

УДК 539.1.072

## К ПРОБЛЕМЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ НА ЛУНЕ

© 2010 г. А. Н. Денисов<sup>1</sup>, Н. В. Кузнецов<sup>2</sup>, Р. А. Ныммик<sup>2</sup>,  
М. И. Панасюк<sup>2</sup>, Н. М. Соболевский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерных исследований РАН, г. Москва

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ

Поступила в редакцию 27.01.2010 г.

В связи с проектами обитаемой базы на Луне становится актуальной оценка радиационной опасности ее персонала. В работе описана методика оценки радиационной обстановки на поверхности Луны от галактического и солнечного космического излучения. В глубине лунного грунта учтены роли как первичных, так и вторичных излучений, возникающих под воздействием высокоэнергичных протонов и ядер. Вычисленные потоки частиц используются для оценки среднегодовой поглощенной и эквивалентной локальной дозы в ткани. Установлено, что в лунном грунте вклад в дозу от вторичных нейтронов превосходит вклад от протонов. Оценен вклад в дозу вторичных частиц, генерируемых ядрами ГКЛ.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений в области исследования космического пространства является проект обитаемой базы на Луне. Поэтому оценки радиационной опасности для персонала и оборудования базы от прямого воздействия ГКЛ и СКЛ, а также от воздействия вторичных излучений, инициируемых в лунном грунте, являются актуальными.

Оценки радиационной опасности на Луне проводились и ранее (см., например, [1, 2] и цитированные там работы). Однако совершенствование моделей и методик расчета предполагает периодический пересмотр и уточнение полученных ранее данных. При этом наличие альтернативных методик является положительным фактором с точки зрения их взаимной проверки.

В настоящей работе представлены методика и результаты оценки радиационной опасности на Луне, полученные на основе оригинальных Российских моделей и компьютерных кодов: моделей галактических (ГКЛ) и солнечных (СКЛ) космических лучей [3–5]; модели лунного грунта, основанной на данных аппаратов *Луна-16* и *Луна-20* [6]; универсального транспортно-кода SHIELD [7] для моделирования взаимодействия адронов и ядер с веществом.

Некоторые предварительные результаты были представлены ранее в работе [8]. В настоящей работе в формирование потоков вторичных частиц в лунном грунте дополнительно учтен вклад ядер галактических космических лучей (ГКЛ). Полученные оценки поглощенных и эквивалентных доз могут служить основой для дальнейшего расчета дозиметрических характеристик и радиационного риска новых проектов. Детальный сравнительный анализ наших оценок с оценками других авторов является

отдельной задачей, однако серьезных противоречий с данными работы [1] нами не обнаружено (см. далее).

### 2. СПЕКТРЫ ГКЛ И СКЛ

Дифференциальные энергетические спектры  $\phi(E)$  частиц ГКЛ и СКЛ [3–5], бомбардирующих поверхность Луны в годы минимума и максимума солнечной активности, представлены на рис. 1. Предполагалось изотропное угловое распределение для всех снарядов при облучении поверхности Луны.

Для эпизодически возникающих событий СКЛ, согласно модели [5], рассматривался вариант, при котором вычисленный поток частиц СКЛ может быть превышен с вероятностью 1%. Отличием нашей работы от предыдущих является учет частиц не только в период максимума, но и в период минимума солнечной активности. Согласно модели [5] (рис. 1а), потоки частиц СКЛ в этот период могут играть заметную роль в формировании радиационных условий на поверхности Луны. Такое утверждение подтверждено появлением в 2005 и 2006 годах (при минимуме СА) потоков СКЛ значительной величины.

На рис. 1б показаны энергетические спектры годовых флюенсов протонов и основных ядер ГКЛ, который, по нашему мнению, должен быть учтен в вычислительных процедурах. Воздействие тяжелых ионов СКЛ в дозу радиации нами также моделировалось, однако, их вклад оказался не существенным и поэтому на рисунках не демонстрируется.

### 3. МОДЕЛЬ ЛУННОГО ГРУНТА

Согласно данным [6] принята следующая модель грунта. Поверхность Луны разбивалась на 5 слоев, плотность которых увеличивается с глубиной.

