

Л-342

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 519.677

11-86-652

Ле Ван Нгок

МОНТЕ-КАРЛОВСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
КАСКАДА АДРОНОВ И γ -КВАНТОВ
В ГАЗООБРАЗНЫХ И КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ

Специальность: 05.13.16 -
Применение вычислительной техники,
математического моделирования
и математических методов в научных исследованиях

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1986

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель
доктор физико-математических наук
профессор

В.С. БАРАШЕНКОВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

И.В. ПУЗЫНИН

доктор технических наук
профессор

Л.Н. ЗАЙЦЕВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт физики высоких энергий, Серпухов

Защита диссертации состоится "___" _____ 1986 года на заседании Специализированного совета Д047.01.04 Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

Автореферат разослан "___" _____ 1986 года.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИИИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

Ивг₂ Э.М. ИВАНЧЕНКО

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Актуальность темы. Развитие науки и техники, изучение физических процессов, конструирование сложных установок сегодня невозможно без подробного математического моделирования физических закономерностей с помощью ЭВМ.

В результате стремительного развития таких важных областей, как ядерная физика, теория переноса излучений, космические исследования, энергетика, конструирование сложных установок, появилась необходимость выполнять большие и сложные "математические эксперименты", воспроизводящие реальную физическую обстановку.

В настоящее время уровень развития вычислительной техники, программирования и численных методов дает возможность решать многие большие физико-математические и инженерно-технические задачи с помощью вычислительного эксперимента. Можно указать в качестве примера типичные и практически важные задачи такого типа, для решения которых наиболее эффективным и адекватным способом расчета во многих случаях является математическое моделирование. Это задачи распространения пучков высокоэнергетических частиц и потоков γ -квантов в протяженных средах.

В ОИИИ задача прохождения высокоэнергетических адронов через вещество была поставлена и решена в течение ряда лет. Однако в разработанной программе расчета отсутствует блок расчета γ -компоненты. Учет этой компоненты в расчетах переноса высокоэнергетических адронов важен с точки зрения практических приложений.

Вместе с тем, многие научные вопросы и прикладные задачи в настоящее время требуют для своего решения умения рассчитать закономерности распространения потоков γ -квантов, рождаемых в средах и изотопным источником излучения, и пучком быстрых частиц. Как, например, расчет защиты от γ -излучений на физико-ядерных установках, использующихся в медицине, технике и промышленности, расчет поля γ -излучений вокруг большой тяжелой мишени на экспериментах, связанных с электроядерным методом, расчет спектра индуцированного γ -излучения различных веществ под действием космических лучей. Поэтому актуальной становится проблема создания математического обеспечения ЭВМ в виде вычислительной программы для расчетов переноса γ -квантов в различных средах.

Наряду с решением задач прохождения высокоэнергетических адронов через вещество и расчетами переноса γ -излучений, для практики важны расчеты распространения пучков быстрых частиц в протяженных газовых средах, в частности, расчеты распространения космических лучей в ат-

мосфере. Это необходимо для решения широкого круга научных и прикладных проблем, связанных с интерпретацией некоторых астрофизических вопросов, анализом структуры широких атмосферных ливней, прогнозированием и оценкой радиационной ситуации на больших высотах, изучением образующихся в атмосфере изотопов и т.д.

Распространение космических лучей в атмосфере является многогранным явлением. Большинство теоретических и экспериментальных работ посвящено исследованию характеристик широких атмосферных ливней при достаточно высоких энергиях, где допускаются в расчетах, образованных в атмосфере компонент вторичного излучения, упрощающие предположения как математического, так и физического характера.

Задача прохождения космических лучей через атмосферу в вычислительном плане сложна и трудна. Она относится к "большим" задачам и требует наиболее "быстрых" ЭВМ.

