

УДК 520.6

НЕЙТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПОЛЮСАХ

© 2024 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 10.11.2023 г.

После доработки 12.02.2024 г.

Принята к публикации 16.02.2024 г.

Лунная поверхность в окрестности полюсов обладает особыми свойствами по сравнению с поверхностью на экваторе и на умеренных широтах. В полярном реголите содержится в достаточно большом количестве водяной лед, который существенно влияет на возникающее под действием галактических космических лучей нейтронное излучение. Также, температура полярного реголита может иметь предельно низкие значения около 25 К, вследствие чего тепловая компонента нейтронного потока частично удерживается в гравитационном поле.

На основе численного моделирования нейтронного излучения лунной поверхности показаны его главные особенности для полярных районов по сравнению с экваториальными: значительное уменьшение отношения потоков эпитепловых и тепловых нейтронов вследствие увеличения концентрации водорода в реголите и существенное увеличение плотности тепловых нейтронов вблизи поверхности вследствие гравитационного удержания.

DOI: 10.31857/S0023420624060102, EDN: IFHRGI

1. ВВЕДЕНИЕ

Нейтронное излучение Луны возникает в верхнем слое реголита под воздействием потока Галактических космических лучей (ГКЛ) и спорадически возникающих солнечных космических лучей (СКЛ) [1, 2]. Нейтроны возникают в верхнем слое на глубине около 1 м в ядерных реакциях раскола ядер основных породообразующих элементов при столкновении с энергичными заряженными частицами ГКЛ и СКЛ, главным образом протонами и альфа-частицами. Образовавшиеся нейтроны имеют характерную энергию около нескольких десятков мегаэлектронвольт и относительно небольшую длину свободного пробега, поэтому после рождения эти частицы испытывают многократные столкновения с ядрами лунного вещества. В каждом столкновении нейтроны теряют часть своей энергии, пропорциональную отношению масс нейтрона и ядра. Свободные нейтроны являются нестабильными частицами и распадаются за время около 880 с. Это время гораздо продолжительнее времени блуждания образовавшихся

частиц в веществе, которое составляет около нескольких миллисекунд. Поэтому распад нейтронов до их вылета с поверхности практически отсутствует. Процесс блужданий нейтронов в веществе подобен диффузии — он может завершиться поглощением в реакции ядерного захвата, либо спонтанным распадом нейтрона, либо вылетом нейтрона с поверхности в окололунное космическое пространство, либо уходом нейтрона на большую глубину.

Спектральное распределение вылетающих нейтронов по энергии возникает как результат процесса блужданий с замедлением, который носит случайный характер. Нейтроны, которые практически сразу после рождения покидают приповерхностный слой почти полностью сохраняют исходную энергию. Они вносят вклад в высокоэнергетическую часть спектра. Те нейтроны, которые до вылета испытали большое количество столкновений, существенно замедляются. Часть из них имеют надтепловые энергии (такие нейтроны называют эпитепловыми). Другие нейтроны оказываются полностью

термализованными и имеют характерную кинетическую энергию, соответствующую температуре приповерхностного грунта (такие нейтроны принято называть тепловыми). Таким образом, энергетический спектр нейтронного излучения Луны простирается на ~ 13 порядков от десятков ГэВ до тысячных долей эВ.

Лунное нейтронное альbedo было впервые измерено в 1972 г. в миссии *Apollo-17* в эксперименте LPNE [3]. Прибор LNPE содержал две системы детектирования, обе с использованием трековых детекторов частиц на основе ^{235}U и ^{10}B . Прибор состоял из двух блоков, которые были соединены вместе и установлены в буровой скважине. Было измерено, как объемная плотность нейтронов (нейтрон/см³) меняется с глубиной, и показано, что максимальное значение $\sim 10^{-5}$ нейтрон/см³ наблюдается на глубине 1.5 м [3]. Глобальные измерения потока лунных нейтронов были выполнены в 1998–1999 гг. в орбитальном эксперименте LPNS на борту космического аппарата (КА) NASA *Lunar Prospector* в спектральных диапазонах тепловых, эпитепловых и быстрых нейтронов [4, 5]. Было показано, что нейтронный поток от Луны имеет значительную пространственную переменность. Значительные вариации потока тепловых нейтронов наблюдались на умеренных широтах. Этот эффект был связан с вариациями концентраций в составе лунного реголита породообразующих элементов и элементов с большими сечениями поглощения нейтронов [4]. Были обнаружены значительные уменьшения потока эпитепловых нейтронов в окрестностях северного и южного лунных полюсов. Причиной этого эффекта было предложено считать присутствие в лунном полярном веществе на дне полярных постоянно затененных кратеров относительно высокой массовой доли водорода в составе молекул воды по сравнению с веществом на умеренных широтах [5]. Дело в том, что замедление нейтронов в веществе с высокой концентрацией водорода происходит эффективнее, чем в грунте с малой водородной концентрацией, так как относительная доля теряемой энергии нейтрона при каждом столкновении с ядром атома водорода может быть порядка единицы. Вследствие этого, поток вылетающих эпитепловых нейтронов в полярных районах уменьшается. Соответственно, эффективность термализации нейтронов в веществе с большой концентрацией водорода возрастает. И поэтому, можно ожидать значительного повышения на полюсах потока тепловых нейтронов даже при том, что заметная часть таких частиц поглощается самим водородом.

