

УДК 524.1629.78

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ И ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ЗА ЗАЩИТОЙ ОТ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАНСПОРТНОГО КОДА SHIELD

© 2021 г. Н. М. Соболевский^{1, *}, Л. Н. Латышева¹, Н. В. Кузнецов²,
М. И. Панасюк², М. В. Подзолко²

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*sobolevs@inr.ru

Поступила в редакцию 15.07.2020 г.

После доработки 08.09.2020 г.

Принята к публикации 17.09.2020 г.

Разработана специальная версия транспортного кода SHIELD, предназначенная для задач радиационной защиты в космосе. Выполнен расчет потоков первичных и вторичных частиц и мощности поглощенной дозы в водном фантоме за различной защитой под воздействием галактических космических лучей (ГКЛ) с использованием модели ГКЛ, разработанной НИИЯФ МГУ. Кратко описана архитектура кода SHIELD, включая модели ядерных реакций. Тормозные способности $dE/dX(E)$ вычисляются в интервале энергий 10 кэВ/нуклон–100 ГэВ/нуклон. Расчет выполнен в сферической геометрии, что позволяет в простой постановке задачи, сравнить потоки частиц разных типов в фантоме, а также оценить вклад в дозу разных компонент ГКЛ в зависимости от параметров защиты.

DOI: 10.31857/S0023420621030109

ВВЕДЕНИЕ

В течение ряда лет обсуждается Международный проект по созданию орбитальной космической станции на окололунной орбите. Начиная с 2013 г. проводятся ежегодные рабочие совещания под общим названием “Радиационная обстановка и анализ рисков на поверхности Луны и вблизи нее” (Radiation Environment and Risk Analysis At and Near the Lunar Surface) с участием представителей Роскосмоса, NASA, Европейского космического агентства (ESA), Канадского космического агентства (CSA) и Агентства аэрокосмических исследований Японии (JAXA). Последнее совещание состоялось в Москве в 2019 г.

Реализация проекта встречает определенные трудности. В частности, нормативы по допустимой дозовой нагрузке на космонавтов различны в разных странах. Подходы участников к построению моделей космических лучей также несколько различаются. Существуют и другие причины, по которым данный проект не получил пока официального статуса. Тем не менее, обсуждаемый проект стимулировал прогресс в научных исследованиях.

Очевидно, станция на окололунной орбите не защищена магнитосферой Земли от галактиче-

ских космических лучей (ГКЛ) и подвергается их постоянному воздействию.

Были уточнены модели ГКЛ, а также солнечных космических лучей (СКЛ).

Был выполнен большой объем расчетов воздействия ГКЛ на различные объекты. Необходимо подчеркнуть, что расчеты потоков частиц и дозовых полей для реальной геометрии космической станции весьма сложны. Здесь применяются известные компьютерные программы, разработанные в США, Европе, Японии, например, программа GEANT4, разработанная в CERN, и в том числе отечественная программа SHIELD [1] (<http://inr.ru/shield/>).

В данной работе представлена специальная версия транспортного кода SHIELD, предназначенная для задач радиационной защиты в космосе. С ее помощью выполнен расчет потоков частиц и поглощенной дозы в водном фантоме за защитным экраном из алюминия и пластика разной толщины, при облучении изотропным потоком ГКЛ в сферической геометрии. Это позволяет, в простой постановке задачи, сравнить потоки вторичных частиц разных типов в фантоме, а также оценить вклад в мощность дозы разных компонент ГКЛ в зависимости от толщины и материала защиты.

1. СПЕКТРЫ ГКЛ

В настоящих расчетах использовались спектры ГКЛ в области орбиты Земли вне ее магнитосферы для 24-го солнечного цикла, рассчитанные по разработанной в НИИЯФ в 2017–2019 гг. новой версии модели ГКЛ [2, 3]. В этой модели диапазон масс ядер ГКЛ распространяется от протона до ядер никеля, а энергия – от 10 МэВ/нуклон до 100 ГэВ/нуклон. Бралась спектры в минимуме солнечной активности, когда поток ГКЛ максимален.

Поскольку использовать индивидуальный спектр для каждого ядра затруднительно, ядра снаряды были объединены в группы, представленные одним усредненным ядром, как показано в табл. 1.

Результаты моделирования (потоки и дозы) для каждого снаряда ГКЛ, указанного в первой строке таблицы, умножаются на весовой фактор из последней строки. И использованные спектры представлены на рис. 1.

2. ТРАНСПОРТНЫЙ КОД SHIELD

Транспортный код SHIELD [1] (<http://inr.ru/shield/>) позволяет моделировать перенос в веществе нуклонов, пионов, каонов, антинуклонов и мюонов, а также ядер с произвольными значениями (Z, A) при энергиях до 1 ТэВ/нуклон. Геометрическая конфигурация мишени может быть произвольной комбинацией тел, ограниченных поверхностями второго порядка. Химический и изотопный состав материалов в каждой геометрической зоне мишени произвольный. Учитываются ионизационные потери энергии заряженных частиц и ионов, флуктуации ионизационных потерь, многократное кулоновское рассеяние и основные моды распада пионов и каонов.

