

## ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ РАДИОИЗОТОПНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА КОСМОНАВТОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПИЛОТИРУЕМОГО НЕГЕРМЕТИЧНОГО ЛУНОХОДА

## AN ASSESSMENT OF THE RADIOISOTOPE POWER SOURCE RADIATION EFFECT ON COSMONAUTS DURING OPERATION OF A MANNED UNPRESSURIZED LUNAR ROVER



**Е.В. Власенков<sup>1</sup>,**  
veb@laspace.ru;  
**E.V. Vlasenkov**



**Н.М. Хамидуллина<sup>1</sup>,**  
кандидат физико-  
математических наук,  
KHamidullinaNM@laspace.ru;  
**N.M. Khamidullina**



**И.В. Зефирин<sup>1</sup>,**  
кандидат  
технических наук,  
ZefirovIV@laspace.ru;  
**I.V. Zefirov**

Расчёт характеристик радиационного воздействия при эксплуатации перспективных луноходов на поверхности Луны предполагает комплексное исследование как радиационной стойкости (РС) бортовых устройств, так и радиационной безопасности экипажа. Анализ РС аппаратуры лунохода был представлен в работе (Власенков Е.В. и др., 2019), а воздействие на космонавтов при работе с луноходами, оснащёнными радиоизотопными источниками тепла (РИТ), – в работе (Власенков Е.В., Хамидуллина Н.М., 2023). В настоящей статье рассматривается воздействие космического пространства и ионизирующего излучения бортовых радиоизотопных источников электроэнергии, по мощности излучения существенно превышающих РИТ, на организм космонавта. Расчёты основаны на типовом сценарии строительных работ при создании лунной базы в соответствии с мировыми тенденциями освоения Луны, их результаты позволяют определить основные источники радиационной опасности и допустимое время работы для космонавтов при непосредственной эксплуатации лунохода.

Calculation of the radiation exposure characteristics during the operation of promising lunar rovers on the Moon surface involves a comprehensive study of both the radiation hardness (RH) of on-board devices and the radiation safety of the crew. An analysis of the lunar rover equipment RH was presented in (Vlasenkov E.V. et al., 2019), and the effect on cosmonauts when working with lunar rovers equipped with radioisotope heat units (RHU) was presented in (Vlasenkov E.V., Khamidullina N.M., 2023). This article examines the effect of ionizing radiation from outer space and on-board radioisotope energy sources, whose radiation power is significantly higher than RHU, on cosmonauts' organisms. The calculations are based on a typical scenario of lunar base creation in accordance with global lunar exploration trends; their results make it possible to determine the main sources of radiation hazard and the permissible working time for cosmonauts' lunar rover in-situ operation.

<sup>1</sup> АО «НПО Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Lavochkin Association, JSC, Russia, Moscow region, Khimki.

*Ключевые слова:*

*луноход; эквивалентная доза;  
радиоизотопный источник электроэнергии;  
ионизирующие излучения космического  
пространства;  
солнечная вспышка;  
радиационная безопасность;  
лунная база.*

DOI: 10.26162/LS.2024.97.36.017

## **ВВЕДЕНИЕ**

В исследовании Луны наступает новая эра, содержание которой состоит не просто в доставке посадочных аппаратов и людей на её поверхность, но и в полномасштабном освоении роботами и людьми в условиях длительного пребывания на специализированных лунных базах (Довгань В.Г., Мошечев А.А., 2020). Параллельно с Россией в настоящее время освоением и исследованием Луны занимаются Китай, США с партнёрами, Южная Корея, Объединённые Арабские Эмираты, Израиль, Индия.

Один из этапов российской перспективной программы освоения Луны предполагает отработку средств доступа на поверхность Луны, первые пилотируемые полёты на поверхность Луны, создание и размещение на Луне первых элементов посещаемой базы. К этому времени на поверхности Луны должны функционировать тяжёлые луноходы, выполняющие научные задачи и обеспечивающие поддержку пилотируемых миссий, особенностью которых является наличие на борту радиоизотопных источников тепла и электроэнергии, необходимых для обеспечения как теплового режима бортовой аппаратуры (БА) в условиях лунной ночи длительностью около 14 суток и температурой поверхности, опускающейся до минус 190°C, так и энергии для функционирования БА. Таким образом, очень важно ещё на этапе проектирования оценить не только радиационную стойкость аппаратуры и устройств КА и луноходов (Власенков Е.В. и др., 2019), но и уровень облучения космонавтов на этапе перелёта и при работе на поверхности Луны от ионизирующих излучений космического пространства (ИИ КП) и радиоизотопных источников путём расчёта эквивалентных доз (Козлов В.Ф., 1991). Полученные результаты необходимо сравнивать с предельно допустимым значением эквивалентной дозы для космонавтов, что является расчётным подтверждением обеспечения радиационной безопасности экипажей лунных миссий.