В ОИЯИ еще в 1974 году первая попытка постановки и решения задачи распространения космических лучей в атмосфере была сделана^{1/}. Однако полученная прямолинейной адаптацией программа расчета оказалась слишком громоздкой и требовала много времени ЭВМ (порядка десятка часов на БЭСМ-6) для расчета достаточно простых характеристик. Эта программа и ее описание не были опубликованы и отсутствуют в настоящее время.

Следует отметить, что полученных к настоящему времени результатов расчетов явно недостаточно для надежного предсказания спектра нуклонов в произвольной точке атмосферы и в достаточно широком интервале жесткостей геомагнитного обрезания. С другой стороны, в связи с новыми экспериментами по регистрации атмосферных мюонов и нейтрино, с необходимостью правильной интерпретации экспериментальных данных, касающихся выяснения многих вопросов физики солнца и околосолнечного пространства, в последнее время необходимым требованием становится проведение детальных расчетов процесса прохождения космических лучей через атмосферу, численная реализация которых невозможна без создания специализированного математического обеспечения ЭВМ в виде программного комплекса. Поэтому особую актуальность имеет проблема разработки быстродействующего программного комплекса для монте-карловского моделирования процесса прохождения высокоэнергетических излучений через атмосферу.

Цель работы состоит в разработке программного комплекса для эффективного математического моделирования на основе метода Монте-Карло каскада адронов и γ -квантов в газообразных и конденсированных средах, численной реализации расчетов на ЭВМ практически важных конкретных задач и сравнительном анализе полученных результатов.

Новизна работы. Разработанный в диссертации программный комплекс для монте-карловского моделирования межъядерных каскадов, инициируемых в атмосфере высокоэнергетическим излучением, основанный на каскадно-испарительной модели ядерных реакций, позволяет рассчитать и предсказать многочисленные характеристики ядерно-физических процессов, протекающих при прохождении космических лучей, или излучения других интенсивных источников сквозь атмосферу, с учетом геомагнитного эффекта в широком диапазоне географических широт местности. По сравнению с опубликованными в литературе расчетами, данный программный комплекс открывает большие возможности для детального сопоставления с экспериментом вследствие учета ионизационных процессов, самопроизвольного распада и подробного описания внутриядерных взаимодействий.

На основе разработанного программного комплекса выполнены первые расчеты некоторых конкретных случаев распространения космического излучения в атмосфере. Разработанный программный комплекс обладает большой избыточностью, особенно в модуле расчета ядерных взаимодействий, что важно при решении физических задач. Кроме того, он дает достаточно точные результаты расчета, требуя для своей работы приемлемых объема оперативной памяти и времени счета ЭВМ.

Для расчета переноса γ -квантов, образованных в ядерных реакциях высокоэнергетических адронов в веществе, впервые в ОИЯИ разработана монте-карловская модель распространения низкоэнергетической компоненты γ -излучений и создана вычислительная программа. Разработанная модель позволяет правильно описывать поведение γ -квантов, рождаемых первичными частицами любой энергии от предела обрезания до нескольких ГэВ.

С целью реализации на ЭВМ монте-карловского моделирования каскада γ -квантов, связанных с высокоэнергетическим излучением в атмосфере, построена схема моделирования, приведены моделирующие теоретические формулы, описывающие процессы образования и распространения γ -квантов в атмосфере.

Практическая ценность работы. Результаты диссертации могут служить прикладным программным обеспечением ЭВМ для решения разнообразных практических задач, касающихся расчетов пространственно-энергетических распределений вторичных излучений в атмосфере и внутри блоков находящегося в ней вещества, для оценки радиационных ситуаций на больших высотах, а также в применении к расчетам защиты от γ -излучений, создаваемых в средах пучками высокоэнергетических адронов.

На защиту выносятся следующие основные результаты, полученные в диссертации

1. Создан основанный на каскадно-испарительной модели ядерных реакций комплекс программ для решения широкого класса теоретических и прикладных задач, связанных с распространением в атмосфере потоков адронов, созданных космическим излучением или источниками искусственного происхождения.

