



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На правах рукописи
2006–25

Курочкин Игорь Анатольевич

**РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ
В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ MARS**

05.13.11 — математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Протвино 2006

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г.Протвино).

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук И.Л. Ажгирей.

Официальные оппоненты: кандидат физико-математических наук Ю.П. Гуз (ОАФ, ИФВЭ, г. Протвино), доктор физико-математических наук В.В. Ужинский (ЛИТ, ОИЯИ, г. Дубна).

Ведущая организация – Институт теоретической и экспериментальной физики (г. Москва).

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2006 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета К 201.004.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 201.004.01

В.Н. Ларин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Развитие научных исследований в области физики высоких энергий характеризуется внедрением новейших технологий в процессы создания и модернизации ускорительных и экспериментальных установок, отличающихся особой сложностью и высокой стоимостью. Полномасштабное математическое моделирование является основным инструментом проектных исследований. Это диктует высокие требования к программам моделирования ядерно-электромагнитных каскадов в веществе, в частности к точности описания физики взаимодействий частиц с веществом. Интенсивные потоки низкоэнергетических частиц, образующиеся на современных ускорителях, определяют радиационную обстановку за биологической защитой и фоновые загрузки экспериментальных установок. От точности и быстродействия алгоритмов, описывающих низкоэнергетическую часть ядерно-электромагнитного каскада, во многом зависит корректность результатов и трудоемкость полномасштабного моделирования.

Среди задач, для которых принципиально важен прогресс в описании физики переноса низкоэнергетической компоненты ядерно-электромагнитного каскада, – создание безопасных ядерных реакторов с ускорительной "накачкой", где сильноточные протонные и

ионные пучки используются для генерации интенсивных полей низкоэнергетических нейтронов, а также решение проблемы эффективной трансмутации отработанного ядерного топлива. Одно из направлений, где важен рассматриваемый аспект моделирования – обеспечение радиационной безопасности полетов гражданской авиации. Низкоэнергетическая компонента космического излучения определяет радиационное воздействие на человека. Также рассматриваемые алгоритмы описания переноса низкоэнергетических частиц могут быть использованы при решении задач, связанных с радиационной терапией.

Перечисленные выше задачи определяют **актуальность** и **важность** создания и развития программного обеспечения для описания механизмов рождения и транспорта низкоэнергетических частиц при моделировании ядерно-электромагнитных каскадов.

Целью диссертационной работы является разработка и развитие программных кодов, описывающих методом Монте-Карло процессы рождения и переноса низкоэнергетических нейтронов и фотонов в рамках комплекса программ MARS.

Автор защищает:

- Разработку математического обеспечения для описания процессов рождения и переноса низкоэнергетических частиц в сложных геометриях при моделировании ядерно-электромагнитных каскадов в веществе.
- Алгоритм прямого инклюзивного моделирования рождения низкоэнергетических частиц в программном пакете MARS.
- Развитие алгоритмов для моделирования формирования спектров частиц в атмосфере и результаты расчета спектров.
- Разработку и развитие алгоритмов для прогнозирования эффективных доз для населения в случае распределенных выбросов радиоактивного воздуха из ускорителя на протяженной местности сложного рельефа и результаты использования со-

зданного прикладного пакета для расчета доз в районе Большого Адронного Коллайдера (БАК) в ЦЕРН.

- Результаты использования созданных программных пакетов при оптимизации фоновых загрузок детекторов в эксперименте DIRAC.
- Данные по моделированию серии экспериментов на бустере ИФВЭ по исследованию сечений реакций расщепления в протяженных мишенях при облучении их протонами средних энергий.