Таким образом, собственное нейтронное излучение Луны в полярных районах существенно отличается от излучения на умеренных широтах. В этих районах имеет место значимое понижение потоков эпитепловых нейтронов. Максимальное пространственное разрешение LPNS составило порядка 45 км на высоте 30 км [6]. Новые данные появились в 2009 г. после запуска еще одного орбитального КА NASA *Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)*, на котором был установлен российский коллимированный нейтронный спектрометр ЛЕНД [7, 8]. ЛЕНД обладает значительно более узким полем зрения, чем LPNS и способен регистрировать нейтронное излучение от объектов на поверхности Луны с пространственным разрешением 10 км с высоты в 50 км [7]. Одновременно с миссией *LRO* проводился эксперимент *LCROSS*. В ходе этого эксперимента разгонный блок Центавр КА *LCROSS* был нацелен с лунной орбиты на участок лунной поверхности, где предполагалось обнаружить большее количество воды [9]. Выбор места падения был сделан с учетом наблюдений прибора ЛЕНД, выполненных в самом начале миссии *LRO* [8]. Таким местом оказалась вечно затененная область внутри кратера Кабео вблизи южного полюса с наибольшим понижением потока эпитепловых нейтронов, которое составило около 20% [8, 10]. Вследствие того, что направление лунной полярной оси практически перпендикулярно к направлению на Солнце, в окрестности полюсов средняя температура приповерхностного слоя вещества гораздо ниже, чем на умеренных широтах. Например, в постоянно затененном северном полярном кратере Эрмит температура вещества составляет около 25 K (<https://lunar.gsfc.nasa.gov/images/lithos/LROlitho7temperaturevariation27May2014.pdf>).

Таким образом, в окрестности полюсов в районах с высоким содержанием воды условия возникновения лунного нейтронного излучения могут значительно отличаться от условий на умеренных широтах. Настоящая работа посвящена изучению свойств нейтронного излучения лунной поверхности вблизи полюсов.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯРНОГО НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛУНЫ

Для изучения свойств нейтронного излучения полярной поверхности Луны было выполнено численное моделирование на основе метода Монте-Карло. Для этого использовался пакет программ Geant4 (версия geant4.11.01-patch-02

[11]), который позволяет моделировать ядерные процессы взаимодействия между ядрами и частицами. Лунное вещество считалось однородным по составу как вдоль поверхности, так и по глубине. Состав основных породообразующих элементов соответствовал данным для грунта типа ferroan anorthosite (FAN [12]), который представляет собой древнейший тип лунной коры и часто используется в качестве базового состава для моделирования нейтронного альbedo полярных районов Луны [13].

Свойства вещества с указанным составом породообразующих элементов дополнительно описывались двумя переменными параметрами. Первым параметром было значение массовой доли воды, традиционно заданное в форме водного эквивалента водорода или WEN (Water Equivalent Hydrogen). Согласно имеющимся оценкам для значений WEN вблизи полюсов величина этого параметра для моделирования задавалась в пределах от 0 до 10%. Максимальное значение примерно в два раза превышает оценку, полученную на основе обработки данных измерений эксперимента *LCROSS* [9]. Вторым параметром была температура вещества. Расчеты были проведены для трех значений температур 25, 100 и 273 К. Минимальное значение соответствует оценке температуры поверхности на дне постоянно затененного кратера Эрмит в окрестности северного полюса (<https://lunar.gsfc.nasa.gov/images/lithos/LROlitho7temperaturevariation27May2014.pdf>).

Спектральная плотность потока частиц ГКЛ была назначена в соответствии с минимумом солнечного цикла (т.е. максимумом потока ГКЛ), что соответствует фазе солнечного цикла с параметром солнечной модуляции $\Phi = 398$ МВ по модели ГКЛ [14]. Соответственно, приведенные ниже оценки потоков нейтронов следует рассматривать как верхние пределы.

История жизни каждого нейтрона моделировалась от момента его рождения при столкновении частицы ГКЛ с ядром лунного вещества до наступления одного из четырех событий: поглощения нейтрона в ядерных реакциях захвата, выхода нейтрона в окололунное космическое пространство, ухода нейтрона вглубь на глубину невозврата, или спонтанного распада. Для каждой вылетающей с поверхности частицы фиксировалась ее энергия и направление вылета относительно нормали к поверхности. С учетом этих данных рассчитывалось движение частицы в гравитационном поле Луны либо (а) — до ее ухода на расстояние от поверхности около миллиона

километров, либо (б) — до возврата по баллистической траектории обратно к поверхности, либо (в) — до момента распада во время движения в окололунном пространстве.

Ниже будет показано, что в случае (б) вернувшийся нейтрон в приповерхностном слое может испытать эффективное отражение вследствие столкновения с ядрами, приобрести новую энергию в соответствии с распределением Максвелла и вновь покинуть поверхность с вылетом в окололунное пространство. Эта часть истории нейтронов в численном моделировании не учитывалась. Вклад отраженных поверхностью нейтронов оценивался отдельно на основе общих теоретических соображений.