В работе (Власенков Е.В., Хамидуллина Н.М., 2023) рассматривалось радиационное воздействие на космонавтов при эксплуатации луноходов, оснащённых

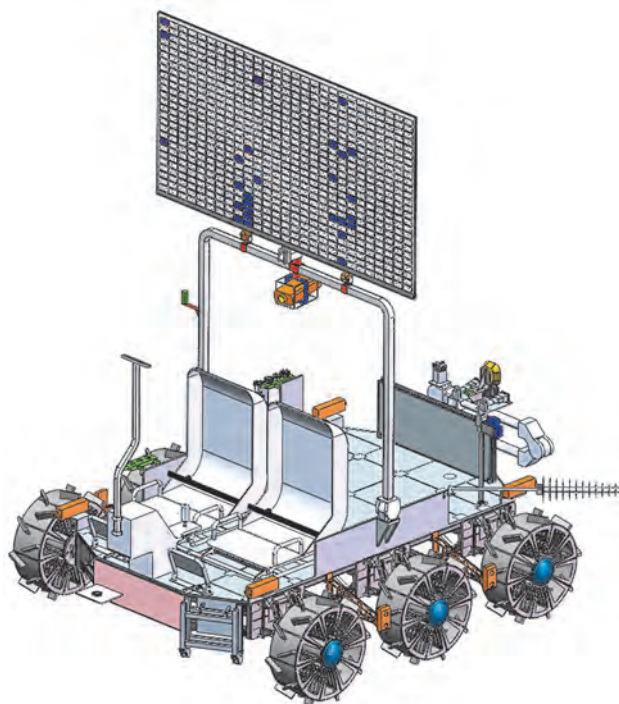
*Key words:*

*lunar rover;  
equivalent dose;  
radioisotope electric energy source;  
space ionizing radiation;  
solar flare;  
radiation safety;  
lunar base.*

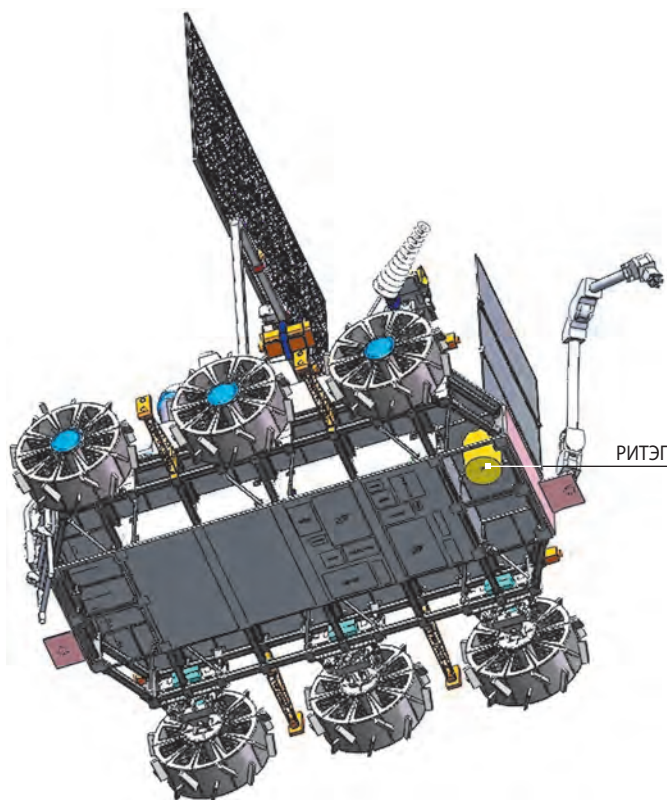
РИТ. В настоящей статье рассматривается пилотируемый негерметичный луноход (ПНЛ), на котором для обеспечения электропитания и для поддержания теплового режима работы БА в условиях лунной ночи устанавливается радиоизотопный термоэлектрический генератор (РИТЭГ).

