

УДК 520.6

## НЕЙТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЛУНЫ ВО ВРЕМЯ ИСТОРИЧЕСКОГО СОЛНЕЧНОГО ПРОТОННОГО СОБЫТИЯ КЭРРИНГТОНА 1 СЕНТЯБРЯ 1859 ГОДА

© 2025 г. И. Г. Митрофанов, А. Б. Санин, М. Л. Литвак, Д. В. Головин\*, М. В. Дьячкова,  
А. А. Аникин, Н. В. Лукьянов

*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

*\*e-mail: golovin@np.cosmos.ru*

Поступила в редакцию 03.12.2024 г.

После доработки 20.12.2024 г.

Принята к публикации 28.12.2024 г.

Рассмотрено нейтронное излучение лунной поверхности под воздействием потока энергичных заряженных частиц от интенсивного солнечного протонного события (СПС). Выполнены численные оценки нейтронного потока и соответствующей нейтронной компоненты радиационной дозы для исторического СПС Кэррингтона, которое можно считать примером наиболее интенсивного СПС, зарегистрированного за современный период наблюдений солнечной активности. Показано, что величина нейтронной компоненты дозы во время СПС Кэррингтона примерно в 1000 раз превышала фоновое значение от воздействия на лунную поверхность Галактических космических лучей (ГКЛ) в условиях спокойного Солнца. Величина полной радиационной дозы на лунной поверхности во время СПС Кэррингтона была близка к предельно допустимым значениям для человека в космическом пространстве.

**DOI:** 10.31857/S0023420625040031, **EDN:** QNJYDY

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции развития мировой космонавтики указывают на то, что в ближайшие 10–20 лет начнется процесс освоения Луны, как ближайшего космического объекта с уникальной природной средой, источника ценных природных ресурсов и как внеземной гавани для подготовки межпланетных космических экспедиций. Следует ожидать, что уже в среднесрочной перспективе на лунных полюсах будут возведены лабораторные, технологические и бытовые модули лунных баз, будут работать вахтовые команды исследователей. Присутствие экспедиций на Луне в 21 в. станет постоянным — так же как в прошлом веке стало регулярным присутствие экспедиций в Антарктиде и на околоземных орбитах. Очевидно, что уже в настоящее время становится актуальным вопрос о негативных факторах лунной природной среды, которые следует принимать во внимание при разработке стратегических планов освоения Луны. Одним из таких факторов является нейтронное излучение на лунной поверхности.

Известно, что космическое пространство за пределами земной магнитосферы заполнено ГКЛ, которые представляют собой квазистационарный поток энергичных заряженных частиц, главным образом протонов, с изотропным угловым распределением. Вследствие солнечной активности к ГКЛ спорадически добавляются потоки энергичных заряженных частиц, также главным образом протонов, от солнечных протонных событий (СПС).

Нейтронное излучение Луны возникает в ядерных реакциях раскола ядер порообразующих элементов лунного вещества вследствие бомбардировки верхнего слоя поверхности энергичными протонами и тяжелыми заряженными частицами Галактических космических лучей (ГКЛ) и СПС (см., например, [1, 2]). Настоящая статья посвящена изучению природных радиационных катаклизмов на Луне, связанных с генерацией вторичных нейтронов в лунном веществе под воздействием мощных СПС. Очевидно, что будущие исследователи Луны неизбежно столкнутся с такими явлениями.