Полное число нейтронов, для которых было проведено моделирование, составило 10^8 отдельно для каждого значения температуры грунта и значения WEN. Для каждого элементарного объема окололунного космического пространства от поверхности до высоты 1 млн. км относительно поверхности были построены энергетические спектры нейтронов для разных направлений вектора их скорости относительно направления в зенит, причем частицы с направлением движения к поверхности также принимались во внимание.

В качестве примера на рис. 1 представлены энергетические спектры полного потока вылетающих с лунной поверхности нейтронов для двух предельных случаев: (а) — отсутствия воды в веществе WEN = 0 % и высокой температуры $T = 273$ К и (б) — высокого содержания воды WEN = 10 % и минимальной температуры $T = 25$ К. Изменение температуры поверхности влияет только на низкоэнергетическую часть спектра с энергией нейтронов ниже 10^{-6} МэВ, в то время как увеличение содержания воды от 0 до 10 % значительно снижает поток нейтронов в широком диапазоне энергий от 10^{-8} до 10^6 МэВ.

Следует отметить, что кроме потока нейтронов, вылетевших с поверхности, существует поток нейтронов, которые возвращаются к поверхности в гравитационном поле Луны, часть из которых испытывает повторную термализацию в верхнем слое грунта и имеет шанс повторно выйти с поверхности в окололунное пространство. На рис. 1 штриховыми линиями показаны спектры нейтронов, вылетевших с поверхности в окололунное пространство. Сплошной линией показаны спектральные распределения, которые учитывают эффекты гравитационного удержания и распада нейтронов. Очевидно, что гравитация удерживает тепловые нейтроны не

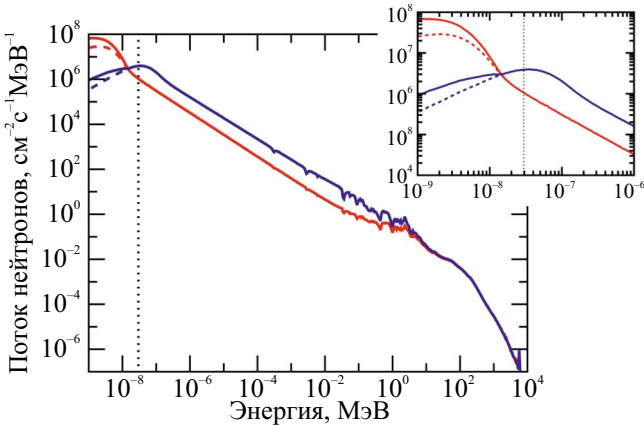


Рис. 1. Энергетические спектры потоков нейтронов на лунной поверхности для случая грунта с температурой 273 К при WEN = 0% (синяя линия) и случая грунта с температурой 25 К и WEN = 10% (красная линия). Штрихами показаны спектры потоков нейтронов, вылетающих с поверхности. Сплошной линией показаны спектры полного потока нейтронов с учетом тепловых нейтронов, многократно вернувшихся на поверхность и рассеянных в приповерхностном слое грунта. На врезке в крупном масштабе показан энергетический диапазон тепловых нейтронов. Вертикальный пунктир показывает энергию, соответствующую величине параболической скорости для лунной поверхности.

зависимо от того, в грунте с какой температурой и каким содержанием воды они термализовались. Поэтому, относительное различие между сплошными и пунктирными линиями одинаково и для красных, и для синих кривых на одной

и той же энергии нейтрона. Наибольшее различие между сплошными и пунктирными кривыми наблюдается до энергий ~0.01 эВ и зависит от величины параболической скорости на лунной поверхности (соответствующая ей энергия показана точечным пунктиром) и длительности жизни свободного нейтрона. Наиболее вероятная энергия, которая соответствует пику распределения Максвелла (kT , где k — постоянная Больцмана), для нейтронов, термализовавшихся в грунте с температурой 25 К равна примерно 0.002 эВ. Соответственно, в случае температуры грунта 273 К эта энергия составляет около 0.024 эВ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1 Общая картина нейтронного излучения Луны на полюсах

Для описания общей картины полярного нейтронного излучения Луны были выбраны четыре энергетических интервала: тепловые нейтроны с энергиями <1 эВ (далее этот диапазон энергий обозначен, как ТН), эпитепловые нейтроны с энергиями 1 эВ–10 кэВ (диапазон ЭТН), быстрые нейтроны с энергиями 10 кэВ–10 МэВ (диапазон БН) и энергичные нейтроны с энергиями >10 МэВ (диапазон ЭН).

