

Научная статья
УДК 528.029.69
doi:10.37614/2949-1185.2023.2.2.002

ОЦЕНКА ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА GOES

**Евгений Александрович Маурчев^{1, 2}, Алексей Владимирович Германенко³,
Юрий Васильевич Балабин⁴, Борис Борисович Гвоздевский⁵**

^{1, 3–5}Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова
Российской академии наук, Москва, Россия

¹maurchev1987@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2028-4613>

³<https://orcid.org/0000-0001-5129-9426>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-1256-6728>

⁵<https://orcid.org/0000-0003-1643-798X>

Аннотация

Разработана система, позволяющая проводить оценку эквивалентной дозы излучения на высотах полета гражданских авиалайнеров в режиме реального времени. Представлено краткое описание методики вычислений, дается ссылка на информационный ресурс, предоставляющий данные в открытом доступе. Показан результат для типового спектра протонов космических лучей, полученного со спутника.

Ключевые слова:

метод Монте-Карло, GEANT4, космические лучи, радиационная безопасность

Благодарности:

работа выполнена при поддержке РНФ (грант №18-77-10018).

Original article

THE REAL TIME ESTIMATION OF THE EQUIVALENT RADIATION DOSE WITH THE GOES SATELLITE PROTON DATA

Evgenii A. Maurchev^{1, 2}, Alexey V. Germanenko³, Yuriy V. Balabin⁴, Boris B. Gvozdevsky⁵

^{1, 3–5}Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk

¹maurchev1987@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2028-4613>

³<https://orcid.org/0000-0001-5129-9426>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-1256-6728>

⁵<https://orcid.org/0000-0003-1643-798X>

Abstract

A system has been developed that makes it possible to evaluate the equivalent radiation dose at the altitudes of airliners in real time. A brief description of the calculation methodology is presented, a link is given to an information resource that provides data in the public domain. The result is shown for a typical spectrum of cosmic ray protons obtained from a satellite.

Keywords:

Monte-Carlo method, GEANT4, cosmic rays, radiation safety

Acknowledgments:

the reported study was funded by RSF according to the research project № 18-77-10018.

Введение

Космические лучи (КЛ) более чем на 90 % состоят из протонов, которые, вторгаясь в атмосферу Земли, взаимодействуют с ядрами кислорода и азота, образуя каскады вторичных частиц. Также процессом потери энергии является ионизация (Filges D., 2009). Ранние версии нашего программного обеспечения были предназначены для расчета характеристик потоков вторичного излучения, в некоторых работах приводится пример использования созданной нами модели для прохождения КЛ через атмосферу Земли (Маурчев Е. А и др., 2021; Маурчев Е. А и др., 2021а; Маурчев Е. А и др., 2021б; Маурчев Е. А и др., 2019). Помимо значений потоков вторичного излучения, рассчитывалась 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 могут быть представлены как в виде энергетических спектров вторичных частиц, так и в виде высотных профилей

(или зависимостей от глубины), где измеряемая величина может быть выражена либо в единицах потока ($\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$), либо как скорость ионизации ($\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$). Одной из прикладных задач, в которой используются эти данные — оценка радиационной безопасности на высотах полета гражданских авиалайнеров, особенно в области высоких широт. Однако получаемые единицы измерения неудобны и требуют приведения к стандартной величине, а именно к эквивалентной дозе, выражаемой в зивертах. Такая работа была проведена нами ранее (Маурчев Е. А. и др., 2022). Проведение исследования стало необходимым, поскольку во время событий GLE (Ground Level Enhancement — эффект возрастания скорости счета на нейтронных мониторах) абсолютное значение первичного потока протонов может увеличиваться на несколько порядков. Такое возрастание величины потока на высотах полетов авиалайнеров может приводить к тому, что экипаж и пассажиры на борту воздушного судна могут получать значительную дозу облучения. Задачей предыдущей работы была количественная оценка этой величины. Следует заметить, что расчеты эквивалентной дозы уже проводились в рамках решения подобных задач (например, в работах (Mishev et al., 2015; Menzel H. G., 2010) экспериментально и при помощи PLANETOCOSMICS). Однако одной из главных ниших целей было создание собственного инструмента, на базе имеющихся у нас собственных разработанных моделей.

В данной статье представлено описание первого приближения модели оценки эквивалентной дозы излучения в режиме реального времени. Входными данными на сегодня являются потоки протонов, получаемые при помощи спутника GOES. Выходными данными являются значения эквивалентной дозы на высоте 10 км в виде глобального распределения, которое транслируется в режиме online на сайте нашего проекта (<http://ruscosmics.ru>).