Научная новизна и практическая ценность работы определяется тем, что в рамках инклюзивного подхода были предложены и впервые реализованы в программах алгоритмы прямого рождения и транспорта низкоэнергетических частиц в групповом приближении, позволяющие достаточно корректно и быстро проводить расчеты транспорта частиц через вещество, моделировать источники и оптимизировать фоновые загрузки на элементы детекторов экспериментальных установок. На основе результатов моделирования фоновых условий для детекторов эксперимента DIRAC на ускорителе PS (ЦЕРН), проведенных автором, была выработана схема проведения эксперимента, определены оптимальные параметры защиты и поглотителя пучка. Эти предложения были использованы в эксперименте DIRAC. Результаты расчетов нейтронных спектров в атмосфере использованы при выработке рекомендаций европейской комиссии EURADOS по безопасности полетов самолетов гражданской авиации. Исследованы выходы нейтронов из различных мишеней на пучке бустера ИФВЭ, показано согласие экспериментальных и расчетных данных. Решена задача расчета эффективной дозы для населения от распределенных выбросов радиоактивного воздуха из БАК. Разработанные алгоритмы рождения и транспорта частиц через вещество, прикладное программное обеспечение активно используются при решении радиационно-физических проблем на ускорителях и в экспериментальных исследованиях, проводимых в настоящее время в ИФВЭ и ЦЕРН.

Апробация работы и публикации

Диссертация основана на результатах исследований, выполненных автором в 1985-2003 гг. в Отделе радиационных исследований ИФВЭ в соответствии с планами работ по программам подготовки и проведения экспериментов на ускорителях ИФВЭ и ЦЕРН, на коллайдерах УНК, SSC и LHC.

Основные результаты исследований, вошедших в диссертацию, опубликованы [1]-[9] в виде препринтов ИФВЭ, ЦЕРН и статей в журналах "Nuclear Instruments & Methods", "Radiation Protection Dosimetry"; они докладывались на конференциях по защите от ионизирующего излучения, на семинарах в РТВ (Германия) и TISRР (ЦЕРН), на рабочих совещаниях по проектам УНК и LHC, а также на семинарах ИФВЭ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и трех приложений. Объем диссертации составляет 117 страниц, в том числе 40 рисунков и 8 таблиц; библиография включает в себя 175 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации дается общее описание основных понятий и математически формализованных подходов к проблеме прохождения и взаимодействия частиц через вещество, рассматриваются особенности использования метода Монте-Карло (ММК) при моделировании ядерно-электромагнитных каскадов (ЯЭК) и переноса низкоэнергетических нейтронов в групповом приближении. Определяются основные источники низкоэнергетических нейтронов и фотонов (НЭЧ) при развитии ЯЭК и излагаются основные принципы построения программного обеспечения.

В общей постановке решение задач о прохождении и взаимодействиях частиц в веществе с учетом сложных физических и геометрических факторов, определяющих процесс переноса, возможно только с использованием приближений и численных методов. Единственный универсальный метод, позволяющий проводить расчет пе-

реноса в произвольной геометрии при наличии внешних электрических и магнитных полей – метод Монте-Карло. ЯЭК в веществе рассматривается как случайная *марковская цепь* независимых актов взаимодействия частиц с веществом. ММК моделирует случайные траектории этой цепи на ЭВМ, используя законы распределения частиц в акте взаимодействия, и вычисляет такие ее характеристики, которые являются оценками искомых функционалов. Из-за относительно медленной сходимости этого метода особое внимание отводится разработке эффективных алгоритмов и моделей транспорта и взаимодействий частиц. Применение методов неаналогового моделирования траекторий частиц каскада позволяет уменьшить дисперсию рассчитываемых функционалов и увеличить эффективность расчета.

Во второй главе рассматриваются основные программные пакеты для моделирования ЯЭК, модели для описания выхода вторичных низкоэнергетических частиц в неупругих адрон-ядерных взаимодействиях, дается анализ основных алгоритмов моделирования НЭЧ и константного обеспечения на основе практики их использования в транспортных кодах.

В зависимости от способа моделирования адрон-ядерного взаимодействия программы можно разделить на три основные группы. В программах первой группы, реализующих *эксклюзивный* подход, в каждом акте адрон-ядерного взаимодействия осуществляется прямое моделирование процесса образования произвольного числа вторичных частиц различных сортов, допускаемого законами сохранения. К программам этой группы относятся программы GEANT, HETC, HERMES, LANET, CALOR95, MCNPX, SHIELD и HADRON.

