

И.В. Иванов^{1,2}, В.И. Бурмистров², Е.И. Маткевич³

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ПОЛЕТАХ НА ЛУНУ

¹ Научно-исследовательский институт медицины труда им. академика Н.Ф. Измерова, Москва

² Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва

³ Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

Контактное лицо: И.В. Иванов, e-mail: ivanov-iv@yandex.ru

РЕФЕРАТ

Введение: Недостаточно изученным остается вопрос оценки особенностей факторов, влияющих на формирование доз облучения космонавтов при нахождении на орбите Луны и на её поверхности, что важно для обеспечения радиационной безопасности космонавтов в лунных миссиях.

Цель: Проанализировать факторы, влияющие на формирование дозы облучения космонавтов на этапе нахождения космического аппарата на орбите Луны и посадочного модуля на её поверхности.

Материал и методы: Проанализированы и обобщены особенности по уровням дозовой нагрузки на космонавтов на этапах орбиты Луны и на поверхности Луны, использованы расчетные методы с учетом орбиты обращения космического аппарата (КА) вокруг Луны, противорадиационных свойств материалов посадочного модуля и лунного скафандра и времени нахождения в них в период краткосрочной лунной миссии.

Результаты: Суммарные дозы облучения за лунную часть миссии, рассчитанные по данным дозиметрических измерений в 2009 и 2018–2019 г.г. с низкой солнечной активностью (СА) (без учета дозы облучения на траектории полета от Земли к Луне и обратно), составляют для дежурного космонавта, пребывающего в космическом аппарате (КА) на орбите Луны, от 19,5 до 23,2 мЗв, для космонавта экипажа высадки на поверхность Луны – от 22,7 до 24,0 мЗв, в зависимости от массовой толщины радиационной защиты. Увеличение защиты посадочного модуля в эквиваленте алюминия с 1,5 до 3–5 г/см² и лунного скафандра в эквиваленте алюминия с 0,2 до 0,5–1 г/см² позволит не более чем в 1,3 раза снизить общую дозу облучения космонавта за период 14-суточного пребывания на поверхности Луны в период минимальной солнечной активности. Результаты свидетельствуют, что с целью минимизации доз радиации, которые получают космонавты в ходе лунной миссии, важно учитывать прогноз СА для оптимизации времени старта космического аппарата в «окна» с минимальными уровнями радиационного воздействия.

Заключение: При прогнозировании уровней радиационной опасности для космонавтов при краткосрочной лунной миссии необходимо оценивать уровни воздействия космического излучения как на орбите Луны в зависимости от окололунной траектории космического аппарата, так и на поверхности Луны с учетом времени пребывания в лунном посадочном модуле и в лунном скафандре, а также уровней СА. Проанализированные особенности формирования доз облучения космонавтов при нахождении на орбите Луны и на её поверхности важно учитывать при прогнозировании временных пределов лунной миссии, радиационной защиты космонавтов и их соответствия нормативным пределам облучения.

Ключевые слова: космические полеты, Луна, космонавты, ионизирующие излучения, дозы облучения, противорадиационная защита, лунный модуль, скафандр

Для цитирования: Иванов И.В., Бурмистров В.И., Маткевич Е.И. Оценка радиационной обстановки при кратковременных полетах на луну // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2024. Т. 69. № 1. С. 50–60. DOI:10.33266/1024-6177-2024-69-1-50-60

I.V. Ivanov^{1,2}, V.I. Burmistrov¹, E.I. Matkevich³

Assessment of the Radiation Situation during Short-Term Flights to the Moon

¹ N.F. Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, Russia

² I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia

³ A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

Contact person: I.V. Ivanov, e-mail: ivanov-iv@yandex.ru

ABSTRACT

Background: The issue of assessing the features of factors affecting the formation of radiation doses of astronauts while in orbit of the Moon and on its surface remains insufficiently studied, which is important for ensuring the anti-radiation safety of astronauts on lunar missions.

Purpose: To analyze the factors influencing the formation of the radiation dose of astronauts at the stage of finding the spacecraft in orbit of the Moon and the lander on its surface.

Material and methods: The features of the dose load levels on astronauts at the stages of the Moon's orbit and on the Moon's surface are analyzed and generalized, calculation methods are used taking into account the orbit of the spacecraft around the Moon, the anti-radiation properties of the materials of the lander and spacesuit and the time spent in them during a short-term lunar mission.

Results: The total radiation doses of astronauts for 14 days, calculated according to dosimetric measurements during the years of low solar activity (2009 and 2018–2019), are 19.5–23.2 mSv for astronauts staying in a spacecraft in lunar orbit, and from 22.7 to 24.0 mSv for astronauts on the Lunar surface, depending on the mass thickness of the protection at the maximum permissible 250 mSv for 1 month. An

increase in the mass thickness of the anti-radiation protection of the lander in the equivalent of aluminum from 1.5 to 3-5 g/cm² and the lunar spacesuit in the equivalent of aluminum from 0.2 to 0.5–1 g/cm² will reduce the total radiation dose of astronauts no more than 1.3 times during a 14-day stay on the surface of the moon. The results indicate that in order to minimize the radiation doses that astronauts receive during a lunar mission, it is important to take into account the forecast of solar activity in order to optimize the launch time of the spacecraft in the «windows» with minimal levels of radiation exposure.

Conclusion: When predicting radiation hazard levels for astronauts during a short-term lunar mission, it is necessary to assess the levels of exposure to cosmic ionizing radiation both in the orbit of the Moon, depending on the lunar trajectory of the spacecraft, and on the surface of the Moon, taking into account the time spent in the lunar module and in a spacesuit, as well as levels of solar activity. It is important to take into account the analyzed features of the formation of cosmonauts' radiation doses while orbiting the Moon and on its surface when predicting the time limits of the lunar mission, anti-radiation protection of astronauts and their compliance with the regulatory limits of exposure.

Keywords: *space flights, the moon, astronauts, ionizing radiation, radiation doses, anti-radiation protection, lunar module, spacesuit*

For citation: Ivanov IV, Burmistrov VI, Matkevich EI. Assessment of the Radiation Situation during Short-Term Flights to the Moon. Medical Radiology and Radiation Safety. 2024;69(1):50–60. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2024-69-1-50-60

Введение

Многие исследования посвящены оценке доз облучения космонавтов при орбитальных полётах вокруг Земли, как в космической станции [1–6], так и при нахождении в скафандре при внекорабельной деятельности [7], в том числе с применением методов математического моделирования [8–10]. Однако недостаточно изученным остается вопрос оценки особенностей факторов, влияющих на формирование доз облучений космонавтов при нахождении на орбите Луны и на её поверхности, что важно для обеспечения противорадиационной безопасности космонавтов в лунных миссиях [11].

Цель исследования – проанализировать факторы, влияющие на формирование дозы облучения космонавтов на этапе нахождения на орбите Луны и на её поверхности.

Материал и методы

В ходе исследования были проанализированы и обобщены имеющиеся сведения по уровням дозовой нагрузки на космонавтов на этапах полета на орбитах вокруг Луны и на поверхности Луны, использованы расчетные методы с учетом противорадиационных свойств материалов космического аппарата (КА), лунного посадочного модуля (ПМ) и лунного скафандра (ЛС) и времени нахождения в них в период краткосрочной лунной миссии.

Для оценки доз облучения на основе прямых измерений использованы результаты, полученные со спутников на геостационарных орбитах, на орбите Луны и на лунной поверхности, результаты математического моделирования, основанные на статистических данных многолетних наблюдений за космической радиационной обстановкой в условиях минимума и максимума 11-летних циклов солнечной активности (СА). При этом расчеты поглощенной дозы радиации с заданным доверительным уровнем осуществляются для телесного угла 4π стерадиан внутри сферы из алюминия с помощью стандартных программ COSRAD и SPENVIS. При расчете задается доверительный уровень как степень достоверности того, что реальные значения дозы не будут превышать рассчитанные.

Эквивалентную дозу ионизирующего излучения рассчитывали как произведение поглощенной дозы излучения в биологической ткани на коэффициент качества (взвешивающий коэффициент) этого излучения. Коэффициент качества ионизирующего излучения зависит от линейной передачи энергии (ЛПЭ) заряженных частиц в воде, его значения (для линейной передачи энергии в воде) были приведены в ГОСТ 15484-81 [12] и составляли: 1 (≤ 35 кэВ/мкм), 2 (7,0 кэВ/мкм), 5 (23 кэВ/мкм), 10 (53 кэВ/мкм), 20 (≥ 175 кэВ/мкм).

