

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**Обнинский институт атомной энергетики –**

филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**(ИАТЭ НИЯУ МИФИ)**

Отделение биотехнологий

**Выпускная квалификационная работа –  
магистерская диссертация**

по направлению подготовки: 03.04.02 Физика

Основная профессиональная образовательная программа: Инновационные технологии в  
ядерной медицине

**«Расчет дозовых нагрузок на астронавтов миссии Аполло  
методом Монте-Карло»**

Выполнил:

студент гр. МФ-М18

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Меджидов И.М.

Руководитель ВКР,  
д.ф. – м.н., главный научный  
сотрудник ФГБНУ  
ВНИИРАЭ

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Кураченко Ю.А.

Консультант по ВКР,  
д.ф. – м.н., главный научный  
сотрудник ФГБНУ  
ВНИИРАЭ

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Кураченко Ю.А.

Нормоконтроль

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Романцова И.В.

Выпускная квалификационная  
работа допущена к защите

протокол №2 от 17.06.2020

(№ протокола, дата заседания комиссии)

Руководитель  
образовательной программы  
03.04.02 физика  
к.ф.-м.н., доцент каф. Ядерной  
физики отделения ЯФит (О)  
ИАТЭ НИЯУ МИФИ

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Александрова О.П.

Обнинск, 2020

## РЕФЕРАТ

Работа 55 с., 15 рис., 13 табл., 25 ист., 3 прил.

APOLLO, ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, СОЛНЕЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, АНТРОПОМОРФНЫЙ ФАНТОМ, ВОКСЕЛЬНЫЙ ФАНТОМ, MCNP, МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО, ТРАНСПОРТ ИЗЛУЧЕНИЙ, ПОЯСА ВАН-АЛЛЕНА, ПОГЛОЩЕННАЯ ДОЗА, ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ДОЗА, ЭФФЕКТИВНАЯ ДОЗА.

Объектом исследования является дозиметрия антропоморфного фантома – «MIRD Humans».

Предмет исследования – дозы облучения астронавтов миссий «Apollo».

Цель работы – оценка дозовой нагрузки на астронавта при прохождении радиационного пояса Земли, используя транспортный код – MCNPX.

Методологической основой в работе выступает код MCNP, предназначенный для моделирования процессов переноса ионизирующего излучения в материальных системах с использованием метода Монте-Карло.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что данный программный комплекс позволяет проводить дозиметрию человека и формировать индивидуализированные антропоморфные или воксельные фантомы. Данная работа является примером расчёта дозовых нагрузок на астронавтов при космических полетах. Данный метод и программный комплекс может быть положен в основу системы индивидуального дозиметрического контроля при прохождении радиационных поясов Земли.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....	7
1.1 История изучения космического излучения .....	7
1.2 Радиационные пояса Земли.....	8
1.3 Классификация космического излучения.....	10
1.4 Вторичное излучение в атмосфере Земли .....	15
1.5 Миссии «Apollo» .....	17
1.6 Внекорабельная система жизнеобеспечения «Apollo» .....	25
1.7 Дозиметрические детекторы и полученные дозы.....	27
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ .....	31
2.1 Monte Carlo N-Particle Transport Code.....	31
2.2 Входные данные MCNP .....	32
2.2.1 Карты ячеек.....	33
2.2.2 Карты поверхностей.....	34
2.2.3 Карты данных.....	35
2.3 Метод Монте-Карло в MCNP .....	37
2.3 Антропоморфные фантомы .....	39
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ .....	42
3.1 Модель командного отсека в MCNPX.....	43
3.2 Антропоморфный фантом «MIRD» .....	43
3.3 Основные результаты .....	46
3.4 Анализ данных .....	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	52
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	53

## ВВЕДЕНИЕ

Интерес к природе космических лучей сверхвысоких энергий со стороны исследователей, работающих как в физике элементарных частиц, так и в астрофизике, не ослабевает на протяжении многих десятилетий. XX век является основополагающим как в изучении космических лучей, так и в покорении неизведанного космоса. Он запомнился человечеству значительными событиями, одним из которых является напряженное соперничество в области освоения космоса между СССР и США. Старт гонки был дан 4 октября 1957 года, когда Советским Союзом был запущен первый в мире искусственный спутник Земли – «Спутник – 1» [23]. Космическая гонка стала важной частью культурного, технологического и идеологического противостояния между двумя сверхдержавами в период холодной войны. Это было обусловлено тем, что космические исследования имели не только большое значение для научных и военных разработок, но и заметный пропагандистский эффект. В число событий гонки входят запуски искусственных спутников, полёты в космос животных и человека, а также высадка на Луну.

В 1880-м году русским ученым Константином Циолковским была разработана теория многоступенчатой жидкотопливной ракеты, способной достичь околоземной орбиты и летать в космосе [23]. Ракетные ступени и формула Циолковского по сей день используется в разработках космических ракет. Также Циолковский сделал первое теоретическое описание искусственного спутника.

Несмотря на выдающиеся открытия СССР, уже в 1961 году в США была поставлена задача осуществления первой пилотируемой высадки на Луну [23]. И спустя 8 лет в ходе миссии «Аполло-11» данная цель была выполнена высадкой Нила Армстронга и Эдвина Олдрина. Всего по программе «Аполло» было совершено 6 успешных высадок астронавтов на Луну, последняя из которых была в 1972 году [23]. Эти шесть полётов на данный момент – единственные за

всю историю человечества, когда люди высаживались на другом астрономическом объекте. Программа «Apollo» и высадка на Луну часто упоминаются как одни из величайших достижений в истории человечества, наряду с полетом Юрия Гагарина.

В СССР такое грандиозное событие восприняли как новую реальность, несмотря на состояние «холодной войны» и победу США в лунной гонке. Это достижение является величайшим в истории человечества и следовало ожидать, что оно вызовет огромный резонанс. Почти сразу после окончания миссий «Apollo» появляется и нарастает волна конспирологии.

На осуществление миссии «Apollo» расходовалось большое количество ресурсов, которые приобретались на налоги граждан. На протяжении нескольких лет граждане США задавались вопросами эффективности их затрат и возможности осуществления полета на Луну. Отрицательный ответ дал бы большое разочарование в лице граждан и пустое транжирование больших сумм денег, когда их можно было использовать на большинство земных проблем. Отсюда следует, что миссия не могла потерпеть неудачу и обязательно должна была достичь поставленной задачи, несмотря на возможность ее проведения. Конспирологи использовали это в своих теориях заговора и утверждают, что некоторые или все элементы программы «Apollo» и связанные с ней высадки на Луну были мистификацией, организованной «NASA». Самое примечательное утверждение состоит в том, что шесть пилотируемых посадок (1968 – 1972) были фальшивыми и что 12 астронавтов на самом деле не ходили по Луне.

С середины 1970-х годов различные группы и отдельные лица заявляли, что «NASA» сознательно ввели общественность в заблуждение, заставив поверить их в то, что посадка произошла, путем изготовления подделки и убийством некоторых ключевых свидетелей.

Но существует много доказательств реальности высадки, и, наконец, были сделаны прямые опровержения мнений конспирологов. С конца 2000-х годов фотографии посадочных площадок «Apollo» высокой четкости, сделанные лунным разведывательным орбитальным аппаратом (LROC), демонстрируют

посадочные модули и следы, оставленные астронавтами [15, 16]. В 2012 году были опубликованы фотографии, показывающие, что пять из шести американских флагов миссий «Apollo», установленных на Луне, все еще стоят; исключением является флаг «Apollo-11», который лежал на лунной поверхности с тех пор, как его случайно сдуло выхлопом взлетающей ракеты [17, 18]. Всё это вполне можно считать прямыми доказательствами высадки.

Казалось бы, большинство фактов предоставлено и нет причин опровергать реальность миссии «Apollo», но конспирологи все же не унимаются. Из множества материалов в интернете остановимся на самом, казалось бы, убедительном [25]. Основным опровергающим оружием авторов является излучение при пересечении поясов Ван-Аллена. Выбрав неизвестно откуда сценарий прохождения протонного пояса Ван-Аллена и применив формулы пятидесятилетней давности, и это в эпоху прецизионных моделей и численных методов, пренебрегая корректными отечественными стандартами по космическим излучениям, движимые уязвленной национальной гордостью и невежеством, они с торжеством свидетельствуют непреодолимость поясов! По их результатам, за однократным прохождением пояса Ван-Аллена последует смертельный исход экипажа в течение нескольких дней.

Досконально изучив государственные стандарты [1–5], можно сделать вывод, что протонный (внутренний) пояс Ван-Аллена действительно является основным дозообразующим фактором для астронавтов миссий «Apollo». Оценки показывают, что ~ 90 % дозы экипажа формируется протонами пояса Ван-Аллена, генерирующими в защите и окружении астронавтов широкий спектр вторичных частиц. Все остальные факторы (электроны внешнего пояса Ван-Аллена, СКЛ и ГКЛ) внесут вклад в дозу в пределах погрешности расчётов дозы, обусловленной протонами внутреннего пояса.

Исходя из этого, была поставлена цель данной работы: оценить дозовую нагрузку на астронавта при прохождении радиационного пояса Земли, используя транспортный код – MCNPX.

Для достижения этой цели были сформулированы следующие задачи:

1. Изучение метода Монте-Карло для задач транспорта частиц.
2. Освоение кода MCNPX.
3. Построение различных геометрических фигур при помощи программы «Vised» на базе MCNPX.
4. Расчет поглощенной, эквивалентной и эффективной дозы для фантома при прохождении радиационного пояса и сравнение с доступными данными.

Актуальность данной работы состоит в том, что проведением расчётов дозовых нагрузок миссий «Apollo» ранее никто серьезно не занимался. В открытом доступе имеется отчет «NASA» [9], где приводятся средние значения доз на экипаж миссий «Apollo» и нашумевшая статья автора [25], которая получила колоссальное распространение в глобальной сети Интернет за счет опровержения космических экспедиций «NASA». Расчеты данной работы направлены на то, чтобы показать, как с высокой точностью оценить дозу облучения на отдельные органы и на человека в целом при помощи прецизионного моделирования в программной среде – MCNPX.

# ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 История изучения космического излучения

Еще в начале 20-го века были первые представления о существовании испускаемого Солнцем корпускулярного излучения. Биркеланд и Штёмер [19] считали, что полярные сияния обусловлены струйными солнечными потоками частиц, но объяснить их происхождение они не могли. При проведении первых экспериментов с регистрацией радиоактивности, было обнаружено [19], что существует постоянный фон излучения, не связанный с наличием радиоактивного источника. Были предположения, что это активность материалов детекторов. Однако уже в 1911 году Гесс [19] выполнил измерения в атмосфере, установив счетчик частиц на воздушном шаре, и обнаружил рост показаний детекторов с высотой. Таким образом, было установлено, что главной причиной фона является излучение, входящее в атмосферу извне, из космического пространства.

Исследования космической радиации оказали огромное влияние на развитие ядерной физики в целом. Когда Чедвик в 1932 году открыл нейтрон, картина материального мира казалась завершенной. Вся материя казалась состоящей из 4-х фундаментальных частиц: протонов, нейтронов, электронов и фотонов. Но в том же 1932 году при изучении космического излучения Андерсоном был открыт позитрон [19] – первая античастица. Спустя пять лет была открыта отрицательно заряженная частица с массой около 200 масс электрона – мюон. С тех пор было открыто множество субъядерных частиц, многие из которых впервые наблюдались в космических лучах.

Звезды являются источниками космического излучения. Особо мощные вспышки излучения наблюдаются при взрывах сверхновых. Солнце испускает электромагнитное излучение в широком энергетическом диапазоне. Интенсивность излучения Солнца зависит от его активности. Расчеты,

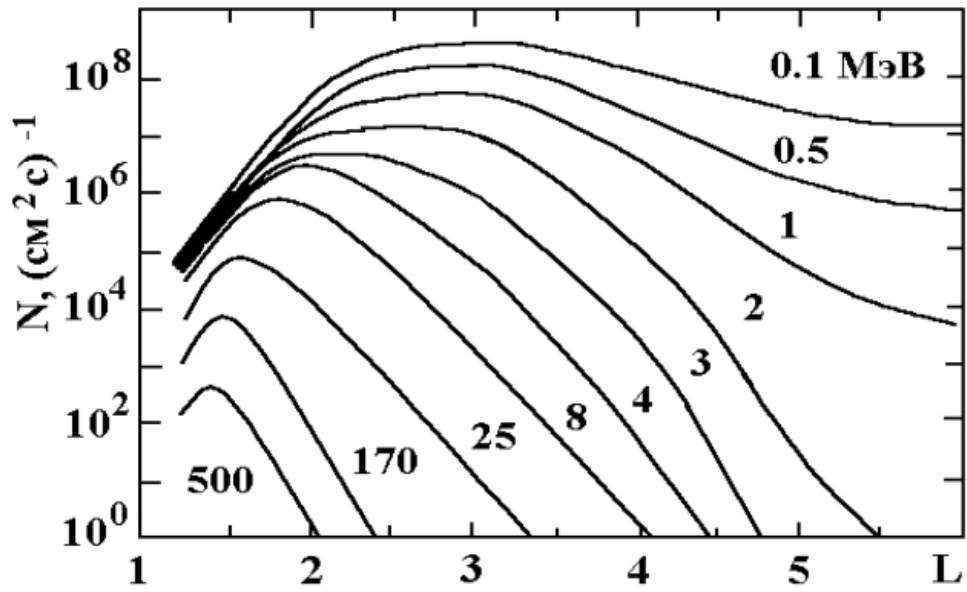


выполненные в последние десятилетия со спутников, позволили надежно выделить в пространстве и исследовать как направленное солнечное излучение, так и практически изотропное галактическое излучение из нашей и соседних галактик.

## 1.2 Радиационные пояса Земли

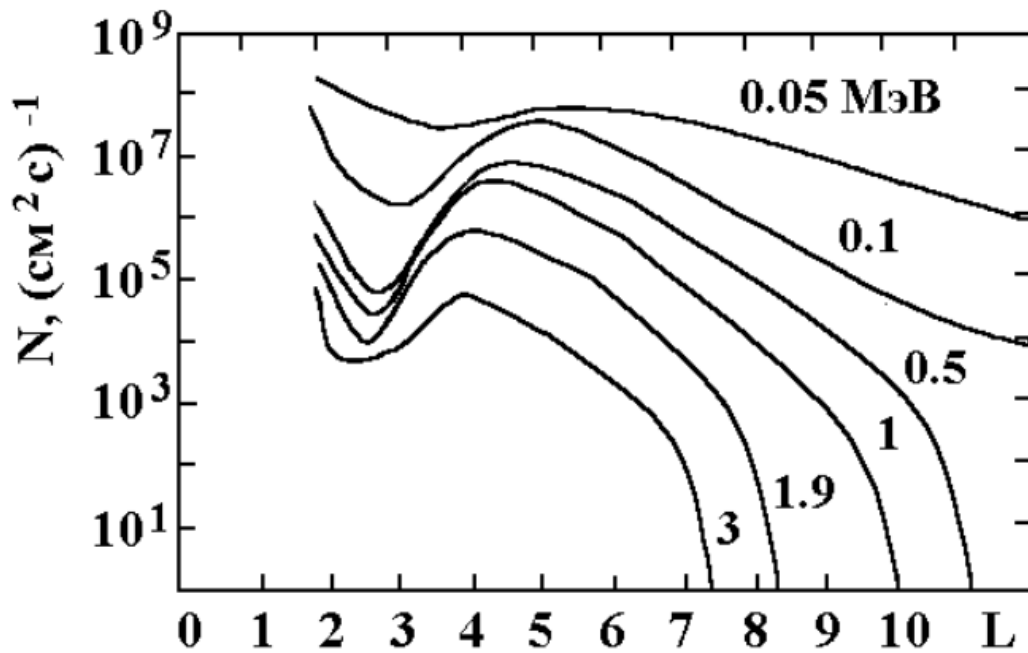
Радиационные пояса Земли были открыты в 1958 г. Джеймсом Ван Алленом [20] – внутренний пояс и С. Н. Верновым и А. Е. Чудаковым [20] – внешний пояс. Еще в 1958 году Эрнст Рей и Ван Аллен проанализировали данные скорости счета газоразрядных счетчиков, установленных на космических аппаратах «Эксплорер-1» и «Эксплорер-3». Обсуждая результаты, было заключено, что космос радиоактивен, а интенсивность заряженных частиц распределена в околоземном космическом пространстве неравномерно. Ее основная часть сосредоточена в замкнутой области.

Внутренний пояс, который в основном состоит из протонов, находится на высоте от 1000 км до 13000 км, максимальный уровень потока протонов ( $E > 100$  МэВ) располагается на высоте 3500 км. Внешний радиационный пояс Земли располагается на высоте от 13000 км до 65000 км с максимумом электронов ( $E > 40$  кэВ) на высоте 16500 км [20]. Все эти цифры приближенны и даны для ориентира. Пояс – динамическая система и его параметры существенно могут меняться в зависимости от состояния межпланетной среды. Ниже будут приведены графики радиальных профилей плотностей потоков протонов и электронов (рисунок 1, 2).



Источник: [20]

Рисунок 1 – Радиальные профили потоков протонов в плоскости геомагнитного экватора для  $L < 6$



Источник: [20]

Рисунок 2 – Радиальные профили потоков электронов в плоскости геомагнитного экватора для  $L < 12$

На рисунках 1, 2  $L$  – магнитная оболочка или параметр Мак-Илвайна, который равен отношению среднего удаления реальной магнитной оболочки от центра Земли в плоскости геомагнитного экватора, к радиусу Земли.