Во вторую группу, реализующую *квазиэксклюзивный* подход, входят программы семейства FLUKA. Множественное рождение адронов описывается в рамках одночастичных инклюзивных распределений. При этом приближенно моделируется эксклюзивный процесс с использованием алгоритма, обеспечивающего выполнение закона сохранения в каждом столкновении.

Общим в программах третьей группы – CASIM, KASPRO и MARS – является *инклюзивное* моделирование актов адрон-ядерных

взаимодействий с применением метода статистических весов. Они используют феноменологическое описание инклюзивных распределений частиц, а закон сохранения импульса-энергии выполняется в среднем по многим событиям. В каждой точке ядерного взаимодействия моделируется фиксированное число адронов со статистическим весом, математическое ожидание которого совпадает с полной множественностью. Программы этой группы обладают лучшим быстродействием по сравнению с описанными выше.

На практике для описания рождения НЭЧ в неупругих адрон-ядерных взаимодействиях используются чисто феноменологические модели, которые основаны либо на прямом моделировании hA -взаимодействия, либо на выборке из одночастичных инклюзивных сечений, полученных на основе аппроксимации экспериментальных и модельных данных. В случае прямого моделирования характеристики взаимодействия рассчитываются на основе модельных представлений о пространственно-временном развитии процессов и структуры ядра. Процесс глубоконеупругих адрон-ядерных реакций можно разделить на два этапа: начальный – неравновесный и конечный – равновесный. На раннем неравновесном этапе используются модель внутриядерного каскада, предравновесная экситонная модель, модели, основанные на уравнениях Власова-Улинга-Улебека, классической молекулярной динамики и квантовой молекулярной динамики. Статистические равновесные модели нацелены на описание развала возбужденных равновесных ядер и отличаются используемыми статистическими ансамблями и описанием индивидуальных фрагментов. Комбинация неравновесных и равновесных моделей позволяет описать весь процесс эволюции возбужденного ядра в hA -взаимодействиях.

Программы моделирования переноса нейтронного и фотонного излучения отличаются друг от друга алгоритмами построения случайных траекторий и оценками искомым величин по выборочным значениям. При этом алгоритмы имеют разную эффективность для решения той или иной задачи. Программы переноса низкоэнергетических нейтронов и фотонов по своему назначению можно разделить на две основные группы: общецелевые программы и про-

граммы, ориентированные на расчеты ядерных реакторов. К первой группе можно отнести комплекс программ MCNP, MORSE, MVP и MCBENDO, ко второй – KENO, MONK и MCU-3. Основой для работы физического модуля программ моделирования переноса НЭЧ является константное обеспечение, которое базируется на рекомендованных нейтронно-физических данных, входящих в состав библиотек в определенном формате. Большинство современных программ используют как библиотеки оцененных данных, так и мультигрупповые библиотеки нейтронных данных с узкими и широкими нейтронными группами. Моделирование процессов переноса частиц осуществляется либо с использованием непрерывной энергетической шкалы с поточечным заданием сечений взаимодействия, как это сделано в MCNP или MVP, либо с использованием группового приближения, реализованного в программах MORSE, MONK и MCU-3.

В третьей главе представлены разработанные в рамках программного комплекса MARS алгоритмы рождения и переноса НЭЧ. Приведены сведения о программной реализации разработанных алгоритмов, представлены результаты верификации пакета MARS.

Комплекс программ MARS разработан в ИФВЭ для моделирования ядерно-электромагнитных каскадов в среде произвольной геометрии при наличии магнитных и электрических полей. Современная версия комплекса программ MARS реализует *единый инклюзивный подход* к описанию рождения частиц в ядерных и электромагнитных взаимодействиях и при распадах нестабильных частиц. Пакет MARS является программным продуктом, независимым от внешних программ и библиотек, что обеспечивает его *автономность* и *замкнутость*. Дерево траекторий при моделировании адронного каскада в веществе образуется вершинами – точками неупругих адрон-ядерных взаимодействий с фиксированным числом взвешенных адронов в конечном состоянии. В каждой вершине рождаются ветка быстрых нуклонов, ветка заряженных π -мезонов и ветка медленных каскадных нуклонов. Математическое ожидание статистического веса частиц совпадает с их соответствующей средней множественностью. Розыгрыш кинематических характеристик вторичных

адронов осуществляется на основе феноменологического описания одночастичных инклюзивных распределений адронов. Основная доля временных затрат физического модуля приходится на моделирование переноса низкоэнергетических частиц.

