EDN: https://elibrary.ru/nmglkg
DOI: https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-6-367-378
УДК 523.34+539.1.047+613.648.4+613.693+614.876
© Иванов И.В., Бурмистров В.И., 2023
Иванов И.В.[1,2,3], Бурмистров В.И.[1]

Противорадиационная защита космонавтов в процессе труда на поверхности Луны в краткосрочной миссии

[1]ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский Университет), ул. Большая Пироговская, 2, стр. 4, Москва, 119991;
[2]ФГУ «Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины Министерства обороны Российской Федерации», ул. Лесопарковая, 4, Санкт-Петербург, 195043;
[3]ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр-т Будённого, 31, Москва, 105275

Введение. Недостаточно изученным остаётся вопрос оценки характерных для поверхности Луны видов ионизирующего излучения, противорадиационных свойств различных материалов, факторов, обеспечивающих противорадиационную безопасность космонавтов при размещении на лунной поверхности, учитывая нормативы радиационной безопасности для персонала.

Цель исследования — провести анализ факторов, определяющих особенности противорадиационной защиты космонавтов в будущих лунных поселениях.

Материалы и методы. В ходе исследования были использованы аналитические методы для обобщения и систематизации материалов по уровням дозовой нагрузки на космонавтов на этапах космического полёта и на поверхности Луны, а также расчётные методы с учётом противорадиационных свойств разных материалов в зависимости от вида ионизирующего излучения для разработки подходов к организации противорадиационной защиты космонавтов в условиях краткосрочного (до 14 суток) пребывания на лунной поверхности.

Результаты. Проведён анализ факторов, обусловливающих радиационную опасность для космонавтов в процессе пребывания и труда в лунных поселениях. Обосновано, что при разработке противорадиационной защиты необходимо использовать корпус лунного модуля (каркас из алюминия), лунный реголит и полиэтилен. При многослойности защиты лунного модуля учитываются коэффициенты ослабления материалов для разных видов ионизирующего излучения, что позволит снизить дозы как от прямого гамма-излучения, протонов и нейтронов, так и от рассеянного вторичного излучения.

Заключение. *Разные варианты конструкции защиты модулей лунной станции по толщине составляющих её слоёв позволят обеспечить противорадиационную защиту для помещений с разным предназначением в зависимости от возможных вариантов солнечной активности и требуемых уровней для жилых, рабочих, аварийных отсеков.*

Этика. Проведение исследования не требовало заключения этического комитета.

Ключевые слова: *Луна; лунные поселения; космонавты; дозы облучения; противорадиационная защита; реголит; полиэтилен; коэффициенты ослабления излучения*

Для цитирования: Иванов И.В., Бурмистров В.И. Противорадиационная защита космонавтов в процессе труда на поверхности Луны в краткосрочной миссии. *Мед. труда и пром. экол.* 2023; 63(6): 367–378. https://elibrary.ru/nmglkg https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-6-367-378

Для корреспонденции: *Иванов Иван Васильевич,* ведущий научный сотрудник лаборатории физических факторов ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», д-р мед. наук, профессор. E-mail: ivanov-iv@yandex.ru

Участие авторов:
Иванов И.В. — концепция и дизайн исследования, анализ и интерпретация данных; подготовка первого варианта статьи;
Бурмистров В.И. — концепция исследования, подготовка обзора литературы, получение и анализ данных; выполнение расчётов, редакция статьи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 22.05.2023 / Дата принятия к печати: 07.06.2023 / Дата публикации: 12.06.2023

Ivan V. Ivanov[1,2,3], Vladimir I. Burmistrov[1]

Anti-radiation protection of astronauts in the process of working on the surface of the Moon in a short-term mission

[1]I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), 2-4, Bolshaya Pirogovskaya St., Moscow, 119991;
[2]State Scientific-Research Test Institute of Military Medicine of Defense Ministry of the Russian Federation, 4, Lesoparkovaya St., St. Petersburg, 195043;
[3]Izmerov Research Institute of Occupational Health, 31, Budyonnogo Ave, Moscow, 105275

Introduction. The issue of assessing the types of ionizing radiation characteristic of the lunar surface, the anti-radiation properties of various materials, and factors ensuring the anti-radiation safety of astronauts when placed on the lunar surface, taking into account the radiation safety standards for personnel, remains insufficiently studied.

The study aims to analyze the factors that determine the features of anti-radiation protection of astronauts in future lunar settlements.

Materials and methods. During the study, experts used analytical methods to generalize and systematize materials on the levels of dose load on astronauts at the stages of space flight and on the surface of the Moon. The researchers also used computational methods taking into account the anti-radiation properties of various materials, depending on the type of ionizing radiation, to develop approaches to the organization of anti-radiation protection of astronauts in conditions of short-term (up to 14 days) stay on the surface of the Moon.

Results. The researchers have carried out the analysis of the factors determining the radiation hazard for astronauts during their stay and work in lunar settlements. It is proved that when developing anti-radiation protection, it is necessary to use the housing of the lunar module (aluminum frame), lunar regolith and polyethylene. With the multilayer protection of the lunar module, it is necessary to take into account the attenuation coefficients of materials for various types of ionizing radiation, which will reduce the doses from both direct gamma radiation, protons and neutrons, and from scattered secondary radiation.
Conclusion. *Various design options for the protection of the lunar station modules by the thickness of their constituent layers will provide anti-radiation protection of premises for various purposes, depending on the possible options for solar activity and the required levels for residential, working, emergency compartments.*
Ethics. The study was conducted in compliance with Ethical standards.
Keywords: *Moon; lunar settlements; astronauts; radiation doses; radiation protection; regolith; polyethylene; radiation attenuation coefficients*
For citation: Ivanov I.V., Burmistrov V.I. Anti-radiation protection of astronauts during labor on the surface of the Moon in a short-term mission. *Med. truda i prom. ekol.* 2023; 63(6): 367–378. https://elibrary.ru/nmglkg https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-6-367-378 (in Russian)
For correspondence: *Ivan V. Ivanov,* the leading researcher of the Physical Factor's Laboratory at Izmerov Research Institute of Occupational Health, Dr. of Sci. (Med.), Professor. E-mail: ivanov-iv@yandex.ru
Contribution:
Ivanov I.V. — concept and design of the study, analysis and interpretation of data, preparation of the first version of the article;
Burmistrov V.I. — research concept, preparation of literature review, data acquisition and analysis; calculations, editorial office of the article.
Funding. The study had no funding.
Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.
Received: 22.05.2023 / Accepted: 07.06.2023 / Published: 12.06.2023

Введение. Более полувека назад человек смог оказаться на Луне. Первые астронавты (командир корабля Нил Армстронг) ступили на поверхность Луны в июле 1969 г. в Море Спокойствия, пробыли на поверхности 2 ч 24 мин и преодолели по её поверхности расстояние 250 м. Вторая высадка людей на Луну (командир корабля Чарльз Конрад) произошла в ноябре 1969 года в Океане Бурь; астронавты пробыли на поверхности спутника 7,5 ч, преодолев расстояние 2 км.

В последние годы ведущие страны мира снова устремляют свой взор к спутнику Земли, желая вновь покорить его. Предполагается использовать Луну в качестве полигона для проведения научных экспериментов в областях планетологии, астрономии, космологии, космической биологии, тестирования космических технологий для полётов на Марс и другие планеты, в том числе обеспечения стартов космических кораблей в межпланетные и межзвёздные полёты. Планируется использовать естественный спутник Земли как ресурсную базу для добычи полезных ископаемых — редкоземельных металлов, гелия, воды, кислорода, запасов энергии и др. Для этого необходимо будет обустраивать лунные поселения, которые обеспечат возможность длительной работы космонавтов на будущих лунных базах.

С какими проблемами могут столкнуться участники будущих экспедиций? Воздействие на человека радиации, невесомости, гипогравитации, солнечной инсоляции и низких температур, химического состава лунной пыли, длительное воздействие замкнутого пространства — эти и другие вопросы уже давно решаются в многочисленных научных учреждениях мира.

