

ОЦЕНКА ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАЗНЫХ ВЫСОТАХ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

ESTIMATED EQUIVALENT RADIATION DOSE AT DIFFERENT ALTITUDES IN EARTH'S ATMOSPHERE

Е.А. Маурчев *Полярный геофизический институт РАН,
Апатиты, Россия, maurchev1987@gmail.com***Е.А. Михалко** *Полярный геофизический институт РАН,
Апатиты, Россия, mikhalko@pgia.ru***Ю.В. Балабин** *Полярный геофизический институт РАН,
Апатиты, Россия, balabin@pgia.ru***А.В. Германенко** *Полярный геофизический институт РАН,
Апатиты, Россия, alex.germanenko@gmail.com***Б.Б. Гвоздевский** *Полярный геофизический институт РАН,
Апатиты, Россия, gvozdevsky@pgia.ru***E.A. Maurchev***Polar Geophysical Institute RAS,
Apatites, Russia, maurchev1987@gmail.com***E.A. Mikhalko***Polar Geophysical Institute RAS,
Apatites, Russia, mikhalko@pgia.ru***Yu.V. Balabin***Polar Geophysical Institute RAS,
Apatites, Russia, balabin@pgia.ru***A.V. Germanenko***Polar Geophysical Institute RAS,
Apatites, Russia, alex.germanenko@gmail.com***B.B. Gvozdevsky***Polar Geophysical Institute RAS,
Apatites, Russia, gvozdevsky@pgia.ru*

Аннотация. Статья посвящена моделированию прохождения протонов космических лучей через атмосферу Земли. Целью работы является получение характеристик потоков вторичных частиц на разных высотах и пересчет этих значений в показатели эквивалентной дозы. Методика пересчета основана на численном моделировании взаимодействия частиц с антропоморфным фантомом. В работе рассмотрены два случая с использованием в качестве входных параметров модельного источника первичных частиц спектров протонов, соответствующих как галактическим, так и солнечным космическим лучам. Результаты вычислений представлены в табличном виде для интервала высот от 0 км до 11 км, верхнее значение соответствует стандартной высоте полета гражданских авиалайнеров. Показано хорошее согласие результатов расчетов с результатами аналогичных работ, проведенных другими научными группами.

Ключевые слова: космические лучи, астрофизика, метод Монте-Карло, GEANT4, физика частиц, численное моделирование.

Abstract. The paper reports the results of simulation of cosmic ray proton transport through Earth's atmosphere. The main objective of this work is to obtain characteristics of secondary particle fluxes at different altitudes and to convert them to equivalent dose values. The technique for the conversion is based on numerical simulation of interaction between the particles and an anthropomorphic phantom. The paper examines two cases, using a model source of primary proton spectra as input parameters, which correspond to both purely galactic cosmic rays and solar cosmic rays. The computational results are tabulated for the altitude range from 0 km to 11 km above sea level; the upper range value corresponds to the flight altitude of civilian airliners. These results are shown to agree well with the results obtained by other research teams.

Keywords: cosmic rays, astrophysics, Monte Carlo method, GEANT4, particle physics, numerical simulation.

ВВЕДЕНИЕ

В более ранних работах мы описывали модель прохождения космических лучей (КЛ) через атмосферу Земли [Маурчев и др., 2019; Маурчев и др., 2021]. Рассчитывались потоки вторичных космических лучей, а также скорость ионизации в соответствии с заданными характеристиками источника первичных частиц (протонов), которые соответствуют галактическим КЛ (ГКЛ) или солнечным КЛ (СКЛ). Выходные данные в наших вычислениях представлены как в виде энергетических спектров вторичных частиц, так и в виде высотных профилей (или зависи-

мости от глубины) потока или скорости ионизации, которые измеряются либо в $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$, либо в $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$ соответственно. При оценке радиационной безопасности такие единицы измерения неудобны и требуют приведения к стандартной величине, а именно к эквивалентной дозе, выражаемой в зивертах. Актуальность проблемы обусловлена тем, что во время наземных возрастаний солнечных космических лучей (Ground Level Enhancement, GLE) абсолютное значение первичного потока протонов может увеличиваться на несколько порядков [Firoz et al., 2019]. Во время GLE возрастают потоки радиации на вы-

сотах полетов авиалайнеров, поэтому люди, находящиеся на борту воздушного судна, могут получать значительную эквивалентную дозу облучения. Задача представленной работы — количественная оценка этой широко применяемой на практике величины. Следует заметить, что расчеты эквивалентной дозы уже проводились в рамках решения подобных задач (например, в работах [Menzel, 2010; Mishev et al., 2015]) экспериментально и при помощи PLANETOCOSMICS. Однако одной из главных целей нашей работы является разработка на базе имеющихся собственных моделей инструмента, необходимого для создания системы оценки радиационной безопасности на высотах от 0 до 11 км.

