

Аннотация к циклу научных статей

1. Авторы

И.Г. Митрофанов, М.Л. Литвак, А.Б. Санин, Д.В. Головин

2. Название цикла

Нейтронная компонента радиационного фона на поверхности Марса и Луны в условиях спокойного Солнца и мощных солнечных протонных событий

3. Ссылки на публикации

[1] Igor Mitrofanov, Maxim Litvak, Anton Sanin, Dmitry Golovin, Sergey Nikiforov, Maya Djachkova, Artem Anikin, Nikita Lukyanov, Jordanka Semkova, Yuri Matviichuk (2025) The solar particle event at Mars on 2024 May 20: neutron component of the radiation environment, *Acta Astronautica*. 234. 734–741. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.05.043>

[2] Maxim Litvak, Igor Mitrofanov, Anton Sanin, Dmitry Golovin, Denis Lisov, Vladislav Yakovlev (2025) Neutron radiation dosimetry on Mars, *Acta Astronautica*. 234. 186–193 <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.04.048>

[3] И.Г. Митрофанов, А.Б. Санин, М.Л. Литвак, Д.В. Головин, М.В. Дьячкова, А.А. Аникин, Н.В. Лукьянов (2025); Нейтронное излучение Луны во время исторического Солнечного протонного события Кэррингтона 1 сентября 1859 года, *Космические исследования*, том 63, №4, 377 – 384.

4. Общая формулировка научной проблемы и её актуальность

Луна и Марс станут первыми плацдармами на пути космической экспансии человечества в космос. Уже сейчас активно обсуждаются и моделируются планы пилотируемых экспедиций и оцениваются возможные риски с этим связанные. Одной из наиболее критических проблем является высокая радиационная опасность на поверхности этих небесных тел. Они не имеют ни магнитосферы ни плотной атмосферы, которые могли бы защитить поверхность от облучения заряженными частицами Галактических космических лучей (ГКЛ) и мощных солнечных протонных событий (СПС). Кроме прямого облучения, связанного с заряженными частицами, существенный риск представляет фон вторичных нейтронов, которые в большом количестве производятся заряженными частицам ГКЛ и СПС в верхнем слое поверхности небесного тела и во всех элементах конструкции космического аппарата. Вклад нейтронной компоненты по различным оценкам может составлять значимые 30 - 40% от общей радиационной дозы в условиях спокойного солнца, а в случае мощных СПС значительно превысить разрешенные пределы, установленные для космонавтов.

5. Конкретная решаемая в работе задача и ее значение

В предложенном цикле работ рассмотрены различные случаи, когда нейтронная компонента радиационного фона на поверхности Луны и Марса может достигать своих

максимальных значений и изучены факторы, которые могут повлиять на ее величину. Были решены следующие основные задачи:

- (1) Построена глобальная карта распределения нейтронной компоненты радиационного фона Марса в условиях спокойного Солнца, когда основным источником вторичных нейтронов являются заряженные частицы ГКЛ. В качестве источника региональной переменности рассмотреть вариации содержания подповерхностной воды (из данных прибора ФРЕНД/ КА ЕКА «ТГО») и изменения толщины марсианской атмосферы (из глобальной климатической модели), а также влияние сезонной переменности толщины атмосферы.
- (2) Отдельно рассмотрены районы на Марсе, которые были предложены марсианским научным сообществом в качестве кандидатов на возможные места посадок пилотируемых экспедиций. В своём выборе сообщество учитывало инженерные требования и научные задачи, но не учитывало параметры радиационного фона на поверхности Марса.
- (3) Благодаря данным прямых измерений 20 мая 2024 года, когда до Марса долетели протоны от очень мощной солнечной вспышки, на основе данных российских приборов ХЕНД на орбитальном аппарате НАСА «Одиссей» и ДАН на борту марсохода НАСА «Куриосити» удалось измерить возрастание нейтронного фона на орбите и на поверхности Марса и таким образом экспериментально верифицировать результаты выполненного в данной работе численного моделирования.
- (4) На основе выполненного в данной работе численного моделирования были рассмотрены случаи значительного возрастания нейтронной компоненты радиационного фона от исторических наиболее мощных СПС на Марсе. Для долгосрочной перспективы полученные данные определяют требования к радиационной защите обитаемых станций на «красной» планете.
- (5) Также методом численного моделирования была выполнена оценка нейтронной компоненты радиационного фона по поверхности Луны для условий исторического Солнечного протонного события Кэррингтона с учетом массовой доли воды в веществе реголита лунных полярных районов (по данным российского прибора ЛЕНД на борту орбитального аппарата НАСА «ЛРО»). Показано, что районы размещения посещаемой лунной станции целесообразно выбирать с учетом данных о массовой доле водяного льда в полярном реголите.