Значение коэффициента качества для промежуточных значений ЛПЭ находят путем линейного интерполяции между указанными значениями коэффициента для данного интервала ЛПЭ.

Согласно СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)» [13], взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения при расчете эквивалентной дозы (W_R) – это используемые в радиационной защите множители поглощенной дозы, учитывающие относительную эффективность различных видов излучения (R) в индуцировании биологических эффектов. Согласно [13], W_R составляют для фотонов любых энергий – 1, электронов и мюонов любых энергий – 1, нейтронов с энергией менее 10 кэВ – 5, от 10 кэВ до 100 кэВ – 10, от 100 кэВ до 2 МэВ – 20, от 2 МэВ до 20 МэВ – 10, более 20 МэВ – 5, для протонов с энергией более 2 МэВ кроме протонов отдачи – 5, альфа-частиц, осколков деления и тяжелых ядер – 20.

Коэффициенты качества космического излучения определяются сложной структурой космического излучения как по его многокомпонентному составу, так и по энергетическим характеристикам, которые постоянно изменяются во времени в зависимости от СА, уровней галактического излучения на данный момент измерений, зависят от высоты орбиты станции, места расположения дозиметра на космическом корабле, глубины залегания критического органа или ткани и т.д. Так, оценка среднемесячных значений коэффициента качества космического излучения в течение полугодия на космической станции показала, что они меняются в зависимости от цикла СА на 35 %, от глубины залегания критического органа – на 25 % и от места на станции – на 25 % [10]. Поэтому при расчете эквивалентных доз по поглощенным многие авторы используют усредненные интегральные значения коэффициента качества для определенной области космического пространства [9, 14–16]. Так, с учетом отличий космического излучения по своему составу и по энергетическому распределению различных его компонентов средние значения взвешивающих коэффициентов W_R при переходе от поглощенной к эквивалентной дозе для условий полета в космическом пространстве на орбите Луны и на её поверхности соответствуют значениям $4,3 \pm 0,7$ [16]. Отдельные авторы для суммарного эквивалента дозы галактического излучения на кожу на поверхности Луны W_R оценивали в 7,7 [14].

В качестве исходных значений для расчетов мощности дозы излучения на орбитах КА от заряженных частиц (Дз) использована мощность дозы излучения на поверхности Луны $10,2 \pm 0,9$ мкГр/час, зарегистрированная детекторами для заряженных частиц солнечных (СКЛ)

и галактических (ГКЛ) космических лучей посадочной платформы китайской аппаратуры «Chang'E-4» [16]. При расчете доз на разных расстояниях от Луны учитывали увеличение мощности дозы излучения с удалением от поверхности Луны за счет уменьшения эффекта экранирования от ГКЛ Луной, описанное формулой (1) [17], по результатам анализа показаний околорунной радиационной среды прибором CRaTER на борту лунного разведывательного орбитального аппарата (LRO). Основу CRaTER составляли два кремниевых твердотельных детектора D₁-D₂ (тонкий и толстый), предназначенные для измерения эффектов ионизационных потерь энергии в веществе частицами СКЛ и ГКЛ соответственно. Для такого пересчета использовали зависимость (1) мощности дозы от расстояния над поверхностью Луны [17]:

$$D_3 \text{ на орбите} = D_3 \text{ на поверхности Луны} / F, \quad (1)$$

где D₃ – доза от заряженных частиц, мкГр;

$$F = 1/(1 + \sqrt{b}) \quad (2)$$

$$b = 1 - [R/(R+h_1)] \times [R/(R+h_2)], \quad (3)$$

где h₁, h₂ – высота КА над поверхностью Луны, R – радиус Луны.

Для круговой орбиты КА с радиусом h=110 км при радиусе Луны R=1738 км:

$$b = 1 - [1738/(1738+110)] \times [1738/(1738+110)] = 0,1155 \quad (4)$$

$$F = 0,74635; D_3 = 10,2 \text{ мкГр/ч} / F = 13,6674 \text{ мкГр/ч} \quad (5)$$

Для эллиптической орбиты КА с минимальным удалением от поверхности Луны h₁=110 км, максимальным удалением от поверхности Луны h₂=310 км:

$$b = 1 - [1738/(1738+310)] \times [1738/(1738+110)] = 0,44931 \quad (6)$$

$$F = 0,69; D_3 = 10,2 \text{ мкГр/ч} / F = 14,7826 \text{ мкГр/ч} \quad (7)$$

Дозу незаряженных частиц (D_n) вычисляли исходя из имеющихся данных дозиметрических измерений CRaTER для альбедо нейтральных частиц на поверхности Луны – D_n=3,1±0,5 мкГр/ч, что составляло 23,8 % от суммарной дозы излучения [16, 18], а также данных детекторов со спутника LRO на высоте 50 км над Лунной D_n=1,185 мкГр/ч, что составляло 8,6 % от суммарной дозы [14, 15]. Методом линейной интерполяции по обратно пропорциональной зависимости были вычислены D_n на орбитах КА при различном удалении от поверхности Луны.

Коэффициенты ослабления дозы излучения для защиты различной массовой толщины получены из расчетных значений поглощенной дозы радиации с доверительным уровнем 99 % от частиц СКЛ и ГКЛ в различные годы 25-го цикла СА [17]: для минимума СА 2019 г. кривая 1 из рис. 1, для максимума СА 2024 г. кривая 4 из рис. 1, для минимума СА 2030 г. кривая 4 из рис. 2.

Результаты и обсуждение

В связи с тем, что у Луны отсутствует магнитное поле и нет атмосферы, характер ионизирующего излучения на лунной орбите и на поверхности значительно отличается от радиационной обстановки, характерной для поверхности Земли. Главную опасность для космонавтов при перелёте к Луне и при работе на поверхности Луны представляет ионизирующее излучение СКЛ и ГКЛ [19–22].

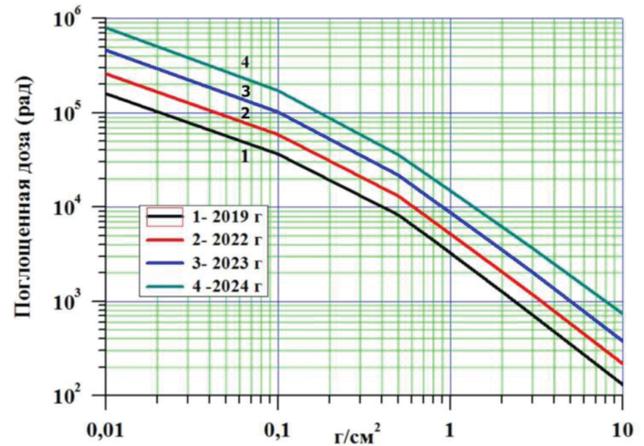


Рис. 1. Расчетные значения поглощенной дозы радиации на орбите Луны по годам фазы роста солнечной активности в 25-м цикле [17]
Fig. 1. Calculated value of the absorbed radiation dose in the orbit of the Moon by the years of the phase of the growth of solar activity in the 25-th cycle [17]

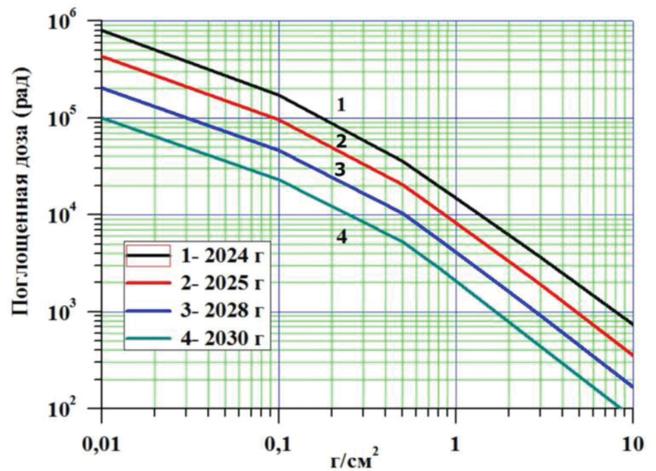


Рис. 2. Расчетные значения поглощенной дозы радиации на орбите Луны по годам фазы спада солнечной активности в 25-м цикле [17]
Fig. 2. Calculated value of the absorbed radiation dose in the orbit of the Moon by the years of the phase of the decline of solar activity in the 25-th cycle [17]

Первичные ГКЛ состоят из потоков высокоэнергетических заряженных частиц из глубины нашей Вселенной – протонов, альфа-частиц, ядер химических элементов от гелия до ядер более тяжелых элементов вплоть до урана, с высокими энергиями – от 10⁷–10⁸ эВ (10–100 МэВ) до 10²⁰ эВ (10¹⁰ ГэВ) [15, 19, 23–25]. 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 тяжелых элементов, электронов) в межпланетное пространство. Энергия СКЛ составляет от нескольких МэВ до нескольких ГэВ [20, 26].