Недостаточно изученным остаётся вопрос оценки характерных для поверхности Луны видов ионизирующего излучения, противорадиационных свойств различных материалов, факторов, обеспечивающих противорадиационную безопасность космонавтов при размещении на Лунной поверхности, учитывая нормативы радиационной безопасности для персонала.

Цель исследования — провести анализ факторов, определяющих особенности противорадиационной защиты космонавтов в будущих лунных поселениях.

Материалы и методы. В ходе исследования были использованы аналитические методы для обобщения и систематизации материалов по уровням дозовой нагрузки на космонавтов на этапах космического полёта и на поверхности Луны, а также расчётные методы с учётом противорадиационных свойств разных материалов в зависимости от вида ионизирующего излучения для разработки подходов к организации противорадиационной защиты космонавтов в условиях краткосрочного (до 14 суток) пребывания на лунной поверхности.

Результаты и обсуждение. ***Характеристика ионизирующего излучения на поверхности Луны.*** В связи с тем, что у Луны отсутствует магнитное поле и нет атмосферы, характер ионизирующего излучения на лунной поверхности значительно отличается от радиационных параметров, характерных для поверхности Земли. Главную опасность для космонавтов при перелёте к Луне и при работе на поверхности Луны представляет ионизирующее излучение солнечных (СКЛ) и галактических (ГКЛ) космических лучей [1–4].

Первичные ГКЛ состоят из потоков высокоэнергетических заряженных частиц от звёзд нашей Вселенной — протонов, нейтронов, ядер химических элементов от гелия до ядер более тяжёлых элементов до урана, с высокими энергиями — от 10^9 эВ (1 ГэВ) до 10^{20} эВ (10^{10} ГэВ) [5–8]. При оценках радиационной опасности от ГКЛ учитывают высокую проникающую способность этих частиц и эффект их каскадного размножения (вторичного излучения) в материалах.

СКЛ образуются в результате мощных краткосрочных вспышек на поверхности Солнца, вызывающих инжекцию заряженных частиц (протонов, ядер гелия и тяжёлых элементов, электронов) в межпланетное пространство. Энергия СКЛ составляет от нескольких кэВ до нескольких ГэВ [1, 9].

Применительно к анализу радиационных воздействий на материал лунного укрытия необходимо учитывать вторичное (тормозное) излучение — вторичного потока протонов и более тяжёлых ядер, рентгеновского и γ-излучения, порождённого взаимодействиями первичного ионизирующего излучения ГКЛ и СКЛ при прохож-

дение их через вещество [1, 2, 4]. Причём вторичное излучение способно проникнуть в материал защиты значительно глубже первичного излучения. Это обусловливает необходимость многослойной защиты с разными характеристиками ослабления в зависимости от вида излучения.

Нормирование радиационного облучения. Неблагоприятные эффекты ионизирующего излучения широко известны [10–13] и обосновывают беспороговую концепцию МКРЗ при оценке влияния малых доз на организм человека [14]. В отличие от рентгеновского и гамма-излучения, для высокоэнергетических частиц галактического и солнечного КИ характерны эффекты прямого повреждающего действия на ядерные и митохондриальные ДНК с высокой вероятностью двухнитиевых разрывов, и ошибки их репарации повышают риск развития канцерогенеза [13], что обусловливает при расчётах эквивалентной дозы увеличение коэффициента качества излучения (ККИ) с 1 до 5.

Цель нормирования — ограничить воздействие вредных последствий воздействия радиационного излучения на персонал, находящийся в различных условиях повышенной радиации [15]. Действующие ограничения облучения космонавтов, установленные российскими нормативными документами [16, 17], основаны на накопленных за последний период сведениях о проявлениях острого и хронического и облучения человека, а также их последствий. Современная версия российских нормативов [18] отражает существующую в мировой практике тенденцию к увеличению жёсткости радиационных лимитов [14] и обеспечивает приемлемые значения вероятностей снижения работоспособности для ситуаций как острых, так и хронических облучений, а также для отдалённых последствий — радиационных рисков от специфических (рак, генетические эффекты) и неспецифических соматических нарушений. Значения дозовых лимитов облучения космонавтов при полётах различной продолжительности [17] приведены в ***таблице 1***.

В новых МУ 2.6.1.44-03-2016 предельная доза облучения космонавтов для краткосрочных околоземных космических полетов (до 1 года) установлен равным 300 мЗв [17, 18].

Возможные дозы облучения персонала на поверхности Луны. На поверхности Луны радиационное воздействие обусловлено заряженными частицами различных энергий от галактических космических лучей, потока солнечных частиц, а также вторичных нейтронах и гамма-лучах (лунное альбедо), возникающих от взаимодействия космического излучения с лунной поверхностью. Для оценки накопленной дозы ионизирующего излучения на борту посадочного модуля миссии «Чанъэ-4» было установлено десять специальных твердотельных кремниевых детекторов [19]. Разделив поглощённое количество излучений на количество дней, в течение которых модуль находился на поверхности Луны, исследователи получили среднюю дозу за час и за сутки.

По замерам датчика *LND* на поверхности Луны известна мощность поглощённой дозы от заряженных частиц 10,2 мкГр/час в кремнии [19]. После пересчёта на воду (в сравнимый биологический эквивалент) путём умножения этого значения на коэффициент 1,3 [19] мощность поглощённой дозы в сутки составляет:

10,2 мкГр/час × 1,3 × 24 часа = 318 мкГр/сутки (1).

Мощность эквивалентной дозы от заряженных частиц определена путём умножения на Кки, равный 4,3 [19] и составляет 1367 мкЗв/сутки.

По аналогичному алгоритму проведён расчёт мощности дозы радиации от нейтральных (незаряженных) компонентов, к которым относили рентгеновское излучение Солнца, нейтроны и гамма-излучение от вторичного лунного альбедо:

3,1 мкГр/час × 1,3 × 24 часа = 97 мкГр/сутки (2).

При переводе поглощённой дозы от нейтрального компонента излучения в эквивалентную использовано значение ККИ=2,5 [5, 20–23]:

97 мкГр/сутки × 2,5 = 243 мкЗв/сутки (3).

Суммарная мощность эквивалентной дозы радиации на открытой поверхности Луны от заряженных частиц и незаряженного компонента различных энергий СКЛ, ГКЛ, рентгеновского и гамма-излучения составила 1610 мкЗв/сутки (1,61 мЗв/сутки), а с учётом 8,6% вторичного излучения лунного альбедо — 1748,46 мкЗв/сутки (1,75 мЗв/сутки).

Это согласуется с данными *NASA* [11], по которым при пребывании на Луне от 6 до 12,5 суток дозы радиации у астронавтов были незначительными и составляли от 0,16 рад в миссиях «Аполлон-7, 8» до 1,14 рад в миссии «Аполлон-14», а суммарно за всю миссию от 6 до 40 мЗв.

Таблица 1 / Table 1

Значения дозовых лимитов облучения космонавтов при полётах различной продолжительности
Values of dose limits of cosmonauts' radiation exposure during flights of various duration

Критический орган, глубина в ткани	Продолжительность экспозиции	Дозовый лимит, эквивалентная доза, Зв
Все тело	профессиональный, за карьеру	1,0 (эффективная доза)
Кроветворные органы (красный костный мозг), 5 см	однократное острое	0,15
	30 дней	0,25
	один год	0,50
Хрусталик глаза, 0,3 см	30 дней	0,5
	один год	1,0
	за карьеру	2,0
Кожа, 0,01 см	30 дней	1,5
	один год	3,0
	за карьеру	6,0

По данным дозиметрических измерений китайской автоматической станции «Чанъэ-4» на Луне в 2019 г. значение мощности дозы на поверхности составляло 60 мкЗв/ч [11], тогда как на поверхности Земли мощность дозы, в основном, не превышает 0,20 мкЗв/час.

Как показывают вышеприведённые расчёты, при отсутствии вспышек солнечной активности средняя суточная доза для человека в этих условиях составит 1,75 мЗв, а за 14 суток пребывания на лунной поверхности без противорадиационной защиты — 24,5 мЗв. При вспышках солнечной активности в этот период расчётные значения доз могут достигать 3–5 Гр за вспышку. Это обусловливает необходимость строительства лунных модулей с достаточной противорадиационной защитой.

