

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М. В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра Физики космоса

На правах рукописи



Дроздов Александр Юрьевич

Поток нейтронов, связанный с грозовой активностью, за пределами атмосферы

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва, 2010 г.

Работа выполнена на кафедре Физики космоса Физического факультета
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научные руководители:
Доктор физико-математических наук, профессор
Панасюк Михаил Игоревич

Кандидат физико-математических наук
Григорьев Александр Валентинович

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, профессор
Бабич Леонид Петрович
РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров)

доктор физико-математических наук, профессор
Веселовский Игорь Станиславович
НИИЯФ МГУ (г. Москва)

Ведущая организация:
Институт прикладной физики Российской Академии наук
(г. Нижний Новгород)

Защита состоится 9 февраля 2011 года в 15:00 на заседании Совета по
защите докторских и кандидатских диссертаций Д.501.001.45 при
Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по
адресу: Россия, 119991, г. Москва, Ленинские Горы д.1 стр. 5 (19-й корпус
НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИ ядерной физики
имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан «22» декабря ___ 2010 года.

Ученый секретарь
Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д.501.001.45
кандидат физико-математических наук **О.М. Вохник**



Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена изучению потоков нейтронов на высотах до 450 км и исследованию возможности их регистрации на борту искусственных спутников Земли.

Актуальность работы

Первое экспериментальное указание на генерацию нейтронного излучения вследствие грозовой активности было получено в 1985 году [1]. В наши дни это явление продолжают регистрировать современные наземные установки [2]. Несмотря на достаточно давнюю историю наблюдений и значительное число теоретических работ по механизму генерации нейтронов во время грозовой активности (появившихся в основном в последнее десятилетие), вопрос о происхождении таких нейтронов остается открытым.

Одна из моделей генерации нейтронов вследствие грозовой активности предполагает наличие ядерного взаимодействия в стволе молнии [3]. Однако по современным представлениям нейтроны генерируются посредством сложного механизма взаимодействия тормозного излучения релятивистских убегающих электронов, которое может возникать во время грозы, с атмосферой [4]. Гамма-компонента излучения наблюдалась в космических экспериментах [5] и называется « γ -вспышкой» или TGF (англ. *terrestrial gamma-ray flash*). Приведенная информация является предпосылкой к рассмотрению возможности наблюдения нейтронов от гроз на борту космических аппаратов.

В ходе измерений потока нейтронов на борту орбитальной станции «МИР» и микроспутника «Колибри-2000», летавших на высоте ~ 350 км, было зафиксировано повышение нейтронного фона. На основе дальнейшего анализа данных этих измерений был сделан вывод о возможной корреляции наблюдаемого повышения нейтронного фона с грозовой активностью [6].

Однако наблюдение таких нейтронов связано с множеством вопросов.

Для достоверной регистрации потока нейтронов от гроз необходимо учитывать наличие постоянного потока нейтронов альbedo от атмосферы Земли и вторичных нейтронов, генерируемых в теле космического аппарата. Кроме этого, необходимо знать характеристики источника нейтронов от гроз, чтобы судить о возможности регистрации таких нейтронов за пределами атмосферы.

В данной работе проводится численное моделирование распространения нейтронов альbedo и нейтронов от гроз, при рассмотрении различных сценариев генерации последних. Рассматриваются возможность регистрации нейтронов от гроз в реальном космическом эксперименте, схема и приборная часть такого эксперимента.

Цель работы

Целью данной работы является изучение потока нейтронов с энергией от тепловых значений до нескольких МэВ в околоземном пространстве на высотах до 450 км и исследование возможности регистрации нейтронов от гроз на борту низкоорбитального спутника.

Задачи работы

1) Анализ основных источников нейтронов околоземного пространства.

2) Расчет характеристик нейтронов (спектр, пространственное и временное распределение на разных высотах), генерируемых во время грозы.

3) Моделирование процесса распространения нейтронов при различных параметрах их источников (высота, направленность, спектр) в атмосфере.

4) Сопоставление характеристик, полученных нейтронных потоков на высотах до 450 км.

5) Анализ возможности регистрации нейтронов от гроз на борту низкоорбитального спутника.

Научная значимость и новизна работы

Научная значимость и новизна работы определяются следующим:

1) Разработана оригинальная численная модель распространения тепловых нейтронов в неоднородной среде на основе метода клеточных автоматов, которая может быть использована для решения различных задач, требующих расчета транспорта нейтронов.

2) Рассчитаны характеристики источника нейтронов, генерируемых во время грозовой активности вследствие взаимодействия тормозного излучения релятивистских убегающих электронов с атмосферой, с учетом современных данных об источниках γ -вспышек.

3) Рассчитаны характеристики потока нейтронов альbedo Земли на высотах до 450 км.

4) Рассчитаны характеристики потока нейтронов от гроз на высотах до 450 км.

5) Путем сравнения результатов проведенных расчетов определены условия возможности наблюдения нейтронов от гроз на борту низкоорбитальных спутников.