МЕТОДИКА

Для расчета прохождения протонов космических лучей через атмосферу Земли используется созданная в Полярном геофизическом институте модель, основанная на пакете для разработки программ GEANT4 [Allison et al., 2016; Маурчев, Балабин, 2016]. Параметризация модели атмосферы Земли выбирается таким образом, чтобы распределение плотности, температуры и состава было максимально приближено к реальности, а также оптимизировано для расчетов. Для этого столб воздуха разделяется на необходимое количество слоев, в каждом из которых содержится доля от общей массы. К примеру, в представленной работе столб разделен на 50 слоев, в каждом из которых содержание вещества составляет 2 % общей массы столба. Параметры задаются при помощи модели NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002]. Для того чтобы можно было задавать необходимые входные данные (дата, время, высота и т. д.) перед каждым запуском модели, авторами этой работы было произведено преобразование кода модели NRLMSISE-00 в класс на языке C++. Для учета физики взаимодействий используется готовый набор, который в GEANT4 называется QGSP_BERT_HP [Amelin et al., 2001; Heikkinen et al., 2003; Garny et al., 2009].

Генератор первичных частиц задан как точечный с изотропным распределением (равномерным по азимутальному и зенитному углам). Плотность вероятности для выбора энергии первичной частицы соответствует форме необходимого спектра первичных частиц, т. е. первичный энергетический спектр переводится в функцию плотности вероятности и используется генератор случайных чисел с этой функцией. Энергетический спектр первичных протонов для ГКЛ задается в соответствии с ГОСТом [ГОСТ 25645.104-84, 1985], а для СКЛ — в соответствии с методикой, описанной в [Vashenyuk et al., 2011]. Согласно этой методике, спектр СКЛ состоит из быстрой (PC) и медленной (DC) компонент. Спектры первичных протонов, используемые в моделировании, представлены на рис. 1. Геометрия модели атмосферы и траектории протонов с энергией 10 ГэВ в проекции Z–Y представлены на рис. 2.

В данной статье описывается методика получения эквивалентной дозы (ЭД). ЭД — это показатель того, как различные типы излучения по-разному воздей-

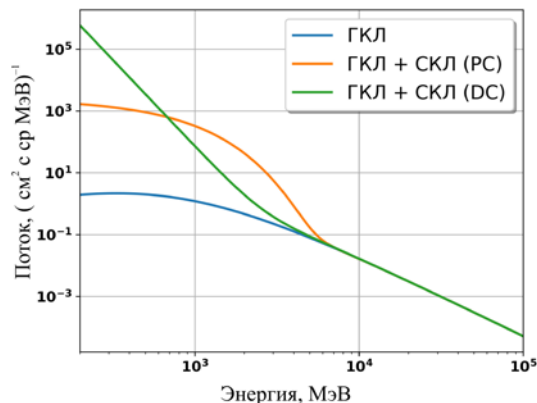


Рис. 1. Дифференциальные энергетические спектры СКЛ, полученные на основе данных сети станций нейтронных мониторов во время события GLE69 (20.01.2005), в сравнении со спектром ГКЛ

вуют на облучаемый объект при одной и той же дозе излучения $H = \sum_r w_r D_r$. При этом для оценочных значений при отсутствии данных о спектрах вторичного излучения используются поглощенная доза D_r , равная отношению средней энергии dE , переданной излучением в объем вещества массой dm , а также коэффициенты эффективности w_r , приведенные в табл. 1 для разных типов излучения r [http://nuclphys.sinp.msu.ru/radiation/rad_5.htm; Лошаков, 2008].