## **1. Рассматриваемая конфигурация лунохода**

К моменту реализации этапа строительства лунной базы на поверхности Луны будут функционировать тяжёлые луноходы-строители, причём как в автоматическом режиме, так и под управлением космонавтов. Проектирование космической техники на современном этапе освоения Луны, как правило, выполняется по модульному принципу, и основным модулем для создания тяжёлых негерметичных луноходов различного назначения будет являться базовая самоходная платформа – шестиколёсное шасси с установленным на борту РИТЭГ (рисунок 1).



**рисунок 1.** Проектный облик ПНЛ



**рисунок 2.** Схема размещения РИТЭГ на ПНЛ (вид снизу)

РИТЭГ представляет собой радиоизотопный источник тепла и электроэнергии мощностью 500 В, выполненный на основе диоксида плутония-238.

Расположение РИТЭГ на борту ПНЛ показано на рисунке 2.

## 2. Радиационные условия функционирования экипажа на поверхности Луны

Для оценки уровней влияния ионизирующих излучений на организм человека часто используется понятие эквивалентной дозы, характеризующее эффекты радиационного биологического воздействия (Козлов В.Ф., 1991).

В процессе пилотируемого освоения Луны на космонавтов действует как ионизирующее излучение космического пространства, так и ионизирующее излучение РИТЭГ, расположенного на борту ПНЛ.

При расчёте эквивалентной дозы от воздействия РИТЭГ важнейшими характеристиками являются длительность работы космонавта с луноходом и его удаленность от радиоизотопного источника – значения расстояний от РИТЭГ до космонавта при различных видах работ.

Для определения необходимых исходных данных при расчёте эквивалентной дозы от РИТЭГ, прежде всего, стоит отметить, что характеристики поля излучений (мощность дозы, доза) зависят от распределения радиоактивного вещества в радиоизотопном источнике. В зависимости от их геометрических параметров и расстояний до точки детектирования выделяют протяжённые, например, (Банников А.В., Попов В.Б., 2021) и точечные радиоизотопные источники. В статье рассматриваются точечные радиоизотопные источники, которые в настоящее время применяются в космической промышленности, и приведенные здесь результаты расчётов эквивалентных доз, полученных космонавтами, базируются на данном факте. Рассмотрим подробно каждый источник радиационного воздействия.

### 2.1. Космическое пространство

На рассматриваемом этапе освоения Луны предполагается, что лунная база будет функционировать в режиме посещения для формирования инфраструктуры базы. При выполнении данного расчёта рассмотрим два варианта длительности пребывания экипажа на Луне – 14 суток (минимальный случай) и один земной год (максимальный случай), при этих сценариях учтём длительность перелёта к Луне и обратно по перспективной траектории для функционирования орбитального КА на гало-орбите общей длительностью 42 дня.

Расчёты параметров воздействия ИИ КП проводились, в соответствии с ОСТ 134-1044-2007-изм. 1,

**таблица 1** – Значения эквивалентных доз за сферическими защитными экранами различной толщины от ГКЛ (фоновые условия) за один год пребывания космонавтов на Луне

массовая защита, г/см <sup>2</sup>	протоны, Зв	нейтроны, Зв	ядра, Зв	суммарная доза, Зв
1,0*	0,046	0,0033	0,658	0,708
3,0	0,051	0,0091	0,570	0,630
10,0**	0,060	0,0325	0,355	0,447

Примечания

\* Массовая защита 1 г/см<sup>2</sup> соответствует скафандру космонавта.

\*\* Массовая защита 10 г/см<sup>2</sup> соответствует обитаемому отсеку лунного модуля.



**таблица 2** – Значения эквивалентных доз за сферическими защитными экранами различной толщины от СКЛ (экстремальные условия) за один год пребывания космонавтов на Луне

массовая защита, г/см <sup>2</sup>	протоны, Зв	нейтроны, Зв	ионы, Зв	суммарная доза, Зв
1,0	10,70	0,0072	3,38	14,1
3,0	1,72	0,0072	0,33	2,07
10,0	0,22	0,0079	0,023	0,254

с применением программного комплекса COSRAD (Кузнецов Н.В. и др., 2011), основанного на динамической модели галактических космических лучей (ГКЛ) (ГОСТ 25645.150-90, 1991; Модель космоса, 2007) и вероятностной модели солнечных космических лучей (СКЛ) (ГОСТ Р 25645.165-2001, 2001; Модель космоса, 2007).