## 2. НЕЙТРОННАЯ КОМПОНЕНТА ЛУННОГО РАДИАЦИОННОГО ФОНА ОТ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ

Энергии протонов ГКЛ соответствуют чрезвычайно широкому диапазону от  $10^6$  до  $10^{21}$  эВ с максимумом около нескольких сотен мегаэлектронвольт. Попадая в лунный грунт, протоны таких энергий способны порождать осколки ядер, входящих в состав грунта, и также большое число вторичных частиц, таких как нейтроны, электроны, позитроны, фотоны и др. В среднем в одном акте взаимодействия протон ГКЛ теряет значительную долю своей энергии, производя вторичные частицы и осколки ядер. Каждое последующее взаимодействие первичного протона и вторичных частиц добавляет новые частицы, которые летят преимущественно в направлении движения первичного протона, образуя адронный, мюонный и электромагнитный каскады. Количество образующихся нейтронов и глубина слоя поверхности, где они образуются, зависят от энергии первичного протона и его угла падения на лунную поверхность. Очевидно, что чем больше энергия протона, тем больше он производит нейтронов и на большей глубине под поверхностью. Численное моделирование производства нейтронов изотропным потоком протонов ГКЛ на лунную поверхность, выполненное в настоящей работе, показывает, что один протон производит в среднем около 40 нейтронов на глубинах от поверхности до  $\sim 10$  м с максимумом на глубине  $\sim 30$  см. При этом энергии произведенных нейтронов находятся в достаточно широком диапазоне от килоэлектронвольт до сотен гигаэлектронвольт с максимумом в районе 1 МэВ.

Протоны СПС имеют меньшие энергии в диапазоне от 1 МэВ до 1 ГэВ, и, соответственно, каждая частица создает в грунте меньшее число нейтронов.

Длина свободного пробега нейтрона в лунном веществе гораздо меньше толщины слоя, где они образуются. Поэтому образовавшиеся энергичные нейтроны испытывают в нем многократные столкновения с ядрами и замедляются до эпитепловых (надтепловых), или даже до тепловых энергий. Процесс блуждания нейтронов в веществе до вылета является случайным, поэтому некоторые из них замедляются до теплового равновесия с ядрами, то есть термализуются. Поэтому энергетический спектр нейтронного излучения лунной поверхности достаточно широк — от тепловых энергий около  $10^{-3}$  эВ до исходной энергии рожденного нейтрона.

Существенным фактором, влияющим на энергетический спектр нейтронного излучения лунной поверхности, является концентрация воды и других водородсодержащих химических соединений в грунте. Это связано с тем, что эффективность замедления нейтронов значительно возрастает с увеличением числа их столкновений с протонами (ядрами атома водорода). Известно, что в полярных районах в лунном грунте может содержаться от 0.1 до 5 % водяного льда по массе [3, 4]. Это существенно больше, чем массовая доля молекул воды около 0.05 % на экваторе и в умеренных широтах [5].

Следует учесть, что именно богатые водяным льдом полярные территории наиболее перспективны для размещения на них постоянных обитаемых лунных баз. Поэтому ниже рассматриваются свойства лунного нейтронного излучения для полярных территорий. Химический состав реголита таких территорий соответствует лунным грунтам типа железистый анортозит — основного типа пород лунных материков [6]. Массовая доля водяного льда в полярном реголите принимается равной первому или второму из указанных значений, т.е. 0.1 % или 5 % водяного льда по массе.

Вторичное по своей природе лунное нейтронное излучение изменяется со временем. Основным фактором, вызывающим его долгопериодическую переменность, выступает переменность потока ГКЛ с одиннадцатилетним периодом цикла солнечной активности. На фазе максимума солнечной активности объем гелиосферы увеличивается, и поток ГКЛ в ее внутренней области уменьшается. И напротив, на фазе минимума солнечной активности объем гелиосферы уменьшается, а поток ГКЛ в окрестности земной орбиты достигает максимальных значений. Можно утверждать, что нейтронная компонента лунного радиационного фона, возникающая под воздействием ГКЛ, имеет вполне предсказуемую переменность с фактором около 2 [7]. Эта переменность может быть легко учтена при планировании лунных экспедиций.

Короткопериодические изменения лунного нейтронного излучения вызваны спорадическими вспышками в активных областях на Солнце, которые сопровождаются СПС — выбросами в межпланетное пространство потоков энергичных протонов. Солнечные вспышки — нерегулярное эруптивное проявление солнечной активности, предсказать которое заранее практически невозможно. Вероятностный краткосрочный прогноз СПС может

быть подготовлен только на основе анализа данных непрерывного мониторинга процессов в конкретных активных областях [8]. Характерное время жизни таких областей составляет несколько недель. Отсюда следует оценка времени вероятностного прогноза СПС. Кроме того, от момента регистрации солнечной вспышки, связанной с СПС, до пересечения потоком энергичных частиц орбиты Земли проходит примерно 30 мин. Это означает, что предупреждение о надвигающейся радиационной опасности от СПС на Луне может быть выработано только с таким достаточно коротким упреждением.