Практическая ценность работы

Результаты моделирования могут быть использованы для получения потоков нейтронов на разных высотах, как во время грозовой активности, так и в ее отсутствие. Полученные характеристики потоков нейтронов на высотах до 450 км могут быть учтены при анализе данных космических экспериментов. Схемы и алгоритмы вычислений могут быть использованы в космической и авиационной отрасли для оценки радиационной обстановки.

Личный вклад автора

Автором проведен анализ проблем, возникающих при наблюдении нейтронов от гроз в реальных космических экспериментах. Проведен качественный теоретический анализ распространения нейтронов в атмосфере. На основе данного анализа автором разработана численная модель транспорта нейтронов, использующая метод клеточных автоматов. Автором разработана программа расчета распространения тепловых нейтронов в атмосфере Земли и программа расчета характеристик нейтронов альбедо Земли на высотах до 450 км. Совместно со студентом физического факультета МГУ Малышкиным Ю. М. (выполнявшим дублирующий расчет) разработаны программы расчета характеристик источника нейтронов от гроз и расчета характеристик таких нейтронов на высотах до 450 км. Автором проведен сравнительный анализ рассчитанных потоков нейтронов альбедо Земли и нейтронов от гроз на низкоорбитальных высотах. Автор участвовал в разработке конструкторской документации, создании и испытаниях научной аппаратуры «Разрез».

Основные положения, выносимые на защиту

В диссертационной работе защищаются результаты:

- 1) Результаты расчета распространения тепловых нейтронов до высот 450 км в атмосфере Земли.
- 2) Характеристики потоков нейтронов альбедо Земли на высотах до 450 км.
- 3) Характеристики потока нейтронов, генерируемых во время грозовой активности, в области генерации и на высотах до 450 км.
- 4) Результаты сравнительного анализа потоков нейтронов альбедо и нейтронов от гроз на высотах до 450 км.

5) Возможность регистрации нейтронов от гроз в космических экспериментах.

Апробация работы

Материалы данной работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях:

- 1) AGU Charman (Университет Пенн Стейт , США, 2009 г.)
- 2) «TEPA-2010» (Нор Амберд, Армения, 2010)
- 3) STP-12 (г. Берлин, Германия, 2010 г.)
- 4) NWP-08 (г. Нижний Новгород, Россия, 2008 г.)
- 5) WDS-2010 (г. Прага, Чехия, 2010 г.)
- 6) «Ломоносов-2009» (г. Москва, Россия, 2009 г.)
- 7) «Ломоносов-2010» (г. Москва, Россия, 2010)
- 8) Молодежная международная конференция «Космические исследования и образование» (г. Ульяновск, Россия, 2008 г.)

Материалы опубликованы в двух статьях в рецензируемых журналах и в 12 трудах и тезисах конференций.

Структура диссертации

Диссертация содержит 130 страниц, включает в себя 63 иллюстрации и 7 таблиц. Состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 87 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы и дается обзор предпосылок для проводимого исследования, формулируется основная цель, новизна исследования, раскрывается практическая и научная значимость работы, перечисляются положения, выносимые на защиту.

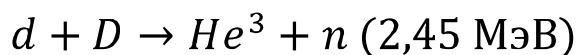
В первой главе работы приведен подробный анализ возможных источников нейтронов, которые могут быть зарегистрированы на борту спутника. Так как время жизни свободных нейтронов ограничено и составляет ~14,5 минут, можно утверждать, что в межзвездном пространстве нейтронов нет. В атмосфере Земли и на ее поверхности нейтроны связаны в ядрах. Свободные нейтроны образуются под действием

космических лучей (КЛ), вторичного излучения, быстрых частиц радиоактивного распада, выделяются при спонтанном делении природного урана или радона, образуются во время гроз. Другими источниками могут быть Солнце и Луна, но потоки нейтронов от таких источников в околоземном пространстве крайне малы [7].

Основной поток нейтронов в околоземном пространстве создают нейтроны альbedo атмосферы Земли, образованные под действием КЛ. Характерной особенностью потока таких нейтронов является наличие широтной зависимости, обусловленной конфигурацией магнитного поля Земли. Форма спектра нейтронов альbedo практически не меняется с широтой и долготой.

Вклад радиоактивных газов в образование нейтронов рассмотрен в третьей главе диссертации. Поток таких нейтронов незначительно влияет на полный поток нейтронов на интересующих высотах околоземного пространства.

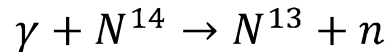
В главе описаны известные механизмы генерации нейтронов вследствие грозовой активности. Одним из возможных механизмов является образование нейтронов в стволе молнии вследствие дейтрон-дейтронного взаимодействия [3]. В атмосфере присутствует молекулы тяжелой воды со связанным дейтерием. При протекании сильных электрических токов в молниях может происходить ускорение ядер до энергий достаточных для осуществления реакции дейтрон-дейтронного взаимодействия:



Механизм предполагает образование 10^9 - 10^{10} нейтронов, на высоте до ~ 10 км за один мощный разряд.