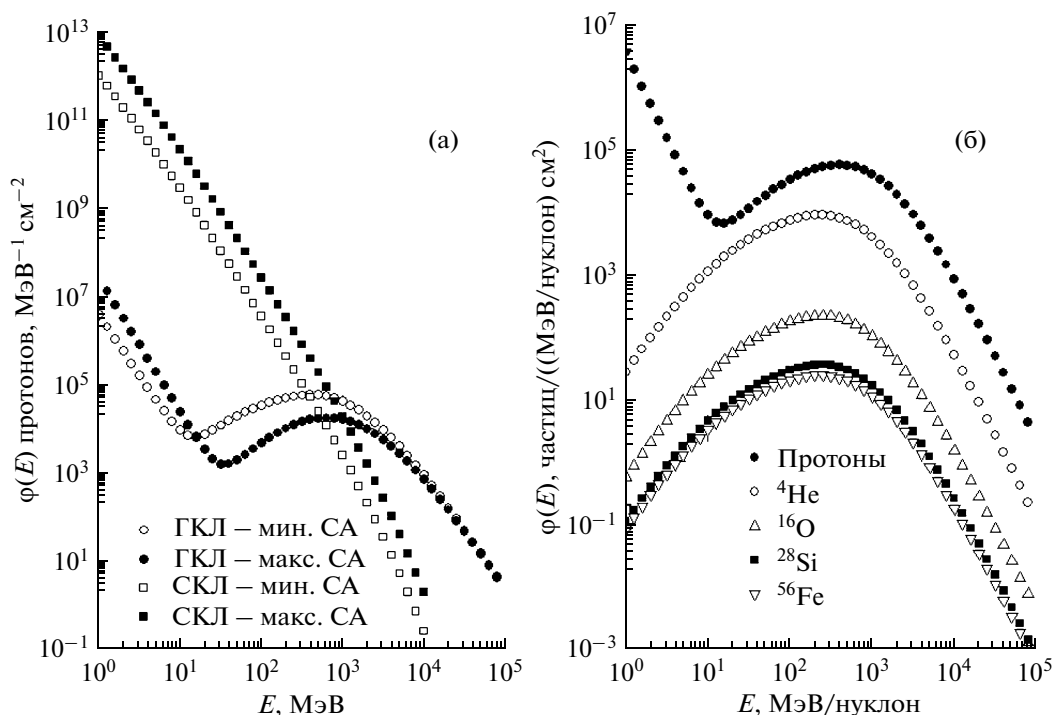


Рис. 1. Энергетические спектры  $\phi(E)$  протонов ГКЛ и СКЛ (а) в годы минимума и максимума солнечной активности и некоторых ядер ГКЛ (б) в годы минимума солнечной активности.

Верхний пылевой слой толщиной 0.5 см имеет плотность  $\rho = 0.6 \text{ г/см}^3$ . Далее идут слои с большей плотностью: глубина 0.5–20 см –  $\rho = 1.2 \text{ г/см}^3$ ; глубина 20–35 см –  $\rho = 1.5 \text{ г/см}^3$ ; глубина 35–500 см –  $\rho = 2.0 \text{ г/см}^3$ . Глубже 5 метров лежит скальная порода с плотностью  $3.4 \text{ г/см}^3$ .

Химический состав всех слоев одинаков и представлен в таблице. В расчетах использовался среднеарифметический состав из данных аппаратов *Луна-16* и *Луна-20*, перенормированных на 100%. В таблицу для сравнения включены также данные из работы [1]. Очевидно, наши данные по химическому составу не противоречат данным [1]. Изотопный

состав химических элементов – натуральный. Элементы со средней весовой долей менее 1% не были приняты во внимание.

#### 4. ПРОЦЕДУРА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Моделирование потоков вторичных частиц проводилось с помощью транспортного кода SHIELD [7]. Транспортный код SHIELD предназначен для Монте-Карло моделирования взаимодействия адронов и ядер со сложными макроскопическими мишенями. Код SHIELD используется для решения

Весовые доли соединений, %			Весовые доли элементов, %			
Соединение	Луна-16	Луна-20	Элемент	Средняя доля	McKinney et al., [1]	
					min	max
SiO <sub>2</sub>	42.95	44.2	<sup>8</sup> O	42.40	41.56	43.29
TiO <sub>2</sub>	5.5	0.32	<sup>12</sup> Mg	4.83	4.03	6.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.88	19.1	<sup>13</sup> Al	6.88	5.98	11.07
FeO	20.17	6.91	<sup>14</sup> Si	19.64	18.96	20.26
MgO	6.05	13.37	<sup>20</sup> Ca	8.08	7.54	10.07
CaO	10.8	13.3	<sup>22</sup> Ti	4.32	1.41	5.14
Total	99.35	97.20	<sup>26</sup> Fe	13.53	9.06	14.03

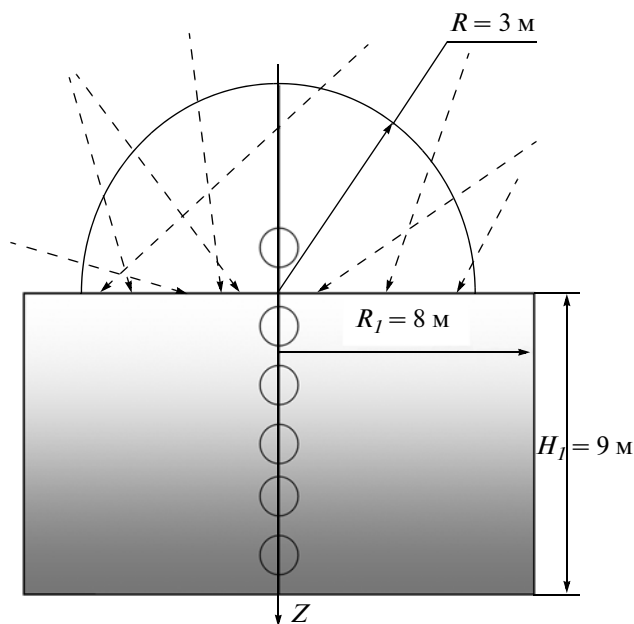


Рис. 2. Геометрическая конфигурация расчета.

того же класса задач, что и известные программы FLUKA, Geant4, MCNPX и PHITS.

