

На правах рукописи

ГЕРМАНЕНКО АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И
ПРОНИКАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ АРКТИЧЕСКИХ И
СУБАРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ ЗЕМЛИ**

01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Автор:

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
оппоненты:

Михайлов Владимир Владимирович

доктор физико-математических наук, профессор

ведущий научный сотрудник кафедры экспериментальной ядерной физики и космофизики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

Васильев Геннадий Иванович

кандидат физико-математических наук,

старший научный сотрудник лаборатории космических лучей Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

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

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию вариаций проникающих излучений в приземном слое атмосферы высоких широт, а также разработке методики моделирования радиационно-опасных потоков солнечных космических лучей по данным нейтронных мониторов. В работе рассматривается широкий круг вопросов, связанных с регистрацией проникающих излучений в приземном слое, физическими процессами, ответственными за генерацию этих частиц, а также методами прогнозирования радиационно-опасных потоков по полученным с наземных детекторов данным.

Актуальность темы

Актуальность исследования определяется как интересами понимания физики фундаментальных процессов воздействия космических лучей на атмосферу, так и практической необходимостью такого понимания для прогнозирования радиационных угроз здоровью человека и влияния на климатические изменения. Необходимо отметить, что, в отличие от средних широт, для атмосферы полярных районов характерен ряд особенностей, которые могут оказывать значительное влияние на параметры атмосферы. К таким особенностям можно отнести малое значение геомагнитного порога обрезания, приводящее к повышенной интенсивности вторичных космических лучей в высокоширотной атмосфере. Представленные в работе измерения выполняются на постоянной основе, в комплексе с регистрацией нескольких типов излучений, с использованием комплексных установок для регистрации и методов численного моделирования.

Цель и задачи работы

Целью работы является экспериментальное исследование вариаций проникающих излучений в приземном слое атмосферы высоких широт, а также разработка методики моделирования радиационно-опасных потоков солнечных космических лучей по данным нейтронных мониторов.

В соответствии с целью работы ставились следующие задачи:

- Создание аппаратного и программного комплекса для регистрации различных компонент излучения в приземном слое. Калибровка вновь созданных систем и разработка методов коррекции данных для учёта локальных поглощений излучения и погрешностей детекторов.

- Анализ наблюдаемых на комплексе вариаций излучения, интерпретация механизмов наблюдаемых явлений и моделирование этих механизмов.
- Разработка методики прогноза радиационно-опасных потоков солнечных космических лучей по данным нейтронных мониторов на основе методики оперативного расчёта параметров СКЛ. Сравнение результатов расчётов по новой (сокращённой) методике с данными расчётов по полной методике.

Вопросы, рассмотренные в диссертации, вошли в планы научно-исследовательских работ Полярного геофизического института, утвержденные Президиумом РАН, а полученные результаты вошли в ряд научных отчетов по темам НИР.

Научная новизна

1. Впервые экспериментально обнаружены возрастания рентгеновского (гамма) излучения в приземном слое атмосферы во время осадков. Показано, что эти события не связаны с внесённой извне радиоактивностью, а полностью обусловлены процессами в низкорасположенных слоисто-дождевых облаках.

2. Предложена физическая модель генерации рентгеновского излучения, связанного с атмосферными осадками. Эта модель основывается на электрических полях в слоисто-дождевых облаках. Энергичные электроны в атмосфере доускоряются электрическим полем облаков и генерируют тормозное рентгеновское излучение, которое затем достигает земли.

3. Разработан метод оперативного прогнозирования радиационно-опасных потоков солнечных космических лучей по данным нейтронных мониторов.

Защищаемые положения и результаты

1. Разработанная и созданная комплексная установка непрерывного мониторинга вторичных космических лучей на уровне земли.

2. Выявленный эффект, связанный с возрастанием интенсивности мягкого гамма-излучения в приземном слое.

3. Результат анализа различных событий возрастания гамма-излучения в приземном слое.

4. Предложенный механизм генерации дополнительного гамма-излучения, вызывающий обнаруженные эффекты.