Современной моделью является образование нейтронов посредством фотоядерных реакций, протекающих в гигантских восходящих атмосферных разрядах (ВАР), развивающихся над грозowymi облаками [4]. Такие явления возникают в результате пробоя стратосферы на убегающих электронах. Эти так называемые лавины релятивистских убегающих электронов

(ЛРУЭ) сопровождаются импульсами жесткого γ -излучения. Считается, что γ -вспышка есть ни что иное как тормозное излучение ЛРУЭ. Спектр типичной вспышки доходит до 10-20 МэВ. Таким образом, возможна фотоядерная реакция:



Аналогичная реакция может протекать и на кислороде. По оценкам, количество генерируемых нейтронов за одну γ -вспышку может доходить до 10^{15} , а высота генерации может достигать ~ 30 км.

До настоящего времени окончательно не разрешены разногласия относительно сценария ускорения электронов. Одна из гипотез предполагает ускорение электронов в квазипостоянных полях. Анализ формы спектров γ -вспышек показал, что этот механизм хорошо объясняет события генерации γ -квантов на высотах 10-20 км. Другая гипотеза заключается в ускорении электромагнитными импульсами тока в канале возвратного удара. Она предполагает возможность возникновения ЛРУЭ на высотах до 50-60 км [8].

В работе [9] в предположении точечного источника путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными была получена допустимая высота генерации γ -вспышки в диапазоне 15-20 км. При этом спектр источника мог соответствовать как тормозному излучению в случае квазиэлектростатического поля, так и жесткому степенному спектру с показателем -1 в случае убегающих электронов в импульсных полях.

Детальный анализ полученных в эксперименте BATSE спектров, проведенный в работе [8], указывает на то, что помимо низких высот, γ -кванты могут генерироваться на больших высотах от 30 до 40 км.

Таким образом, вопрос о природе возникновения γ -вспышек является открытым. Возможным направлением поиска ответа на этот вопрос является изучение генерации нейтронов от гроз и их регистрация на борту космического аппарата.

В главе также обсуждаются несколько уже выполненных космических экспериментов по регистрации нейтронов, и приводится анализ условий наблюдения нейтронов от гроз в данных экспериментах. Суммарный поток нейтронов на борту низкоорбитального спутника складывается из трех компонент. Постоянный вклад обеспечивают нейтроны альbedo атмосферы Земли. Второй компонентой являются вторичные – локальные нейтроны, образованные взаимодействием КЛ и частиц радиационного пояса Земли с веществом космического аппарата. Третьей компонентой будем считать нейтроны других источников, которыми могут являться космические объекты, ионосферные эффекты (нейтроны от гроз) или источники нейтронов на Земле. Данные, которые на текущий момент имеются в распоряжении, не позволяют выделить нейтроны от гроз на фоне нейтронов от других источников.

Представленный в этой главе литературный анализ показывает, что проблема регистрации нейтронов от гроз на борту спутника на данный момент открыта и является актуальной для рассмотрения.

Во второй главе рассмотрены теоретические вопросы, связанные с распространением нейтронов в атмосфере. Родившись с энергией несколько МэВ, нейтроны в атмосфере сначала эффективно замедляются (уже после нескольких соударений с ядрами среды, на расстояниях до десятка километров в нижних слоях атмосферы за время порядка нескольких секунд), затем быстро термализуются, продолжая терять энергию и диффундируя, и, наконец, движутся с тепловой энергией, подчиняясь только законам диффузии. Захват нейтронов при этом оказывается менее значимым процессом и им можно пренебречь в данной задаче. Это позволяет рассматривать распространение нейтронов от гроз до интересующих высот в первом приближении как диффузию тепловых нейтронов от мгновенного точечного источника. В неоднородной среде, однако, диффузионное приближение может оказаться неприменимым из-за быстрого изменения плотности атмосферы на длине свободного пробега. Другой параметр, изменяющийся с

высотой в атмосфере – температура. Однако в энергетическом масштабе температура атмосферы находится в рамках одного порядка, поэтому можно считать, что она постоянна и соответствует тепловой энергии 0,025 эВ.

Условие применимости диффузионного приближения для моноэнергетических нейтронов можно записать в виде $\frac{\delta\lambda}{\lambda} = \frac{\delta N}{N} \ll 1$, где $\delta\lambda$ - изменение длины свободного пробега за счет изменения плотности среды δN . Данное условие в атмосфере нарушается на высоте ~50 км, выше которой движение нейтронов можно считать свободным в силу огромной длины свободного пробега (~1000 км).

Таким образом, процесс распространения нейтронов только на некотором участке может быть представлен в виде решения уравнения диффузии. Поиск аналитического решения даже этого уравнения в соответствующих задаче условиях оказывается затруднительным, что приводит к необходимости использования численных методов.