В новой версии программы реализован алгоритм прямого инклюзивного рождения НЭЧ при развитии ЯЭК: по ключу в каждой вершине дерева траекторий вводится дополнительная ветка для низкоэнергетических нейтральных частиц [2]. Для описания множественности и спектра низкоэнергетических нейтронов были использованы аппроксимация на основе расчетов по каскадно-испарительной модели [2] в адрон-ядерных взаимодействиях и параметризация на основе модели "движущихся источников" для предравновесной и равновесной эмиссии в протон-ядерных взаимодействиях [4]. Множественность и спектр фотонов от снятия возбуждения ядра описываются в рамках статистической модели [4].

Рождение низкоэнергетических нейтронов в фотоядерных реакциях рассматривалось лишь в области гигантского дипольного резонанса. При развитии ЭФЛ в веществе в каждой точке взаимодействия γ -квантов с ядром рождается фотонейтрон с весом равным средней множественности нейтронов в реакции. Полная вероятность вылета фотонейтрона из ядра определяется суммой трех процессов: равновесного, предравновесного и деления. Низкоэнергетические нейтроны рождаются также при захвате μ^- -мезона K -оболочкой атома. Полная вероятность исчезновения μ^- -мезона определяется вероятностью распада и вероятностью поглощения [4]. Для описания множественности и спектров испущенных нейтронов используется двухкомпонентная параметризация экспериментальных данных, выполненная в рамках модели "движущихся источников" [4].

В основе моделирования переноса НЭЧ в пакете MARS используется групповое приближение решения интегрального уравнения Больцмана. Пробег частицы до столкновения разыгрывается с использованием среднего полного группового сечения [1], конкретный вид взаимодействия не рассматривается, важен лишь итог столкновения – рассеяние или деление, или рождение вторичного фотона [1]-[3]. Рождение вторичных фотонов при взаимодействии ней-

тронов с веществом осуществляется принудительно в каждой точке взаимодействия нейтрона с весом равным вероятности данного процесса [3]. Рассеяние на водороде выделяется в отдельную реакцию и считается изотропным в системе центра масс. Энергия после взаимодействия определяется из соотношения вероятностей для перехода из группы в группу. Анизотропия рассеяния учитывается в P_5 -приближении. Угол рассеяния нейтрона определялся методом равновероятных интервалов [1,2]. В процессе моделирования зависимость дифференциальных характеристик поля излучения от всех переменных дискретизируется. Пространственная зависимость аппроксимируется положением и типом детекторов (точечные и объемные), энергетическая – многогрупповым приближением. В качестве оценок пространственно-энергетической плотности потока в пакете MARS реализованы оценки по столкновениям, пробегу и локальная оценка [2].

В пакете MARS реализованы две схемы расчета энерговыделения в точке взаимодействия. Первая основана на формуле для парциального группового энерговыделения, учитывающей взвешенные вклады от каждого из процессов взаимодействия нейтрона с ядром, при этом энерговыделение от взаимодействия нейтронов на водороде выделено в отдельный канал [2]. Вторая модель основана на керма-приближении для каждой точки столкновения [4].

В силу особенностей геометрического модуля программы MARS в задачах глубокого проникновения для моделирования НЭЧ-траекторий используется метод систематической выборки точек столкновений в комбинации с весовым окном [2]. Суть метода систематической выборки точек столкновений в "проталкивании" частицы с помощью расщепления и рулетки к периферийным областям геометрии задачи, при этом вес частицы должен лежать в установленном "допустимом" интервале – весовом окне.

