

УДК 524.1,629.78

## СРАВНЕНИЕ ИЗМЕРЕННЫХ И ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОГЛОЩЕННЫХ ДОЗ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2019 г. Н. В. Кузнецов<sup>1, \*</sup>, М. И. Панасюк<sup>1</sup>, М. В. Подзолко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

\**nvk@srd.sinp.msu.ru*

Поступила в редакцию 29.01.2018 г.

После доработки 29.01.2018 г.

Принята к публикации 30.03.2018 г.

В настоящей работе приводятся результаты сравнения экспериментально измеренных и расчетных значений поглощенных доз радиации при воздействии галактических космических лучей для ряда космических миссий к Луне и Марсу. Потоки ГКЛ рассчитывались по модели НИИЯФ-2016. Дается краткое описание методики расчета потоков и поглощенных доз. Показано, что расчетные значения поглощенной дозы находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными.

DOI: 10.1134/S0023420619010060

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, радиационная опасность в космосе для экипажей и технических систем космических кораблей исходит от высокоэнергичной космической радиации, главными составляющими которой являются потоки заряженных частиц, приходящие из Галактики (галактические космические лучи – ГКЛ) или от Солнца (солнечные космические лучи – СКЛ), а также находящиеся в ловушке магнитного поля Земли (радиационные пояса Земли – РПЗ). Эти составляющие космического ионизирующего излучения образуют радиационные поля, каждое из которых содержит заряженные частицы со своим элементарным и энергетическим составом, и потоки этих частиц изменяются по своим законам в пространстве и во времени. Поэтому исследование (изучение, моделирование и прогнозирование) нарушений в оборудовании и у космонавтов, вызванных воздействием космической радиации, изучается отдельно для каждого из этих полей и затем суммируется. Однако общим в таких исследованиях является применение в качестве количественной меры радиационных нарушений физической величины – поглощенной дозы (ПД).

Кроме того, в нормах радиационной безопасности для целей радиологической защиты человека дополнительно используют нормируемые величины (эквивалентная доза, эффективная доза), которые, опираясь на значение ПД в ткани (органах человека), дополнительно учитывают “качество” излучений разного вида и энергии при создании радиобиологического эффекта.

ПД является интегральной характеристикой нарушений в исследуемом объекте, накапливаемых при облучении. Она отражает полное количество энергии, которая в течение времени облучения передается от множества бомбардирующих частиц единице массы вещества. Необходимо иметь в виду, что для количественных оценок “правильное” применение значений ПД накладывает определенное условие на размер чувствительных (активных) объемов, от которых зависит нарушения исследуемых свойств (рабочих параметров) объектов. А именно, линейные размеры чувствительных объемов должны быть (значительно) меньше, чем пробег частиц в веществе этих объектов.

Для изучения изменения значений ПД в связи с изменяющимися условиями в космическом пространстве (в зависимости от времени и пространственных координат) применяются расчетные методы, использующие модели потоков частиц в космическом пространстве с учетом прохождения частиц за защитные экраны. Эти методы требуют подтверждения путем сравнения с данными непосредственных измерений, которые могут быть получены с помощью приборов (дозиметров), установленных на борту космических аппаратов. В течение долгого времени такое сравнение было возможно только для околоземных орбит благодаря наличию дозиметрической аппаратуры на станции *Мир* и *МКС*, а также на некоторых автоматических космических аппаратах [1–3].

Теперь в связи с планами освоения Луны и Марса научное сообщество получило возможность более детально исследовать указанную про-

блему за пределами магнитосферы Земли, используя полетные данные от дозиметрических приборов на межпланетных автоматических космических станциях [4–8].

В настоящей работе выполнено сравнение значений ПД [4–8], которые измерены на борту межпланетных космических аппаратов при воздействии потоков частиц ГКЛ и которые рассчитываются с использованием модельных спектров потоков частиц ГКЛ. Также обсуждаются проблемы, возникающие при таком сравнении.

## 1. МОДЕЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ

В настоящей работе для расчета энергетических спектров тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ – протонов и более тяжелых ядер с зарядом ядра до  $z = 28$ ) ГКЛ в межпланетном пространстве используется модель НИИЯФ-2016 [9].