Дозы облучения космонавтов за лунную миссию. В ***таблице 2*** представлены результаты анализа доз облучения космонавтов за лунную миссию продолжительностью 14 суток по трассе полёта в программе «*Apollo*» 1969 г., названной американцами «Трассой Кондратюка» [24–26]. Использованы измеренные значения поглощённой дозы радиации на орбите Луны в период минимума солнечной активности между 24–25 солнечными циклами за период с июля 2018 г. по декабрь 2018 г. [27–29], когда фактически не происходили солнечные вспышки [29], и значения доз радиации, измеренные датчиками *LND* Китайской посадочной платформой *KA Chang'E4,* на поверхности Луны в период с 11 января 2019 г. по 3 февраля 2019 г. (Минимум солнечной активности между 24–25 солнечными циклами) [19].

Как видно из ***таблицы 2*** суммарная доза за лунную миссию 14 суток в период минимума солнечной активности и при отсутствии солнечных вспышек накапливается преимущественно в период преодоления радиационных поясов земли, за время перелёта к Луне и обратно, она составит 133,497 мЗв. Это позволяет пребывать космонавтам на Луне 224 ч в капсуле посадочного модуля с защитой для посадочного модуля 1,5 г/см^2 при общем времени выполнения работ на поверхности Луны в скафандрах типа «Орлан–М» с защитой 0,20 г/см^2 продолжительностью 112 ч. Однако, в случае непрогнозируемых мощных солнечных вспышек, доза облучения космонавтов может составить около 5 Гр, что неминуемо приведёт к развитию у них острой лучевой болезни тяжёлой степени со смертельным исходом [27, 31]. Продолжительность вспышечного потока радиации составляет около полутора суток [27, 31]. Это делает крайне необходимым, особенно при длительных периодах пребывания и выполнения производственных задач в лунных поселениях использование дополнительных путей зашиты от ионизирующих излучений. В качестве одного из таких направлений могут рассматриваться использование реголита и других материалов для оборудования лунных модулей.

Расчёты эффективности защиты материалов от солнечного и галактического излучений на поверхности Луны. Выполнены расчёты эффективности защиты при низкой и высокой солнечной активности, а также при солнечной вспышке при 3-х вариантах оборудования укрытий на поверхности Луны (с массовой толщиной 10, 20 и 30 г/см^2). Учитывались дозы излучения от заряженных частиц (протоны, электроны, тяжёлые ионы), нейтронов и гамма-излучения, а также от вторичных нейтронов и гамма-излучения от реголита (лунного альбедо, которое составляет 8,6% от суммарной энергии ГКЛ) [29, 32, 33].

Изначально принималось, что дозы облучения на поверхности Луны без защиты составляли: эквивалентные дозы при минимуме солнечной активности 1,748 мЗв/сут, при максимуме солнечной активности 10,21 мЗв/сут [31]. Поглощённая доза за солнечную вспышку 11.05.1959 г. в открытом космосе составила 6 Гр ***(рис. 1)*** [29, 34, 35], на поверхности Луны это соответствовало 3 Гр с учётом того, на поверхности Луны доза в 2 раза меньше, чем в открытом космосе за счёт эффекта экранирования Луны от галактического излучения. При учёте коэффициента качества излучения ККИ=5, это соответствует эквивалентной дозе 15 Зв.

Таблица 2 / Table 2

Предполагаемые дозы радиации по этапам лунной миссии в период минимума солнечной активности (между 24–25 солнечными циклами) при отсутствии солнечных вспышек
Estimated radiation doses by stages of the lunar mission during the period of minimum solar activity (between 24–25 solar cycles) in the absence of solar flares

Этапы	Продолжительность, часы (сутки)	Защита на этапе миссии (в эквиваленте алюминия)	Дозы радиации		Источник литературы
			Поглощённая, мГр	Эквивалентная, мЗв	
Старт — выход на орбиту и преодоление радиационных поясов Земли	6 часов	Командный модуль (10,0 г/см^2)	30	90	[7, 24, 27–29]
Полёт в межпланетном пространстве Земля–Луна–Земля	168 ч (7 сут.)	Командный модуль (10,0 г/см^2)	2,303	11,515	[23, 29]
Луна. Пребывание в капсуле посадочного модуля	224 ч (9 сут.+ 8 ч)	Посадочный модуль (1,5 г/см^2)	2,52	9,772	[19, 26]
Луна. В скафандре на открытой поверхности	112 часов (4 сут.+16 ч.)	Скафандр «Орлан–М» (0,20 г/см^2)	1,857	7,21	[30]
При обратном полёте к Земле и при посадке на Землю	1 час	Командный модуль (10,0 г/см^2)	5	15	[24, 28]
ИТОГО за лунную миссию	511 ч (21 сут.+7 ч.)	—	41,68	133,497	—

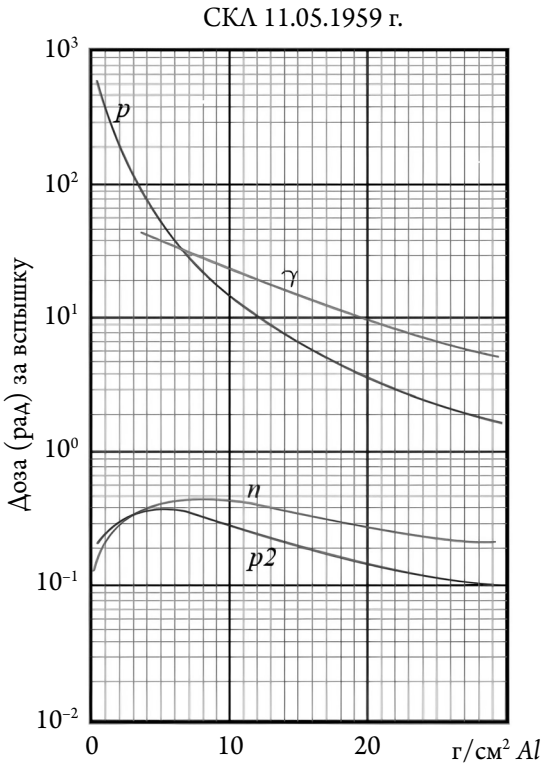

Рис. 1. Зависимость полной поглощённой дозы радиации от первичного излучения (протоны) и вторичного (протоны, нейтроны, гамма-излучение) за экранами из алюминия [29]. По оси абсцисс — массовая толщина защитного экрана, г/см², по оси ординат — доза за вспышку (рад).

Fig. 1. The dependence of the total absorbed radiation dose on primary radiation (protons) and secondary radiation (protons, neutrons, gamma radiation) behind aluminum screens [29]. On the abscissa axis — the mass thickness of the protective screen, g/cm², on the ordinate axis — the dose per flash (rad).

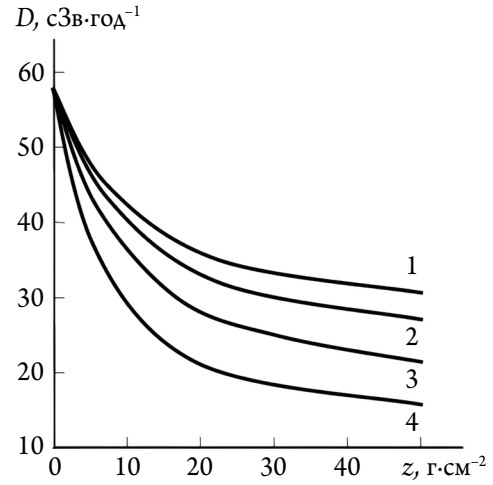

Рис. 2. Зависимость эквивалентной дозы, обусловленной частицами ГКЛ, от толщины защитных экранов, изготовленных из разных материалов: 1 — алюминий, 2 — лунный реголит, 3 — вода, 4 — полиэтилен [5].

Fig. 2. Dependence of the equivalent dose due to galactic cosmic rays particles on the thickness of protective screens made of different materials: 1 — aluminum, 2 — lunar regolith, 3 — water, 4 — polyethylene [5].