5. Методика оперативного краткосрочного прогноза радиационно-опасных потоков в экстремальных событиях солнечных космических лучей по данным нейтронных мониторов.

Личный вклад автора

Автор лично принимал участие в разработке аппаратуры и программного обеспечения, развертывании, калибровке и эксплуатации аппаратурных комплексов для мониторинга излучения в приземном слое в Апатитах и в Баренцбурге (арх. Шпицберген). Автором предложена и применена модель генерации рентгеновского излучения, связанного с атмосферными осадками; выполнен сбор данных измерительного комплекса за семь лет и в полном объеме выполнена их обработка.

Диссертанту принадлежит лидирующее авторство в выборе методов решения поставленных задач научного исследования. Все результаты по теме диссертации получены лично автором или при его активном участии.

Апробация работы

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на 21-ом (2008 г., Кошице, Словакия), 22-ом (2010 г., Турку, Финляндия), 23-ем (2012 г., Москва, Россия), 24-ом (2014 г., Киль, Германия) и 26-ом (2018 г., Барнаул, Россия) Европейских симпозиумах по космическим лучам (ECRS), на 38-й (2010 г., Бремен, Германия), 39-й (2012 г., Майсур, Индия) и 40-й (2014 г., Москва, Россия) научных ассамблеях КОСПАР (COSPAR), на 32-й (2011 г., Пекин, КНР), 33-й (2013 г., Рио-де-Жанейро, Бразилия) и 35-й (2017, Бусан, Южная Корея) международных конференциях по космическим лучам (ICRC), на 30-й (2008 г., С.Петербург), 31-й (2010 г., Москва), 32-й (2012 г., Москва), 33-й (2014 г., Дубна), 34-й (2016 г., Дубна), 35-й (2018 г., Барнаул) и 36-й (2020 г.) всероссийских конференциях по космическим лучам (ВККЛ), на 5-й (2016 г., Калининград) и 6-й (2018 г., Калининград) международных конференциях «Атмосфера, Ионосфера, Безопасность», на 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43 и 44 ежегодных Апатитских семинарах «Физика авроральных явлений» (2008 – 2021 гг., Апатиты).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 30 печатных работ (10 входящих в список ВАК).

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём — 123 страницы, в том числе: 59 рисунков, 2 таблицы. Список литературы включает 84 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели работы. Кратко описано содержание глав.

В первой главе рассматриваются методические вопросы, связанные с разработкой экспериментального комплекса для регистрации проникающих излучения на уровне земли, а также обработкой и анализом данных, получаемых с помощью наземных детекторов, входящих в состав комплекса. Анализируется состав регистрируемых излучений, влияние на излучения факторов окружающей среды. Сделан расчёт отклика детекторов при помощи метода Монте-Карло.

Описана проведённая работа по расширению и улучшению существовавших ранее аппаратурных измерительных комплексов в Апатитах и Баренцбурге. Приводится общая схема нового измерительного комплекса, и подробно рассматриваются его основные детекторы.

К стандартному нейтронному монитору (18-НМ-64) в Апатитах была добавлена бессвинцовая секция нейтронного монитора, построенная на основе газоразрядных счетчиков СНМ-15, обычно применяемых в нейтронном мониторе. Секция состоит из четырёх счётчиков, вставленных в полиэтиленовые трубы, играющие роль замедлителя нейтронов. В нашем случае используются трубы толщиной 21 мм. Счетчики бессвинцовой секции подобраны таким образом, чтобы иметь одинаковые счетные характеристики, что позволило подать на них одно и то же высокое напряжение от одного источника. Бессвинцовая секция нейтронного монитора была введена в работу с октября 2008 года. Непрерывные измерения на ней проводятся с ноября 2008 года.