Радиационные пояса всегда заполнены частицами, но их концентрация, пространственное распределение, распределение по энергиям со временем меняется в зависимости от состояния межпланетной среды, солнечной активности и динамики тех процессов, которые реализуются в текущий момент внутри магнитосферы. Обычно внешний РПЗ на расстояниях более  $5R_z$  от центра Земли в плоскости экватора наполнен частицами до отказа, т.е. до такой концентрации, которую геомагнитное поле в состоянии удержать.

Во время магнитной бури такое наполнение частицами радиационного пояса распространяется на более низкие высоты, до  $3 - 4R_z$ , и отвечает за главную фазу геомагнитной бури. Радиационные пояса Земли состоят в основном из протонов, антипротонов и т. д, удерживаемых магнитным полем Земли. Ядра химических элементов легкой, средней и тяжелой группы также присутствуют в радиационных поясах, но их потоки незначительны по сравнению с потоками протонов и электронов тех же энергий.

### 1.3 Классификация космического излучения

#### Галактические космические лучи

Под галактическими космическими излучениями понимаются потоки заряженных частиц, начиная от протонов и ядер гелия и кончая ядрами более тяжёлых элементов вплоть до урана, рождённых и ускоренных до высоких и предельно высоких (вплоть до  $10^{20}$  эВ) энергий вне пределов Земли. Рождается данный вид излучения в глубоком космосе. Предполагаемый возраст галактических космических лучей, приходящих в Солнечную систему, составляет около 2,5 – 33 миллиона лет. В составе галактического космического

излучения преобладают протоны – около 85%,  $\alpha$ -частицы – около 14% и тяжелые ядра – 1% (таблица 1).

Таблица 1 – Зарядовый состав Галактического космического излучения в верхних слоях атмосферы

Заряд частицы, Кл	Вертикальный поток частиц, $\text{м}^{-2} \times \text{ср}^{-1} \times \text{с}^{-1}$	
	Солнечный минимум	Солнечный максимум
1	2000	800
2	300	120
3-5	6	2
6-9	16	6
10-20	6	2
20 и более	2	1

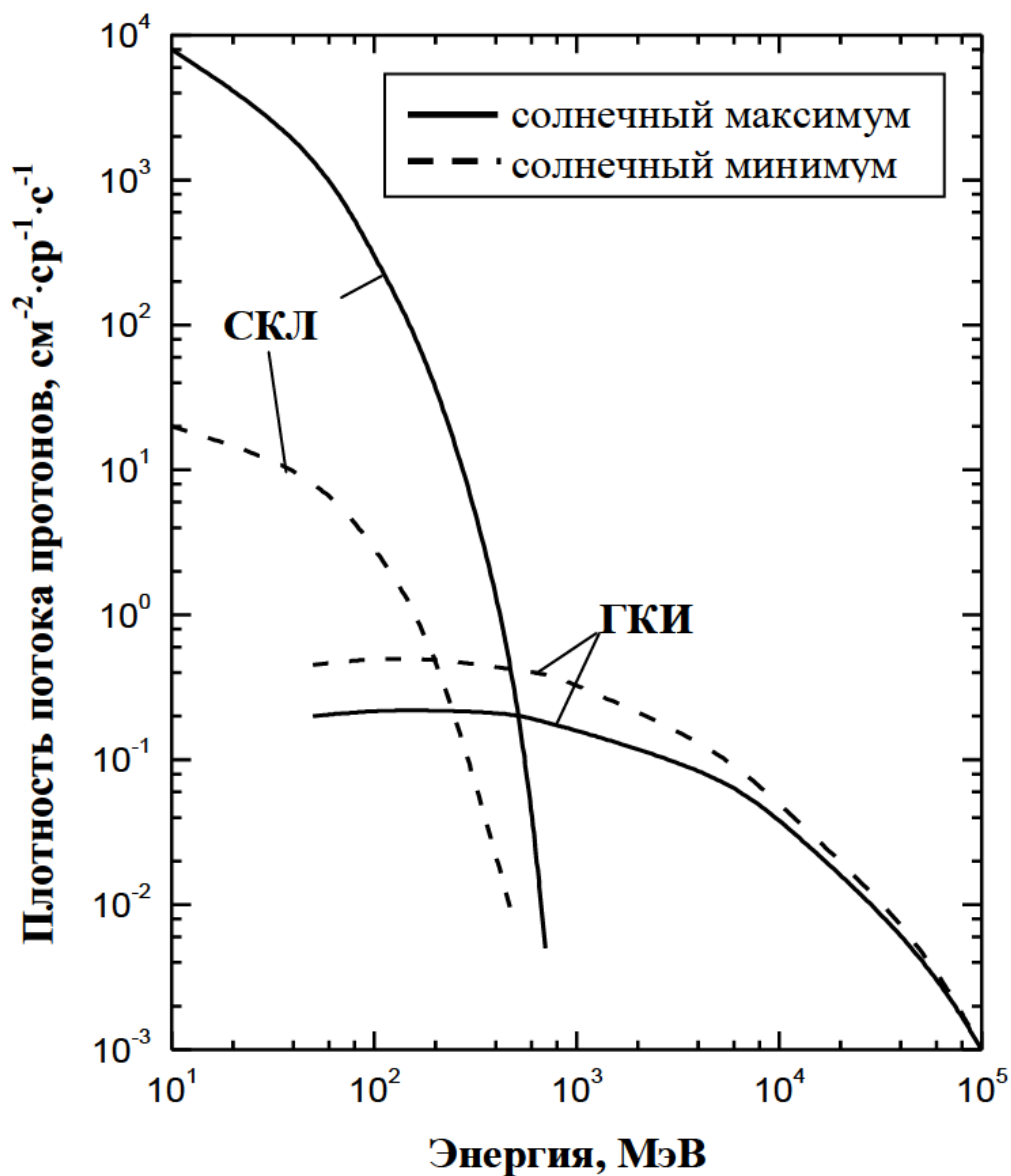
Источник: [19]

Интенсивность меняется примерно вдвое в противофазе с солнечной активностью. Связано это с тем фактом, что в периоды максимальной солнечной активности магнитосфера Солнца значительно возрастает, достигая орбиты Юпитера, и отклоняет заряженные частицы из глубокого космоса.

Содержание ядер в составе галактического космического излучения, кроме протонов, выделяется тремя основными группами:

1.  $Z = 5 \div 8$  – группа углерода;
2.  $Z = 10 \div 15$  – группа магния;
3.  $Z = 25 \div 30$  – группа железа.

Энергетическое распределение частиц галактического космического излучения более жесткое, чем частиц солнечного космического излучения. Ниже, на рисунке 3, приведен спектральный состав протонов солнечных космических лучей и галактических космических лучей в периоды максимума и минимума солнечной активности.



Источник: [19]

Рисунок 3 – Энергетические спектры протонов галактических и солнечных космических лучей в периоды максимума и минимума солнечной активности

В открытом космосе эффективная эквивалентная доза от протонов галактического космического излучения составляет около 40%, а 60% – эквивалентная доза от высокоэнергетичных ядер. Тяжелые ядра галактического космического излучения с очень высокой энергией рождают, в результате взаимодействия с земной атмосферой, мощные космические ливни вторичных

частиц с меньшей энергией. По этому эффекту было открыто существование галактического космического излучения. Относительный химический состав галактического космического излучения, кроме протонов, представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Содержание различных ядер с  $Z \geq 2$  в составе галактического космического излучения.

Элемент	Относительное содержание
He	0,86
Be	$1,4 \times 10^{-2}$
C	$3,2 \times 10^{-2}$
O	$1,8 \times 10^{-2}$
Ne	$5,4 \times 10^{-3}$
Si	$2,1 \times 10^{-3}$
N	<0,0145
Fe	$4,7 \times 10^{-5}$

Источник: [19]

### Солнечные космические лучи

Солнце представляет собой гигантский естественный ускоритель заряженных частиц. Наряду с различными видами электромагнитного излучения значительная доля энергии солнечных вспышек передается ускоренным частицам – солнечным космическим лучам [19].

Основную долю солнечных космических лучей составляют протоны, электроны с энергией  $> 40$  кэВ. Относительный химический состав солнечного излучения, кроме протонов, представлен в таблице 3.

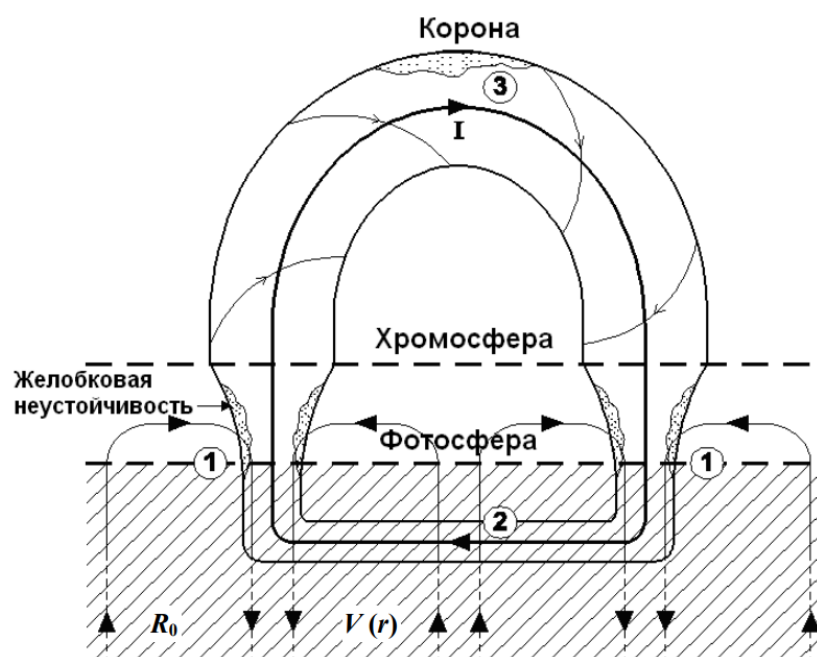
Таблица 3 – Содержание различных ядер с  $Z \geq 2$  в составе солнечного излучения

Элемент	Относительное содержание
He	0,96
Li	$2,6 \times 10^{-2}$
Be	$<0.00018$
O	$8.9 \times 10^{-3}$
Ne	$1,16 \times 10^{-3}$
Si	$2,9 \times 10^{-4}$
Mg	$3,8 \times 10^{-4}$
N	$1,7 \times 10^{-3}$

Источник: [19]

Ускорение частиц на солнце может происходить в двух областях (рис. 4):

1. В хромосфере – высокая плотность плазмы.
2. В солнечной короне – низкая плотность плазмы.



Источник: [19]

Рисунок 4 – Схема корональной магнитной петли, сформированной сходящимися конвективными потоками фотосферной плазмы

В области с небольшой плотностью потери энергии при столкновениях ускоряемых частиц с частицами среды – малы, поэтому ускоряются здесь все ядра, а в области с высокой плотностью, где потери на столкновения велики, ускоряются преимущественно протоны, теряющие при столкновениях меньше энергии, чем более тяжелые ядра.

Распределение солнечных космических лучей по энергиям и зарядам у Земли определяется как особенностями процесса ускорения частиц в источнике (солнечная вспышка) и выхода их из области ускорения, так и условиями распространения в межпланетных магнитных полях. Полное число ускоренных во вспышке частиц может быть  $10^{32}$ , а их суммарная энергия –  $10^{32}$  эрг. Верхний предел энергии солнечных космических лучей равен  $2 \times 10^{10}$  эВ, нижний – около  $10^6$  эВ. При меньших энергиях частицы уже нельзя рассматривать как независимо движущиеся, поскольку они начинают коллективно взаимодействовать с межпланетным магнитным полем. Поток солнечных частиц с энергией  $10^9$  эВ после сильных вспышек может более чем в  $10^3$  раз превышать поток галактических космических лучей вблизи орбиты Земли.

Наибольшую радиационную опасность для космонавтов представляют протоны с энергией 150 – 500 МэВ, которые создают в обшивке корабля корпускулярное излучение с выходом тяжелых частиц, мощную электронно-фотонную лавину и поток рентгеновских лучей.

#### 1.4 Вторичное излучение в атмосфере Земли

Попадание космических частиц в атмосферу Земли и последующее взаимодействие с атомами атмосферы вызывает каскадные процессы потоков вторичных частиц. Сформировавшиеся вторичные частицы воздействуют на среду за счет механизмов поляризации и ионизации.

В результате взаимодействия с ядрами атмосферы первичные космические лучи (в основном протоны) создают большое число вторичных частиц:



1.  $p + \text{ядра воздуха} \longrightarrow p + n + \pi^\pm + \pi^0$ ;
2.  $n + \text{ядра воздуха} \longrightarrow p + n + \pi^\pm + \nu^0$ ;
3.  $\pi^\pm \longrightarrow \mu^\pm + \gamma$ ;
4.  $\pi^0 \longrightarrow 2\gamma \longrightarrow 4e^\pm \longrightarrow \gamma$ ;
5.  $\mu^\pm \longrightarrow e^\pm \longrightarrow 2\nu \longrightarrow \gamma$ .

Таким образом вместо одной первичной частицы возникает большое число вторичных частиц, которые делятся на адронную, мюонную и электронно-фотонную компоненты. Такой каскад называется широким атмосферным ливнем.

Первое взаимодействие происходит на высоте около 20 километров [19]. Вероятность того, что первичная частица не испытает столкновений – крайне мала, т.к. толщина всей атмосферы составляет 1000 г/см, примерно 15 ядерных пробегов для протонов. На высоких поверхностях Земли – горы, рельефы и т. д., можно зафиксировать небольшое количество первичных частиц, основное же количество первичных частиц детектируется при помощи шаров-зондов.

Протон, испытавший ядерное столкновение, теряет в среднем от 30 до 50% первоначальной энергии. В результате основная часть протонов первичных космических лучей со средней энергией около 10 ГэВ после нескольких ядерных столкновений замедляется и в дальнейшем быстро теряет оставшуюся энергию на ионизацию атомов воздуха [19]. Лишь протоны с первичной энергией в несколько сотен гигаэлектронвольт и выше могут достичь земной поверхности, однако число таких протонов относительно мало. Таким образом, первичные частицы очень быстро растрачивают свою энергию в атмосфере. Она распределяется между многими вторичными частицами, число которых лавинообразно нарастает по мере углубления в атмосферу.

Акты размножения продолжаются до тех пор, пока энергия частиц не уменьшится до мегаэлектронвольт. При меньших энергиях вероятность рождения новых частиц очень мала.

Основным вторичным излучением у земной поверхности являются мюоны. Проникающая способность данного вида излучения крайне высока. В

среднем у земной поверхности фиксируется около 50% мюонов от всех заряженных частиц [19].

Также, процент соотношения вторичных частиц зависит от географического расположения, солнечной активности и высоты. Ниже будет приведена таблица высотной зависимости (таблица 4).

Таблица 4 – Высотная зависимость эквивалентной дозы вторичного космического излучения

Высота, км.	Эквивалентная доза, мкЗв/час
0	0,035
4	0,20
6	0,51
8	1,35
10	2,88
12	4,93
14	7,56
16	9,70
18	11,64
20	12,75

Источник: [19]

На уровне моря среднее годовое значение эквивалентной дозы космического излучения составляет 300 мкЗв/год для средних широт, причем соотношения доз, обусловленных заряженными частицами (мюонами), гамма-квантами и нейтронами оцениваются приблизительно как 50:40:10.

### 1.5 Миссии «Apollo»

Высадка на Луне была самым сложным и крупнейшим событием, предпринятым в истории человечества. 20 июля 1969 года Нил Армстронг и Эдвин Олдрин, выполняя миссию Apollo 11, успешно ступили на Луну [8]. За время, проведенное на Луне, они организовали большое количество научных экспериментов. В общей сложности программа Apollo высадила на Луну 12 человек [8]. В таблице 5 представлены данные о миссиях Apollo.

Таблица 5 – Основные данные полетов Apollo

№ Миссии	Описание миссии	Дата запуска	Длительность миссии, (час)	
			Общее время	Пребывание на Луне
7	Первые испытания корабля на околоземной орбите	11.09.1968	260,1	--
8	Первый пилотируемый облёт Луны	21.12.1968	174	--
9	Испытания основного и лунного кораблей на околоземной орбите	03.03.1969	241	--
10	Испытания основного и лунного кораблей на окололунной орбите	18.05.1969	192	--
11	Первая пилотируемая лунная посадка	16.07.1969	194	22,2
12	Вторая пилотируемая лунная посадка	14.11.1969	244,5	31,5
13	Прерванная лунная посадка из-за отказа кислородного баллона	11.04.1970	142,9	--
14	Третья пилотируемая лунная посадка	31.01.1971	216	33,5
15	Первый лунный ровер	26.07.1971	295	67
16	Геологический отбор проб из вулканических районов Луны	16.04.1972	265,8	71
17	Исследование территории для получения информации о формировании и истории Луны	07.12.1972	301,8	75

Источник: [8]

Космический корабль длиной 15 метров состоял из пяти основных сегментов: система аварийного запуска, командный модуль, сервисный модуль, адаптер лунного модуля, лунный модуль (рисунок 5).