Вопросы радиационной защиты от заряженных частиц СПС в настоящей работе не обсуждаются — решение этих вопросов имеет общую постановку для всех космических полетов за пределами земной магнитосферы. Радиационный фон от заряженных частиц СПС на борту космического аппарата в условиях его полета в открытом космосе или расположения на лунной поверхности существенно не меняется — на Луне такой фон даже может быть ниже благодаря частичному экранированию Луной потока заряженных частиц.

Исходя из этого, ниже рассматриваются только вопросы нейтронного радиационного фона на Луне во время СПС. Если в открытом космосе вторичные нейтроны от СПС возникают только в веществе самого космического аппарата, то на борту аппарата на лунной поверхности поток нейтронов от СПС генерируется всем веществом небесного тела.

Наличие нейтронной компоненты радиационного фона составляет особенность лунной космонавтики. В работе нейтронный радиационный фон на Луне рассматривается как для условий спокойного Солнца, когда нейтроны генерируются частицами ГКЛ, так и во время СПС.

Квазистационарный поток ГКЛ на земной орбите хорошо известен, и соответствующая ему величина нейтронного фона может быть достаточно достоверно оценена для любого района лунной поверхности (см., например, [9]). Солнечные протонные события, напротив, имеют достаточно большой разброс по интенсивностям. Поэтому лунная радиационная защита от нейтронов должна быть создана с учетом самых интенсивных событий СПС. Очевидно, что их параметры неизвестны, так как время рекуррентности таких событий существенно превышает продолжительность современного периода мониторинга солнечной активности. Первым

историческим наиболее интенсивным СПС, параметры которого были оценены на основе анализа его косвенных проявлений на Земле, было так называемое событие Кэррингтона 1–2. IX.1859 [10]. Можно предположить, что время рекуррентности подобных СПС составляет несколько сотен лет.

Ниже приведены результаты численного моделирования потока лунного нейтронного излучения для СПС Кэррингтона. Полученные оценки могут представлять интерес для выработки концепции освоения Луны в среднесрочной и долгосрочной перспективе.