Для нейтронного монитора был разработан и изготовлен усилитель-дискриминатор импульсов, с учетом требований, предъявляемых для усиления и селекции импульсов от газоразрядных счетчиков нейтронов СНМ-15. Усилитель разработан с использованием современной элементной базы, обладает высокой стабильностью, низким уровнем шумов ($3 \cdot 10^{-4}$ В на входе) при рабочем

коэффициенте усиления 10^3 и имеет в своем составе пороговый дискриминатор и формирователь мертвого времени 10 мкс. Усилители данной системы установлены на нейтронных мониторах в Апатитах и Баренцбурге, а также на бессвинцовой секции нейтронного монитора в Апатитах.

Далее описываются, включённые в экспериментальный комплекс, спектрометры гамма-излучения на основе сцинтилляционных детекторов. В данной работе используются сцинтилляторы на основе кристалла иодида натрия, активированного таллием ($NaI(Tl)$).

Используемые сцинтилляторы различаются размерами кристаллов. В основном, были использованы малые детекторы с кристаллами толщиной 2 см, диаметром 6 см и фотоумножителями типа ФЭУ-82. Данный тип детекторов позволяет с достаточной эффективностью регистрировать гамма-кванты с энергиями от 20 кэВ до 400 кэВ. Также в работе был использован один большой детектор типа БДЭГ2-39 на основе кристалла толщиной 10 см, диаметром 15 см и фотоумножителем типа ФЭУ-125. Такой детектор позволяет эффективно регистрировать гамма-кванты с энергиями от 200 кэВ до 4 МэВ. Таким образом, применение сразу двух типов спектрометров, позволяет проводить измерения спектра гамма-излучения в приземном слое в широком диапазоне.

Автором разработана и изготовлена система регистрации для данных спектрометров. Данная система даёт возможность регистрировать как непрерывный интегральный счёт по нескольким каналам данных с заранее заданными энергетическими порогами регистрации, так и детальные дифференциальные энергетические спектры излучения при помощи высокоскоростного 4096-и канального амплитудного анализатора. Спектрометры установлены на постоянную регистрацию в Апатитах с июня 2009 года и в Баренцбурге с ноября 2009 года. Таким образом, непрерывный мониторинг вариаций приземного фона гамма-излучения проводится уже более девяти лет в двух различных пунктах наблюдения. Кроме того, разработан и изготовлен мобильный автономный вариант данного детектора. На данных детекторах автором был зарегистрирован ряд эффектов, которые подробнее рассматриваются во второй главе.

Также описывается проведённое в ходе работы компьютерное моделирование сцинтилляционных спектрометров, используемых в мониторинге, и полученные функции отклика. Моделирование производилось при помощи

программного пакета GEANT4. При интерпретации результатов измерений рентгеновского излучения в приземном слое необходимо учитывать эффективность регистрации сцинтилляционным детектором фотонов различных энергий, т.е. трансформацию спектра фотонов, падающих на детектор. За образец геометрии детектора для моделирования был взят кристалл $NaI(Tl)$, помещённый в алюминиевый корпус, как и у наших сцинтилляционных детекторов. Расчёты проводились как для кристалла 63 x 20 мм, так и для кристалла 150 x 100 мм. Моделировался поток частиц, изотропный по верхней полусфере. Поток фотонов из нижней полусферы не учитывался, что соответствует диаграмме направленности наших детекторов. Также в моделировании не учитывался процесс обратного рассеяния частиц, т.к. в нашей конфигурации он даёт пренебрежительно малый вклад в регистрацию, по сравнению с основным прямым потоком частиц. Сбор статистики производился по энергиям фотонов, возникающих в кристалле вследствие сцинтилляции и попавших в окно фотоумножителя. При суммарной потере частицей в кристалле энергии менее 5 кэВ, считалось, что частица с веществом кристалла не взаимодействует. Этим эффектом можно пренебрегать, так как практически энергии фотонов меньше 5 кэВ трудно регистрировать, поскольку этот диапазон энергий лежит уже в области шумов ФЭУ. Физические параметры кристаллов $NaI(Tl)$ для моделирования брались из справочного материала и спецификаций производителей. Из проведенного моделирования было получено отношение числа частиц, оставивших энергию в кристалле N_ϕ , к общему числу частиц N_0 , что и является чувствительностью кристалла к рентгеновскому излучению. Данная чувствительность была аппроксимирована автором для получения формулы, описывающей эффективность регистрации рентгеновского излучения кристаллом $NaI(Tl)$, с соответствующими геометрическими размерами. Полученные таким образом зависимости эффективности регистрации от энергии гамма-кванта, попавшего в детектор, могут быть использованы при интерпретации измерений.