Результаты расчётов эквивалентных доз за сферическими защитными экранами различной толщины от ГКЛ (фоновые условия в отсутствии солнечных вспышек) за один год длительности миссии представлены в таблице 1.

При оценке радиационного воздействия на космонавтов от СКЛ принимается условие, что за время работы на поверхности Луны может произойти экстремальная солнечная вспышка (класса S5), в результате которой образуются мощнейшие потоки протонов, значительно увеличивающие уровень радиационного воздействия.

Результаты расчётов эквивалентных доз за сферическими защитными экранами различной толщины от СКЛ за один год длительности миссии представлены в таблице 2.

## 2.2. Радиоизотопные источники

Уровни воздействия радиоизотопного источника на космонавта характеризуются параметром эквивалентной дозы, значение которой зависит от активности (массы) изотопа, расстояния от источника излучения до космонавта и времени нахождения

в непосредственной близости от источника. На данном этапе проектирования защитными свойствами скафандра космонавта можно пренебречь, т.к. поток частиц после прохождения массовой защиты ослабляется незначительно, однако на последующих этапах проектирования, зная непосредственно конструкцию скафандра, целесообразно проводить расчёты с учётом ослабления потока частиц от РИТЭГ скафандром.

В составе НПЛ предполагается использовать РИТЭГ тепловой мощностью 500 Вт на основе диоксида плутония-238 (Pu<sup>238</sup>O<sub>2</sub>). РИТЭГ такой тепловой мощности не применялся в космической промышленности, и только предстоит его разработка, поэтому оценим его характеристики методом критериев подобия на основе уже разработанных и применяемых в космической промышленности радиоизотопных источников тепла и электроэнергии.

В современных проектах по исследованию дальнего космоса рассматриваются радиоизотопные источники на основе диоксида изотопа плутония-238, являющегося источником нейтронного, гамма- и рентгеновского излучения, характеристики которого зависят от активности изотопа. Оценивать характеристики рассматриваемого РИТЭГ будем через критерии подобия, а именно, принимая тот факт, что поток излучения пропорционален тепловой мощности, которая, в свою очередь, пропорциональна активности применяемого радиоизотопа.

**таблица 3** – Максимальные значения мощности эквивалентной дозы от РИТЭГ ПНЛ в зависимости от расстояния до источника

расстояние до РИТЭГ, см	суммарная мощность эквивалентной дозы от гамма-излучения и рентгеновского излучения и нейтронов, Зв/с
10	$8,96 \cdot 10^{-6}$
50	$3,47 \cdot 10^{-7}$
100	$8,80 \cdot 10^{-8}$
200	$2,23 \cdot 10^{-8}$

Тепловой блок (ТБ) ТБ-238-8,5 «Ангел» (Завалишин Ю.К. и др., 2004), используемый для обогрева аппаратуры посадочных аппаратов разработки АО «НПО Лавочкина», имеет тепловую мощность 8,5 Вт, поэтому плотность потока излучения, а также поглощенная и эквивалентная дозы для РИТЭГ мощностью 500 Вт будут в 58,8 раз больше, чем для ТБ.

В статье (Власенков Е.В., Хамидуллина Н.М., 2023) была представлена зависимость мощности эквивалентной дозы для упомянутого выше ТБ мощностью 8,5 Вт. Используя критерии подобия, получаем зависимость мощности эквивалентной дозы РИТЭГ НПЛ от расстояния, которая представлена в таблице 3.

Как следует из таблицы 3, радиальная зависимость максимального значения мощности эквивалентной дозы от одного типового РИТЭГ на расстояниях более 10 см хорошо описывается функцией  $1/R^2$  как в случае точечного источника.

Применённый подход подтверждается и данными о приблизительной пропорциональности выхода нейтронов из радиоизотопного источника величине его тепловой мощности (с точностью до 4%). Действительно, ТБ с тепловой мощностью 8,5 Вт имеет выход нейтронов  $2,40 \cdot 10^5$  нейтрон/с (коэффициент пропорциональности  $2,82 \cdot 10^4$  (с·Вт)<sup>-1</sup>), а используемый в проектах АО «НПО Лавочкина» РИТЭГ-238-6,5, содержащий тепловой блок ТБ-238-130 с тепловой мощностью 130 Вт, –  $3,50 \cdot 10^6$  нейтрон/с (коэффициент пропорциональности  $2,70 \cdot 10^4$  (с·Вт)<sup>-1</sup>).