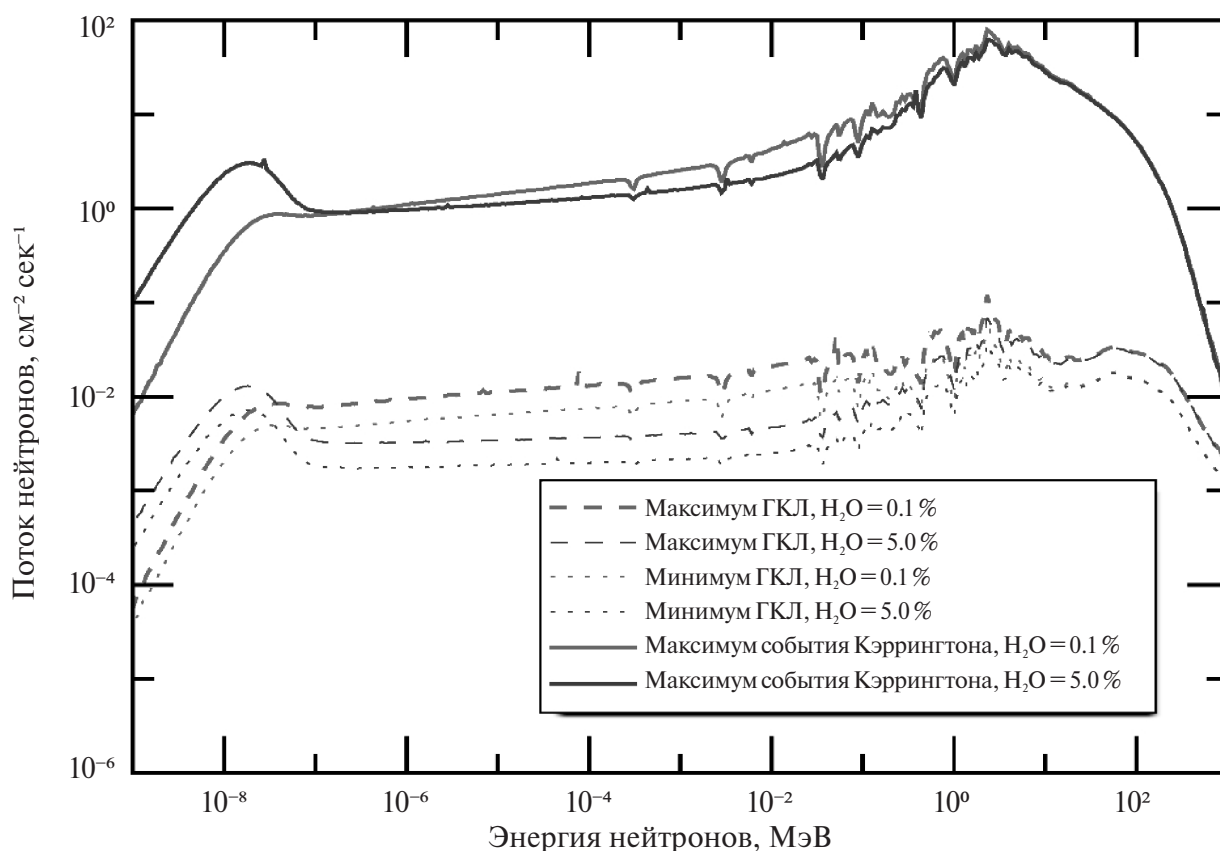
### 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛУНЫ ВО ВРЕМЯ СПС КЭРРИНГТОНА

Было выполнено численное моделирование спектральной плотности нейтронного потока на поверхности лунного грунта с химическим составом, соответствующим железистому анортозиту — основному типу пород лунных материков, и концентрациями водяного льда, о которых говорилось выше. Для расчетов использовался код, основанный на библиотеке численного моделирования ядерно-физических процессов методом Монте Карло Geant4 (версия 11.2-patch-02) с описанием физических процессов на основе листа FTFP\_INCLXX\_HP [11].

Для оценки падающего на Луну потока энергичных частиц в максимуме СПС Кэррингтона использовались оценки формы спектра полного флюенса и потока протонов в максимуме с энергией  $\geq 30$  МэВ, равные  $1.88 \cdot 10^{10}$  и  $2.9 \cdot 10^4$  см<sup>-2</sup>, соответственно [12].

Для сравнения с нейтронным излучением Луны в условиях спокойного Солнца были проведены расчеты для лунного нейтронного альбеда под воздействием ГКЛ. Использовались данные для спектральной плотности потоков частиц ГКЛ в окрестности земной орбиты в периоды максимума и минимума цикла солнечной активности согласно модели [13]. Величины потока ГКЛ соответствовали  $4.56$  и  $1.45$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> в минимуме и максимуме цикла солнечной активности, соответственно.

Полученные в результате моделирования спектры потока нейтронов отражены на рис. 1 красными (0.1 % воды в грунте) и синими (5 % воды в грунте) кривыми. Расчеты показали, что полный поток нейтронов под воздействием ГКЛ изменяется примерно в два раза от минимальных значений  $3.9$  и  $2.2$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> в максимуме



**Рис. 1.** Результаты численного моделирования спектральной плотности потоков нейтронного излучения лунного грунта с химическим составом, типичным для высокоширотных районов, и концентрацией водяного льда, равным 0.1 % (красные кривые) и 5 % (синие кривые) по массе. Сплошными линиями показаны спектры нейтронов, возникших под действием протонов с потоком, соответствующим максимуму СПС Кэррингтона. Пунктирными кривыми для сравнения показаны спектры нейтронов в периоды максимума ГКЛ, а точечными кривыми — в периоды минимумов ГКЛ