В главе дана подробная характеристика методов расчета транспорта нейтронов с помощью разностных схем, клеточных автоматов и метода Монте-Карло. Для расчета распространения нейтронов тепловых энергий в атмосфере Земли, разработана собственная численная модель на основе метода клеточных автоматов (КА).

КА является набором клеток с заданными состояниями в конкретный момент времени и правилами изменения этих состояний в следующий момент. С точки зрения решения физической задачи необходимо определить физические переменные, которые будут отвечать за состояние клетки, и физические процессы, которые будут приводить к изменению этого состояния. Для рассмотрения распространения нейтронов в неоднородной среде за состояние клетки была принята вероятность нахождения в ней нейтрона. Процесс изменения состояния связывался с актами взаимодействия нейтронов с атмосферой (Рисунок 1). Размерность КА была выбрана исходя

из минимальных длины свободного пробега и времени между взаимодействиями.

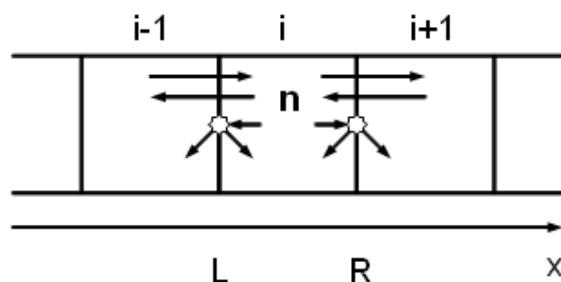


Рисунок 1 Схема взаимодействий нейтронов в клеточном автомате

Формулы, определяющие состояние клеток КА и правила перехода в одномерном случае имеют вид:

$$P_R(i, t) = (P_R(i - 1, t - 1) + P_L(i, t - 1))P_{int}(i - 1)P_{int}^R$$

$$P_L(i, t) = (P_L(i + 1, t - 1) + P_R(i, t - 1))P_{int}(i)P_{int}^L,$$

где $P_R(i, t), P_L(i, t)$ – вероятности обнаружить нейтрон в клетке i , переходящий, соответственно, вправо и влево из клетки i в момент времени t , $P_{int}(i)$ – вероятность взаимодействия нейтрона со средой в клетке (учитывается при проходе нейтрона через правую границу клетки i), P_{int}^R, P_{int}^L – вероятность перехода в правую и левую клетку, соответственно, после взаимодействия со средой. Количество нейтронов в клетке вычисляется как произведение суммы вероятностей $P_R(i, t) + P_L(i, t)$ и полного количества нейтронов в КА.

Использование данной схемы позволяет рассчитывать процесс распространения нейтронов, как в диффузионной области, так и в области свободного распространения нейтронов. Недостатком данной схемы является невозможность изменения энергии нейтрона. Следовательно, данная схема не позволяет учитывать изменение спектра нейтронов. Но для количественных оценок в приближении полного замедления нейтронов этого вполне достаточно. Достоинством этого метода можно назвать невысокую потребность к ресурсам персонального компьютера.

В третьей главе приведены результаты моделирования рождения и распространения нейтронов.

Для проверки разработанной модели на основе метода КА приведено сравнение результатов расчета по этой модели в однородной среде с решением уравнения диффузии при тех же условиях. Результат расчета оказался близок к решению уравнения.

Далее в главе разработанная модель применяется для оценки потока нейтронов от гроз на борту спутника. Рассматриваются два механизма генерации нейтронов: в стволе молнии и в результате фотоядерных реакций. Так как нейтроны быстро термализуются в атмосфере, источник полагается точечным и тепловым. Для верхней оценки потока нейтронов этого вполне достаточно. Для первого механизма источник находится на высоте 10 км и генерирует 10^{10} нейтронов, для второго – источник находится на высоте 30 км и генерирует 10^{15} нейтронов.

Получено, что механизм образования нейтронов в стволе молнии не обеспечивает достаточного для наблюдения на орбитальных высотах (~350 км) количества нейтронов. Скорость счета нейтронов от гроз на микроспутнике «Колибри-2000» была бы $Q \cong 10^{-5}$ н/с. В свою очередь, показана принципиальная возможность наблюдения нейтронов на тех же высотах, рожденных по механизму фотоядерных реакций (от γ -вспышек): для того же спутника скорость счета $Q = 1,3$ н/с, что совпадает со значением наблюдавшегося повышения скорости счета нейтронов на спутнике «Колибри-2000» [6].

На высотах ~30 км замедление происходит менее эффективно, чем в плотных слоях атмосферы. Учитывая то, что плотность атмосферы резко падает с высотой, для детального рассмотрения вопроса регистрации нейтронов от гроз на борту космического аппарата необходимо учитывать спектр нейтронов. Кроме этого, существует постоянный «фоновый» поток нейтронов альбедо. Так как разработанная модель не позволяет учитывать вышеперечисленное, в главе проведено численное моделирование процессов генерации и транспорта нейтронов методом Монте-Карло с использованием пакета Geant4.

