

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 621.039.58; 629.78

**РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ
В АНТРОПОМОРФНОМ ФАНТОМЕ ВНУТРИ
ПИЛОТИРУЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА
НА ПРЕДПОЛАГАЕМОЙ ОРБИТЕ РОССИЙСКОЙ
ОРБИТАЛЬНОЙ СЛУЖЕБНОЙ СТАНЦИИ**

М. Ю. Азаркин, О. В. Мешков, А. Р. Теркулов

В работе путем Монте-Карло моделирования получена оценка радиационной нагрузки внутри пилотируемого космического аппарата на предполагаемой орбите Российской Орбитальной Служебной Станции (РОСС). Расчет был произведен на примере упрощенной модели служебного модуля (СМ) Международной Космической Станции (МКС) с помощью программного пакета GEANT4 и модели космической радиации SPENVIS. Значение мощности поглощенной дозы на орбите РОСС было сопоставлено со значениями, полученными в рамках той же модели СМ МКС для низкой и высокой орбиты МКС. Проведенное сравнение показывает, что предполагаемая орбита РОСС приводит к значениям полной поглощенной дозы находящимся в окне значений, получаемых для разных орбит МКС, однако компонента поглощенной дозы, связанная с Галактическими Космическими Лучами, возрастает на несколько десятков процентов.

Ключевые слова: высокоширотная орбита, РОСС, радиация на РОСС, GEANT4.

Введение. Российская орбитальная служебная станция – проектируемая национальная космическая станция, которая должна прийти на смену российскому сегменту МКС. Главной её особенностью является использование высокоширотной орбиты, обеспечивающий возможность глобального обзора Земли, включая всю территорию нашей страны

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: meshkovov@lebedev.ru.

и Арктики, проведения геофизических и атмосферных исследований в полярных областях, где многие процессы все еще слабо изучены. Однако использование высокоширотных орбит сопряжено с увеличением затраты топлива, и как следствие, снижением полезной массы выводимого груза. Кроме этого возрастает воздействие космического излучения за счет прохождения над полярными областями, где магнитное поле Земли направляет заряженные частицы солнечного ветра вдоль силовых линий к поверхности и не оказывает значительного отклоняющего влияния на высокоэнергетические частицы галактических космических лучей (ГКЛ). Для смягчения влияния обоих негативных факторов предполагается использование более низкой орбиты в сравнении с текущей для МКС, а также ведется разработка новых транспортных кораблей на основе существующих “Прогресс” и “Союз” для доставки грузов [1]. Среди рассматриваемых орбит РОСС наиболее оптимальной для поставленных перед РОСС задач является солнечно-синхронная орбита с высотой 372 км и наклоном 96.9° [2].

Количественные оценки радиационной обстановки на предполагаемой орбите РОСС крайне малочисленны, а соответствующие публикации в реферируемых журналах представлены фактически одной [3]. В работе [3] применялся аналитический эффективный подход, использующий вместо реальной трехмерной геометрии обитаемого модуля и фантома функции экранирования и табулированные удельные значения поглощенной дозы на определенной глубине для определенных энергетических и массовых спектров космического излучения (КИ). Однако отсутствие трехмерной геометрии системы и непосредственных расчетов электромагнитных и ядерных процессов прохождения КИ через вещество могут приводить к значительным неточностям из-за изменяющихся с параметрами орбиты энергетическими и массовыми спектрами КИ и в случае существенных геометрических неоднородностей. Поэтому, в этой работе мы оценим радиационные условия на РОСС, моделируя в программном пакете GEANT4 [4] все физические процессы прохождения КИ через вещество на примере трехмерной модели СМ МКС и антропоморфного фантома.