Описывается детектор заряженной компоненты космических лучей на основе счётчиков Гейгера-Мюллера типа СТС-6. Данный детектор применяется для отслеживания вариаций заряженной компоненты излучения в приземном слое и анализе состава, регистрируемого комплексом излучения. Сцинтилляционные детекторы в равной степени эффективно регистрируют как гамма-кванты, так и заряженную компоненту излучения (электроны, протоны и мюоны). Введение

детектора, чувствительного только к заряженной компоненте излучения, позволит определить состав регистрируемого излучения. Для регистрации заряженной компоненты в Апатитах был изготовлен и установлен детектор заряженной компоненты излучения на основе счётчиков Гейгера-Мюллера, построенный по принципу телескопа. Детектор состоит из двух слоёв по 8 счётчиков СТС-6, разделённых алюминиевой пластиной, толщиной 8 мм. Рассчитанная эффективная площадь регистрации данного детектора составляет 160 см^2 . Данные поступают с верхнего ряда счётчиков и со схемы, регистрирующей совпадения срабатывания верхнего и нижнего рядов. Верхний ряд счётчиков может регистрировать электроны, протоны и гамма-кванты (последние — с эффективностью детектирования $\delta \sim 1\%$). Сигнал со схемы совпадений поступает от детектирования электронов, протонов и мюонов. Эффективность регистрации гамма-квантов схемой совпадения равняется δ^2 , т.е. примерно 10^{-4} . Поэтому можно считать, что детектор заряженной компоненты по схеме совпадений обладает нечувствительностью к гамма-квантам.

Также описан созданный в ходе работ комплекс датчиков для контроля состояния окружающей среды: вариаций давления, температуры и осадков. На основе данных с этих датчиков было оценено влияние температурных и барометрических эффектов на новые детекторы: заряженной компоненты и рентгеновского излучения.

При регистрации мягкого гамма-излучения необходимо учитывать экранирование детекторов крышей здания, в котором они установлены. Особенно это важно при регистрации энергетических спектров рентгеновского излучения, поскольку для разных энергий гамма-излучения коэффициенты ослабления различны и наличие крыши над сцинтилляционным детектором излучения может вносить серьёзные искажения в получаемые результаты. В ходе работы были рассчитаны коэффициенты ослабления гамма-излучения в материале крыши и получена аппроксимация этих коэффициентов в зависимости от энергии гамма-квантов.

Вторая глава посвящена регистрации гамма-излучения в приземном слое и обнаруженных при этом эффектов. За время работы со сцинтилляционными датчиками был отмечен ряд эффектов. Самые заметные из них это сезонные вариации счёта сцинтилляционных датчиков и возрастание фона гамма-квантов во время выпадения осадков, а также связь между вариациями счёта

сцинтилляционных детекторов и темпом счёта нейтронного монитора. Особый интерес представляет устойчивая связь между выпадением осадков и возрастанием гамма-излучения в приземном слое. Этот эффект наблюдался нами почти в 1300 событиях за период наблюдений с июля 2009 по настоящее время на двух имеющихся у нас станциях наблюдения. Данный эффект был проанализирован автором при помощи различных вспомогательных экспериментов и предложен вероятный механизм его происхождения. Предлагается возможная интерпретация механизма данного эффекта и его моделирование при помощи методов Монте-Карло.

В данной главе приведены примеры событий возрастания фонового гамма-излучения для разных сезонов года, показана методика отбора событий и контроля данных. Производится анализ периодических вариаций счёта спектрометров и влияние на работу детекторов сезонов года и типов осадков.

