетки составляет 5 градусов).
5. Получены количественные характеристики скорости ионизации вещества атмосферы Земли первичными протонами ГКЛ, модулированными солнечными частицами, для событий GLE № 65, 67, 69, 70. Представлены высотные профили скорости ионизации для двух значений жесткости геомагнитного обрезания (0,65 ГВ и 3 ГВ). Спектры для параметризации первичного источника получены по уникальной методике, разработанной на станции нейтронного монитора г. Апатиты, ПГИ.

Публикации по теме диссертации в рецензируемых журналах

1. Балабин Ю.В., Маурчев Е.А., Вашенюк Э.В., Гвоздевский Б.Б. Детальное исследование явления множественности на нейтронных мониторах // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2010. – № 2. – С. 50–65.
2. Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B., Maurchev E.A., Vashenyuk E.V., Dzhappuev D.D. Fine structure of neutron multiplicity on neutron monitors // *Astrophysics and Space Science*. – 2011 – Т.7 – С. 283–286.
3. Маурчев Е.А. Численное моделирование в различных задачах физики космических лучей // Труды Кольского научного центра РАН. – 2015. – № 6. – С. 152–156.
4. Маурчев Е.А. Программный комплекс RUSCOSMICS в задачах прохождения космических лучей через атмосферу Земли // Труды Кольского научного центра РАН. – 2017. – Т. 8. – № 7–3. – С. 10–16.
5. Velinov P. I. Y., Balabin Yu. V., Maurchev E. A., Calculations of enhanced ionization in strato–troposphere during the greatest ground level enhancement on 23 February 1956 (GLE 05) // *Compt. rend. Acad. Bulg. Sci.* – 2017 – V. 70. – № 4, – P. 545–555.
6. Маурчев Е.А., Михалко Е.А., Германенко А.В., Балабин Ю.В. Экспериментальные методы для проведения валидации результатов моделирования взаимодействия космических лучей с атмосферой Земли // Труды Кольского научного центра РАН. – 2018. – Т. 9. – № 5–4. – С. 76–81.

Публикации по теме диссертации из списка ВАК

1. Балабин Ю.В., Джаппуев Д.Д., Гвоздевский Б.Б., Маурчев Е.А., Куджаев А.У., Михайлова О.И. Множественность на нейтронных мониторах: локальные адронные ливни и ШАЛ // **Известия Российской академии наук. Серия физическая.** – 2011. – Т. 75. – № 3. – С. 393–395.
2. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Вашенюк Э.В. Новая численная модель для исследования космических лучей в атмосфере

- Земли // **Известия Российской академии наук. Серия физическая.** – 2015. – Т. 79. – № 5. – С. 711–713.
3. Maurchev E.A., Balabin Yu.V. RUSCOSMICS – The new software toolbox for detailed analysis of cosmic ray interactions with matter // **Solar–Terrestrial Physics.** – 2016. – Т. 2. – № 4. – С. 3–10.
 4. Mikhalko E.A., Balabin Yu.V., Maurchev E.A., Germanenko A.V. New narrow–beam neutron spectrometer in complex monitoring system // **Solar–Terrestrial Physics.** – 2018. – Vol. 4. – № 1. – P. 71–74.
 5. Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В., Маурчев Е.А., Михалко Е.А., Луковникова А.А., Торопов А.А. Общие свойства возрастных гамма–фона и их статистические характеристики // **Известия Российской академии наук. Серия физическая.** – 2019. – Т. 83. – № 5. – С. 659–662.
 6. Михалко Е.А., Балабин Ю.В., Маурчев Е.А., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Исследование энергетических спектров возрастных фонового гамма–излучения // **Известия Российской академии наук. Серия физическая.** – 2019. – Т. 83. – № 5. – С. 663–665.
 7. Маурчев Е.А., Михалко Е.А., Германенко А.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.В. Программный комплекс RUSCOSMICS как инструмент для оценки скорости ионизации вещества атмосферы Земли протонами космических лучей // **Известия Российской академии наук. Серия физическая.** – 2019. – Т. 83. – № 5. – С. 712–716.
 8. Maurchev E.A., Balabin Yu.V., Germanenko A.V., Mikhalko E.A., Gvozdevsky V.V. Calculating the ionization rate induced by GCR and SCR protons in Earth atmosphere // **Solar–Terrestrial Physics.** – 2019. – Vol. 5. – № 3. – P. 68–74.
 9. Михалко Е.А., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В. Направленный детектор нейтронов умеренных энергий // **Приборы и техника эксперимента.** – 2021. – № 4. – С. 89–94.
 10. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Моделирование прохождения протонов солнечных космических лучей через атмосферу Земли для событий GLE42 И GLE44 // **Известия**

