

УДК 53.043

## РАСЧЕТЫ РАДИАЦИОННЫХ НАГРУЗОК, СОЗДАВАЕМЫХ КОСМИЧЕСКИМИ ЛУЧАМИ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2021 г. М. И. Добынды<sup>1,3,\*</sup>, С. И. Свертилов<sup>1,2</sup>, М. И. Панасюк<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт медико-биологических проблем Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: mikhail.dobynde@skolkovotech.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

Воздействие высокоэнергичных космических лучей, проникающих в атмосферу Земли, создает радиационные риски для авиационных полетов. Промоделировано распространение частиц космических лучей в атмосфере и вычисляем высотные профили радиационных нагрузок за алюминиевой защитой различной толщины. Полученные результаты могут стать основой системы мониторинга радиационных нагрузок при авиаперелетах.

DOI: 10.31857/S0367676521110090

### ВВЕДЕНИЕ

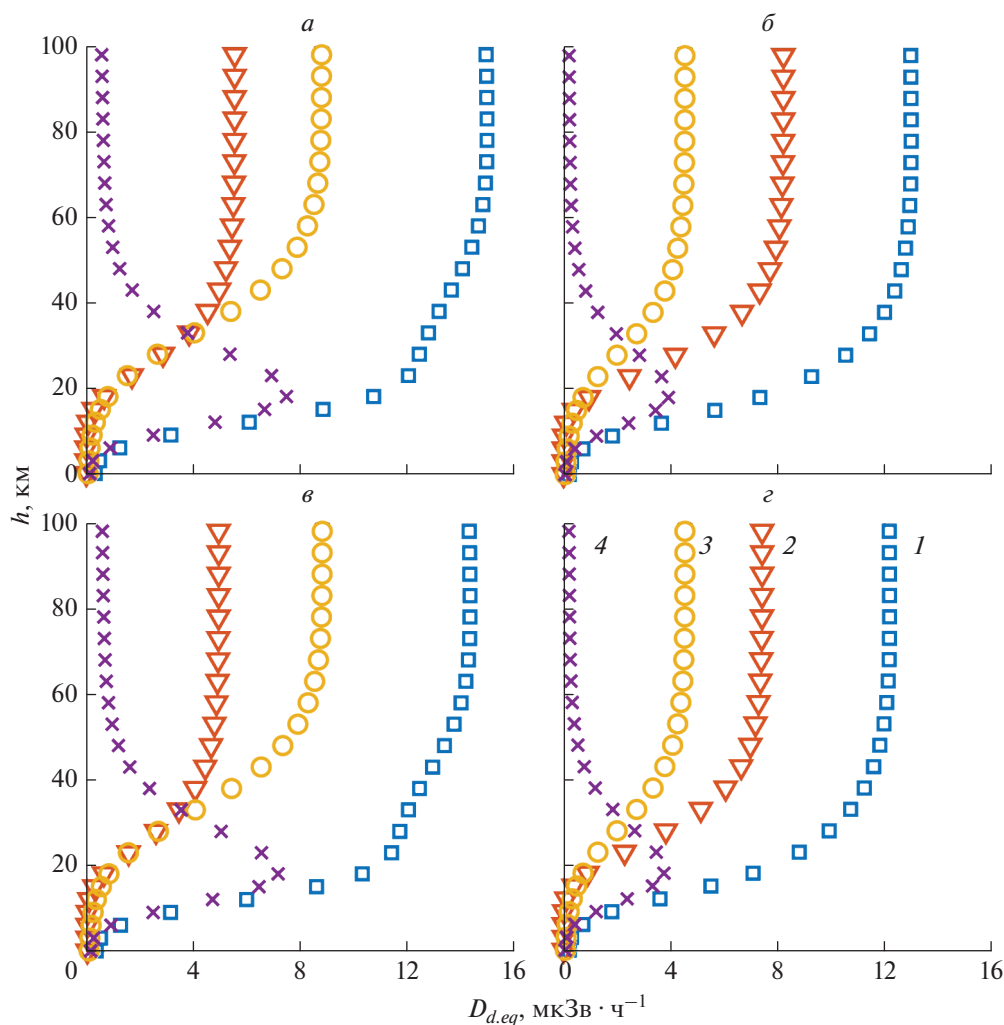
Воздействие космической радиации или космических лучей (КЛ) на бортовые системы и живые организмы — один из значительных факторов риска для космических и авиационных полетов. КЛ представляют собой потоки, в основном, высокоэнергичных заряженных частиц — ядер различных элементов. Галактические космические лучи (ГКЛ) и солнечные космические лучи (СКЛ) являются двумя основными компонентами КЛ в околоземном межпланетном пространстве. Интенсивность ГКЛ и частота событий СКЛ зависит от уровня солнечной активности. СКЛ наиболее вероятны во время максимума солнечной активности, когда интенсивность ГКЛ минимальна. Во время минимума солнечной активности ситуация обратна.