Для того чтобы прояснить природу происхождения наблюдаемых нами возрастных гамма-фона в приземном слое во время осадков, был проведён ряд дополнительных экспериментов.

Одной из причин происхождения возрастных полагалось наличие радиоактивного газа радона, выделяющегося из земли во время осадков. Но эта теория была достаточно быстро отвергнута, поскольку возрастания счёта на сцинтилляционных детекторах отмечается как летом, так и зимой. В зимний сезон почва промерзает на несколько метров и покрыта толстым слоем снега. Соответственно, во время зимних осадков радон не может выделяться. Кроме того, сцинтилляционные детекторы в Апатитах установлены на чердаке здания и помещены в достаточно плотно закрытый контейнер, что препятствует быстрому притоку газа к датчикам. Всё это исключает возможность происхождения возрастных от выделения радиоактивного радона.

Одним из очевидных предположений о происхождении возрастных гамма-излучения во время осадков было возможное наличие каких-либо радиоактивных компонентов в составе самих выпадающих осадков. Для быстрой проверки данной теории нами были собраны 5 литров дождевой воды во время 25 %-го возрастания и помещены под свинцовую оболочку к экспериментальному детектору. Детектор не показал какого-либо возрастания счёта. Кроме того, спектры, получаемые с наших детекторов при помощи 4096-и канального амплитудного анализатора, не показывают каких-либо энергетических линий, свойственных радионуклидам, в спектре, регистрируемом во время атмосферных осадков.

Для более тщательного анализа нами были собраны несколько образцов осадков в виде дождя и снега во время ряда событий и отданы на анализ в радиохимическую лабораторию. По результатам их анализа были выявлены следовые количества радиоактивных изотопов. Однако их количество в осадках было даже ниже, чем допустимые нормы в питьевой воде, и они не могли вызвать какое-либо заметное возрастание на таких датчиках, как наш детектор.

Сцинтилляционные детекторы в равной степени эффективно регистрируют как гамма-кванты, так и заряженную компоненту излучения (электроны, протоны и мюоны). Для определения вклада заряженной компоненты в регистрируемое излучение был установлен, описанный ранее в первой главе, детектор заряженной компоненты на основе счётчиков Гейгера-Мюллера. Известно, что чувствительность данного типа датчиков, использованных в нашем детекторе заряженной компоненты, к заряженной компоненте излучения на два порядка выше, чем к гамма-квантам. Кроме того, наличие второго слоя счётчиков Гейгера-Мюллера, разделяющей слои пластины из алюминия и схемы, регистрирующей совпадения в срабатывании двух слоёв счётчиков, гарантирует обнаружение только заряженной компоненты излучения. Полученные в ходе измерений данные показали, что детектор заряженной компоненты не показывает никакого значительного возрастания счёта во время события. Такое поведение детекторов характерно для всех событий, зарегистрированных с их применением. Это свидетельствует об отсутствии какого-либо заметного вклада заряженной компоненты в регистрируемое нами возрастание излучения во время осадков.

Один из экспериментальных сцинтилляционных детекторов был помещён в свинцовый «стакан» с толщиной стенок 5 см. Таким образом, обзор датчика был ограничен углом примерно в 30° . Сам «стакан» с датчиком был наклонён под углом примерно 45° к горизонту. Таким наклонным датчиком было зарегистрировано около 10 событий возрастания приземного гамма-фона. Параллельно эти события были зарегистрированы детектором, установленным в аналогичный свинцовый «стакан» вертикально. Амплитуда возрастаний счёта наклонного датчика составила не менее 90% от амплитуды возрастаний счёта основного детектора. Это говорит нам о том, что излучение практически изотропно по верхней полусфере.