Приведенное ниже описание кода по необходимости краткое. Более подробную информацию и литературные ссылки можно найти на веб-странице [7]. Исходная, адронная версия кода SHIELD была разработана ОИЯИ (Дубна) в 1967–72 годах. Последующее развитие кода было продолжено в Институте ядерных исследований РАН. Современная версия кода SHIELD позволяет моделировать перенос нуклонов, антинуклонов, пионов и каонов вплоть до энергии 1 ТэВ, и от тепловой энергии в случае нейтронов. В 1997 году в коде SHIELD был реализован перенос атомных ядер произвольного заряда и массы ( $Z, A$ ).

Код SHIELD включает основные опции, общепринятые для универсальных транспортных кодов, такие как сложная геометрическая конфигурация и химический состав мишени, модели торможения и флуктуаций ионизационных потерь энергии заряженных частиц, многократное кулоновское рассеяние, улучшенные модели тормозных способностей для ионов, основные моды распада мезонов и т.п.

Транспортный код SHIELD включает известные отечественные модели ядерных реакций, развитые в ОИЯИ и ИЯИ РАН. Эти модели описывают все стадии ядерной реакции в эксклюзивном подходе. Быстрая, каскадная стадия ядерной реакции моделируется на основе Дубнинской модели внутриядерных каскадов (DCM – Dubna Cascade Model), модели независимых кварк-глюонных струн (QGSM – Quark-Gluon String Model) и модели коалесценции. Включена предравновесная эмиссия

нуклонов и легчайших ядер. Равновесное девозбуждение остаточного ядра включает Ферми-развал легких ядер, конкуренцию испарения и деления и статистическую модель мультифрагментации (SMM) высоковозбужденных ядер.

Круг успешных приложений кода SHIELD достаточно широк: ADS (Accelerator Driven Systems), моделирование детекторов экспериментальной физики, взаимодействия терапевтических пучков протонов и легких ионов с тканезквивалентными средами, моделирование элементов тракта транспортировки пучка ускорителей тяжелых ионов, воздействие космического излучения на космические аппараты и природные объекты, фоновые условия в подземных низкофоновых экспериментах, первичные радиационные повреждения материалов под действием пучка ускорителя.

Для проведения расчета методом Монте-Карло необходимо задать геометрическую конфигурацию и химический состав мишени, источник внешнего облучения, а также определить, какие результаты подлежат регистрации. Целью моделирования являлся расчет дифференциальных флюенсов вторичных протонов и нейтронов в зависимости от глубины в лунном грунте, а также альbedo этих частиц от лунной поверхности. Флюенсы вычисляются методом оценки по пробегам (Track Length Estimation).

Лунный грунт представлен цилиндром высотой  $H_l = 9$  м и радиусом  $R_l = 8$  м. Цилиндр был разбит по высоте на слои, как описано в предыдущем разделе. Указанные размеры массива грунта выбраны исходя из опыта использования программы SHIELD для аналогичных расчетов [9].

Ось  $Z$  декартовой системы координат направлена к центру Луны, нулевое значение  $Z$ -координаты находится на поверхности. Вдоль оси  $Z$  расположены шаровые объемы для регистрации флюенсов частиц на расчетной глубине. Центры сфер располагались на 13 глубинах, вплоть до 6 м. Радиусы сфер изменялись от 5 см в небольших глубинах до 40 см на глубине 6 м. Сфера для регистрации альbedo располагалась над поверхностью Луны, см. рис. 2.

Протоны космических лучей, прежде чем войти в лунный грунт, проходили через поверхность нормирующей полусферы радиусом  $R = 3$  м. Это необходимо, чтобы связать число испытаний Монте-Карло с реальным временем облучения.

Заметим, что масса Луны эффективно экранирует первичные потоки ГКЛ и СКЛ, падающие на ее поверхность из межпланетного пространства. Соответственно полный поток ГКЛ и СКЛ был уменьшен в 2 раза по сравнению с открытым космосом.

Розыгрыш изотропного направления первичной частицы, координат точки входа в нормирующую сферу и энергии согласно дифференциальным спектрам  $\phi(E)$  (рис. 1а, б) не представляет каких-либо трудностей. Однако, из-за весьма быстрого

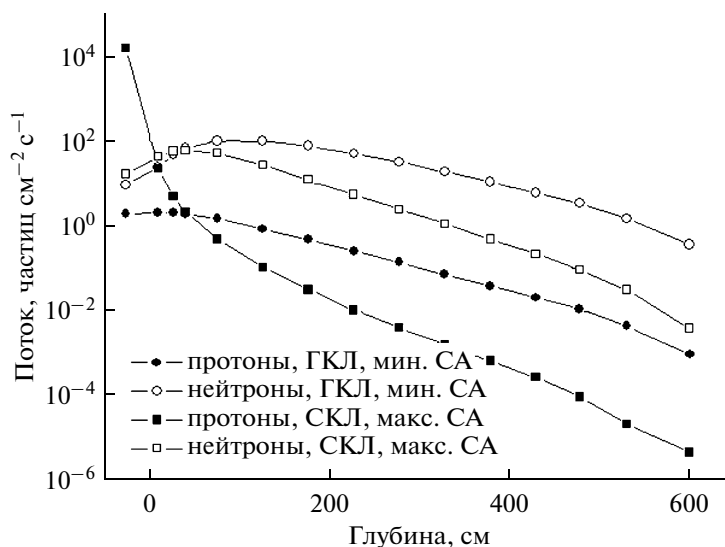


Рис. 3. Интегральные по энергии потоки протонов и нейтронов, инициированных протонами ГКЛ и СКЛ.