Согласно этой модели энергетические спектры протонов и ядер гелия с энергиями до  $E = 10^5$  МэВ/нуклон рассчитываются с учетом гелиоцентрического расстояния  $r$  в межпланетном пространстве, используя формулу

$$F_{(p,He)}(E, t) = A_{(p,He)} \cdot E^{-\gamma} \cdot \left( \frac{E}{E + \varepsilon_{(p,He)}(t, r)} \right)^\Delta, \quad (1)$$

где модуляционный потенциал  $\varepsilon_{(p, He)}(t, r)$  зависит от числа Вольфа  $W(t - \Delta t)$ , которое имело место во время  $t - \Delta t$  с разницей  $\Delta t$  относительно времени регистрации потока.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{(p,He)}(t, r) &= \varepsilon_0(r) + k(r) \cdot W(t - \Delta t) = \\ &= \varepsilon_0 r^{-\alpha} + k(1 - r/120) \cdot W(t - \Delta t). \end{aligned} \quad (2)$$

В (1) и (2) параметры  $\gamma = 2.72$ ,  $\Delta = 3.7$ ,  $\Delta t$  не зависят от типа частиц, но параметры  $A$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $k$ ,  $\alpha$  различны для протонов и ядер гелия.

Потоки тяжелых ядер от лития до никеля (с зарядом ядра  $z = 3-28$ ) вычисляются по формуле

$$F_{(HCP)}(E, t) = \zeta_{(HCP)} F_{(He)}(E, t), \quad (3)$$

где  $\zeta_{(HCP)}$  – коэффициент нормировки.

Расчеты энергетических спектров потоков частиц ГКЛ для разных условий солнечной активности, соответствующим условиям полета космических аппаратов к Луне и Марсу [4–8], проводились для гелиоцентрического расстояния  $r = 1$  а. е. (орбита Земли). Увеличение потоков частиц ГКЛ с увеличением  $r$  при полетах космических аппаратов к Марсу не учитывалось, так как, как показывают расчеты, потоки частиц ГКЛ на орбите Марса ( $r = 1.5$  а. е.) только на  $\sim 7\%$  выше, чем на орбите Земли.

Для расчета энергетических спектров заряженных частиц, возникающих за защитой в результате ее бомбардировки потоком заряженных частиц ГКЛ, использовалась специальная про-

грамма. Эта программа аппроксимирует данные адронного транспортного кода SHIELD (<http://www.inr.ru/shield/introd-rus.html>), ограничившись случаем расчетов спектров потоков ТЗЧ (ядра с зарядом от  $z = 1$  до 28), создаваемых ГКЛ в центре сферической алюминиевой защиты разной толщины [10]. Использование расчетных спектров потоков частиц в центре сферической защиты для описания радиационного окружения внутри дозиметра следует считать оправданным из-за отсутствия (как правило) подробной информации о конфигурации защиты вокруг активного элемента (детектора излучения).

## 2. ПОГЛОЩЕННАЯ ДОЗА

Поглощенная доза  $D$  по определению есть средняя энергия  $dE$ , передаваемая от ионизирующего излучения элементу объема вещества  $dV$  с массой  $dm = \rho dV$ :

$$D = dE/\rho dV, \quad (4)$$

где  $\rho$  [г/см<sup>3</sup>] – плотность вещества.

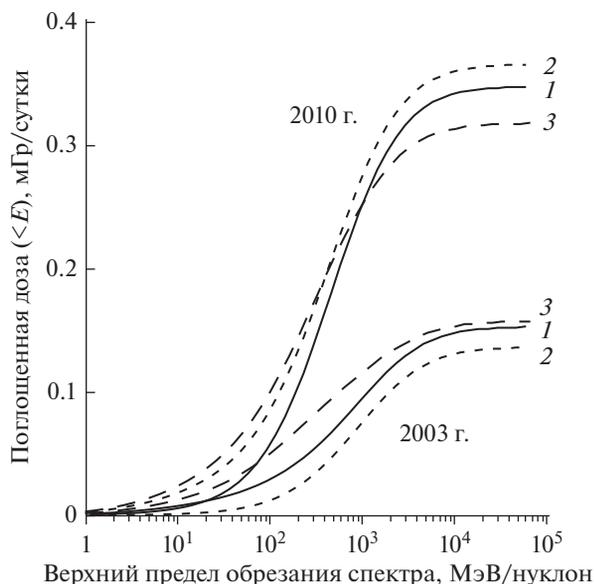
В этом определении понятие “средней энергии” указывает на то, что поглощенная доза является усредненной характеристикой выделенной энергии в “элементе объема” после многих актов взаимодействия налетающих частиц с атомами и электронами вещества. При этом в качестве “элемента объема” обычно рассматривается, так называемый, “точечный объем”, для которого справедливо предположение: пробег любой частицы из общего спектра падающих излучений превышает линейные размеры самого объема.