В результате таких экспериментов, мы можем говорить о том, что данное излучение состоит из гамма-квантов, не содержит заметной заряженной компоненты, не вызывается радиоактивными примесями в осадках или

радиоактивными газами в атмосфере, рождается в слое атмосферы не выше нескольких сотен метров и практически изотропно по верхней полусфере. Также, наблюдаемые нами возрастания явно связаны с процессами в низкорасположенных дождевых или снеговых облаках. Таким образом, мы предполагаем, что единственным возможным источником гамма-излучения может быть тормозное рентгеновское излучение, производимое вторичными электронами космических лучей, получающими дополнительное ускорение в электрическом поле низкорасположенных дождевых облаков.

Нами было проведено моделирование предложенного механизма возникновения возрастаний рентгеновского излучения в приземном слое при помощи метода Монте-Карло с использованием программного пакета GEANT4.

Модель основывалась на прохождении через атмосферу потока протонов галактического космического излучения с известным спектром ($E^{-2.7}$), анализа возникающих на высоте облаков (1 – 2 км) потоков электронов и мюонов и регистрации у поверхности земли (100 м) потока гамма-квантов. Затем в модель добавлялось электрическое поле на высоте облачности (1 – 2 км) с определённой напряжённостью (в несколько кВ/м) и примесь воды, которая имитировала облако, висящее на соответствующей высоте и имеющее определённую водность. Оценивалось возрастание потока рентгеновского излучения у поверхности земли и зависимость этого возрастания от напряжённости поля в облаках. Программный пакет GEANT4 автоматически рассчитывал каскады частиц, возникающие при прохождении потока первичных космических лучей через атмосферу. Модель атмосферы основывалась на модели атмосферы NRLMSISE-00 из пакета Planetocosmic и представляла собой допустимое упрощение этой модели без заметных потерь точности расчётов. Изначальная модель представляла собой разбиение атмосферы, толщиной 80 000 м на равные слои по 100 м. Для каждой точки с шагом в 100 м указывались такие свойства атмосферы как плотность, давление, глубина, температура, количество частиц на единицу объёма и процентное соотношение газов. Однако такой частый шаг сильно увеличивал время моделирования. Поэтому данная модель была усечена до 50-и слоёв, расположенных в виде градиента с уменьшением шага при уменьшении высоты.

При моделировании задавалась различная высота и толщина облаков с электрическим полем внутри них, изменялась напряжённость электрического поля

для оценки его влияния на поток гамма квантов у земной поверхности. В результате моделирования регистрировались спектры потоков электронов, позитронов и мюонов на высоте облаков и спектр гамма-квантов у земной поверхности.

Третья глава посвящена методике прогноза радиационно-опасных потоков солнечных космических лучей по данным нейтронных мониторов. Дается описание быстрой методики моделирования параметров событий СКЛ на уровне земли, позволяющее давать в реальном времени оперативный прогноз радиационной опасности на несколько часов вперед. Приводятся примеры такого моделирования на примере событий прежних лет, поскольку за время разработки методики не было зарегистрировано ни одного события солнечных космических лучей.

Мировая сеть нейтронных мониторов все еще остается единственным достоверным источником данных о релятивистских солнечных протонах (РСП), регистрируемых во время событий солнечных космических лучей (СКЛ) на уровне земли (международное название: GLE — Ground Level Enhancement). Характеристики этих частиц определяются по данным мировой сети нейтронных мониторов (НМ) посредством моделирования GLE. Наиболее полная и адекватная методика определения параметров потока РСП за пределами магнитосферы по данным сети нейтронных мониторов была разработана ранее в нашем секторе космических лучей ПГИ. Эта полная методика основана на решении обратной задачи методом наименьших квадратов. По данным мировой сети нейтронных мониторов восстанавливается первичный поток РСП на границе магнитосферы. Данная методика охватывает все стадии процесса от расчёта асимптотических конусов приёма до регистрации потока вторичных нейтронов нейтронными мониторами на поверхности земли. Эта методика предназначена для научных задач: исследование генерации РСП на Солнце, распространение РСП в межпланетном пространстве и т.д. Однако полная методика требует значительных вычислительных ресурсов, и расчёты по ней занимают длительное время. Так количество траекторий для расчета асимптотического конуса приёма только для одного монитора может достигать 200 000. При этом необходимо использовать данные, по меньшей мере, 30 – 40 мониторов, а решение обратной задачи сводится к поиску минимума функции, содержащей 10 – 12 переменных