6. Используемый подход, его новизна и оригинальность

В качестве методов решения поставленных задач применялось сквозное численное моделирование нейтронного потока на орбите и поверхности Луны и Марса и сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными в российских экспериментах ДАН на марсоходе НАСА «Куриосити», ХЕНД на орбитальном аппарате НАСА «Марс Одиссей» и ФРЕНД на орбитальном аппарате ЕКА «ТГО» для Марса и ЛЕНД на орбитальном аппарате НАСА «ЛРО» для Луны. Для оценки нейтронной компоненты дозы спектральная плотность нейтронного потока сворачивалась с коэффициентами конверсии, оценёнными по протоколам международной комиссии по радиационной защите.

Совместный анализ численных расчетов и экспериментальных данных позволил получить новые верифицированные оценки нейтронного фона на Марсе и учесть зависимость от различных факторов, включая распределение воды, толщину атмосферы, её сезонную переменность, а также проверить как меняется доза в условиях мощных солнечных событий. Впервые указано как из множества предложенных кандидатов на места посадки пилотируемых экспедиций отобрать те, где нейтронный фон минимален. Также впервые проведены оценки нейтронного фона на Марсе в условиях экстремально мощных солнечных событий.

Для Луны особое внимание в численном моделировании было уделено полярным районам, в грунте которых может присутствовать значительное количество водяного льда. Учитывая перспективные планы космических агентств по созданию на полюсах посещаемых лунных станций, была детально изучена значительная переменность нейтронной компоненты радиационного фона на поверхности полярных районов с учетом массовой доли водяного льда в верхнем слое. Оценки были выполнены для условий мощного исторического события СПС Кэррингтона.

7. Полученные результаты и их значимость

К наиболее важным результатам следует отнести:

- (1) Построена глобальная карта распределения нейтронной компоненты радиационного фона в условиях спокойного Солнца, на основе которой составлена таблица доз для кандидатов на возможные места посадок пилотируемых экспедиций. Показано, что в максимуме потока ГКЛ мощность нейтронной дозы может составлять от 85 до 145 мкЗв/сут в зависимости от выбранного места посадки. Существенное влияние на величину дозы оказывает наличие подповерхностной воды (изменение дозы на 25%) и толщина атмосферы (изменение дозы на 15%). Влияние сезонных вариаций атмосферы составляет не более 4-6%.
- (2) Установлено, что с точки зрения нейтронного фона наиболее безопасными местами являются области с высоким содержанием воды, находящиеся на высокогорье (небольшая толщина атмосферного столба).
- (3) Для СПС от 20 мая 2024 года оценена суммарная нейтронная доза, которую бы получились космонавты, находясь на поверхности Марса. Она составила 600 мкЗв, что эквивалентно 11 дням пребывания на поверхности Марса в условиях спокойного солнца.
- (4) Полученные результаты были масштабированы на более мощные солнечные события известные из земной истории. Так для события Кэррингтона, одного из самых мощных СПС, для Марса была предсказана нейтронная доза в 240 мЗв, что сопоставимо с годовой дозой, разрешенной для космонавтов. Для районов на лунных полюсах такое событие привело бы к регистрации полной дозы от нейтронов на уровне 40 мЗв. Существенно более высокое значение нейтронной компоненты дозы на Марсе связано с наличием у планеты атмосферы, которая рассеивая вышедшие из грунта нейтроны, многократно отражает их обратно в сторону грунта.

Важность полученных результатов заключается в комплексной оценке рисков нейтронной компоненты радиационного фона на Луне и на Марса, основанной на рассмотрении различных предельных случаев (максимум потока ГКЛ и очень мощные СПС), а также учета различных факторов, особенно важных для Марса (возможное высокое содержание подповерхностной воды, значительная сезонная переменность атмосферы), которые могут существенно повлиять на величину дозы.