Метод расчета. РОСС будет состоять из модулей, некоторые из которых изначально проектировались для МКС [5], поэтому степень экранированности внутренних объемов от КИ без применения дополнительных защит будет в среднем находиться на одном уровне с модулями российского сегмента МКС. По этой причине при оценке радиационной нагрузки на космонавтов методом МК моделирования разумно и показательно использовать модели модулей российского сегмента МКС. В данной работе используется упрощенная модель Служебного Модуля (СМ) МКС, созданная ранее авторами

для моделирования радиационных условий в СМ МКС и проверенная сравнением экспериментальными измерениями [6] и антропоморфный фантом, похожий своими характеристиками на используемый на МКС фантом “Матрешка-R” [7, 8]. Однако в качестве материала в данной работе использована вода, а не пластик с плотностью $\approx 1.1 \text{ г/см}^3$, что позволяет делать дозиметрические расчеты без поправок на состав и плотность вещества. Расчет мощности поглощенной дозы в эффективном антропоморфном фантоме внутри СМ МКС проведен для периода минимума солнечной активности для предполагаемой орбиты РОСС [2] для высокой и низкой орбит МКС [9] в сравнительных целях, т. е. для следующих параметров орбиты, соответственно: 372 км и 51.6° , 372 км и 96.8° , 420 км и 51.6° .

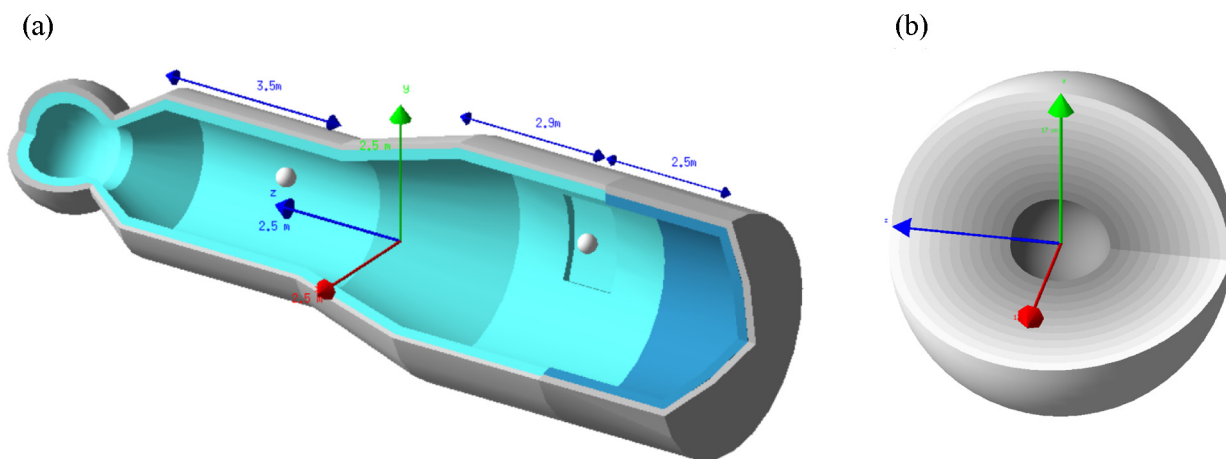


Рис. 1: Эффективная геометрическая модель, приближенно описывающая СМ МКС (а) и фантом типа “Матрешка” (б). Светло-серым цветом обозначен алюминиевый корпус переходного, большого и малого рабочих отсеков; темно-серым – более толстый эффективный корпус агрегатного и промежуточного отсеков, также учитывающий в себе массу объединенной двигательной установки. Внутренняя часть СМ покрыта слоем полипропилена толщиной 10 см (бирюзовый цвет), кроме каюты космонавта, где его толщина составляет 5 мм.

Упрощенная эффективная программная модель СМ включает все основные его элементы и обладает значением массы, близким к реальному. Модель СМ проиллюстрирована на рис. 1(а) и включает в себя следующие элементы: переходный отсек, рабочий отсек малого диаметра (РОМ), рабочий отсек большого диаметра (РОБ), промежуточную камеру, негерметичный агрегатный отсек (и объединенную двигательную установку). Переходный отсек может быть описан стальной усеченной сферой диаметром 225 см и