Для расчета характеристик источника нейтронов, рождаемых от γ -вспышки, в программе задавался точечный источник γ -излучения. Характеристики источника выбирались в соответствии с современными теориями о генерации γ -вспышек, описанными в первой главе диссертации. Источник задавался направленным вверх с углом раствора 40° . Высота источника варьировалась от 15 км до 40 км. Спектр являлся степенным с показателем -1 в диапазоне от 10 МэВ до 30 МэВ. В расчете моделировалось 10^8 γ -квантов.

Результатом расчета является набор родившихся нейтронов с указанными значениями энергии, положения и направления. Таким образом, были получены спектры родившихся нейтронов и их пространственное распределение.

Характеристики полученного набора нейтронов использовались для расчета прохождения нейтронов от гроз сквозь атмосферу до высот от 50 км до 450 км. От каждого промоделированного источника γ -излучения рассчитывалось прохождение 10^7 нейтронов. Таким образом, вычислялись характеристики нейтронов от гроз на высотах низкоорбитальных спутников. Рассчитанные спектры сравнивались с аналогичными спектрами, рассчитанными в работе [10] (Рисунок 2).

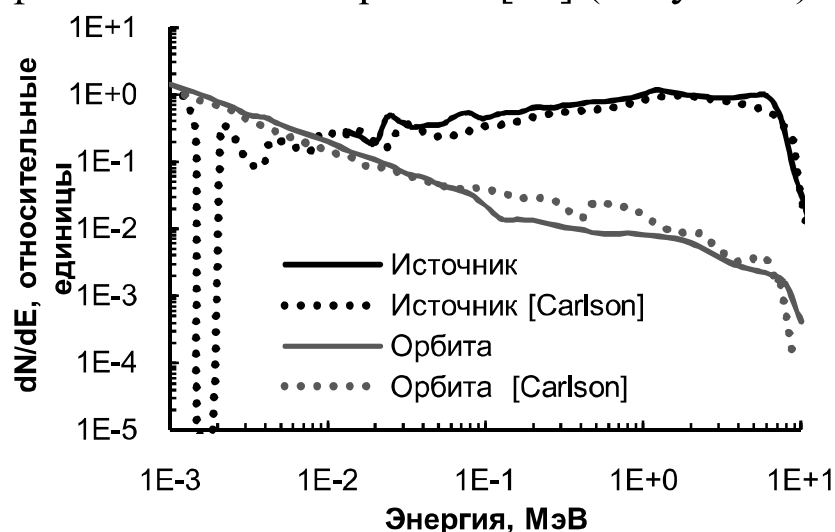


Рисунок 2 Спектр нейтронов от γ -вспышки (Источник), и на высоте 350 км (Орбита) в сравнении с расчетами работы [10]

Для определения характеристик потока нейтронов альбедо на высотах от 50 км до 450 км рассчитывалось прохождение

нейтронов, рожденных в атмосфере Земли. Источником являлось пространственное распределение нейтронов на высотах от 4 км до 30 км [11]. Учитывались широтная и высотная зависимости и спектр [12].

Для проверки достоверности полученных результатов, рассчитанный спектр (Рисунок 3) и широтная зависимость (Рисунок 4) на высоте 450 км сравнивались с экспериментальными и расчетными данными других авторов. Все данные находятся в хорошем согласии друг с другом.

Для определения возможности регистрации нейтронов от гроз на орбите проведено сравнение их расчетных спектров и расчетных спектров нейтронов альbedo на разных высотах регистрации. Для удобства сравнения спектры пересчитаны в единицы потока нейтронов (Рисунок 5). Пересчет для нейтронов альbedo осуществлялся исходя из литературных данных. Пересчет для нейтронов от гроз осуществлялся в предположении максимального количества γ -квантов в источнике.