При краткосрочной (до 14 сут) лунной миссии расчет доз облучения членов экипажа исходит из того, что часть экипажа опустится на поверхность Луны в лунном посадочном модуле, будет находиться в нём и периодически выходить на поверхность Луны в скафандрах для выполнения работ, дежурный космонавт экипажа останется в КА на орбите Луны для обеспечения его функционирования и поддержания связи с посадочным модулем.

Оценка радиационного воздействия на космонавтов на орбите Луны

После старта с Земли и достижения Луны орбита КА имеет особенности в зависимости от этапа полёта [27, 28]:

1. Торможения в КА (эллиптическая орбита, минимальное удаление 110 км, максимальное удаление 310 км, период обращения около 2,2 ч) – торможение КА при подлете к Луне и переход на орбиту обращения вокруг Луны.
2. Парковочная в КА (круговая орбита, $R = 110$ км, период обращения около 2 ч), из 404 ч 26 ч – подготовка к спуску ПМ, проверки оборудования, переход в ПМ и др., 336 ч – наблюдение за спуском и прилунением ПМ, ожидание в КА на орбите, 42 ч – сопряжение траекторий КА и взлетной ступени (ВС) при её приёме с Луны и подготовка к старту к Земле.
3. Парковочная в ПМ или ВС (круговая орбита, $R = 110$ км, период обращения около 2 ч), из 16 ч общего времени на этой орбите 8 ч занимают подготовка к спуску ПМ к Луне, 8 ч – работы в ВС после возвращения с Луны и стыковки ВС с КА.
4. Посадочная в ПМ / взлетная в ВС (эллиптическая орбита, минимальное удаление 15 км, максимальное удаление 110 км, период обращения около 48 мин), из 10,2 ч общего времени на этой орбите 5,1 ч занимают работы на спуске ПМ после его отстыковки от КА и прилунении, 5,1 ч – работы после взлета ВС с Луны (сопряжение траектории ВС с КА, подготовка КА к стыковке с ВС и стыковка КА с ВС, переход космонавтов из ВС в КА и др.). Эллипсоидная форма посадочной орбиты ПМ и взлетной орбиты ВС позволяет на коротком радиусе максимально приближаться к поверхности Луны для посадки лунного посадочного модуля, а также при обратном возвращении ВС взлетать с поверхности Луны, достигая парковочной (круговой) орбиты КА вокруг Луны и стыковаться с КА.

Старт КА с орбиты Луны к Земле осуществляется с круговой орбиты радиусом 110 км после стыковки ВС с КА, подготовки и сброса ВС в открытый космос, отдыха экипажа, а также с учетом ожидания «Окна старта» по баллистическим параметрам полёта.

При расчетах дозы облучения космонавтов на орбитах полета вокруг Луны (табл. 1) учитывали, что на формирование дозы облучения оказывают влияние две противоположные закономерности [14, 18]: с отдалением от поверхности Луны уровень излучения возрастает ввиду уменьшения эффекта экранирования Луной от ГКЛ и СКЛ, однако уменьшается доля излучения за счет альbedo от поверхности Луны. Это учтено при расчетах (табл. 1). Как видно, с увеличением расстояния от Луны вклад дозы от заряженных частиц СКЛ и ГКЛ увеличивается с 76,2 до 95,5 % от общей дозы излучения, вклад дозы от альbedo нейтральных частиц уменьшается с 23,8 до 4,5 %. При этом суммарная мощность дозы от ГКЛ, СКЛ и лунного альbedo с увеличением радиуса орбит КА вокруг Луны увеличивается с 14,01 до 18,7 мкГр/ч. Исходя из этого были получены значения эквивалентной дозы облучения космонавта на орбите Луны для условий минимума солнечной активности 24 и 25 циклов СА с учетом времени их пребывания на разных орбитах (табл. 2). Расчеты эквивалентной дозы по поглощенной выполнены при $W_R = 5$ [16], исходя из того, что излучение от СКЛ и ГКЛ представляет собой очень сложную и постоянно меняющуюся во времени и в пространстве смесь заряженных и нейтральных частиц [17]. Как видно (табл. 2), дозы облучения дежурного космонавта за время пребывания на орбитах вокруг Луны при защите КА в эквиваленте $A1\ 10 / 20 / 30$ г/см² составят 23,2 / 19,5 / 18,3 мЗв соответственно, дозы облучения космонавта экипажа высадки на поверхность Луны за время пребывания на орбитах вокруг Луны при защите КА в эквиваленте $A1\ 10 / 20 / 30$ г/см² и ПМ и ВС в эквиваленте $A1\ 1,5 / 3,0 / 5,0$ г/см² составят 4,4 / 3,9 / 3,7 мЗв соответственно.

Оценка радиационного воздействия на космонавтов на поверхности Луны

На поверхности Луны радиационное воздействие обусловлено заряженными частицами различных энергий от галактических космических лучей, потока солнечных частиц, а также вторичным (тормозным) излучением (лунное альbedo). Вторичное излучение возникает от взаимодействия первичного ионизирующего излучения от протонов и более тяжелых ядер, рентгеновского и

Таблица 1

Расчет дозы облучения космонавта на орбите Луны для условий минимума солнечной активности (24–25 солнечных циклы) при разных вариантах орбиты без учета защиты

Calculation of the radiation dose of an astronaut in the orbit of the Moon for the conditions of minimum solar activity with different orbit variants without taking into account protection

Высота расчетной орбиты КА над поверхностью Луны (мин/макс), км	F – Коэфф. экранирования Луной излучения от СКЛ и ГКЛ	D _н (от заряженных частиц СКЛ и ГКЛ)		D _н (от нейтральных частиц альbedo)		D _{сум} от СКЛ, ГКЛ и альbedo на орбитах КА, мкГр/ч
		На поверхности Луны, мкГр/ч	На орбитах КА с учетом F, мкГр/ч (% от D _{сум})	На поверхности Луны, мкГр/ч	На орбитах КА, мкГр/ч (% от D _{сум})	
Торможения 1966 г. (эллиптическая*) (189 / 1867)	0,5708	10,2±0,9	17,87 (95,5 %)	3,1±0,5	0,84 (4,5 %)	18,70
Торможения в КА (эллиптическая**) (110 / 310)	0,6900	10,2±0,9	14,78 (93,6 %)	3,1±0,5	1,01 (6,4 %)	15,59
Парковочная в КА, ПМ и ВС (круговая**) (110/110)	0,7463	10,2±0,9	13,67 (92,6 %)	3,1±0,5	1,09 (7,4 %)	14,76
Посадочная в ПМ / взлетная в ВС (эллиптическая**) (15 / 110)	0,7936	10,2±0,9	12,85 (91,7 %)	3,1±0,5	1,16 8,3 %	14,01
На поверхности Луны (0 км)	1	10,2±0,9	10,2 (76,2 %)	3,1±0,5	3,1 (23,8 %)	13,3

Примечание: * орбита космического аппарата США Lunar Orbiter вокруг Луны 14 августа 1966 [Wade M. Lunar Orbiter. Encyclopedia Astronautica. https://en.wikipedia.org/wiki/Lunar_orbit]; ** орбиты космических аппаратов США Аполлон-8, Аполлон-10 и Аполлон-17 [27, 28]

Таблица 2

Расчет дозы облучения космонавтов на орбите Луны за 14-суточную миссию для условий минимума солнечной активности при разных вариантах орбиты и противорадиационной защиты
Calculation of the radiation dose of an astronaut in orbit of the Moon for a 14-day mission for the conditions of minimum solar activity for different orbit and radiation protection variants