Источник: [8]

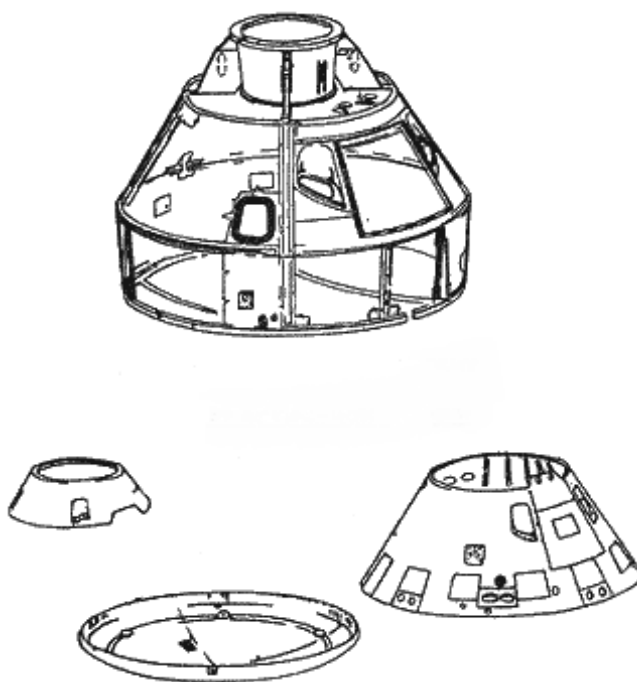
Рисунок 5 – Космический корабль Apollo

### Система аварийного запуска

Система аварийного запуска состояла из 10-метровой башни массой 3629 кг и ракетного двигателя, обеспечивающего 66675 кг тяги [8]. Она обеспечивала возможность эвакуации во время обратного отсчета перед запуском или в первые 100 секунд стартовой последовательности в случае возникновения пожара или другой аварийной ситуации. После активации спасательная башня поднимет космический корабль примерно на 1,6 км от стартовой площадки. Спуск будет обеспечиваться основной парашютной системой.

## Командный модуль

Основной конструкцией командного модуля являлся сосуд под давлением, заключенный в теплозащитный экран. Модуль был конической формы, длиной 3,48 м и диаметром основания 3,91 м. Материал корпуса был алюминий, а его толщина составляла 2,8 см [8]. Командный модуль состоял из носового отсека, в котором находились два реактивных двигателя и парашюты, используемые для приземления. В отсеке экипажа или внутреннем сосуде под давлением находились помещения для экипажа, системы управления, дисплей, а также другие системы космического аппарата. В кормовом отсеке размещались десять реактивных двигателей, топливные баки, баки с гелием и баки с водой. Обитаемый объем отсека экипажа составлял 5,95 м<sup>3</sup> (рисунок 6).



Источник: [8]

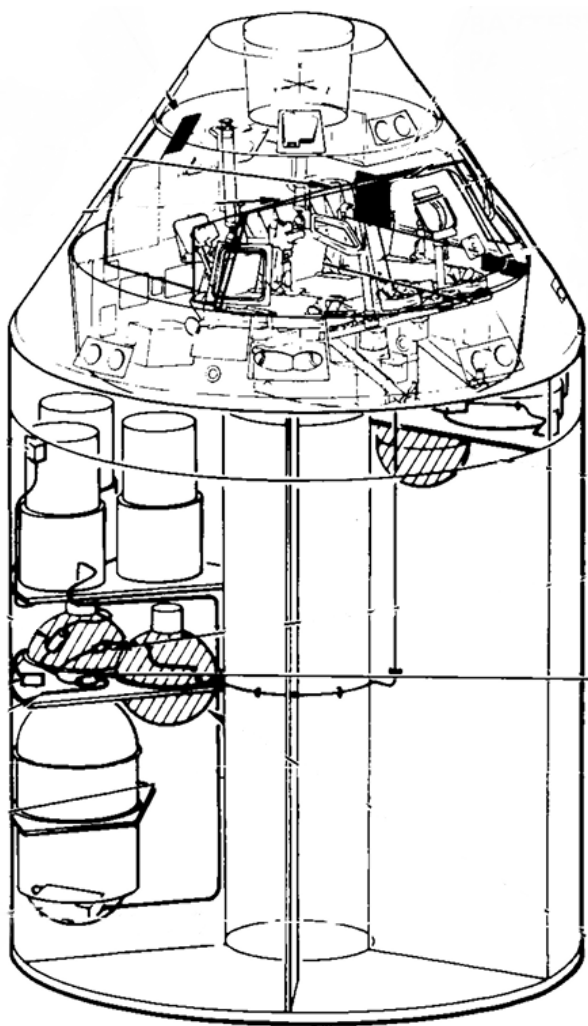
Рисунок 6 – Командный модуль

В командном модуле командир располагался слева, пилот командного модуля, отвечающий за управление и навигацию – в центре, а пилот лунного модуля, отвечающий за управление подсистемами – справа. Посадочные места стояли лицом к дисплею.

Атмосфера командного модуля была рассчитана на 100%-й кислород, но после пожара космического аппарата в 1967 году, была изменена на смесь кислорода и азота в соотношении 60/40. Давление было позволено установить на 0,345 бар по мере достижения высоты. Терморегулирующая часть системы экологического контроля поддерживала температуру кабины космического аппарата в комфортном диапазоне от 21° до 24°С. В командном модуле было два люка: один сбоку для входа и один наверху для использования при стыковке корабля с лунным модулем. Пять смотровых окон позволяли осуществлять широкий внешний обзор и фотографировать во время миссий [8].

### Сервисный модуль

Сервисный модуль представлял собой цилиндрическую конструкцию диаметром 3.91 м и длиной 7.49 м [8]. Эта часть космического аппарата содержала основную двигательную установку и обеспечивала укладку большинства расходных материалов. Сервисный модуль оставался прикрепленным к командному модулю во время полета на Луну. Во время обратного полета разделение происходило непосредственно перед входом в атмосферу Земли. Служебная двигательная установка использовалась для маневров в середине курса и снижения скорости выхода космического аппарата на лунную орбиту (рисунок 7).



Источник: [8]

Рисунок 7 – Командный и сервисный модуль

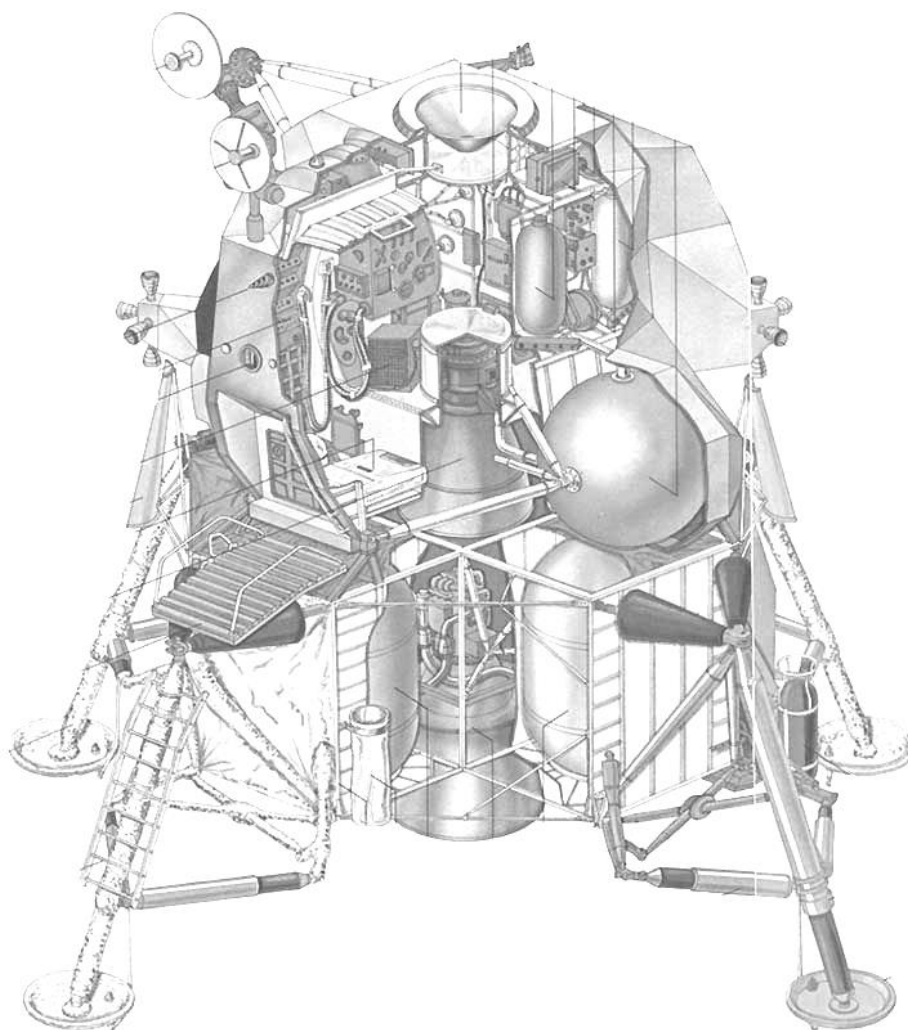
#### Адаптер лунного модуля

Этот сегмент космического аппарата служил гладкой аэродинамической оболочкой для лунного модуля и обеспечивал крепление командного модуля к ракете-носителю. Лунный модуль извлекается из адаптера после того, как космический аппарат покинет орбиту Земли.

#### Лунный модуль

Лунный модуль представлял собой двухступенчатый аппарат с вертикальной длиной – 6,985 м. Диагональная ширина между шасси составляла 9,45 м [8]. Лунный модуль выполнял функцию доставки космонавтов с лунного

орбитального командного модуля на лунную поверхность и обратно. Спроектирован лунный модуль был так, чтобы летать только в космическом вакууме, что не позволяло вернуться на Землю только лишь на лунном модуле (рисунок 8).

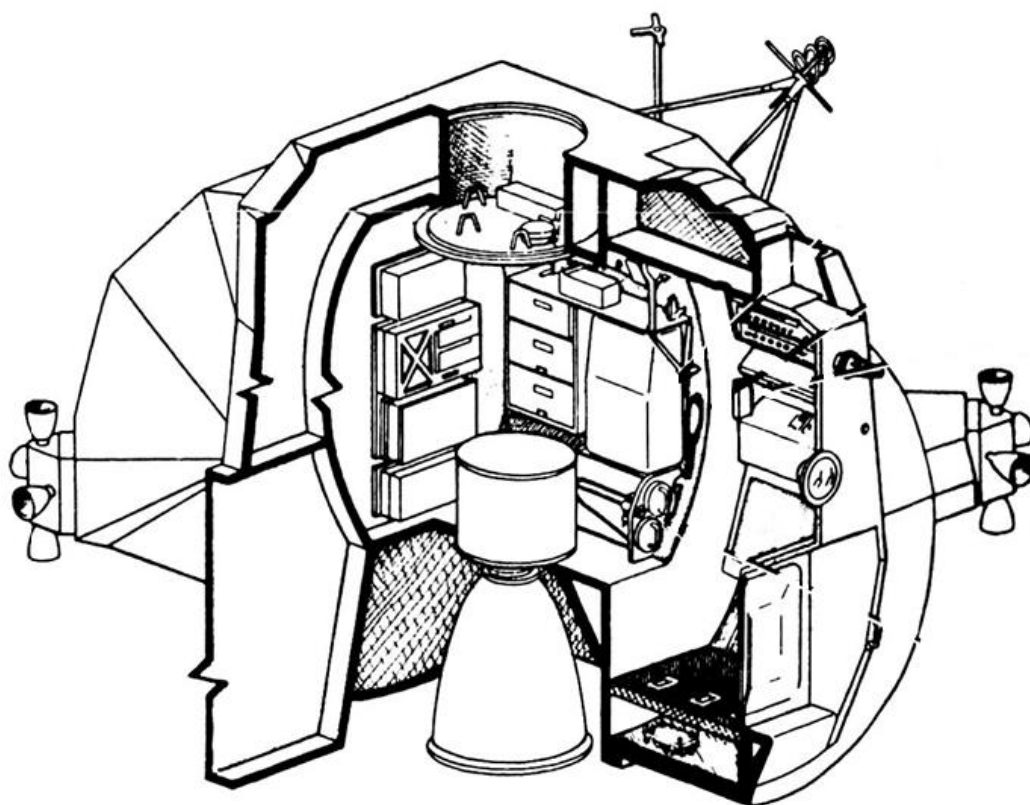


Источник: [8]

Рисунок 8 – Лунный модуль

Лунный модуль состоял из трех основных секций: отсека экипажа, среднего отсека и кормового отсека. Обитаемый объем кабины составлял  $6,7 \text{ м}^3$ . Ступень подъема была длиной  $3,76 \text{ м}$  и диаметром  $4,29 \text{ м}$ . На рисунке 9 показана внутренняя часть кабины лунного модуля.





Источник: [8]

Рисунок 9 – Внутренняя часть кабины лунного модуля

Посадка лунного модуля на поверхность Луны осуществлялась при помощи двигательной установки, которая замедляла космический корабль для безопасной посадки. Во время «прилунения» выдвигались четыре стойки шасси из складского положения. Каждая из стоек была заполнена алюминием для поглощения удара при посадке. Накладки на концах стоек содержали чувствительные датчики, которые сигнализировали экипажу о необходимости отключения спускового механизма при контакте с лунной поверхностью. Посадочный датчик предоставлял информацию о высоте и скорости лунного модуля относительно поверхности Луны. Также имелось 3 отсека, которые содержали: топливные баки, модульное оборудование и лунный ровер.

## 1.6 Внекорабельная система жизнеобеспечения «Apollo»

Скафандр, используемый экипажем в программе исследования Луны, уходил корнями в конец 19 века. В августе 1934 года Уайли Пост совершил первый полет на самолете в скафандре. Скафандр состоял из двух слоев: внутреннего резинового мешка, предназначенного для хранения газа под давлением и внешней ткани, поддерживающей нужную форму скафандра [8].

Скафандр астронавтов миссии «Меркурий» был похож на скафандры, используемые в полетах военных реактивных самолетов на большой высоте. Костюм состоял из внутреннего слоя нейлоновой ткани с неопреновым покрытием и стойкого к деформации слоя алюминированной нейлоновой ткани. Алюминированное покрытие использовалось для отвода повышенного тепла в кабине во время входа в атмосферу. Внутри костюма содержались биомедицинские датчики для контроля температуры тела, электрокардиограммы артериального давления и частоты дыхания. Мочу собирали в специальный пакет внутри костюма. Дыхательный газ, кислород, подавался в штуцер на передней части туловища, а затем распределялся по всей внутренней части костюма. Костюм весил около 9.1 кг. Скафандр "Меркурий" должен был использоваться в качестве аварийного резерва системы наддува космического аппарата в случае отказа системы кабины. Высокая степень подвижности не является обязательным условием, из-за ограничительного объема космической капсулы "Меркурий".

Поскольку проект «Gemini» предполагал внекорабельную деятельность, требования к конструкции скафандра изменились. Были добавлены дополнительные слои для обеспечения необходимой защиты в ходе операций в свободном космосе. Костюм «Gemini» состоял из наружного слоя термостойкого нейлона, слоя «link-net» для обеспечения подвижности под давлением и для контроля наддува костюма, герметичного слоя нейлона с неопреновым

покрытием и внутреннего алюминированного слоя нейлона для тепловой и микрометеороитной защиты. Для защиты внутренней смотровой маски от ударных повреждений и дополнительной защиты от повышенного уровня ультрафиолетового излучения, встречающегося за пределами земной атмосферы, к шлему была добавлена съёмная маска. Как и прежде, дыхательный газ составлял 100 % кислорода и костюм носился на протяжении всего полета.

Полеты «Gemini» дали планировщикам миссии уверенность в целостности космического корабля. Микрометеориты оказались менее опасными для целостности космических аппаратов, чем опасались некоторые люди. Как следствие, астронавты «Apollo» не носили скафандры на протяжении всей миссии, надевая их только для критических операций, таких как запуск, сближение и стыковка. Костюм «Apollo» был похож на костюм «Gemini» с многослойной конструкцией. Внешний слой костюма из ткани тефлонового покрытия был создан из бета-стекла. Под этим слоем был сдерживающий слой из номекса и извилистых швов, чтобы сдерживать внутреннее давление и поддерживать форму костюма. Следующим слоем была покрытая неопреном нейлоновая ткань, а последним – термостойкий нейлоновый вкладыш. Как и в предыдущих костюмах, 100% кислорода подавалось через фитинг в передней части туловища. Коммуникационные и биомедицинские линии передачи данных проходили через скафандр по множественной цепи электрического соединения на передней части скафандра. Комплект скафандра «Apollo» весил около 16.15 кг [8].

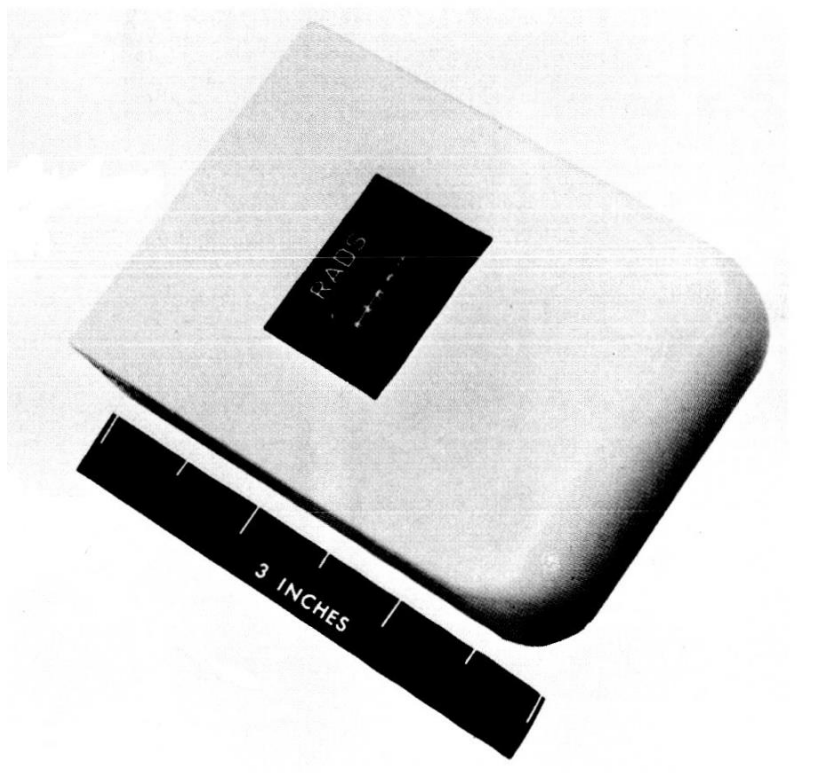
Астронавты «Apollo» были снабжены автономной портативной системой жизнеобеспечения, которую несли в рюкзаке. Это позволяло работать на больших расстояниях от космического аппарата. Система поставляла кислород для наддува и метаболического потребления. Портативная система жизнеобеспечения содержала средства связи и телеметрии, а также источник питания передатчика. На случай непредвиденных обстоятельств была установлена система продувки кислородом, которая обеспечивала запас газообразного кислорода в течение 40 минут.