со стенкой толщиной 1 см; рабочий отсек малого диаметра ($D = 290$ см) представляет собой алюминиевый цилиндр со стенкой толщиной 4 мм; рабочий отсек большого диаметра ($D = 422$ см) – алюминиевый цилиндр со стенкой толщиной 4 мм. Агрегатный отсек, промежуточный отсек и объединенная двигательная установка эффективно представляют собой стальной цилиндр диаметром 422 см с закрывающим его с торца конусом с толщиной стенок 10 мм. Внутренняя поверхность модуля покрыта равномерным слоем полипропилена толщиной 10 см, эффективно описывающим элементы внутренней обшивки и различную аппаратуру, расположенную вдоль стенок. Однако стенка каюты космонавта (КК), расположенная внутри РОБ, защищена облицовочной полипропиленовой панелью толщиной 5 мм. Поэтому расчет мощности поглощенной дозы в антропоморфном фантоме в работе выполнен для его расположения как в среднезащищенном РОМ, так и в слабозащищенной КК. Модель используемого для расчета антропоморфного фантома (см. рис. 1(b)) представляет собой заполненную водой полую сферу с внешним диаметром $D = 34$ см и диаметром полости $D = 10$ см.

При расчете учитывались протонное поле радиационных поясов Земли (РПЗ), а также протоны и наиболее распространенные ядра (${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{56}\text{Fe}$) галактических космических лучей. Дифференциальные энергетические спектры данных радиационных полей были получены с помощью программы SPENVIS [10]. Протоны из РПЗ и ГКЛ имеют сложный характер взаимодействия с веществом [11], а энергетический спектр на предполагаемой орбите РОСС достигает 100 МэВ/нуклон. В состав данной программы входят развиваемые NASA (англ. National Aeronautics and Space Administration) и ESA (англ. European Space Agency) модели магнитного поля Земли, РПЗ, ГКЛ, солнечных протонных событий, инструменты для оценки влияния радиации на микроэлектронику, модели радиационных полей в межпланетном пространстве, а также на Луне, Марсе, и Юпитере, модель для оценки метеороидной опасности. В контексте данной работы программа позволяет пользователю ввести параметры орбиты и получить соответствующие усредненные вдоль траектории значения дифференциальных по энергии флюенсов частиц. Описанная ранее геометрическая модель СМ была облучена изотропными потоками частиц РПЗ и ГКЛ, испущенными с поверхности мнимой сферы, размещенной вокруг СМ. Процессы прохождения частиц КИ через материалы СМ и фантом промоделированы в программной среде GEANT4 (версия 11.2) с набором физических моделей QGSP_BERT_HP, который широко применяется для моделирования современных коллайдерных экспериментов [12], экспериментов по регистрации КИ, а также радиологических задач. Этот набор использует стандартную для GEANT4 модель элек-

тромагнитных потерь, струнную модель для взаимодействия адронов (QGSP) высоких энергий (>8 ГэВ), каскад Бертини для адронных взаимодействий более низких энергий и прецизионную модель взаимодействия нейтронов с веществом, опирающуюся на значительное количество экспериментальных данных.