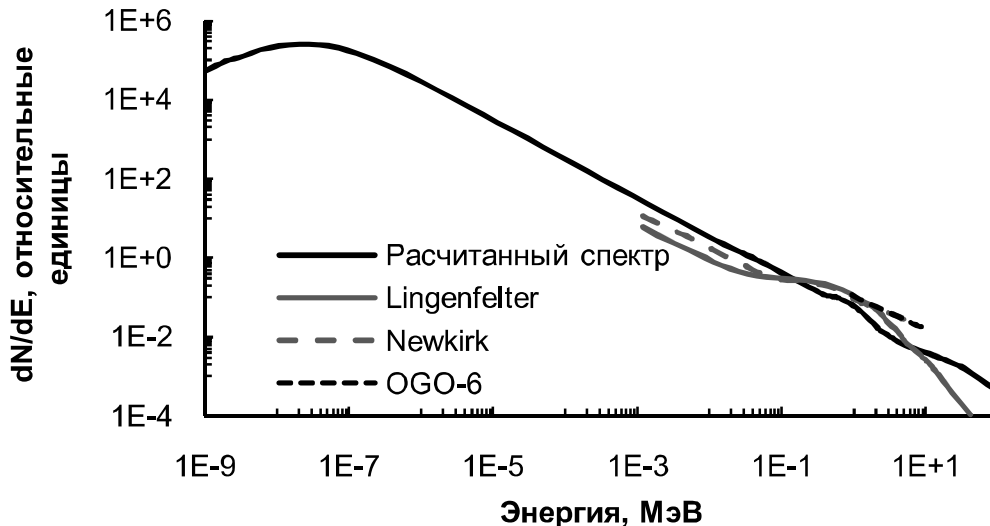


Рисунок 3 Спектры нейтронов альbedo на высоте 450 км в сравнении с данными спутника OGO-6 [13] и расчетами в работах [14] и [15]

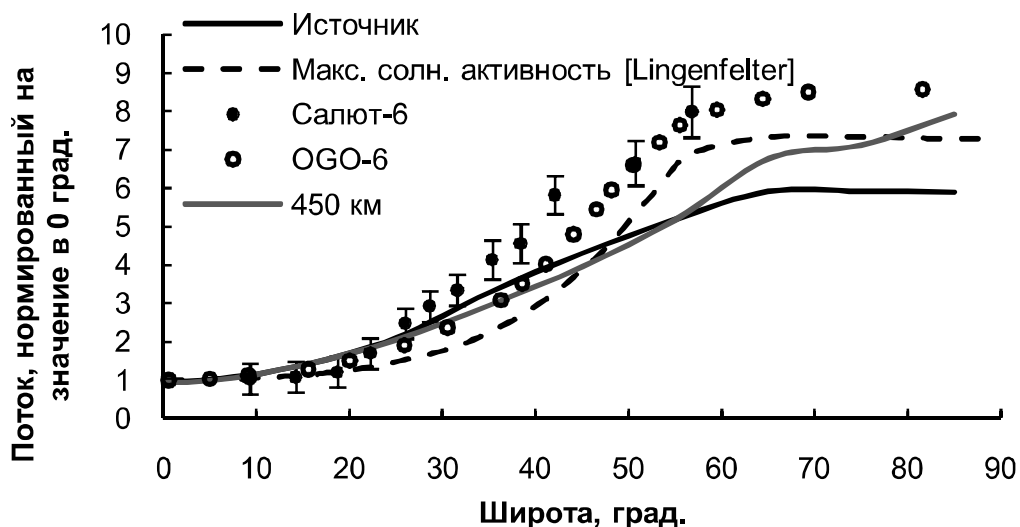


Рисунок 4 Широтная зависимость нейтронов альbedo на высоте 450 км в сравнении с данными спутника OGO-6, орбитальной станции Салют-6 [16] и расчетами в работе [14] в максимуме солнечной активности

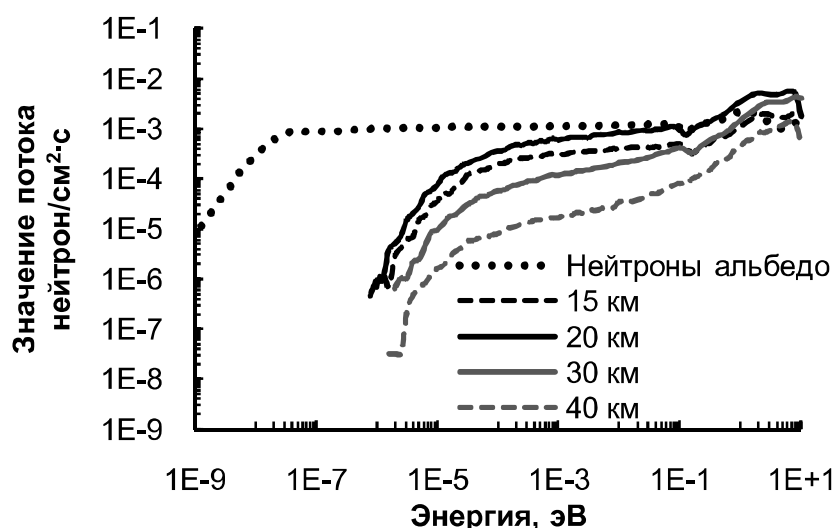


Рисунок 5 Сравнение спектров нейтронов альbedo в 0° широты и спектров нейтронов от гроз, рассчитанных для источника «мощностью» 10^{17} γ -квантов на высоте регистрации 200 км

Для широты наблюдения от 0° до 10° и высоты от 200 км до ~350 км поток нейтронов от гроз превышает поток нейтронов альbedo больше, чем в 2 раза для энергий больше 1-2 МэВ. С увеличением широты и высоты поток нейтронов альbedo сильно возрастает по сравнению с потоком нейтронов от гроз, что делает наблюдение последних невозможным. Кроме этого, на основе полученных результатов рассмотрены характеристики источника

γ -излучения, которые могут обеспечить наблюдение нейтронов от гроз.