Таблица 1

Весовые коэффициенты для эквивалентной дозы

| Тип излучения и диапазон энергии | Коэффициент |
|------------------------------------|-------------|
| Гамма-кванты и фотоны всех энергий | 1 |
| Электроны и позитроны | 1 |
| Мюоны ⁺⁻ | 1 |
| Протоны | 5 |
| Нейтроны (<0.01 МэВ) | 5 |
| Нейтроны (0.01–0.1 МэВ) | 10 |
| Нейтроны (0.1–2 МэВ) | 20 |
| Нейтроны (2–20 МэВ) | 10 |
| Нейтроны (>20 МэВ) | 5 |

В нашей работе проводится прямой расчет поглощенной энергии в объеме вещества при помощи метода Монте-Карло. При этом используются все известные виды взаимодействий частиц, что позволяет получать наиболее точный результат. Следует заметить, что современные вычислительные мощности позволяют проводить моделирование фактически в режиме реального времени.

Таким образом, алгоритм расчета эквивалентной дозы выглядит следующим образом:

1. На заданных высотах при помощи модели прохождения КЛ через атмосферу Земли рассчитываются энергетические спектры вторичных частиц (полученные результаты представлены на рис. 3–5).

2. Для каждого типа частиц определяется интегральный поток, т. е. количество частиц, прошедших через единицу площади в единицу времени. Интегральные потоки в зависимости от высоты показаны на рис. 6.

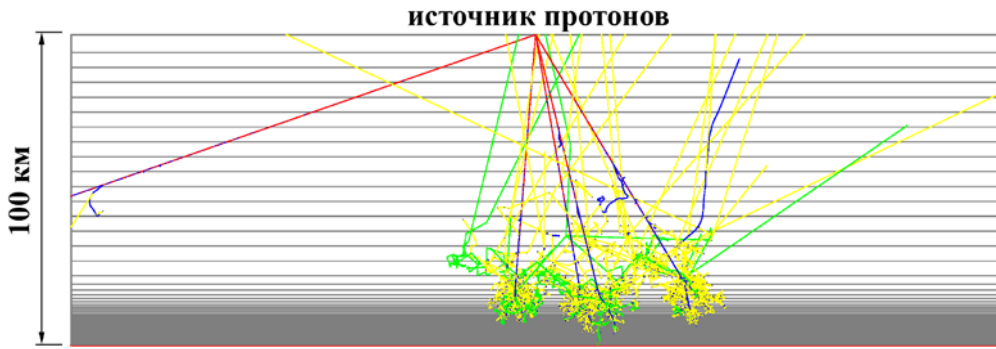


Рис. 2. Траектории пролета пяти протонов с начальной кинетической энергией 10 ГэВ через атмосферу Земли. Серым цветом представлена модель атмосферы, разделенной на слои, на верхней границе расположен источник первичных частиц с изотропным угловым распределением. Направление распространения первичных протонов от верхней границы к нижней. Красным цветом представлены положительно заряженные частицы, синим — отрицательно заряженные, пурпурным — мюоны, желтым — фотоны всех энергий и зеленым — нейтроны

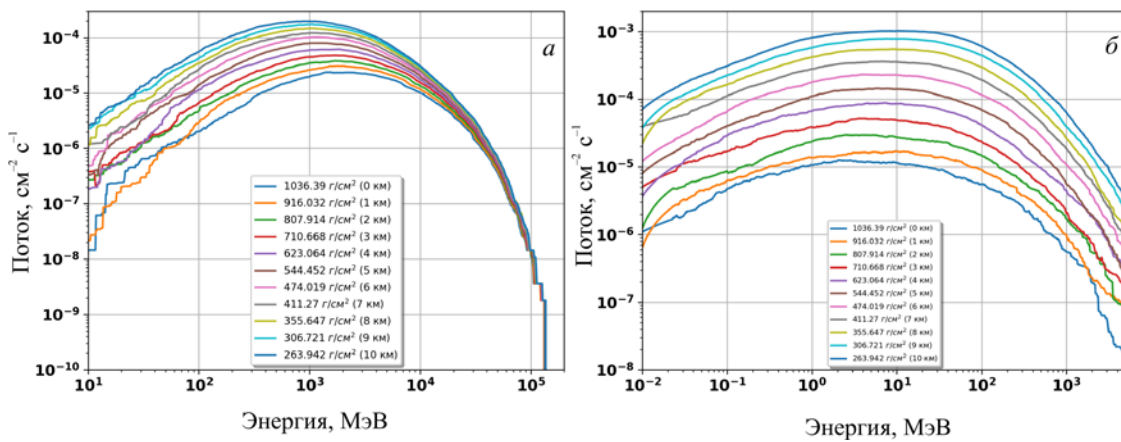


Рис. 3. Интегральные энергетические спектры вторичных мюонов (а) и электронов (б) на разных глубинах (высотах), полученные в результате моделирования прохождения протонов с энергетическими характеристиками, соответствующими спектру ГКЛ, через атмосферу Земли