К настоящему времени существуют сетевые ресурсы, содержащие данные нейтронных мониторов в реальном времени. Одной из таких систем является —

NMDB (Neutron Monitor Database; <http://www01.nmdb.eu/>). Хотя события РСП происходят достаточно редко, они вызывают возрастание радиационного фона в атмосфере в десятки раз. В этом случае задача экспресс анализа данных нейтронных мониторов и определения характеристик РСП является актуальной. Автором была разработана и протестирована на нескольких прошлых событиях GLE быстрая методика моделирования параметров СКЛ. За основу этой быстрой методики взята полная методика, описанная выше. Поскольку основной целью являлось получение параметров потока первичных солнечных протонов в реальном времени, полная методика потребовала внесения существенных изменений с целью упрощения и ускорения расчётов. Данный экспресс анализ прежде всего направлен на получение информации о радиационной обстановке в любой точке Земли и на различных высотах в тропосфере.

Практика показывает, что ограниченный метод достаточно достоверен для оперативного прогноза развития GLE в реальном времени и раннего обнаружения радиационной опасности в средних и низких энергиях солнечных протонов.

События GLE как правило состоят из двух компонент. Вначале присутствует быстрая компонента с экспоненциальным спектром РСП. Длительность её составляет 10 – 20 минут. Затем наступает фаза медленной компоненты со степенным спектром РСП. Длится она до конца GLE — от нескольких часов до полусуток.

Прогноз, основанный на быстрой методике моделирования, возможен вследствие того факта, что наблюдается хорошее соответствие спектров медленной компоненты РСП, полученных моделированием GLE, и спектров прямых измерений солнечных протонов, наблюдаемых во время максимума возрастания (ТОМ) в диапазоне средних энергий. Наблюдаемое соответствие спектров медленной компоненты РСП, и максимальных спектров солнечных протонов средних энергий, мы можем принять как следствие единого механизма ускорения частиц на Солнце. Поэтому энергетические спектры СКЛ в высоких и низких энергиях совпадают, хотя высокоэнергичные частицы приходят от Солнца и достигают максимальной интенсивности раньше низкоэнергичных. Отсюда также ясно, что для прогноза потоков СКЛ умеренных энергий по наземным измерениям необходимо пользоваться только данными медленной компоненты РСП. У быстрой компоненты РСП слишком малая интенсивность в средних и низких

энергетических областях, и поэтому она не представляет серьезной радиационной опасности.

С алгоритмами, полученными для ограниченного моделирования, была создана программа для автоматического вычисления параметров РСП в режиме реального времени. Программа начинает работать автоматически после получения сигнала о начале GLE. Результат работы программы — спектры солнечных протонов ($E_p > 430$ МэВ), получаемые в режиме реального времени. На основе этих спектров, можно давать прогноз максимальной интенсивности солнечных протонов в энергетическом диапазоне от 100 до 400 МэВ.

Максимальные интенсивности солнечных протонов в средних энергиях достигаются на 1 – 10 часов позже относительно нейтронных мониторов. Таким образом, определение спектров РСП по данным наземных наблюдений в режиме реального времени позволяет нам заблаговременно предсказывать также радиационную опасность от протонов средних энергий, которые могут представлять радиационную опасность для пилотируемых космических полетов, а также для пилотов и пассажиров на трансполярных авиатрассах.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации:

1. Создан аппаратно-программный комплекс для мониторинга сложного состава проникающих излучений в атмосфере. В состав комплекса, кроме стандартного нейтронного монитора со свинцом (18-НМ-64), входят:

- бессвинцовая секция нейтронного монитора
- сцинтилляционный гамма спектрометр
- датчики состояния окружающей среды
- информационно-диагностическое устройство для регистрации данных и их анализа

Комплекс установлен в двух высокоширотных пунктах: Апатиты (субарктическая зона) и Баренцбург (арктическая зона).