Тогда для расчета ПД в условиях космического пространства, когда происходит облучение “элемента объема” всенаправленными и изотропными потоками заряженных частиц разного сорта и энергии, формула (4) может быть преобразована к виду

$$D = k \sum_i \int_{E_i^{(min)}}^{E_i^{(max)}} L_i(E) \Phi_i(E) dE, \quad (5)$$

где  $L_i(E)$  [МэВ/(г·см<sup>2</sup>)] – линейная передача энергии (ЛПЭ), то есть энергия, выделяемая частицей  $i$ -го сорта с энергией  $E$  на единице пути (в г·см<sup>2</sup>),  $\Phi_i(E)$  [1/(см<sup>2</sup> МэВ/нуклон)] – дифференциальный энергетический спектр всенаправленного и изотропного потока частиц  $i$ -го сорта, пересекающих “точечный” объема  $dV$ ,  $E_i^{(min)}$  и  $E_i^{(max)}$  [МэВ/нуклон] – минимальная и максимальная энергия частиц  $i$ -го сорта в энергетическом спектре частиц,  $k = 1.6 \cdot 10^{-10}$  [Гр/(МэВ/г)] – постоянный коэффициент для преобразования значения поглощенной дозы к единице измерения в системе SI (Грей [Гр] = Дж/кг).

Формула (5) позволяет прогнозировать значения ПД при воздействии потоков частиц ГКЛ, ес-

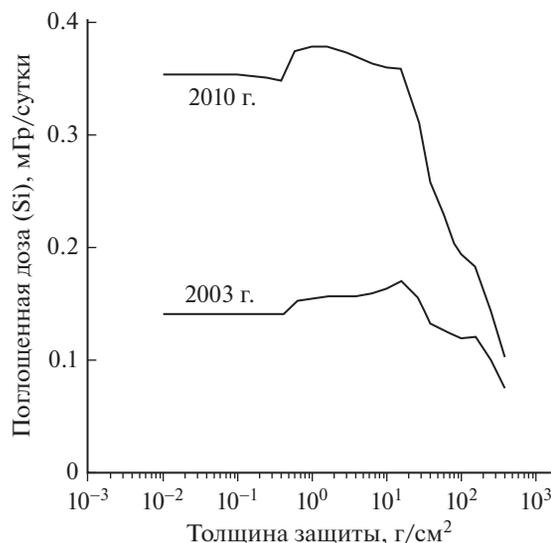


**Рис. 1.** Поглощенная доза в кремнии в зависимости от верхнего предела обрезания энергетического спектра потоков частиц ГКЛ при минимуме и максимуме солнечной активности. Толщина сферической защиты (Al), г/см<sup>2</sup>: 1 – 0.27; 2 – 2.7; 3 – 27.

ли известны энергетические спектры потока каждой частицы  $\Phi_i(E)$  (см. выше) и значения ЛПЭ  $L_i(E)$  каждой частицы в зависимости от их энергии  $E$ . Последние находятся из условия  $L_i(E) = |dE/dx|_i/\rho$ , где  $|dE/dx|_i/\rho$  – удельные (средние) ионизационные потери энергии для частицы с энергией  $E$ , которые известны из ядерной физики. В настоящей работе при определении  $|dE/dx|_i/\rho$  для ТЗЧ ГКЛ использовался код SRIM (<http://www.SRIM.org>).

