

УДК 621.039+629.78

**ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ НА ОБЛИК
КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ В БУДУЩЕМ**А.В. Фалеев, Л.М. Королев, В.Г. Сорокин, В.В. Самарин,
Е.В. Попова, Л.А. Умнова

А.В. Фалеев; докт. психол. наук, проф. Л.М. Королев;
канд. воен. наук, доц. В.Г. Сорокин; канд. техн. наук В.В. Самарин,
канд. пед. наук Е.В. Попова, Л.А. Умнова
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье рассматривается влияние радиации на экипаж и пилотируемый космический аппарат при полетах в космос. Представлены данные об основных источниках радиационного воздействия на космонавтов в космосе. Представлены особенности действия радиации на Луне и на Марсе.

Ключевые слова: радиация, защитный композит, галактические космические лучи, радиационные пояса Земли, солнечные космические лучи

**The Influence of Cosmic Radiation on the Appearance of Space
Flights in the Future. A.V. Faleev, L.M. Korolev, V.G. Sorokin,
V.V. Samarin, E.V. Popova, L.A. Umnova**

The article examines the effect of radiation on the crew and manned spacecraft during space flights. Data on the main sources of radiation exposure to astronauts in space are presented. The features of the action of radiation on the Moon and on Mars are presented.

Keywords: radiation, protective composite, galactic cosmic rays, radiation belts of the Earth, solar cosmic rays

Цель статьи состоит в том, чтобы проанализировать влияние космической радиации на экипаж и пилотируемый космический аппарат (ПКА) при осуществлении пилотируемых полетов к Луне и Марсу.

Космический полет протекает в необычной и непривычной для человека среде. В процессе его выполнения на экипаж ПКА воздействуют многочисленные неблагоприятные факторы: первые из них порождаются самой космической средой (радиация, микрометеориты, температура и космический вакуум); вторые – обусловлены динамикой полета (невесомость, перегрузки, шумы и вибрации, воздействие циркадианных и нециркадианных десинхронизаторов биоритмов); третьи – проявляются как следствие пребывания человека в замкнутой, изолированной среде ограниченного объема (ограниченные запасы воды и пищи, повышенная опасность заболеваний, психологическая несовместимость членов экипажа и др.) [1].

Радиационная обстановка на орбите с наклоном 96,9° более опасна для экипажа ПКА, чем радиационная обстановка на орбите Международной

космической станции (МКС) с наклоном $51,6^\circ$. Связано это с тем, что основной защитой Земли и объектов на низкой околоземной орбите является магнитное поле Земли.

Вклад радиационных поясов Земли (РПЗ) в величину общей поглощенной дозы для околоземной орбиты преобладает над вкладом от потоков частиц галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ). Внутри ПКА доза определяется протонами РПЗ.

В условиях длительного космического полета вне магнитного поля Земли экипаж оказывается наедине в основном с космической радиацией. Тяжелые заряженные частицы могут вызывать нарушения ДНК, также недостаточно изучена проблема воздействия малых доз радиации на биологические структуры.

В таблице представлены степени тяжести первичной лучевой реакции (ПЛР) на организм человека [3].

Влияние ПЛР на работоспособность космонавта

Доза, Зв	Степень ПЛР	Характерные проявления	Работоспособность
0,25–1	1	Слабовыраженные симптомы: слабость, головная боль, снижение аппетита, легкое головокружение	Не нарушена
1–1,5	2	Общая слабость, стойкая тошнота (может сопровождаться однократной рвотой), выраженное снижение аппетита, головная боль, головокружение, нарушение сна	Заметно снижена
1,5–2,5	3	Комплекс симптомов, включающий сильную общую слабость, отсутствие аппетита, резкую тошноту, многократную рвоту, апатию, выраженное извращение вкуса и обоняния, резкое головокружение, сильную головную боль, бессонницу	Выраженное снижение работоспособности в первые двое суток после облучения
Более 2,5	4	Комплекс симптомов при третьей степени и дополнительно развиваются понос, озноб, судороги	Невозможность осуществления какой-либо деятельности

Солнце является источником электромагнитного и корпускулярного излучений в широком энергетическом диапазоне, представляющих собой частицы, ускоренные при солнечной вспышке: протоны, электроны, альфа-частицы и более тяжелые ядра.