Орбита КА	Параметры орбитального полета вокруг Луны (без защиты)					Поглощенная доза за этап, мкГр (Суммарная эквивалентная доза, мЗв)			
	Расчетное удаление от поверхности Луны (мин/макс), км	Мощность дозы излучения на орбите, мкГр/час	Доза за 1 оборот вокруг Луны, мкГр	Кол-во оборотов вокруг Луны по орбите	Общее время этапа, час	Без защиты	Защита А1 КА10 г/см ² (K _{оцл} =0,76) ПМ 1,5 г/см ² , (K _{оцл} =0,88)	Защита А1 КА 20 г/см ² (K _{оцл} =0,64) ПМ 3,0 г/см ² (K _{оцл} =0,82)	Защита А1 КА 30 г/см ² (K _{оцл} =0,6) ПМ 5,0 г/см ² (K _{оцл} =0,8)
Дежурный космонавт в КА на орбите Луны									
Торможения в КА (эллиптическая)	110/310	15,59	33,68	4	8,64	134,7	102,4 (КА)	86,2(КА)	80,8КА)
Парковочная в КА (круговая)	110/110	14,76	29,52	202 13/168/21*	404	5963,0	4531,9 (КА)	3816,3 (КА)	3577,8 (КА)
Суммарная поглощенная доза (в КА), мкГр						6097,8	4634,3	3902,6	3658,7
Суммарная эквивалентная доза, мЗв (W_R=5)						30,5	23,2	19,5	18,3
Космонавт экипажа высадки на поверхность Луны									
Торможения в КА (эллиптическая)	110/310	15,59	33,68	4	8,64	134,7	102,4 (КА)	86,2 (КА)	80,8 (КА)
Парковочная в КА (круговая)	110/110	14,76	29,52	20 10/10**	40,0 20/20**	590,4	448,7 (КА)	377,9 (КА)	354,2 (КА)
Парковочная в ПМ или ВС (круговая)	110/110	14,76	29,52	8 4/4**	16,0 8/8**	236,2	207,8 (ПМ/ВС)	193,6 (ПМ/ВС)	188,9 (ПМ/ВС)
Посадочная в ПМ / взлетная в ВС (эллиптическая)	15/110	14,01	11,91	12 6/6**	10,2 5,1/5,1**	142,9	125,8 (ПМ/ВС)	117,2 (ПМ/ВС)	114,3 (ПМ/ВС)
Суммарная поглощенная доза (в КА+ПМ+ВС), мкГр						1104,2	884,7	774,9	738,3
Суммарная эквивалентная доза, мЗв (W_R=5)						5,5	4,4	3,9	3,7

Примечание: КА – космический аппарат, ПМ – посадочный модуль, ВС– взлетная ступень, * 13 оборотов – подготовка к отделению ПМ от КА, 168 оборотов – дежурный режим КА на орбите Луны, 21 оборот – стыковка КА и ВС и подготовка к старту КА с орбиты Луны к Земле; ** – при работах в ПМ на орбите Луны и при посадке ПМ на Луну /при старте ВС с Луны к КА и работах в ВС на орбите Луны

γ-излучения ГКЛ и СКЛ при прохождении их через вещество [14, 19, 20, 22] и способно проникать в материалы защиты значительно глубже первичного излучения.

При расчетах использованы данные оценки накопленной дозы ионизирующего излучения на борту посадочного модуля миссии Chang'E-4, на котором были установлены десять специальных твердотельных кремниевых детекторов [16, 18]. Разделив поглощенную дозу 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 поглощенной дозы от заряженных частиц 10,2 мкГр/ч в кремнии [16, 18]. После пересчета на воду (в сравнимый биологический тканеэквивалент) путем умножения этого значения на коэффициент 1,3 [16, 18] мощность поглощенной дозы в сутки составляет 10,2 мкГр/ч × 1,3 × 24 ч = 318 мкГр/сут.

Мощность эквивалентной дозы от заряженных частиц определена путём умножения на W_R, равный 4,3 [16, 18] и составляет 1367 мкЗв/сут.

По аналогичному алгоритму проведен расчет мощности дозы радиации от нейтральных (незаряженных) компонентов, к которым относятся рентгеновское излучение Солнца, нейтроны и гамма-излучение от вторичного лунного альbedo: 3,1 мкГр/ч × 1,3 × 24 ч = 97 мкГр/сут.

При переводе поглощенной дозы от нейтрального компонента излучения в эквивалентную использовано значение W_R=2,5 [15, 29–32]: 97 мкГр/сут × 2,5 = 243 мкЗв/сут.

Суммарная мощность эквивалентной дозы радиации на открытой поверхности Луны от заряженных частиц, рентгеновского и гамма-излучения, а также незаряжен-

ного компонента различных энергий СКЛ, ГКЛ составила 1610 мкЗв/сут (1,61 мЗв/сут).

Это согласуется с данными NASA [11], по которым при пребывании на Луне от 6 до 12,5 сут 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. По данным дозиметрических измерений китайской автоматической станции Chang'E-4 на Луне в 2019 г. мощность дозы на поверхности составляла около 60 мкЗв/ч [16, 18], тогда как на поверхности Земли мощность дозы, в основном, не превышает 0,20 мкЗв/ч.

Суммарная мощность эквивалентной дозы радиации 1,61 мЗв/сут использована в качестве исходной величины средней суточной дозы для человека в условиях пребывания на лунной поверхности без радиационной защиты, тогда за 14 сут доза без защиты составит 22,5 мЗв. Данные по дозам облучения в ПМ и ВС за время нахождения на поверхности Луны при минимуме СА и отсутствии солнечных вспышек приведены в табл. 3. В то же время, по данным [33] при максимуме СА доза на поверхности Луны составила 10,21 мЗв/сут, а при вспышках солнечной активности в этот период прогнозируемые значения доз могут достигать 3–5 Гр за вспышку [15]. Так поглощенная доза за солнечную вспышку 11.05.1959 в открытом космосе составила 6 Гр (рис. 3) [17, 34, 35], на поверхности Луны это соответствовало бы 3 Гр с учетом того, на поверхности Луны доза в 2 раза меньше, чем в открытом космосе за счет эффекта экранирования Луны от галактического излучения. При учете взвешивающего коэффициента излучения W_R =5 эквивалентная доза составила бы 15 Зв. Это обуслав-

Таблица 3

Эквивалентная доза облучения космонавта за период пребывания на поверхности Луны за защитой различной толщины посадочного модуля (ПМ), лунного скафандра (ЛС) в различные периоды максимума (СА макс) и минимума (СА мин) солнечной активности
 The equivalent radiation dose of an astronaut during the period of stay on the surface of the Moon behind the protection of various thicknesses of the lander (PM), lunar spacesuit (LS) during different periods of maximum (CA макс) and minimum (CA мин) solar activity

Толщина защиты, г/см ² / К _{ослабления} **	Эквивалентные дозы (мЗв) в период пребывания 14 сут * на орбите и на поверхности Луны в периоды солнечной активности							
	2018–2019 г. СА мин				2024 г. СА макс		2030 г. СА мин	
	По фактическим измерениям		Статистическая модель		Статистическая модель		Статистическая модель	
	мЗв / сут	за 14 сут *	мЗв / сут	за 14 сут *	мЗв / сут	за 14 сут *	мЗв / сут	за 14 сут *
Открытая Луна	1,61	22,5	9863,0	138082,2	49315,1	690410,9	9863,0	138082,2
ПМ 1,5 / 0,85	1,37	12,8	123,3	1150,6	616,4	5753,2	92,5	863,0
ПМ 3,0 / 0,81	1,31	12,2	43,2	402,7	234,2	2186,2	26,5	247,4
ПМ 5,0 / 0,78	1,26	11,8	20,3	189,8	110,9	1035,6	14,2	132,3
ЛС 0,2 / 0,9	1,45	6,8	1232,9	5753,4	5547,9	25886,7	801,4	3739,2
ЛС 0,5–1,0 / 0,88	1,42	6,6	203,4	949,2	924,7	4314,5	123,3	575,3

Примечание: * за время миссии исходили из пребывания на поверхности Луны 14 сут – в ПМ по 16 ч в день (всего 9 сут 8 ч = 9,33 сут) и в ЛС по 8 ч в день (всего 4 сут 16 ч = 4,67 сут); ** – рассчитан по значениям кривой 2 на рис. 4.