убывания спектров с энергией, чтобы добиться удовлетворительной статистической обеспеченности при высоких энергиях, пришлось разбивать полный энергетический интервал [1 МэВ–100 ГэВ] на 4–5 подинтервалов, и затем суммировать результаты для каждого подинтервала с соответствующей перенормировкой.

### 5. РАСЧЕТ ДОЗЫ В ЛУННОМ ГРУНТЕ

Существующие нормы радиационной безопасности в общем случае учитывают разную степень опасности излучений разного вида для различных частей тела человека [10].

Для оценки радиационного риска от различных компонент ионизирующего излучения для персонала лунной базы, локальная поглощенная доза  $\bar{D}$  и локальная эквивалентная доза  $\bar{H}$  в ткани вычислялись в зависимости от глубины в лунном грунте.

Локальные дозы  $\bar{D}_p$  и  $\bar{H}_p$  в ткани для протонов вычислялась по формулам (1) и (2):

$$\bar{D}_p = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} L(E)\Phi_p(E)dE, \quad (1)$$

$$\bar{H}_p = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} Q(L(E))L(E)\Phi_p(E)dE, \quad (2)$$

где  $L(E)$  — линейная передача энергии (ЛПЭ) в тканеэквивалентном веществе (мягкая биологическая ткань) в зависимости от энергии протонов [11],  $Q(L(E))$  — коэффициент качества излучения, зависящий от ЛПЭ протонов [12],  $\Phi_p(E)$  — дифференциальный флюенс протонов.

При облучении нейтронами расчет среднетканевых доз  $\bar{D}_n$  и  $\bar{H}_n$  проводился по формулам (3) и (4):

$$\bar{D}_n = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} K_D(E)\Phi_n(E)dE, \quad (3)$$

$$\bar{H}_n = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} K_H(E)\Phi_n(E)dE, \quad (4)$$

где  $K_D(E)$  — удельная керма для нейтронов в тканеэквивалентном веществе [13],  $K_H(E)$  — удельная эквивалентная керма для нейтронов в тканеэквивалентном веществе [13],  $\Phi_n(E)$  — дифференциальный флюенс нейтронов.

### 6. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

**6.1. Интегральные потоки.** Интегральные (проинтегрированные по энергии) потоки протонов и нейтронов представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что над поверхностью луны потоки протонов и нейтронов сравнимы по величине, тогда как на глубине около 1 м потоки нейтронов имеют выраженный максимум и превосходят потоки протонов почти на 2 порядка величины. Потоки нейтронов убывают с глубиной медленнее, чем потоки протонов. На больших глубинах различие в потоках нейтронов и протонов, инициированных протонами ГКЛ, достигает 500 раз.

На глубинах более 2 м потоки нейтронов от СКЛ при максимуме солнечной активности на 3 порядка величины превосходят потоки протонов от СКЛ. В минимуме солнечной активности годовой флюенс протонов СКЛ примерно на порядок ниже, поэтому

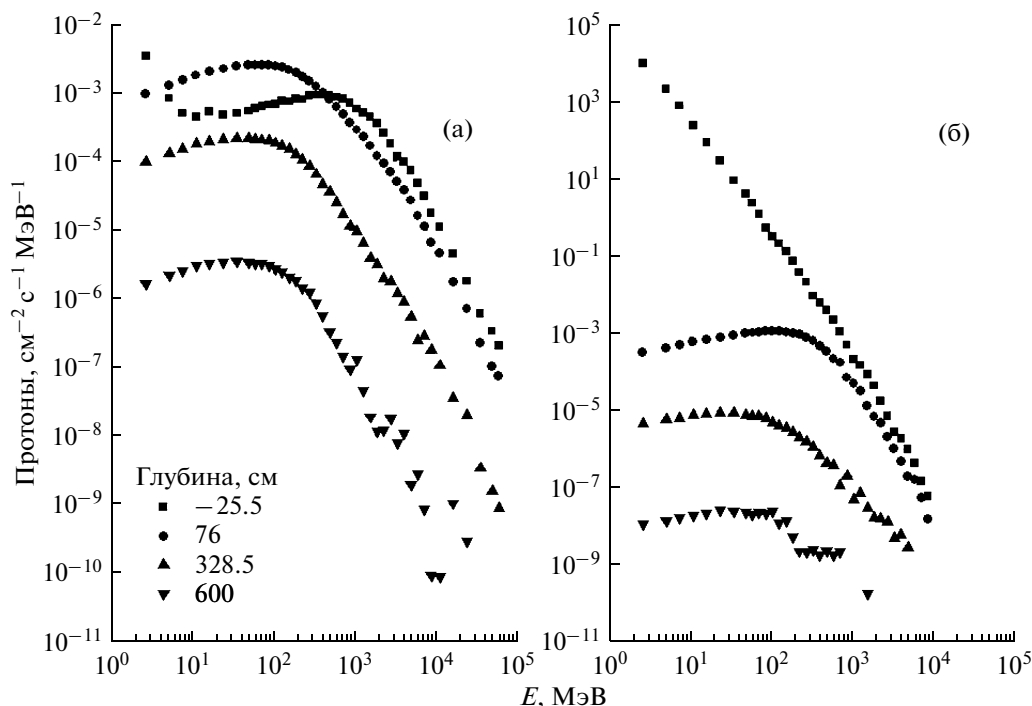


Рис. 4. Дифференциальные спектры протонов, инициированных протонами ГКЛ (а) и СКЛ (б) на различных глубинах в лунном грунте.