Скафандр «Аполлон» дал человеку возможность передвижения по Луне в течение определенного периода времени. Система работала очень хорошо. На лунной поверхности не было никаких сбоев в работе скафандра. Перспектива выхода из строя скафандра, какой бы призрачной она ни казалась, крайне пугала, потому что в определенные части скафандра невозможно было встроить такую же степень защиты, как в космический корабль. Избыточные слои, как правило, делают скафандр чрезмерно жестким и твердым. Общий успех системы скафандров «Аполло» получился весьма хорошим, защита, жизнеобеспечение и дизайн отвечали большинству требований.

### 1.7 Дозиметрические детекторы и полученные дозы

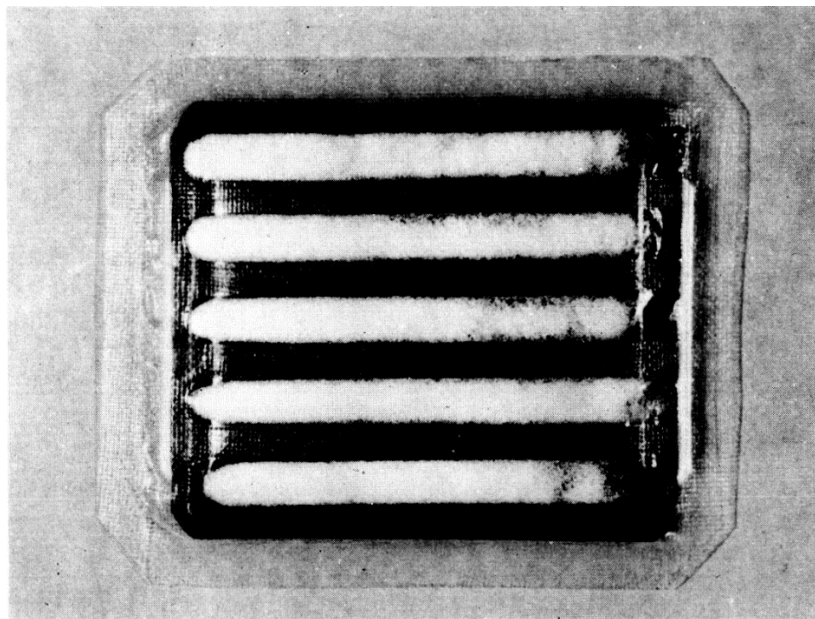
В рамках программы радиационной защиты «Аполло», основное внимание уделялось как естественным излучениям, встречающимся в космосе, так и антропогенным излучениям, встречающимся на земле и в космической среде. В обеих областях основная философия осталась прежней – избегать вредного радиационного воздействия путем ограничения дозы облучения до самого низкого уровня.

Чтобы обеспечить точное определение общего радиационного облучения членов экипажа, каждый имел индивидуальный дозиметр радиации (рисунок 10) и три пассивных дозиметра (рисунок 11) [9]. По мере продвижения миссии индивидуальный дозиметр обеспечивал визуальное считывание накопленной дозы радиации для каждого члена экипажа. Карманы для дозиметров были предусмотрены как в летном комбинезоне, так и в скафандре. Пассивные дозиметры были помещены в одежду, которую носили на протяжении всей миссии. Путем размещения этих детекторов в различных местах (лодыжка, бедро и грудь) внутри одежды, были определены точные дозы облучения.



Источник: [9]

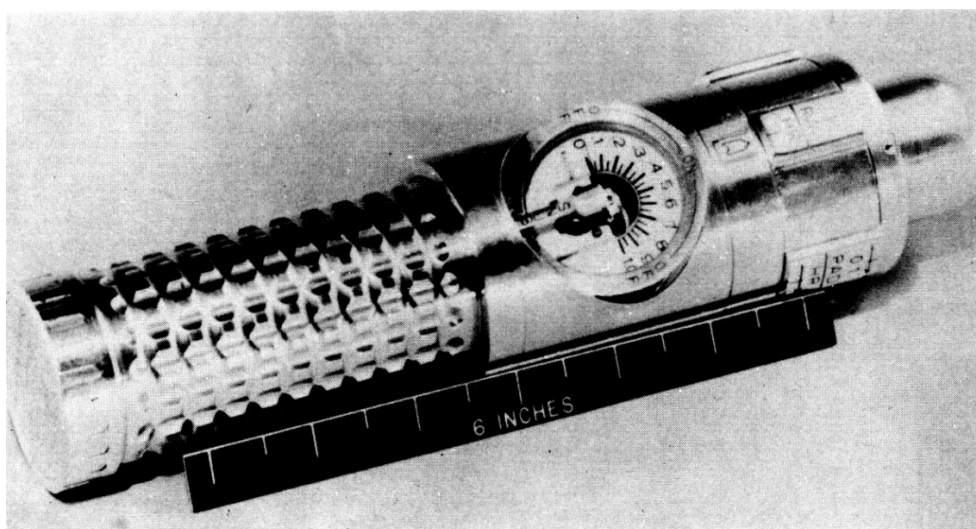
Рисунок 10 – Индивидуальный дозиметр радиации



Источник: [9]

Рисунок 11 – Пассивный дозиметр радиации

Следующий радиационно-дозиметрический прибор (рисунок 12) находится во владении у экипажа и позволяет определять уровни радиации в любом желаемом месте. Члены экипажа могли использовать данный прибор для измерения мощности дозы с прямым считыванием, чтобы найти пригодную для обитания область низких доз в космическом корабле в случае радиационной аварийной ситуации [9].



Источник: [9]

Рисунок 12 – Радиационно-дозиметрический прибор

Согласно [9] для каждой миссии выполнялось усреднение по экипажу измеренных доз. Индивидуальные показания отличались примерно на 20% от среднего из-за различий в эффективности экранирования различных частей космического корабля «Apollo», а также различий в обязанностях, движениях и местоположении членов экипажа. Дозы для кроветворных органов были примерно на 40% ниже, чем значения, измеренные на поверхности тела. По сравнению с фактически полученными дозами максимальный предел рабочей дозы для каждой из миссий «Apollo» был установлен в 400 рад (4 зиверта) для кожи и 50 рад (0.5 зиверта) для кроветворных органов.

По официальным данным сообщается, что дозы, полученные экипажем, были очень малы, даже ниже, чем среднегодовая норма 5 рентген, установленная комиссией по атомной энергетике в США для рабочих, которые используют радиоактивные вещества в ходе деятельности. Также сообщается, что причиной столь низких доз является отсутствие крупных событий и отсутствие солнечных вспышек в районе миссий. Одно небольшое событие было обнаружено датчиком излучения вне космического корабля «Аполлон-12», но увеличение дозы излучения для членов экипажа внутри космического корабля не было обнаружено.

## ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### 2.1 Monte Carlo N-Particle Transport Code

Monte Carlo N-Particle Transport Code (MCNP) – это программа, предназначенная для моделирования процессов переноса излучения в материальных средах с использованием метода Монте-Карло. Разработана в Лос-Аламосской национальной лаборатории (Los Alamos National Laboratory) в США на языках программирования ANSI C и FORTRAN (90 и 95) [21]. Программа моделирует взаимодействие частиц с веществом системы. Рассматриваются реакции рассеяния и захвата, а также деления ядер нейтронами. Генерирует источник вторичных частиц, образующихся в ядерных реакциях.

В данном исследовании использовалась программа MCNP версии X, которая во многом превосходит предыдущую версию MCNP5. Разработка программы MCNPX началась еще в 1994 году. Целью работы было расширение MCNP на все частицы и все энергии, улучшение физических моделей, расширение нейтронных, протонных и фотоядерных библиотек до 150 МэВ и разработка новых методов уменьшения дисперсии и анализа данных [10].

Геометрический модуль программы позволяет описывать, практически без упрощений, любые системы в трехмерной геометрии. Это неоспоримое преимущество данной программы. Трехмерная модель, используемая в данной задаче, представляет собой объединение однородных геометрических зон, каждая из которых описывается как комбинация набора простых тел (цилиндр, конус, сфера и т. д.). Описание геометрии композиций, содержащих регулярно повторяющиеся элементы, облегчается благодаря использованию методов размножения, позволяющих задать повторяющийся элемент только один раз. Учет симметрии и соответствующих краевых условий также облегчает моделирование геометрии.

Все границы геометрических зон моделируются из кусков плоскостей или квадратичных поверхностей, поэтому при наличии деталей с более сложными



граничными поверхностями их необходимо аппроксимировать большим числом зон. Каждой геометрической зоне приписывается ряд атрибутов: номер материала, номер регистрационной зоны, номер регистрационного объекта и пр.

Программа имеет свой визуализатор, с помощью которого можно проверить входные данные и посмотреть изображение модели в виде плоских сечений с последовательным изображением материальных зон, регистрационных зон и объектов. Возможна генерация цветных и черно-белых изображений.

Регистрировать частицы можно различными способами: в объеме, при прохождении через поверхность, в детекторе и т.д. Вычисляются различные функционалы потока, определенные как интегралы потока с заданными весовыми функциями в регистрационных зонах, регистрационных объектах и в композиции в целом [12].

## 2.2 Входные данные MCNP

Перед запуском программы пользователь создает основной входной файл [11] – INP, который в дальнейшем обрабатывается программой. Файл включает в себя следующую информацию о задаче:

Однострочная строка с именем задачи

Карты ячеек

.

.

Чистая строка – разделение

Карты поверхностей

.

.

Чистая строка – разделение

Карты данных

Все вводимые строки могут содержать максимум 80 символов [11]. Буквы могут быть заглавными, строчными или и теми, и другими. Знак доллара (\$) означает окончание ввода. Все, что написано после доллара интерпретируется как комментарии. Пустые строки используются как разделение блоков карт или для обозначения окончания ввода данных.

Карты с комментариями могут использоваться в любом месте файла INP после карты с именем задачи и до пустой карты-окончания. Для обозначения строки-комментария используется «C» в одной из позиций 1 – 5, после чего должна следовать хотя бы одна пустая позиция. В строке комментария также должно находиться не более 80 символов.

Карты ячеек, поверхностей и данных должны начинаться с одной из позиций 1 – 5. Числа могут быть как целыми, так и с плавающей точкой. MCNP выполняет соответствующее преобразование.

MCNP выполняет тщательные проверки входного файла, ищет ошибки, допущенные пользователем. При нарушении основного ограничения входного описания выводится сообщение о фатальной ошибке, программа останавливается, не начиная запуск частиц. Первая выданная фатальная ошибка действительно существует, последующие сообщения об ошибках могут быть как действительными, так и ложными. Это зависит от сути первой ошибки.

### 2.2.1 Карты ячеек

Карта ячеек состоит из пяти столбцов. Номер ячейки является первой записью.

Следующая запись – это номер материала ячейки. Каждому материалу присвоен определенный номер.

Затем вводится плотность материала ячейки. Положительное число означает атомную плотность в единицах атом/см<sup>3</sup>×б, отрицательное – массовую плотность в г/см<sup>3</sup>.

Потом следует полное описание геометрии ячейки. Описание включает в себя перечень поверхностей с указанием знака, ограничивающих ячейку. Знак обозначает положение областей, определяемых поверхностями. Области комбинируются при помощи булевых операторов пересечения и объединения. Пробел обозначает пересечение, двоеточие – объединение.

После описания геометрии можно ввести дополнительные параметры ячейки в виде «мнемоника = значение».

В нашей задаче использовалось 48 ячеек. В таблице 5 приведена одна ячейка для иллюстрации.

Таблица 5 – Иллюстрация ввода ячейки в MCNPX

Номер ячейки	Номер материала	Плотность материала, (г/см <sup>3</sup> )	Описание геометрии	Мнемоника	Комментарии
10	3	-1,04	-35 36 -37 -38	Imp:n=1	\$liver

Источник: Собственная разработка

### 2.2.2 Карты поверхностей

Как и с картами ячеек, первым вводится номер поверхности, он не должен превосходить 5 цифр.

Далее вводится буквенная мнемоника, указывающая тип поверхности (сфера, конус, цилиндр и т.д.). Таблица с полной информацией о мнемониках представлена в приложении А.

Затем, после мнемоники поверхности, по порядку следуют численные коэффициенты уравнения поверхности, которые тоже представлены в приложении А.

Фантом, используемый в нашей задаче, имеет 176 строку с данными о поверхностях. В таблице 6 приведена одна строка для иллюстрации.

Таблица 6 – Иллюстрация ввода карты поверхностей в MCNPX

Номер поверхности	Мнемоника	Коэффициент уравнения поверхности
29	рх	-5.4

Источник: Собственная разработка

### 2.2.3 Карты данных

Первым делом вводится имя карты, которое должно начинаться в первых 5 столбцах. Следующие вводимые данные разделяются одним, или более, пробелами.

Некоторые карты данных требуют обозначения вида частиц для того, чтобы различать входные данные для нейтронов, фотонов, электронов и т.д. Частицы обозначаются с помощью символа двоеточие «:» и букв (N-нейтрон, P-фотон, E-электрон и т.д.). Например, для описания ценности ячейки для нейтрона используется карта IMP:N, для фотона – IMP:P и т.д. Ни одна карта данных не может быть использована более одного раза с одной и той же мнемоникой, то есть M1 и M2 – допустимы, но две карты M1 – не допускаются. Категории карт, которые использовались для достижения поставленной задачи, представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Категории карт

№	Имя карты	Значение карты
1	MODE	Режим
2	SDEF	Описание источника
3	Fn, En	Описание функционалов
4	Mn	Описание материала

Источник: [11]

Режим:

Карта «MODE» может быть запущена в различных вариациях. Чтобы выбрать режим переноса нейтронов используется карта «MODE N», для протонов – «MODE H» и т.д. Каждой частице присвоена своя мнемоника. В нашем случае использовалось 9 частиц: N – нейтрон, H – протон, P – фотон, Z –  $\pi^0$ , E – электрон, D – дейтрон, T – тритон, S –  $^3\text{He}$ , A –  $^4\text{He}$ .

Описание источника:

Карта SDEF определяет основные параметры источника, а именно:

1. POS – координаты точечного источника.
2. CEL – исходный номер ячейки.
3. ERG – исходная энергия.
4. WGT – исходный вес.
5. TME – время.
6. PAR – тип источника частиц.

Карты функционалов

Карты функционалов используются для того, чтобы уточнить, что именно нужно получить от вычислений программы: это может быть поток через поверхность, поток в точке и т.д. Запрос оформляется в одной или нескольких картах. Эти карты не обязательны, но, если не будет введено ни одной такой карты, после выполнения задачи не будет выведено никакого результата.

В нашей задаче использовались 2 карты функционалов:

1. F4 – усредненный поток частиц.
2. F6 – энергетический вклад в среднем на ячейку.

Описание материала (Mn):

Данная карта используется для описания материала всех ячеек. Число «n» состоит не более, чем из 5 цифр. В карте материала «n» соответствует номеру

материала в карте ячейки. Карта материала состоит из последовательного перечисления пар данных: идентификационные номера (ZA) элементов, входящих в состав материала, и атомные доли соответствующих элементов или нуклидов.

ZA – номер, используемый для маркировки желаемого элемента или нуклида: Z – атомный номер элемента или нуклида, A – массовое число нуклида.

Пример использования карты материала приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Карта материала

Mn	ZAID	доля
M1	55137	1.0

Источник: Собственная разработка

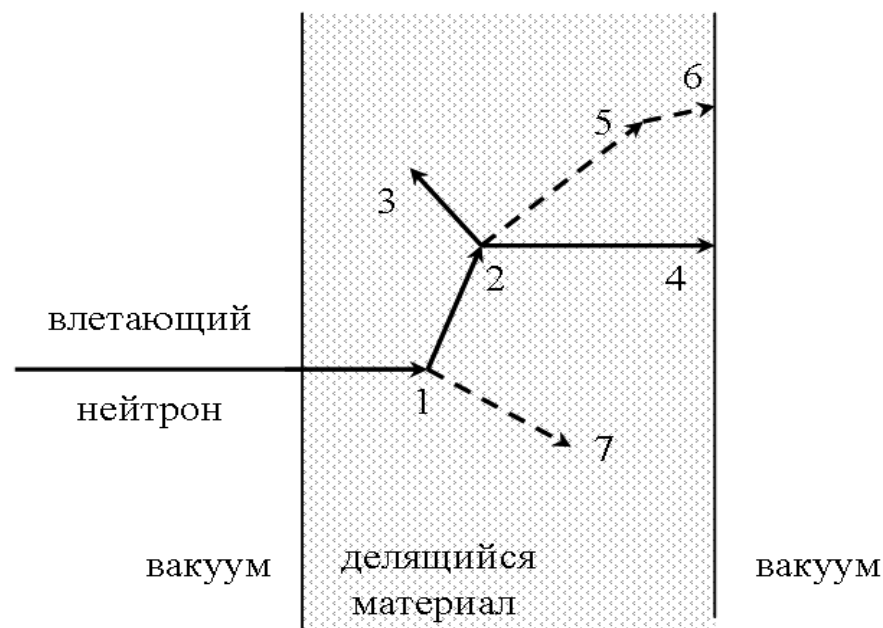
### 2.3 Метод Монте-Карло в MCNP

Методом Монте-Карло называется численный метод решения математических задач при помощи моделирования случайных величин [22]. Применяется данный метод для моделирования различных процессов, носящих статистический характер (например, взаимодействие нейтронов в среде). Метод крайне полезен при решении сложных задач, которые невозможно смоделировать программой, основанной на детерминистском методе. Для каждой частицы моделируются случайные события. Совокупность отдельных событий, носящих статистический характер, составляет полную картину происходящего процесса. По распределению вероятностей отдельных событий можно судить о процессе в целом. В общем случае, моделирование выполняется с помощью компьютера, так как количество разыгранных событий, необходимых для удовлетворительного описания процесса, крайне велико.