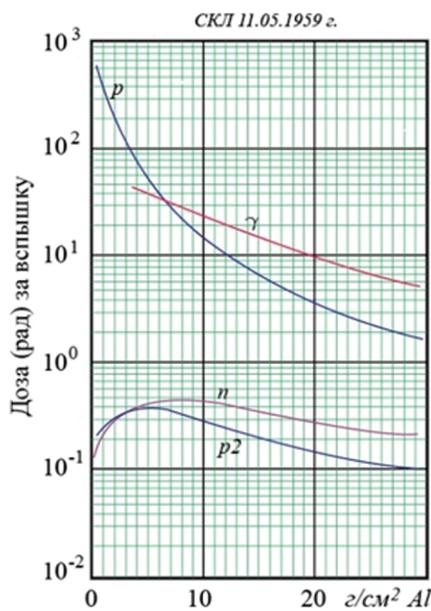


Рис. 3. Зависимость полной поглощённой дозы радиации за солнечную вспышку 11.05.1959 от первичного излучения (p-протоны) и вторичного (p2-протоны, n-нейтроны, γ-гамма-излучение) за экранами из алюминия [17]. По оси абсцисс – массовая толщина защитного экрана, г/см², по оси ординат – доза за вспышку (рад)

Fig. 3. Dependence of the total absorbed radiation dose for the solar flare of 05/11/1959 on primary radiation (p-protons) and secondary radiation (p2-protons, n-neutrons, gamma-gamma radiation) behind aluminum screens [17]. On the abscissa axis – the mass thickness of the protective screen, g / cm², on the ordinate axis – the dose per flash (rad)

ливают необходимость строительства лунных модулей с достаточной радиационной защитой.

При анализе доз облучения космонавтов на поверхности Луны могут рассматриваться два подхода с учетом различий в уровнях радиации при минимальной и максимальной СА: 1) по фактическим измерениям на основании замеров доз излучения датчиков китайского аппарата [18], 2) на основании данных статистического моделирования доз излучения [17]. Исходя из этого, в табл. 3 приведены фактические и расчетные значения эквивалентной дозы в ПМ и в ЛС, создаваемой на поверхности Луны, при различных уровнях защиты из Al, в периоды минимума и максимума СА.

Исходными данными для оценки поглощенной дозы радиации на орбите Луны методом статистического моделирования служили расчетные значения дозы для минимума СА во второй половине 2018 г. (рис. 4, кривая 1),

полученные по модели [17] с доверительным уровнем 99 %, который означает что в 99 из 100 космических миссий уровень поглощенной дозы радиации не превысит расчетных значений. Эта статистическая модель создана на основании большого объема экспериментальных данных многолетних наблюдений за потоками ионизирующего излучения, отражает изменение реальной дозы радиации в крайне широких пределах, и направлена на оценку предельно высокого уровня поглощенной дозы радиации.

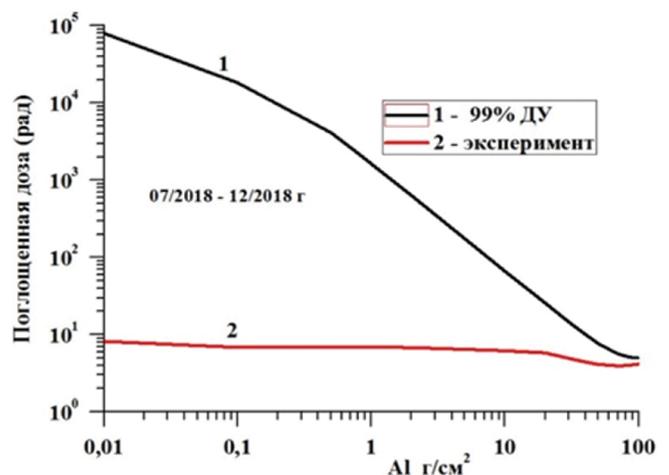


Рис. 4. Результат расчета [17] поглощенной дозы радиации на орбите Луны для второй половины 2018 г. по статистической модели с 99 % доверительным уровнем (кривая 1) и реальные значения дозы, наблюдаемые в этот период (кривая 2)

Fig. 4. The result of calculating [17] the absorbed radiation dose in the Moon's orbit for the second half of 2018 using a statistical model with a 99 % confidence level (curve 1) and the actual dose values observed during this period (curve 2)

Из табл. 3 видно, что реально измеренные дозы радиации как на орбите Луны (в открытом космосе), так и на её поверхности на несколько порядков меньше расчетных значений по статистической модели. Это связано с закономерностями статистического моделирования – измеренная доза на орбите Луны в открытом космосе (рис. 4, кривая 2) на несколько порядков меньше расчетных значений по статистической модели (рис. 4, кривая 1). Такое большое различие между расчетными значениями дозы радиации и реальными значениями, вблизи минимума активности Солнца во второй половине 2018 г., связано с тем, что по модели учтены воз-

можные вспышки хотя бы средней мощности, но их в действительности не было, а солнечные вспышки, которые произошли за этот период, все были малой мощности с энергией протонов СКЛ менее 2 МэВ. Солнечные вспышки вносят весомый вклад в дозы радиации, а за 11-летний солнечный цикл их бывает более 10 тыс.

Крайне важно, что, как видно из рис. 1, 2 и выполненных расчетов (табл. 3), поглощенная доза радиации, рассчитанная для максимума СА как на орбите Луны, так и на её поверхности в несколько раз превосходит дозу радиации, рассчитанную для минимума СА. В то же время можно полагать, что при минимуме СА увеличение массовой толщины защиты на поверхности Луны свыше 3 г/см² до уровней 5 г/см² (рис. 4, кривая 2 и табл. 2) вплоть до массовой толщины 40 г/см² (рис. 4, кривая 2) не оказывает существенного влияния на уменьшение дозы облучения космонавта ввиду сложного спектра компонентов космического излучения и характера его взаимодействия с материалами.

Общая оценка радиационного воздействия на космонавтов на лунном этапе экспедиции

В табл. 4 приведены обобщенные данные выполненных выше расчетов по результатам фактических измерений 2009 и 2018–2019 гг. и статистического моделирования радиационной обстановки для минимума и максимума СА при использовании разных уровней массовой защиты в эквиваленте алюминия. Как видно, суммарные значения доз облучения за 14 сут, рассчитанные по данным реальных дозиметрических измерений в 2009 и 2018–2019 гг., для дежурного космонавта на орбите Луны составляют 19,5–23,2 мЗв и незначительно отличаются от доз облучения космонавта экипажа высадки на поверхность Луны – от 22,7 до 24,0 мЗв (в зависимости от массовой толщины защиты). Однако, как видно, по расчетам статистической модели эти различия могут быть очень значительны, особенно в период максимума СА, ввиду учета моделью даже очень малой вероятности сильных солнечных вспышек и увеличения за счет этого прогнозируемой дозы облучения на несколько порядков (рис. 4, кривая 1) при толщине защиты от радиации менее 3–5 г/см², которая характерна для ПМ и ЛС в сравнении с уровнем защиты КА 10–20 г/см². Видны отличия модели от фактических измерений также и в период низкой СА и отсутствия солнечных вспышек, но особенно это характерно для периодов максимальной СА (табл. 4).

По отдельным сообщениям [17, 33–35] в случае непрогнозируемых мощных солнечных вспышек поглощенная доза облучения у космонавтов может составить около 5 Гр, что неминуемо приведёт к развитию у них острой лучевой болезни тяжелой степени со смертельным исходом, при этом продолжительность вспышечного потока радиации составляет около полутора суток. Это делает крайне необходимым, особенно при длительных периодах пребывания и выполнения производственных задач в лунных поселениях, использование дополнительных способов защиты от ионизирующих излучений. В качестве одного из таких направлений могут рассматриваться использование реголита и композитных материалов при оборудовании лунных модулей.

Заключение

Радиация в околоземном космическом пространстве изучается уже многие десятилетия. В результате этих исследований, на базе большого объема экспериментальных данных наблюдений за потоками ионизирующих излучений, были построены статистические модели, позволяющие рассчитать предельно высокий уровень поглощенной дозы радиации, который, с определенной вероятностью, в будущем реальная доза радиации не превысит.

На орбите и вблизи поверхности Луны радиационная среда представляет собой сложную смесь ионизирующих частиц, в которых заряженные частицы с высокой проникающей способностью от Солнца и источников вне солнечной системы представляют реальную опасность для космических лунных миссий. Однако, изучение и постоянный мониторинг СА может позволить надежно прогнозировать временные «окна» (продолжительностью до нескольких месяцев) с низким уровнем радиации для перелётов к Луне и обратно.