данные для минимума солнечной активности не представлены.

**6.2. Дифференциальные потоки.** Для расчета дозовых характеристик требуются дифференциальные по энергии потоки частиц. Рис. 4–6 иллюстрируют эти данные. Поскольку объем числовых данных и графического материала велик, то представлена только небольшая часть результатов в чисто иллюстративных целях.

На рис. 4 представлены спектры протонов на глубинах 76, 328 и 600 см в лунном грунте и над поверхностью Луны, на уровне 25 см, образовавшихся под действием протонов ГКЛ и СКЛ. Спектры включают как первичные протоны, так и вторичные протоны всех поколений, образовавшиеся в результате ядерных реакций. Над лунной поверхностью эти спектры практически полностью совпадают с начальным спектром протонов, падающих на поверхность Луны (поток протонов альbedo незначителен).

Максимального развития адронные каскады достигают на глубине около 80 см. Видно, что в области энергий 5–500 МэВ поток протонов от ГКЛ на глубине 76 см превышает поток протонов над поверхностью Луны. Потоки протонов от СКЛ сильнее убывают с глубиной и круче падают с увеличением энергии, чем потоки протонов от ГКЛ, что определяется формой начальных спектров.

Спектры вторичных нейтронов для тех же глубин и условий облучения представлены на рис. 5.

Спектры нейтронов от ГКЛ и СКЛ на поверхности Луны и на глубине 76 см сравнимы по форме и интегралу (см. также рис. 3). Потоки нейтронов от СКЛ и ГКЛ на глубине около 80 см превышают потоки нейтронов на поверхности Луны на всем энергетическом интервале.

На рис. 6 представлены спектры вторичных протонов и нейтронов на глубине 76 см, образовавшихся под действием протонов и ядер ГКЛ. Данная глубина приблизительно соответствует максимуму развития адронного каскада. Вкладом ядер ГКЛ нельзя пренебрегать. Как будет видно из дальнейшего, ядра ГКЛ за счет генерации вторичных нейтронов и протонов увеличивают поглощенную дозу в полтора раза по сравнению с дозой только от протонов ГКЛ.

Были рассчитаны также энергетические спектры некоторых вторичных ядер, образовавшихся под действием ядер ГКЛ, например, спектры вторичного гелия  $^4\text{He}$  от первичных ядер  $^{16}\text{O}$ . Но вклад таких вторичных ядер в дозовые характеристики мал, также как и вклад от ядер СКЛ в целом.

**6.3. Сравнение с экспериментом LNPE и расчетами по MCNPX.** Ниже представлены результаты сравнения наших расчетов с расчетами G.W. McKinney et al. [1] по программе MCNPX, а также с результатами эксперимента LNPE (D. Woolum et al.) [14], как они представлены в работе [1].

Данные эксперимента LNPE по измерению нейтронного поля в лунном грунте представлены в виде