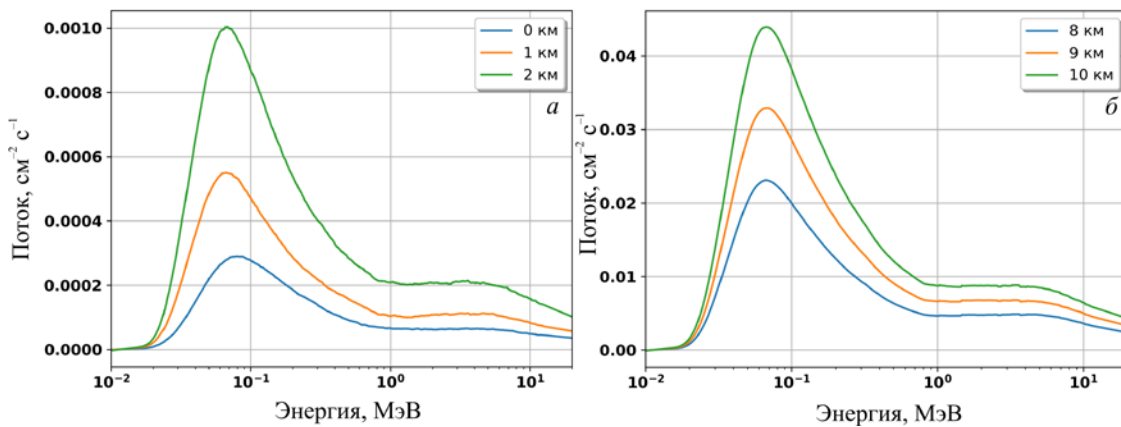


Рис. 4. Интегральные энергетические спектры вторичных гамма-квантов на высотах 0–2 км (а) и 8–10 км (б), полученные в результате моделирования прохождения протонов с энергетическими характеристиками, соответствующими спектру ГКЛ, через атмосферу Земли

После этого при помощи GEANT4 создается модель калориметра (объем воды 0.065 м^3) в виде цилиндра массой 64.8 кг с первичным источником, которому назначается спектральная характеристика частиц рассматриваемого типа. Производится запуск необходимого количества событий, определяется количество энергии, оставленной в единице объема, и производится пересчет на массу.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе работы отдельно моделировались прохождение протонов КЛ через атмосферу Земли и облучение частицами объема воды (цилиндр, масса, радиус и высота которого близки к параметрам человеческого тела). В ходе первого этапа расчетов были собраны данные об энергетических спектрах вторичных

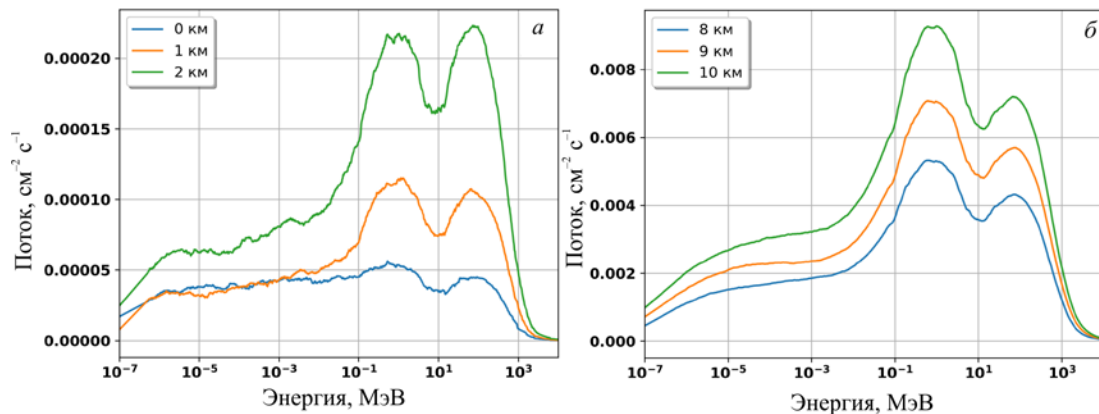


Рис. 5. Интегральные энергетические спектры вторичных нейтронов на высотах 0–2 км (а) и 8–10 км (б), полученные в результате моделирования прохождения протонов с энергетическими характеристиками, соответствующими спектру ГКЛ, через атмосферу Земли