Алгоритмы и методы, описанные выше, реализованы в виде набора процедур, независимых от других подпрограмм пакета MARS и использующих собственную, скрытую структуру данных. Программный модуль CLENMA [2] может быть использован отдельно для моделирования переноса низкоэнергетических нейтронов и фотонов

методом Монте-Карло. Процедуры объединены в общую библиотеку комплекса программ MARS и функционируют в различных версиях пакета с 1991 г. [2].

Разработанный формат FMARS и процедуры получения групповых $n\gamma$ -констант для комплекса программ MARS используют групповые библиотеки констант БНАБ-78, GNDL и BUGLE96 [1,3,4], позволяют моделировать процесс переноса нейтронов с произвольным числом групп и учитывать процессы термализации нейтронов.

Для верификации и валидации программных модулей были проведены многочисленные сравнения [1]-[4] с экспериментальными и расчетными данными. Сравнение инклюзивных дважды дифференциальных сечений выхода нейтронов при взаимодействии протонов различных энергий с ядрами иллюстрирует качество моделей рождения НЭЧ в hA -взаимодействиях. Результаты расчетов находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными [4]. Корректность низкоэнергетических модулей программы при высоких первичных энергиях проверялась по воспроизводимости результатов эксперимента по облучению железного калориметра в ЦЕРНе пучком протонов с энергией 200 ГэВ. Экспериментальные данные совпадают с расчетом в пределах погрешности [2]. НЭЧ-модули программы MARS были проверены также при моделировании нейтронных опорных полей в ЦЕРНе за верхней бетонной защитой [4,5]. Результаты расчетов нейтронных спектров по программам MARS и FLUKA сравнивались с экспериментальным спектром. Погрешность расчетных данных по средней энергии не превышает 20%, по нейтронному флюенсу – 15%, по дозе – 8 % [4].

Для оценки воздействия радиоактивности на окружающую среду при работе БАК было разработано специальное программное обеспечение – пакет RELEASE [9]. Степень воздействия ускорителя оценивается по величине эффективной дозы для населения, определяемой радионуклидами, первоначально образующимися в воздухе туннеля и подземных сооружений БАК. Расчет дозы осуществляется в три этапа. На первом этапе осуществляется расчет распределения удельной радиоактивности воздуха в туннелях и подземных сооружениях БАК, определяемого пространственно-энергетическим рас-

пределением потоков вторичных частиц, инициируемых адронным каскадом. На втором этапе проводится расчет активации воздуха в туннелях и подземных сооружениях БАК на основе моделей движения воздуха в течение времени облучения и его доставки к точке выброса с учетом диффузии и конвекционного перемешивания. На заключительном этапе рассчитываются дисперсия радионуклидов в атмосфере и эффективные дозы для населения от радиоактивных выбросов из системы вентиляции ускорителя с учетом метеорологических и радиологических процессов, происходящих на протяженной и сильно пересеченной местности района БАК [9].

В четвертой главе представлены результаты решения ряда практических задач по подготовке и проведению экспериментов на ускорителях и по физике космических лучей, которые были выполнены с помощью развитого и описанного выше программного обеспечения.

В эксперименте DIRAC [6] проводилось измерение времени жизни $\pi^+\pi^-$ -мезоатомов. Из-за высокой интенсивности первичного пучка протонов, малой базы выведенного из ускорителя PS пучка и низких допустимых пределов загрузок детекторов низкоэнергетические нейтроны и фотоны представляли серьезную проблему для чувствительных элементов экспериментальных установок и определяли "фоновый сигнал" в детекторах и системах обработки сигнала [6]. В результате серии расчетов было показано, что взаимодействие протонного пучка с керном поглотителя является определяющим в формировании фоновой загрузки детекторов. Для первоначальной схемы эксперимента фоновые загрузки существенно превышают допустимые для большинства детекторов. Для окончательной схемы эксперимента DIRAC был предложен новый вариант защиты. Оптимальный вариант и новая конструкция поглотителя пучка позволили обеспечить соотношение фон/сигнал менее 1% для дрейфовых камер и сцинтилляционных годоскопов. Фоновые загрузки для мюонных камер снижены в 350 раз по сравнению с первоначальной схемой эксперимента, соотношение фон/сигнал для мюонных камер составило 20-30% для всех режимов работы эксперимента [6].