В задачах переноса частиц приемы Монте-Карло наиболее близки к реальности. Суть метода заключается в отслеживании каждой частицы, покинувшей источник, от рождения до исчезновения (поглощения, утечки и т.д.).

Разыгрывание событий основано на генерации случайных чисел. Используя данные переноса, можно определить место нахождения частицы на каждом этапе ее истории.

На рисунке 13 в плоской геометрии представлена одна из возможных траекторий нейтрона, попавшего в делящийся материал. Генератор случайных чисел выдает результаты от 0 до 1, по которым MCNP на основе распределений соответствующих вероятностей определяет вид взаимодействия и место, где это взаимодействие произошло. В данном примере нейтронное столкновение происходит в точке 1. Нейтрон рассеивается в указанном направлении, которое моделируется согласно закону распределения вероятности рассеяния. Вместе с нейтроном рождается фотон, информация о нем временно сохраняется в памяти для последующего анализа. В точке 2 происходит деление, в результате которого исходный нейтрон исчезает, и появляются два новых нейтрона и один фотон. Один нейтрон и один фотон сохраняются в памяти для последующего анализа. Первый нейтрон деления испытывает захват в точке 3 и исчезает. Далее идет возвращение к сохраненному ранее нейтрону. При дальнейшем моделировании он покидает систему в точке 4. Фотон, образовавшийся в результате деления, испытывает рассеяние в точке 5 и вылетает из системы в точке 6. Оставшийся фотон, появившийся в событии 1, испытывает захват в точке 7. Необходимо обратить внимание, как программа извлекает частицы из банка данных: последняя сохраненная частица извлекается первой [11].



Источник: [11]

Рисунок 13 – Одна из возможных траекторий нейтрона при взаимодействии с веществом

История одного нейтрона разыграна. Чем больше историй будет разыграно, тем лучше и точнее будет получаться информация о распределении частиц.

### 2.3 Антропоморфные фантомы

Термин фантом используется в литературе для обозначения физической модели человеческого тела. В радиологическом сообществе фантомом именуют математическую модель человеческого тела, существенно отличающейся от модели тела, которая строится для рассмотрения физиологических процессов, например, дыхания и кровообращения [13].

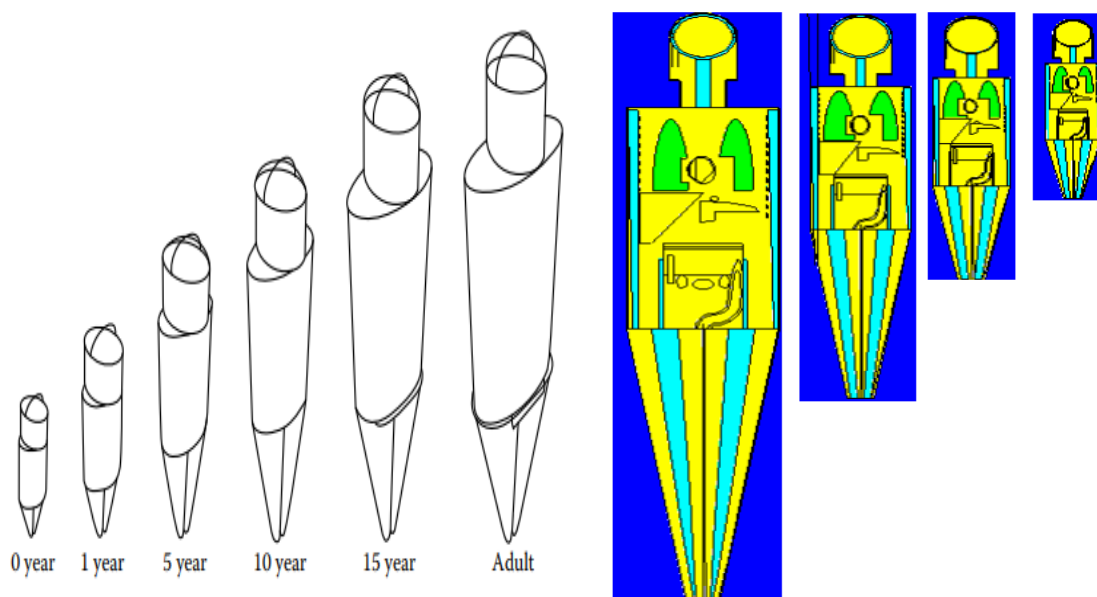
Если рассматривать физический фантом, то он выполняется из твердых материалов, обладающих свойствами и формами человеческого тела. Материалы фантома эквивалентны костям и мягким тканям человека – как по форме, так и



по составу. Осуществление данного фантома очень дорогостоящее занятие и очень сложное в производстве. Поэтому появление первого поколения компьютеров в 1940 годах и развитие метода Монте – Карло применительно к задачам ядерной физики позволило вычислять органы дозы при помощи моделирования. Смоделированный фантом учитывает как внешние свойства человеческого тела, так и внутренние – массу, объем и форму. Имея информацию о плотности и атомарном составе органов, такой фантом позволяет моделировать прохождение излучения через вещество и находить распределение энергии при помощи метода Монте-Карло. Такие математические фантомы с момента их изобретения в 1960 годах становятся все популярнее в задачах радиационной безопасности, медицинской визуализации и радиотерапии. В настоящее время физические фантомы используются исключительно в радиационной безопасности как некоторая опорная точка для значений, полученных при помощи моделирования. Кроме того, математические фантомы используются для оценки влияния неионизирующих излучений, что в настоящее время очень ценно.

В 1960 году Фишер и Снайдер выпустили первые работы по моделированию математических антропоморфных фантомов [13]. Они использовали блочную геометрию и следующие примитивы – цилиндры с эллипсом в основании и конусы. Разработанный ими фантом известен как фантом взрослого человека Фишера – Снайдера. Также ими был разработан фантом ребенка, который представляет собой фантом взрослого в масштабе с допущением того, что ткани однородны. Спустя 9 лет тем же Снайдером был разработан первый гетерогенный фантом, получивший название – MIRD-5 [13]. Это был первый неоднородный фантом, хотя и достаточно примитивный: представление внутренних органов в данном стилизованном фантоме было достаточно грубым, так как намечалось только примерное местоположение органов. Фантом представляет собой мужчину ростом 170 см и весом 70 кг. В 1978 Снайдер опубликовал серию работ, в которых данные были получены с

использованием усовершенствованной версии фантома, в котором было более 20 органов или тканей [13].



Источник: [13]

Рисунок 14 – Фантомы MIRDO Humans

Опираясь на уже опубликованные работы, в 1980 году Кристи обнаружил разработку новой серии математических фантомов «MIRD Humans» (рисунок 14). Это семейство фантомов состоит из:

1. фантом взрослого мужчины;
2. фантом взрослой женщины;
3. новорожденного ребенка;
4. детей в возрасте год, пять, десять и пятнадцать лет.

### ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В ФГБНУ ВНИИРАЭ совместно с Кураченко Ю. А. из отделения измерения ионизирующих излучений было проведено исследование по дозиметрии астронавтов во время выполнения миссий «Apollo». В качестве транспортного кода был выбран код MCNPX в виду большого спектра возможностей и использовании наиболее полной библиотеки сечений ядерных реакций TALYS. Программа MCNPX является общепризнанным прецизионным инструментом для расчета физических характеристик систем, содержащих материалы. Как уже отмечалось, эта программа позволяет моделировать перенос частиц на основе метода Монте-Карло и рассчитывать различные функционалы, зависящие от распределения этих частиц по энергии, направлению и пространственным координатам.

Основным источником излучения в ходе операции являются протоны – около 90 % излучения, остальные 10 % излучения – это рентгеновские лучи солнечного ветра. Диапазон энергий протонов варьируется от 20 до 1000 МэВ. В расчётах фигурировало большое разнообразие реакций с выходом различных частиц, их транспортом и взаимодействием со средой. Вклад следующих частиц был учтен программой:

1. протоны;
2. нейтроны;
3. фотоны;
4. электроны;
5.  $\pi^+$  мезоны;
6.  $\pi^0$  мезоны;
7. дейтроны;
8. тритоны;
9. ядра  $^3\text{He}$ ;
10. альфа-частицы.

### 3.1 Модель командного отсека в MCNPX

В качестве командного модуля была принята сфера из алюминия толщиной  $7.5 \text{ г/см}^2 \rightarrow 2.8 \text{ см}$  – эквивалентная толщина защиты командного модуля. Радиус модели равен 162 см, что обеспечивает объем, равный объему реального отсека. Падение протонов на корпус отсека было принято нормальным. Атмосфера внутри модели состояла из 100% воздуха, т.к. атмосфера не влияет на транспорт излучений и, соответственно, нет смысла задавать смесь из 60% кислорода и 40% азота.

### 3.2 Антропоморфный фантом «MIRD»

В роли космонавта в исследовании был выбран фантом из серии – MIRD Humans. Разработан данный фантом в 1980 году в Национальной лаборатории Окриджа. В виду разновидности полов и возрастов, был выбран фантом взрослой женщины, который имеет массу – 72 кг и рост – 168.1 см. Тело и органы представлены уравнениями трехмерных геометрических фигур. Все данные модели, а именно: состав материала, плотность и т. д. были запрограммированы как входные файлы в MCNPX. Ознакомиться с подробным описанием входного файла – INP можно во второй главе.

MIRD фантом состоит из четырех секций:

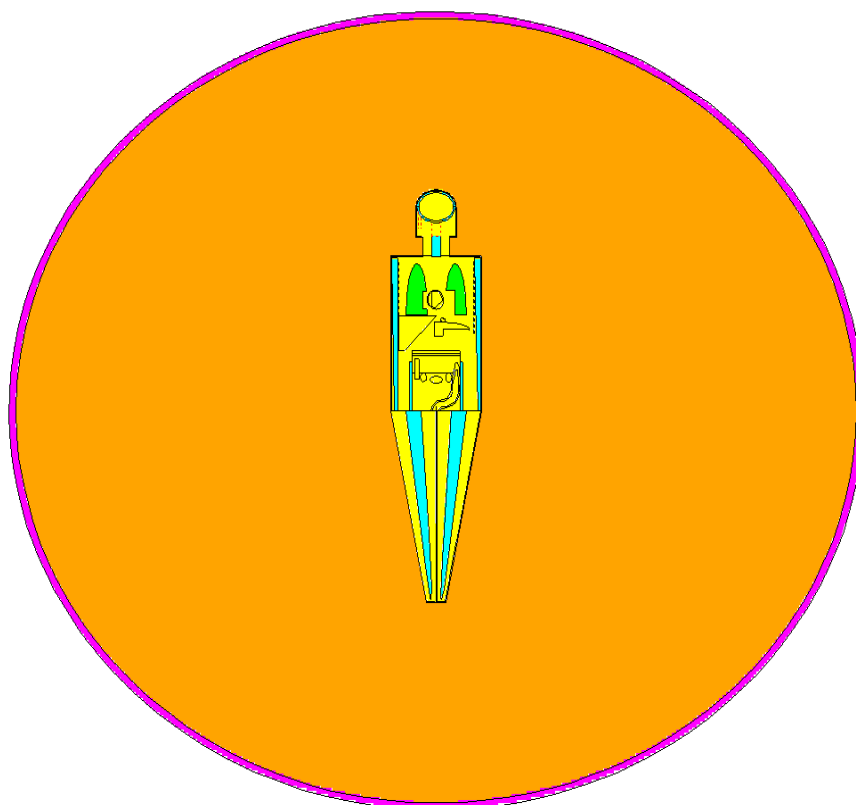
1. Туловище и руки представлены в виде эллиптических цилиндров.
2. Ноги и ступни представляют собой два усеченных круглых конуса.
3. Шея и голова представлены круглым цилиндром, на котором находился другой эллиптический цилиндр, покрытый половиной эллипсоида.
4. Два эллипсоида, представляющие женские груди, были прикреплены к туловищу.

Немаловажным в исследовании является химическое строение и плотность тканей конкретных органов для расчета поглощенной дозы. В нашем фантоме присутствовали три основных типа тканей с различной плотностью и элементным составом:

1. Скелетные.
2. Легкие.
3. Мягкие.

В такого рода геометрических задачах выбор подходящей системы координат был очень важен и может значительно сократить время расчета в некоторых задачах. Начало координат было взято в центре нижнего основания ствольной секции фантома. Ось  $Z$  была направлена вертикально вверх. Ось  $Y$  и ось  $X$  были горизонтально направлены к задней стороне и к левой стороне фантома, соответственно. Поверхности органов определялись как пересечения плоскостей, сфер, цилиндров и т.д. – поверхностей, задаваемых в MCNP.

Как уже было упомянуто во второй главе, объединяя поверхности при помощи булевой алгебры, MCNPX формирует ячейки, которые представляют собой само человеческое тело и все его органы. Для нашего женского фантома используется 48 ячеек и 176 поверхностей во входном файле (рисунок 15).



Источник: [14]

Рисунок 15 – Модель командного модуля Apollo с антропоморфным фантомом астронавта

В ходе вычисления была выполнена верхняя оценка дозы, так как:

1. Падающие извне протоны направлены нормально к поверхности командного модуля.
2. Поток протонов имеет изотропное угловое распределение, поэтому в качестве источника использовались только протоны, направленные в полупространство ( $2\pi$  вместо  $4\pi$ ) при падении на поверхность командного отсека.
3. Фантом не экранируется такими факторами, как специальное внутреннее оборудование и фантомы остальных двух членов экипажа.

Текст входного файла MCNPX для расчёта доз астронавта в командном модуле смотрите в Приложении Б.

### 3.3 Основные результаты

В ходе расчетов были получены значения поглощенной («физической») и эквивалентной дозы в органах и тканях фантома, а также эффективная доза при прохождении радиационного пояса Земли.

А) Поглощенная доза ( $D$ ) – величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу [6]:

$$D = \frac{d\bar{e}}{dm}, \quad (1)$$

где  $d\bar{e}$  – средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном объеме;

$dm$  – масса вещества в этом объеме.

Энергия может быть усреднена по любому определенному объему, и в этом случае средняя доза будет равна полной энергии, переданной объему, деленной на массу этого объема. В единицах СИ поглощенная доза измеряется в джоулях, деленных на килограмм ( $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ), и имеет специальное название – грей (Гр).

Основная расчетная формула выглядит так:

$$D_j^i = 4\pi R_{\text{см}}^2 \sum_k \frac{1.602 \times 10^{10} Q_k \tau_k}{2} \times d_j^i, \quad (2)$$

где  $D_j^i$  – доза « $i$ »-го типа, полученная « $j$ »-м органом;

$4\pi R_{\text{см}}^2$  – площадь внешней поверхности командного модуля, облучаемая протонами;

$R_{\text{см}}^2$  – внешний радиус модуля, равный 162,7 см;

$1,602 \times 10^{10}$  – коэффициент перехода от МэВ/г (формат MCNP) к Дж/кг (формат СИ);

$Q_k \tau_k$  – плотность источника ( $\text{см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ ) протонов « $k$ »-й энергии и время пролёта зоны с этим источником соответственно;

$d_j^i$  – результат, полученный расчётом по коду MCNP, для дозы « $i$ »-го типа и « $j$ »-го органа.

В таблице 9 приведены значения поглощенной дозы для органов, получивших большое количество излучения. Весь список органов будет предоставлен в приложении В.

Таблица 9 – Поглощенная доза на органы

Ячейка	Наименование	Наименование на латыни	Доза, (Гр)
4	Ноги	Crura	7.79E-1
7	Кожа	Cutis	7.87E-1
13	Мочевой пузырь	Urinae et vesicae	2.12E+0
15	Яичники	Ovaries	2.94E-1
19	Толстая кишка	Colonia	1.07E+0
21	Кости ног	Cruris ossa	5.72E-1
24	Кости рук	Brachium ossa	2.84E-1
25	Ключицы	Clavicles	1.04E-1
64	Матка	Uterus	4.96E-1
65	Грудная клетка	Breast	1.44E-1

Источник: собственная разработка

Б) Эквивалентная доза ( $H_{T,R}$ ) – поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения,  $W_R$  [6]:

$$H_{T,R} = W_R \times D_{T,R}, \quad (3)$$

где  $D_{T,R}$  – средняя поглощенная доза в органе или ткани Т;

$W_R$  – взвешивающий коэффициент для излучения R.



При воздействии различных видов излучения с различными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучения:

$$H_T = \sum_R H_{T,R}, \quad (4)$$

Единицей эквивалентной дозы является зиверт (Зв).

Как уже упоминалось выше, в нашем исследовании фигурировало большое разнообразие реакций с выходом различных частиц, их транспортом и взаимодействием со средой. Для расчета эквивалентной дозы нужно знать взвешивающие коэффициенты ( $W_R$ ) для каждого вида излучения с различным диапазоном энергий. Эти коэффициенты были взяты из НРБ 99/2009, Публикации МКРЗ и других источников [6, 7].