На сегодняшний день нет эффективного способа избежать радиации в космосе. Даже с использованием передовых технологий ПКА не может обеспечить надежную защиту от радиации во время длительных полетов вне РПЗ. Например, во время миссии на Марс экипаж может быть облучен радиацией в несколько раз выше, чем на околоземной орбите, что может привести к серьезным последствиям для здоровья.

С учетом неоднородности дозового поля на космической станции и необходимости определять суммарную дозу, полученную за весь полет, для каждого космонавта предусмотрен индивидуальный дозиметр, который необходимо в течение всего полета носить при себе.

За год полета на МКС космонавт получает дозу (200 мЗв/год) примерно в 10 раз превышающую нормы радиационной безопасности для работника атомной промышленности (в среднем 20 мЗв/год), что все же допустимо, поскольку современные российские нормативы лимитируют дозу на кровяные органы космонавтов в размере 500 мЗв/год [2].

Предел дозы для космонавтов в 1 Зв был установлен в России, чтобы ожидаемое сокращение продолжительности жизни космонавтов не превышало 3 лет. Чтобы свести к минимуму общую дозу за полет, продолжительность полета должна быть короче или защита ПКА должна быть более эффективной.

В России был разработан полимерный композиционный радиационно-защитный материал для биологической защиты космонавтов в обитаемых гермоотсеках российского сегмента МКС, который был испытан в космосе в течение 226 суток [4].

17 февраля 2022 г. в конце экспедиции МКС-66 транспортным грузовым кораблем «Прогресс МС-19» на борт российского сегмента МКС были доставлены два образца научной аппаратуры (НА) «Композит защитный» и установлены в каюте космонавтов в служебном модуле (СМ) над и под иллюминатором (рис. 1) [4].



Рис. 1. Расположение двух образцов НА «Композит защитный» в СМ РС МКС (фото с сайта Госкорпорации «Роскосмос»)

Контейнеры имеют цилиндрическую форму с двумя выводами для размещения и извлечения детекторов во время полета; масса каждого контейнера 2 кг, толщина стенки контейнера 1 см, плотность материала 4 г/см². Контейнеры были размещены на стене кабины экипажа СМ левого борта. Пассивные детекторы, а именно TLD и SSTD, расположены внутри и снаружи контейнеров для измерения экранирующего эффекта композитного материала. Данные с пассивных детекторов получены после их возвращения на Землю в феврале 2023 г.

В период экспедиции МКС-67 целевую работу «Защитный композит» выполнял космонавт С. Корсаков (рис. 2). После нахождения в космических условиях в течение 226 суток один из контейнеров в сентябре 2022 г. был спущен на Землю и 7 октября 2022 г. был доставлен в БГТУ имени В.Г. Шухова (г. Белгород, Россия) для исследования физико-технических характеристик композита после воздействия космических условий [4].



Рис. 2. Космонавт С. Корсаков выполняет ЦР «Защитный композит»
(фото с сайта Госкорпорации «Роскосмос»)

Результаты, полученные на последних сеансах, демонстрируют высокие экранирующие свойства композитного материала, так как поглощенная доза внутри контейнеров на 30–60 % ниже, чем снаружи на стенке кабины экипажа [4].

Проведенный ежемесячный дозиметрический контроль датчиками «Пилле-МКС» двух защитных контейнеров, сделанных из композита, свидетельствует о высоких и стабильных радиационно-защитных характеристиках материала. Кратность ослабления космического ионизирующего излучения с толщиной стенки экрана 10 мм находилась в пределах 1,38 для контейнера № 1 (линейный коэффициент ослабления 0,322 см⁻¹, массовый коэффициент ослабления 0,079 г/см²). Аналогичные показатели для контейнера № 2: кратность ослабления космического ионизирующего излучения с толщиной стенки экрана 10 мм находилась в пределах 2,10 (линейный коэффициент ослабления 0,756 см⁻¹, массовый коэффициент ослабления 0,187 г/см²) [4].