Таким образом, показана принципиальная возможность наблюдения нейтронов от гроз и определены оптимальные параметры для их регистрации на борту спутника.

В четвертой главе рассмотрен вопрос о регистрации нейтронов на борту космического аппарата. Описана разработанная в НИИЯФ МГУ научная аппаратура (НА) «Разрез», предназначенная для регистрации нейтронов и других излучений (Таблица 1).

Таблица 1 Список измеряемых параметров НА «Разрез»

Измеряемый параметр	Диапазон измерения
Потоки нейтронов	Интегральный поток: $E_n > 0.025$ эВ до нескольких кэВ. $E_n > \sim 100$ кэВ. $E_n > \sim 1$ МэВ.
Потоки протонов	Интегральный поток: $E_p > \sim 50$ МэВ

Предполагается установка НА «Разрез» на борт малого космического аппарата. Таким образом, влияние локальных нейтронов будет сведено к минимуму. Набор детекторов позволит регистрировать нейтроны разных энергий, в том числе с энергией > 1 МэВ. Наличие детектора заряженных частиц, позволит исключить регистрацию нейтронов, рожденных в результате таких процессов как солнечные вспышки. Таким образом, НА «Разрез» может быть использована в космическом эксперименте для регистрации нейтронов от гроз.

В главе также описаны испытания данной аппаратуры и возможность ее использования на разных космических платформах.

В заключении приведены основные результаты и кратко сформулированы основные выводы диссертации.

Выводы

1) Разработана оригинальная модель распространения тепловых нейтронов в неоднородной среде методом клеточных автоматов.

2) Проведен аналитический и численный расчет потока тепловых нейтронов в атмосфере на высотах ~ 350 км по механизму генерации нейтронов в стволе молнии. Показано, что поток таких нейтронов недостаточен для наблюдения.

3) Получен спектр и пространственное распределение источников нейтронов, генерируемых по механизму фотоядерных реакций во время гроз, расположенных на высотах 15 — 40 км и спектр, пространственное распределение, временное распределение и выход таких нейтронов на высоты 50 — 450 км методом Монте-Карло. На основе сравнения результатов этого расчета с расчетом потока нейтронов альbedo в атмосфере на тех же высотах показана принципиальная возможность наблюдения нейтронов от гроз на орбите.

4) Показана возможность использования научной аппаратуры “Разрез”, предназначенной для регистрации заряженных и нейтральных излучений в космическом эксперименте для регистрации нейтронов от гроз.

Работы, опубликованные по теме диссертации

1. *Drozdov A., Amelushkin A., Bratolyubova-Tsulukidze L., Churilo I., Grigoriev A., Grigoryan O., Iudin D., Mareev E., Nechaev O., Petrov V.* Experiment based on spacesuit "Orlan-M". Neutron fluxes from thunderstorm // *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, A00E51, - 2010. doi: 10.1029/2009JA014903
2. *Grigoriev A.V., Grigoryan O.R., Drozdov A.Yu., Malyshkin Y.M., Popov Y.V., Mareev E.A., Iudin D.I.* Thunderstorm neutrons in near space: Analyses and numerical simulation // *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, A00E52, - 2010. - doi:10.1029/2009JA014870.
3. *Amelushkin A.M., Bratolubova-Tsulukidze L.S., Grigoriev A.V., Grigoryan O.R., Drozdov A.Yu., Nechaev O. Yu., Churilo I.V., Mareev E.A., Iudin D.I.* Experiment based on spacesuite «Orlan-M». Neutron flux from thunderstorm // *Proc. Of V International Workshop, N. Novgorod, July 20-26, 2008* ed. By A.G. Litvak, Vol. 3 - Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics, Russian Academy of Science, 2008, P. 26-28
4. *Grigoriev A.V., Grigoryan O.R., Drozdov A.Yu., Popov Yu.V., Mareev E.A., Iudin D.I.* Thunderstorm neutrons at altitudes up to 400 km: Some theoretical estimations // *Proc. Of V International Workshop, N. Novgorod, July 20-26, 2008* ed. By A.G. Litvak, Vol. 3. - Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics, Russian Academy of Science, 2008, P. 43-45
5. *Drozdov A.Yu., Amelushkin A.M., Bratolyubova-Tsulukidze L.S., Grigoriev A.V., Grigoryan O.R., Iudin D.I., Mareev E.A., Nechaev O.Yu., Petrov V.L.,* Experiment Based On Spacesuit «Orlan-M». Neutron Fluxes From Thunderstorm // *AGU Chapman Conference on Effects of Thunderstorms and Lightning in the Upper Atmosphere - State College, USA, 2009*, p 52-53.
6. *Grigoriev A.V., Drozdov A.Yu., Grigoryan O.R., Iudin D.I., Mareev E.A., Pastushenkov D.D.* Thunderstorm Neutrons at

Altitudes up to 400 km: Theoretical Estimations and Numerical Simulation // AGU Chapman Conference on Effects of Thunderstorms and Lightning in the Upper Atmosphere - State College, USA, 2009, p 53.

