

УДК 523

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОГО РИСКА ДЛЯ КОСМОНАВТОВ НА ЛУНЕ

© 2012 г. Н. В. Кузнецов¹, Р. А. Ныммик¹, М. И. Панасюк¹,
А. Н. Денисов², Н. М. Соболевский²

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ

²Институт ядерных исследований РАН, г. Москва

nvk@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 05.05.2011 г.

Обсуждается проблема оценки радиационного риска для человека на Луне с учетом вероятностного характера появления солнечных событий. Выполнены расчеты ожидаемых значений среднетканевой эквивалентной дозы, которые создают потоки частиц ГКЛ и СКЛ на поверхности Луны за защитным экраном при разной продолжительности лунных экспедиций.

ВВЕДЕНИЕ

При планировании околоземных космических пилотируемых полетов и экспедиций требуется оценка радиационного риска для космонавтов из-за существования потоков высокоэнергетических частиц в космическом пространстве. Эта проблема решается расчетными методами с привлечением моделей потоков высокоэнергетических частиц космической радиации и транспортных кодов, учитывающих взаимодействие излучения с веществом защитных экранов (корпус космического корабля, оболочка скафандра и др.). В итоге потоки частиц космических лучей, прошедшие за экран, и потоки частиц вторичных излучений, возникшие в окружающем веществе в результате ядерных превращений, должны быть пересчитаны в значения эффективной или эквивалентной дозы, которые являются мерой неблагоприятного влияния радиации на работоспособность и здоровье человека. Предельные значения дозовых величин, превышение которых считается недопустимым в околоземных (в пределах магнитосферы Земли) пилотируемых полетах, стандартизованы [1].

Эти стандартизованные значения предельных дозовых величин использованы в настоящей работе для прогнозирования радиационного риска на Луне, то есть за пределами магнитосферы Земли. В этом случае полученная человеком доза является следствием воздействия потоков заряженных частиц галактических и солнечных космических лучей (ГКЛ и СКЛ, соответственно). При этом потоки частиц ГКЛ постоянно присутствуют в космическом пространстве, а потоки частиц СКЛ появляются эпизодически и имеют случайный характер. Следовательно, полученная человеком доза также является случайной величиной, а значения радиационного риска, то есть превышение полученной дозы над стандартизованным

значением предельной дозы¹, должны определяться с учетом теории вероятности.

В настоящей работе оценка радиационного риска для человека на Луне выполнена для разной продолжительности лунных экспедиций учитывая нахождение на поверхности Луны защитного экрана.

СХЕМА РАСЧЕТА

Геометрическая схема расчета потоков частиц на поверхности Луны приведена на рис. 1. Как видно из этого рисунка, потоки частиц ГКЛ и СКЛ падают на поверхность алюминиевого экрана полусферической формы, центр окружности которого расположен на поверхности Луны. Потоки частиц ГКЛ и СКЛ, прошедшие внутрь экрана, а также потоки вторичных протонов и нейтронов, возникшие в веществе экрана и в лунном грунте падают на шаровой фантом из мягкой биологической ткани (МБТ) [2], который расположен на поверхности Луны в центре окружности сферического экрана.

Для расчетов энергетических спектров постоянно действующих потоков заряженных частиц космических лучей, падающих на сферический экран, использовалась модель потоков частиц (протонов и ядер с зарядом $z = 2-28$) ГКЛ [3, 4] с включением потоков протонов низкоэнергетического компонента солнечного происхождения [3, 5]. Для расчетов энергетических спектров эпизодически возникающих потоков частиц космических лучей, падающих на поверхность экрана, ис-

¹ Введенное здесь определение радиационного риска служит для учета стохастического характера источника радиационного воздействия и не учитывает стохастического характера радиобиологических эффектов, вызывающих неблагоприятные последствия для здоровья человека.

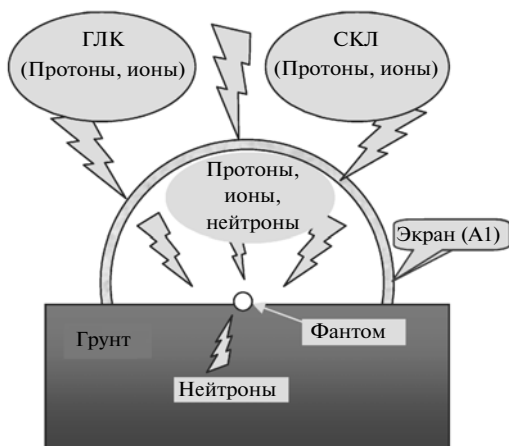


Рис. 1. Геометрическая схема расчета.