Частицы КЛ проникают в атмосферу Земли, создавая каскады вторичных частиц и ионизируя атмосферу. Ионизация атмосферы частицами ГКЛ максимальна на 20 км — так называемый максимум Регенера—Пфотцера. Потоки первичных и индуцированных частиц также значительны на высотах 10–12 км, где проходят трассы большинства гражданских авиарейсов. Частицы КЛ испытывают влияние магнитного поля Земли, поэтому интенсивность и спектры потоков частиц космической радиации зависят от геогра-

фических координат. Наиболее защищенной является область вблизи экватора над азиатским регионом. Наиболее интенсивны потоки КЛ вблизи полюсов в районе магнитосферного каспа, где практически все частицы КЛ могут проникать в атмосферу Земли.

Радиационные риски, связанные с КЛ, обусловлены ионизацией, которую КЛ создают в бортовых системах управления или внутри биологических тканей, нарушают их нормальное функционирование. В России радиационные риски учитываются в регламенте профессиональной активности космонавтов [1], но не учитываются для экипажей воздушных судов. В то же время, Европейском Союзе [2], пилоты, получающие дозу в 6 мЗв и более, относятся к категории А, а в США Федеральной авиационной администрацией облучение экипажей ограничивается дозой 100 мЗв за 5 лет и не более 50 мЗв в течение года. Контроль за уровнем облучения осуществляется как с помощью измерений на борту, так и с помощью информационно-аналитических систем, которые основаны на моделях проникновения КЛ в атмосферу Земли. Широко используются системы NAIRAS [3], CARI [4], PANDOCA [5].

В данной работе мы используем методы математического моделирования для описания распространения частиц КЛ в атмосфере Земли. По-



**Рис. 1.** Зависимости среднетканевого дозового эквивалента ГКЛ  $D_{d,eq}$  от высоты  $h$  над уровнем моря в районе Мурманска (*а, б*) и Санкт-Петербурга (*в, г*) за алюминиевой защитой  $0.1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$  (*а, в*) и  $15 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$  (*б, г*). Обозначения: 1 – общая доза, 2 – доза от первичных протонов и альфа-частиц, 3 – доза от ТЗЧ, 4 – доза от вторичных нейтронов.

лучены вертикальные профили распределения мощности радиационных доз для различных географических координат и толщин защиты летательных аппаратов. Мы так же демонстрируем вклад различных частиц в общую дозу. Полученные результаты могут использоваться как для оценки радиационных нагрузок при авиационных перелетах, так и для анализа различных экспериментальных данных, например полученных в экспериментах со стратосферными зондами.

## МЕТОДОЛОГИЯ

В данной работе мы моделируем распространение частиц ГКЛ и СКЛ в атмосфере Земли и вычисляем значения среднетканевого дозового эквивалента [6] на различных высотах, в различных географических координатах для различных толщин защиты. Согласно [7], величина средне-

тканевого дозового эквивалента может быть использована как верхняя оценка эффективной дозы, которая используется в нормативных документах.

Для описания спектров КЛ мы используем модель ГКЛ [8] для периода максимума солнечной активности и СКЛ [9]. Компьютерное моделирование проводилось методом Монте-Карло с помощью программного пакета GEANT4 [10] версии 4.10.06.p01. Для оценки дозовых нагрузок решались две задачи. Первая задача – это расчет потоков частиц, создаваемых протонами и альфа-частицами на различных высотах в атмосфере Земли. Вторая задача – расчет среднетканевого дозового эквивалента в сферическом фантоме [7], который находится в центре сферической оболочки из алюминия. Для оценки дозы тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) проводилась экстраполяция