На бустере ИФВЭ выполнена серия экспериментов [7], в которых измерялся выход нейтронов из протяженной вольфрамовой мишени. Эти данные представляют интерес как для верификации расчетных программ, так и для оптимального выбора материала мишени в электроядерных и трансмутационных установках. Пакет программ MARS был использован при подготовке и планировании эксперимента. Впоследствии, с целью верификации алгоритмов численного моделирования, различными группами были проведены расчеты выхода нейтронов для данной установки при помощи программных пакетов HERMES, LANET и NMTC/JAERI-MCNP4A. Результаты расчетов по всем программам удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными и достаточно хорошо согласуются друг с другом, несмотря на то, что все программы используют различные системы констант, модели описания ядерных реакций и транспорта адронов и библиотеки нейтронных данных.

Высокоэнергетические частицы галактического космического и солнечного излучения проходят сквозь геомагнитную защиту Земли и входят в атмосферу. Эти частицы инициируют развитие ЯЭК в атмосфере и в материалах обшивки воздушных судов и космических аппаратов. Для типичных высот полета воздушных судов (10-13 км выше уровня моря) средняя мощность амбиентной дозы достигает величины $10 \text{ мкЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$, до половины которой дают нейтроны. За один перелет пассажиры и экипаж могут получить эквивалентную дозу около 3% от регламентированного годового предела. Измерения спектров вторичных частиц в самолете затруднены из-за нестационарных условий эксперимента и сложного компонентного состава радиационных полей. Для оценки достоверности экспериментальных данных и для определения приближенных калибровочных факторов, зависящих от спектров частиц, были использованы расчеты нейтронных спектров на основе пакета MARS с использованием разработанных алгоритмов переноса НЭЧ [8]. Спектры нейтронов были рассчитаны для различных глубин атмосферы. Проведены сравнения расчетов по программе MARS с данными измерений нейтронных спектров на вершине горы Zugspitze (2963 м над уровнем моря) и результатами расчетов, выполненных по программе FLUKA [8]. Показано, что с

глубины атмосферы $200 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$ форма нейтронных спектров практически одинакова, ослабление флюенса нейтронов следует экспоненциальному закону, поэтому можно считать отношение поглощенной дозы к эквивалентной дозе постоянной величиной [8].

Разработанный программный пакет RELEASE был использован для расчета эффективной дозы для населения вследствие выбросов радиоактивного воздуха из системы вентиляции Большого Адронного Коллайдера [9]. Эффективная доза облучения, получаемая критическими группами населения, проживающими на территории, прилегающей к БАК, определяется характеристиками ускорителя, степенью детализации геометрического описания туннеля, технологических и экспериментальных залов БАК, погодными статистиками и путями облучения населения. При этом условия облучения могут меняться с изменением параметров системы вентиляции ускорителя или с изменением условий проведения экспериментов [9]. Максимальные значения эффективных доз достигаются вблизи точек выброса радиоактивного воздуха в районе систем коллимации пучка. Максимальная доза определяется короткоживущими радионуклидами и не превышает $1/10$ от годового дозового предела.

В заключении подводятся основные итоги исследования:

1. Созданы формализованные программные алгоритмы прямого инклюзивного моделирования образования и переноса низкоэнергетических частиц при развитии ЯЭК.
2. В рамках пакета программ MARS создано программное обеспечение для моделирования переноса низкоэнергетических частиц при развитии ядерно-электромагнитных каскадов. Оно включает в себя: модули физических процессов, модули оптимизации дерева траекторий низкоэнергетических частиц, программы подготовки групповых низкоэнергетических констант, прикладное программное обеспечение для решения радиационно-физических задач. Пакет используется в настоящее время для расчетных исследований в ИФВЭ и ЦЕРН.

3. Исследован широкий круг прикладных физических проблем, связанных с подготовкой и проведением экспериментов по физике высоких энергий.