2. Выполнены и сопоставлены с экспериментом расчеты различных ядерных и дозовых характеристик космических лучей. Эти расчеты позволяли получать результаты со статистической погрешностью, находящейся в рамках 15-20%.

3. Проведены оценки радиационной обстановки на разных высотах в атмосфере и расчет доз радиоактивного излучения, создаваемого искусственными источниками высокоэнергетического адронного излучения на больших высотах.

4. Вычислен вклад ядер отдачи и тяжелых продуктов, образованных в ядерных реакциях в атмосфере под действием высокоэнергетических излучений, в суммарную радиационную дозу на разных высотах.

5. Разработана монте-карловская модель и создана вычислительная программа для расчета распространения низкоэнергетической компоненты γ -квантов, рождаемых в веществе частицами высоких энергий.

6. Разработаны монте-карловский алгоритмы для моделирования распространения γ -квантов, индуцированных в атмосфере адронами высоких энергий.

Апробация работы и публикации. Результаты, полученные в диссертации, доложены на семинарах ЛВТА ОИЯИ и на УП Всесоюзном совещании "Методы Монте-Карло в вычислительной математике и математической физике" (Новосибирск, 1985). По результатам диссертации опубликовано 6 работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав основного содержания и заключения; она содержит 141 страницу машинописного текста, 28 рисунков, 10 таблиц и список литературы из 124 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении подчеркивается актуальность проблемы создания специализированного математического обеспечения ЭВМ в виде программных комплексов для решения задач о распространении каскада высокоэнергетических адронов и потоков γ -квантов в протяженных средах. Показаны основные подходы к расчету процессов такого рода и обсуждаются преи-

мущества использования метода Монте-Карло. Рассмотрено состояние существующих теоретических моделей распространения космических лучей в атмосфере. Сформулированы основные вопросы, рассмотренные в диссертации.

В первой главе рассматриваются различные математические аспекты монте-карловского моделирования физических явлений и процессов. Обсуждается монте-карловский алгоритм расчета межъядерных каскадов в атмосфере, описывается программный комплекс для монте-карловского моделирования физико-ядерных процессов, реализующихся при прохождении высокоэнергетических излучений сквозь атмосферу. Изложен способ оценивания и расчета распределений каскадных адронов и создаваемых ими доз облучения с помощью метода Монте-Карло. Рассмотрен учет вклада ядер отдачи и тяжелых продуктов, образованных в ядерных реакциях в атмосфере, в расчетах суммарной радиационной дозы.

В начале главы изложены вопросы, связанные с применением методов Монте-Карло для рассмотрения процессов переноса. Понятие алгоритм Монте-Карло - составное; оно включает в себя метод Монте-Карло, т.е. случайную цепь и оценку, и моделирующие формулы; последнее - это формулы, выражающие случайные величины в цепи и оценке через случайные числа, равномерно распределенные на отрезке (0,1).

В следующем параграфе обсуждается модель атмосферы, используемая в расчетах межъядерных каскадов. Предполагается двухкомпонентный состав вещества атмосферы, состоящий из азота (79%, $Z=7$, $A=14$) и кислорода (21%, $Z=8$, $A=16$), соотношение которых не меняется с высотой.

Зависимость атмосферной плотности от высоты аппроксимируется экспонентой

$$\rho(h) = \begin{cases} \rho_0 e^{-\frac{h}{\alpha}} & h \leq 50 \text{ км} \\ 0 & h > 50 \text{ км}, \end{cases}$$

где $\rho_0 = 1,443 \cdot 10^{-3}$ г/см³ - плотность воздуха на уровне моря; $\alpha = 7,327$ км - экспериментальный параметр.