солнечного цикла до максимальных значений  $7.1$  и  $4.2 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  в минимуме для 0.1 и 5 % воды соответственно. При этом в максимуме СПС Кэррингтона нейтронный поток на лунной поверхности возрос примерно в 1000 раз относительно его минимального значения под воздействием ГКЛ и составил  $3.3 \cdot 10^3$  и  $2.8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  для 0.1 и 5 % воды соответственно. Энергетический спектр потока нейтронов для полного флюенса СПС Кэррингтона на рис. 1 не приведен, поскольку его форма очень близка к форме спектра нейтронов для максимума этого события.

Результаты моделирования для потоков нейтронов в единицах  $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  показаны в табл. 1 для пяти энергетических диапазонов (тепловые нейтроны с энергиями  $< 0.4 \text{ эВ}$ , эпитепловые с энергиями от  $0.4 \text{ эВ}$  до  $1 \text{ кэВ}$ , быстрые нейтроны с энергиями от  $1 \text{ кэВ}$  до  $1 \text{ МэВ}$ , энергичные нейтроны с энергиями более  $1 \text{ МэВ}$  и суммарный поток).

#### 4. ОЦЕНКИ НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ РАДИАЦИОННОЙ ДОЗЫ НА ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВО ВРЕМЯ СПС КЭРРИНГТОНА

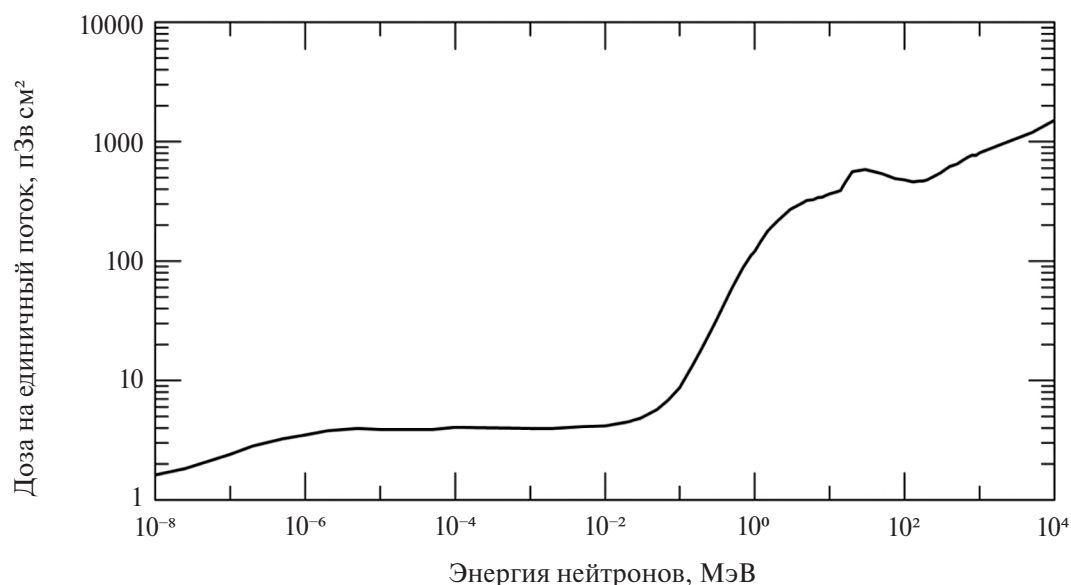
Мощность нейтронной компоненты радиационной дозы (НКРД) на лунной поверхности оценивается на основе свертки по энергии функции спектральной плотности нейтронного потока с функцией коэффициента конверсии, которая позволяет оценить эффект радиационного поражения организма человека в космосе в зависимости от энергии налетающего нейтрона. Эта функция рассчитывается в соответствии с рекомендациями Международной комиссии по радиационной защите, а ее вид представлен на рис. 2 [14].