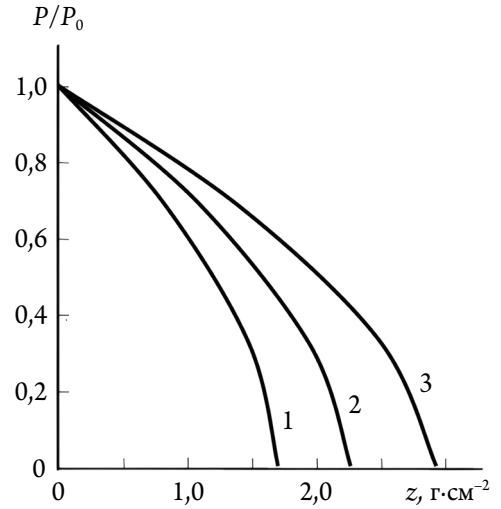

Рис. 3. Зависимость ослабления энергии первичного излучения от протонов E=50 МэВ (P/P_0) от толщины экрана для композиционных материалов [5]: 1 — полиэтилен с добавлением водорода, 2 — полиэтилен с добавлением нитрида бора, 3 — алюминий.

Примечание: P_0 — полный поток энергии излучения, падающего на экран; P — поток энергии излучения, прошедшего через эран.

Fig. 3. The dependence of the attenuation of the primary radiation energy from protons E=50 MeV (P/P_0) on the thickness of the screen for composite materials [5]: 1 — polyethylene with the addition of hydrogen, 2 — polyethylene with the addition of boron nitride, 3 — aluminum.

Note: P_0 is the total energy flux of radiation incident on the screen; P is the energy flux of radiation transmitted through the screen

В качестве строительного и защитного материала в проектах обитаемых лунных баз используется реголит. Как видно из ***рисунка 2***, реголит обеспечивает более высокий уровень защиты по сравнению с алюминием, а наибольшее ослабление поглощённой дозы при одинаковых массовых толщинах экрана достигается при использовании полиэтилена [5]. Данные рисунка 2 были использованы для вычисления коэффициентов пересчёта ослабления поглощённой дозы излучения от алюминия к реголиту для массовой толщины защиты 10, 20 и 30 г/см².

Для снижения массы защитных радиационных экранов и уменьшения процесса образования в них вторичного излучения рекомендуется использовать экраны, состоящие из элементов с малыми значениями ядерного заряда. Таким материалам соответствуют водородсодержащие материалы — полимеры, а также материалы, содержащие бор *(B)* и нитрид бора *(BN)* [5]. При взаимодействии тяжёлых ядер ГКЛ с лёгкими элементами эффективно идёт процесс распада первичных ядер на фрагменты с малой длиной пробега в материале экрана, вследствие чего радиационные потоки за экраном значительно ослабляются. Такое введение лёгких элементов в состав материала защитного экрана и использование многокомпонентных композитов повышает его эффективность.

По данным [5] ***(рис. 3)*** были определены коэффициенты пересчёта ослабления дозы облучения от алюминия к полиэтилену в зависимости от толщины полиэтилена для массовой толщины защиты 1 и 2 г/см². При этом учитывалось, что вклад протонов в общий энергетический поток всех видов излучения составлял 91–94% [32]. Видно, что композиционные материалы позволяют обеспечить

уровень защиты при меньшей массе экрана по сравнению с алюминием.

Эти коэффициенты пересчёта были использованы при вычислении дозы после прохождения потока излучения через защиту из полиэтилена с нитридом бора и через каркас лунного модуля (обечайку защиты из *Al)*. Результаты расчётов доз излучения, которые могут получить космонавты при разных вариантах солнечной активности при нахождении в лунных укрытиях различных типов, представлены в ***таблицах 3–5*** и обобщены в ***таблице 6***.

Как видно из ***таблицы 6***, снижение дозы облучения пропорционально толщине составляющих компонентов и наиболее выражено при варианте защиты лунного укрытия из реголита 30 г/см^2 + полиэтилена 2 г/см^2 + каркас из алюминия 1 г/см^2. Оборудование такого убежища снизит дозу облучения космонавтов за 9,3 суток пребывания в лунном модуле при минимуме солнечной активности с 16,26 мЗв до 1,84 мЗв, при максимуме солнечной активности с 94,95 мЗв до 9,03 мЗв, при солнечной вспышке со смертельной дозы 3 Гр (15 Зв) до безопасной дозы 15,2 мЗв. То есть даже при сочетании максимальной солнечной активности и солнечной вспышки доза облучения за 14-суточную миссию в целом при такой защите в модулях на поверхности Луны не превысит 147,96 мЗв.

Расчёты эффективности защиты, основанные на экспериментальных замерах доз радиации на поверхности Луны датчиками *LND* Китайской посадочной платформой *KA Chang'E4*, достаточно близки к расчётным данным других авторов [27, 33–35].

Так, в исследовании [31] авторы исходили из критерия того, что радиационная доза для персонала лунной базы при воздействии потоков частиц ГКЛ и СКЛ за год не должна превышать допустимую дозу 50 сЗв [17]. Было установлено, что при уровне радиационного риска 3% прогнозируемая длительность пребывания человека на поверхности Луны не должна превышать полутора месяцев во время максимума солнечной активности и превышает 1 год во время минимума солнечной активности, если при этом персонал защищён алюминиевым экраном толщиной 10 г/см^2.

Данные расчёты дополняют имеющиеся сведения по обоснованию 9 вариантов противорадиационной защиты для каждого из 3-х уровней солнечной активности (минимум и максимум солнечной активности, а также при солнечной вспышке) и 3-х составов защиты (реголит, реголит + полиэтилен 1 г/см^2, реголит + полиэтилен 2 г/см^2, для толщины реголита 10, 20 и 30 г/см^2).

Космический полёт к Луне целесообразно выполнять в период минимума солнечной активности, так как мощные солнечные вспышки характерны для периода максимума солнечной активности, однако эта закономерность имеет вероятностный характер [29]. Изредка мощные вспышки со смертельными для человека уровнями радиации регистрировались и на минимуме солнечной активности, что обусловливает необходимость проектирования и оборудования противорадиационных убежищ при планировании полёта даже в период минимума солнечной активности.

Выполненные расчёты были проведены с учётом условий солнечной вспышки, создавшей на поверхности Луны поглощённую дозу 3 Гр. Однако следует отметить, что по мнению отдельных исследователей [5, 6, 31], при мощной солнечной вспышке, создающей на поверхности Луны суммарную дозу облучения около 5 Гр, потребуется комбинированная защита не менее 40 г/см^2. В то же время, учитывая сложность доставки материалов с Земли на Луну и инженерных работ по оборудованию лунных модулей, могут использоваться разные уровни защиты в зависимости от предназначения модулей и времени пребывания в них космонавтов. Максимальная защита требуется для убежищ на случай экстренного временного перемещения в них космонавтов от 1 до 3 суток на период высокой радиационной опасности при солнечной вспышке.

Обсуждение. При самых оптимистичных прогнозах полёты на Луну можно ожидать лишь в 30-х годах этого столетия, что связано с необходимостью технических решений системы прилунения и старта с Луны. Тем не менее, решение вопросов обитаемости, гигиенических нормативов условий труда для лунных миссий уже не за горами. Негативное влияние радиационного фактора на здоровье и безопасность труда будущих лунных колонистов повышает значимость исследований по обеспечению безопасности труда в этих условиях.

Основная проблема радиационной безопасности при полёте к Луне и организации труда на поверхности Луны — защита от ГКЛ, СКЛ и вторичного тормозного излучения. Даже при неблагоприятном стечении обстоятельств, когда пик вспышки придётся на периоды пребывания космонавтов на Луне и их эвакуации на Землю, максимальные значения доз не должны превысить 300 мЗв, что не вызовет клинически значимых проявлений детерминированных эффектов радиации.