Российской академии наук. Серия физическая. –2021. –Т. 85. –№ 3. – С. 383–387.

11. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Михалко Е.А., Гвоздевский Б.Б. Расчет скорости ионизации во время события GLE с использованием глобальной модели атмосферы Земли и оценка вклада в этот процесс частиц галактических космических лучей с $Z > 2$ // **Известия Российской академии наук. Серия физическая.** –2021. –Т. 85. –№ 3. – С. 388–392.

Труды конференций

1. Маурчев Е.А., Гвоздевский Б.Б., Балабин Ю.В., Вашенюк Э.В. Моделирование функции отклика нейтронного монитора // материалы конференции “Состояние и перспективы развития геофизических исследований в высоких широтах”. –2010. –С. 30–31.
2. Maurchev E.A., Gvozdevsky B.B., Balabin Yu.V., Vashenyuk E.V. Modelling of hadron interactions in the neutron monitor // *Physics of Auroral Phenomena.* – 2011. –V. 33. –№ 1. –P. 83–86
3. Maurchev E.A., Balabin Yu.V., Vashenyuk E.V., Gvozdevsky B.B., Bazilevskaya G.A., Makhmutov V.S., Transport of solar protons through the atmosphere in the 13 December 2006 GLE // *Physics of Auroral Phenomena.* – 2011. –V. 34. –№ 2 (35). –С. 110–113.
4. Maurchev E.A., Balabin Yu.V. New neutron spectrometer with narrow acceptance diagram // *Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference.* –2011. –P. 173–175. – DOI: 10.7529/ICRC2011/V10/0387.
5. Maurchev E.A., Balabin Y.U.V., Vashenyuk E.V., Gvozdevsky B.B., Bazilevskaya G.A., Makhmutov V.S. Transport of solar protons through the atmosphere in the 13 December 2006 GLE: comparison of simulations with balloon and neutron monitor observations // *Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference.* –2011. –P. 147–150. – DOI:

10.7529/ICRC2011/V10/0670.

6. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Вашенюк Э.В., Гвоздевский Б.Б. Моделирование прохождения галактических космических лучей через атмосферу Земли // Материалы научно–технической конференции “Наука и образование – 2012”, –2012. –С. 92–96.
7. Германенко А.В., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. Расчёт эффективности регистрации рентгеновского излучения кристаллами NaI(Tl) с различной геометрией методом Монте–Карло // Труды конференции «Высокоширотные геофизические исследования», –2012. –С. 77–80.
8. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Вашенюк Э.В., Германенко А.В. Применение метода Монте–Карло в детальном исследовании прохождения космических лучей через атмосферу Земли // Труды 3 школы молодых учёных «Высокоширотные геофизические исследования», –2013. –С. 93–95.
9. Maurchev E.A., Balabin Yu.V., Vashenyuk E.V., Gvozdevsky B.B. Transport of solar protons through the atmosphere during GLE events // J. of Phys. Conf. Ser. –V.409. –2013. –DOI:10.1088/1742–6596/409/1/012200.
10. Germanenko A.V., Balabin Yu.V., Maurchev E.A., Gvozdevsky B.B., Vashenyuk E.V. The continuous detection of gamma (X–ray) spectra registered during atmospheric precipitations // J. of Phys. Conf. Ser. –V.409. –2013. – DOI:10.1088/1742–6596/409/1/012240.
11. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б. Модельный комплекс для исследования космических лучей RUSCOSMICS // Труды Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и Конференции молодых ученых. –2015. –С. 51–53.
12. Maurchev, E.A., Balabin, Yu.V. Modeling of the Earth atmosphere ionization by galactic cosmic ray protons with RUSCOSMICS© // PoS (ICRC2017) 297. – 2017. –Vol. 301. –P. 1–6.
13. Velinov, P.I.Y., Balabin, Y.V., Maurchev, E.A. Cosmic ray ionization effect