Получены следующие результаты эквивалентных доз (весь список смотрите в приложении В):

Таблица 10 – Эквивалентная доза на органы

Ячейка	Наименование	Наименование на латыни	Доза, (Зв)
4	Ноги	Crura	4.32E+0
7	Кожа	Cutis	3.67E+0
13	Мочевой пузырь	Urinae et vesicae	1.11E+1
15	Яичники	Ovaries	1.88E+0
19	Толстая кишка	Colonia	5.94E+0
21	Кости ног	Cruris ossa	2.82E+0
24	Кости рук	Brachium ossa	1.76E+0
25	Ключицы	Clavicles	6.45E-1
64	Матка	Uterus	3.10E+0
65	Грудная клетка	Breast	8.44E-1

Источник: собственная разработка

В) Эффективная доза (Е) – величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Она

представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты [6]:

$$E = \sum_T H_T \times W_T,$$

где  $H_T$  – эквивалентная доза в органе или ткани T;

→  $W_T$  – взвешивающий коэффициент для органа или ткани T;

Единица эффективной дозы – зиверт (Зв).

Полученный результат по эффективной дозе и взвешивающие коэффициенты ( $W_T$ ) для органов приведены в таблице 11. С полным списком можно ознакомиться в приложении В.

Таблица 11 – Взвешивающие коэффициенты для органов и суммарное значение эффективной дозы

Ячейка	Наименование	Наименование на латыни	$W_T$	Эффективная доза (E, Зв)	
4	Ноги	Crura	0.003125		
7	Кожа	Cutis	0.01		
8	Правое легкое	Ius pulmonis	0.12		
9	Левое легкое	Reliquit pulmonis	0.12		
13	Мочевой пузырь	Urinae et vesicae	0.05		
15	Яичники	Ovaries	0.20		
19	Толстая кишка	Colonia	0		
21	Кости ног	Cruris ossa	0.12		
24	Кости рук	Brachium ossa	0.12		
25	Ключицы	Clavicles	0		
64	Матка	Uterus	0.003125		
65	Грудная клетка	Breast	0.05		
Итого:					2.3

Источник: Собственная разработка

Для последующего сравнения полученных расчетных данных с доступными данными, приведем таблицу со значениями доз из статьи – [25] и таблицу средних доз облучения из официального отчета «NASA» [9].

Таблица 12 – Дозы, полученные конспирологами из статьи [25]

Энергия протонов, МэВ	Плотность потока, частиц/(с*см <sup>2</sup> )	Время пролёта пояса Ван-Аллена, мин	Эквивалентная доза для кожи, Зв	Эквивалентная доза для внутренних органов на глубине 1 см, Зв	Эквивалентная доза для внутренних органов на глубине 10 см, Зв
1000	10	10	0,00	0,00	0,00
500	100	20	0,19	0,19	0,17
200	1000	20	0,60	0,59	0,40
170	5000	20	2,23	2,09	1,10
105	8000	20	2,00	1,65	0,45
50	10000	33	0,27	0,16	0,00
30	20000	40	0,00	0,00	0,00
20	70000	45	0,00	0,00	0,00
Итого:			5,29	4,68	2,12

Источник: [25]

Таблица 13 – Средние дозы облучения экипажа для миссий «Аполло»

Миссия «Аполло»	Доза кожи, Рад	Доза кожи, Зиверт
7	0.16	0.0016
8	0.16	0.0016
9	0.20	0.0020
10	0.48	0.0048
11	0.18	0.0018
12	0.58	0.0058
13	0.24	0.0024
14	1.14	0.0114
15	0.30	0.0030
16	0.51	0.0051
17	0.55	0.0055

Источник: [9]

### 3.4 Анализ данных

Проведя анализ, можно сделать вывод, что дозы, полученные в нашем эксперименте, превосходят значения официальных данных по дозиметрии миссий «Аполло» и примерно равны значениям, полученным автором из статьи [25]. Стоит учитывать, что автор проводил расчеты для кожи и внутренних органов на глубине 1 см и 10 см, тогда как в нашей работе предполагается расчёт доз для 44-х органов и тканей. Так, например, полученная эквивалентная доза на

кожу у автора – 5,29 Зв, наш фантом получил дозу равной 3,69 Зв. Максимальное значение доз было зарегистрировано на органах, выполняющих репродуктивные функции, а именно – яичники и матка, т.к. радиочувствительность тканей данных органов очень высока. Суммарное значение эффективной дозы на женский фантом при пересечении внутреннего (протонного) пояса Ван-Аллена составило 2,3 Зв, что является довольно существенным.

Утверждать, что полеты на Луну были мистификацией – нельзя. Стоит учитывать, что в нашем эксперименте была выполнена верхняя оценка дозы и такие факторы экранирования, как специальное внутреннее оборудование, фантомы остальных двух членов экипажа, индивидуальные задачи и передвижения на борту – не учитывались.

Такие низкие значения доз, полученных астронавтами миссий «Apollo» [9], скорее всего, связаны с тем, что были выбраны иные траектории для полетов на Луну, пролегающие через полюса Земли, т.к. в этих районах интенсивность радиационного излучения и плотность потока частиц невелики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы был освоен транспортный код – MCNPX, на основе метода Монте-Карло. Были составлены входные файлы – INP, проведены запуски программы на счет, остановка счета и анализ данных. При помощи программы «Vised» на базе MCNPX были построены различной сложности геометрические фигуры для дальнейшего транспорта частиц. Были рассмотрены и изучены особенности формирования и моделирования дозы, а также изучены общие принципы действия излучений на организм человека.

Используя программу переноса частиц, была рассчитана дозовая нагрузка на фантом из серии «MIRD Humans» при пересечении радиационного пояса Земли. Построены таблицы данных распределения поглощенной, эквивалентной и эффективной доз. Из сравнительного анализа можно сделать вывод, что миссии «Аполло» были, но фактические данные по дозовой нагрузке были занижены, а также не приведены действительные траектории полетов.

В дальнейшем планируется подробно изучить код MCNP, оценить дозовые нагрузки на более современных фантомах и получить значения доз при следующих этапах миссий «Аполло»: межорбитальный перелет и нахождение на Луне.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

### Официальные и нормативные материалы

- 1 Излучение в геомагнитном поле. Модель потоков протонов и электронов низких энергий, ГОСТ 25645.155-91, 01.01.1992
- 2 Лучи космические, ГОСТ 25645.104-84, 01.01.1985
- 3 Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно-энергетического распределения плотности потока протонов, ГОСТ 25645.138-86, 01.07.1987
- 4 Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно-энергетического распределения плотности потока электронов, ГОСТ 25645.139-86, 01.07.1987
- 5 Условия физические космического пространства, ГОСТ 25645.103-84, 01.01.1985
- 6 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)», 225 стр.
- 7 «Рекомендации Международной комиссии по радиационной защите от 2007 года», 344 стр.

### Специальная литература

- 8 «Biomedical results of Apollo» Richard S., Johnston, Lawrence F., Dietlein M.D. and Charles A. стр 9 – 41 // Washington – 1975.
- 9 «Apollo experience report protection against radiation» Robert A. English, Richard E. Benson, Vernon Bailey and Charles M. Barne // National aeronautics and space administration – Washington – march 1973.
- 10 «MCNPX User's Manual» Mark B. Chadwick, Stephanie C. Frankle и т. д. // California, Los Alamos National Laboratory, 2003.
- 11 «MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5» Thomas E. Booth, Forrest B. Brown, Jeffrey S. Bull и т. д. // California, Los Alamos National Laboratory.

- 12 «Расчетные исследования переноса нейтронов в околокорпусном пространстве реактора ВВЭР – 440 по коду MCNP – 5 и сравнение их результатов с экспериментальными данными», П. Г. Бородкин, 2008, стр 33 – 34.
- 13 «Handbook of anatomical models for radiation dosimetry» Xie George Xu and Keith F. Eckerman // Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York, USA 2010.
- 14 «MCNP Medical Physics Geometry Database» Tim Goorley // California, Los Alamos National Laboratory.
- 15 Neal-Jones, Nancy; Zubritsky, Elizabeth; Cole, Steve (September 6, 2011). Garner, Robert (ed.). «NASA Spacecraft Images Offer Sharper Views of Apollo Landing Sites». NASA. Goddard Release No. 11-058 (co-issued as NASA HQ Release No. 11-289). Retrieved September 22, 2011.
- 16 Robinson, Mark (July 27, 2012). «LRO slewed 19° down-Sun allowing the illuminated side of the still standing American flag to be captured at the Apollo 17 landing site. M113751661L2» (Caption). LROC News System. Archived from the original on October 24, 2012. Retrieved April 29, 2013.
- 17 «Apollo Moon flags still standing, images show». BBC News. London: BBC. July 30, 2012. Retrieved April 29, 2013.
- 18 Abbey, Jennifer (July 31, 2012). «American Flags From Apollo Missions Still Standing». ABC News (Blog). New York: ABC. Retrieved April 29, 2013.

#### Электронные ресурсы

- 19 «Космическая радиация», стр 1 – 17. Режим доступа: <http://fein.uni-dubna.ru/document/Programme/Biophysics/Posobie-CosmicRadiation.pdf>.
- 20 «Исследование внешнего радиационного пояса Земли»: статья – И.П. Безродных, стр 1 – 5. Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/B57.pdf>.
- 21 «Википедия MCNP». Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MCNP>.

- 22 «Метод Монте – Карло». Режим доступа:  
[https://studref.com/548858/ekonomika/metod\\_monte\\_karlo](https://studref.com/548858/ekonomika/metod_monte_karlo).
- 23 «Википедия Космическая гонка». Режим доступа:  
[https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F\\_%D0%B3%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%B3%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%B0)
- 24 «Дозы радиации при полете на Луну». Режим доступа:  
<https://aboutspacejournal.net/2017/11/05/%D0%B4%D0%BE%D0%B7%D1%8B-%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8-%D0%BF%D1%80%D0%B8-%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%82%D0%B5-%D0%BD%D0%B0-%D0%BB%D1%83%D0%BD%D1%83/>
- 25 Космическая радиационная защита — Большой Форум. Режим доступа:  
[http://bolshoyforum.com/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F\\_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D0%B7%D0%B0%D1%89%D0%B8%D1%82%D0%B0](http://bolshoyforum.com/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B7%D0%B0%D1%89%D0%B8%D1%82%D0%B0)



## ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А  
Карты поверхностей МСНР

Мнемоника	Тип поверхности	Описание	Уравнение	Параметры
P	Плоскость	Общий случай	$Ax + By + Cz - D = 0$	ABCD
PX		Перпендикулярная оси X	$x - D = 0$	D
PY		Перпендикулярная оси Y	$y - D = 0$	D
PZ		Перпендикулярная оси Z	$z - D = 0$	D
CO	Сфера	Центр в начале координат	$x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
S		Общий случай	$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{x}\bar{y}\bar{z}R$
SX		Центр на оси X	$(x - \bar{x})^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$	$\bar{x}R$
SY		Центр на оси Y	$x^2 + (y - \bar{y})^2 + z^2 - R^2 = 0$	$\bar{y}R$
SZ		Центр на оси Z	$x^2 + y^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{z}R$
C/X	Цилиндр	Ось симметрии параллельна оси X	$(y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{y}\bar{z}R$
C/Y		Ось симметрии параллельна оси Y	$(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{x}\bar{z}R$
C/Z	Цилиндр	Ось симметрии параллельна оси Z	$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 - R^2 = 0$	$\bar{x}\bar{y}R$
CX		Ось симметрии – ось X	$y^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
CY		Ось симметрии – ось Y	$x^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
CZ		Ось симметрии – ось Z	$x^2 + y^2 - R^2 = 0$	R
K/X	Конус	Ось симметрии параллельна оси X	$\sqrt{(y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2} - t(x - \bar{x}) = 0$	$\bar{x}\bar{y}\bar{z}t^2 \pm 1$
K/Y		Ось симметрии параллельна оси Y	$\sqrt{(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2} - t(y - \bar{y}) = 0$	$\bar{x}\bar{y}\bar{z}t^2 \pm 1$
K/Z		Ось симметрии параллельна оси Z	$\sqrt{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2} - t(z - \bar{z}) = 0$	$\bar{x}\bar{y}\bar{z}t^2 \pm 1$
KX		Ось симметрии – ось X	$\sqrt{y^2 + z^2} - t(x - \bar{x}) = 0$	$\bar{x}t^2 \pm 1$
KY		Ось симметрии – ось Y	$\sqrt{x^2 + z^2} - t(y - \bar{y}) = 0$	$\bar{y}t^2 \pm 1$
KZ		Ось симметрии – ось Z	$\sqrt{x^2 + y^2} - t(z - \bar{z}) = 0$	$\bar{z}t^2 \pm 1$
$\pm 1$ используется только для однополосных конусов				
SQ	Эллипсоид Гиперboloид Параболоид	Ось симметрии параллельна оси X, Y или Z	$A(x - \bar{x})^2 + B(y - \bar{y})^2 + C(z - \bar{z})^2 + 2D(x - \bar{x}) + 2E(y - \bar{y}) + 2F(z - \bar{z}) + 2G = 0$	A B C D E F G $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$
GQ	Цилиндр Конус Эллипсоид Гиперboloид Параболоид	Ось симметрии не параллельна ни одной из осей X, Y или Z	$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Eyz + Fzx + Gx + Hy + Jz + K = 0$	A B C D E F G H J K
TX	Эллиптические, круговые торы, оси симметрии параллельны осям X, Y или Z		$(x - \bar{x})^2/B^2 + (\sqrt{(y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2} - A)^2/C^2 - 1 = 0$	$\bar{x}\bar{y}\bar{z}ABC$
TY			$(y - \bar{y})^2/B^2 + (\sqrt{(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2} - A)^2/C^2 - 1 = 0$	$\bar{x}\bar{y}\bar{z}ABC$
TZ			$(z - \bar{z})^2/B^2 + (\sqrt{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2} - A)^2/C^2 - 1 = 0$	$\bar{x}\bar{y}\bar{z}ABC$

## Приложение Б

Текст входного файла MCNP для расчёта доз астронавта в командном модуле  
с Input file of ORNL phantom -Female (Eckerman et al., 1996)

с Cell Cards

```
1 3 -1.04 ((-13 20 -5):(-213 20 -5)) #21 imp:p=1 $ legs
C 5 2 -0.00129 (((313 4 -5 413):-4):(11 5 -6 225 226):(21 6 -22): &
C (14 22 -12):(24 12 -15)) 1 2 7 -8 9 -10 imp:p=1 $outsides of phantom
5 100 -0.00129 (((313 4 -5 413):-4):(11 5 -6 225 226):(21 6 -22): &
(14 22 -12):(24 12 -1040)) 1 -1040 imp:p=1 $outsides of phantom
6 3 -1.04 ((-23 6 -22 114) #44 #18 #118 ):(-21 22 -322 114):((322 -12 -18 116) &
#41 #43 #17):((-524 12 116) #43 #42) imp:p=1 $ head and neck
7 3 -1.04 (-5 20 -313 13):(213 -413 -5 20):(4 -20 -313):(4 -20 -413): &
(-11 16 5 -19 225 226):(16 227 -225):(16 -226 228):(-11 19 -6 21): &
(-21 23 6 -22):(22 -322 21 -14):(-14 18 322 -12):(12 -24 524) imp:p=1 $skin
8 4 -0.296 (-27:28:-29:30) -25 31 imp:p=1 $right lung
9 4 -0.296 (33:34:32) -26 31 imp:p=1 $ left lung
10 3 -1.04 -35 36 -37 -38 imp:p=1 $liver
11 3 -1.04 -39 40 #47 imp:p=1 $stomach
12 3 -1.04 -40 imp:p=1 $ contents
13 3 -1.04 -41 42 imp:p=1 $ urinary bladder
14 3 -1.04 -42 imp:p=1 $ contents
15 3 -1.04 (-43):(-44) imp:p=1 $ ovaries
17 3 -1.04 -45 imp:p=1 $brain
18 3 -1.04 (-48 175 37 -19):(-176 177 -178) imp:p=1 $esophagus:thoracic+abdominal
portion
118 0 -175 37 -19 imp:p=1 $ void in esophagus
19 3 -1.04 (-49 50 51 -52):(-53 54 -55 56):(-57 58 59 -52):(-61 62 -59 65): &
(-63 64 -65 5) imp:p=1 $colon:ascending, transverse, descending and sigmoid
```

Продолжение Приложения Б

20 3 -1.04 (-50 51 -52):(-54 -55 56):(-58 59 -52):(-62 -59 65): &  
(-64 -65 5) imp:p=1 \$contents-colon  
21 5 -1.4 (-66 20 -5):(20 -5 -67) imp:p=1 \$ leg bones  
24 5 -1.4 (-68 5 -70 -16):(-69 5 -70 -16) imp:p=1 \$ arm bones  
25 5 -1.4 (-71 272 -72 -119):(-71 -73 -273 -119) imp:p=1 \$clavicles  
26 5 -1.4 (75 -74 78 -79 119 80 -81):(75 -74 78 -79 119 -76 77) imp:p=1 \$scapulae  
28 5 -1.4 ((-83 82 -86 87 5 -85):(-83 82 -84 85 87)) imp:p=1 \$pelvis  
29 5 -1.4 ((-75 89 90 -91):(-75 89 92 -93):(-75 89 94 -95):(-75 89 31 -96): &  
(-75 89 97 -98):(-75 89 99 -100):(-75 89 101 -102):(-75 89 103 -104): &  
(-75 89 105 -106):(-75 89 107 -108):(-75 89 109 -110):(-75 89 111 -79)) &  
#10 #24 #25 #26 imp:p=1 imp:p=1 \$rib cage  
41 5 -1.4 (-112 84 -214):(-112 214 -19):(19 -113 -114) imp:p=1 \$spine  
c 41 5 -1.4 -112 84 -90 imp:p=1 \$spine, lower portion  
c 411 5 -1.4 -112 90 -19 imp:p=1 \$ spine, middle portion  
c 412 5 -1.4 19 -113 -114 imp:p=1 \$ spine, upper portion  
42 5 -1.4 -116 45 -12 #18 imp:p=1 \$skull-cranium  
43 5 -1.4 (-116 45 12 #18):(118 -117 120 -121 -119 116) imp:p=1 \$facial skeleton  
44 3 -1.04 (((-125 134 -122 6 -133 123 127):(-126 128 -122 123 -134 6 -133)): &  
((-129 131 134 -122 123 133 -47):(-130 132 -134 -122 123 133 -47))) ( &  
-122 123 -23 -124 6 -47) imp:p=1 \$thyroid  
45 3 -1.04 (-135 365):(-136 -137) imp:p=1 \$ kidneys  
47 3 -1.04 (-138 139 -339):(-138 339 140) imp:p=1 \$pancreas  
48 3 -1.04 -141 imp:p=1 \$spleen  
49 3 -1.04 -142 imp:p=1 \$thymus  
50 3 -1.04 (-143 145):(-144 145) imp:p=1 \$ adrenals  
52 3 -1.04 (-146 147 -148):(-149 150 148 -348) imp:p=1 \$gall bladder  
53 3 -1.04 (-147 -148):(-150 148 -348) imp:p=1 \$gall bladder-contents  
54 3 -1.04 -151 152 153 #56 #57 imp:p=1 \$heart -left ventricle