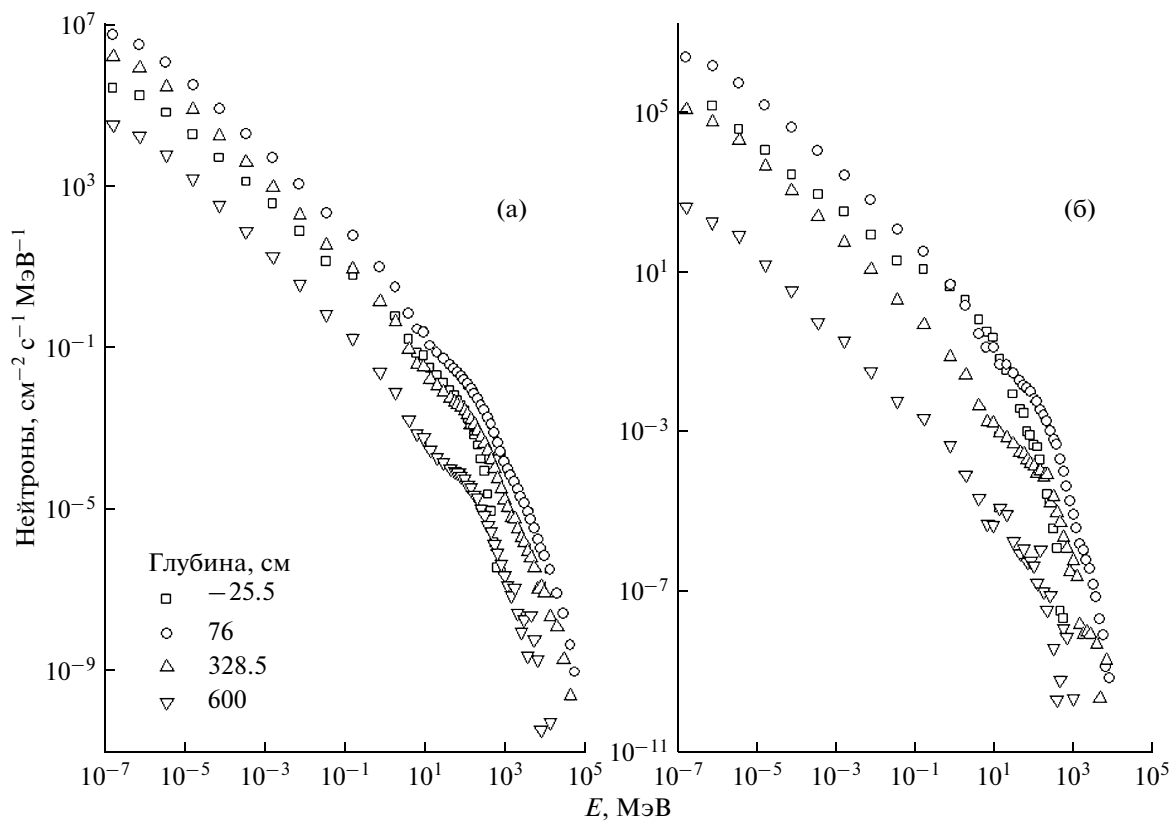


Рис. 5. Дифференциальные спектры нейтронов, инициированных протонами ГКЛ (а) и СКЛ (б) на различных глубинах в лунном грунте.

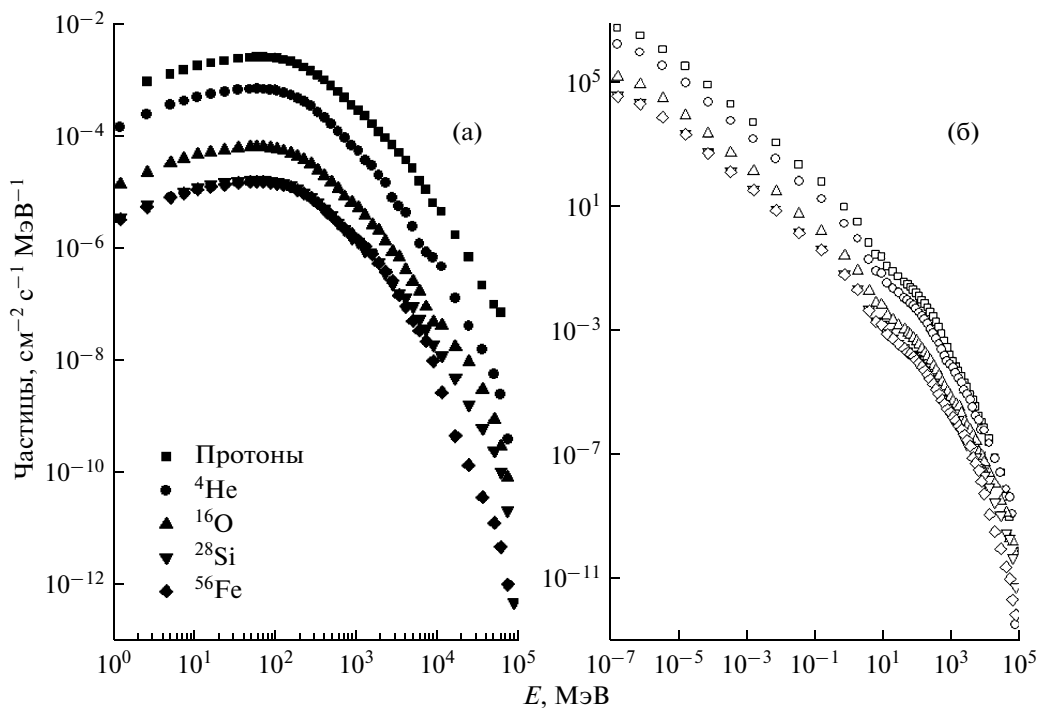


Рис. 6. Дифференциальные спектры протонов (а) и нейтронов (б), инициированных различными ядрами ГКЛ на глубине 76 см в лунном грунте.