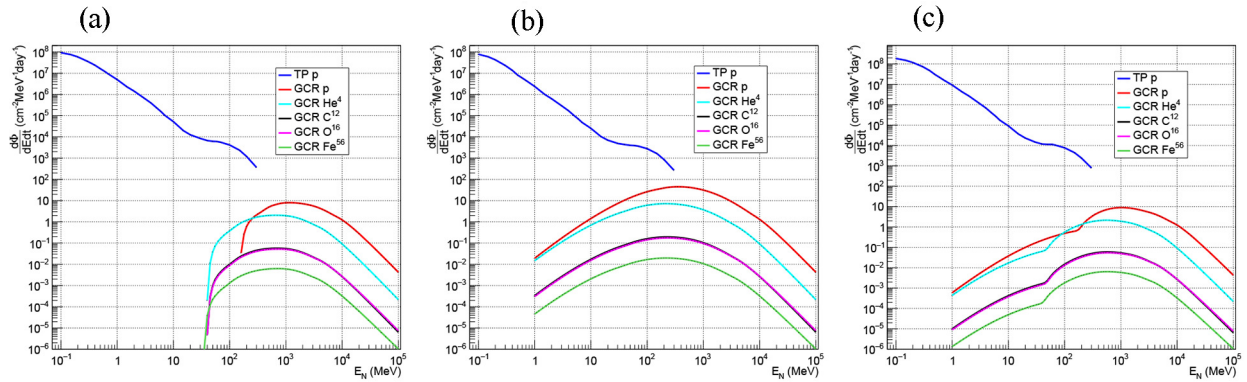


Рис. 2: Дифференциальные энергетические спектры протонов и электронов в радиационных поясах Земли, протонов и наиболее распространенных ядер галактических космических лучей в период минимума солнечной активности для 3 разных орбит со следующими высотами и наклонениями, соответственно: 372 км и 51.6° (a), 372 км и 96.8° (b), 420 км и 51.6° (c).

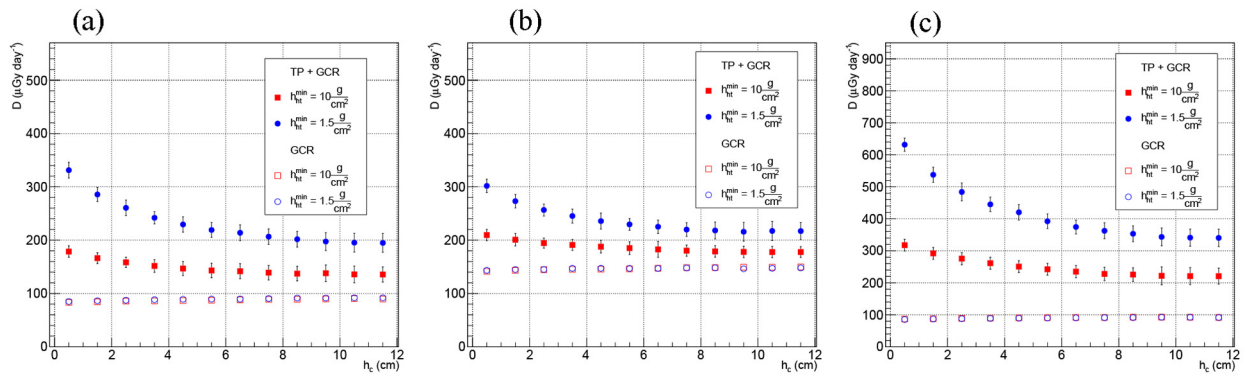


Рис. 3: Мощность поглощенной дозы в слоях фантома в зависимости от глубины его залегания для минимума солнечной активности для 3 разных орбит со следующими высотами и наклонениями, соответственно: 372 км и 51.6° (a), 372 км и 96.9° (b), 420 км и 51.6° (c). Синим цветом обозначена мощность поглощенной дозы в менее защищенной части рабочего отсека, красным – в наиболее; h_{ht}^{min} означает минимальную толщину материала от поверхности фантома до открытого космоса.

Результаты и дискуссия. Дифференциальные энергетические спектры данных радиационных полей, полученные с помощью модели SPENVIS, продемонстрированы на рис. 2. Данные энергетические спектры КИ наглядно демонстрируют, что понижение высоты орбиты с 420 км до 372 км снижает интенсивность протонов РПЗ практически на полпорядка во всем диапазоне энергий и при этом, например, при одинаковой высоте средняя интенсивность протонов РПЗ на орбите с наклоном 96.8° ниже, чем при наклоне 51.6° , что является отражением хорошо известного факта о структуре РПЗ с максимальной интенсивностью в экваториальной области. Энергетический спектр ГКЛ при изменении параметров орбит меняется в основном в мягкой области, левее пика его интенсивности, лежащего в диапазоне 300–100 МэВ/нуклон. Так, например, видно, что при высоте орбиты 372 км и ее наклоне 51.6° (а) происходит обрезание энергетических спектров ГКЛ 50–100 МэВ на нуклон.