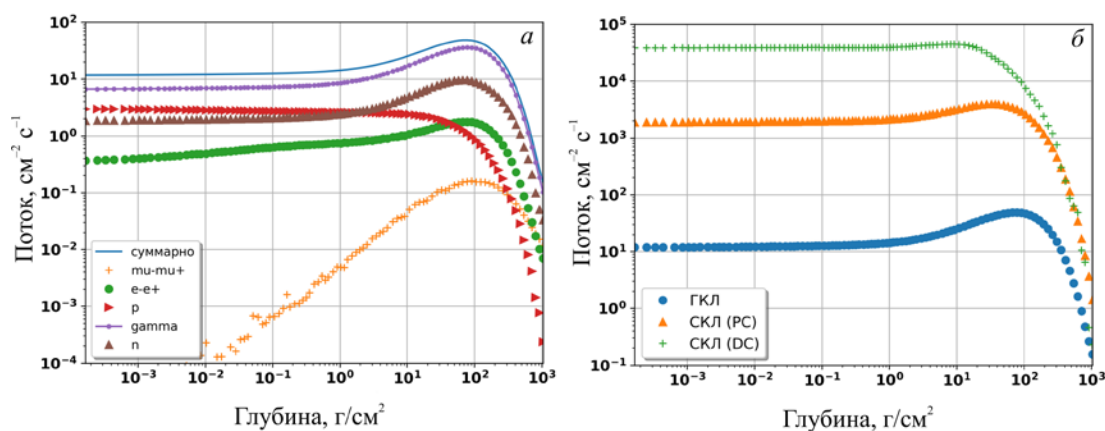


Рис. 6. Интегральные потоки различного типа частиц в зависимости от глубины атмосферы, полученные в результате моделирования прохождения протонов ГКЛ (а), и сравнение с интегральными потоками, полученными при расчете прохождения протонов СКЛ (б) во время события GLE69 (20.01.2005) для точки с геомагнитным обрезанием $R=0.65$ ГВ

Таблица 2

Расчетные значения эквивалентной дозы

| Высота, км | Эквивалентная доза | | | | | |
|------------|--------------------|--------|------------|----------|------------|----------|
| | ГКЛ | | GLE69 (PC) | | GLE69 (DC) | |
| | мкЗв/ч | мкЗв/ч | мкЗв/ч | мкЗв/ч | мкЗв/ч | мкЗв/ч |
| 0 | 0.130 | 1.134 | 0.413 | 3.614 | 0.155 | 1.358 |
| 1 | 0.192 | 1.681 | 1.047 | 9.171 | 0.256 | 2.244 |
| 2 | 0.290 | 2.543 | 2.897 | 25.373 | 1.457 | 12.759 |
| 3 | 0.469 | 4.106 | 6.210 | 54.395 | 2.384 | 20.880 |
| 4 | 0.764 | 6.693 | 11.951 | 104.693 | 9.911 | 86.822 |
| 5 | 1.214 | 10.637 | 23.327 | 204.340 | 27.267 | 238.863 |
| 6 | 1.935 | 16.950 | 42.444 | 371.813 | 35.366 | 309.804 |
| 7 | 2.940 | 25.755 | 70.227 | 615.191 | 65.236 | 571.464 |
| 8 | 4.274 | 37.437 | 117.558 | 1029.809 | 97.279 | 852.163 |
| 9 | 6.032 | 52.837 | 179.210 | 1569.880 | 183.526 | 1607.688 |
| 10 | 8.166 | 71.532 | 277.879 | 2434.222 | 298.847 | 2617.901 |
| 11 | 10.552 | 92.431 | 412.100 | 3609.995 | 513.438 | 4497.718 |

частиц (протоны, нейтроны, электроны, позитроны, мюоны, гамма-кванты) и их потоках, которые использовались как входные данные для второго этапа. При моделировании облучения объема воды собиралась информация об оставленной энергии на единицу массы — эквивалентной дозе. В табл. 2 приведены значения ЭД для трех случаев: ГКЛ, СКЛ со спектром, соответствующим быстрой (PC) и мед-

ленной (DC) компонентам GLE69 (20.01.2005). Данные представлены для интервала высот 0–11 км над уровнем моря (высоты полета большинства лайнеров гражданской авиации), что позволяет произвести количественную оценку дозы во время полета. Следует учесть, что расчеты проводились для жесткости геомагнитного обрезания $R=0.65$ ГВ. Нужно сказать также, что для СКЛ годовые дозы приведены

исключительно информативно, поскольку событие GLE обычно длится несколько часов (не более суток), однако интересно сравнить эти показатели с данными для ГКЛ.