Действующие ограничения облучения космонавтов установлены российскими нормативными документами [36–38], они основаны на накопленных за последний период сведениях о проявлениях острого и хронического облучения человека, а также их последствий. Современная версия российских нормативов [39] отражает существующую в мировой практике тенденцию к увеличению жесткости радиационных лимитов [40] и обеспечивает приемлемые значения вероятностей снижения работоспособности для ситуаций как острых, так и хронических облучений, а также для отдаленных

Таблица 4

Дозы облучения (мЗв) космонавтов в краткосрочной лунной миссии в зависимости от солнечной активности

Radiation doses (mSv) of astronauts in a short-term lunar mission depending on solar activity

Этапы лунной миссии	Факт*		Модель**		Факт*		Модель**	
	СА мин	СА макс-2024	СА мин-2030	СА макс-2024	СА мин	СА макс-2024	СА мин-2030	СА макс-2024
1. Дежурный космонавт на орбите Луны за 17,2 сут	КА (Al 10 г/см ²)				КА (Al 20 г/см ²)			
	23,2	604,1	138,1	604,1	19,5	517,8	58,7	517,8
2. Космонавт экипажа высадки на поверхность Луны	КА 10 г/см ² , ПМ (BC) 1,5 г/см ²				КА 20 г/см ² , ПМ (BC) 3,0 г/см ²			
	2.1. На орбите Луны (3,1 сут)	4,4	108,9	24,9	108,9	3,9	93,3	10,6
2.2. Пребывание в ПМ и ВС на поверхности Луны (9,33 сут)	ПМ и ВС (Al 1,5 г/см ²)				ПМ и ВС (Al 3,0 г/см ²)			
	12,8	5753,2	863,0	5753,2	12,2	2186,2	247,4	2186,2
2.3. Работа в скафандре на открытой поверхности (4,67 сут)	ЛС (Al 0,2 г/см ²)				ЛС (Al 1,0 г/см ²)			
	6,8	25886,7	3739,2	25886,7	6,6	4314,5	575,3	4314,5
Всего для космонавта экипажа высадки на поверхность Луны Луна за 17,2 сут	24,0	31748,8	4627,1	31748,8	22,7	6594,0	833,2	6594,0

Примечание: КА – космический аппарат; ПМ – посадочный модуль; ВС – взлетная ступень; ЛС – лунный скафандр; * – по данным дозиметрических измерений в 2009 и 2018–2019 гг. и расчетов защиты на основе этих измерений; ** – максимальные значения модели, которые не будут превышены с вероятностью 99 %

последствий – радиационных рисков от специфических (рак, генетические эффекты) и неспецифических соматических нарушений. Дозовые лимиты облучения космонавтов при полетах различной продолжительности [38] приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения дозовых лимитов облучения космонавтов при космических полетах различной продолжительности [38]

Values of dose limits of cosmonauts' radiation exposure during space flights of various duration [38]

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

Как видно, предел дозы на красный костный мозг за карьеру космонавтов составляет 1 Зв. Это значение соответствует профессиональному пределу в атомной промышленности. Предел дозы на кроветворные органы для космонавтов при осуществлении околоземного космического полета за год установлен равным 300 мЗв [38, 39]. В новых Методических рекомендациях МР ФМБА 17.01-2021 «Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах. (ОКОКП-2021). Москва, 2021» по сравнению с прежним нормативом МУ 2.6.1.44-03-2004 для сохранения нормальной работоспособности космонавтов в космическом полете предложено снизить предельный уровень эквивалентной дозы на красный костный мозг за 30 сут с 250 мЗв до 150 мЗв, а для кратковременного облучения за одно солнечное протонное событие, развивающееся в пределах одних суток – с 150 мЗв до 100 мЗв [1, 38, 39].

В целом результаты выполненных нами расчетов сопоставимы с имеющимися разработками [1, 2, 11] и дополняют их в отношении возможных оценок уровней облучения космонавтов на основном этапе лунной миссии (пребывание на орбите Луны и нахождение на поверхности Луны в лунном ПМ и в ЛС), в том числе с учетом низкого и высокого уровней СА, и могут рассматриваться как один из возможных алгоритмов таких расчетов.

По данным разных авторов [11, 23, 17] из общей дозы 41,68 мГр (133,6 мЗв) за 21 сутки лунной миссии при уровне защиты космического аппарата в эквиваленте Al 10 г/см² основной вклад – 35 мГр (105 мЗв) – составит доза, полученная при преодолении радиационных поясов Земли. Тем не менее, анализ радиационной обстановки на лунном этапе миссии представляется также крайне важным. При этом можно заключить, что дозы облучения космонавтов во многом определяются уровнем СА на момент совершения полета, которая имеет волнообразный характер в виде 11-летних циклов от минимума к максимуму. Как показывают наблюдения, в 2022–2025 гг. наблюдается максимум СА с переходом в минимум СА к 2030 г. Это необходимо учитывать при прогнозировании возможных доз облучения космонавтов и при планировании космического полета к Луне.

Выводы

1. При прогнозировании уровней радиационной опасности для космонавтов при краткосрочной лунной миссии необходимо оценивать уровни воздействия ионизирующего излучения от СКЛ и ГКЛ как на орбите Луны в зависимости от окололунной траектории космического аппарата, так и на поверхности Луны с учетом времени пребывания в лунном модуле и в лунном скафандре, а также с учетом уровней солнечной активности.
2. Суммарные дозы облучения за лунную часть миссии, рассчитанные по данным дозиметрических измерений в годы низкой СА (2009 и 2018–2019 гг.), без учета дозы облучения на траектории полета от Земли к Луне и обратно, составляют для дежурного космонавта, пребывающего в КА на орбите Луны – 23,2 или 19,5 мЗв при защите из Al 10 и 20 г/см² соответственно, для космонавтов экипажа высадки на поверхность Луны, пребывающих в КА, ПМ и ВС – от 22,7 до 24,0 мЗв, в зависимости от массовой толщины защиты КА, ПМ, ВС и ЛС.
3. С целью минимизации доз радиации, которые получают космонавты в ходе лунной миссии, важно учитывать прогноз солнечной активности для оптимизации времени старта космического аппарата в «окна» с минимальными уровнями радиационного воздействия.
4. Увеличение массовой толщины противорадиационной защиты посадочного модуля в эквиваленте алюминия с 1,5 до 3–5 г/см² и лунного скафандра в эквиваленте алюминия с 0,2 до 0,5–1 г/см² позволит не более чем в 1,3 раза снизить общую дозу облучения космонавтов за период 14-суточного пребывания на поверхности Луны в период минимальной солнечной активности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьев Ю.Г., Ушаков И.Б., Шафиркин А.В. Особенности радиационного нормирования в СССР (России) и США применительно к длительным пилотируемым космическим полетам // Гигиена и санитария. 2017. Т.96, № 9. С. 861-867. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-9-861-867>.
2. Самойлов А.С., Ушаков И.Б., Шуршаков В.А. Радиационное воздействие в орбитальных и межпланетных космических полетах: мониторинг и защита // Экология человека. 2019. № 1. С. 4–9.
3. Митрикас В.Г., Хорошева Е.Г. Оценки индивидуальных доз космонавтов по показаниям бортовых дозиметров // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т.52, № 2. С. 29-33. DOI 10.21687/0233-528X-2018-52-2-29-33.
4. Шафиркин А.В., Бенгин В.В., Бондаренко В.А., Митрикас В.Г., Панасюк М.И., Цетлин В.В., Шуршаков В.А. Дозовые нагрузки и суммарный радиационный риск для космонавтов при длительных полетах на ОС «Мир» и Международной космической станции // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т.52, № 1. С. 12-23. DOI 10.21687/0233-528X-2018-52-1-12-23.
5. Бондаренко В.А., Митрикас В.Г., Цетлин В.В. Характеристики радиационных условий среды обитания на МКС в период 24-го цикла солнечной активности // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т.53, № 5. С. 17-21. DOI 10.21687/0233-528X-2019-53-5-17-21.
6. Митрикас В. Г. Отдельные аспекты радиационного воздействия на космонавтов при пересечении магнитосферы Зем-