пользовалась вероятностная модель потоков частиц (протонов и ионов с зарядом ядра $z = 2-28$) СКЛ [6, 7]. Указанные модели устанавливают изотропные потоки частиц в межпланетном пространстве в районе орбиты Земли (1 а. е.). Они учитывают зависимость потоков частиц от солнечной активности, которая задается среднемесячными числами Вольфа W . В статье рассматривались периоды минимума ($W = 10$) и максимума ($W = 130$) солнечной активности.

Энергетические спектры потока частиц космических лучей после торможения в веществе экрана находились с использованием данных программы SRIM2003 [8]. Энергетические спектры вторичных протонов и нейтронов вычислялись с использованием адронного транспортного кода SHIELD [9]. Толщина сферического экрана варьировалась в пределах от 1 до 100 г/см². При-

меры дифференциальных энергетических спектров протонов и нейтронов за экраном приведены на рис. 2–5.

Окончательно, рассчитанные потоки частиц пересчитывались в среднетканевую эквивалентную дозу H , которая согласно [1] служит верхней оценкой эффективной дозы, которую может получить космонавт при облучении. Расчет значений H проводился для каждого из компонентов излучения (протонов, ионов, нейтронов от экрана и нейтронов от грунта) ГЛК и СКЛ в отдельности и затем суммировались. Для расчета значений H от потока протонов и ионов использовались значения линейной передачи энергии (ЛПЭ) в МБТ [8] и зависимость коэффициента качества излучения от ЛПЭ, рекомендованную в докладе ICRP [10]. Для расчета значений H от потока нейтронов использовались значения удельной эквивалентной кермы нейтронов в МБТ [11].

РАДИАЦИОННЫЙ РИСК

В соответствии с практикой оценки радиационной опасности на Луне [12–17] на первом этапе были выполнены расчеты ожидаемых среднегодовых значений H для периодов максимума и минимума солнечной активности. При расчете значений H от потоков частиц СКЛ использовались энергетические спектры потоков частиц, которые согласно модели [5] могут быть превышены с вероятностью $r = 1\%$. Результаты этих расчетов, показывающие вклад потоков заряженных частиц и нейтронов в величину среднетканевой эквивалентной дозы при разной толщине защиты, представлены в таблице. Из таблицы можно сделать следующие выводы:

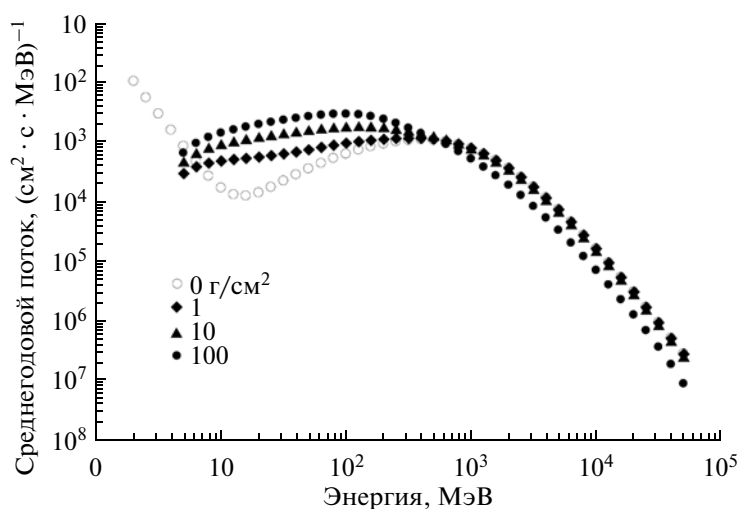


Рис. 2. Энергетические спектры потока протонов, создаваемые потоком протонов ГЛК на поверхности Луны в год минимума солнечной активности в отсутствии и при наличии алюминиевого экрана разной толщины (значения на рис.).