Построение защитных укрытий с учётом возможных солнечных вспышек потребует от противорадиационной защиты лунных модулей значительной толщины и многослойности материалов. В результате анализа факторов, обусловливающих радиационную опасность для космонавтов в процессе пребывания и труда в лунных поселениях, обосновано, что при разработке противорадиационной защиты необходимо использовать корпуса лунных модулей (каркасы из алюминия), лунный реголит и композитные материалы, такие как полиэтилен с нитридом бора. При многослойности защиты лунного модуля учитываются коэффициенты ослабления материалов для разных видов ионизирующего излучения, что позволит снизить дозы как от прямого гамма-излучения, высокоэнергетических протонов и нейтронов, так и от рассеянного вторичного излучения. Рассмотренные варианты защиты модулей лунной станции с разной массовой толщиной составляющих её слоёв позволят обеспечить противорадиационную защиту помещений с разным предназначением в зависимости от возможных вариантов солнечной активности и требуемых уровней для жилых, рабочих, аварийных отсеков. Кроме того, конструкция поселений на лунной поверхности должна разрабатываться с учётом времени пребывания космонавтов в лунном поселении и предусматривать защиту как от радиационных, так и от других опасных факторов нерадиационной природы (метеориты, лунная пыль, и др.) [36].

В дальнейшем в данной области предстоит подготовить нормативные документы по факторам среды на лунной станции, обосновать направления разработки технологий размещения космонавтов в убежищах на поверхности Луны (создание в них приемлемой для жизни человека среды обитания, выхода их на поверхность для выполнения работ и возвращения после деятельности вне станции, организация широкого круга мероприятий по обеспечению безопасности труда космонавтов). В целом это позволит обеспечить работоспособность и сохранение

Таблица 3 / Table 3

Результаты расчётов дозы радиации при минимуме солнечной активности при использовании комбинированной защиты из реголита и полиэтилена

The results of calculations of the radiation dose at a minimum of solar activity when using a combined protection of regolith and polyethylene

Варианты защиты	Данные для расчёта доз ионизирующего излучения при использовании укрытий						
	Показатели	Эквивалентная доза без материалов защиты*, мЗв/сут	Материалы защиты на поверхности Луны				
			Реголит		Реголит + ПЭ + каркас *Al*		
			Коэффициент ослабления излучения	Эквивалентная доза, мЗв/сут	Коэффициент ослабления излучения	Эквивалентная доза, (мЗв/сут)	
						ПЭ 1 г/см²	ПЭ 2 г/см²
Лунный реголит 10 г/см², полиэтилен 1 или 2 г/см², каркас ЛУ из *Al* 1 г/см²	Первичные заряженные частицы (протоны, электроны, тяжёлые ионы)	1,367	0,61	0,834			
	Первичные нейтроны и гамма-излучение	0,243	0,61	0,148			
	Вторичные нейтроны и гамма-излучение	0,138	0,61	0,084			
	$Д_{сумм.}$ с реголитом	1,748	0,61	1,066			
	$Д_{сумм.}$ реголит +ПЭ 1 г/см²				0,73	0,778	
	$Д_{сумм.}$ реголит +ПЭ 2 г/см²				0,29		0,309
	$Д_{сумм.}$ реголит + каркас из *Al* 1 г/см²		0,80	0,853			
	$Д_{сумм.}$ реголит + ПЭ+ каркас из *Al* 1 г/см²				0,80	0,623	0,274
Лунный реголит 20 г/см², полиэтилен 1 или 2 г/см², каркас ЛУ из *Al* 1 г/см²	Первичные заряженные частицы (протоны, электроны, тяжёлые ионы)	1,367	0,47	0,642			
	Первичные нейтроны и гамма-излучение	0,243	0,47	0,114			
	Вторичные нейтроны и гамма-излучение	0,138	0,47	0,065			
	$Д_{сумм.}$ с реголитом	1,748	0,47	0,821			
	$Д_{сумм.}$ реголит +ПЭ 1 г/см²	—			0,73	0,599	
	$Д_{сумм.}$ реголит +ПЭ 2 г/см²				0,29		0,238
	$Д_{сумм.}$ реголит + каркас из *Al* 1 г/см²	—	0,80	0,657			
	$Д_{сумм.}$ реголит + ПЭ+ каркас из *Al* 1 г/см²				0,80	0,479	0,190
Лунный реголит 30 г/см², полиэтилен 1 или 2 г/см², каркас ЛУ из *Al* 1 г/см²	Первичные заряженные частицы (протоны, электроны, тяжёлые ионы)	1,367	0,41	0,560	0,73 / 0,29	0,489	0,194
	Первичные нейтроны и гамма-излучение	0,243	0,41	0,099	0,73 / 0,29	0,087	0,034
	Вторичные нейтроны и гамма-излучение	0,138	0,41	0,056	0,73 / 0,29	0,049	0,019
	$Д_{сумм.}$ с реголитом	1,748	0,41	0,715	—	—	—
	$Д_{сумм.}$ реголит +ПЭ 1 г/см²				0,73	0,522	
	$Д_{сумм.}$ реголит +ПЭ 2 г/см²	—			0,29		0,207
	$Д_{сумм.}$ реголит + каркас из *Al* 1 г/см²		0,80	0,573			
	$Д_{сумм.}$ реголит + ПЭ+ каркас из *Al* 1 г/см²	—			0,80	0,418	0,166

Примечания (табл. 3–5): * — доза, измеренная детектором излучения с учётом экранирования его элементами конструкции посадочной платформы в эквиваленте 1 г/см² *Al;* ЛУ — лунное укрытие, $Д_{сумм.}$ — суммарная доза излучения, коэффициенты качества излучения при расчётах эквивалентной дозы; $P_{перв.}$ — первичные протоны от СКЛ и ГКЛ, $N_{втор.}$ — вторичные нейтроны от СКЛ и ГКЛ, $P_{втор.}$ — вторичные протоны от СКЛ и ГКЛ, $Г_{втор.}$ — вторичное гамма-излучение от СКЛ и ГКЛ, ПЭ — полиэтилен.

Notes to Table 3–5: * — the dose measured by the radiation detector taking into account its shielding by the elements of the landing platform structure in the equivalent of 1 g/cm² Al; ЛУ — lunar shelter, $Д_{сумм.}$ — total radiation dose, radiation quality coefficients when calculating the equivalent dose; $P_{перв.}$ — primary protons from solar cosmic rays (SCR) and galactic cosmic rays (GCR), $N_{втор.}$ — secondary neutrons from SCL and GCL, $P_{втор.}$ — secondary protons from SCL and GCL, $Г_{втор.}$ — secondary gamma radiation from SCL and GCL, ПЭ — polyethylen.

Таблица 4 / Table 4

Результаты расчётов дозы радиации при максимуме солнечной активности при использовании комбинированной защиты из реголита и полиэтилена

The results of calculations of the radiation dose at the maximum of solar activity when using a combined protection of regolith and polyethylene

Варианты защиты	Данные для расчёта доз ионизирующего излучения при использовании укрытий						
	Показатели	Эквивалентная доза без материалов защиты*, мЗв/сут	Материалы защиты на поверхности Луны				
			Реголит		Реголит + ПЭ + каркас *Al*		
			Коэффициент ослабления излучения	Эквивалентная доза, мЗв/сут	Коэффициент ослабления излучения	Эквивалентная доза, (мЗв/сут)	
						ПЭ 1 г/см²	ПЭ 2 г/см²
Лунный реголит 10 г/см², полиэтилен 1 или 2 г/см², каркас ЛУ из *Al* 1 г/см²	Первичные заряженные частицы (протоны, электроны, тяжёлые ионы)	8,078	0,61	4,927			
	Первичные нейтроны и гамма-излучение	1,435	0,61	0,875			
	Вторичные нейтроны и гамма-излучение	0,697	0,61	0,425			
	$Д_{сумм.}$ с реголитом	10,21	0,61	6,228			
	$Д_{сумм.}$ реголит +ПЭ 1 г/см²				0,73	4,546	
	$Д_{сумм.}$ реголит +ПЭ 2 г/см²	—	—		0,29		1,806
	$Д_{сумм.}$ реголит + каркас из *Al* 1 г/см²		0,80	4,982			
	$Д_{сумм.}$ реголит + ПЭ+ каркас из *Al* 1 г/см²	—			0,80	3,637	1,445
Лунный реголит 20 г/см², полиэтилен 1 или 2 г/см², каркас ЛУ из *Al* 1 г/см²	Первичные заряженные частицы (протоны, электроны, тяжёлые ионы)	8,078	0,47	3,796			
	Первичные нейтроны и гамма-излучение	1,435	0,47	0,674			
	Вторичные нейтроны и гамма-излучение	0,697	0,47	0,328			
	$Д_{сумм.}$ с реголитом	10,21	0,47	4,798			
	$Д_{сумм.}$ реголит +ПЭ 1 г/см²				0,73	3,503	
	$Д_{сумм.}$ реголит +ПЭ 2 г/см²	—	—		0,29		1,391
	$Д_{сумм.}$ реголит + каркас из *Al* 1 г/см²		0,80	3,839			
	$Д_{сумм.}$ реголит + ПЭ+ каркас из *Al* 1 г/см²	—			0,80	2,802	1,113
Лунный реголит 30 г/см², полиэтилен 1 или 2 г/см², каркас ЛУ из *Al* 1 г/см²	Первичные заряженные частицы (протоны, электроны, тяжёлые ионы)	8,078	0,41	3,312			
	Первичные нейтроны и гамма-излучение	1,435	0,41	0,588			
	Вторичные нейтроны и гамма-излучение	0,697	0,41	0,286			
	$Д_{сумм.}$ с реголитом	10,21	0,41	4,186			
	$Д_{сумм.}$ реголит +ПЭ 1 г/см²				0,73	3,056	
	$Д_{сумм.}$ реголит +ПЭ 2 г/см²				0,29		1,214
	$Д_{сумм.}$ реголит + каркас из *Al* 1 г/см²		0,80	3,349			
	$Д_{сумм.}$ реголит + ПЭ+ каркас из *Al* 1 г/см²	—			0,80	2,445	0,971