Было проведено сравнение полученных нами результатов с результатами, ранее полученными другими исследователями. В работе [Mishev et al., 2015] приводятся экспериментальные данные за 1998 г. (близко к минимуму солнечной активности) [Menzel, 2010]. Согласно этим измерениям (и, соответственно, результатам, полученным в работе [Mishev et al., 2015]) на высоте 11 км для $R=0.65$ ГВ доза составила 6.5 мкЗв/ч. По нашим расчетам, этот показатель составил 10.6 мкЗв/ч, что является хорошим согласием. Несоответствие может быть обусловлено множеством факторов: тем, что мы используем случай с идеальным энергетическим спектром ГКЛ в минимуме солнечного цикла, идеализацией при моделировании прохождения КЛ через атмосферу Земли в целом и использованием несовершенной модели антропоморфного фантома. Для GLE69 (20.01.2005) и высот 11 км также проводились расчеты несколькими научными группами. В работе [Matthia et al., 2009] значение эквивалентной дозы равно 1000 мкЗв/ч для Южного полюса и 100 мкЗв/ч для Северного, в работе [Butikofer et al., 2008] эти значения составили 1500 и 100 мкЗв/ч соответственно, в работе [Mishev et al., 2015] — 986 и 145 мкЗв/ч. Следует заметить, что в нашей работе используется чистый спектр СКЛ, а ось анизотропии для рассматриваемого события была направлена как раз в южную полусферу, поэтому для рассматриваемой жесткости получилось значение 412 мкЗв/ч, что ожидаемо меньше, чем на полюсе. Конечно, для улучшения модели необходимо провести расчеты для нескольких значений жесткости геомагнитного обрезания с учетом питч-углового распределения, что планируется сделать в будущих работах. Предполагается также создание полноценной модели антропоморфного фантома при помощи GEANT4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы разработали инструмент для оценки эквивалентной дозы излучения в атмосфере Земли, который может применяться совместно с данными об энергетическом спектре первичных КЛ с целью обеспечения радиационной безопасности во время полетов на авиалайнерах. Как пример были проведены расчеты для ГКЛ и СКЛ во время события GLE69 (20.01.2005) для одной точки жесткости геомагнитного обрезания $R=0.65$ ГВ.

В заключение приведем некоторые оценки. Для лиц, не работающих непосредственно с источниками ионизирующего излучения, но которые по условиям проживания или размещения рабочих мест могут подвергаться воздействию ионизирующих излучений, предельно допустимая доза составляет 0.5 бэр/год (или 0.005 Зв/год, либо 0.571 мкЗв/ч). В присутствии только галактических космических лучей на уровне земли для точки с жесткостью геомагнитного обрезания $R=0.65$ ГВ расчетная эквивалентная доза для всего объема, имитирующего тело человека, составляет