- ли // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2021. Т.55, № 3. С. 51-56. DOI 10.21687/0233-528X-2021-55-3-51-56.
7. Митрикас В.Г., Хорошева Е.Г. Эффективные дозы облучения ионизирующей радиацией космонавтов при выполнении внекорабельной деятельности // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2016. Т.50, № 3. С. 23-29.
 8. Митрикас В.Г. Оценка эффективных доз ионизирующей радиации экипажей Международной космической станции методом расчетного моделирования // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2015. Т.49, № 3. С. 5-11.
 9. Митрикас В.Г. Динамическая модель радиационной обстановки для оперативного обеспечения радиационной безопасности космонавтов в космическом полете: Автореф. дис. ... доктора технич. наук. М., 2000. 36 с.
 10. Бондаренко В.А. Оценка радиационных нагрузок на космонавтов МКС с использованием геометрической модели тела человека: Автореф. дис. ... канд. технич. наук. М., 2007. 27с.
 11. Орлов О.И., Панасюк М.И., Шуршаков В.А. Радиационный фактор при лунных миссиях // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2019. Т.53, № 4. С. 5–18. DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-4-5-18.
 12. ГОСТ 15484-81 Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения. М., 1986.
 13. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. М., 2010.
 14. Spence H.E., Golightly M.J., Joyce C.J., Looper M.D., Schwadron N.A., Smith S.S., Townsend L.W., Wilson J., Zeitlin C. Relative Contributions of Galactic Cosmic Rays and Lunar Proton «Albedo» to Dose and Dose Rates Near the Moon // *Space Weather*. 2013. No. 11. P. 643–650. doi:10.1002/2013SW000995. URL: <http://www.d54x.ru/articles/Luna/Luna91.pdf>.
 15. Новиков Л.С. Космическое материаловедение. М.: Макс Пресс, 2014. 448 с.
 16. Zhang S., Wimmer-Schweingruber R.F., Yu J., Wang C., Fu Q., Zou Y., Sun Y., Wang C., Hou D., Böttcher S.I., Burmeister S., Seimetz L., Schuster B., Knierim V., Shen G., Yuan B., Lohf H., Guo J., Xu Z., Freiherr von Forstner J.L., Kulkarni S.R., Xu H., Xue C., Li J., Zhang Z., Zhang H., Berger T., Matthiä D., Hellweg C.E., Hou X., Cao J., Chang Z., Zhang B., Chen Y., Geng H., Quan Z. First Measurements of the Radiation Dose on the Lunar Surface // *Sci. Adv.* 2020. V.6, No. 39. P. eaaz1334. doi: 10.1126/sciadv.aaz1334.
 17. Безродных И.П. Космическая радиация – основная угроза при космических полетах. ИКИ РАН. М., 2021. 38 с. Электронный ресурс: <https://studylib.ru/doc/6428972/bezrodnyh-i.p.-kosmicheskaya-radiaciya---osnovnaya-ugroza-pri>.
 18. 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. V.216, No. 104. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00725-3>.
 19. Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Роганова Т.М. Галактические космические лучи Т. 1 // *Модель космоса*. / Под ред. Панасюка М.И. М.: Книжный дом Университет, 2007. С. 62-95.
 20. Белов А.В., Курт В.Г. Солнечные космические лучи // *Модель космоса*. Т. 1 / Под ред. проф. Панасюка М.И. М.: Книжный дом Университет, 2007. С. 293-313.
 21. Ionizing Radiation in Earth's Atmosphere and in Space Near Earth // Wallace Friedberg Kyle Copeland Civil Aerospace Medical Institute Federal Aviation Administration. Oklahoma City, OK 73125. P. 1-32.
 22. Денисов А.Н., Кузнецов Н.В., Ныммик Р.А., Панасюк М.И., Соболевский Н.М. К проблеме радиационной обстановки на Луне // *Космические исследования*. 2010. Т.48, № 6. С.524–531.
 23. 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. Труды ВНИИЭМ*. 2012. Т.131, № 6. С. 15-18.
 24. Безродных И.П. Факторы космического пространства, влияющие на исследование и освоение Луны. М.: ИКИ РАН, 2014. 39 с. <https://studylib.ru/doc/2735279/bezrodnyh-i.p.-iki-ran-spisok-normativnyh>.
 25. ГОСТ 25645.150-90. Лучи космические галактические. Модель изменения потоков частиц. М.: Изд-во Стандартов, 1991.
 26. ГОСТ 25645.165-2001. Лучи космические солнечные. Вероятностная модель потоков протонов. Госстандарт России. М.: Госстандарт, 2001.
 27. Программа «Аполлон». Ч. II. Обзор по материалам открытой иностранной печати / Сост. Д.Ю. Гольдовский. Калининград: ГОНТИ-1, 1971. Аполлон-8. URL: <https://monamir.ru/Аполлон-8>. Аполлон-10. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Аполлон-10>.
 28. Jones E.M. A Running Start – Apollo 17 up to Powered Descent Initiation. Apollo 17 Lunar Surface Journal. NASA (1995); Аполлон-17. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Аполлон-17>.
 29. 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 Т. 1. // *Модель космоса*. / Под ред. проф. Панасюка М.И. М.: Книжный дом Университет, 2007. С. 642-667.
 30. 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. No. 117. P. E00H13.
 31. 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. No. 16. P. 289–303.
 32. 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 // *Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation (CRaTER)*. URL: <http://predices.sr.unh.edu/craterweb/algorithms.html>.
 33. Кузнецов Н.В., Ныммик Р.А., Панасюк М.И., Денисов А.Н., Соболевский Н.М. Оценка радиационного риска для космонавтов на Луне // *Космические исследования*. 2012. Т.50, № 3. С. 224-228.
 34. Курт В.Г. Солнечные вспышки. Т.1. // *Модель космоса* / Под ред. проф. Панасюка М.И. М.: Книжный дом Университет, 2007. С. 272-293.
 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. No. 6. P. eaaz1334.
 36. СП 2.6.1.758-99. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.
 37. ГОСТ 25645.215-85 БРЭКАКП. Нормы безопасности при продолжительности полетов до 3 лет. М., 1986.
 38. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.6.1. 44-03-2004. Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах (ОКОКП-2004): Методические указания МУ 2.6.1. 44-03-2004. М.: Федеральное управление «Медбиоэкстрем», 2004.
 39. Ушаков И.Б., Григорьев Ю.Г., Шафиркин А.В., Шуршаков В.А. Обоснование пределов доз к новому нормативному документу по радиационной безопасности длительных космических полетов на орбитах высотой до 500 км // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2016. Т.50, № 1. С.39–54.
 40. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ) / Пер с англ.: Под общей ред. Киселёва М.Ф., Шандалы Н.К. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.