В табл. 1 представлены интегральные потоки нейтронов, излучаемые поверхностью под воздействием ГКЛ (в единицах нейтрон/см²/с) в

Таблица 1. Интегральные потоки нейтронов (нейтрон/см²/с), излучаемые лунной поверхностью под воздействием ГКЛ в энергетических интервалах ТН, ЭТН, БН и ЭН

H ₂ O, масс. %	0			0.1			0.5			1.0		
Т, К	25	100	273	25	100	273	25	100	273	25	100	273
ТН	0.55	0.59	0.67	0.55	0.60	0.69	0.55	0.63	0.75	0.54	0.64	0.79
ЭТН		2.09			1.95			1.52			1.23	
БН		3.66			3.57			3.23			2.94	
ЭН		1.38			1.38			1.38			1.37	
Сумма*		7.68–7.80			7.45–7.59			6.68–6.88			6.08–6.34	

H ₂ O, масс. %	3.0			5.0			10.0		
Т, К	25	100	273	25	100	273	25	100	273
ТН	0.47	0.61	0.80	0.42	0.57	0.76	0.33	0.47	0.64
ЭТН		0.74			0.55			0.34	
БН		2.29			1.93			1.44	
ЭН		1.36			1.33			1.29	
Сумма*		4.86–5.19			4.23–4.57		3.40–3.71		

* Суммарный поток нейтронов представлен для температур поверхности от 25 до 273 К.

указанных энергетических интервалах ТН, ЭТН, БН и ЭН для трех значений температуры (только для тепловых нейтронов) и семи значений массовой доли воды в веществе 0, 0.1, 0.5, 1, 3, 5 и 10%.

Согласно данным табл. 1, в нейтронном потоке наблюдаются несколько эффектов, связанных со свойствами вещества лунной поверхности:

1. Поток тепловых нейтронов из грунта без воды $WEN = 0\%$ возрастает с ростом температуры. При повышении температуры от 25 до 273 К этот поток увеличивается примерно в 1.2 раза. Этот рост связан с уменьшением сечений поглощения тепловых нейтронов ядрами порообразующих элементов при увеличении температуры. Сечение захвата тепловых нейтронов зависит от энергии нейтрона как $\sim 1/\sqrt{E}$, поэтому при увеличении температуры в 10 раз (от 25 до 273 К) наиболее вероятная энергия теплового нейтрона ($\sim kT$) тоже возрастает в 10 раз, а сечение захвата падает примерно в 3 раза. Следует отметить, что нейтроны с энергиями выше 1 эВ практически не поглощаются и поэтому их потоки не меняются с изменением температуры вещества (см. табл. 1).

2. Для температуры 25 К поток тепловых нейтронов имеет максимум при значении WEN около 0.1 % и спадает при дальнейшем увеличении WEN . Для температуры 273 К максимум потока наблюдается при WEN около 3.0%. Такая немонотонная зависимость потока в диапазоне ТН от

массовой доли воды связана с двумя параллельно происходящими процессами, противоположно влияющими на его величину. Первым процессом является повышение эффективности термализации нейтронов в веществе при увеличении массовой доли водорода — при увеличении WEN производство тепловых нейтронов в веществе повышается. Второй процесс связан с увеличением коэффициента поглощения нейтронов веществом при увеличении в нем массовой доли WEN вследствие реакции захвата нейтронов протонами с образованием дейтерия. Максимум потока в спектральном диапазоне ТН имеет место, когда эти два процесса уравнивают друг друга. При низкой температуре 25 К максимум потока тепловых нейтронов находится там, где сечение реакции поглощения нейтронов водородом велико, и компенсация наступает при меньшем содержании воды — около 0.1% по массе. При повышении температуры до 273 К максимум потока смещается в область более высоких энергий, где сечение поглощения уменьшается, и, поэтому, поглощение компенсирует процесс термализации нейтронов при гораздо большей массовой доле воды, около 3%.

3. Очевидно, что для нейтронов с энергиями выше 1 эВ все зависимости от температуры вещества пропадают. Эти частицы покидают поверхность до установления теплового равновесия с атомами. Основным фактором, который влияет на потоки в спектральных диапазонах

Таблица 2. Параметры потоков нейтронов в диапазоне ТН

H_2O , масс. %	0			0.1			0.5			1.0		
Т, К	25	100	273	25	100	273	25	100	273	25	100	273
Поток излученных ТН, нейтрон/см ² /с	0.55	0.59	0.67	0.55	0.60	0.69	0.55	0.63	0.75	0.54	0.64	0.79
Поток возвращенных ТН, нейтрон/см ² /с	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04	0.02	0.01	0.06	0.03	0.01
Доля α , %	3.5	1.9	0.8	4.3	2.3	0.9	7.5	3.8	1.4	10.5	5.2	1.8
Оценка полного потока ТН, нейтрон/см ² /с	0.58	0.61	0.68	0.59	0.62	0.70	0.61	0.67	0.77	0.63	0.69	0.81

H_2O , масс. %	3.0			5.0			10.0		
Т, К	25	100	273	25	100	273	25	100	273
Поток излученных ТН, нейтрон/см ² /с	0.47	0.61	0.80	0.42	0.57	0.76	0.33	0.47	0.64
Поток возвращенных ТН, нейтрон/см ² /с	0.08	0.05	0.02	0.09	0.05	0.02	0.09	0.05	0.02
Доля α , %	17.6	8.2	2.7	21.3	9.5	3.1	25.8	11.1	3.5
Оценка полного потока ТН, нейтрон/см ² /с	0.61	0.69	0.83	0.57	0.65	0.80	0.48	0.55	0.67

ЭТН и БН, является повышение эффективности замедления нейтронов при увеличении массовой доли водорода в веществе. Так, при добавлении в сухое вещество доли водорода, соответствующей малой массовой доли воды $W_{EH} = 0.1\%$, потоки в диапазонах ЭТН и БН ослабляются на 6.6 и 2.5%, соответственно. При увеличении массовой доли воды до 10% эти потоки уменьшаются относительно потоков для сухого грунта в 6.1 и 2.5 раза в диапазонах ЭТН и БН соответственно.