in the atmosphere during the maximal GLE05 – On 23.02.1956 // PoS(ICRC2017)075 –2017. –Vol. 301. –P. 1–8.

14. Maurchev E.A., Germanenko A.V., Mikhalko E.A., Balabin Yu.V. The Detector of a Secondary Cosmic Rays Electron–Muon Component for a RUSCOSMICS calculations Results Verification // Proceedings of VI International conference AIS. –2018. –Part 2. –P. 192 – 196.

Цитируемая литература

1. Agostinelli S. et al. Geant4 – A Simulation Toolkit // Nuclear Instruments and Methods. –2003. –A 506. –P. 250–303. –DOI: 10.1016/S0168–9002.
2. Соболев И.М. Метод Монте–Карло: 4–е издание. – М.: Наука. –1985. –80 с.
3. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. Features of relativistic solar proton spectra derived from ground level enhancement events (GLE) modeling // Astrophysics and Space Sciences Transactions. – 2011. – V. 7. – I. 4. – P. 459–463.
4. Maurchev E.A., Balabin Yu.V., RUSCOSMICS – The new software toolbox for detailed analysis of cosmic ray interactions with matter // Solar–Terrestrial Physics. – 2016. – V. 2. – N. 4. – P. 3–10.
5. Chilingarian A., Bostanjyan N., Vanyan L. Neutron bursts associated with thunderstorms // Physical Review D: Particles, Fields, Gravitation and Cosmology. – 2012. – T. 85. – №8. – С. 085017.
6. Петрашова Д.А., Белишева Н.К. Цитогенетические эффекты высокоэнергетической нейтронной компоненты космических лучей в клетках меристемы *Alium CEPA* // Труды Кольского научного центра РАН. – 2015. – Т. 32. – №6. – С. 41–49.
7. Петрашова Д.А., Белишева Н.К., Балабин Ю.В., Маурчев Е.А. Оценка биоэффективности высокоэнергетических нейтронов вторичных космических лучей у поверхности Земли // Proceeding of the 39th Annual Seminar. –2016. –С. 55–56.
8. Зелинский А.С., Яковлева В.С. Оценка вклада космической компоненты в

- суммарный β - и γ - фон приземной атмосферы // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2017. – Т. 20. – №4. – С. 28–34.
9. Елифанова И.Э., Тертышник Э.Г. Исследование образования радионуклидов в препарате лития под воздействием космических лучей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – №6. – С. 148–152.
 10. Firoz K.A., Gan W.Q., Li Y.P., Rodríguez-Pacheco J., Kudela K. On the possible mechanism of GLE initiation // The Astrophysical Journal. – 2019. – V. 872. – N. 2. – P. 178.
 11. Brown D.A. et al. ENDF/B–VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO–project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data // Nuclear Data Sheets. –V. 148, –P. 1–142.
 12. Chadwick M.B. et al. ENDF/B–VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data // Nuclear Data Sheets. –2011. –V. 112. –№ 12. –P. 2887–2996.
 13. Clem J.M., Dorman L.I. Neutron Monitor Response Functions // Space Science Reviews. –2000. –V. 93. –I. 1–2. –P. 335–359.
 14. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A. C. NRLMSISE–00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH. –2002 –V. 107. –№ A12, –P. 15–16.
 15. Gvozdevsky B.B., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Gushchina R., Ptuskin V. Geomagnetic cutoff rigidities of cosmic rays and their secular changes // Proc. 42nd COSPAR Scientific Assembly. –2018. –ID. D1.2–31–18.