REFERENCES

1. Grigoryev Yu.G., Ushakov I.B., Shafirkin A.V. Peculiarities of Radiation Normalization in the USSR (Russia) and the USA Concerning to Long-Term Pilotable Space Flights. *Gigiyena i Sanitariya* = Hygiene and Sanitation. 2017;96:9:861-867. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-9-861-867> (In Russ.).
2. Samoylov A.S., Ushakov I.B., Shurshakov V.A. Radiation Exposure During the Orbital and Interplanetary Spaceflights: Monitoring and Protection. *Ekologiya Cheloveka* = Human Ecology. 2019;1:4-9 (In Russ.).
3. Mitrikas V.G., Khorosheva E.G. Effective Doses from Ionizing Radiation Exposure of Cosmonauts During Extravehicular Activity. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* = Aerospace and Environmental Medicine. 2018;52;2:29-33. DOI 10.21687/0233-528X-2018-52-2-29-33 (In Russ.).
4. Shafirkin A.V., Bengin V.V., Bondarenko V.A., Mitrikas V.G., Panasyuk M.I., Tsetlin V.V., Shurshakov V.A. Dose Loads and Total Radiation Risk for Cosmonauts in Long-Term Missions to the Orbital Station Mir and International Space Station. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* = Aerospace and Environmental Medicine. 2018;52;1:12-23. DOI 10.21687/0233-528X-2018-52-1-12-23 (In Russ.).
5. Bondarenko V.A., Mitrikas V.G., Tsetlin V.V. Characteristics of the Iss Radiation Environment in the Period of the 24th Solar Cycle. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* = Aerospace and Environmental Medicine. 2019;53;5:17-21. DOI 10.21687/0233-528X-2019-53-5-17-21 (In Russ.).
6. Mitrikas V.G. Some Aspects of the Radiation Exposure of Cosmonauts Traversing the Earth's Magnetosphere. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* = Aerospace and Environmental Medicine. 2021;55;3:51-56. DOI 10.21687/0233-528X-2021-55-3-51-56 (In Russ.).
7. Mitrikas V.G., Khorosheva E.G. Effective Doses from Ionizing Radiation Exposure of Cosmonauts During Extravehicular Activity. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* = Aerospace and Environmental Medicine. 2016;50;3:23-29 (In Russ.).
8. Mitrikas V.G. Estimation of Ionizing Radiation Effective Doses to Crews of the International Space Station by the Method of Calculation Modeling. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* = Aerospace and Environmental Medicine. 2015;49;3:5-11 (In Russ.).
9. Mitrikas V.G. *Dinamicheskaya Model Radiatsionnoy obstanovki dlya Operativnogo Obespecheniya Radiatsionnoy Bezopasnosti Kosmonavtov v Kosmicheskom Polete* = A Dynamic Model of the Radiation Situation for Operational Provision of Radiation Safety of Astronauts in Space Flight. Avtoref. diss. ... doct. Technical Sciences. Moscow Publ., 2000. 36 p. (In Russ.).
10. Bondarenko V.A. *Otsenka Radiatsionnykh Nagruzok na Kosmonavtov Mks s Ispolzovaniyem Geometricheskoy Modeli Tela Cheloveka* = Assessment of Radiation Loads on the ISS Astronauts Using a Geometric Model of the Human Body. Avtoref. diss. ... kand. of Technical Sciences. Moscow Publ., 2007. 27 p. (In Russ.).
11. Orlov O.I., Panasyuk M.I., Shurshakov V.A. Radiation Factor in Lunar Missions. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* = Aerospace and Environmental Medicine. 2019;53;4:5-18 (In Russ.).
12. STATE STANDARD 15484-81 Ionizing Radiations and Their Measurements. Terms and definitions. Moscow Publ., 1986 (In Russ.).
13. SP 2.6.1.2612-10. Basic Sanitary Rules for Radiation Safety (OSPORB-99/2010). Moscow Publ., 2010 (In Russ.).
14. Spence H.E., Golightly M.J., Joyce C.J., Looper M.D., Schwadron N.A., Smith S.S., Townsend L.W., Wilson J. and Zeitlin C. Relative Contributions of Galactic Cosmic Rays and Lunar Proton «Albedo» to Dose and Dose Rates Near the Moon. *Space Weather*. 2013;11:643-650. doi:10.1002/2013SW000995. URL: <http://www.d54x.ru/articles/Luna/Luna91.pdf>.
15. Novikov L.S. *Kosmicheskoye Materialovedeniye* = Space Materials Science. Moscow, Max Press Publ., 2014. 448 p. (In Russ.).
16. Zhang S., Wimmer-Schweingruber R.F., Yu J., Wang C., Fu Q., Zou Y., Sun Y., Wang C., Hou D., Böttcher S.I., Burmeister S., Seimetz L., Schuster B., Knierim V., Shen G., Yuan B., Lohf H., Guo J., Xu Z., Freiherr von Forstner J.L., Kulkarni S.R., Xu H., Xue C., Li J., Zhang Z., Zhang H., Berger T., Matthä D., Hellweg C.E., Hou X., Cao J., Chang Z., Zhang B., Chen Y., Geng H., Quan Z. First Measurements of the Radiation Dose on the Lunar Surface. *Sci. Adv.* 2020;6;39:eaz1334. doi: 10.1126/sciadv.aaz1334.
17. Bezrodnykh I.P. *Kosmicheskaya Radiatsiya – Osnovnaya Ugroza pri Kosmicheskikh Poletakh* = Space Radiation Is the Main Threat During Space Flights. ICI RAS. Moscow Publ., 2021. 39 p. URL: <https://studylib.ru/doc/6428972/bezrodnyh-i.p.-kosmicheskaya-radiatsiya-osnovnaya-ugroza-pri> (In Russ.).
18. Wimmer-Schweingruber R.F., Yu J., Böttcher S.I., Zhang S., Burmeister S., Lohf H. at all. The Lunar Lander Neutron and Dosimetry (LND) Experiment on Chang'E 4. *Space Sci.* 2020;216;104. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00725-3>.
19. Kalmykov N.N., Kulikov G.V., Roganova T.M. Galactic Cosmic Rays. V. 1. *Model Kosmosa* = A Model of the Cosmos. Ed. Panasyuk M.I. Moscow Publ., 2007. P. 62-95 (In Russ.).
20. Belov A.V., Kurt V.G. Solar Cosmic Rays. V. 1. *Model Kosmosa* = A Model of the Cosmos. Ed. Panasyuk M.I. Moscow Publ., 2007. P. 293-313 (In Russ.).
21. Ionizing Radiation in Earth's Atmosphere and in Space Near Earth. Wallace Friedberg Kyle Copeland Civil Aerospace Medical Institute Federal Aviation Administration. Oklahoma City, OK 73125. P. 1-32.
22. Denisov A.N., Kuznetsov N.V., Nymmik R.A., Panasyuk M.I., Sobolevskiy N.M. On the Problem of the Radiation Situation on the Moon. *Kosmicheskoye Issledovaniye* = Cosmic Research. 2010;48;6:524-531 (In Russ.).
23. 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 Elektromekhaniki. Trudy VNIEM* = Electromechanical Matters. VNIEM Studies. 2012;131;6:15-18 (In Russ.).
24. Bezrodnykh I.P. *Fakторы Kosmicheskogo Prostranstva, Vliyayushchiye na Issledovaniye i Osvoyeniye Luny* = Factors of Outer Space Affecting the Exploration and Exploration of the Moon. Moscow Publ., 2014 // <https://studylib.ru/doc/2735279/bezrodnyh-i.p.-iki-ran-spisok-normativnyh> (In Russ.).
25. GOST 25645.150-90. Cosmic Galactic Rays. A Model for Changing Particle Flows. Moscow Publ., 1991 (In Russ.).
26. GOST 25645.165-2001. Cosmic Solar Rays. Probabilistic Model of Proton Fluxes. Gosstandart of Russia. Moscow Publ., 2001 (In Russ.).
27. URL: <https://monamir.ru/Аполлон-8>; <https://ru.wikipedia.org/wiki/Аполлон-10>.
28. Jones E.M. A Running Start- Apollo 17 up to Powered Descent Initiation. Apollo 17 Lunar Surface Journal. NASA (1995); Аполлон-17 URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Аполлон-17>.
29. 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. V. 1. *Model Kosmosa* = A Model of the Cosmos. Ed. Panasyuk M.I. Moscow Publ., 2007. P. 642-667 (In Russ.).
30. 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.
31. 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.

32. 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. Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation (CRaTER). URL: <http://prediccs.sr.unh.edu/craterweb/algorithms.html>.
33. Kuznetsov N.V., Nymnik R.A., Panasyuk M.I., Denisov A.N., Sobolevsky N.M. Assessment of Radiation Risk for Astronauts on the Moon. *Kosmicheskiye Issledovaniya* = Cosmic Research. 2012;50;3:224-228 (In Russ.).
34. Kurt V.G. Solar Flares. V. 1. *Model Kosmosa* = A Model of the Cosmos. Ed. Panasyuk M.I. Moscow Publ., 2007. P. 62-95.
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. Limits of radiation Safety (NRS-99/2009) SP. 2.6.1.758-99. Moscow Publ., 2009 (In Russ.).
37. GOST 25645.215-85 BREKAKP. Safety Regulations for the Duration of Flights up to 3 Years. Moscow Publ., 1986 (In Russ.).
38. Limits of Cosmonauts' Irradiation for Orbital Near-Earth Space Flights. Workbook MU 2.6.1.44-03-2004. Moscow Publ., 2004 (In Russ.).
39. Ushakov I.B., Grigoryev 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* = Aerospace and Environmental Medicine. 2016;50;1:39-54 (In Russ.).
40. Publication 103 of the International Commission on Radiation Protection (ICRP). Ed. Kiselev M.F., Shandala N.K. Moscow Publ., 2009 (In Russ.).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 20.10.2023. Принята к публикации: 27.11.2023.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 20.10.2023. Accepted for publication: 27.11.2023.