Рассматривается влияние геомагнитного поля Земли на движение заряженных космических частиц, падающих на границу атмосферы. Учет этого эффекта выполнен путем выбора частиц по энергии, а также по полярному и азимутальному углам. При этом энергия обрезания задана в виде

$$E_{\chi}(\theta) = mc^2 \left(\sqrt{1 + \left[Z\rho_{\chi}(\theta)/mc^2 \right]^2} - 1 \right),$$

где жесткость обрезания для дипольного представления геомагнитного поля

$$\rho_{\chi}(\theta) = 59.3 Z \cos^4 \chi \left[1 + \sqrt{1 - \sin^2 \psi \sin^2 \alpha \chi} \right]^{-2},$$

Здесь $m c^2$ - масса космической частицы с зарядом z , χ - геомагнитная широта; θ и φ - полярный и азимутальный углы, характеризующие направление движения частиц.

В третьем параграфе главы обсуждается алгоритм расчета межъядерных каскадов в атмосфере с помощью метода Монте-Карло.

Монте-карловский расчет движения высокоэнергетических частиц в атмосфере предполагает включить в алгоритм следующие процессы:

- Моделирование источника частиц. При моделировании каскадов частиц в атмосфере требуется вычислять характеристики каждой моделируемой частицы: координаты ее местонахождения (x, y, z), направления движения (θ, φ), кинетическую энергию (ϵ). Расчет характеристик первичной частицы выполнен путем розыгрыша их по заданным функциям распределения.

- Моделирование свободного пробега. Частица с разыгранными значениями $\epsilon, \varphi, \theta$ генерирует каскад вторичных частиц, испытывая первое столкновение на расстоянии l от точки входа в атмосферу. Это расстояние определяется из уравнения

$$\int_0^l \frac{dl}{\lambda(\epsilon(\vec{r}), \vec{r})} = -\ln \xi, \quad (3.1)$$

где

$$\lambda = \frac{1}{\sum_i \sigma_i(\epsilon(\vec{r})) \rho_i(\vec{r})} \quad (3.2)$$

- средний пробег в точке \vec{r} , σ_i - полное сечение взаимодействия частицы с ядром сорта i в точке \vec{r} , ρ_i - плотность числа этих ядер. Интегрирование выполняется вдоль траектории частицы.

Если траектория частицы не пересекает блоков расположенного в воздухе вещества, то

$$\rho_i(z) = \rho_{0i} \exp\{\alpha(z - h)\}, \quad (3.3)$$

где $z = l \cos \theta$ - расстояние от границы атмосферы (θ - угол по отношению к вертикали), h - высота границы атмосферы над уровнем моря, α - экспериментально определяемая константа, ρ_{0i} - плотность ядер азота и кислорода на уровне моря. Если, кроме того, частица (нейтрон и Π^0 -мезон) не ионизирует среду, то из (3.1) следует:

$$l = \ln(1 - \chi \alpha \cos \theta \ln \xi) / \alpha \cos \theta.$$

Во всех других случаях пробег l разыгрывается по формулам (3.1), (3.2) методом "выравнивания". Для этого генерировались две последова-

тельности случайных величин:

$$\gamma_n = \frac{1}{\alpha \cos \theta} \sum_{i=1}^n \ln(1 - \chi_{\min} \alpha \cos \theta \ln \xi_i)$$

и равномерно распределенные $\xi \in (0, 1)$. Если

$$N = \min \left\{ n : \xi_n \leq \min \chi(x) / \lambda[\epsilon(\tau_0 + \delta_n^\omega)] \right\},$$

где $x \leq \epsilon(\tau_0)$, то $l = \delta_N$. Здесь τ_0 - начальное положение частицы, ω - единичный вектор вдоль направления ее движения.

При расчете пробегов Π -мезонов учитывается вероятность их распада до ядерного взаимодействия.

- Моделирование ядерного взаимодействия. После розыгрыша пробега по известным экспериментальным вероятностям разыгрывается тип взаимодействия - упругое или неупругое. В случае упругого столкновения разыгрывается угол рассеяния θ по хорошо описываемому экспериментальные данные феноменологическому распределению^[2].