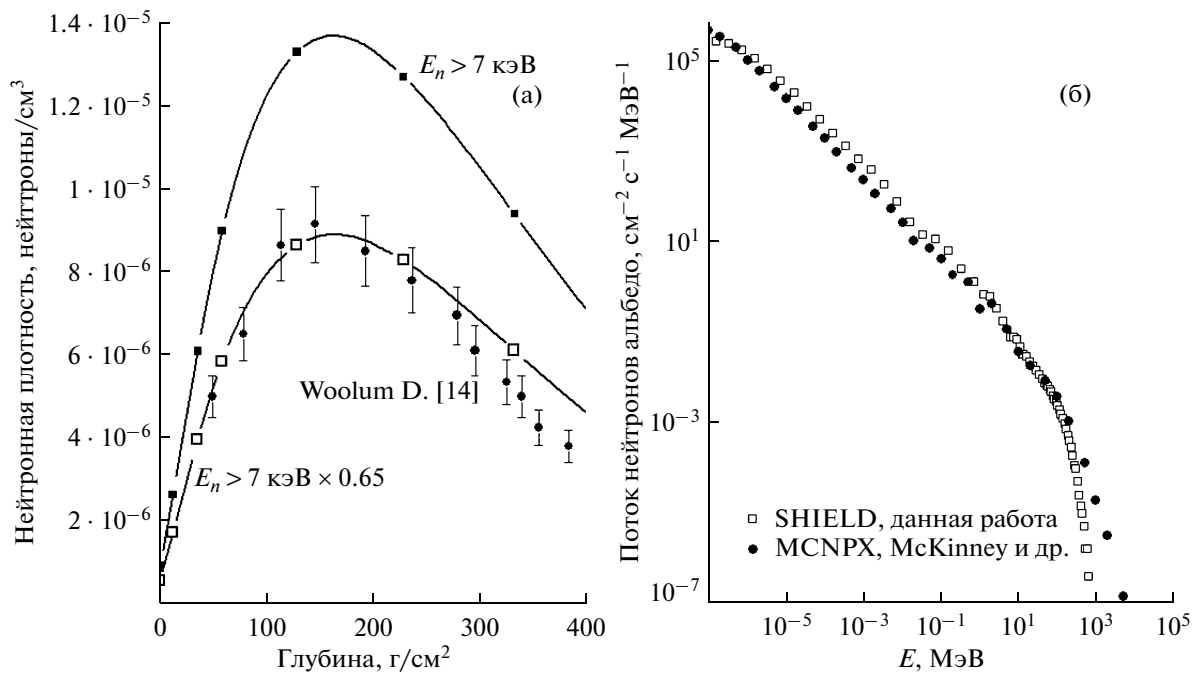


Рис. 7. Профиль плотности нейтронов (а): квадраты – расчет по SHIELD, точки с ошибками – эксперимент LNPE. Поток нейтронов альbedo над поверхностью Луны (б).

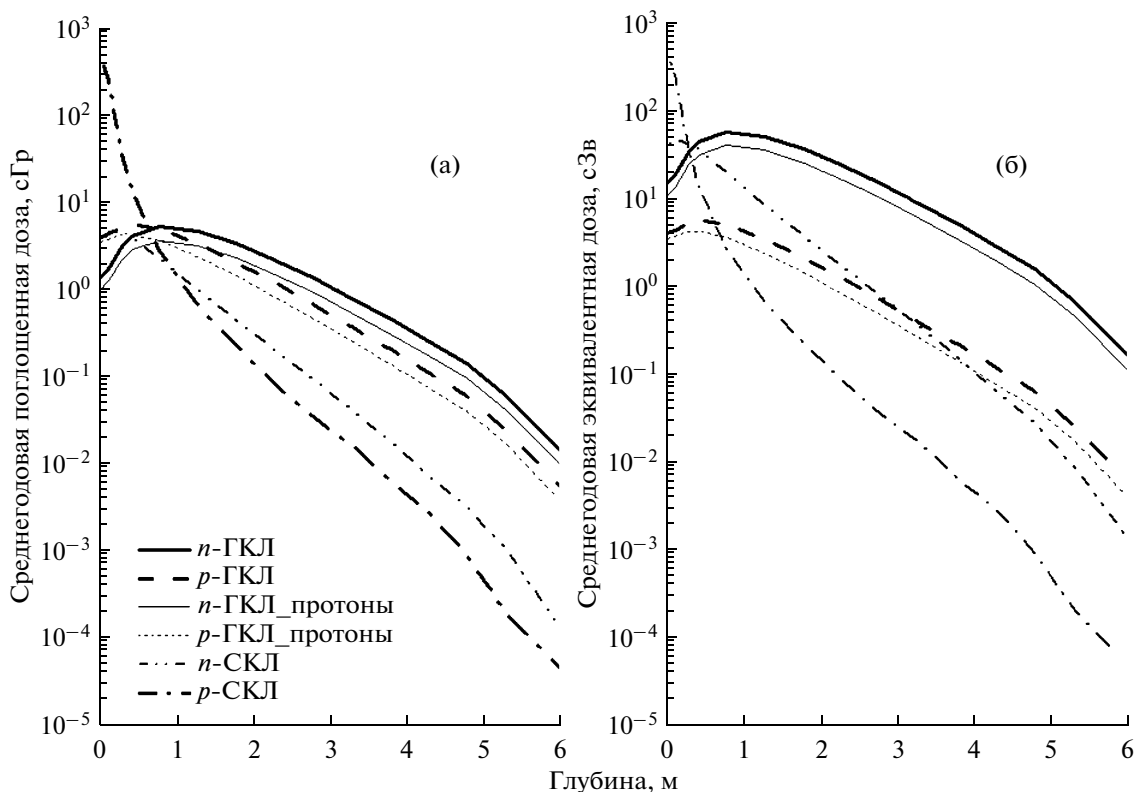


Рис. 8. Вклады в поглощенную (а) и эквивалентную (б) среднетканевые дозы от протонов (p) и нейтронов (n) в зависимости от глубины в лунном грунте. Отдельно показан вклад только от протонов ГКЛ.

плотности нейтронов в единицах  $n/cm^3$ , а не потока. Плотность нейтронов, как интегральная по энергии характеристика нейтронного поля, сильно зависит от того, какой интервал энергии рассматривается, т.к. потоки нейтронов резко возрастают с уменьшением энергии (см. рис. 5а).