4. Присутствие в веществе водорода практически не влияет на поток энергичных нейтронов. Эти частицы покидают вещество сразу после рождения, и эффективность процесса замедления не влияет на величину их потока. Численное моделирование показало (табл. 2), что при увеличении массовой доли воды в веществе от ее полного отсутствия до $W_{EH} = 10\%$ поток в диапазоне ЭН уменьшается всего на 6.5%. Основное влияние на поток энергичных нейтронов оказывает состав основных порообразующих элементов, так как с увеличением атомного веса ядер возрастает эффективность рождения большего количества нейтронов в веществе под воздействием частиц ГКЛ [15].

На рис. 2 представлены зависимости отношения потоков в диапазонах ЭТН и БН относительно потока в диапазоне ЭН. Экспериментальные измерения этих отношений позволяют оценить массовую долю воды в веществе практически независимо от данных о составе основных порообразующих элементов.

5. Суммарный поток нейтронного излучения лунной поверхности уменьшается с увеличением

массовой воды в веществе с фиксированным составом. Сравнение оценок для сухого грунта и грунта с $W_{EH} = 10\%$ демонстрирует уменьшение суммарных потоков в 2.3 и 2.1 раза при температурах 25 и 273 К соответственно. Разница между этими коэффициентами возникает вследствие увеличения сечения поглощения тепловых нейтронов ядрами водорода при низкой температуре.

3.2 Эффект гравитационного удержания лунных тепловых нейтронов

Тепловые нейтроны, вылетающие из верхнего слоя поверхности лунного вещества, имеют скорости, соответствующие температуре верхнего слоя поверхности (см. рис. 1). Температура лунной поверхности испытывает вариации 150–200° в течение лунных суток (см., например, [16]). Такой большой градиент наблюдается только на самой поверхности и резко спадает с глубиной. На глубине около 0.5–1 м температура стабилизируется и не испытывает вариаций [16]. На дне вечно затененных кратеров температура может опускаться до нескольких десятков кельвинов, а на освещенных участках достигать 0°С (273 К) [17].

Для температуры 273 К наиболее вероятная энергия тепловых нейтронов соответствует величине 0.024 эВ и наиболее вероятная скорость равна 2.1 км/с. Такая скорость меньше второй космической скорости для Луны, равной 2.4 км/с. Это означает, что при низких температурах поверхности значительная доля вылетающих с поверхности тепловых нейтронов не покинет окрестность Луны, а двигаясь по баллистической траектории, вернется на поверхность.

Численное моделирование позволило оценить долю частиц, которые возвращаются на лунную поверхность по баллистической траектории (см. табл. 2). Очевидно, что доля захваченных гравитацией возвращающихся нейтронов возрастает при уменьшении температуры. Так, для грунта с относительно высоким содержанием воды $W_{EH} = 3\%$ доля возвращающихся частиц возрастает от 2.7 до 17.6% при уменьшении температуры от 273 до 25 К соответственно.

Оказалось, что доля захваченных гравитационным полем частиц также зависит от массовой доли воды в грунте. При температуре 25 К для сухого грунта ($W_{EH} = 0\%$) эта доля составляет около 3.5% и увеличивается до 25.8% для грунта с высоким содержанием воды ($W_{EH} = 10\%$). Эффективность гравитационного захвата от массовой доли воды в грунте вызвана зависимостью

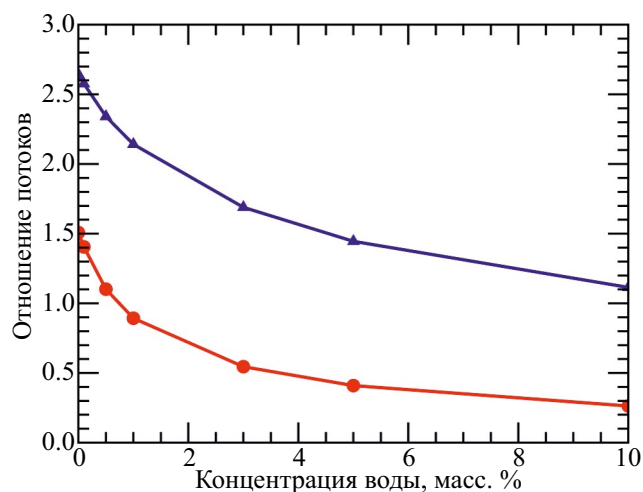


Рис. 2. Зависимости отношения потоков нейтронов в диапазонах ЭТН (красная кривая) и БН (синяя кривая) относительно потока в диапазоне ЭН.