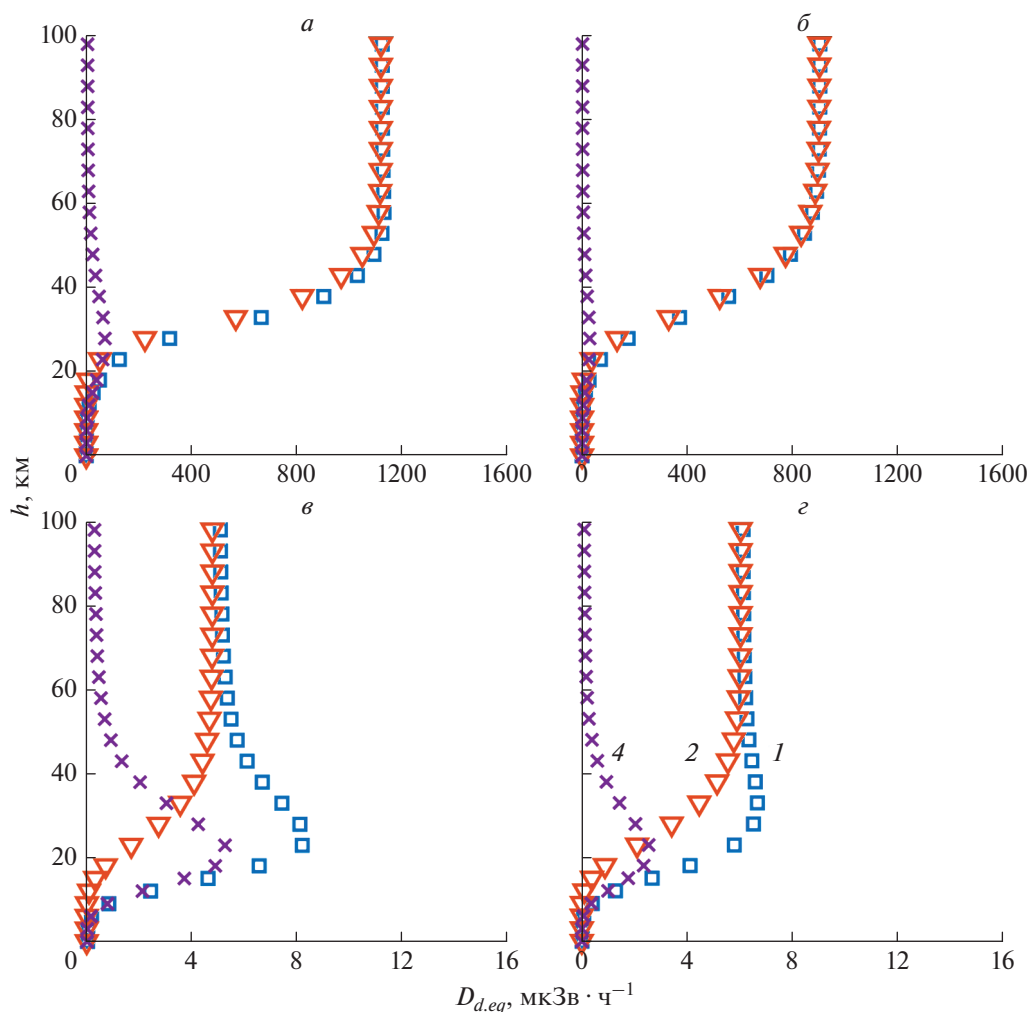


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для СКЛ.

данных, полученных для условий межпланетного полета [11].

Для описания атмосферы мы используем модель квазибесконечных плоскопараллельных слоев толщиной 100 м. Плотности внутри каждого слоя вычисляется как средняя интегральная плотность слоя по модели USSA76 [12] на сетке с шагом в 1 м. Использование плоскопараллельной геометрии уменьшает время расчета на 25% [13], по сравнению со сферической. При моделировании мы рассматривали только перпендикулярное падение первичных частиц КЛ на верхнюю границу атмосферы. Для учета углового падения мы использовали величину интегральной толщины атмосферы вдоль направления прихода первичных частиц.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

ГКЛ создают радиационный фон в атмосфере Земли, зависящий от фазы цикла солнечной ак-

тивности. На больших высотах вблизи верхней границы атмосферы основной вклад в дозу вносят первичные частицы ГКЛ (рис. 1). За толщинами менее  $15 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$  основной вклад в дозу вносят ТЗЧ. Это происходит из-за их большой биологической эффективности, несмотря на то что их доля в ГКЛ составляет порядка 1%. За большими толщинами защиты основной вклад дают протоны и альфа-частицы ГКЛ. С уменьшением высоты доза от первичных частиц уменьшается, а от вторичных частиц, которые возникают в атмосфере, увеличивается. Основной вклад в дозу на низких высотах вносят вторичные нейтроны. Их вклад достигает максимальных значений на высотах порядка 20 км, и затем спадает по мере приближения к поверхности Земли.