Для расчета неупругого взаимодействия частицы с ядром воздуха при энергиях > 10 МэВ используется каскадно-испарительная модель, которая позволяет определить энергию и углы вылета для рождающейся частицы.

При этом все рождаемые в столкновении частицы заносятся в память ЭВМ в виде массивов. Каждая частица в каскаде моделируется до тех пор, пока она не вылетит из атмосферы, испытает ядерное поглощение или остановится вследствие ионизационных потерь или распада.

При расчете вторичной нейтронной компоненты, следует иметь в виду, что при энергиях $< 10,5$ МэВ каскадная лавина состоит только из нейтронов. Здесь важны лишь несколько каналов реакции, которые моделируются заданием вероятностей на основе многогрупповой системы констант для расчета ядерных реакторов.

Расчет межъядерных каскадов имеет циклический характер. После того, как рассчитано одно каскадное дерево, вычисления повторяются для новой первичной частицы, затем для следующей и так далее. Рассчитываются многие десятки, а иногда и сотни деревьев, для того, чтобы уменьшить статистические флуктуации изучаемых величин.

В § 4 описывается разработанный программный комплекс для монте-карловского моделирования физико-ядерных процессов, реализующихся в атмосфере под действием высокоэнергетических излучений, представляет собой программная структура.

Для сокращения времени счета атмосферу целесообразно разделить на плоские слои с толщиной $\Delta z \approx 100$ кг/м² (толщина всей атмосферы

10330 кг/м²) и в каждом слое применять оценки по пробегу и по пересечениям.

Организация выдачи зависит от конкретной задачи, причем можно либо записывать необходимые характеристики на внешний носитель (например, на магнитную ленту), либо строить интересующие нас функции распределения в процессе расчета.

Разработанный программный комплекс предназначен для ЭВМ СДС-6500 и требует для своей работы ~ 200 Кбайт оперативной памяти этой ЭВМ.

Время счета для моделирования 1000 первичных частиц - около 10 мин. Данный программный комплекс написан на языке FORTRAN и легко адаптируется к ЭВМ разного рода.

В § 5 излагается метод расчета потоков каскадных адронов в атмосфере на разных высотах. Для вычисления потока частиц по слою воздуха используется несмещенная оценка по пробегу, которая определяется величиной:

$$\vartheta = \sum_{j=1}^N l(z_{j-1}, z_j),$$

где $l(z_{j-1}, z_j)$ - длина пути частицы в слое Δz на участке (z_{j-1}, z_j) . Оценка потока частиц на заданной высоте определяется величиной:

$$\vartheta_1 = \sum_{j=1}^N \delta(z_{j-1}, z_j).$$

Здесь $\delta(z_{j-1}, z_j)$ - индикатор пересечения высоты h на участке ломаной (z_{j-1}, z_j)

$$\delta = \begin{cases} 1/\vec{n}_2 \cdot \vec{n}_1, & \text{если } z_{j-1} \text{ и } z_j \text{ находятся по} \\ & \text{разные стороны от высоты } h, \\ 0 & \text{в противоположном случае.} \end{cases}$$

Описывается способ оценивания дозы облучения, формируемой от каскадных адронов на разных высотах. Расчет эквивалентной дозы, создаваемой адронами в атмосфере, проводится одновременно с расчетами потоков адронов с помощью введения дозных коэффициентов в программы расчета.

Приведены в виде таблиц используемые в расчетах значения биологической эффективности нуклонов и заряженных Π^{\pm} -мезонов, полученные путем обработки и интерполяции экспериментальных данных.

В § 6 рассматривается вклад ядер отдачи и тяжелых продуктов, образованных в атмосфере адронами высоких энергий, в радиационную дозу на разных высотах.

Описываются изменения в алгоритме и вычислительной программе, связанные с расчетом вклада ядер отдачи в дозные характеристики.