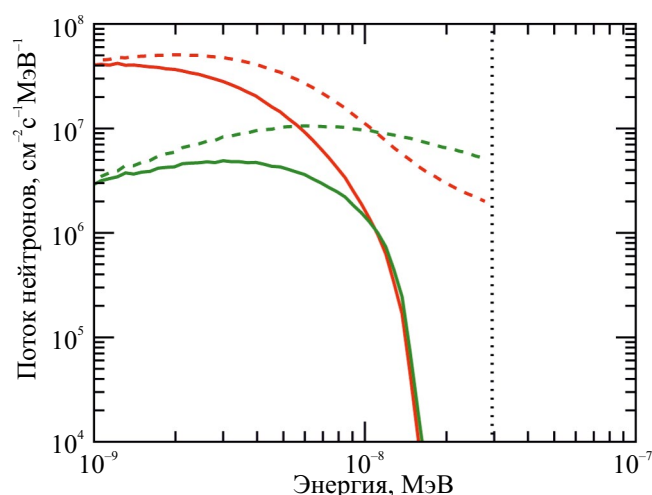


Рис. 3. Спектральные распределения многократно вернувшихся к поверхности частиц для вещества поверхности с массовой долей воды 0 и 10%. Для сравнения на рисунке представлены спектры для идеального случая в предположении стабильности свободных нейтронов (показаны штрихами). Вертикальный пунктир показывает энергию, соответствующую величине параболической скорости для лунной поверхности.

спектрального распределения вернувшихся нейтронов от WEN с учетом их распада. На рис. 3 представлены спектральные распределения вернувшихся к поверхности частиц для вещества поверхности с массовой долей воды 0 и 10%. Для сравнения представлены спектры для физически нереального случая в предположении стабильности свободных нейтронов (показаны штрихами). Точками отмечена энергетическая граница, соответствующая параболической скорости на лунной поверхности. Из рисунка видно, что количество вернувшихся на поверхность нейтронов с энергиями более 0.01 эВ быстро убывает. Это происходит потому, что нейтроны с такими энергиями проводят в полете по баллистической траектории после вылета с поверхности до возвращения обратно время, сопоставимое или превышающее время жизни свободного нейтрона.

В максимальном случае гравитационного захвата среди рассмотренных ($T = 25$ К и $WEN = 10\%$) доля возвратившихся нейтронов составляет 25.8%. Соответственно, полный поток нейтронов вблизи поверхности увеличивается на эту величину. Однако такое увеличение полного потока нейтронов над поверхностью вследствие гравитационного удержания не является окончательным. Вернувшиеся нейтроны, двигаясь сверху вниз, проникают в верхний слой вещества поверхности. Аналогично тому, как происходит

исходный процесс термализации нейтронов после рождения, вернувшиеся нейтроны вновь диффундируют в веществе, сталкиваясь и обмениваясь энергией с ядрами. В процессе столкновений частицы могут вторично вылететь через поверхность для повторного полета в окололунном пространстве. Как и в первый раз, в зависимости от приобретенного импульса они могут покинуть окололунное пространство или остаться захваченными. Вообще говоря, тепловой нейтрон может многократно покидать поверхность и возвращаться к ней: этот процесс завершится, когда он покинет гравитационное поле Луны или покинет приповерхностный слой с уходом на глубину, или испытает радиоактивный распад, или будет захвачен.

Эффект гравитационного удержания тепловых нейтронов в гравитационном поле Луны можно качественно описать относительно простой формулой. Вероятность удержания теплового нейтрона в гравитационном поле после вылета с поверхности можно задать как параметр α , а вероятность вылета с поверхности после повторной термализации параметром β . Суммарную величину интегрального потока нейтронов вдоль всех направлений вблизи поверхности можно описать простым выражением, воспользовавшись соотношением для суммы геометрической прогрессии:

$$F_{sum} = F(1 + \alpha + \alpha\beta + \alpha^2\beta + \alpha^2\beta^2 + \dots) = \sum_{i=1}^n F(1 + \alpha)(\alpha\beta)^{n-1} = \frac{F(1 + \alpha)}{(1 - \alpha\beta)},$$

где F — это исходный поток нейтронов в диапазоне ТН, излученный с лунной поверхности (см. третью строку в табл. 2), а F_{sum} соответствует полной величине потока нейтронов с учетом вернувшихся частиц.

Согласно численному моделированию, для случая $T = 25$ К и $WEN = 10\%$ вероятность гравитационного захвата теплового нейтрона $\alpha = 0.26$. Величина β в рамках выполненного численного моделирования не оценивалась. В качестве верхнего предела этот параметр можно задать равным 0.5 (половина вернувшихся в приповерхностный слой нейтронов после термализации вновь вылетает в свободное пространство, захват и распад нейтронов не учитывается). В этом случае полный коэффициент увеличения потока тепловых нейтронов над поверхностью вследствие эффекта гравитационного удержания составит $1.26 / 0.87 = 1.45$, т.е. поток возрастает на 45%.

В нижней строке табл. 2 приведена оценка полного потока тепловых нейтронов над поверхностью Луны вследствие эффекта гравитационного удержания. Величина коэффициента α для каждого случая оценена на основе численного расчета (строка 5 в табл. 2 для доли возвращенных частиц), а величина β вероятности возврата из приповерхностного слоя в свободное пространство, как отмечено выше, принята равной 0.5.