Окончательные выводы по работоспособности разработанного полимерного композиционного материала в космических условиях будут сделаны при аналогичных испытаниях контейнера № 2 после экспонирования на российском сегменте МКС в течение 2 лет [4].

Эксперимент «Матрешка-Р», который уже несколько лет проводится на РС МКС, изучает влияние радиации на внутренние органы космонавта. В эксперименте используется шарообразный фантом человека.

Многолетние исследования показали, что разные органы получают неодинаковые дозы радиации во время полета. Это зависит от того, насколько глубоко расположен соответствующий орган. Для снижения доз радиации при годовом полете для дополнительной защиты от космической радиации рекомендовано применение изделия «Шторка защитная», которое состоит из пропитанных водой гигиенических салфеток и полотенец, размещаемых внутри изделия в каюте космонавта СМ (рис. 3).

Экспериментальные данные подтверждают защитный эффект – доза для космонавта в каюте при наличии изделия «Шторка защитная» уменьшается на 20–30 % и более, что дает ощутимый эффект по снижению доз за всю экспедицию [5].



Рис. 3. Космонавт О. Артемьев выполняет сборку изделия «Шторка защитная» (фото с сайта Госкорпорации «Роскосмос»)

Радиация на Луне и на Марсе

За пределами РПЗ, где большую часть времени проходит полет ПКА лунной миссии, существует два вида космической радиации: потоки ГКЛ и СКЛ. Состав этих космических лучей примерно одинаковый – протоны, альфа-частицы и тяжелые ядра. Солнечных заряженных частиц больше, но их энергия ниже, и это определяет разницу в средствах защиты.

Радиация на поверхности Луны более жесткая, чем, например, на Марсе. По данным, полученным с марсохода «Кьюриосити», радиация на поверхности Марса составляет в среднем 0,7 мЗв/сут. Это сопоставимо со среднесуточной дозой на МКС 0,3–0,8 мЗв/сут. На Луне доза может вдвое превышать

уровень, зафиксированный на Марсе. Это связано с несколькими факторами: во-первых, Луна ближе к Солнцу, чем Марс, и доза от солнечных энергичных частиц на поверхности Луны с учетом разницы расстояния от Солнца в два-три раза больше, чем на Марсе; во-вторых, на Марсе в отличие от Луны все же есть разреженная атмосфера плотностью около 20 г/см^2 , которая ослабляет как галактическую, так и солнечную радиацию.

Магнитное поле Марса в 10 000 раз слабее магнитного поля Земли, поэтому у Марса нет магнитосферы и радиационных поясов. Радиационные условия на Марсе, как и на Луне, определяются с учетом воздействия частиц ГКЛ СКЛ на грунт, в результате образуется значительное количество нейтронов, которые могут усиливать радиационные потоки на поверхности.

Если среднесуточная доза на Луне составляет примерно 1,4 мЗв, то за полгода уровень радиации достигнет 250 мЗв. Столько же получают члены экипажа на МКС в течение годового полета. Однако необходимо иметь укрытие, например, естественные лунные пещеры или надувные лунные модули, покрытые сверху реголитом, в котором обитатели лунной базы смогли бы переждать солнечные протонные события (СПС) [3].

Характерной особенностью рентгеновского излучения является очень короткая длина волны, что позволяет этому виду электромагнитных волн нести большую энергию и придает ему высокую проникающую способность. В отличие от света, рентгеновские лучи способны проникать сквозь тело космонавта.

Во время прохождения через организм космонавта рентгеновские лучи «разбивают» сложные молекулы и атомы ДНК на заряженные частицы и активные молекулы.

В отличие от солнечного ветра, опасность которого можно предупредить за несколько часов, рентгеновское излучение распространяется со скоростью света. Заблаговременно предупредить об их «приближении» физически невозможно. По этой причине рентгеновские лучи могут представлять собой неожиданную и серьезную угрозу для космонавта на Луне.