Во второй главе с целью проверки правильности функционирования разработанного программного комплекса для Monte-Карло моделирования прохождения высокоэнергетических излучений через атмосферу и получения представления о возможных систематических погрешностях алгоритма, проводятся конкретные расчеты. Результаты расчетов сравниваются с данными опыта и результатами других расчетов. Сделан вывод о том, что разработанный программный комплекс функционирует правильно.

В первом параграфе главы реализуется моделирование на ЭВМ ядерно-активной компоненты атмосферных ливней на разных высотах. Исходным в моделировании является известный из эксперимента спектр космических протонов, изотропно падающих на границу земной атмосферы, в годы минимума солнца (см. рис. 1).

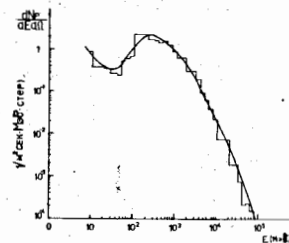


Рис. 1. Спектр космических протонов в годы "минимума" солнца. Кривая - экспериментальные данные^{/3/}. Гистограмма - результат моделирования

Геомagneticное искажение спектра учитывается путем отбраковки частиц с энергиями $E < E_{\text{мин}}(\lambda, \theta, \varphi)$. Проводится сравнительный анализ результатов моделирования процесса распространения потоков ядерных частиц в атмосфере на разных высотах и широтах. Показано, что в широком энергетическом интервале хорошо описываются экспериментальные данные и результаты других расчетов. Согласие расчетных и экспериментальных данных иллюстрируется рис. 2.

На ЭВМ с быстродействием порядка миллиона операций в секунду (как, например, СДС - 6500) типичное время счета набора пространственно-энергетических распределений протонов и Π -мезонов для одного значения географической широты со статистической погрешностью, находящейся в рамках 15-20%, составляет около часа и слабо зависит от того, при скольких значениях высоты h строятся распределения. В осо-

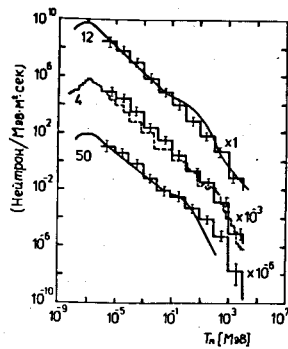


Рис. 2. Энергетический спектр нейтронов, порожденных космическими лучами на высотах 12, 4, 50 км над уровнем моря в годы "минимума" солнца. Геомагнитная широта $\lambda = 42^\circ$. Сплошные гистограммы - наш расчет, пунктирная - расчет/4/. Кривые - экспериментальные и расчетные данные/5,6/.

бенности для достижения этой погрешности в нейтронных расчетах, из-за избытка нейтронов, образованных в ядерных реакциях в атмосфере требуется время счета лишь порядка полчаса. При этом программа обработки требует для своей работы не более 6 КБ оперативной памяти ЭВМ и времени счета 3 м.

В следующем параграфе изучены с помощью численного моделирования биологические эффекты космического излучения.

На рис. 3 показан результат моделирования высотной зависимости дозы облучения незащищенного человека протонами, нейтронами и π^\pm -мезонами, порождаемыми в атмосфере космическим излучением при обычных условиях - когда нет значительных хромосферных вспышек на солнце.

Для получения результатов расчета, показанных на рис. 3, необходимо проводить время счета на ЭВМ ~ 1 ч. При этом достигается статистическая погрешность $\sim 20\%$.

В третьем параграфе обсуждается численное моделирование образования ливней ядерно-активных частиц в атмосфере от интенсивных источников излучения в околоземном пространстве. Для достижения погрешности $\sim 20\%$ необходимо время счета ~ 1 ч в расчетах пучков протонов и нейтронов с энергией $T=1$ ГэВ, падающих в атмосферу.