2. Проведены работы по калибровке и тестированию устройств комплекса, в том числе посредством модельных расчетов методами Монте-Карло при помощи пакетов GEANT4 и Planetocosmics.

3. Проведен мониторинг гамма (рентгеновского) излучения и его спектрального состава в приземном слое атмосферы в двух высокоширотных пунктах: Апатиты и Баренцбург.

4. Впервые показано существование избыточного гамма (рентгеновского) фона, связанного с атмосферными осадками. Показано, что это излучение не связано с радиоактивностью.

5. Исследованы особенности излучения, сопровождающего атмосферные осадки. Показана связь этого излучения со слоисто-дождевым типом облачности.

6. Разработана модель генерации рентгеновского излучения, связанного с атмосферными осадками. Эта модель основывается на электрическом поле в слоисто-дождевых облаках. Энергичные электроны в атмосфере доускоряются электрическим полем облаков и генерируют тормозное рентгеновское излучение, которое затем достигает Земли.

7. Предложена система оперативного прогноза радиационной опасности от солнечных космических лучей (СКЛ), основанная на данных нейтронных мониторов.

8. Разработана упрощенная методика определения параметров потока релятивистских СКЛ по данным нейтронных мониторов, позволяющая в реальном времени вычислять эти характеристики с достаточной точностью.

9. Показано, что продлением спектров релятивистских солнечных протонов, полученных из данных нейтронных мониторов, можно предсказать с заблаговременностью 1 – 10 часов интенсивность солнечных протонов с энергиями в десятки – сотни МэВ.

Результаты, составившие основу диссертационной работы, изложены в следующих публикациях, включенных в текущий перечень ВАК:

1. Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В., Луковникова А.А., Торопов А.А. СУТОЧНАЯ И СЕЗОННАЯ ВАРИАЦИИ МЯГКОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2019. Т. 83. № 5. С. 655-658
2. Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В., Маурчев Е.А., Михалко Е.А., Луковникова А.А., Торопов А.А. ОБЩИЕ СВОЙСТВА ВОЗРАСТАНИЙ ГАММА-ФОНА И ИХ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2019. Т. 83. № 5. С. 659-662
3. Михалко Е.А., Балабин Ю.В., Маурчев Е.А., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ВОЗРАСТАНИЙ ФОНОВОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2019. Т. 83. № 5. С. 663-665
4. Михалко Е.А., Балабин Ю.В., Маурчев Е.А., Германенко А.В. НОВЫЙ УЗКОНАПРАВЛЕННЫЙ НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР В

КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. № 1. С. 85-88

5. Германенко А.В., Балабин Ю.В. СЕЗОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТАХ ВТОРИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2017. Т. 81. № 4. С. 574-576
6. Германенко А.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Щур Л.И. ПРИРОДА ВАРИАЦИЙ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ОСАДКОВ // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2. № 1. С. 56-63
7. Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б., Вашенюк Э.В. АНАЛИЗ СОБЫТИЯ GLE72 6 ЯНВАРЯ 2014 Г // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 5. С. 612
8. Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б., Вашенюк Э.В. ВАРИАЦИИ ЕСТЕСТВЕННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ФОНА В ПОЛЯРНОЙ АТМОСФЕРЕ // Геомагнетизм и аэрномия. 2014. Т. 54. № 3. С. 376
9. Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б., Вашенюк Э.В. ОСОБЕННОСТИ ВАРИАЦИЙ ГАММА-ФОНА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 5. С. 639
10. Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. ПРОГНОЗ РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ПОТОКОВ СКЛ ПО ДАННЫМ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2011. Т. 75. № 6. С. 819-821

Благодарности

Автор выражает искреннюю глубокую признательность научному руководителю Балабину Юрию Васильевичу за постановку задачи, ценные советы, и помощь в организационных вопросах.

Автор сердечно благодарит Гвоздевского Б.Б., Щура Л.И., Маурчева Е.А., Мельник Н.А, способствовавших написанию этой работы.