Как и в случае других видов радиации, опасным считается только рентгеновское излучение определенной интенсивности, которое воздействует на организм космонавта в течение достаточно долгого промежутка времени.

Зная интенсивность рентгеновского излучения и длину волны, мы можем произвести расчет дозы радиации, которую получает экипаж, в зависимости от защитных экранов, корпуса лунного модуля или скафандра.

Интенсивность рентгеновского излучения I_0 , в околослунном пространстве, проходя через слой материала толщиной x и плотностью ρ , ослабевает по экспоненциальному закону [8]:

$$I = I_0 \exp \left[-\mu \left(\frac{x}{\rho} \right) \right],$$

где μ – массовый коэффициент ослабления рентгеновского излучения $\text{см}^2/\text{г}$;

x/ρ – массовая толщина защиты г/см².

Если рассматривают несколько слоев, тогда под экспонентой находятся несколько слагаемых со знаком минус.

Мощность поглощенной дозы радиации от рентгеновского излучения за единицу времени N определяется интенсивностью излучения I и массовым коэффициентом поглощения μ_{EN} [8]:

$$N = I\mu_{EN}.$$

Расчет показывает, что лунный модуль с плотностью защитного материала 1,5 г/см² (или 5,6 мм Al) полностью поглощает мягкое и жесткое рентгеновское излучение Солнца. Для самой мощной вспышки от 4 ноября 2003 г. интенсивность ее рентгеновского излучения в пике составляла $28 \cdot 10^{-4}$ Вт/м² для мягкого излучения и $4 \cdot 10^{-4}$ Вт/м² – для жесткого излучения. За сутки усредненная интенсивность составит, соответственно, 10 и 1,3 Вт/м² сут. Доза радиации для экипажа за сутки равна 8 рад или 0,08 Гр, что безопасно для космонавта [8].

При полете к Марсу с использованием двигательного комплекса, состоящего из модулей большой и малой тяги, включающего жидкостной реактивный двигатель (ЖРД) и ядерно-энергетическую двигательную установку (ЯЭРДУ) на начальной стадии полета, можно значительно сократить время пребывания корабля с экипажем в РПЗ, и продолжительность всей экспедиции заметно сократится до 530–615 суток. При полете с комбинированной схемой двигателей с использованием ЖРД и ЯЭРДУ радиационную опасность для экипажа в основном представляют ГКЛ и СКЛ [7].

Солнечные вспышки опасны, но от них можно защититься. Это известно благодаря автоматической межпланетной станции Rosetta. У нее на борту было два дозиметра: один – на солнечной стороне, второй – на теневой. Когда в зонд прилетела мощная солнечная вспышка, то облучение освещенного прибора значительно возросло, теневой же показал лишь незначительный флуктуации.

Наблюдение за Солнцем позволяет предсказывать наиболее опасные вспышки – СПС – примерно за несколько минут. Их должно хватить, чтобы сориентировать летящий ПКА на Марс «хвостом» к Солнцу и защитить экипаж. Гораздо опаснее мощные вспышки во время выхода в открытый космос.

Чтобы обеспечить безопасный перелет на Марс, нужно соблюсти некоторые условия:

- сократить длительность перелета;
- лететь в период максимума солнечного цикла;
- развернуться двигательным отсеком и топливными баками в сторону

Солнца;

- использовать для защиты от радиации приборы, оборудование и запасы топлива вокруг жилых отсеков.

Измерения доз на трассе полета к Марсу, а потом и на его поверхности, проведенные учеными НАСА в 2012–2013 гг. прибором RAD, позволили уточнить имеющиеся расчетные оценки: на трассе полета доза была 1,8 мЗв/сут, а на поверхности Марса – 0,7 мЗв/сут, и за весь полет – более 1 Зв [6].

И на Луне, и на Марсе необходима автономная система радиационного контроля, работающая оперативно и независимо от наличия связи с Землей. Должны не только фиксироваться полученные космонавтами индивидуальные дозы, но и заблаговременно выдаваться сигналы об опасности – о начале мощной солнечной вспышки, что позволит оперативно уходить в радиационное убежище. Возможно, придется использовать и медицинские препараты – радиопротекторы [6].