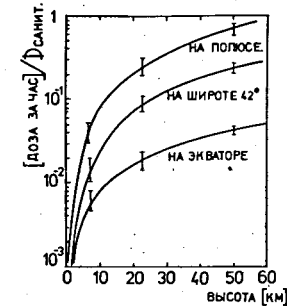


Рис. 3. Высотная доза облучения на различных широтах $\lambda = 90^\circ, 42^\circ, 0^\circ$. Кривые - результат моделирования

В третьей главе дан краткий обзор проблемы прохождения γ -квантов в протяженных средах, обсуждены алгоритмы Монте-Карло и его программная реализация на ЭВМ для расчета низкоэнергетической компоненты γ -квантов, рождаемых в веществе частицами высоких энергий, и построена теоретическая схема моделирования каскада γ -квантов, связанных с высокоэнергетическим излучением в атмосфере, по методу Монте-Карло.

В первом параграфе главы обсуждается прикладное значение расчета закономерностей прохождения потоков γ -квантов, образованных в средах разными источниками. Задачи по распространению γ -квантов в средах становятся особенно сложными, когда γ -кванты сопровождают прохождение частиц больших энергий через среду. Расчет переноса γ -квантов требуется при этом проводить одновременно с расчетами переноса высокоэнергетических частиц.

В следующем параграфе изложен расчет распространения низкоэнергетической компоненты γ -квантов в веществе под действием высокоэнергетических частиц. Монте-карловское моделирование прохождения образованных γ -квантов при этом реализуется в соответствии с вероятностями, заданными экспериментальными данными (или теоретическими формулами). Число γ -квантов, рождаемых в каждой точке в среде в результате ядерных реакций нейтронов при низких энергиях, разыгрывается по известному из эксперимента спектру образования γ -квантов. При этом пространственные координаты данной точки в среде заносятся в память ЭВМ в виде массива, используемого в качестве исходного для моделирования γ -компоненты, а розыгрыш характеристик каждого из образованных γ -квантов реализуется по "экспериментальным" вероятностям и изотропному угловому распределению.

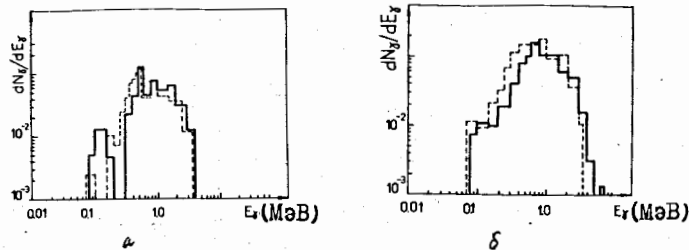


Рис. 4. Энергетический спектр γ -квантов, вылетающих из цилиндрической мишени ^{238}U размером 30×10 см в разных интервалах углов. — Сплошные гистограммы — наш расчет, пунктирные — обзорные данные [7].
 а — $\Delta\theta = 33^{\circ}56' - 48^{\circ}19'$ б — $\Delta\theta = 131^{\circ}81' - 146^{\circ}44'$

Для расчета γ -квантов, испускаемых возбужденными ядрами-остатками (или возбужденными фрагментами), полагается, что эти γ -кванты имеют изотропное угловое распределение, и при моделировании энергия каждого γ -кванта разыгрывается по формуле

$$\Gamma_{\gamma}(E_{\gamma}, \epsilon^{\circ}) = 3(\pi \hbar^2 c^2) G_0^{E_1} E_{\gamma}^2 \Gamma_R^2 \left[(E_{\gamma}^2 - E_R^2) + E_{\gamma}^2 E_R^2 \right]^{-1} \exp(2\sqrt{\lambda} E_{\gamma}) \times \exp\left[2\sqrt{\lambda} A(E^* - E_{\gamma})\right].$$

Здесь $G_0^{E_1} = 2,5$ А барн; $\Gamma_R = 0,3$ Е МэВ; $E_R = 40,3$ А^{-1/5} МэВ; E^* — энергия возбуждения ядер-остатков; A_R — масса ядра-остатка; λ — параметр плотности уровней ($\lambda = 0,1$).

