

Образование радиоактивных изотопов при космических полетах с использованием двигателей малой тяги

К.Р. Рахимчанова^{1*} А.Н. Турундаевский^{2†}

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики космоса
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобелева
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 09.06.2024; подписана в печать 10.07.2024)

В настоящее время ведутся разработки космических аппаратов с электрореактивными двигателями малой тяги. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными ракетными системами, в том числе аппараты с такими двигателями могут доставлять большие объемы грузов к Луне с меньшими затратами. Однако при этом время полета оказывается существенно больше (300 суток и больше), что приводит к длительному (по сравнению с гомановской траекторией) облучению груза как частями радиационных поясов, так и галактическими, и солнечными космическими лучами. При взаимодействии протонов и ядер высоких энергий с ядрами вещества полезной нагрузки возможна фрагментация с образованием радиоактивных изотопов. В случае создания обитаемых станций на поверхности Луны или на окололунной орбите, значительную часть груза составят продукты питания. Возникает вопрос, не приведет ли облучение компонентами космических лучей к накоплению значительного количества опасных для жизни радиоактивных изотопов в этих продуктах. В данной работе было произведено моделирование взаимодействия потоков протонов космических лучей на траектории полета космического аппарата с двигателем малой тяги с веществом мишени (в качестве которого было выбрано мясо). В результате было получено, что уровни наведенной радиоактивности на основе сравнения с предельно допустимыми нормами содержания радионуклидов в продуктах незначительны. Данный результат является важным для будущих исследований Луны.

PACS: 94.20.wq, 25.40.Er

УДК: 524.1-352, 539.17

Ключевые слова: космические лучи, ядерная фрагментация, радиоактивные изотопы, продукты питания, двигатели малой тяги.

ВВЕДЕНИЕ

Идея использования двигателей малой тяги при космических полетах развивается много лет [1–3]. Такой двигатель имеет ряд преимуществ по сравнению с жидкостными реактивными двигателями: он работает в течение длительного времени, обладает меньшим расходом рабочего тела и позволяет перевозить большие массы полезной нагрузки.

Возможно создание многоразового межорбитального буксира, который может обеспечить эффективную доставку грузов с низкой околоземной орбиты на окололунную. Это дает значительное преимущество перед традиционными ракетными системами, которые требуют больших затрат для достижения такой орбиты.

Ранее уже велись работы над подобным проектом - ядерным межорбитальным буксиром «Геркулес» [2], — но на данный момент они прекращены. Сейчас ведутся работы по программе «Зевс» [3].

У подобного перелета существуют свои недостатки. Главный из них заключается в том, что использование двигателя малой тяги приводит к длительному

(по сравнению с гомановской траекторией) пребыванию в пределах радиационных поясов. Ранее уже была произведена количественная оценка доз радиации при перелете с низкой околоземной орбиты к Луне [4]. Выяснилось, что полученные дозы на 3 порядка выше, чем на орбите МКС за год полета.

Уже существуют проекты (например, Van Allen Probes [5]), которые доказали возможность создания аппаратуры, работающей при подобной радиационной нагрузке.

Кроме того, сейчас существуют проекты по созданию лунных и окололунных обитаемых станций. Одним из примеров такого проекта является «Лунная орбитальная платформа-шлюз», или «LOP-G» («Lunar Orbital Platform-Gateway») [6]. Данная программа, возглавляемая НАСА, находится в активной разработке, и уже в 2027 г. предполагается запуск космического корабля «Орион» с экипажем, миссией которых будет являться сбор станции «Gateway».

В случае возникновения подобных обитаемых станций на поверхности Луны или на окололунной орбите, значительную часть груза составят продукты питания.

Возникает вопрос, не приведет ли облучение различными компонентами космических лучей при длительном полете к накоплению значительного количества опасных для жизни радиоактивных изотопов в этих продуктах. Проверка данного факта может существен-

* rakhimchanova.kr20@physics.msu.ru

† turun1966@yandex.ru

но повлиять на затраты будущих исследований Луны.

Данная проблема встала относительно недавно. В открытом доступе не было опубликовано работ с подобными расчетами. Для решения поставленной задачи предлагается рассчитать потоки частиц космических лучей на траектории перелета к Луне, включая частицы от радиационных поясов Земли, галактических и солнечных космических лучей. После чего произвести моделирование их взаимодействия с веществом мишени (в данном случае с продуктами питания).