Таблица 5 / Table 5

Результаты расчётов дозы радиации за период Солнечной вспышки 11.05.1959 г. при использовании комбинированной защиты из реголита и полиэтилена
Results of calculations of radiation dose for the period of Solar flare 11.05.1959 when using combined protection from regolith and polyethylene

Уровни солнечной активности	Показатели	Данные для расчёта доз ионизирующего излучения при использовании укрытий								
		Вне укрытия				Материалы укрытия на поверхности Луны				
		Поглощённая доза		Эквивалентная доза, мЗв		Реголит		Реголит + ПЭ + каркас Al		
		Рад	мГр	В открытом космосе	На поверхности Луны	Коэффициент ослабления излучения	Эквивалентная доза, мЗв/сут	Коэффициент ослабления излучения	Эквивалентная доза, (мЗв/сут)	
									ПЭ 1 г/см^2	ПЭ 2 г/см^2
Лунный реголит 10 г/см^2, полиэтилен 1 или 2 г/см^2, каркас ЛУ из *Al* 1 г/см^2	$P_{перв.}$=5	15	150	750	370	0,93	344			
	$N_{втор.}$=5	0,5	5	25	13	0,93	12			
	$P_{втор.}$=5	0,3	3	15	7	0,93	6			
	$Г_{втор.}$=1	25	250	250	130	0,93	121			
	$Д_{сумм.}$ с реголитом	40,8	408	1040	520	0,93	483			
	$Д_{сумм.}$ реголит + ПЭ 1 г/см^2							0,73	353	
	$Д_{сумм.}$ реголит + ПЭ 2 г/см^2							0,29		140
	$Д_{сумм.}$ реголит + каркас из *Al* 1 г/см^2					0,80	386			
	$Д_{сумм.}$ реголит + ПЭ+ каркас из *Al* 1 г/см^2							0,80	282	112
Лунный реголит 20 г/см^2, полиэтилен 1 или 2 г/см^2, каркас ЛУ из *Al* 1 г/см^2	$P_{перв.}$=5	4	40	200	100	0,89	89	—		
	$N_{втор.}$=5	0,3	3	15	8	0,89	7	—		
	$P_{втор.}$=5	0,15	1,5	7,5	37	0,89	3,3	—		
	$Г_{втор.}$=1	10	100	100	50	0,89	44,5	—		
	$Д_{сумм.}$ с реголитом	14,45	144,5	322,5	161,3	0,89	143,8			
	$Д_{сумм.}$ реголит + ПЭ 1 г/см^2							0,73	105	
	$Д_{сумм.}$ реголит + ПЭ 2 г/см^2							0,29		41,7
	$Д_{сумм.}$ реголит + каркас из *Al* 1 г/см^2					0,80	115,0			
	$Д_{сумм.}$ реголит + ПЭ+ каркас из *Al* 1 г/см^2	—	—	—	—			0,80	84	33,4
Лунный реголит 30 г/см^2, полиэтилен 1 или 2 г/см^2, каркас ЛУ из *Al* 1 г/см^2	$P_{перв.}$=5	1,8	18	90	45	0,85	38,2			
	$N_{втор.}$=5	0,2	2	10	5	0,85	4,2			
	$P_{втор.}$=5	0,1	1	5	2,5	0,85	2,1			
	$Г_{втор.}$=1	5,0	50	50	25	0,85	21,3			
	$Д_{сумм.}$ с реголитом	7,1	71	155	77,5	0,85	65,8			
	$Д_{сумм.}$ реголит + ПЭ 1 г/см^2							0,73	48	
	$Д_{сумм.}$ реголит + ПЭ 2 г/см^2							0,29		19,1
	$Д_{сумм.}$ реголит + каркас из *Al* 1 г/см^2					0,80	52,6			
	$Д_{сумм.}$ реголит + ПЭ+ каркас из *Al* 1 г/см^2							0,80	38,4	15,2

Таблица 6 / Table 6

Дозы облучения космонавтов за время пребывания в укрытии на поверхности Луны за лунную миссию при вариантах защиты лунного модуля в зависимости от солнечной активности

Radiation doses of astronauts during their stay in shelter on the surface of the Moon for a lunar mission with options for protecting the lunar module depending on solar activity

Условия солнечной активности	Доза облучения без защиты, мЗв	Дозы облучения (мЗв) при вариантах защиты реголит + полиэтилен + каркас из алюминия 1 г/см²					
		реголит 10 г/см²		реголит 20 г/см²		реголит 30 г/см²	
		ПЭ 1 г/см²	ПЭ 2 г/см²	ПЭ 1 г/см²	ПЭ 2 г/см²	ПЭ 1 г/см²	ПЭ 2 г/см²
$Д_{мин.}$ СА / 1 сут	1,748	0,623	0,274	0,479	0,190	0,418	0,166
$Д_{мин.}$ СА / 9,3 сут	16,26	5,79	2,55	4,45	1,77	3,89	1,54
$Д_{макс.}$ СА / 1 сут	10,21	3,637	1,445	2,802	1,113	2,445	0,971
$Д_{макс.}$ СА / 9,3 сут	94,95	33,82	13,44	26,06	10,35	22,74	9,03
Доза за солнечную вспышку	15 000	282	112	84	33,4	38,4	15,2

Примечания: $Д_{мин.}$ СА — доза облучения при минимуме солнечной активности, $Д_{макс.}$ СА — доза облучения при максимуме солнечной активности, ПЭ — полиэтилен.

Notes: $Д_{мин.}$ СА — radiation doses at a minimum of solar activity, $Д_{макс.}$ СА — radiation doses at the maximum of solar activity, ПЭ — polyethylen.

здоровья космонавтов при размещении их в лунных поселениях.

Выводы:

1. Радиационная опасность окружающей среды для космонавтов Лунных поселений обусловлена высокоэнергетическим протонным галактическим излучением, а также гамма- и гамма-нейтронным солнечным излучением.

2. Противорадиационная защита должна быть многослойной с учётом особенностей коэффициентов ослабления материалов (реголит, алюминий, полиэтилен и др.) для разных видов ионизирующего излучения. Это обеспечит защиту как от прямого, так и от вторичного излучения.

3. Использование многослойной противорадиационной защиты на поверхности Луны (реголит 30 г/см², полиэтилен 2 г/см² и каркас лунного модуля из алюминия 1 г/см²) позволит снизить дозу облучения космонавтов при солнечной вспышке с 3 Зв до 15,2 мЗв. В этом случае даже при сочетании максимальной солнечной активности и солнечной вспышки доза облучения персонала за 14 суточную миссию не превысит 147,96 мЗв при максимально допустимых 300 мЗв.