При моделировании адронного каскада в мишени учитываются все поколения вторичных частиц. Формируются источники вторичных частиц – нейтронов низкой энергии ($E_n < 14.5$ МэВ), γ -квантов, электронов/позитронов и нейтрино (как продуктов распадов мезонов). Все эти частицы хранятся в специальных массивах со всеми их индивидуальными параметрами. После завершения адронного каскада перенос нейтронов с энергиями ниже 14.5 МэВ из массива источника моделируется с использованием программы переноса

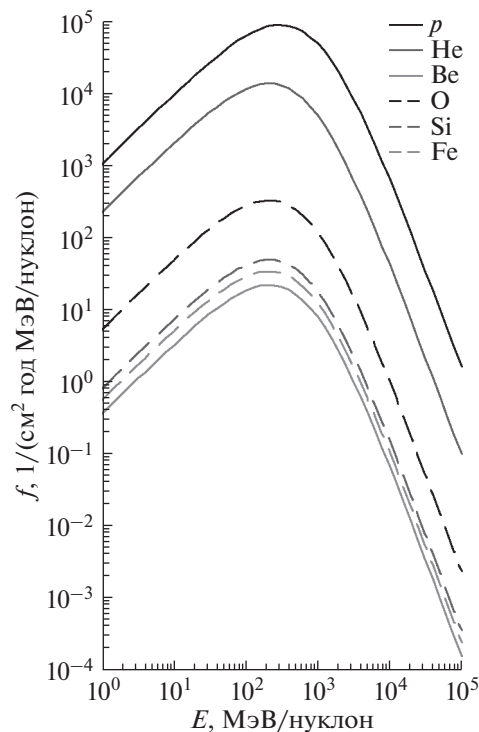


Рис. 1. Дифференциальные потоки протонов и рассмотренных групп ядер ГКЛ в космосе в минимуме 24-го солнечного цикла.

нейтронов LOENT (Low Energy Neutron Transport) [4] на основе 28-групповой системы нейтронных констант ABBN [5]. Код LOENT может использоваться как совместно с кодом SHIELD, с которым он имеет общий геометрический модуль и ряд общих подпрограмм, так и независимо, для моделирования переноса нейтронов низкой энергии.

В коде SHIELD реализовано запоминание дерева адронного каскада полностью, без потери физической информации, с учетом всех возможных корреляций [6]. Хранение дерева осуществляется в специальных массивах, в привязке к геометрической конфигурации мишени. Такая организация вычислений позволяет полностью разделить моделирующую и регистрирующую части кода. При необходимости пользователь может запоминать деревья на внешнем носителе, визуализировать деревья. По завершении моделирования очередного адронного каскада массивы дерева очищаются.

Таблица 1. Представление химического состава ГКЛ

Снаряд ГКЛ	^1_1H	^4_2He	^9_4Be	$^{16}_8\text{O}$	$^{28}_{14}\text{Si}$	$^{56}_{26}\text{Fe}$
Представляет ядра	^1_1H	^4_2He	Li, Be, B	C–Ne	Na–Ar	K–Ni
Весовой фактор	1	1	7.0	2.16	2.84	1.77

Возможности транспортного кода существенно зависят от генератора неупругих ядерных взаимодействий. В транспортном коде SHIELD используется генератор MSDM (Multi-Stage Dynamical Model) [7], который включает в себя последние версии известных российских моделей ядерных реакций. Быстрая, каскадная стадия ядерной реакции при энергиях ниже 1 ГэВ моделируется на основе Дубненской модели внутриядерного каскада (DCM) [8]. Выше 10 ГэВ используется модель кварк-глюонных струн (QGSM) [9], а в промежуточном диапазоне 1–10 ГэВ – некоторое расширение QGSM [10]. Таким образом, обеспечивается самосогласованное описание быстрой стадии ядерных реакций во всем диапазоне энергий первичных адронов и ядер при энергиях до 1 ТэВ/нуклон. По окончании каскадной стадии нуклоны, которые находятся близко друг к другу в импульсном пространстве, могут объединяться, образуя сложную частицу (стадия коалесценции) [8]. Коалесценция приводит к образованию быстрых вторичных легчайших ядер – d , t , ${}^3\text{He}$ и α -частиц.

Эволюция возбужденного остаточного ядра к равновесному состоянию описывается в терминах предравновесной модели, основанной на решении соответствующего мастер-уравнения методом Монте-Карло [11]. Дальнейшее снятие возбуждения с остаточного ядра включает несколько механизмов. Для легких ядер ($A < 16$) применяется модифицированная модель Ферми-развала [12]. Средние и тяжелые ядра при умеренных возбуждениях ($E^* < 2$ МэВ/нуклон) снимают возбуждение путем “испарения” частиц [12]. Для тяжелых ядер реализуется конкуренция испарения и деления [13]. Высоковозбужденные ядра ($E^* > 2$ МэВ/нуклон) могут распадаться на несколько возбужденных фрагментов в соответствии со Статистической моделью мульти-фрагментации (SMM) [14] с последующим испусканием частиц из возбужденных фрагментов. Таким образом, генератор MSDM [7] обеспечивает описание всех этапов ядерной реакции в эксклюзивном подходе.