В наших расчетах наилучшее согласие с данными эксперимента LNPE в абсолютных единицах наблюдается, если при вычислении плотности нейтронов учитываются нейтроны с энергией выше 7 кэВ. Для сравнения формы профиля плотности нейтронов расчетные данные умножены на коэффициент 0.65 (см. рис. 7а). Из рисунка видно, что, несмотря на независимость модели лунного грунта, положение максимума профиля нейтронной плотности в наших расчетах практически совпадает с экспериментом LNPE и находится на глубине около 150 г/см<sup>2</sup>. На глубинах более 300 г/см<sup>2</sup> расчетная плотность нейтронов уменьшается с глубиной несколько медленнее, чем в эксперименте.

На рис. 7б представлено сравнение плотности потока нейтронов альbedo, полученное в наших расчетах (см. рис. 5а), и в расчетах по программе MCNPX (рис. 12, 13 работы [1]). Наблюдается удовлетворительное согласие во всем интервале энергий, за исключением высокоэнергетического хвоста спектра.

Таким образом, несмотря на полную независимость используемых моделей, данных и кодов, наши результаты не обнаруживают драматических расхождений с экспериментальными и расчетными данными других авторов, что повышает доверие ко всем обсуждаемым результатам.

**6.4. Дозы в лунном грунте.** Зависимости локальной дозы в ткани от глубины в лунном грунте, рассчитанные согласно формулам (1–4), представлены на рис. 8. Использовались потоки протонов и ядер ГКЛ при минимуме солнечной активности, и потоки протонов СКЛ при максимуме. Видно, что вклад в дозу от нейтронов выше, чем от протонов на всех глубинах более ~0.5 м, особенно для эквивалентной дозы. Видно также, что вторичные нейтроны и протоны, инициированные ядрами ГКЛ, увеличивает среднетканевую дозу примерно в полтора раза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на основе стандартизованных моделей потоков частиц ГКЛ и СКЛ и транспортного кода SHIELD выполнены подробные расчеты энергетических спектров потоков протонов и нейтронов, возникающих в лунном грунте на разной глубине в результате бомбардировки потоками высокоэнергетичных заряженных частиц. На основе этих данных рассчитаны значения локальной дозы в ткани в зависимости от глубины лунного грунта, которые позволяют оценить радиационный риск

для персонала лунной базы, находящегося в глубине лунного грунта.

Полученные результаты показывают, что: вклад в дозу от вторичных нейтронов, на глубинах, превышающих ~0.5 м, превосходит вклад от протонов, как для ГКЛ, так и для СКЛ, особенно для эквивалентной дозы; учет ядер ГКЛ увеличивает дозу в полтора раза по сравнению с дозой только от протонов ГКЛ; вклад в дозу от ядер СКЛ составляет лишь несколько процентов от дозы от протонов СКЛ; максимум развития адронного каскада (максимальные потоки) находится в лунном грунте на глубине ~0.8 м.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *McKinney G.W., Lawrence D.J., Prettyman T.H. et al.* MCNPX benchmark for cosmic ray interactions with the Moon // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111.
2. *De Angelis G., Badavi F.F., Clem J.M. et al.* Modeling of the Lunar Radiation Environment // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. 2007. V. 166. P. 169–183.
3. *Nymmik R.A., Panasyuk M.I., Suslov A.A.* Galactic Cosmic Ray Flux Simulation and Prediction // *Adv. Space Res.* 1996. V. 17. P. 19–30.
4. International Standard. Space environment (natural and artificial) – Galactic cosmic ray model. 2004. ISO 15390.
5. *Nymmik R.A.* Probabilistic Model for Fluences and Peak Fluxes of Solar Particles // *Radiation Measurements*. 1999. V. 30. P. 287–296.
6. *Викторов С.В., Чесноков В.И.* Химия лунного грунта. М.: Знание, 1978.
7. *Dementyev A.V., Sobolevsky N.M.* SHIELD – Universal Monte Carlo Hadron Transport Code: Scope and Applications // *Radiation Measurements*. 1999. V. 30. P. 553–557. URL: <http://www.inr.ru/shield>
8. *Денисов А.Н., Кузнецов Н.В., Ныммик Р.А., Соболевский Н.М.* Компьютерное моделирование радиационной обстановки на Луне. 1. Воздействие протонов галактических и солнечных космических лучей. М.: Препринт ИЯИ РАН 2009. V. 1220. 2009.
9. *Dementyev A., Gurentsov V., Ryazhskaya O., Sobolevsky N.* Production and Transport of Hadrons Generated in Nuclear Cascades Initiated by Muons in the Rock (Exclusive Approach) // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. 1999. V. 70. P. 486.
10. ГОСТ 25645.215-85. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Нормы безопасности при продолжительности полетов до трех лет. М.: Госстандарт, 1987.
11. *Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.* The Stopping and Range of Ions in Solids. NY: Pergamon Press, 1985.
12. ICRP 1990. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Annals of the ICRP 21, NY and Oxford: Pergamon Press, 1991.
13. *Савинский А.К., Попов В.И., Кулямин В.А.* Спектры ЛПЭ и коэффициенты качества инкорпорированных радионуклидов. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986.
14. *Woolum D.S., Burnett D.S.* Lunar neutron capture as a tracer for regolith dynamics, Proceedings of the Fifth Lunar Conference // *Geochimica et Cosmochimica acta*. 1974. Supplement 5. V. 2. P. 2061–2074.