4. Конструкция лунной станции должна быть многомодульной с разными уровнями противорадиационной защиты для помещений, отличающихся по предназначению (жилые, рабочие, аварийные и др.), а также в зависимости от времени пребывания космонавта в лунном поселении.

5. Организация защиты персонала поселений должна предусматривать широкий комплекс защитных мероприятий как противорадиационной, так и других видов защиты от опасных факторов на лунной поверхности.

Список литературы

1. Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Роганова Т.М. Галактические космические лучи. В кн.: *Модель космоса.* Восьмое изд., Т. 1. Под ред. проф. М.И. Панасюка. М.: Книжный дом Университет; 2007: 62–95.
2. Белов А.В., Курт В.Г. Солнечные космические лучи. В кн.: *Модель космоса.* Восьмое изд., Т. 1. Под ред. проф. М.И. Панасюка. М.: Книжный дом Университет; 2007: 293–313.
3. Ionizing Radiation in Earth's Atmosphere and in Space Near Earth. In: *Wallace Friedberg Kyle Copeland Civil Aerospace Medical Institute Federal Aviation Administration.* Oklahoma City, OK 73125: 1–32.
4. Денисов А.Н., Кузнецов Н.В., Ныммик Р.А., Панасюк М.И., Соболевский Н.М. К проблеме радиационной обстановки на Луне. *Космические исследования.* 2010; 48(6): 524–31.
5. Новиков Л.С. *Космическое материаловедение. НИИ ядерной физики МГУ.* М.: Книжный дом Университет; 2014.
6. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Семёнов В.Т. Оценка оптимальных параметров экранов для защиты электронных систем космических аппаратов от ионизирующих излучений. *Вопросы электромеханики.* 2012; 131(6): 15–8.
7. Безродных И.П. *Факторы космического пространства, влияющие на исследование и освоение Луны.* Москва: ИКИ РАН; 2014.
8. ГОСТ 25645.150-90. *Лучи космические галактические. Модель изменения потоков частиц.* М.: Изд-во Стандартов; 1991.
9. ГОСТ 25645.165-2001. *Лучи космические солнечные. Вероятностная модель потоков протонов.* Госстандарт России. М.: Госстандарт; 2001.
10. Булдаков Л.А., Калистратова В.С. *Радиоактивное излучение и здоровье.* М.: Информ-Атом; 2003.
11. Орлов О.И., Панасюк М.И., Шуршаков В.А. Радиационный фактор при лунных миссиях. *Авиакосмическая и экологическая медицина.* 2019; 53(4): 5–18. https://doi.org/10.21687/0233-528X-2019-53-4-5-18
12. Ушаков И.Б. Космос. *Радиация. Человек (Радиационный барьер в межпланетных полётах).* М.: Научная книга; 2021.
13. Barcellos-Hoff M.H., Blakely E.A., Burma S., Fornace Jr A.J., Gerson S., Hlatky L., Kirsch D.G., Luderer U., Shay J, Wang Y. et al. Concepts and challenges in cancer risk prediction for the space radiation environment. *Life Sci Space Res (Amst).* 2015; 6: 92–103. https://doi.org/10.1016/j.lssr.2015.07.006
14. *Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ).* Пер с англ. /Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана»; 2009.
15. *Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) / СП 2.6.1.758-99.* М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.
16. ГОСТ 25645.215-85 БРЭКАКП. *Нормы безопасности при продолжительности полётов до 3 лет.* М.; 1986.
17. *Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полётах (ООКОКП-2004).* Методические указания МУ 2.6.1.44-03-2004. М.: ИМБП; 2004.

18. Ушаков И.Б., Григорьев Ю.Г., Шафиркин А.В., Шуршаков В.А. Обоснование пределов доз к новому нормативному документу по радиационной безопасности длительных космических полётов на орбитах высотой до 500 км. *Авиакосмическая и экологическая медицина.* 2016; 50(1): 39–54.
19. Wimmer-Schweingruber R.F., Yu J., Böttcher S.I., Zhang S., Burmeister S., Lohf H. et al. The Lunar Lander Neutron and Dosimetry (LND) Experiment on Chang'E 4. *Space Sci.* 2020; Rev. 216 (104). https://doi.org/10.1007/s11214-020-00725-3
20. Schwadron N.A., Baker T., Blake B., Case A.W., Cooper J.F., Golightly M. et al. Lunar radiation environment and space weathering from the Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation (CRaTER). *J. Geophys. Res.* 2012; 117: E00H13.
21. Schwadron N.A., Rahmanifard F., Wilson J., Jordan A.P., Spence H.E., Joyce C.J. et al. Update on the worsening particle radiation environment observed by CRaTER and implications for future human deep-space exploration. *Space Weather.* 2018; 16; 289–303.
22. The effect of the varying distance on the effective shielding by the Moon is included in the dose rates published by the CRaTER team, as discussed on their website. In: *Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation (CRaTER).* https://clck.ru/34YaPK
23. Петров В.М., Митрикас В.Г., Тельцов М.В., Акатов Ю.В., Бенгин В.В., Бондаренко В.А. и др. Радиационная дозиметрия в космическом полете. В кн.: *Модель космоса.* Восьмое изд., Т. 1. Под ред. проф. М.И. Панасюка. М.: Книжный дом Университет; 2007: 642–67.
24. Кондратюк Ю.В. *Завоевание межпланетных пространств.* Под ред. П.И. Иванова. 2-е изд. М.: Изд-во Оборонгиза; 1947.
25. *Пионеры ракетной техники: Кибальчич, Циолковский, Цандер, Кондратюк; избранные труды.* Институт истории естествознания и техники (Академия наук СССР). Ред. Мелькумов Т.М. М.: Наука; 1964. https://clck.ru/34Yaju
26. Аполлон (космическая программа). https://clck.ru/LzeKx
27. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А. и др. Защита космических аппаратов от ионизирующих излучений. В кн.: *НИИЭМ. Конференция «Иосифьяновские чтения 2015», Материалы конференции*: 41–50. https://clck.ru/34YaQd
28. Безродных И.П., Тютнев А.П., Семенов В.Т. *Радиационные эффекты в космосе. Часть 1. Радиация в околоземном космическом пространстве.* М.: ОАО «Корпорация "ВНИИЭМ"»; 2014.
29. Безродных И.П. *Космическая радиация — основная угроза при космических полётах.* Отчёт ИКИ РАН. Москва;2021.
30. Радиационные требования и параметры лунного скафандра. В сб.: *Человек на Луне. Дозы радиации при полете на Луну.* https://clck.ru/34YaQd
31. Кузнецов Н.В., Нымmик Р.А., Панасюк М.И., Денисов А.Н., Соболевский Н.М. Оценка радиационного риска для космонавтов на Луне. *Космические исследования.* 2012; 50(3): 224–8.
32. Spence Harlan E., Golightly Michael J., Joyce Colin J., Looper Mark D., Schwadron Nathan A., Smith Sonya S. et al. Relative contributions of galactic cosmic rays and lunar proton «albedo» to dose and dose rates near the Moon. *Space Weather*. 2013; 11: 643–50. https://doi.org/10.1002/2013SW000995 http://www.d54x.ru/articles/Luna/Luna91.pdf
33. Heiken G., Vaniman D., French B.M. (eds.). The Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1991. http://www.cosmic-rays.ru/moon.aspx
34. Курт В.Г. Солнечные вспышки. В кн.: *Модель космоса.* Восьмое изд., Т. 1. Под ред. проф. М.И. Панасюка. М.: Книжный дом Университет; 2007: 272–93.
35. Wimmer-Schweingruber R.F., Yu J., Böttcher S.I., Zhang S., Burmeister S., Lohf H. et al. Planetary Science. First measurements of the radiation dose on the lunar surface. *Sci. Adv.* 2020; 6: eaaz1334.
36. Ребеко А.Г. Защита людей и космических аппаратов в космосе. *Инженерный журнал: наука и инновации.* 2016, 5: 1–22. https://doi.org/10.18698/2308-6033-2016-05-1496