В табл. 2 представлены оценки нейтронной компоненты для радиационной дозы и для



**Таблица 1.** Результаты моделирования потоков нейтронов на лунной поверхности с содержанием воды 0.1 и 5 % от СПС Кэррингтона и ГКЛ для различных энергетических диапазонов

Параметры	0.1 % воды в грунте					5 % воды в грунте				
	$E < 0.4 \text{ эВ}$	$0.4 \text{ эВ} \leq E < 1 \text{ кэВ}$	$1 \text{ кэВ} \leq E < 1 \text{ МэВ}$	$1 \text{ МэВ} \leq E$	Полный поток	$E < 0.4 \text{ эВ}$	$0.4 \text{ эВ} \leq E < 1 \text{ кэВ}$	$1 \text{ кэВ} \leq E < 1 \text{ МэВ}$	$1 \text{ МэВ} \leq E$	Полный поток
Максимум СПС Кэррингтона, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	46	179	915	2190	<b>3330</b>	117	134	631	1960	<b>2840</b>
Флюенс СПС Кэррингтона, $\text{см}^{-2}$	$2.6 \cdot 10^6$	$1.0 \cdot 10^7$	$4.6 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^8$	<b><math>1.7 \cdot 10^8</math></b>	$7.8 \cdot 10^6$	$8.8 \cdot 10^6$	$3.8 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^8$	<b><math>1.7 \cdot 10^8</math></b>
Максимум потока ГКЛ, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	0.43	1.33	2.28	3.06	<b>7.10</b>	0.48	0.4	0.78	2.56	<b>4.21</b>
Минимум потока ГКЛ, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	0.25	0.76	1.24	1.61	<b>3.87</b>	0.26	0.22	0.41	1.34	<b>2.23</b>



**Рис. 2.** Зависимость от энергии величины нейтронной дозы, полученной космонавтом, для единичного нейтронного потока (соответствует рекомендации Международной комиссии по радиационной защите ICRP 123, [14])

мощности радиационной дозы на лунной поверхности во время СПС Кэррингтона. Для сравнения представлены аналогичные оценки в периоды минимума и максимума потоков ГКЛ при активном и спокойном Солнце соответственно.

Из табл. 2 следует, что мощность НКРД в пике СПС Кэррингтона превышает дозовые нагрузки для спокойного Солнца от 500 до 1000 раз в зависимости от фазы цикла солнечной активности. С учетом того что СПС, как правило, случаются

**Таблица 2.** Оценки НКРД на поверхности Луны

Параметры НКРД	Полярный грунт с 0.1 % воды	Полярный грунт с 5.0 % воды
Мощность НКРД для максимума потока СПС Кэррингтона, мЗв/ч	2.48	2.39
Полная величина НКРД за все время СПС Кэррингтона, мЗв	42.6	41.2
Мощность НКРД для максимального потока ГКЛ, мкЗв/ч	4.3	3.8
Мощность НКРД для минимального потока ГКЛ, мкЗв/ч	2.3	2.0

именно в максимуме солнечной активности, когда поток ГКЛ минимален, можно предположить, что, когда в будущем произойдет СПС типа Кэррингтона, величина НКРД от ГКЛ будет превышена на три порядка. При этом расчеты показали, что грунт с высоким содержанием воды понижает значение НКРД на несколько процентов.

Из табл. 2 следует, что в пике СПС Кэррингтона величина мощности НКРД на поверхности Луны составляет  $\sim 2.5$  мЗв/ч. Следует учесть, что НКРД на поверхности Луны составляет лишь часть от полной дозы, которая создается заряженными частицами СПС. Исследования показывают, что эта доля для типичного СПС составляет примерно  $1/4$  (см., [15]). Таким образом мощность полной дозы на лунной поверхности в пике СПС Кэррингтона могла составить  $0.01$  Зв/ч. При этом оценка полной величины НКРД за все время СПС Кэррингтона составляет  $\sim 0.04$  Зв, а полная доза с учетом заряженных частиц достигала  $0.16$  Зв.