### 3. Циклограмма работ космонавта

На первых этапах строительства лунной базы пилотируемые экспедиции будут иметь краткосрочный характер.

В настоящем разделе рассмотрим миссию на поверхность Луны длительностью 14 суток, при этом экипаж доставляется туда в лунном многоэтажном пилотируемом корабле. В процессе пребывания на поверхности Луны космонавты должны работать по научной программе, предусматривающей работу как внутри жилого отсека лунного модуля, так и на поверхности Луны. Для расчётов радиационного

воздействия на космонавта необходимо определить типовую циклограмму работ краткосрочной миссии, типовые работы с луноходом и расстояния от космонавта до РИТЭГ при выполнении данных работ.

Предположительная типовая посуточная циклограмма работ космонавта на поверхности Луны в период краткосрочной миссии (14 суток) представлена в таблице 4.

В связи с тем, что конкретная программа работы космонавта с ПНЛ в настоящее время не может быть определена, как наихудший случай принимается работа в непосредственной близости от РИТЭГ лунохода на протяжении шести часов.

### 4. Расположение РИТЭГ

Непосредственное расположение РИТЭГ на луноходе определяется задачами обеспечения требуемого температурного диапазона на посадочных поверхностях под служебную и научную аппаратуру. В конструкции ПНЛ РИТЭГ расположен в нижней части лунохода. Рассмотрим два расчётных случая:

- расположение космонавта в непосредственной близости к РИТЭГ лунохода (наименьшее возможное расстояние до РИТЭГ) при выполнении работ с луноходом (рисунок 3);
- расположение космонавтов в креслах лунохода при передвижении по поверхности Луны (рисунки 4 и 5).

В дальнейших расчётах примем «наихудший» случай и рассматривать будем место расположения космонавта № 1 (сидение по левому борту), т.к. оно расположено наиболее близко к РИТЭГ.

### 5. Расчётные значения уровней эквивалентных доз

В соответствии с принятой длительностью работ (шесть часов в течение только одних суток) космонавта с ПНЛ в непосредственной близости от него (операции по сервисному обслуживанию), рассчитанное значение эквивалентной дозы от РИТЭГ составляет 0,001603 Зв.

**таблица 4** – Суточная циклограмма работ космонавта на поверхности Луны в период краткосрочной миссии (14 суток)

действующие факторы	длительность пребывания на поверхности Луны, сутки		
	внутри жилого отсека	работа на поверхности Луны в скафандре	работа на поверхности Луны с луноходом
	8	5*	1**
КП	+	+	+
РИТЭГ	–	–	+
Примечания			
* Космонавт работает на поверхности Луны не более шести часов каждые из пяти суток (определяется ресурсом скафандра), при этом в режиме движения на ПНЛ – четыре часа, в режиме работы на поверхности Луны (удалены от ПНЛ более чем на пять метров) – два часа.			
** Длительность работы по сервисному обслуживанию ПНЛ (в непосредственной близости к РИТЭГ). Знак «+» означает наличие воздействия, знак «–» – его отсутствие.			

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ РАДИОИЗОТОПНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА КОСМОНАВТОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПИЛОТИРУЕМОГО НЕГЕРМЕТИЧНОГО ЛУНОХОДА

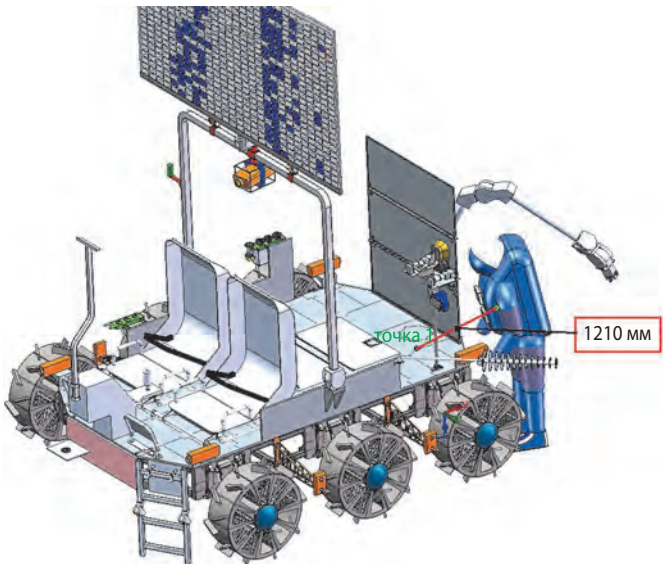


рисунок 3. Расположение космонавта рядом с луноходом («худший» случай), минимальное расстояние от РИТЭГ до космонавта ~120 см