References

1. Kalmykov N.N., Kulikov G.V., Roganova T.M. Galactic cosmic rays. Kalmykov N.N., Kulikov G.V., Roganova T.M. Galactic cosmic rays. In: *A model of the cosmos.* Eighth ed., Vol. 1. Physical conditions in outer space. Edited by prof. M.I. Panasyuk. M.: UNIVERSITY Book House; 2007: 62–95 (in Russian).
2. Belov A.V., Kurt V.G. Solar cosmic rays. In: *A model of the cosmos.* Eighth ed., Vol. 1. Physical conditions in outer space. Edited by prof. M.I. Panasyuk. M.: UNIVERSITY Book House; 2007: 293–313 (in Russian).
3. Ionizing Radiation in Earth's Atmosphere and in Space Near Earth. In: *Wallace Friedberg Kyle Copeland Civil Aerospace Medical Institute Federal Aviation Administration*. Oklahoma City, OK 73125: 1–32.
4. Denisov A.N., Kuznetsov N.V., Nymmik R.A., Panasyuk M.I., Sobolevsky N.M. On the problem of the radiation situation on the Moon. *Kosmicheskie issledovaniya.* 2010; 48(6): 524–31 (in Russian).
5. Novikov L.S. *Space materials science. Research Institute of Nuclear Physics of Moscow State University.* Moscow: University Book House; 2014 (in Russian).
6. Bezrodnykh I.P., Morozova E.I., Petrukovich A.A., Semenov V.T. Evaluation of optimal parameters of screens for protecting electronic systems of spacecraft from ionizing radiation. *Voprosy' e'lektromexaniki.* 2012; 131(6): 15–8 (in Russian).
7. Bezrodnykh I.P. *Factors of outer space affecting the exploration and exploration of the Moon.* Moscow: ICI RAS; 2014 (in Russian).
8. GOST 25645.150-90. *Cosmic galactic rays. A model for changing particle flows.* Moscow, 1991 (in Russian).
9. GOST 25645.165-2001. *Cosmic solar rays. Probabilistic model of proton fluxes. Gosstandart of Russia.* Moscow; 2001 (in Russian).
10. Buldakov L.A., Kalistratova V.S. *Radioactive radiation and health.* M.: Inform-Atom; 2003 (in Russian).
11. Orlov O.I., Panasiuk M.I., Shurshakov V.A. Radiation factor in lunar missions. *Aviakosmicheskaia i ekologicheskaia meditsina.* 2019; 53(4): 5–18 (in Russian).
12. Ushakov I.B. *Space. Radiation. Human (Radiation barrier in interplanetary flights).* Moscow, Scientific Book; 2021 (in Russian).
13. Barcellos-Hoff M.H., Blakely E.A., Burma S., Fornace Jr A.J., Gerson S., Hlatky L., Kirsch D.G., Luderer U., Shay J., Wang Y. et al. Concepts and challenges in cancer risk prediction for the space radiation environment. *Life Sci Space Res (Amst).* 2015; 6: 92–103. https://doi.org/10.1016/j.lssr.2015.07.006
14. *Publication 103 of the International Commission on Radiation Protection (ICRP).* Moscow; 2009 (in Russian).
15. *Limits of radiation safety (NRS-99/2009) SP. 2.6.1.758-99*. Moscow; 2009 (in Russian).
16. GOST 25645.215-85 BREKAKP. *Safety regulations for the duration of flights up to 3 years.* Moscow; 1986 (in Russian).
17. *Limits of cosmonauts' irradiation for orbital near-earth space flights.* Workbook MU 2.6.1.44-03-2004. Moscow; 2004 (in Russian).
18. Ushakov I.B., Grigoriev Yu.G., Shafirkin A.V., Shurshakov V.A. Substantiation of dose limits for a new normative document on radiation safety of long-duration space missions at orbit altitudes of up to 500 km. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina.* 2016; 50(1): 39–54 (in Russian).
19. Wimmer-Schweingruber R.F., Yu J., Böttcher S.I., Zhang S., Burmeister S., Lohf H. et al. The Lunar Lander Neutron and Dosimetry (LND) Experiment on Chang'E 4. *Space Sci.* 2020; Rev. 216 (104). https://doi.org/10.1007/s11214-020-00725-3

20. Schwadron N.A., Baker T., Blake B., Case A.W., Cooper J.F., Golightly M. et al. Lunar radiation environment and space weathering from the Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation (CRaTER). *J. Geophys. Res.* 2012; 117: E00H13.
21. Schwadron N.A., Rahmanifard F., Wilson J., Jordan A.P., Spence H.E., Joyce C.J. et al. Update on the worsening particle radiation environment observed by CRaTER and implications for future human deep-space exploration. *Space Weather.* 2018; 16; 289–303.
22. The effect of the varying distance on the effective shielding by the Moon is included in the dose rates published by the CRaTER team, as discussed on their website. In: *Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation (CRaTER).* https://clck.ru/34YaPK
23. Petrov V.M., Mitrikas V.G., Teltsov M.V., Akatov Yu.V., Bengin V.V., Bondarenko V.A. et al. Radiation dosimetry in space flight. In: *A model of the cosmos.* Eighth ed., Vol. 1. Edited by prof. M.I. Panasyuk. M.: UNIVERSITY Book House; 2007: 642–67 (in Russian).
24. Kondratyuk Yu.V. *The conquest of interplanetary spaces.* Edited by P. I. Ivanov. 2nd ed. Moscow: Oborongiz Publishing House; 1947 (in Russian).
25. *Pioneers of rocket technology: Kibalchich, Tsiolkovsky, Zander, Kondratyuk; selected works.* Institute of the History of Natural Science and Technology (Academy of Sciences of the USSR). Ed. Melkumov T.M. M.: Nauka; 1964. https://clck.ru/34Yaju (in Russian).
26. Apollo (space program). https://clck.ru/LzeKx (in Russian).
27. Bezrodnykh I.P., Morozova E.I., Petrukovich A.A. et al. Protection of spacecraft from ionizing radiation. In: *NIIEM. Conference «Iosifian Readings 2015», Conference materials*. 41–50 http://niiem.ru/images/n/docs/conf/conf03/08.pdf (in Russian).
28. Bezrodnykh I.P., Tyutnev A.P., Semenov V.T. *Radiation effects in space. Part1. Radiation in near — Earth space.* Moscow: JSC«Corporation «VNIIEM»»; 2014 (in Russian).
29. Bezrodnykh I.P. *Space radiation is the main threat during space flights.* ICI RAS report. Moscow; 2021 (in Russian).
30. Radiation requirements and parameters of the lunar spacesuit. In: *Man on the Moon. Radiation doses during a flight to the Moon.* https://clck.ru/34YaQd (in Russian).
31. Kuznetsov N.V., Nymmik R.A., Panasyuk M.I., Denisov A.N., Sobolevsky N.M. Assessment of radiation risk for astronauts on the Moon. *Kosmicheskie issledovaniya.* 2012; 50(3): 224–8 (in Russian).
32. Spence Harlan E., Golightly Michael J., Joyce Colin J., Looper Mark D., Schwadron Nathan A., Smith Sonya S. et al. Relative contributions of galactic cosmic rays and lunar proton «albedo» to dose and dose rates near the Moon. *Space Weather.* 2013; 11: 643–50. https://doi.org/10.1002/2013SW000995 http://www.d54x.ru/articles/Luna/Luna91.pdf
33. Heiken G., Vaniman D., French B.M. (eds.). *The Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon.* Cambridge University Press, Cambridge, UK; 1991. http://www.cosmic-rays.ru/moon.aspx.
34. Kurt V.G. Solar flares. In: *A model of the cosmos.* Eighth ed., Vol. 1. Physical conditions in outer space. Edited by prof. M.I. Panasyuk. M.: UNIVERSITY Book House; 2007: 62–95 (in Russian).
35. Wimmer-Schweingruber R.F., Yu J., Böttcher S.I., Zhang S., Burmeister S., Lohf H.et al. Planetary Science. First measurements of the radiation dose on the lunar surface. *Sci. Adv.* 2020; 6: eaaz1334.
36. Rebeko A.G. Protection of people and spacecraft in space. *Inzhenerny`j zhurnal: nauka i innovacii.* 2016; 5: 1–22. https://doi.org/10.18698/2308-6033-2016-05-1496 (in Russian).