Полученные оценки следует сравнить с нормами, которые регламентируют условия для работы человека в космосе. Российский космонавт не должен получить за год радиационную дозу  $0.3$  Зв и дозу  $1$  Зв за всю профессиональную карьеру [16]. Таким образом, в случае СПС Кэррингтона длительностью несколько дней человек на лунной поверхности мог бы получить дозу величиной около половины от допустимого значения за год, и составляющую  $16\%$  от предельно допустимого значения за всю карьеру.

В нормативных документах НАСА по радиационной безопасности в космосе также приведено пороговое значение допустимой для астронавта радиационной дозы от однократного СПС, которое равно  $0.25$  Зв [17]. Оценка для СПС Кэррингтона составила  $64\%$  от предельно допустимой величины.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные оценки показали, что СПС представляют собой важный фактор риска, который необходимо учитывать в ходе развития лунной космонавтики. Поверхность Луны — это источник вторичного нейтронного излучения, которое возрастает на несколько порядков во время интенсивных СПС по сравнению с квазистационарным потоком нейтронов под воздействием ГКЛ. Важной особенностью радиационного риска от СПС является очень ограниченная предсказуемость времени начала их генерации на Солнце. Это означает, что планы деятельности космонавтов на лунной поверхности должны учитывать суточные прогнозы процессов в активных областях на Солнце и предусматривать непрерывный мониторинг солнечной активности для выработки сигналов предупреждения о начале потенциально опасных СПС.

Особенностью разработки средств радиационной защиты космонавтов на Луне от воздействия СПС является противоречивость требований экранирования от потока солнечных энергичных заряженных частиц с энергиями до сотен мегаэлектронвольт, от потока вторичных нейтронов от вещества лунной поверхности и конструкций космического аппарата. Увеличение толщины стенок обитаемых модулей или слоя насыпного укрытия из реголита для поглощения потока заряженных частиц повышает поток вторичных нейтронов, которые генерируются веществом, окружающим обитаемый объем. Методы экранирования от нейтронов хорошо известны (см., например, [18]), и их применение потребует разработки новых космических технологий и дополнительных усилий по созданию элементов лунной инфраструктуры.

Особого рассмотрения требует вопрос о защите будущих лунных экспедиций от СПС с максимально высокой интенсивностью. Рассмотренное выше СПС Кэррингтона наверняка не может считаться таковым. Исследования состава и особенностей кольцевых структур сохранившихся остатков стволов древних деревьев показали, что за последние  $10000$  лет Земля подверглась облучению нескольких мощных СПС,