1. ТРАЕКТОРИЯ

Для того чтобы произвести оценку наведенной радиоактивности в продуктах питания, в первую очередь необходимо описать траекторию перелета космического аппарата к Луне. Упрощенный баллистический расчет приведен в статье [4]. Он проводился в соответствии с работой О. Л. Стариновой [7].

Начальные условия и характеристики электрореактивного двигателя для поставленной задачи определялись, опираясь на информацию из открытых источников. В частности, использовались доступные данные по проектам «Геркулес» [2] и «Зевс» [3].

Предполагалось, что начальная круговая орбита находится на высоте 800 км и имеет наклонение 51.6° . Время полета — 300 суток, тяга двигателя — 6.5 Н. В качестве рабочего тела рассматривался ксенон, скорость истечения которого принималась равной 45 км/с.

Нужно отметить, что космический аппарат с двигателями малой тяги действительно будет двигаться по спиральной траектории. При этом, согласно расчетам, он несколько месяцев будет находиться в пределах радиационных поясов.

2. РАСЧЕТ СПЕКТРОВ

Для расчета потоков частиц использовалась программное обеспечение COSRAD [8]. Оно позволяет произвести расчет энергетических спектров частиц на околоземной орбите в разные моменты солнечного цикла.

В качестве основной части радиационного фона рассматривались протоны радиационных поясов Земли, а также из потоков галактических и солнечных космических лучей. Рассмотрение только протонов обусловлено тем, что сечения фрагментации ядра мишени определяются энергией на нуклон и, соответственно, целесообразно использовать шкалу энергий на нуклон. В таком случае основной компонентой радиационного фона будут являться протоны.

Расчет проводился для максимума и минимума солнечной активности. Вероятность солнечного события принималась равной 0.1.

Для описания полученной спиральной траектории был наигран банк данных для виртуальных круговых орбит. После чего проводилась интерполяция по рассчитанной траектории с учетом времени пребывания космического аппарата на различных расстояниях от Земли.

По результатам были получены необходимые спектры протонов для минимума и максимума солнечной активности (рис. 1) Для большей наглядности потоки протонов были умножены на энергию в степени 2.5. В последствии они будут использованы при моделировании взаимодействия с продуктами питания.

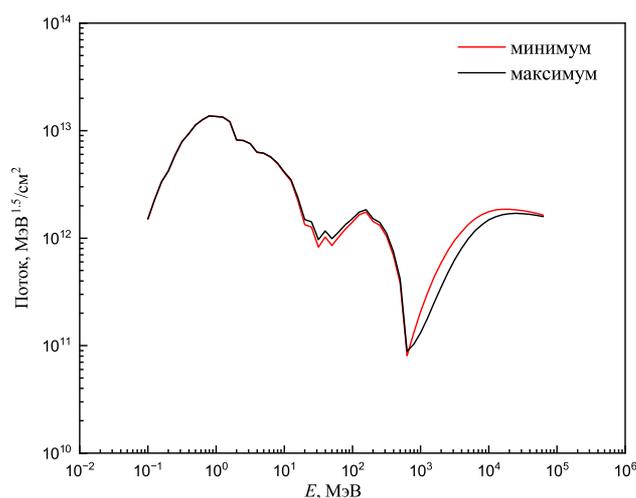


Рис. 1. Суммарные спектры протонов (домноженные на энергию $E^{2.5}$) за все время перелета к Луне при помощи двигателя малой тяги (6.5 Н) для минимума и максимума солнечной активности

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Следующий этап посвящен моделированию взаимодействия полученных потоков протонов с продуктами питания. Для выполнения этой задачи использовался программный комплекс GEANT4 [9–11]. Данное программное обеспечение использует метод Монте-Карло для моделирования прохождения частиц через вещество.

GEANT4 позволяет моделировать множество различных физических процессов. В частности, для выполнения поставленной задачи была выбрана физическая модель, рекомендуемая для моделирования в области физики космоса — QBVC [12]. Она позволяет производить адрон-ядерные взаимодействия в очень широком диапазоне энергий: от 0 до 100 ТэВ. В том числе с помощью QBVC можно моделировать необходимую в данной работе фрагментацию ядер мишени.