Профили доз СКЛ (рис. 2) формируются аналогично профилям ГКЛ. По мере приближения к поверхности Земли, вклад от первичных протонов уменьшается, а вклад вторичных нейтронов увеличивается, достигая максимума на высоте

порядка 20 км. На больших высотах за малой защитой мощность дозы от СКЛ значительно больше мощности дозы от ГКЛ, из-за большей интенсивности потоков частиц. Однако, с уменьшением высоты, доза от СКЛ убывает гораздо быстрее, поскольку энергия значительной части частиц СКЛ недостаточна для проникновения в нижние слои атмосферы.

Крайне интересно, что максимум в профиле общей дозы от всех типов частиц может как присутствовать, так и отсутствовать. Его наличие определяется вкладами в дозу от различных типов частиц, главным образом первичных частиц КЛ и вторичных нейтронов, при этом доза зависит от географических координат и толщины защитной оболочки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено моделирование распространения частиц КЛ в атмосфере Земли. Впервые показано влияние толщины алюминиевой защиты на величины дозовых нагрузок в атмосфере. Наличие максимума в профиле дозового эквивалента определяется соотношением дозы нейтронов и дозы от первичных частиц КЛ, которое зависит от жесткости геомагнитного обрезания и толщины алюминиевой защиты. Полученные результаты могут быть использованы для оценки доз радиации при авиаперелетах и стать основой системы радиационного мониторинга.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор № RFMEFI60419X0237).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СанПиН 2.6.1. 44-03-2004. Методич. указания МУ 2.6.1. 44-03-2004. Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах (ОКОКП-2004). Москва: Федеральное управление "Медбиоэкстрем", 2004.
2. EURATOM 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom, 2014.
3. Mertens C.J., Meier M.M., Brown S. et al. // Space Weather. V. 11. No. 10. P. 603.
4. Copeland K. // Radiat. Prot. Dosim. V. 175. No. 4. P. 419.
5. Matthiä D., Meier M.M., Reitz G. // Space Weather. 2014. V. 12. No. 3. P. 161.
6. Jammet H., Sinclair W.K., Meinhold C.B. et al. Recommendations on the International Commission on Radiological Protection, 1990.
7. ГОСТ 25645.203-83. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Модель тела человека для расчета тканевой дозы.
8. Matthiä D., Berger T., Mrigakshi A.I., Reitz G. // Adv. Space Res. 2013. V. 51. No. 3. P. 329.
9. Adams J.H., Beliaev A.A., Kuznetsov N.V. et al. // Radiat. Meas. 1996. V. 26. No. 3. P. 509.
10. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2003. V. 506. No. 3. P. 250.
11. Dobynde M.I., Shprits Y.Y. // Life Sci. Space Res. 2020. V. 24. P. 116.
12. U.S. Standard Atmosphere. Washington: U.S. Government Printing Office, 1976.
13. Paschalis P., Mavromichalaki H., Dorman L.I. et al. // New Astron. 2014. V. 33. P. 26.

## Assessment of the radiation dose rates due to the space radiation in the atmosphere of the Earth

M. I. Dobynde<sup>a, c, \*</sup>, S. I. Svertilov<sup>a, b</sup>, M. I. Panasyuk<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Lomonosov Moscow State University, Skobel'syn Institute of Nuclear Physics at Moscow, Moscow, 119991 Russia

<sup>b</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

<sup>c</sup>Institute of Biomedical Problems of Russian Academy of Science, Moscow, 123007 Russia

\*e-mail: mikhail.dobynde@skolkovotech.ru

Impact of space radiation, which penetrate in the atmosphere of the Earth, is a risk factor for aviation flights. In this work, we model the propagation of space radiation in the atmosphere. We calculate the altitude profiles of the radiation dose rates behind aluminum shielding of different thicknesses. The results of the work could be a background for a system for monitoring radiation exposure during aviation flights.