Прототип такой автономной системы разработан российскими специалистами и в настоящее время размещен в СМ РС МКС. В российских космических нормативах 1 Зв – это лимит дозы за карьеру космонавта. Но дело в том, что этот лимит установлен без учета возраста и пола и представляет собой некую усредненную оценку для принятия решений о возможности продолжения карьеры на Земле или в космосе. Практически этот лимит недостижим: чтобы приблизиться к нему, на ядерном объекте надо отработать более 50 лет или отлетать на космической станции 5 лет.

Радиационный мониторинг в ходе космических полетов с участием живых систем требует особого методологического подхода для определения биологически значимых характеристик поля излучения, а также учета сложного состава излучения с возможными сильными перепадами дозовых величин. Полученные на МКС результаты об эффективных дозах радиации и апробированные методы снижения радиационного воздействия, наряду с результатами об ожидаемых радиобиологических эффектах космического излучения, могут быть использованы при планировании дальних и длительных космических полетов за пределами магнитосферы Земли [5].

Поскольку приведенные выше значения толщины современных конструкционных материалов недопустимы при дефиците массы в межпланетных полетах, целесообразно продолжать целевую работу по исследованию защитного полимерного композита в космических условиях для биологической защиты космонавтов в обитаемых гермоотсеках РС МКС, а также в перспективе на орбитальной станции РОС.

Многие страны мира развивают свою лунную программу. Например, в 2008 г. Индия запустила к Луне орбитальный аппарат «Чандраян-1», который успешно сбросил зонд на поверхность Луны. В июле 2019 г. на борту космического аппарата «Чандраян-2», запущенного к Луне, уже находились посадочный модуль и луноход, но при прилунении связь с аппаратом была потеряна. «Чандраян-3» в данный момент направляется к Луне, отделение посадочного модуля от станции планируется 17 августа.

Россия не стоит в стороне от исследования Луны. 11 августа 2023 г. с космодрома Восточный «Роскосмос» запустил автоматическую станцию «Луна-25».

Аппаратура, установленная на станции, проведет исследования состояния радиационной обстановки при полете к Луне и на ее поверхности, что позволит безопасно для экипажа и ПКА совершить пилотируемый полет к Луне.

Выводы

1. Лунная и марсианская экспедиции будут осуществляться в условиях опасного влияния космической радиации на экипаж и ПКА. Радиационную опасность в космосе для экипажа ПКА в основном представляют естественные источники космического ионизирующего излучения, которыми являются звезды на разных стадиях развития. Основными источниками радиационной опасности при осуществлении полетов в дальний космос являются ГКЛ, характеризующиеся сложным компонентным составом.

2. Одним из способов биологической защиты экипажа ПКА от радиационной опасности может быть использование полимерного композиционно-радиационно-защитного материала, разработанного в России и испытанного в космосе. Результаты, полученные во время испытаний, демонстрируют высокие экранирующие свойства композитного радиационно-защитного материала. Для получения окончательных выводов по работоспособности разработанного полимерного композиционно-радиационно-защитного материала испытания продолжаются в космических условиях.

3. Исследования, проводящиеся в условиях космического полета, показали, что разные органы космонавтов получают неодинаковые дозы радиации во время полета. Зависит это от того, насколько глубоко расположен соответствующий орган. Для снижения доз радиации и для дополнительной защиты от космической радиации внутренних органов космонавта рекомендовано применение изделия «Шторка защитная».

4. Для лунных и марсианских миссий характерно то, что уровень радиации на поверхности Луны может вдвое превышать уровень радиации на поверхности Марса. Это обстоятельство предполагает необходимость иметь укрытие для экипажа.

5. На Луне и на Марсе необходимы автономные системы радиационного контроля, работающие оперативно и независимо от наличия связи с Землей. Должны не только фиксироваться полученные космонавтами индивидуальные дозы, но и заблаговременно выдаваться сигналы об опасности – о начале мощной солнечной вспышки, что позволит оперативно уходить в радиационное убежище.