Учет эффекта гравитационного удержания нейтронов позволяет скорректировать форму энергетического распределения потока лунных нейтронов в интервале низких энергий (см. сплошные линии на рис. 1).

3.3 Поле нейтронного излучения над полярной поверхностью Луны

В численном расчёте нейтронного поля над полярной Луной моделировалось движение каждого нейтрона в окололунном пространстве на разном удалении от Луны, при этом учитывались, как вероятность гравитационного захвата частиц, так и вероятность их радиоактивного распада. Зависимость потока нейтронов от расстояния R относительно центра Луны представлена на рис. 4 для спектральных диапазонов ТН и ЭТН.

Здесь прослеживается, как по мере удаления от Луны убывает поверхностная плотность

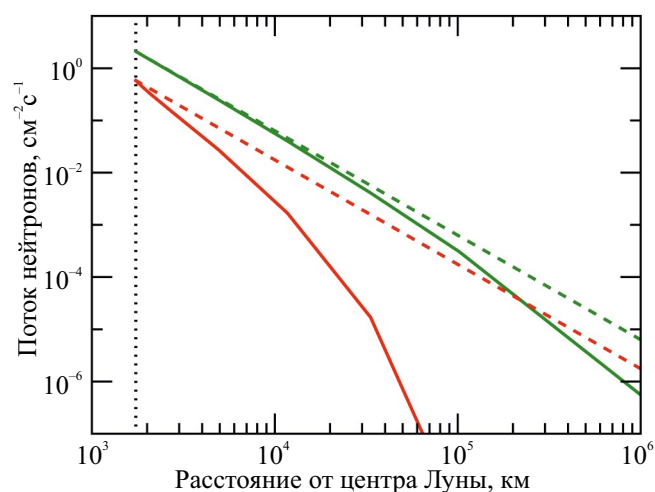


Рис. 4. Зависимости потоков нейтронов от расстояния R от центра Луны для спектральных диапазонов ТН (красная линия) и ЭТН (зеленая линия). Штриховыми линиями показаны зависимости по закону $F_0 R^{-2}$ для потоков нейтронов в данных спектральных диапазонах. Вертикальный пунктир показывает значение радиуса Луны, равного 1737 км.

нейтронов (количество нейтронов на единицу площади). В идеальном случае эта величина уменьшается по закону $F_0 R^{-2}$, где F_0 — это количество нейтронов, излученных с 1 см^2 лунной поверхности, а R — расстояние от центра Луны. На рис. 4 эти зависимости для нейтронов различных энергий показаны пунктирными линиями. В реальности такое поведение искажается за счет гравитационного захвата тепловых нейтронов и конечного времени жизни свободного нейтрона. Так, все нейтроны с энергиями выше 1 эВ безвозвратно покидают гравитационное поле Луны. Поэтому отклонение от закона R^{-2} связано только с распадом частиц. Нейтроны низких энергий в спектральном диапазоне ТН частично захватываются лунной гравитацией. Поэтому поток нейтронов с энергиями ниже 1 эВ ослабляется с расстоянием гораздо быстрее. Очевидно, что с повышением температуры грунта, в котором происходит термализация частиц, эффект гравитационного захвата ослабляется, и уменьшение потока с увеличением расстояния стремится следовать закону R^{-2} . Однако потеря нейтронов вследствие радиоактивного распада по-прежнему имеет место, и уменьшение полного потока с расстоянием и в этом случае происходит быстрее.

Следует учитывать, что потоки нейтронов над лунной поверхностью моделировались для случая постоянной температуры поверхности. В реальности лунная поверхность в окрестности полюсов имеет различную температуру в зависимости от условий ее освещенности. Соответственно, разные участки поверхности должны излучать потоки тепловых нейтронов с различными характерными энергиями и с разной вероятностью гравитационного удержания. В общем случае оценка потока тепловых нейтронов в точке на расстоянии R от центра Луны должна проводиться на основе интегрирования потоков от участков лунной поверхности с учетом как различия их температуры, так и различия содержания воды в их веществе. Потоки нейтронов в спектральных интервалах ЭТН и БН от температуры поверхности не зависят, поэтому для оценок их величин в точке над поверхностью достаточно учитывать только пространственную переменность содержания воды. Потоки энергичных нейтронов в диапазоне ЭН от содержания воды практически не зависят, и их величина определяется только элементарным составом вещества лунной поверхности. На зависимость поверхностной плотности нейтронов в диапазонах БН и ЭН от расстояния не влияет эффект гравитационного удержания и практически не

сказывается эффект конечного времени жизни нейтрона. Поэтому она уменьшается с расстоянием по закону R^{-2} , и соответствующие зависимости для них на рис. 4 не показаны.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного моделирования нейтронного излучения лунной поверхности в окрестности полюсов позволили обнаружить четыре эффекта, которые отличают окрестность полюсов от лунной поверхности на экваториальных и умеренных широтах:

1. Наличие водяного льда в полярном регионе значительно уменьшает полный поток нейтронного излучения. Сравнение суммарных потоков для поверхности с температурой 273 К с сухим веществом и с веществом с массовой долей воды 10% показывает, что во втором случае уменьшение потока нейтронов составляет примерно два раза. Это ослабление связано с более эффективным процессом замедления и термализации нейтронов при наличии в веществе водорода, что в свою очередь, приводит к увеличению их поглощения в ядерной реакции захвата ядрами водорода и других пороодообразующих элементов вследствие возрастания сечения этой реакции для медленных нейтронов.