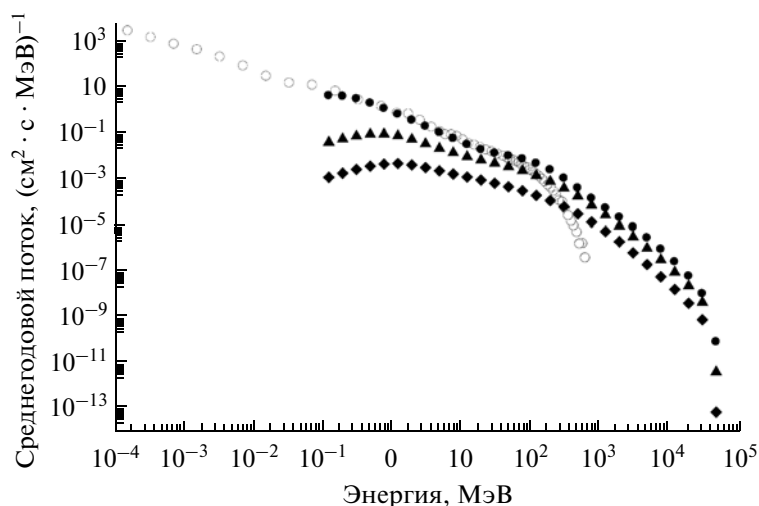


Рис. 3. Энергетические спектры потока нейтронов, создаваемые потоком протонов ГКЛ на поверхности Луны в год минимума солнечной активности от лунного грунта в отсутствии экрана и от алюминиевого экрана разной толщины.

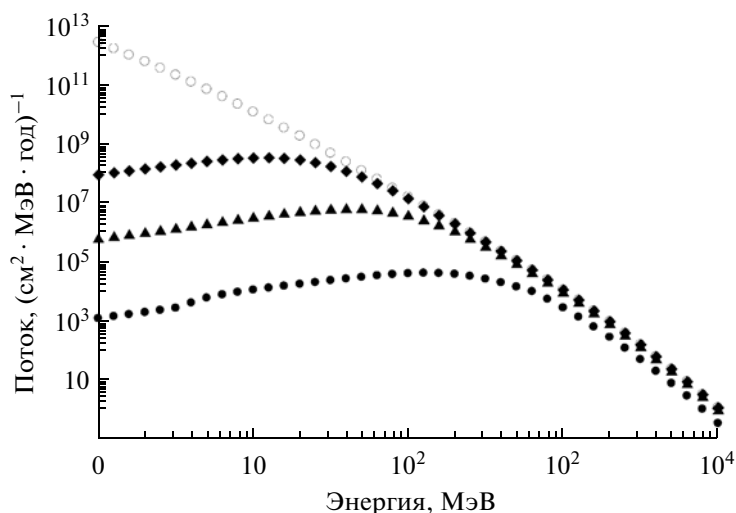


Рис. 4. Энергетические спектры годового флюенса протонов, создаваемые потоком протонов СКЛ (1%) на поверхности Луны в год максимума солнечной активности от алюминиевого экрана разной толщины.

1) вклад нейтронов в значение H значительно меньше вклада заряженных частиц при толщине алюминиевого экрана менее ~ 30 г/см² и сравним при большей толщине экрана;

2) значение $H_{СКЛ}$, ожидаемое за год от частиц СКЛ ($r = 1\%$), выше значения $H_{ГКЛ}$, создаваемое частицами ГКЛ во всем диапазоне рассмотренных толщин экрана во время максимума солнечной активности, и при толщине экрана менее 10 г/см² — во время минимума солнечной активности.

Данные таблицы указывают на необходимость иметь защиту большой толщины (более ~ 30 г/см²), чтобы радиационная доза для персонала лунной базы при воздействии потоков частиц ГКЛ и СКЛ за год не превысила допустимую дозу 50 сЗв [1].

Следует подчеркнуть, что этот вывод сделан для редко реализуемого сценария появления очень большого потока частиц СКЛ, который может быть превышен с вероятностью $r = 1\%$ (то есть риск получить более высокий поток частиц СКЛ, чем расчетный, ожидается в одной из 100 аналогичных миссий).

Однако при планировании сценариев лунной экспедиции для обеспечения радиационной безопасности космонавтов необходимы более детальные оценки значений дозы, которые могут быть превышены с определенным риском ($r \geq 1\%$) при разной продолжительности лунной экспедиции. Пример результатов таких расчетов значений дозы $H(t) = H_{SEP}(t) + H_{GCR}(t)$ для поверхности