6. Для снижения уровня полученного облучения экипажем ПКА необходимо предусмотреть использование медицинских препаратов – радиопротекторов. В ходе выполнения космических полетов необходим радиационный мониторинг с участием живых систем для получения результатов о дозах радиации и разработки апробированных методов снижения радиационного воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Безопасность космических полетов / Г.Т. Береговой, А.А. Тищенко [и др.] – Москва: Машиностроение, 1977. – С. 263.
- [2] Расчет радиационных нагрузок в отсеке космической станции при использовании дополнительной защиты / Д.А. Карташов, Р.В. Толочек, В.А. Шуршаков, Е.Н. Ярманова // Авиакосмическая и экологическая медицина. Научный периодический журнал. – 2013. – Т. 47. – № 6. – С. 61–66.
- [3] Орлов, О.И. Радиационный фактор при лунных миссиях / О.И. Орлов, М.И. Панасюк, В.А. Шуршаков // Авиакосмическая и экологическая медицина. Научный периодический журнал. – 2019. – Т. 53. – № 4.
- [4] Перспективные полимерные материалы для радиационной защиты / В.И. Павленко, Н.И. Черкашина, А.А. Курицын [и др.] // Сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос», Звездный городок, 2021. – С. 40–41.
- [5] Панасюк, М.И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. – Фрязино: Век-2, 2005. – С. 272.
- [6] Самойлов, А.С. Радиационное воздействие в орбитальных и межпланетных космических полетах: мониторинг и защита / А.С. Самойлов, И.Б. Ушаков, В.А. Шуршаков // Экология человека. – 2019. – № 01. – С. 4–9.
- [7] Шафиркин, А.В. Межпланетные и орбитальные космические полеты. Радиационный риск для космонавтов / А.В. Шафиркин, Ю.Г. Григорьев. – Москва: Экономика, 2009. – С. 639.
- [8] Space radiation. – URL: oko-planet.ru/science/sciencecosmos/page,5,225516-chelovek-na-lune-dozy-radiacii-pri-polete-na-lunu.html (дата обращения 10.08.2023).

REFERENCES

- [1] Safety of Space Flights / G.T. Beregovoy, A.A. Tishchenko [at all.] – Moscow: Mashinostroyeniye, 1977. – P. 263.
- [2] Calculation of Radiation Loads Inside the Space Station when Using Additional Protection / D.A. Kartashov, R.V. Tolochek, V.A. Shurshakov, E.N. Yarmanova // Aerospace and Ecological Medicine. Scientific Periodical. – 2013. – Vol. 47. – No 6. – P. 61–66.
- [3] Orlov, O.I. Radiation Factor in Lunar Missions / O.I. Orlov, M.I. Panasyuk, V.A. Shurshakov // Aerospace and Ecological Medicine. Scientific periodical. – 2019. – Vol. 53. – No 4.
- [4] Prospective Polymeric Materials for Radiation Protection / V.I. Pavlenko, N.I. Cherkashina, A.A. Kyritsyn [at all.] // Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference “Manned Flights to Space”, Star City, 2021. – P. 40–41.
- [5] Panasyuk, M.I. Wanderers in the Universe or the Echo of the Big Bang. – Fryazino: Vek-2, 2005. – P. 272.
- [6] Samoilov, A.S. Radiation Impact in Orbital and Interplanetary Flights: Monitoring and Protection / A.S. Samoilov, I.B. Ushakov, V.A. Shurshakov // Human ecology. – 2019. – No 01. – P. 4–9.
- [7] Shafirkin, A.V., Grigiriev Yu.G. Interplanetary and Orbital Space Flights. Radiation Risk for Cosmonauts / A.V. Shafirkin, Yu.G. Grigiriev. – Moscow: Economics, 2009. – P. 639.
- [8] Space radiation. – URL: oko-planet.ru/science/sciencecosmos/page,5,225516-chelovek-na-lune-dozy-radiacii-pri-polete-na-lunu.html (accessed 10.08.2023).