интенсивность которых была существенно выше СПС Кэррингтона [19, 20]. Дату следующего подобного события предсказать невозможно. Поэтому фактор радиационного риска от интенсивных СПС следует принимать во внимание уже сейчас — при разработке лунных космических комплексов и планировании будущих пилотируемых экспедиций.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-12-00321.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Drake D.M., Feldman W.C., Jakosky B.M. Martian neutron leakage spectra // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. Iss. B6. P. 6353–6368.  
<https://doi.org/10.1029/JB093iB06p06353>
2. Masarik J., Reedy R. Gamma ray production and transport in Mars // J. Geophys. Res.: Planets. 1996. V. 101. Iss. E8. P. 18891–18912.  
<https://doi.org/10.1029/96JE01563>
3. Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L. et al. Hydrogen distribution in the lunar polar regions // Icarus. 2017. V. 283. P. 20–30.
4. Colaprete A., Schultz P., Heldmann J. et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume // Science. 2010. V. 330. P. 463–468.
5. Lawrence D.J., Peplowski P.N., Wilson J.T. et al. Global hydrogen abundances on the lunar surface // J. Geophysical Research: Planets. 2022. V. 127. Art. ID e2022JE007197.  
<https://doi.org/10.1029/2022JE007197>
6. Borg L.E., Connelly J.N., Boyet M. et al. Chronological evidence that the Moon is either young or did not have a global magma ocean // Nature. 2011. V. 477. P. 70–72.
7. Usoskin I.G., Gil A., Kovaltsov G.A. et al. Heliospheric modulation of cosmic rays during the neutron monitor era: Calibration using PAMELA data for 2006–2010 // J. Geophys. Res. Space Physics. 2017. V. 122. P. 3875–3887.  
DOI: 10.1002/2016JA023819.
8. Kusano K., Iju T., Bamba Yu. et al. A physics-based method that can predict imminent large solar flares // Science. 2020. V. 369. P. 587–591.  
<https://doi.org/10.1126/science.aaz2511>
9. Митрофанов И.Г., Санин А.Б., Литвак М.Л. и др. Нейтронное излучение лунной поверхности на полюсах // Косм. исслед. 2024. Т. 62. №6. С. 663–672.
10. Townsend L.W., Zapp E.N., Stephens D.L. et al. Carrington flare of 1859 as a prototypical worst-case solar energetic particle event // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2003. V. 5(6). |Art.ID. 2307e2309.
11. Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. Recent developments in GEANT4 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2016. V. 835. P. 186–225.
12. Miroshnichenko L.I., Nymmik R.A. Extreme fluxes in solar energetic particle events: Methodological and physical limitations // Radiation Measurements. 2014. V. 61. P. 6–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2013.11.010>
13. Usoskin I.G., Gil A., Kovaltsov G.A. et al. Heliospheric modulation of cosmic rays during the neutron monitor era: Calibration using PAMELA data for 2006–2010 // J. Geophys. Res. Space Physics. 2017. V. 122. P. 3875–3887.  
DOI: 10.1002/2016JA023819.
14. Dietze G., Bartlett D., Cool D. et al. ICRP Publication 123: Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space // Annals of the ICRP. 2013. V. 42(4). P. 1–339.  
DOI: 10.1016/j.icrp.2013.05.004.
15. Dobynde M., Guo J. Guidelines for radiation-safe human activities on the Moon // Nature. Astronomy. 2024. V. 8. P. 991–999.
16. Limitation of Astronaut's Exposure During Near-Earth Space Flights, Methodical Recommendations Report MR-17.01-2001 (in Russian) (Roscosmos, 2021).
17. NASA Space Flight Human-System Standard. V. 1, Revision b: Crew health 1. 67 p. (NASA, 2022).
18. Мокроусов М.И., Митрофанов И.Г., Аникин А.А. и др. Второй этап космического эксперимента “БТН Нейтрон” на борту российского сегмента Международной космической станции: аппаратура БТН-M2 // Косм. исслед. 2022. Т. 60. №5. С. 426–436.
19. Brehm N., Christl M., Knowles T.D.J. et al. Tree-rings reveal two strong solar proton events in 7176 and 5259 BCE // Nature Communications. 2022. V. 13. Art. ID. 1196.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-28804-9>
20. Uusitalo J., Golubenko K., Arppe L. et al. Transient offset in  $^{14}\text{C}$  after the Carrington event recorded by polar tree rings // Geophysical Research Letters. 2024. V. 51. Art.ID. e2023GL106632.  
<https://doi.org/10.1029/2023GL106632>

## NEUTRON EMISSION FROM THE MOON DURING THE HISTORIC CARRINGTON SOLAR PARTICLE EVENT OF SEPTEMBER 1, 1859

© 2025 I. G. Mitrofanov, A. S. Sanin, M. L. Litvak, D. V. Golovin\*, M. V. Djachkova, A. A. Anikin, N. V. Lukyanov

*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*\*e-mail: golovin@np.cosmos.ru*

The neutron radiation of the lunar surface under the influence of energetic charged particle flux from the intense Solar Proton Event (SPE) is considered. Numerical estimates of the neutron flux and the corresponding neutron component of the radiation dose are made for the historical Carrington SPE, which can be considered an example of the most intense SPE recorded in the modern period of solar activity observations. It is shown that the neutron component of the dose during the Carrington SPE was approximately 1000 times higher than the background value from the impact of Galactic cosmic rays (GCR) on the lunar surface under quiet Sun conditions. The value of the total radiation dose on the lunar surface during the Carrington SPE was close to the limit values for humans in space.