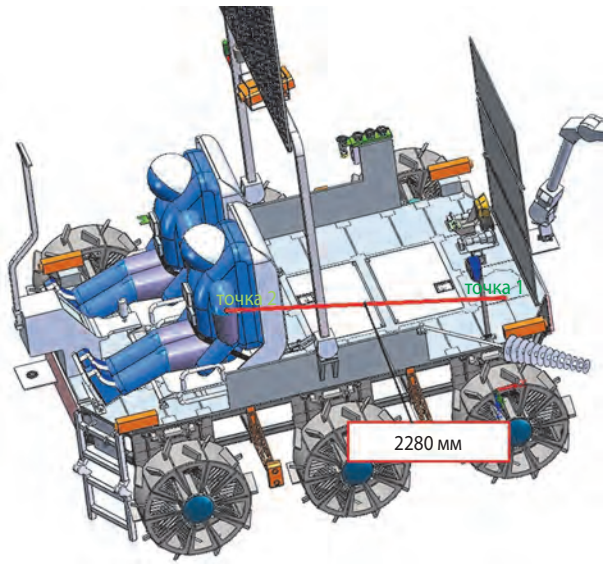


рисунок 4. Расстояние от РИТЭГ до космонавта № 1 (сидение по левому борту)

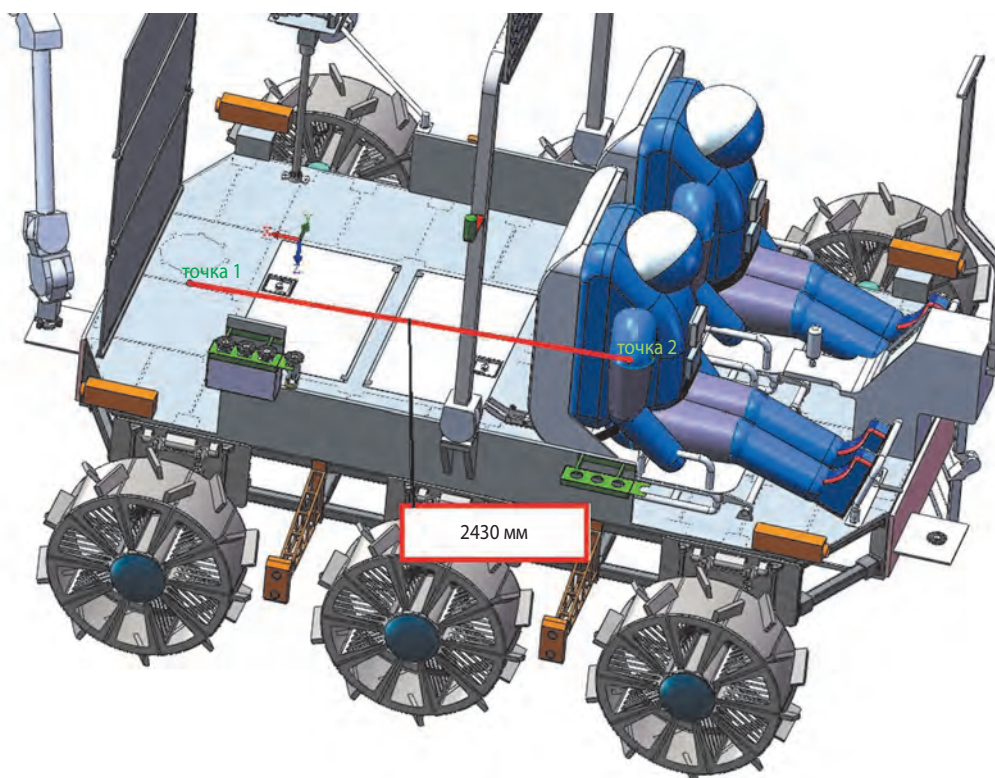
таблица 5 – Рассчитанные эквивалентные дозы при работе космонавтов на поверхности Луны по циклограмме типовой краткосрочной миссии длительностью 14 суток в фоновых и экстремальных радиационных условиях