3. АДАПТАЦИЯ SHIELD ДЛЯ ЗАДАЧ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ В КОСМОСЕ

В предыдущем разделе описана общая версия транспортного кода SHIELD. Однако существуют задачи, которые требуют учета их специфики при применении кода. В частности, по этой причине была разработана “медицинская” версия кода SHIELD-HIT (Heavy Ion Therapy), предназначенная для расчетов в области адронной терапии в онкологии [15, 16] (<http://shieldhit.org/>).

Существенное отличие медицинской версии от общей версии SHIELD состоит в прецизионном расчете тормозных способностей dE/dX при низких энергиях, в области от ≈ 10 кэВ до нескольких МэВ/нуклон. Как известно, биологиче-

ское воздействие облучения в адронной терапии определяется эквивалентной дозой Н (измеряется в зивертах/Sv), которая растет с ростом линейной передачи энергии (ЛПЭ). ЛПЭ максимальна в указанной области низких энергий, поэтому точный расчет dE/dX здесь особенно важен. В коде SHIELD-HIT при расчете тормозных способностей используются рекомендованные ICRU (International Commission on Radiation Units) данные в виде таблиц dE/dX [17, 18]. Использование этих данных общепринято в адронной терапии. С другой стороны, специфика задачи сужает область применения медицинской версии SHIELD-HIT узким интервалом энергий, ниже 2 ГэВ/нуклон, а также легкими ионами-снарядами (от протона до аргона). Отметим, что в коде SHIELD-HIT используется тот же генератор ядерных реакций MSDM, что и в общей версии кода.

Переходя к задаче радиационной защиты в космосе, заметим, что в методах расчета здесь существует определенная аналогия с адронной терапией. Воздействие на космонавтов ядерных фрагментов низких энергий весьма значительно из-за высокой ЛПЭ. Дозы радиации на *Международной космической станции* в ≈ 200 раз больше, чем в обычных земных условиях [19]. Высокая ЛПЭ приводит также к сбоям микросхем электроники.

С другой стороны, в отличие от адронной терапии, оценка радиационного риска для человека в космосе предполагает рассмотрение потоков частиц и ядер в очень широком интервале энергий, от ≈ 10 кэВ/нуклон до 100 ГэВ/нуклон. Нижняя граница определяется высокой линейной передачей энергии (ЛПЭ) при низких энергиях, как и в адронной терапии. Верхняя граница 100 ГэВ/нуклон является общепринятой при представлении спектра ГКЛ в контексте радиационной защиты в космосе, а диапазон ионов-снарядов ГКЛ расширяется до никеля (см. раздел 1).

Исходя из вышеизложенного, естественным путем разработки программы для решения задач радиационной защиты в космосе представляется модификация медицинской версии SHIELD-HIT за счет радикального расширения энергетического диапазона и набора ядер-снарядов ГКЛ, что и было сделано в настоящей работе. При этом сохранен прецизионный расчет тормозных способностей dE/dX при низких энергиях. Созданную таким путем программу назовем SHIELD-HITGCR.

4. РАСЧЕТ ТОРМОЗНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ dE/dX

При Монте-Карло моделировании взаимодействия частиц и ядер со сложными макроскопическими мишенями необходимо знать тормозные способности dE/dX всех материалов мишени для

всех заряженных частиц и ядерных фрагментов, фигурирующих в задаче. Эти данные необходимы для расчета зависимостей пробег-энергия $R(E)$, оптическая толщина-энергия $L(E)$ и других целей.

Тормозные способности dE/dX , а также функции $R(E)$ и $L(E)$ вычисляются заранее, до начала Монте-Карло моделирования, и запоминаются в специальных массивах на подробной энергетической сетке. Затем, в процессе моделирования, тормозные способности и функции $R(E)$ и $L(E)$ вычисляются путем быстрой интерполяции в таблицах. Для сложных веществ применяется правило аддитивности Брэгга.

Общеизвестная формула Бете-Блоха для dE/dX [20] используется для решения многих задач. Однако она не применима при энергии ниже ≈ 1 МэВ для протонов и ниже нескольких МэВ/нуклон для легких ионов, т. к. не учитывает изменение зарядового состояния снаряда при низких энергиях. При этом такое актуальное направление как адронная терапия в онкологии требует точных данных dE/dX при низких энергиях, вплоть до ≈ 10 кэВ/нуклон. Другое актуальное направление – оценка воздействия космического излучения на экипажи космических кораблей и электронику. Здесь также требуются данные dE/dX при низких энергиях ≈ 10 кэВ/нуклон, однако верхняя граница интервала энергий поднимается до 100 ГэВ/нуклон, как обсуждалось в разделе 4.

В работе [21] подробно описано, как в коде SHIELD с помощью модификации формулы Бете-Блоха при низких энергиях для учета перезарядки снаряда, а также подключения ICRU-рекомендованных данных [17, 18], удается вычислить тормозные способности dE/dX для любых материалов мишени и любых снарядов в требуемом диапазоне энергий с удовлетворительной точностью. Следуя [21], назовем эти тормозные способности “ dE/dX по умолчанию”. На рис. 2, в качестве иллюстрации, представлены тормозные способности воды “по умолчанию”, вычисленные программой SHIELD-HITGCR в настоящей работе. Аналогично вычисляются тормозные способности остальных материалов в данной задаче – воздуха, алюминия и пластика.

5. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ПОТОКОВ ЧАСТИЦ И ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ

На рис. 3 изображена сферическая конфигурация, которая облучается изотропным потоком ГКЛ. Сферический экран толщиной 27 или 15 г/см² имеет внешний радиус $R = 200$ см. Материал экрана – алюминий, или углепластик КМУ-1 с плотностью $\rho = 1.49$ г/см³. Сферический водный фантом радиусом $r = 15$ см, окружен воздухом.

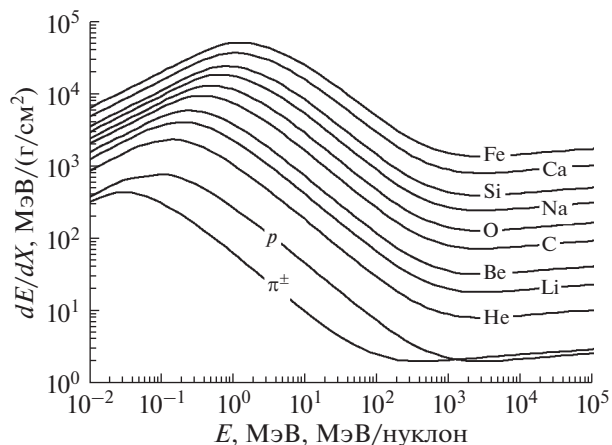


Рис. 2. Тормозная способность воды для некоторых частиц и ядер: π^\pm , протонов, ${}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{23}\text{Na}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{56}\text{Fe}$.

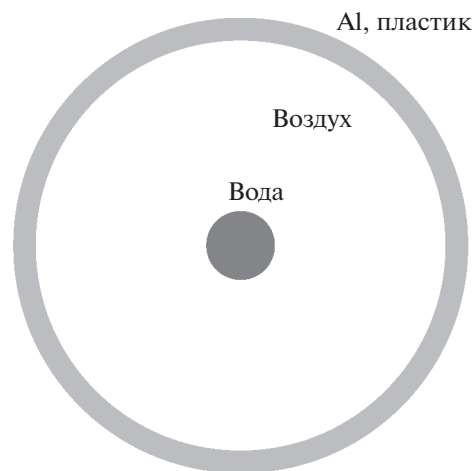


Рис. 3. Сферическая конфигурация мишени, облучаемой изотропным потоком ГКЛ.

Регистрация потоков проводилась методом оценки по длине пробега (Track length estimation) по всему объему фантома. Поэтому приведенные в следующем разделе дифференциальные потоки частиц и ядерных фрагментов в воде усреднены по объему фантома. Регистрировалось также энерговыделение (поглощенная доза) в водном фантоме от всех заряженных адронов и ядерных фрагментов всех поколений.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

На рис. 4–6 представлены дифференциальные потоки частиц и ядерных фрагментов, усредненные по объему водного фантома, за экранами из алюминия толщиной 27 г/см² и углепластика КМУ-1 толщиной 15 и 27 г/см² для всех типов первичных ядер-снарядов ГКЛ, которые учитывались в настоящих расчетах. На каждом графике