3.1. Геометрия и состав мишени

Помимо всего прочего, в GEANT4 есть возможность детального определения геометрии и химического состава системы, с которой будет взаимодействовать поток протонов.

Так как в роли полезной нагрузки выступают продукты питания, в качестве мишени рассматривалась консервная банка с мясом. Из-за того, что производились оценки в нулевом приближении, рассматривался наихудший вариант, и защитой для мяса выступали только стенки банки.

Конструкция представляет из себя два слоя: тонкая защита толщиной 0.1 мм и непосредственно сама мишень толщиной 5 см. Между этими двумя слоями есть небольшой зазор толщиной 5 мм.

Материал защиты — алюминий, определенный в GEANT4 как G4_Al с плотностью 2.699 г/см³. Материал пространства — подобие вакуума, определяемый в GEANT4 как G4_Galactic.

Материал мишени в свою очередь задавался вручную поэлементно при помощи классов G4Element (для задачи химических элементов) и G4Material (для объединения химических элементов в один материал). Названный материал «мясо» имеет плотность 990 г/см³ и элементарный состав, представленный в табл. 1 [13, 14].

Таблица 1. Поэлементный состав мишени («мясо»)

Химический элемент	Процент от общей массы, %	Химический элемент	Процент от общей массы, %
O	65.0	K	0.4
C	18.5	S	0.3
H	9.5	Cl	0.2
N	3.2	Na	0.2
Ca	1.6	Mg	0.1
P	1.0		

3.2. Предварительное моделирование

Перед тем как смоделировать взаимодействие пучков протонов разных энергий с веществом мишени, было проведено предварительное моделирование.

На построенную конструкцию запускался монопучок из 10000 протонов с энергиями 300 ГэВ. В процессе бомбардировки протонами происходит фрагментация ядер мишени с образованием различных изотопов, в том числе и радиоактивных. Основной вклад будут вносить радиоизотопы с временем жизни сравнимым с временем полета, так как короткоживущие просто не доживут до конца полета, а долгоживущие дадут ма-

ленькую активность. По результатам взаимодействия программа выдала список вторичных ядер, образовавшихся при фрагментации ядер мишени, и их количество. На основе полученных данных была произведена сортировка и были выделены радиоактивные ядра с учетом их времени жизни. Результаты представлены в табл. 2. Помимо этого, был произведен расчет того, сколько ядер каждого изотопа останется после 300 суток полета и сколько распадов в секунду будет происходить, а также приведена информация об энергиях распада ядер и средней энергии распадов в секунду [15–17].

Как можно заметить из полученных данных основным радионуклидом, образующимся в продуктах питания при перелете с низкой околоземной орбиты на окололунную, является тритий.

Нужно отметить, что некоторые изотопы (а именно: Be⁷, C¹¹, O¹⁴, O¹⁵) дают число распадов в секунду (после 300 суток полета) больше, чем тритий. Однако распад этих ядер проходит через захват электрона. При этом процессе основная часть энергии распада уносится нейтрино. Поэтому на радиоактивность образца эти изотопы не влияют.

Таким образом по результатам предварительного моделирования было принято решение о том, что при дальнейшем моделировании имеет смысл учитывать вклад только от трития. Однако для чистоты эксперимента так же были рассмотрены изотопы Be¹⁰ и C¹⁴.

3.3. Результаты моделирования

Следующим шагом было проведено моделирование взаимодействия пучков протонов разных энергий с веществом мишени. Число протонов в пучке составило 100000 частиц. Моделирование проводилось в диапазоне энергий от 10 МэВ до 300 ГэВ, а также при различных углах падения пучка на поверхность мишени ($\cos\theta$ от 0.0 до 1.0, где θ — угол между пучком протонов и мишенью).

По его результатам были получены зависимости относительного числа образовавшегося в мишени трития от энергии пучка протонов (рис. 2). Прослеживается возрастание числа образовавшегося трития (в рамках статистических погрешностей) при возрастании энергии пучка протонов.

Далее полученные данные были интерполированы по ранее рассчитанным спектрам протонов, а также была произведена нормировка полученного числа изотопов на массу мишени с учетом ее плотности и толщины. Для удобства проведения дальнейшего сравнения с нормами содержания радионуклидов в продуктах полученные значения были переведены в единицы Бк/кг. Результаты были занесены в табл. 3.