- С помощью пакета MARS исследованы фоновые условия для детекторов эксперимента DIRAC в различной конфигурации. Проведена оптимизация схемы эксперимента, определены оптимальные параметры защиты и поглотителя пучка.
- Проведена подготовка и моделирование серии экспериментов на бустере ИФВЭ, получены данные по выходу нейтронов из протяженных мишеней при облучении их протонами средних энергий.
- Рассчитаны нейтронные спектры на различной глубине в атмосфере от космического излучения с учетом геомагнитного поля земли. Результаты использованы при выработке рекомендаций европейской комиссии EURADOS по безопасности полетов самолетов гражданской авиации.
- Создан прикладной программный пакет RELEASE, позволяющий рассчитать эффективные дозы для населения от распределенных выбросов радиоактивного воздуха из системы вентиляции ускорителей на протяженной и пересеченной местности. Получена карта распределения дозы на участке площадью 20x20 км² при работе Большого Адронного Коллайдера.

Список литературы

- [1] И.Л. Ажгирей, И.А. Курочкин, Н.В. Мохов. *К расчету полей адронов в протяженных блоках вещества*. В сб.: Тезисы докладов 4-й Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок, Томск, ТПИ, 10-12.09.85. – Томск, 1985, с. 8.

- [2] И.С. Байшев, И.А. Курочкин, Н.В. Мохов. *Расширение возможностей комплекса программ MARS10*. Препринт ИФВЭ 91-118, Протвино, 1991.
- [3] И.Л. Ажгирей, И.А. Курочкин, М.А. Маслов, В.В. Таланов, А.В. Узунян. *MARS93. Развитие комплекса программ ИФВЭ для моделирования ядерно-электромагнитных каскадов в области энергий до 20 ТэВ*. Препринт ИФВЭ 93-19, Протвино, 1993.
- [4] И.А. Курочкин. *Моделирование низкоэнергетических частиц в комплексе программ MARS*. В сб.: Тезисы докладов VIII Российской научной конференции по радиационной защите и радиационной безопасности в ядерных технологиях, Обнинск, ГНЦ ФЭИ им. академика А.И. Лейпунского, 17-19 сентября 2002 г. – Обнинск, 2002, с. 246-247.
- [5] I.L. Azhgirey, I.A. Kurochkin, A.V. Sannikov, E.N. Savitskaya. *Calculation of high energy hadron spectra at the CERN-CEC reference field facility by the MARS'95 and HADRON codes*. // Nucl. Instr. and Meth. A 408 (1998), p. 535-542.
- [6] B. Adeva, L. Afanasyev, M. Benayon et al. *DIRAC: A high resolution spectrometer for pionium detection*. // Nucl. Instr. and Meth. A 515 (2003), p. 467-496.
- [7] A.M. Andreev, I.L. Azhgirey, V.I. Beljakov-Bodin, G.I. Krupny, I.A. Kurochkin, R.E. Moiseev, V.A. Sherstev, G.N. Stetsenko, A.A. Yanovich. *Benchmark experiment with tungsten target bombarded by medium energy protons*. In: Proc. of Int. Conf. on Future Nuclear Systems GLOBAL'97, Oct. 1997, Yokohama, Vol. 1, p. 446.
- [8] I.A. Kurochkin, B.R.L. Siebert, B. Wiegel. *Study of the Radiation Environment caused by Galactic Cosmic Rays at Flight Altitudes, at the Summit of the Zugspitze and PTB Braunschweig*. // Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, No. 4, 1999, p. 281.

- [9] I.A. Kourotchkine. *The Calculation of the Effective Dose to the Public due to Air Release from the LHC Facilities*, CERN/TIS-RP/TN/2003-001, Geneva, 2003.

Рукопись поступила 15 ноября 2006 г.

И.А. Курочкин

Развитие программного обеспечения для моделирования переноса
низкоэнергетических частиц в комплексе программы MARS.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **Л^AT_EX**.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 15.11.2006. Формат 60 × 84/16.
Офсетная печать. Печ.л. 1,12. Уч.-изд.л. 0,9. Тираж 100. Заказ 104.
Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2006-25, И Ф В Э, 2006