Следует еще раз подчеркнуть, что формула (5) выводится, полагая попадание частиц изотропного потока с любых направлений в “точечный объем”. Эти предположения требуют оценки расчетной погрешности ПД по отношению к ПД, измеряемой дозиметрами на космических аппаратах. Действительно, во-первых, в реальных условиях поток частиц, падающий на детектор дозиметра, не является строго изотропным из-за разной толщины пассивной защиты вокруг детектора (в том числе, и массой КА) в разных направлениях. Во-вторых, обычные чувствительные объемы детекторов нельзя считать “точечными объемами” для низкоэнергичных частиц, пробег которых не превышает линейные размеры детектора. Например, протоны с энергией 6 МэВ имеют пробег ~300 мкм в кремнии, что сравнимо с обычной толщиной полупроводниковых детекторов, используемых для измерения поглощенной дозы в космосе.

Рис. 1 и 2 позволяют дать ответы на поставленные вопросы о погрешности расчетной дозы от потоков частиц ГКЛ во время минимума (2010 г.) и максимума (2003 г.) солнечной активности по отно-



**Рис. 2.** Поглощенная доза в кремнии в зависимости от толщины сферической защиты при облучении потоком частиц ГКЛ при минимуме и максимуме солнечной активности.

шению к реально измеряемой дозе. На этих рисунках приводятся расчетные значения ПД, рассчитанные по формуле (5) для всех ТЗЧ ГКЛ с энергией от  $E^{(min)} = 0.1$  до  $E^{(max)} = 10^5$  МэВ/нуклон с использованием энергетических спектров в центре сферической защиты с толщиной алюминиевой оболочки от 1 мм (0.27 г/см<sup>2</sup>) до 10 см (27 г/см<sup>2</sup>). В пределах этих значений толщин обычно находится защита детекторов на космических аппаратах, включая как собственную защиту дозиметрического блока, так и защиту с некоторых направлений конструктивными материалами космического аппарата.

На рис. 1 представлена расчетная поглощенная доза в зависимости от меняющегося значения верхнего предела интегрирования в формуле (5). Видно, что основной вклад в ПД от потоков частиц ГКЛ дают частицы с энергиями от несколько десятков МэВ/нуклон до десятка ГэВ/нуклон. Вклад в расчетную дозу (в предположении “точечного объема”) потоков частиц ГКЛ с энергиями меньше и выше указанных значений минимален. Например, частицы с энергией менее 10 МэВ/нуклон, при расчете дают вклад в ПД не выше 10% (зависит от толщины защиты) относительно полного значения.

На рис. 2 представлена расчетная поглощенная доза в зависимости от толщины сферической защиты. При толщине защиты менее ~10 см различие расчетных значений не так велико, хотя может достигать ~30% (0.03 мГр/сутки при максимуме солнечной активности). Если толщина защиты выше 10 см, то при ее увеличении, как мы видим на рис. 4, наблюдается резкое падение значения ПД. Учитывая все указанные обстоятельства, необходимо констатировать, что неопределенность распределения толщины защиты вокруг

**Таблица 1.** Сравнение полетных и расчетных ( $x = 1$  см,  $\Omega = 4\pi$ ) значений поглощенной дозы от потоков частиц ГКЛ

Дата полета	Прибор/косм. аппарат	Поглощенная доза, мГр/сутки		Относительная погрешность, $(D_{\text{рас}} - D_{\text{изм}})/D_{\text{изм}}, \%$
		измерение, $D_{\text{изм}}$	расчет, $D_{\text{рас}}$	
IV.2002–IV.2003	MARIE/ <i>Odyssey</i> (орбита Марса)	0.21	0.16	–22
IV–VI.2008	RADOM/ <i>Chandrayan-1</i> (cruise to Moon)	0.31	0.38	+23
VI.2009	CRaTER/ <i>LRO</i> (cruise to Moon)	0.50	0.39	–22
XII.2011–VII.2012	RAD/ <i>MSL</i> (cruise to Mars)	0.33	0.23	–30
IV–VII.2016	Liulin-MO/ <i>TGO</i> (cruise to Mars)	$0.38 \pm 0.01$	0.28	–28

детектора должна учитываться при сравнении расчетных и полетных значений поглощенной дозы при воздействии потоков частиц ГКЛ.

В табл. 1 приводится сравнение между расчетными значениями ПД, полученными с использованием выше приведенных формул, и известными данными, полученными во время полетов космических аппаратов в межпланетном пространстве. В расчет использовалась толщина сферической защиты равной 1 см, при которой расчетные значения ПД являются максимальными (см. рис. 2).