В работе проведен расчет мощности поглощенной дозы в слоях антропоморфного фантома в среднезащищенном РОМ так и в слабозащищенной КК как для суммарного радиационного поля, РПЗ + ГКЛ, так и для ГКЛ отдельно для низкой орбиты МКС (рис. 3(а)), предполагаемой орбиты РОСС (рис. 3(б)), высокой орбиты МКС (рис. 3(с)). В соответствии с проведенными расчетами можно выделить следующие результаты:

- Суммарная мощность поглощенной дозы в наружных слоях фантома в слабозащищенной КК для всех трех орбит выше в 1.5–2 раза в сравнении со среднезащищенным сценарием. Однако разница спадает для более глубоких слоев, что связано с большим поглощением мягкой части спектра протонов РПЗ при возрастании суммарной толщины экранировки.
- Тем не менее, для всех параметров орбит мощность поглощенной дозы от ГКЛ почти не зависит от места размещения фантома и даже слегка увеличивается для глубоких его слоев, что связано с высокой проникающей способностью высокоэнергетических частиц ГКЛ и возможностью развития адронных каскадов.
- Снижение высоты орбиты с 420 км до 372 км вне зависимости от наклона дает значимое (до 40%) снижение мощности дозы, поглощаемой в фантоме, главным образом за счет снижения вклада РПЗ. На высоте 372 км изменение наклона орбиты с 51.6° на 96.9° приводит к незначительному изменению суммарной поглощенной дозы в фантоме, однако происходит существенное изменение вкладов от РПЗ и ГКЛ, последний демонстрирует полуторакратный рост при соответствующем уменьшении первого.

Обобщая, предполагаемая высокоширотная орбита РОСС показывает даже меньший уровень мощностей поглощенных доз в сравнении с текущей орбитой МКС. Тем не менее, значения мощностей поглощенных доз от ГКЛ, обладающих коэффициентом качества излучения до 2, выше в 1.5–2 раза в сравнении с высокой и низкой орбитами МКС, таким образом нивелируя эффект снижения орбиты РОСС. Стоит заметить, что приведенные оценки получены для спокойной космической погоды. Солнечные протонные события (СПС) способны значительно повысить кратковременные радиационные нагрузки. Однако оценка радиационной нагрузки во время СПС требует отдельного исследования, так как модели таких событий, как и сами такие события, обладают значительной вариативностью.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Е. А. Микрин, *Космическая техника и технологии* **16**(1), 5 (2017).
- [2] И. А. Маринин, *Русский космос* **42**(8), 6 (2022).
- [3] В. Г. Митрикас, *Космические исследования* **61**(2), 157 (2023). DOI: 10.31857/S0023420622700030.
- [4] “GEANT4. A simulation toolkit”. <https://geant4.web.cern.ch/> [Дата обращения: 10 февраля 2026 года].
- [5] В. Егоров, Ф. Терехов, М. Котов, *Русский космос* **23**(1), 6 (2021).
- [6] М. Ю. Азаркин, А. Р. Теркулов, Р. В. Толочек, В. А. Шуршаков, *Авиакосмическая и экологическая медицина* **59**(6), 89 (2025). DOI: 10.21687/0233-528X-2025-59-6-89-95.
- [7] L. Sihver et al., “Simulations of the MTR-R and MTR experiments at ISS, and shielding properties using PHITS”, in *2009 IEEE Aerospace conference*, pp. 1–8 (2009). DOI: 10.1109/AERO.2009.4839360.
- [8] M. Dobynde et al., *Life Sciences in Space Research* **21**, 65 (2019). DOI: 10.1016/j.lssr.2019.04.001.
- [9] M. Ravan, Zenodo (EU Open Research Repository) (08, 2025). DOI: 10.5281/zenodo.16760728.
- [10] European Space Agency, “Space Environment Information System”, 2024. <https://www.spenvis.oma.be/announcement.php> [Дата обращения: 10 сентября 2024 года].
- [11] А. В. Багуля, В. М. Гришин, В. А. Рябов, И. Н. Завестовская, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **51**(8), 42 (2024). DOI: 10.3103/S1068335624601006.

- [12] GEANT4, “Physics Reference Manual for GEANT4. Release 11.2”, 2024. <https://geant4.web.cern.ch/download/release-notes/notes-v11.2.0.html> [Дата обращения: 10 сентября 2024 года].

Поступила в редакцию 26 февраля 2026 г.

После доработки 5 марта 2026 г.

Принята к публикации 6 марта 2026 г.