2. Численное моделирование нейтронного излучения Луны показало, что отношения потоков эпитепловых нейтронов ЭТН и быстрых нейтронов БН к потоку энергичных нейтронов ЭН практически не зависят от состава грунта, но существенно меняются при изменении массовой доли воды. Отсюда следует, что экспериментальные измерения этих отношений позволяют оценить массовую долю воды в веществе, даже не имея информации о составе грунта, который в свою очередь определяет полный поток нейтронов.

3. Низкая температура грунта полярных районов приводит к возможности гравитационного захвата части тепловых нейтронов вследствие того, что их скорость недостаточна для покидания гравитационного поля Луны. Так, при температуре грунта, в котором происходит термализация нейтронов, около 25 К (это минимальная наблюдаемая температура лунной поверхности, которая зарегистрирована на полярных широтах), доля захваченных нейтронов составляет 26%. Эти нейтроны вновь проникают в приповерхностный слой вещества и после повторной термализации могут еще раз покинуть поверхность. Возможность многократного возвращения

тепловых нейтронов эффективно увеличивает полный поток нейтронного излучения вблизи поверхности. Так, согласно приведенным выше оценкам, поток нейтронов в спектральном диапазоне ТН вследствие гравитационного захвата может увеличиться на 45%.

4. Распад свободных нейтронов и гравитационный захват тепловых частиц приводит к более быстрому, чем по закону R^{-2} , уменьшению их полного потока над лунной поверхностью при удалении от нее. Для нейтронов с энергиями в интервалах ЭТН, БН и ЭН эффект более быстрого падения вызван только распадом нейтрона. В энергетическом диапазоне ТН падение с расстоянием происходит еще более быстро, так как добавляется влияние гравитационного захвата. В полярных районах этот эффект проявляется из-за более низкой температуры грунта, которая приводит к более заметному влиянию гравитационного захвата.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-12-0032.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

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. Woolum D.S., Burnett D.S., Furst M. et al. Measurement of the lunar neutron density profile // The Moon. 1975. V. 12. P. 231–250. <https://doi.org/10.1007/BF00577879>.
4. Feldman W.C., Barraclough B.L., Maurice S. et al. Major compositional units of the Moon: Lunar Prospector thermal and fast neutrons // Science. 1998. V. 281. P. 1489–1493. DOI: 10.1126/science.281.5382.1489.
5. Feldman W.C., Maurice S., Binder A.B. et al. Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: Evidence for water ice at the lunar poles // Science. 1998. V. 281. P. 1496–1500. DOI: 10.1126/science.281.5382.1496.

6. *Maurice S., Lawrence D.J., Feldman W.C. et al.* Reduction of neutron data from Lunar Prospector // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. Art.ID. E07S04. DOI: 10.1029/2003JE002208.
7. *Mitrofanov I.G., Bartels A., Bobrovitsky Y.I. et al.* Lunar exploration neutron detector for the NASA lunar reconnaissance orbiter // *Sp. Sci. Rev.* 2010. V. 150 P. 183–207.
8. *Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V. et al.* Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND // *Science*. 2010. V. 330. P. 483–486.
9. *Colaprete A., Schultz P., Heldmann J. et al.* Detection of water in the LCROSS ejecta plume // *Science*. 2010. V. 330. P. 463–468. DOI: 10.1126/science.1186986
10. *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. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.06.002>
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. DOI:10.1016/j.nima.2016.06.125
12. *Borg L., 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. <https://doi.org/10.1038/nature10328>
13. *Lawrence D.J., Feldman W.C., Elphic R.C. et al.* Improved modeling of Lunar Prospector neutron spectrometer data: implications for hydrogen deposits at the lunar poles // *J. Geophysical Research Atmospheres*. 2006. V. 111. Iss. E08001. DOI: 10.1029/2005JE002637.
14. *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. <https://doi.org/10.1002/2016JA023819>.
15. *Gasnault O., Feldman W.C., Maurice S. et al.* Composition from fast neutrons: Application to the Moon // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28(19). P. 3797–3800. DOI: 10.1029/2001GL013072.
16. *Vasavada A., Paige D.A., Wood S.E. et al.* Near-Surface Temperatures on Mercury and the Moon and the Stability of Polar Ice Deposits // *Icarus*. 1999. V. 141. P. 179–193. Art. ID. *icar.1999.6175*
17. *Paige D., Foote M.C., Greenhagen B.T. et al.* The lunar reconnaissance orbiter diviner lunar radiometer experiment // *Sp. Sci. Rev.* 2010. V. 150. P. 125–160. <https://doi.org/10.1007/s11214-009-9529-2>