действующие факторы	эквивалентные дозы, Зв			
	внутри жилого отсека	движение на НПЛ по поверхности Луны	работа на поверхности Луны с НПЛ	за 14 суток пребывания на поверхности Луны
«фоновые» условия КП (только ГКЛ)	0,0098	0,0096	0,002	0,0214
РИТЭГ	—	0,00066	0,00160	0,0023
суммарная эквивалентная доза при «фоновых» условиях				0,0237
суммарная эквивалентная доза при «экстремальных» условиях КП (СКЛ за три часа на поверхности в скафандре 1,76 Зв+ГКЛ)				1,7837

таблица 6 – Рассчитанные эквивалентные дозы при работе космонавтов на поверхности Луны в течении одного года при «фоновых» и «экстремальных» условиях

действующие факторы	эквивалентные дозы, Зв			
	внутри жилого отсека	движение на НПЛ по поверхности Луны	работа на поверхности Луны с НПЛ	за один год пребывания на поверхности Луны
«фоновые» условия КП (только ГКЛ)	0,2548	0,2496	0,052	0,5564
РИТЭГ	—	0,01706	0,04168	0,0587
суммарная эквивалентная доза при «фоновых» условиях				0,615
суммарная эквивалентная доза при «экстремальных» условиях КП (СКЛ за три часа на поверхности в скафандре 1,76 Зв+ГКЛ)				2,375





**рисунк 5.** Расстояние от РИТЭГ до космонавта № 2 (сидение по правому борту)

В соответствии с принятой длительностью режима движения космонавта на луноходе (четыре часа в течении каждого из пяти суток), рассчитанное значение эквивалентной дозы от РИТЭГ составляет 0,000656 Зв.

В режиме работы на поверхности Луны (космонавты удалены от ПНЛ более чем на два метра) воздействие РИТЭГ не учитывается, ввиду пренебрежимо малых значений суммарной мощности дозы.

Рассмотрим случай, когда за время работы космонавта, защищённого только скафандром, на поверхности Луны произойдёт экстремальная солнечная вспышка. С учётом того факта, что космонавту потребуется, например, три часа, чтобы добраться в посадочный модуль или на обитаемую базу, полученная им эквивалентная доза от СКЛ составит 1,76 Зв (Власенков Е.В., Хамидуллина Н.М., 2023).

Рассчитанные эквивалентные дозы при работе космонавтов на поверхности Луны по циклограмме типовой краткосрочной миссии длительностью 14 суток в фоновых (отсутствие солнечных вспышек) и экстремальных (мощная солнечная вспышка класса S5) радиационных условиях, представлены в таблице 5.

При оценке эквивалентной дозы при максимальной рассматриваемой продолжительности пребывания экипажа на Луне принимается, что циклограмма годовой работы экипажа в первом приближении представляет собой циклическое повторение циклограммы 14-суточной работы. Поэтому эквивалентные дозы космонавтов для годовой миссии равны

примерно 26-эквивалентным дозам фонового излучения, полученным для случая 14-суточной миссии (таблица 6).

## ВЫВОДЫ

1. Эквивалентная доза космонавта за 14 суток работы на поверхности Луны по циклограммам типовых краткосрочных миссий в условиях спокойного Солнца составляет 0,02366 Зв≈24 мЗв. Из них вклад РИТЭГ не превышает 0,23 мЗв, что составляет около 1% от общей дозы облучения.

2. Эквивалентная доза космонавта за один год работы на поверхности Луны по циклограммам типовых краткосрочных миссий (в условиях спокойного Солнца) составляет 0,615 Зв=615 мЗв. Из них вклад РИТЭГ не превышает 5,87 мЗв, т.е. около 1% от общей дозы облучения.

3. Эквивалентная доза космонавта, в случае, если солнечная вспышка застала его на поверхности Луны в скафандре на значительном удалении от посадочного модуля, добраться до которого возможно в течение трёх часов, равна 1,76 Зв. В соответствии с мировыми стандартами радиационной безопасности для космонавтов, предельно допустимая эквивалентная доза (ПДЭД), или профессиональный предел при выполнении длительных космических полётов составляет 1 Зв (Методические рекомендации МР ФМБА, 2021). Таким образом, в данном случае доза космонавта почти в два раза превышает ПДЭД.

4. Эквивалентная доза космонавта за солнечную вспышку за массовой защитой  $10 \text{ г/см}^2$  (в обитаемом отсеке) составляет  $0,25 \text{ Зв}=250 \text{ мЗв}$ .