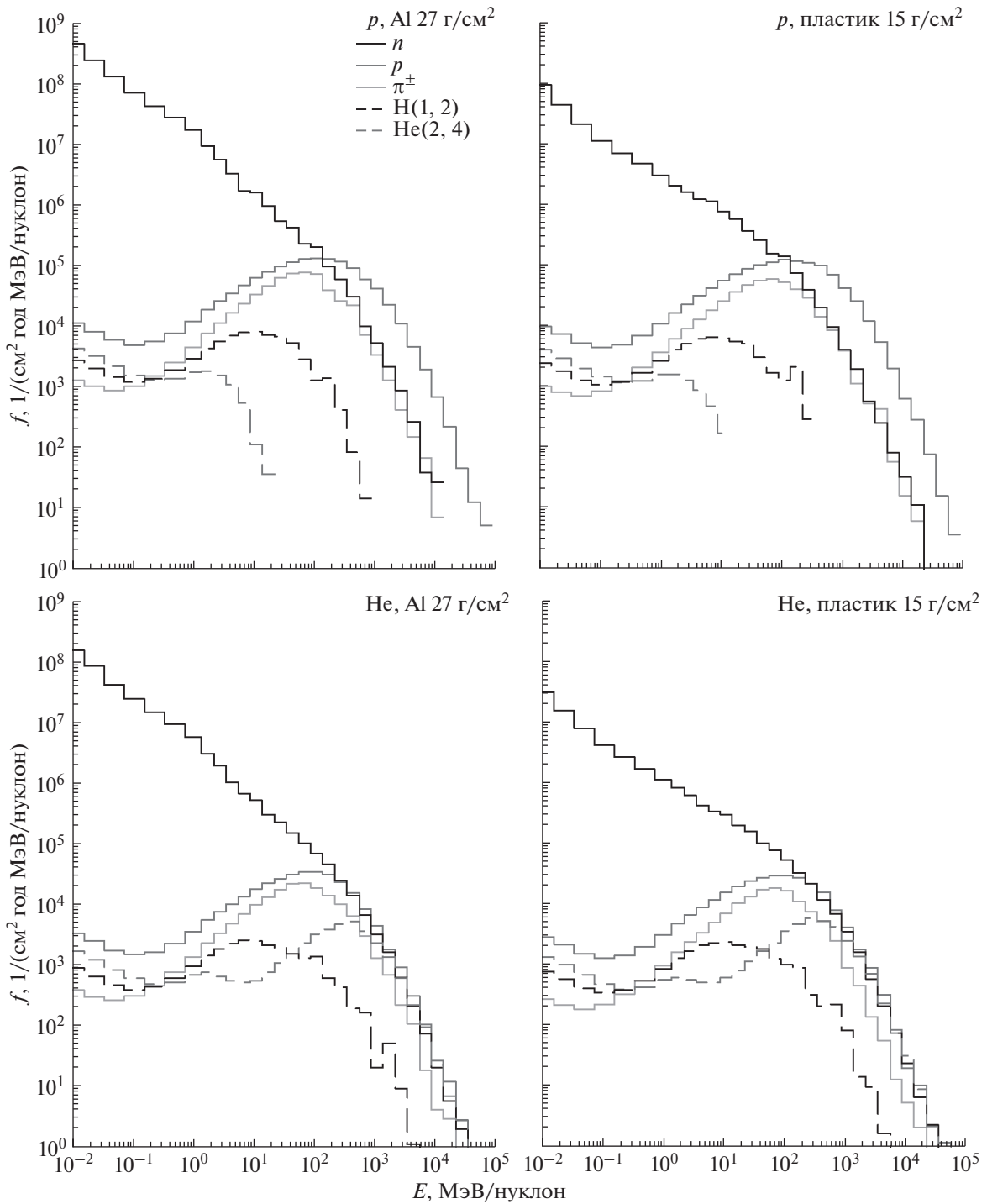


Рис. 4. Спектры частиц за защитой из Al толщиной 27 г/см^2 (слева) и пластика толщиной 15 г/см^2 (справа) при облучении протонами (верхние графики) и ядрами ${}^4_2\text{He}$ (нижние) ГКЛ.

показаны энергетические спектры рассматриваемого прибора ГКЛ, а также всех вторичных частиц, потоки которых значительно превосходят потоки остальных.

Потоки на рис. 4–6 нормированы на время облучения приборами ГКЛ. Процедура пересчета

числа событий Монте-Карло в реальное время облучения описана, например, в [22], в разделе 4.5 главы 4.

Как видно из рис. 4–6, потоки вторичных протонов, легчайших ядер d , α и заряженных пионов π^\pm превышают поток первичного ядра-снаряда