Продолжение Приложения Б

55 3 -1.04 -152 153 #56 #57 imp:p=1 \$ heart-left ventricle-contents  
56 3 -1.04 -154 155 153 -156 151 imp:p=1 \$right ventricle  
57 3 -1.04 -155 153 -156 151 imp:p=1 \$right ventricle-contents  
58 3 -1.04 (-157 158 -153 156):(-159 160 -153 -156) imp:p=1 \$left atrium-part 1 and  
2  
59 3 -1.04 (-158 -153 156):(-160 -153 -156) imp:p=1 \$contents of the left atrium  
60 3 -1.04 -161 162 -153 -156 159 imp:p=1 \$right atrium  
61 3 -1.04 -162 -153 -156 159 imp:p=1 \$contents-right atrium  
62 3 -1.04 (((-82 164 -165 52 -36)#19 #20):(-82 49 164 -165 166 -52)) #19 #20 &  
imp:p=1 \$small intestine  
63 3 -1.04 ((-16 5 -19):(19 -6 -21 114)) #8 #9 #10 #11 #12 #13 #14 #15 &  
#18 #19 #20 #24 #25 #26 #28 #29 &  
#41 #45 #47 #48 #49 #50 #52 #53 #54 #55 &  
#56 #57 #58 #59 #60 #61 #62 #64 #118 imp:p=1 \$trunk  
64 3 -1.04 -170 171 imp:p=1 \$ uterus  
65 3 -1.04 (16 -227):(16 -228) imp:p=1 \$breasts  
C 67 0 -2:-7:8:-9:10:15 imp:p=0 \$void space  
C  
101 6 -2.7 1040 -1041 IMP:P=1 \$ SHIELDING  
67 0 1041 imp:p=0 \$void space  
c end of cell Cards  
  
c Surface Cards  
1 s 0 -100 83.15 1  
C 2 pz -90.0  
4 pz -78  
5 pz 0.0  
6 pz 63.10

Продолжение Приложения Б

C 7 px -110.0

C 8 px 110.0

C 9 py -110.0

C 10 py 110.0

11 sq 96.049 297.5625 0 0 0 0 -28577.9025 0 0 0 \$trunk-skin

12 pz 83.15

13 gq 1 1 0 0 0 -0.1725 -17.25 0 0.0289 3.91314 \$ left leg

213 gq 1 1 0 0 0 0.1725 17.25 0 0.0289 3.91314 \$ right leg

313 gq 1 1 0 0 0 -0.1725 -17.25 0 0 0 \$ left leg skin

413 gq 1 1 0 0 0 0.1725 17.25 0 0 0 \$ right leg skin

14 sq 95.2576 60.3729 0 0 0 0 -5750.9776 0 0 0 \$head-skin

C 15 pz 200.0

C 15 pz 90.0

16 sq 92.7369 291.7369 0 0 0 0 -27053.8 0 0 0 \$ trunk

18 sq 91.9681 57.76 0 0 0 0 -5312.077 0 0 0 \$head

19 pz 62.93 \$height of trunk

20 pz -77.83

21 cz 5.2 \$ neck skin

22 pz 70.80

322 pz 70.97

23 cz 5.03 \$ neck

24 sq 4561.544 2891.041 5750.978 0 0 0 -275393.6 0 0 83.15 \$head 2-skin

524 sq 4190.297 2631.69 5312.077 0 0 0 -242031.5 0 0 83.15 \$head 2

25 sq 20574.746721 7064.31845025 814.99972324 0 0 0 -344176.4206235601 &  
-7.33 0 39.21 \$right lung.

26 sq 20574.746721 7064.31845025 814.99972324 0 0 0 -344176.4206235601 &  
7.33 0 39.21 \$left lung

27 pz 41.6

Продолжение Приложения Б

28 pz 48.5

29 px -5.0

30 py 1.2 \$ end the section removed from the right lung

31 pz 39.21

32 pz 49

33 px 7.0

34 py 0.7 \$ end the section removed from the left lung

35 sq 61.4656 201.3561 0 0 0 0 -12376.47350016 0 0 0 \$liver

36 pz 24.34

37 pz 38.76

38 p 0.03174 0.02235 -0.0258 -1 \$ end def liver

39 sq 437.11101184 603.13465744 100.31224336 0 0 0 -5142.56734 6.90 -3.92 31.55

\$ stomach-wall

40 sq 150.700156 358.799364 28.49637924 0 0 0 -1241.30228 6.90 -3.92 31.55 \$

stomach-contents

41 sq 110.49793921 176.35048209 208.29994276 0 0 0 -2014.6978764 0 -4.41 7.21 \$

urinary bladder-wall

42 sq 82.3011842 135.37787904 161.951076 0 0 0 -1343.2870047744 0 -4.41 7.21 \$

urinary bladder -contents

43 sq 1.089936 4.435236 0.460498 0 0 0 -1.492013 4.8 0 13.52 \$ovary-left

44 sq 1.089936 4.435236 0.460498 0 0 0 -1.492013 -4.8 0 13.52 \$ovary-right

45 sq 2411.409 1421.546 3179.9 0 0 0 -104405.36 0 0 83.15 \$brain

c 37 pz 38.76 \$esophagus

47 pz 67.30

48 sq 0.16 1.1025 0 0 0 0 -0.1764 0 2.29 0 \$esophagus: thoracic portion + abdominal

portion

175 sq 0.0144 0.5929 0 0 0 0 -0.008538 0 2.29 0

176 5 cx 0.64

Продолжение Приложения Б

177 5 px 0.0

178 5 px 7.07 \$end def esophagus

49 sq 6.0025 4.66565 0 0 0 0 -28.00526 -7.33 -2.31 0 \$ ULI ascending colon-wal

50 sq 2.2801 3.24 0 0 0 0 -7.38887524 -7.33 -2.31 0 \$ascending colon- contents

51 pz 13.03

52 pz 21.03 \$end ac. col.

53 sq 0 1.8225 6.0025 0 0 0 -10.93956 0 -2.31 22.99 \$transverse colon-wal

54 sq 0 0.7369 3.8416 0 0 0 -2.841247 0 -2.31 22.29 \$transverse colon-contents

55 px 9.06

56 px -9.06

57 gq 0.381039 0.228932 0.00815687 0 0.0814647 -0.0372351 -5.27548 -0.640313 &  
0.143858 17.711 \$ LLI descending colon

58 gq 0.783147 0.390625 0.0142355 0 0.139002 -0.0765288 -10.8437 -1.09256 &  
0.33543 37.3003 \$descending colon

59 pz 7.86

c 52 pz 21.03

61 ty 2.09 0 7.86 5.16 1.18 1.76 \$sigmoid colon -portion of upper torus

62 ty 2.09 0 7.86 5.16 0.59 1.17

63 ty 2.59 0 0 2.70 1.18 1.76 \$sigmoid colon -portion of lower torus

64 ty 2.59 0 0 2.70 0.59 1.17

65 px 2.59

66 gq 1 1 0.00676423 0 0 -0.172877 -17.25 0 1.318185 65.2778 \$leg bones-left

67 gq 1 1 0.00676423 0 0 0.172877 17.25 0 1.318185 65.2778 \$leg bones-right

68 gq 0.683013 0.142399 0 0 0 0.0132869 -22.5053 0 -0.226941 185.137 \$arm bones

69 gq 0.683013 0.142399 0 0 0 0.0132869 20.8524 0 0.194786 158.906 \$arm bones

70 pz 62.2



Продолжение Приложения Б

71 tz 0 7.22 61.52 15.93 0.7274 0.7274 \$clavicles  
72 p 0.73137 1 0 7.22  
73 p -0.73137 1 0 7.22  
272 p 6.4852 1 0 7.22  
273 p 6.4852 -1 0 -7.22  
74 sq 92.16 267.6496 0 0 0 0 -24666.59 0 0 0 \$scapulae  
75 sq 92.16 214.9156 0 0 0 0 -19806.62 0 0 0  
76 p 0.28 -1 0 0 \$left  
77 p 0.91 -1 0 0  
78 pz 45.88  
79 pz 60.67  
80 p 0.28 1 0 0 \$right  
81 p 0.91 1 0 0  
82 sq 122.5449 94.4784 0 0 0 0 -11577.85 0 -3.72 0 \$pelvis  
83 sq 138.2976 107.1225 0 0 0 0 -14814.78 0 -2.94 0  
84 pz 19.83  
85 pz 12.62  
86 py 4.90  
87 py -2.94  
c 75 88 sq 92.16 214.9156 0 0 0 0 -19806.62 0 0 0 \$rib cage  
89 sq 83.3569 201.35615 0 0 0 0 -16784.42 0 0 0 \$rib cage  
90 pz 31.67  
91 pz 32.93  
92 pz 34.19  
93 pz 35.45  
94 pz 36.71  
95 pz 37.97  
c 31 pz 39.23

Продолжение Приложения Б

96 pz 40.49

97 pz 41.75

98 pz 43.01

99 pz 44.27

100 pz 45.53

101 pz 46.79

102 pz 48.05

103 pz 49.31

104 pz 50.57

105 pz 51.83

106 pz 53.09

107 pz 54.35

108 pz 55.61

109 pz 56.87

110 pz 58.13

111 pz 59.39

c 79 pz 60.65

112 sq 6.0025 2.9929 0 0 0 0 -17.96488 0 5.39 0 \$ spine

113 pz 76.66

114 sq 6.0025 2.9929 0 0 0 0 -17.96488 0 1.0 0 \$ spine

214 pz 31.64

c 45 sq 2411.409 1421.546 3179.9 0 0 0 -104405.36 0 0 83.15 \$brain

116 sq 3666.508 2269.246 4689.812 0 0 0 -197535.3 0 0 83.15 \$skull-cranium

117 sq 79.3881 47.8864 0 0 0 0 -3801.61 0 0 0 \$skull-facial skeleton

118 sq 60.9961 33.8724 0 0 0 0 -2066.084 0 0 0 \$skull-facial skeleton

c 80 sq 5112.25 3271.84 6400 0 0 0 -327184 0 0 91.45 \$statements defining the  
cranium

119 py 0.0

Продолжение Приложения Б

120 pz 74.59  
121 pz 84.85  
122 c/z 0 -3.91 1.85 \$thyroid  
123 c/z 0 -3.91 0.83  
124 py -3.91  
125 gq 1 1 -0.532615 -2 0 0 -7.82 7.82 71.0348 -2353.19 \$thyroid unutar 122  
126 gq 1 1 -0.532615 2 0 0 7.82 7.82 71.0348 -2353.19 \$thyroid unutar 122  
127 gq 1 1 -0.107208 -2 0 0 -7.82 7.82 14.2983 -461.452 \$van 123  
128 gq 1 1 -0.107208 2 0 0 7.82 7.82 14.2983 -461.452 \$van 123  
129 gq 1 1 -0.0591795 -2 0 0 -7.82 7.82 6.699263 -173.93 \$thyroid unutar 122  
130 gq 1 1 -0.0591795 2 0 0 7.82 7.82 6.699263 -173.93 \$thyroid unutar 122  
131 gq 1 1 -0.011912 -2 0 0 -7.82 7.82 1.34713 -22.7988 \$van 123  
132 gq 1 1 -0.011912 2 0 0 7.82 7.82 1.34713 -22.7988 \$van 123  
133 pz 64.15  
134 px 0  
135 sq 57.58989 403.5277 38.39661 0 0 0 -944.6181 5.18 5.88 29.30 \$ left kidney  
136 sq 57.58989 403.5277 38.39661 0 0 0 -944.6181 -5.18 5.88 29.30 \$ right kidney  
365 px 2.48  
137 px -2.48  
138 sq 10.70468 1461.411 230.5782 0 0 0 -1899.249 -0.72 0 33.35 \$pancreas  
139 px -0.72  
339 px 2.61  
140 pz 33.35  
141 sq 95.20295 226.5326 29.7243 0 0 0 -800.6568 9.49 2.94 33.35 \$spleen  
142 sq 13.8384 49 2.648756 0 0 0 -42.3801 0 -7.15 52.00 \$thymus  
143 1 sq 3.418801 31.2481 0.312481 0 0 0 -5.77774 0 0 0 \$ left adrenal  
144 2 sq 3.418801 31.2481 0.312481 0 0 0 -5.77774 0 0 0 \$ right adrenal  
145 1 pz 0

Продолжение Приложения Б

146 3 so 2.031 \$ gall bladder

147 3 so 1.916

148 3 pz 0

348 3 pz 7.66

149 3 kz 8.9274725 0.05175625

150 3 kz 8.421978 0.05175625

151 4 sq 167.2651 494.7866 1290.261 0 0 0 -10333.57 0 0 0 \$ HEART left ventricle-  
komora

152 4 sq 30.72707 119.6573 508.259 0 0 0 -1367.013 0 0 0 \$left ventricle  
(wall+contens)

153 4 px 0

154 4 sq 855.4455 2530.492 1290.261 0 0 0 -52849.08 0 0 0 \$ right ventricle  
(wall+contens)

155 4 sq 553.0493 1828.717 863.5488 0 0 0 -29552.8 0 0 0 \$ right ventricle

156 4 pz 0

157 4 sq 167.2651 195.446 509.6667 0 0 0 -4081.87 0 0 0 \$left atrium (wall+contens)-  
part 1

158 4 sq 121.1761 142.9268 403.2466 0 0 0 -2642.717 0 0 0 \$ left atrium  
(wall+contens)-part 1

159 4 sq 76.1902 89.02677 509.6667 0 0 0 -1859.315 0 0 0 \$ left atrium  
(wall+contens)-part 2

160 4 sq 749.7307 58.65722 403.2466 0 0 0 -1084.572 0 0 0 \$ left atrium  
(wall+contens)part 2

161 4 sq 855.4455 999.5715 509.6607 0 0 0 -20875.95 0 0 0 \$ right atrium

162 4 sq 694.7969 819.5109 403.2466 0 0 0 -15152.76 0 0 0 \$ right atrium  
(wall+contens)

c 82 sq 122.5449 95.0625 0 0 0 0 -11649.42 0 -3.72 0 \$small intestine

c 163 sq 122.5228 95.043 0 0 0 0 -11644.930 -3.72

Продолжение Приложения Б

164 py -4.76

165 py 2.16

166 pz 15.32

171 py -4.77 \$uterus

170 sq 75.61172 14.65741 192.0081 0 0 0 -461.2995 0 -1.96 12.62

225 sq 325.8928 421.9943 463.6486 0 0 0 -7985.187 8.63 -8.485 46.87 \$ breasts-skin

226 sq 325.8928 421.9943 463.6486 0 0 0 -7985.187 -8.63 -8.485 46.87

227 sq 276.7698 361.9278 399.2164 0 0 0 -6323.747 8.63 -8.485 46.87

228 sq 276.7698 361.9278 399.2164 0 0 0 -6323.747 -8.63 -8.485 46.87 \$breasts

C

1040 SO 160.0

1041 SO 162.7

C

c End Surface Card

vol j 15400 j 4700 2130 1180 1020 1350 113 187 34.5 154 10.2 1350 34.1 j &

283.9 274.4 2100 731 41.6 154 460 531 754 508 234 11.9 238 &

62.4 119 27.3 10.1 8.92 47.1 135 77.4 51.4 82.9 23.7 88.3 20.7 &

85.5 806 32920 76 347 j

tr1 3.02 4.90 34.26 0.565 0.825 0 -0.825 0.565 0 0 0 1

tr2 -3.02 4.90 34.26 0.565 -0.825 0 0.825 0.565 0 0 0 1

tr3 -3.98 -3.14 27.04 0.9550 0 -0.2964 -0.0606 0.9789 -0.1952 0.29037 &

0.2044 0.9349

tr4 0.86 -2.10 45.10 0.6453 -0.5134 -0.5658 -0.4428 0.3523 -0.8245 0.6226 &

0.7825 0

tr5 0 2.29 38.08 0.708385 -0.637547 -0.302860 0.668965 0.743294 0.0 0.225114 &

Продолжение Приложения Б

-0.202603 0.953035

c Material Cards

m1 55137 1.0 \$ source

m2 55137 1.0 \$ PUPPET

C m2 7000 0.8 8000 0.2 \$air

m3 1000 10.454E-02 6000 22.663E-02 7000 2.490E-02 8000 &  
63.525E-02 11000 0.112E-02 12000 0.013E-02 14000 0.030E-02 &  
15000 0.134E-02 16000 0.204E-02 17000 0.133E-02 19000 &  
0.208E-02 20000 0.024E-02 26000 0.005E-02 30000 0.003E-02 &  
37000 0.001E-02 40000 0.001E-02 \$soft tissueo

m4 1000 10.134E-02 6000 10.238E-02 7000 2.866E-02 8000 &  
75.752E-02 11000 0.184E-02 12000 0.007E-02 14000 0.006E-02 15000 &  
0.080E-02 16000 0.225E-02 17000 0.266E-02 19000 &  
0.194E-02 20000 0.009E-02 26000 0.037E-02 30000 0.001E-02 &  
37000 0.001E-02 \$lung

m5 1000 7.337E-02 6000 25.475E-02 7000 3.057E-02 8000 &  
47.893E-02 9000 0.025E-02 11000 0.326E-02 12000 0.112E-02 14000 0.002E-02  
&  
15000 5.095E-02 16000 0.173E-02 17000 0.143E-02 19000 &  
0.153E-02 20000 10.190E-02 26000 0.008E-02 30000 0.005E-02 &  
37000 0.002E-02 38000 0.003E-02 82000 0.001E-02 \$skeleton

M6 13027.24c .6026E-01

m100 7014.24c 0.8 8016.24c 0.2 \$air

C

MODE N H / P Z E D T S A

C BBREM 1. 1. 46I 1000. 1 2

C

PHYS:N 1100. 3j 150.