5. Полученная космонавтами доза облучения за время работы по циклограммам типовых краткосрочных миссий длительностью 14 суток, даже в условиях спокойного Солнца,  $\sim 24 \text{ мЗв}$  превышает предельно допустимую годовую дозу облучения персонала категории А, постоянно или временно работающих с источниками ионизирующего излучения на объектах атомной промышленности РФ, составляющую, в соответствии с документом «Нормы радиационной безопасности НРБ-99»,  $20 \text{ мЗв/год}$ .

6. Вклад РИТЭГ не превышает  $2,3 \text{ мЗв}$  в случае 14-суточной миссии и  $59 \text{ мЗв}$  в случае годовой миссии, т.е. составляет при работе космонавтов на Луне в условиях спокойного Солнца примерно 10% от эквивалентной дозы от космических источников радиационного излучения. В случае солнечной вспышки это процент за год работы на Луне уменьшается до 2,5%. Этот важный вывод свидетельствует о том, что максимальную радиационную опасность для экипажей космонавтов представляет излучение космического пространства, а не искусственные радиоизотопные источники, даже такие мощные, как РИТЭГ.

Самую большую опасность представляет экстремальная солнечная вспышка, особенно, если данное событие произойдёт, когда космонавт выполняет работы на поверхности Луны в скафандре вне посадочного модуля. Для предотвращения смертельно опасного облучения необходимо размещать на посадочном модуле или на орбитальных аппаратах, или на луноходах высокочувствительные детекторы солнечных космических лучей, способных уловить нарастание потока частиц после экстремальной вспышки и, тем самым, заранее сигнализировать о необходимости возвращения космонавтов в отсек посадочного модуля или на базу. Важное значение имеет прогнозирование радиационной обстановки, которое осуществляют в России и США соответствующие службы, оснащенные комплексами наблюдательных средств и методиками прогнозирования.

На последующих этапах проектирования при расчёте радиационного воздействия на экипаж лунных миссий необходимо рассматривать предметные циклограммы работ космонавтов с оборудованием, содержащем в своем составе радиоизотопные источники, а также принимать во внимание ослабление потока частиц от радиоизотопных источников массовой защитой скафандра космонавта.

## **список литературы**

Банников А.В., Попов В.Б. Порядок расчёта локальных дозовых нагрузок радиоэлектронной бортовой аппаратуры космического аппарата с ядерной

энергетической установкой // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2021. № 4. С. 45-49.

Власенков Е.В., Зефирова И.В., Хамидуллина Н.М., Комбаев Т.Ш. Особенности проектирования луноходов с учётом радиационного воздействия космического пространства и бортовых радиоизотопных источников тепла // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2019. № 3. С. 12-19.

Власенков Е.В., Хамидуллина Н.М. Радиационное воздействие при эксплуатации перспективных луноходов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 2. С. 47-53.

ГОСТ 25645.150-90. Галактические космические лучи. Модель изменения потоков частиц. М.: Госстандарт, 1991.

ГОСТ Р 25645.165-2001. Лучи космические солнечные. Вероятностная модель потоков протонов. М.: Госстандарт, 2001.

Гражданская продукция организаций оборонно-промышленного комплекса. Разд. 6. Облучательные технологии. Т. 2. М.: Росатом, 2021. 188 с.

Довгань В.Г., Мошечев А.А. Первенцы космических робототехнических комплексов (к 50-летию «ЛУНОХОДА-1») // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2020. № 3. С. 21-29.

Завалишин Ю.К., Пустовалов А.А., Дербунувич Б.В., Акимов И.М. и др. Технологические возможности производства источников тепла на основе плутония-238 // Атомная энергетика. Атомная энергетика для транспортных средств. 2004. № 11. С. 27-31.

Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. Изд. четвёртое. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 7.

Кузнецов Н.В., Малышкин Ю.М., Николаева Н.И., Ныммик Р.А. и др. Программный комплекс COSRAD для прогнозирования радиационных условий на борту космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2011. Вып. 2. С.72-78.

Методические рекомендации МР ФМБА 17.01-2021. Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах (ОКОКП-2021). М., 2021. 15 с.

ОСТ 134-1044-2007-изменение 1. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы расчета радиационных условий на борту космических аппаратов и установление требований по стойкости радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию заряженных частиц космического пространства естественного происхождения. 2017. 258 с.

Статья поступила в редакцию 17.07.2024

Статья после доработки 22.07.2024

Статья принята к публикации 23.07.2024