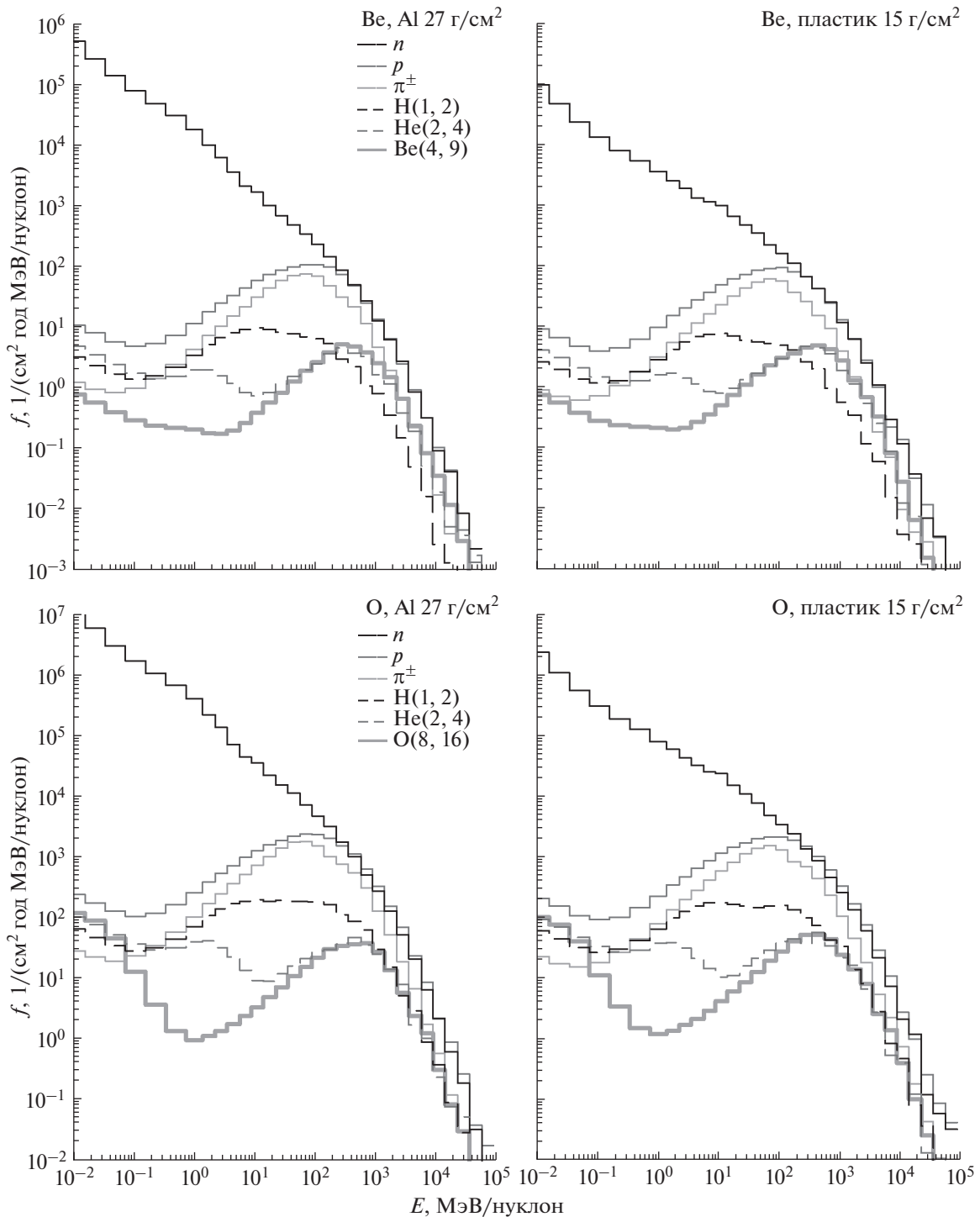


Рис. 5. Спектры частиц за защитой из Al толщиной 27 г/см² (слева) и пластика толщиной 15 г/см² (справа) при облучении ядрами групп ${}^9_2\text{Be}$ (верхние графики) ${}^{16}_8\text{O}$ (нижние) ГКЛ.

ГКЛ, начиная с ${}^9_4\text{Be}$. Даже для более легкого снаряда ${}^4_2\text{He}$ это верно в части потоков вторичных протонов и пионов. С ростом массы снаряда ГКЛ указанная тенденция усиливается. Следует также отметить, что потоки вторичных пионов π^\pm сопо-

ставимы с потоками вторичных протонов, т.е. потоки вторичных пионов достаточно высоки.

На рис. 7 сравнивается мощность поглощенной дозы в водном фантоме при защитном экране из алюминия толщиной 27 г/см² и углепластика