7. *Drozdov A., Grigoriev A., Malyshkin Yu.* The detection possibility of the neutrons from thunderstorm onboard low orbiting small satellites // STP12 Abstracts. - Berlin , 2010.
8. *Drozdov A., Grigoriev A., Malyshkin Yu.* The detection possibility of the neutrons from thunderstorm onboard low orbiting small satellites // TEPA-2010 Abstracts. – Nor Amberd, Armenia, 2010.

Цитируемая литература

1. *Shah G.N., Razdan H. Bhat C.L., Ali Q.M.*, Neutron generation in lightning bolts // *Nature*. - 1985. - Vol. 313. - pp. 773 – 775.
2. *Chilingarian A, Daryan A., Arakelyan K., Hovhannisyanyan A., Mailyan B., Melkumyan L., Hovsepyan G., Chilingaryan S., Reymers A., Vanyan L.*, Ground-based observations of thunderstorm-correlated fluxes of high-energy electrons, gamma rays, and neutrons // *Phys. Rev.* - 2010. - Vol. 82.
3. *Кузевский Б.М.*, Генерация нейтронов в молниях // *Вестн. МГУ. Физика, Астрономия.* - 2004. - 3 : Т. 5. - стр. 14–16.
4. *Бабич Л.П.*, Генерация нейтронов в гигантских восходящих атмосферных разрядах // *Письма в ЖЭТФ*. - 2006. - 6 : Т. 84. - стр. 345-348.
5. *Fishman G.J., Bhat P.N., Mallozzi R., Horack J.M., Koshut T., Kouveliotou C., Pendleton G.N., Meegan C.A., Wilson R.B., Paciesas W.S., Goodman S.J., Christian H.J.*, Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin // *Science*. - 1994. - 5163 : Vol. 264. - pp. 1313 - 1316.
6. *Bratolyubova-Tsulukidze L. S., Grachev E. A., Grigoryan O. R., Kunitsyn V. E., Kuzhevskij B. M., Lysakov D. S., Nechaev O. Yu., Usanova M. E.*, Thunderstorms as the probable reason of high background neutron fluxes at $L < 1.2$ // *Adv. Space Res.* - 2004. - 8 : Vol. 34. - pp. 1815-1818.
7. *Горшков Г.В., Зябкин В.А. Лятковская Н.М., Цветков О.С.*, Естественный нейтронный фон атмосферы и земной коры. - Москва : Атомиздат, 1966.
8. *Ostgaard N., Gjesteland T., Stadsnes J., Connell P.H., Carlson B.*, Production altitude and time delays of the terrestrial gamma flashes: Revisiting the Burst and Transient Source Experiment spectra // *J. Geophys. Res.* - 2008. - A02307 : Vol. 113.
9. *Carlson B.E., Lehtinen N.G., Inan U.S.*, Terrestrial gamma ray flashes production by lightning current pulses // *J. Geophys. Res.* - 2009. - A00E08 : Vol. 114.

10. *Carlson B.E., Lehtinen N.G., Inan U.S.*, Neutron production in terrestrial gamma-ray flashes // *J.Geophys.Res.* - 2010. - A00E19 : Vol. 115.
11. *Soberman Robert K.*, High-Altitude Cosmic-Ray Neutron Intensity Variation // *Phys. Rev.* - 1956. - 5 : Vol. 102.
12. *Hess Wilmot N., Patterson Wade H., Wallace Roger, Chupp Edward L.*, Cosmic-Ray Neutron Energy Spectrum // *Phys. Rev.* - 1959. - 2 : Vol. 116. - pp. 445–457.
13. *Jenkins R.W., Ifedili S.O., Lockwood J.A., Razdan H.*, The Energy Dependence of the Cosmic-Ray Neutron Leakage Flux in the Range 0.01-10 Mev // *JGR.* - 1971. - 31 : Vol. 76. - pp. 7470-7478.
14. *Lingenfelter R.E.*, The cosmic-ray neutron leakage flux. // *J. Geophys. Res.* - 1963. - Vol. 68. - p. 5633.
15. *Newkirk L.L.*, Calculation of Low-Energy Neutron Flux in the Atmosphere by the Sn Method // *J. Geophys. Res.* - 1963. - Vol. 68. - pp. 1825-1833.
16. *Lobakov A.P., Lyagushin V.I., Panasyuk M.I., Petrov V.M., Shavrin P.I.*, Long-term Measurements of the Neutron Flux Aboard the "MIR"-Type Space Station // *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements.* - 1992. - 1 : Vol. 20. - pp. 55-58.

Подписано к печати 14.12.10

Тираж 100 Заказ 203

Отпечатано в отделе оперативной печати
Физического факультета МГУ