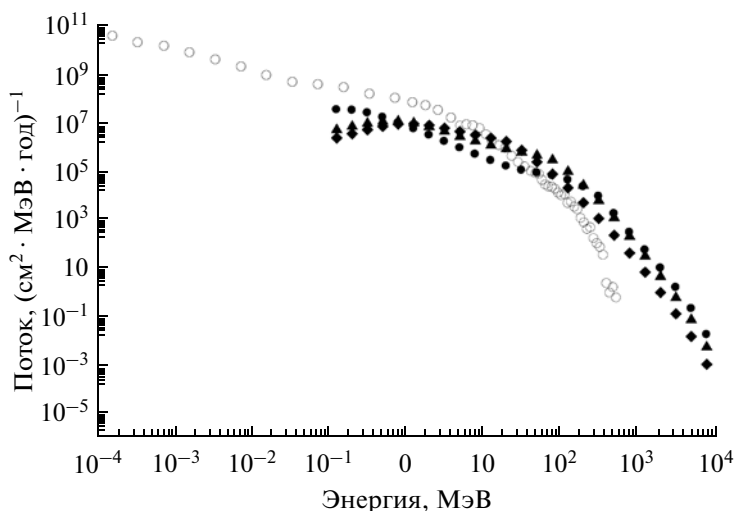


Рис. 5. Энергетические спектры годового флюенса нейтронов, создаваемые потоком протонов СКЛ (1%) на поверхности Луны в год максимума солнечной активности от лунного грунта в отсутствии экрана и от алюминиевого экрана разной толщины.

Луны за экраном толщиной 10 г/см^2 в зависимости от длительности экспедиции t приведен на рис. 6. Расчеты выполнены для периодов минимума и максимума солнечной активности. На рис. 6 также приведена зависимость предельно допустимой дозы от времени t , полученная путем интерполяции стандартизованных значений для $t = 1$ месяц и $t = 1$ год [1].

Из рис. 6 видно, что при уровне радиационного риска 3% прогнозируемая длительность пребывания человека на поверхности Луны не должна превышать полутора месяцев во время максимума солнечной активности и превышает 1 год во

время минимума солнечной активности, если при этом персонал защищен алюминиевым экраном толщиной 10 г/см^2 .

Приведенные на рис. 6 зависимости $H(t)$ являются иллюстрацией методики оценки радиационного риска. В действительности оценка радиационного риска должна быть адаптирована к реальному сценарию пребывания человека на Луне, в котором должны учитываться возможные изменения толщины защиты при изменении условий работы (например, при работе в скафандре на поверхности Луны или при переходе в более защищенное помещение во время солнечных событий).

Расчетные значения среднетканевой эквивалентной дозы, создаваемой на поверхности Луны за экраном различной толщины в течение 1 года в периоды минимума и максимума солнечной активности

| Толщина экрана, г/см^2 | Эквивалентная доза, сЗв | | | | | |
|---------------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | ГКЛ | | | СКЛ (1%) | | |
| | Заряженные частицы | Нейтроны из экрана | Нейтроны от грунта | Заряженные частицы | Нейтроны из экрана | Нейтроны от грунта |
| <i>Минимум СА</i> | | | | | | |
| 0.1 | 41.6 | 0.08 | 1.12 | 67 300 | 2.00 | 0.39 |
| 1 | 39.6 | 0.20 | 1.15 | 1400 | 0.78 | 0.079 |
| 10 | 22.7 | 1.76 | 1.23 | 22 | 0.70 | 0.0052 |
| 31.6 | 8.4 | 4.37 | 1.12 | 2.2 | 0.51 | 0.00093 |
| <i>Максимум СА</i> | | | | | | |
| 0.1 | 21.6 | 0.047 | 0.66 | 398 000 | 12.5 | 1.43 |
| 1 | 20.5 | 0.12 | 0.68 | 9300 | 5.64 | 0.19 |
| 10 | 12.9 | 1.06 | 0.76 | 182 | 6.23 | 0.030 |
| 31.6 | 5.0 | 2.72 | 0.73 | 20.6 | 5.08 | 0.0053 |