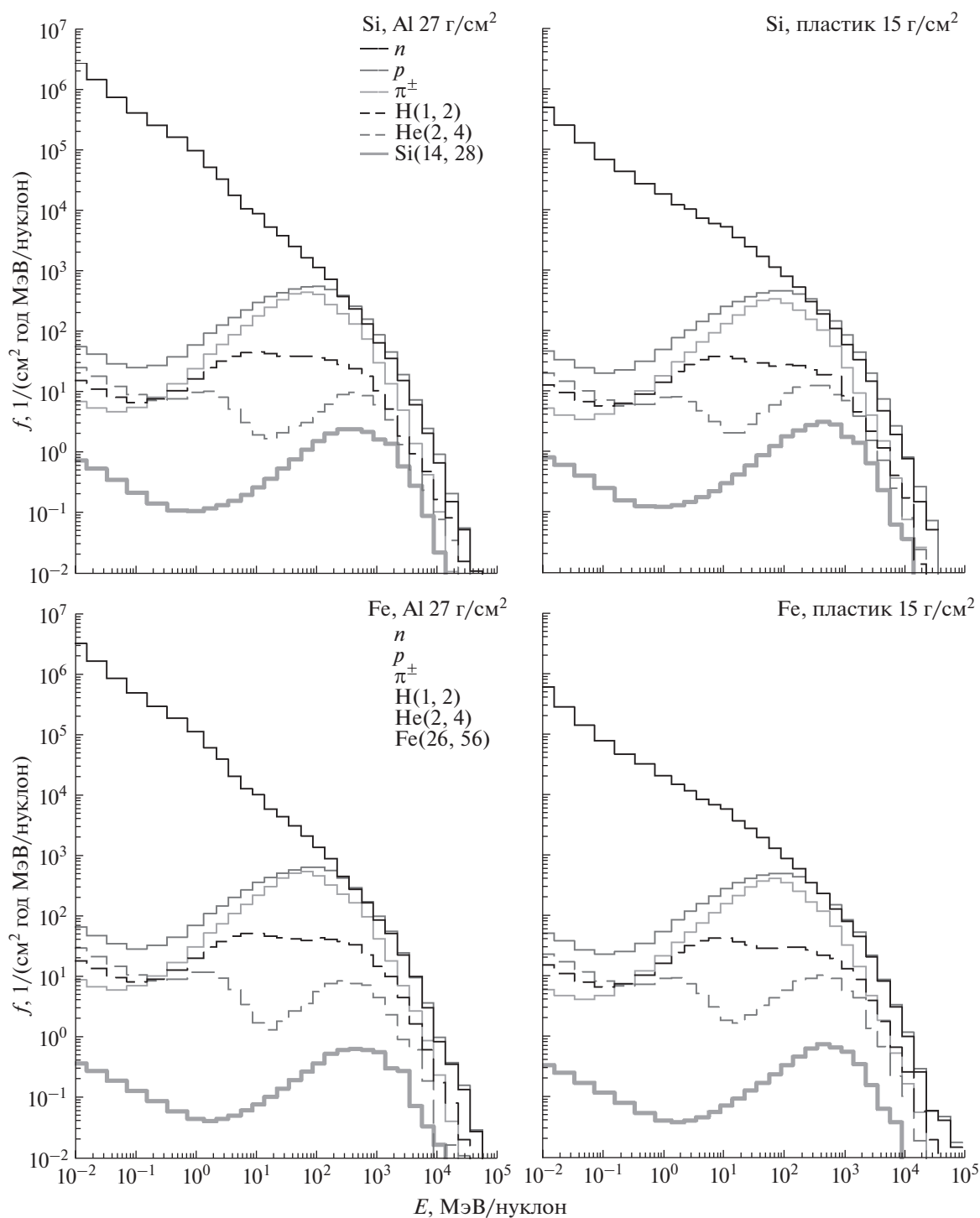


Рис. 6. Спектры частиц за защитой из Al толщиной 27 г/см^2 (слева) и пластика толщиной 15 г/см^2 (справа) при облучении ядрами групп $^{28}_{14}\text{Si}$ (верхние графики) и $^{56}_{26}\text{Fe}$ (нижние) ГКЛ.

толщиной 15 и 27 г/см^2 . Показана суммарная мощность дозы, а также вклад каждого снаряда ГКЛ (с учетом весового фактора в табл. 1).

Можно констатировать, что экран из углепластика толщиной 15 г/см^2 обеспечивает практиче-

ски такую же защиту, как и алюминиевый экран толщиной 27 г/см^2 . При одинаковой геометрической толщине 10 см масса экрана из углепластика в 1.8 раза меньше, чем масса алюминиевого экрана. Использование экрана из углепластика тол-

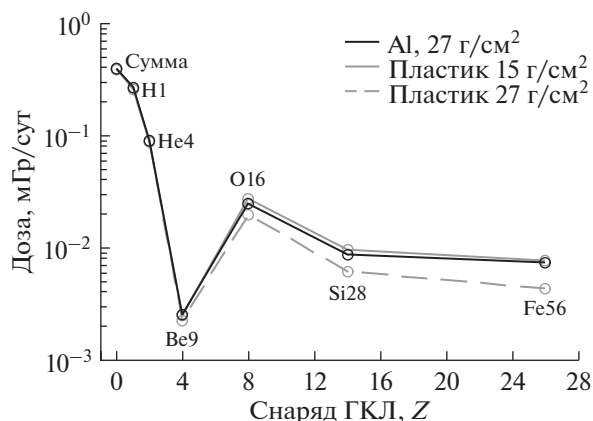


Рис. 7. Мощность поглощенной дозы при разных толщинах и материалах экрана.

щиной 27 г/см^2 (18 см) очевидно является избыточным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью настоящей работы являлась, в первую очередь, разработка специальной версии транспортного кода SHIELD, предназначенной для задач радиационной защиты в космосе. Эта версия получила название SHIELD-HITGCR. Она создана на основе известного кода SHIELD-HIT (Heavy Ion Therapy), который хорошо зарекомендовал себя в контексте задач адронной терапии в онкологии [15, 16] (<http://shieldhit.org/>), путем радикального расширения энергетического диапазона ядер-снарядов до 100 ГэВ/нуклон, а также расширения их набора, в соответствии с химическим составом ГКЛ, до никеля. При этом сохранен прецизионный расчет тормозных способностей dE/dX при энергиях ниже нескольких МэВ/нуклон, где высока ЛПЭ.

С использованием программы SHIELD-HITGCR выполнен расчет потоков частиц и поглощенной дозы при облучении изотропным потоком ГКЛ в водном фантоме за защитным экраном в сферической геометрии. Сравнились потоки первичных и вторичных частиц разных типов в водном фантоме, а также оценивался вклад в мощность дозы разных компонент ГКЛ в зависимости от толщины и материала защитного экрана.

В дозу радиации при облучении ГКЛ за рассматриваемыми толщинами защиты, характерными для пилотируемых космических станций, значительный вклад вносят потоки вторичных частиц из материала защиты: нейтронов, протонов, пионов, и легчайших ядер d, α .

Экран из углепластика толщиной 15 г/см^2 обеспечивает практически такую же защиту, как и алюминиевый экран толщиной 27 г/см^2 , при

меньшей в 1.8 раз массе первого. Объяснение эффективности углепластика для защиты от ГКЛ представляется следующим. Углепластик КМУ-1 это углеродное волокно, залитое эпоксидной смолой, т. е. смесь легких элементов С, Н, N, O. При взаимодействии снаряда ГКЛ с таким экраном образуются более легкие вторичные ядерные фрагменты, чем если бы экран был из алюминия. В случае попадания в водный фантом более легкие фрагменты вносят меньшую поглощенную дозу.