Приведена блок-схема расчета, описана общая программная структура в параллельном с моделированием частиц высоких энергий расчете. Разработанная вычислительная программа требует для своей работы не более 5 Кбайт оперативной памяти ЭВМ CDC-6500 и времени счета на этой ЭВМ ~ 20 мин для достижения погрешности ~15% при моделировании 200 первичных адронов. Данная программа может быть применена для расчета прохождения γ -квантов низких энергий, испускаемых источниками излучения, расположенными внутри среды.

Иллюстрация точности программы изображена на рис. 4.

В третьем параграфе построена теоретическая схема моделирования процесса распространения γ -квантов, связанных с высокоэнергетическим излучением, в атмосфере. Подробно рассмотрены процессы образования и

распространения γ -квантов в атмосфере под действием частиц высоких энергий. Приведены моделирующие теоретические формулы.

Обсуждается процесс моделирования распространения вторичных частиц (e^- , e^+ , μ), связанных с переносом высокоэнергетических γ -квантов.

В заключении перечисляются основные результаты и выводы, полученные в диссертации.

Результаты диссертации опубликованы в работах [8-13].

Литература

1. Барашенков В.С., Сдобнов В.Е., Чигринов С.Е. Распространение быстрых ядерных частиц в атмосфере. "Атомная энергия", 1974, т.36, вып. 3, с. 224-225.
2. Geibel J.A., Ranft J. Part VI: Monte-Carlo calculation of the nucleon meson cascade in shielding materials. Nucl. Instr. Meth., 1965, v. 32, p. 65-69.
3. Mc Donald F.B., IQSY observations of low energy galactic and solar cosmic rays, in Annals of the IQSY, vol. 4, edited by A.C. Strickland, MIT Press, Cambridge, Mass, 1969, p. 187-216.
4. Armstrong T.W., Chandler K.C., and Barish J. Calculations of neutron flux spectra induced in the earth's atmosphere by galactic cosmic rays, J. Geophys. Res., 1973, v. 78, p. 2715-2726.
5. Hess W.N., Patterson H.W., Wallance R., and Chupp E.L. Cosmic ray neutron energy spectrum. Phys. Rev., 1959, v.116, p.445-457.
6. Lingenfelter R.E. The cosmic ray neutron leakage flux. J. Geophys. Res., 1963, v. 68, p. 5633-5639.
7. Барашенков В.С. Ядерно-физические аспекты электро-ядерного метода. ЭЧАЯ, 1978, т. 9, вып. 5, с. 871-921.
8. Ле Ван Нгюк, Шмаков С.Ю. Программа расчета нуклон-мезонного каскада в атмосфере Земли методом Монте-Карло. ОИЯИ, БИ-2-85-47, Дубна, 1985, 19 с.
9. Барашенков В.С., Ле Ван Нгюк, Шмаков С.Ю. Распространение потоков ядерных частиц в атмосфере. Препринт ОИЯИ, Р2-85-135, Дубна, 1985, 6 с.
10. Барашенков В.С., Ле Ван Нгюк, Шмаков С.Ю. Биологические эффекты космического излучения. Препринт ОИЯИ, Р2-85-46, Дубна, 1985, 4 с.

11. Барашенков В.С., Ле Ван Нгок. Ливни ядерно-активных частиц в атмосфере от интенсивных источников излучения в околоземном пространстве. Препринт ОИЯИ, Р2-85-305, Дубна, 1985, 5 с.
12. Ле Ван Нгок. Монте-карловский расчет вклада ядер отдачи и тяжелых продуктов ядерных реакций в атмосфере в радиационные дозы на разных высотах. ОИЯИ, Б3-11-85-743, Дубна, 1985, 9с.
13. Ле Ван Нгок, Шмаков С.Ю. монте-карловское моделирование распространения γ -квантов, образованных в ядерных реакциях в веществе. ОИЯИ, Б1-4-83-203, Дубна, 1983, 11 с.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 октября 1986 года.