Из таблицы видно, что во всех случаях расчетные значения ПД находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными, если принять во внимание рассмотренные выше неопределенности, связанные с искажением всенаправленного потока частиц ГКЛ за защитой. Причем в четырех случаях из пяти расчетные значения ПД на 20–30% ниже, чем значения ПД, зарегистрированные дозиметрами. Хотя это отклонение расчетных значений от экспериментальных укладывается в оценки существующих неопределенностей при расчетах ПД, общая тенденция, по нашему мнению, указывает на существование дополнительного вклада в ПД вторичных излучений (в том числе, пионов [7]), которые не в полной мере учитываются в наших расчетах. Нельзя также сбрасывать со счетов вклад ПД потоков от других космических излучений, которые также как и ГКЛ постоянно присутствуют в космическом пространстве (например, от частиц аномальных космических лучей).

Отдельно следует сказать о данных дозиметра RADOM на космической станции *Chandrayan-1*. Этот дозиметр в значительной степени (как показывает анализ [5]) защищен корпусом и оборудованием космического аппарата от прямого попадания частиц ГКЛ. Поэтому значения ПД, измеренные этим дозиметром, оказались ниже, чем расчетные.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение измеренных и расчетных значений ПД, получаемой в межпланетном пространстве от потоков частиц ГКЛ техническими системами и экипажами космических кораблей и станций показывает, что можно говорить о приемлемой точности (~30%) расчетных значений ПД, использующих модели потоков частиц ГКЛ и предположение о защи-

те сферической формы вокруг рассматриваемого объекта. Уточнение расчетных ПД связано с учетом конфигурации формы защиты вокруг дозиметра и дополнительного вклада всех вторичных излучений, возникающих в материале защиты, включая корпус и оборудование космического аппарата.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 17-29-01022.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башкиров В.Ф., Панасюк М.И., Тельцов М.В. Динамические модели захваченной радиации на низких высотах в магнитосфере // Космич. исслед. 1998. Т. 36. № 4. С. 359–359. (Cosmic Research. P. 336.)
2. Benton E.R., Benton E.V. Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. 2001. V. 184. P. 255–294. doi 10.1016/S0168-583X(01)00748-0
3. Narici L., Berger T., Matthiä D., Reitz G. Radiation measurements performed with active detectors relevant for human space exploration // Front. Oncol. 2015. V. 5. P. 273. doi 10.3389/fonc.2015.00273
4. Saganti P., Cucinotta F., Zeitlin C. et al. MARIE measurements and model predictions of solar modulation of galactic cosmic rays at Mars // Proc. 29th International Cosmic Ray Conference. 2005. V. 1. P. 319–321.
5. Dachev T.P., Tomov B.T., Matviichuk Yu.N. et al. An overview of RADOM results for earth and moon radiation environment on Chandrayaan-1 satellite // Adv. Space Res. 2011. V. 48. P. 779–791. doi 10.1016/j.asr.2011.05.009
6. Mazur J.E., Crain W.R., Looper M. D. et al. New measurements of total ionizing dose in the lunar environment // Space Weather. 2011. V. 9. P. S07002. doi 10.1029/2010SW000641
7. Zeitlin C., Hassler D.M., Cucinotta F.A. et al. Measurements of energetic particle radiation in Transit to Mars on the Mars Science Laboratory // Science. 2013. V. 340. P. 1080–1084. doi 10.1126/science.1235989
8. Semkova J., Dachev T., Maltchev S. et al. Dosimetry investigations onboard ExoMars missions. Results from radiation measurements during ExoMars 2016 TGO cruise to Mars // 7th Moscow solar System Symposium, ИКИ РАН, 2016. P. 7MS3-MS-08. (Abstract)
9. Kuznetsov N.V., Popova E.P., Panasyuk M.I. Empirical model of long-time variations of galactic cosmic ray particle fluxes // J. Geophysical Research: Space Physics. 2017. V. 122. № 2. P. 1463–1472. doi 10.1002/2016JA022920
10. Kuznetsov N.V., Nymmik R.A., Sobolevsky N.M. Estimates of radiation effect for a spacecraft on the Earth-Mars-Earth route // Advances in Space Research. 2002. V. 30. № 4. P. 985–988. doi 10.1016/S0273-1177(02)00163-1