Как видно из полученных данных наведенная радиоактивность от изотопов Be¹⁰ и C¹⁴ является незначительной по сравнению с вкладом от изотопа водорода — разница составляет 3 порядка минимум.

Таблица 2. Результаты предварительного моделирования

Изотоп	Время жизни, с	N , кол-во	N после 300 дней, кол-во	Количество распадов в секунду	Энергия распада ядра, эВ	Энергия распадов в секунду, эВ
Be ⁷	6.6×10^6	11	2.75	4.17×10^{-7}	захват	захват
Be ¹⁰	6.9×10^{13}	4	4	1.45×10^{-14}	5.56×10^5	7.98×10^{-9}
C ¹⁴	2.6×10^{11}	3	3	1.15×10^{-11}	1.56×10^5	1.89×10^{-6}
Ar ³⁷	4.4×10^6	1	1	2.27×10^{-7}	захват	захват
H ³	5.6×10^8	163	159	2.84×10^{-7}	1.86×10^4	5.29×10^{-3}
O ¹⁵	176.4	20	1.36×10^{-4}	7.72×10^{-7}	захват	захват
C ¹¹	1762.7	12	8.17×10^{-4}	4.63×10^{-7}	захват	захват
O ¹⁴	101.9	8	3.15×10^{-5}	3.09×10^{-7}	захват	захват

Таблица 3. Результаты моделирования

Солнечная активность	Минимум		Максимум		
	Изотоп	Активность, Бк/кг	Энергия распадов, эВ/(кг·с)	Активность, Бк/кг	Энергия распадов, эВ/(кг·с)
	H ³	4.64×10^{-1}	8.54×10^3	4.74×10^{-1}	8.72×10^3
	Be ¹⁰	3.29×10^{-7}	0.183	3.41×10^{-7}	0.189
	C ¹⁴	3.97×10^{-4}	62.0	4.17×10^{-4}	64.8

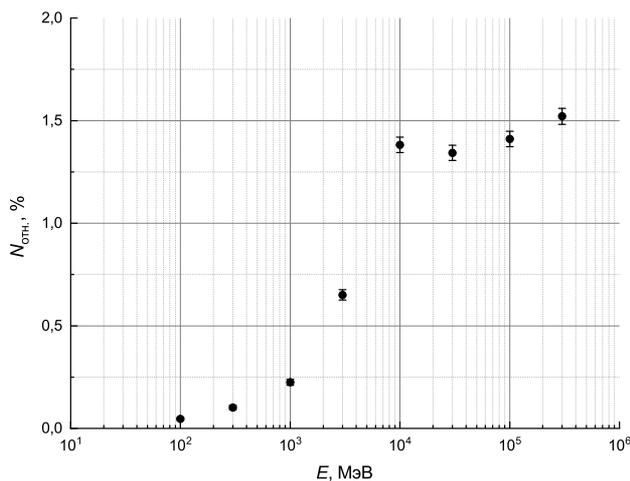


Рис. 2. Относительное число образовавшегося в мишени трития при вертикальном падении пучка, состоящего из 100000 протонов, в зависимости от его энергии

Согласно СанПиН-96 [18] предельно допустимая норма содержания радионуклидов в мясе не должна превышать значения 100 Бк/кг. Нужно отметить, что данное значение приведено конкретно для стронция-

90 (стандартов для трития не существует). Однако из-за того, что энергия распада ядра стронция во много раз превышает энергию распада трития, предельно допустимая норма содержания трития в мясе будет еще больше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам данной работы был выполнен расчет уровня наведенной радиоактивности при перелете с низкой околоземной орбиты к Луне с помощью двигателей малой тяги. Он является незначительным — на три порядка ниже норм СанПиН. Таким образом можно утверждать, что накопление радионуклидов в продуктах за время полета к Луне не представляет опасности для людей.

Более того радиационная угроза от активности радионуклидов является несущественной в сравнении с угрозой химических изменений, вызванных радиацией [4]. Из-за чего можно предложить в качестве защитного экрана от космической радиации для продуктов питания использовать баки с водой, так как в воде не содержится органика, соответственно не происходит химических изменений, а опасность от радиоизотопов, как оказалось, не велика.