0.0011 Зв/год (или 0.11 бэр/год, либо 0.13 мкЗв/ч). При этом, к примеру, для GLE69 (20.01.2005) на высоте 5 км этот показатель составляет 23.327 и 27.267 мкЗв/ч, а на 10 км уже 277.879 и 298.847 мкЗв/ч для быстрой и медленной компонент соответственно. Это на порядок превышает допустимую часовую норму. Примечательно, что на высоте 10 км для только ГКЛ в области высоких широт расчетная доза составила 8.166 мкЗв/ч, поэтому для одного члена экипажа, совершающего такие перелеты длительностью 4 ч четыре раза в неделю (например, маршрут Москва—Мурманск), ЭД составит 0.007 Зв/год или 0.7 бэр/год, что уже превышает предельную норму для лиц, которые не относятся к категории работающих постоянно или временно с источниками ионизирующих излучений (в этом случае предельно допустимая доза равна 5 бэр/год). Поэтому при высокой солнечной активности и длительном перелете в зоне, куда попали СКЛ с энергиями в диапазоне от 50 МэВ до 1 ГэВ, ЭД может превысить норму в несколько раз.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-77-10018 (Балабин Ю.В., Германенко А.В., Маурчев Е.А.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 25645.104-84. Лучи космические. Термины и определения. М., 1985. 9 с.
- Лошаков И.И. Введение в дозиметрию и защита от ионизирующих излучений: Учебное пособие. СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ), 2008. 145 с.
- Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. Модельный комплекс для исследования космических лучей. *Солнечно-земная физика*. 2016. Т. 2, № 4. С. 3–8. DOI: [10.12737/21289](https://doi.org/10.12737/21289).
- Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В. и др. Расчет скорости ионизации вещества атмосферы Земли протонами галактических и солнечных космических лучей. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 3. С. 81–88. DOI: [10.12737/szf-53201908](https://doi.org/10.12737/szf-53201908).
- Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В. и др. Расчет скорости ионизации во время события GLE с использованием глобальной модели атмосферы Земли и оценка вклада в этот процесс частиц галактических космических лучей с $Z>2$. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2021. Т. 85, № 3. С. 388–392. DOI: [10.31857/s0367676521030182](https://doi.org/10.31857/s0367676521030182).
- Allison J., Amako K., Apostolakis J., et al. Recent developments in Geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2016. Vol. 835. P. 186–225. DOI: [10.1016/j.nima.2016.06.125](https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125).
- Amelin N.S., Armesto N., Pajares C., Sousa D. Monte Carlo model for nuclear collisions from SPS to LHC energies. *The European Physical Journal C — Particles and Fields*. 2001. Vol. 22, iss. 1. P. 149–163. DOI: [10.1007/s100520100761](https://doi.org/10.1007/s100520100761).
- Butikofer R., Fluckiger E., Desorgher L., Moser M. The extreme solar cosmic ray particle event on 20 January 2005 and its influence on the radiation dose rate at aircraft altitude. *Sci. Total Environ.* 2008. Vol. 391, iss. 2-3. P. 177–183. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2007.10.021](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.021).
- Firoz K.A., Gan W.Q., Li Y.P., et al. On the possible mechanism of GLE initiation. *Astrophys. J.* 2019. Vol. 872, no. 2, 178. DOI: [10.3847/1538-4357/ab0381](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0381).
- Garny S., Leuthold G., Mares V., et al. Geant4 transport calculations for neutrons and photons below 15 MeV. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2009. Vol. 56, no. 4. P. 2392–2396. DOI: [10.1109/TNS.2009.2023904](https://doi.org/10.1109/TNS.2009.2023904).

Heikkinen A., Stepanov N., Wellisch J.P. Bertini intranuclear cascade implementation in Geant4. *Computing in High Energy and Nuclear Physics*. 2003. MOMT008, 7 p. ePrint nucl-th/0306008.

Matthia D., Heber B., Reitz G., et al. Temporal and spatial evolution of the solar energetic particle event on 20 January 2005 and resulting radiation doses in aviation. *J. Geophys. Res. A: Space Phys.* 2009. Vol. 114, iss. 8. A08104. DOI: [10.1029/2009JA014125](https://doi.org/10.1029/2009JA014125).

Menzel H.G. The International Commission on Radiation Units and Measurements. *J. ICRU*. 2010. Vol. 10, iss. 1. P. 1–106.

Mishev A.L., Adibpour F., Usoskin I.G., Felsberger E. Computation of dose rate at flight altitudes during ground level enhancements no. 69, 70 and 71. *Adv. Space Res.* 2015. Vol. 55. P. 354–362. DOI: [10.1016/j.asr.2014.06.020](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.06.020).

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, iss. A12. 1468. DOI: [10.1029/2002ja009430](https://doi.org/10.1029/2002ja009430).

Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. Features of relativistic solar proton spectra derived from ground level enhancement events (GLE) modeling. *Astrophys. Space Sci. Transactions*. 2011. Vol. 7, iss. 4. P. 459–463. DOI: [10.5194/asttra-7-459-2011](https://doi.org/10.5194/asttra-7-459-2011).

URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/radiation/rad_5.htm (дата обращения 13 июня 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Маурчев Е.А., Михалко Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Оценка эквивалентной дозы излучения на разных высотах от протонов космических лучей. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 3. С. 29–34. DOI: [10.12737/szf-83202204](https://doi.org/10.12737/szf-83202204).