Рассчитанные модельные значения энергетических спектров и доз радиации за защитой при облучении ГКЛ могут использоваться при проектировании пилотируемых космических миссий и в наземных радиобиологических имитационных экспериментах на ускорителях.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 17-29-01022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dementyev A.V., Sobolevsky N.M.* SHIELD – Universal Monte Carlo hadron transport code: scope and applications // *Radiat. Meas.* 1999. V. 30. P. 553–557. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(99\)00231-0](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(99)00231-0)
2. *Kuznetsov N.V., Popova E.P., Panasyuk M.I.* Empirical model of long-time variations of galactic cosmic ray particle fluxes // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2017. V. 122. № 2. P. 1463–1472. <https://doi.org/10.1002/2016JA022920>
3. *Kuznetsov N.V., Popova E.P., Panasyuk M.I., Podzolkov M.V.* Empirical model of galactic cosmic ray particle fluxes based on the experimental data in solar cycles 21–24 // *Proceedings of Science.* 2017. V. 301. P. (ICRC2017)001. <https://doi.org/10.22323/1.301.0001>
4. *Латышева Л.Н., Соболевский Н.М.* LOENT – программа моделирования переноса нейтронов в сложных геометриях методом Монте-Карло. Препринт ИЯИ РАН 1200/2008. М.: ИЯИ РАН, 2008.
5. *Абаган Л.П., Базаянц Н.О., Николаев М.Н., Цибуля А.М.* Групповые константы для расчета реакторов и защиты. М.: Энергоиздат, 1981.
6. *Соболевский Н.М.* Алгоритм запоминания дерева адронного каскада в транспортном коде SHIELD. Препринт ИЯИ РАН 1398/2015. М.: ИЯИ РАН, 2015.
7. *Botvina A.S., Dementyev A.V., Smirnova O.N. et al.* MSDM – multi stage dynamical model // *Ed. International Codes and Model Intercomparison for Intermediate Energy Activation Yields.* 1997. V. 97 (1). № 14. P. 307–312.
8. *Toneev V.D., Gudima K.K.* Particle emission in light and heavy ion reactions // *Ed. Nucl. Phys.* 1983. A400. P. 173–190.
9. *Амелин Н.С., Гудима К.К., Тонеев В.Д.* Ультрарелятивистские ядро-ядерные столкновения в динамической модели независимых кварк-глюонных струн // *Ядерная Физика.* 1983. Т. 51. С. 1730–1743.
10. *Амелин Н.С., Гудима К.К., Сиволоков С.Ю., Тонеев В.Д.* Дальнейшее развитие модели кварк-глюонных струн для описания высокоэнергетических

- столкновений с ядерной мишенью // Ядерная Физика. 1990. Т. 52. С. 272–282.
11. *Gudima K.K., Mashnik S.G., Toneev V.D.* Cascade-exciton model of nuclear reactions // Nucl. Phys. 1983. V. 401. № 2. P. 329–361.
[https://doi.org/10.1016/0375-9474\(83\)90532-8](https://doi.org/10.1016/0375-9474(83)90532-8)
 12. *Botvina A.S., Iljinov A.S., Mishustin I.N. et al.* Statistical simulation of the break-up of highly excited nuclei // Nucl. Phys. 1987. V. 475. № 4. P. 663–686.
[https://doi.org/10.1016/0375-9474\(87\)90232-6](https://doi.org/10.1016/0375-9474(87)90232-6)
 13. *Eren N., Buyukcizmeci N., Ogul R., Botvina A.S.* Mass distribution in the disintegration of heavy nuclei // Eur. Phys. J. A. 2013. V. 49. P. 48.
<https://doi.org/10.1140/epja/i2013-13048-1>
 14. *Bondorf J.P., Botvina A.S., Iljinov A.S. et al.* Statistical multifragmentation of nuclei // Physics Reports. 1995. V. 257. № 3. P. 133–221.
[https://doi.org/10.1016/0370-1573\(94\)00097-M](https://doi.org/10.1016/0370-1573(94)00097-M)
 15. *Gudowska I., Sobolevsky N., Andreo P. et al.* Monte Carlo Code SHIELD-HIT // Phys. Med. Biol. 2004. V. 49. № 10. P. 1933–1958.
<https://doi.org/10.1088/0031-9155/49/10/008>
 16. *Hansen D., Luehr A., Sobolevsky N., Bassler N.* Optimizing SHIELD-HIT for carbon ion treatment // Phys. Med. Biol. 2012. V. 57. № 8. P. 2393–2409.
<https://doi.org/10.1088/0031-9155/57/8/2393>
 17. *Berger M.J., Inokuti M., Andersen H.H. et al.* Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles. ICRU Report 49. International Commission of Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD, USA. 1993.
 18. *Sigmund P., Bimbot R., Geissel H. et al.* Stopping of Ions Heavier than Helium. ICRU Report 73 // J. International Commission on Radiation Units and Measurements. 2005. V. 5. № 1.
<https://doi.org/10.1093/jicru/ndi015>
 19. *Самойлов А.С., Ушаков И.Б., Шушаков В.А.* Радиационное воздействие в орбитальных и межпланетных космических полетах: мониторинг и защита // Экология человека. 2019. № 1. С. 4–9.
 20. *Tanabashi M. et al.* Review of particle physics // Phys. Rev. D. 2018. V. 98. P. 030001.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.030001>
 21. *Соболевский Н.М., Латышева Л.Н.* Модели и алгоритмы расчета тормозных способностей $dE/dX(E)$ в транспортном коде SHIELD. Препринт ИЯИ РАН. М.: ИЯИ РАН, 1443/2019.
 22. *Соболевский Н.М.* Метод Монте-Карло в задачах о взаимодействии частиц с веществом. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017.