[1] Афанасьев И.Б. // Русский космос. № 4. 10 (2022).

[2] Синявский В.В. // Космическая техника и технологии.

№ 3. 25 (2013).

[3] Горюнов Д.А. // Космонавтика и ракетостроение. № 2.

- 125 (2013).
- [4] *Turundaevskiy A.N., Nikolaeva N.I., Panov A.D. et al.* // *Cosmic Research*. **62**, N 4. 371 (2024).
- [5] Van Allen Probes / National Aeronautics and Space Administration. 2012. URL: <https://science.nasa.gov/mission/van-allen-probes/> (дата обр. 07.06.2024).
- [6] Gateway: NASA's Lunar Outpost / National Aeronautics and Space Administration. 2022. URL: <https://www.nasa.gov/gateway-capabilities/> (дата обр. 07.06.2024).
- [7] *Старинова О.Л.* Расчет межпланетных перелетов космических аппаратов с малой тягой. СИЦ РАН, 2007. 43-45.
- [8] *Кузнецов Н.В., Николаева Н.И., Ныммик Р.А.* и др. // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*. № 2. 72 (2011).
- [9] *Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al.* // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*. **835**. 186 (2016).
- [10] *Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al.* // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. **53**, N 1. 270 (2006).
- [11] *Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al.* // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*. **506**, N 3. 250 (2003).
- [12] *Ivantchenko A.V., Ivanchenko V.N., Molina J.M.Q., Incerti S.L.* // *International Journal of Radiation Biology*. **88**. 171 (2011).
- [13] *Nielsen F.H.* Ultratrace minerals: Modern nutrition in health and disease. Baltimore: Williams Wilkins, 1999. P. 283-303.
- [14] *Chang R.* Chemistry. 9th ed. McGraw Hill Higher Education, 2007. P. 52-53.
- [15] *Kinsey R.R., Charles L., Jagdish K.Tuli, Burrows T.* The NUDAT/PCNUDAT program for nuclear data. 1996. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:61071330>.
- [16] *Audi G., Wapstra A.* // *Nuclear Physics A*. **595**, N 4. 409 (1995).
- [17] Nuclear Data Center at KAERI / Korea Atomic Energy Research Institute. 2023. <https://atom.kaeri.re.kr/> (дата обр. 07.06.2024).
- [18] Санитарные правила и нормы СанПиН 2.3.2.560-96 «Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов». Официальное издание Госкомсанэпиднадзор России. М., 1997. <https://docs.cntd.ru/document/9052436> (дата обр. 07.06.2024).

The formation of radioactive isotopes during space flights using low-thrust engines

K.R. Rakhimchanova^{1,a}, A.N. Turundaevskiy^{2,b}

¹*Department of Space Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^arakhimchanova.kr20@physics.msu.ru, ^bturun1966@yandex.ru

Currently, the development of spacecraft with low-thrust electric propulsion systems is underway. These systems have several advantages over traditional rocket systems, such as the ability to deliver larger payload to the Moon at a lower cost. However, flight times are significantly longer (300 days or more), leading to prolonged (compared to the Hohmann transfer orbit) exposure of the payload to radiation belts particles, galactic and solar cosmic rays. During the interaction of high-energy protons and nuclei with the nuclei of the payload material, fragmentation and formation of radioactive isotopes are possible. In the case of creating habitable stations on the lunar surface or in lunar orbit, a significant part of the payload will consist of food products. The question then arises as to whether cosmic radiation will lead to accumulation of dangerous amounts of radioactive isotope in these products that could be harmful to life. In this work, the interaction of cosmic ray proton fluxes along the trajectory of a spacecraft with low-thrust engines with target material (meat has been chosen as the target) has been simulated. As a result, it has been found that the level of induced radioactivity based on a comparison with maximum permissible limits of radionuclides in food products is insignificant. This result is important for future lunar exploration.

PACS: 94.20.wq, 25.40.Ep

Keywords: cosmic rays, nuclear fragmentation, radioactive isotopes, food, low-thrust engines.

Received 09 June 2024.

Сведения об авторах

1. Рахимчанова Карина Ринатовна — студент 4 курса; e-mail: rakhimchanova.kr20@physics.msu.ru.
2. Турундаевский Андрей Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: turun1966@yandex.ru.