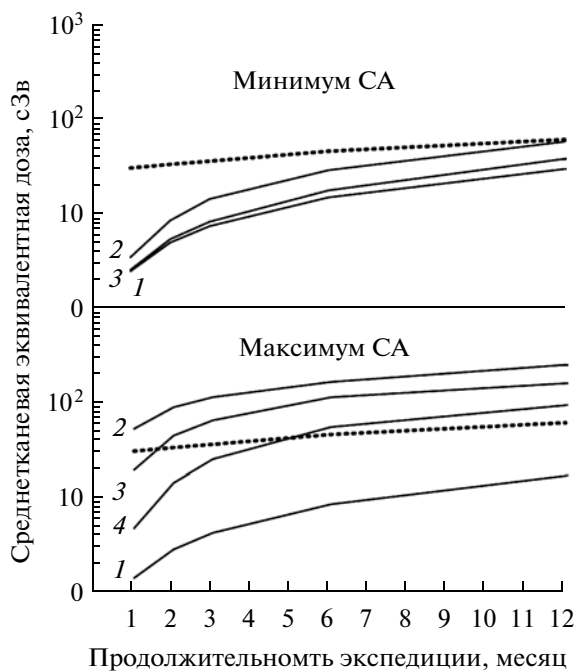


Рис. 6. Расчетные значения среднетканевой эквивалентной дозы (сплошные кривые), созданные потоком частиц ГКЛ (кривая 1) и СКЛ (кривые: 2 – 1%, 3 – 3%, 4 – 10%) в зависимости от продолжительности лунной экспедиции в периоды минимума и максимума солнечной активности на поверхности Луны за защитным экраном толщиной 10 г/см^2 . Пунктирные кривые – предельно допустимая доза в зависимости от времени экспедиции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В общем случае представленный подход оценки радиационного риска на поверхности Луны применим и к прогнозированию радиационного риска для других межпланетных космических полетов (например, при полете на Марс). Естественно, для этого необходимо учитывать все факторы планируемого космического полета (продолжительность миссии, солнечную активность, толщину защитных экранов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания. Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах. МУ. 2.6.1. 44-03-2004. М.: Изд-во ИМБП, 2004.
2. ГОСТ 25645.203-83. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Модель тела человека для расчета тканевой дозы. М.: Госстандарт, 1984.
3. ГОСТ 25645.150-90. Лучи космические галактические. Модель изменения потоков частиц. М.: Изд-во Стандартов, 1991.
4. International Standard, ISO 15390. Space environment (natural and artificial) – Galactic cosmic ray model (First edition 2004-06-01). ISO, 2004.
5. Зельдович М.А., Логачев Ю.И., Сухова Г.М., Кекемети К. Временные вариации потоков малоэнергичных протонов и ядер гелия ($0.3\text{--}10 \text{ МэВ/нуклон}$) в спокойное время солнечной активности во внутренней гелиосфере // Космич. исслед. 2003. Т. 41. № 3. С. 255–264. (Cosmic Research P. 235).
6. ГОСТ Р 25645.165-2001. Лучи космические солнечные. Вероятностная модель потоков протонов. М.: Госстандарт, 2001.
7. Ныммик Р.А. Статистико-функциональный анализ характеристик энергетических спектров частиц ($1 \leq Z \leq 28$) солнечных космических лучей // Известия РАН. Сер. физ. 1997. Т. 61. Вып. 6. С. 1058–1061.
8. Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids. Pergamon Press: New York, 1985. (<http://www.srim.org/>).
9. Demytyev A., Sobolevsky N. SHIELD – universal Monte Carlo hadron transport code: scope and applications // Rad. Meas. 1999. V. 30. P. 553–557 (<http://www.inr.ru/shield>).
10. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 // Ann. ICRP 21. NY and Oxford: Pergamon Press, 1991.
11. Савинский А.К., Попов В.И., Кулямин В.А. Спектры ЛПЭ и коэффициенты качества инкорпорированных радионуклидов. М.: Энергоатомиздат. 1986.
12. McKinney G.W., Lawrence D.J., Prettyman T.H. et al. MCNPX benchmark for cosmic ray interactions with the Moon // J. Geoph. Res. 2006. V. 111. E06004. doi:10.1029/2005JE002551.
13. 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.
14. Hayatsu K., Kobayashi S., Yamashita N. et al. Environmental radiation dose on the Moon. // Proceedings of 10th ICATPP Conference (Villa Olmo, Como-Italy, 8-12 October, 2007). (http://villaolmo.mib.infn.it/ICATPP10th_2007/Software%20Applications/HayatsuK.pdf).
15. Kanako H., Hareyama M., Kobayashi S. et al. Particle and Neutron Dosages from Cosmic Rays on the Lunar Surface // J. Phys. Soc. Japan. 2009. V. 78. Suppl. A. P. 149–152.
16. Kim Myung-Hee Y., Matthew J., Hayat A. et al. Prediction of frequency and exposure level of solar particle events // Health Phys. 2009. V.97. № 1. P. 68–81.
17. Denisov A.N., Kuznetsov N.V., Nymmik R.A., Panasyuk M.I., Sobolevsky N.M.. Assessment of the radiation environment on the Moon // Acta Astronautica. 2011. V. 68. P. 1440–1447.