Продолжение Приложения Б

PHYS:H 1100. j 150.

PHYS:P 1100. 2J 1

PRINT

C

NPS 1000

C

C LCA j j j

C

C PRDMP j -60

c Source Cards

SDEF SUR 1041 ERG 1000. DIR=1 NRM=-1 ARA=332648. PAR 9

C si1 l 0.661

C sp1 d 0.851

C si2 0 1

C sp2 0 1

c Tally Cards

fc6 tally energy deposition averaged over a cells

F6:N,H,/,P,Z,E,D,T,S,A

4 6 7 8 9 10

11 12 13 14 15 17 18 19 20

21 24 25 26 28 29

41 42 43 44 45 47 48 49 50

52 53 54 55 56 57 58 59 60

61 62 63 64 65

(4 6 7 8 9 10

11 12 13 14 15 17 18 19 20

21 24 25 26 28 29

41 42 43 44 45 47 48 49 50

Продолжение Приложения Б

52 53 54 55 56 57 58 59 60

61 62 63 64 65)

F16:N

4 6 7 8 9 10

11 12 13 14 15 17 18 19 20

21 24 25 26 28 29

41 42 43 44 45 47 48 49 50

52 53 54 55 56 57 58 59 60

61 62 63 64 65

(4 6 7 8 9 10

11 12 13 14 15 17 18 19 20

21 24 25 26 28 29

41 42 43 44 45 47 48 49 50

52 53 54 55 56 57 58 59 60

61 62 63 64 65)

C

#	DE16	DF16
	1.0000000E-8	2.5000000E+0
	2.5118864E-8	2.5000000E+0
	6.3095734E-8	2.5000000E+0
	1.5848932E-7	2.5000000E+0
	3.9810717E-7	2.5000000E+0
	1.0000000E-6	2.5000000E+0
	2.5118864E-6	2.5000000E+0
	6.3095734E-6	2.5000000E+0
	1.5848932E-5	2.5000000E+0
	3.9810717E-5	2.5000007E+0
	1.0000000E-4	2.5000132E+0



Продолжение Приложения Б

2.5118864E-4	2.5001934E+0
6.3095734E-4	2.5021396E+0
1.5848932E-3	2.5178386E+0
3.9810717E-3	2.6120959E+0
1.0000000E-2	3.0309024E+0
2.5118864E-2	4.3951129E+0
6.3095734E-2	7.5986003E+0
1.5848932E-1	1.2838614E+1
3.9810717E-1	1.8300438E+1
1.0000000E+0	2.0691793E+1
1.2160418E+0	1.9903078E+1
1.4787576E+0	1.8974642E+1
1.7982311E+0	1.7937987E+1
2.1867241E+0	1.6826442E+1
2.6591479E+0	1.5673400E+1
3.2336350E+0	1.4510707E+1
3.9322353E+0	1.3367277E+1
4.7817625E+0	1.2268032E+1
5.8148230E+0	1.1233196E+1
7.0710678E+0	1.0277960E+1
8.5987140E+0	9.4124802E+0
1.0456396E+1	8.6421744E+0
1.2715414E+1	7.9682469E+0
1.5462475E+1	7.3883647E+0
1.8803015E+1	6.8974161E+0
2.2865253E+1	6.4882842E+0
2.7805103E+1	6.1525783E+0
3.3812167E+1	5.8812850E+0

Продолжение Приложения Б

4.1117008E+1	5.6653093E+0
5.0000000E+1	5.4999016E+0
5.8079317E+1	5.3870410E+0
6.7464142E+1	5.2577249E+0
7.8365427E+1	5.1145743E+0
9.1028210E+1	4.9603850E+0
1.0573713E+2	4.7980381E+0
1.2282280E+2	4.6304111E+0
1.4266929E+2	4.4602961E+0
1.6572270E+2	4.2903254E+0
1.9250123E+2	4.1229096E+0
2.2360680E+2	3.9601879E+0
2.5973860E+2	3.8039928E+0
3.0170882E+2	3.6558293E+0
3.5046084E+2	3.5168673E+0
4.0709053E+2	3.3879467E+0
4.7287080E+2	3.2695938E+0
5.4928027E+2	3.1620462E+0
6.3803647E+2	3.0652844E+0
7.4113445E+2	2.9790688E+0
8.6089166E+2	2.9029774E+0
1.0000000E+3	2.8364462E+0

C

F26:H

4	6	7	8	9	10			
11	12	13	14	15	17	18	19	20
21	24	25	26	28	29			
41	42	43	44	45	47	48	49	50

Продолжение Приложения Б

52 53 54 55 56 57 58 59 60

61 62 63 64 65

(4 6 7 8 9 10

11 12 13 14 15 17 18 19 20

21 24 25 26 28 29

41 42 43 44 45 47 48 49 50

52 53 54 55 56 57 58 59 60

61 62 63 64 65)

C

# DE26 DF26

2. 13.5

5. 11.7

10. 9.4

20. 7.0

50. 4.7

100. 3.4

200. 2.4

500. 2.1

1000. 2.1

C

F36:/

4 6 7 8 9 10

11 12 13 14 15 17 18 19 20

21 24 25 26 28 29

41 42 43 44 45 47 48 49 50

52 53 54 55 56 57 58 59 60

61 62 63 64 65

(4 6 7 8 9 10

Продолжение Приложения Б

11 12 13 14 15 17 18 19 20  
21 24 25 26 28 29  
41 42 43 44 45 47 48 49 50  
52 53 54 55 56 57 58 59 60  
61 62 63 64 65)

C

# DE36 DF36

10. 1.2  
20. 1.1  
50. 1.2  
100. 2.0  
200. 2.2  
500. 2.3  
1000. 2.3

C

F46:P,E

4 6 7 8 9 10  
11 12 13 14 15 17 18 19 20  
21 24 25 26 28 29  
41 42 43 44 45 47 48 49 50  
52 53 54 55 56 57 58 59 60  
61 62 63 64 65  
(4 6 7 8 9 10  
11 12 13 14 15 17 18 19 20  
21 24 25 26 28 29  
41 42 43 44 45 47 48 49 50  
52 53 54 55 56 57 58 59 60  
61 62 63 64 65)

Продолжение Приложения Б

C

F56:D

4 6 7 8 9 10  
11 12 13 14 15 17 18 19 20  
21 24 25 26 28 29  
41 42 43 44 45 47 48 49 50  
52 53 54 55 56 57 58 59 60  
61 62 63 64 65  
(4 6 7 8 9 10  
11 12 13 14 15 17 18 19 20  
21 24 25 26 28 29  
41 42 43 44 45 47 48 49 50  
52 53 54 55 56 57 58 59 60  
61 62 63 64 65)

C

# DE56 DF56

.1 6.

1000 6.

C

F66:T

4 6 7 8 9 10  
11 12 13 14 15 17 18 19 20  
21 24 25 26 28 29  
41 42 43 44 45 47 48 49 50  
52 53 54 55 56 57 58 59 60  
61 62 63 64 65  
(4 6 7 8 9 10  
11 12 13 14 15 17 18 19 20

Продолжение Приложения Б

21 24 25 26 28 29  
41 42 43 44 45 47 48 49 50  
52 53 54 55 56 57 58 59 60  
61 62 63 64 65)

C

# DE66 DF66

.1 6.

1000 6.

C

F76:S

4 6 7 8 9 10

11 12 13 14 15 17 18 19 20

21 24 25 26 28 29

41 42 43 44 45 47 48 49 50

52 53 54 55 56 57 58 59 60

61 62 63 64 65

(4 6 7 8 9 10

11 12 13 14 15 17 18 19 20

21 24 25 26 28 29

41 42 43 44 45 47 48 49 50

52 53 54 55 56 57 58 59 60

61 62 63 64 65)

C

# DE76 DF76

.1 20.

1000 20.

C

F106:A

Продолжение Приложения Б

4 6 7 8 9 10  
11 12 13 14 15 17 18 19 20  
21 24 25 26 28 29  
41 42 43 44 45 47 48 49 50  
52 53 54 55 56 57 58 59 60  
61 62 63 64 65  
(4 6 7 8 9 10  
11 12 13 14 15 17 18 19 20  
21 24 25 26 28 29  
41 42 43 44 45 47 48 49 50  
52 53 54 55 56 57 58 59 60  
61 62 63 64 65)

# DE106 DF106  
.1 20.  
1000 20.

C

## Приложение В

### Таблицы данных по полученным дозам для различных органов

#### Поглощенная доза

Ячейка	Наименование	Наименование на латыни	Доза (Гр)
4	Ноги	crura	7.79E-1
6	Голова и шея	caput et collum	1.11E-2
7	Кожа	cutis	7.87E-1
8	Правое лёгкое	ius pulmonis	4.29E-2
9	Левое лёгкое	reliquit pulmonis	4.20E-2
10	Печень	iecoris	5.75E-2
11	Желудок	stomachum	6.20E-2
12	Содержимое	contenta	3.02E-2
13	Мочевой пузырь	urinae et vesicae	2.12E+0
14	Содержимое	contenta	2.06E+0
<b>15</b>	<b>яичники</b>	<b>ovaries</b>	2.94E-1
17	Мозг	cerebrum	2.70E-2
18	пищевод: грудная+брюшная часть	esophagus:thoracicum+abdominis pars	5.16E-3
19	Толстый кишечник: восходящая, поперечная,	colonia:ascendentes, transversa, descendens et sigmoid	1.07E+0
<b>21</b>	<b>Кости ног</b>	<b>cruris ossa</b>	5.72E-1
<b>24</b>	<b>Кости рук</b>	<b>brachium ossa</b>	2.84E-1
25	Ключицы	clavicles	1.04E-1
26	Лопатки	scapulae	7.10E-2
28	Таз	pelvis	7.72E-1
29	Грудная клетка	costa caveam	9.22E-2
41	Позвоночник	spina	2.52E-2
42	Череп	skull-cranium	1.10E-2
43	Лицевые кости	facialis larvam	6.39E-2
44	Щитовидная железа	thyroid	5.20E-3
45	Почки	renes	9.39E-2
47	Поджелудочная железа	pancreas	1.37E-2
48	Селезёнка	lienis	5.30E-2
49	Тимус	thymus	3.89E-2



Продолжение Приложения В

50	Надпочечники	adrenals	2.27E-2
52	Желчный пузырь	gall vesicae	2.19E-2
53	Содержимое мочевого пузыря	contenta	2.04E-2
54	Сердце – левый желудочек	cordis sinistrum ventriculum	1.69E-2
55	Сердце – левый желудочек – содержимое	contenta	9.89E-3
56	Правый желудочек	ius ventricul	3.81E-2
57	Правый желудочек - содержимое	contenta	2.59E-2
58	Левое предсердие – часть 1 и 2	reliquit atrium	1.06E-2
59	Содержимое левого предсердия	contenta	2.89E-3
60	Правое предсердие	ius atrium	1.65E-2
61	Содержимое правого предсердия	contenta	1.13E-2
62	Тонкий кишечник	parva intestini	1.01E-1
63	Торс	truncus	4.58E-1
64	<b>Матка</b>	<b>uterus</b>	4.96E-1
65	<b>Грудь</b>	<b>mamma</b>	1.44E-1

Эквивалентная доза

Ячейка	Наименование	Наименование на латыни	Доза (Зв)
4	Ноги	crura	4.32E+0
6	Голова и шея	caput et collum	6.51E-2
7	Кожа	cutis	3.67E+0
8	Правое лёгкое	ius pulmonis	2.26E-1
9	Левое лёгкое	reliquit pulmonis	2.21E-1
10	Печень	iecoris	3.14E-1
11	Желудок	stomachum	3.47E-1
12	Содержимое	contenta	1.76E-1
13	Мочевой пузырь	urinae et vesicae	1.11E+1
14	Содержимое	contenta	1.04E+1
<b>15</b>	<b>яичники</b>	<b>ovaries</b>	<b>1.88E+0</b>
17	Мозг	cerebrum	1.50E-1

Продолжение Приложения В

18	пищевод: грудная+брюшная часть	esophagus:thoracicum+abdominis pars	3.18E-2
19	Толстый кишечник: восходящая, поперечная,	colonia:ascendentes, transversa, descendens et sigmoid	5.94E+0
<b>21</b>	<b>Кости ног</b>	<b>cruris ossa</b>	2.82E+0
<b>24</b>	<b>Кости рук</b>	<b>brachium ossa</b>	1.76E+0
25	Ключицы	clavicles	6.45E-1
26	Лопатки	scapulae	4.30E-1
28	Таз	pelvis	3.98E+0
29	Грудная клетка	costa caveam	5.23E-1
41	Позвоночник	spina	1.39E-1
42	Череп	skull-cranium	5.88E-2
43	Лицевые кости	facialis larvam	3.42E-1
44	Щитовидная железа	thyroid	3.19E-2
45	Почки	renes	4.89E-1
47	Поджелудочная железа	pancreas	8.34E-2
48	Селезёнка	lienis	3.04E-1
49	Тимус	thymus	2.18E-1
50	Надпочечники	adrenals	1.37E-1
52	Желчный пузырь	gall vesicae	1.27E-1
53	Содержимое мочевого пузыря	contenta	1.20E-1
54	Сердце – левый желудочек	cordis sinistrum ventriculum	1.03E-1
55	Сердце – левый желудочек	contenta	6.32E-2
56	Правый желудочек	ius ventricul	2.09E-1
57	Правый желудочек - содержимое	contenta	1.48E-1
58	Левое предсердие – часть 1 и 2	reliquit atrium	6.37E-2
59	Содержимое левого предсердия	contenta	1.72E-2
60	Правое предсердие	ius atrium	9.76E-2
61	Содержимое правого предсердия	contenta	6.81E-2
62	Тонкий кишечник	parva intestini	6.00E-1
63	Торс	truncus	2.50E+0
64	<b>Матка</b>	<b>uterus</b>	<b>3.10E+0</b>
65	<b>Грудь</b>	<b>mamma</b>	<b>8.44E-1</b>

Продолжение Приложения В

Ячейка	Наименование	Наименование на латыни	$W_T$
4	Ноги	crura	0.003125
6	Голова и шея	caput et collum	0
7	Кожа	cutis	0.01
8	Правое лёгкое	ius pulmonis	<b>0.12</b>
9	Левое лёгкое	reliquit pulmonis	<b>0.12</b>
10	Печень	iecoris	<b>0.12</b>
11	Желудок	stomachum	<b>0.12</b>
12	Содержимое	contenta	0
13	Мочевой пузырь	urinae et vesicae	0.05
14	Содержимое	contenta	0
<b>15</b>	<b>яичники</b>	<b>ovaries</b>	0.20
17	Мозг	cerebrum	0.003125
18	пищевод: грудная+брюшная часть	esophagus:thoracicum+abdominis pars	0.05
19	Толстый кишечник: восходящая, поперечная,	colonia:ascendentes, transversa, descendens et sigmoid	0
<b>21</b>	<b>Кости ног</b>	<b>cruris ossa</b>	0.12
<b>24</b>	<b>Кости рук</b>	<b>brachium ossa</b>	0.12
25	Ключицы	clavicles	0
26	Лопатки	scapulae	0
28	Таз	pelvis	0
29	Грудная клетка	costa caveam	0.12
41	Позвоночник	spina	0.12
42	Череп	skull-cranium	0
43	Лицевые кости	facialis larvam	0
44	Щитовидная железа	thyroid	0.05
45	Почки	renes	0.003125
47	Поджелудочная железа	pancreas	0.003125
48	Селезёнка	lienis	0.003125
49	Тимус	thymus	0.003125
50	Надпочечники	adrenals	0.003125
52	Желчный пузырь	gall vesicae	0

Продолжение Приложения В

53	Содержимое мочевого пузыря	contenta	0
54	Сердце – левый желудочек	cordis sinistrum ventriculum	0
55	Сердце – левый желудочек	contenta	0
56	Правый желудочек	ius ventricul	0
57	Правый желудочек - содержимое	contenta	0
58	Левое предсердие – часть 1 и 2	reliquit atrium	0
59	Содержимое левого предсердия	contenta	0
60	Правое предсердие	ius atrium	0
61	Содержимое правого предсердия	contenta	0
62	Тонкий кишечник	parva intestini	0.003125
63	Торс	truncus	0
64	<b>Матка</b>	<b>uterus</b>	0.003125
65	<b>Грудь</b>	<b>mamma</b>	0.05