Методика

Для расчета прохождения протонов космических лучей используется созданная в Полярном геофизическом институте (ПГИ) модель, основанная на пакете для разработки программ GEANT4 (Allison J. et al., 2016). Параметризация модели атмосферы Земли выбирается таким образом, чтобы распределение плотности, температуры и состава было максимально приближенно к реальности, а также оптимизированно для расчетов. Для этого используется принцип построения так называемой «плоской» геометрии, в которой столб воздуха разделяется на необходимое количество слоев, в каждом из которых содержится доля от общей массы. Так, к примеру, в представленной работе столб разделен на 50 слоев, в каждом из которых содержание вещества составляет 2 % от общей массы столба. Параметры задаются при помощи модели NRLMSISE-00 (Picone J. M. et al., 2002). Следует заметить, что авторами данной статьи было произведено преобразование кода модели NRLMSISE-00 в класс на языке C++ и последующее встраивание ее в модель прохождения частиц КЛ через атмосферу Земли. Таким образом, расчет параметров атмосферы происходит каждый раз перед запуском моделирования и имеется возможность задавать необходимые входные данные (дата, время, высота и т. д.).

Для учета физики взаимодействий используется готовый набор, который в GEANT4 называется QGSP_BERT_HP, включающий в себя стандартные электромагнитные взаимодействия, каскадные процессы (Amelin N. S. et al., 2001; Heikkinen A. et al., 2003), а также расчет прохождения нейтронов в соответствии с сечениями взаимодействий с энергиями ниже 20 МэВ (Garny S. et al., 2009).

В первом приближении для определения нижнего порога энергии в спектре была выбрана карта значений вертикальной жесткости геомагнитного обрезания с шагом 5° по долготе и широте (Gvozdevsky B. B et al., 2018). Генератор первичных частиц на границе каждой области задается как точечный, с изотропным распределением. Плотность вероятности для выбора энергии первичной частицы соответствует форме необходимого спектра первичных частиц. То есть первичный энергетический спектр переводится в функцию плотности вероятности и создается генератор случайного числа с этой функцией. Дифференциальный энергетический спектр первичных протонов определяется по спутнику GOES (<https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux>) в режиме реального времени и в дальнейшем аппроксимируется. Спектры первичных протонов, используемые в моделировании, представлены на рис. 1. Пример геометрии одной области моделирования, ограниченной шагом в 5° , и трекинга протонов с моноэнергией 10 ГэВ в проекции Z–Y представлен на рис. 2. В нашей работе проводится прямой расчет поглощенной энергии в объеме вещества (эквивалентной дозы) при помощи метода Монте-Карло. При этом используются все известные виды взаимодействий частиц, что позволяет получать наиболее точный результат. Более подробное описание методики представлено в работе (Маурчев Е. А. и др., 2022).

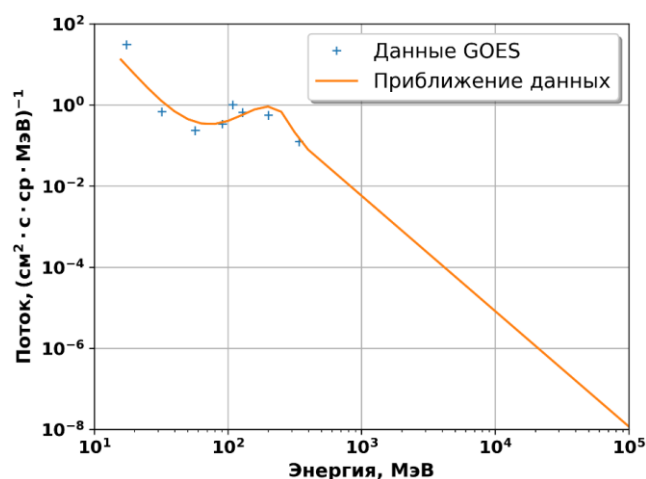


Рис. 1. Типовой дифференциальный энергетический спектр, получаемый при помощи спутника GOES, и его аппроксимация для использования в модели оценки эквивалентной дозы излучения. Следует заметить, что использование только данных спутника является первым приближением при создании системы реального времени, также нами разработана методика привязки к наземным детекторам излучения, которая будет обсуждаться в следующих работах

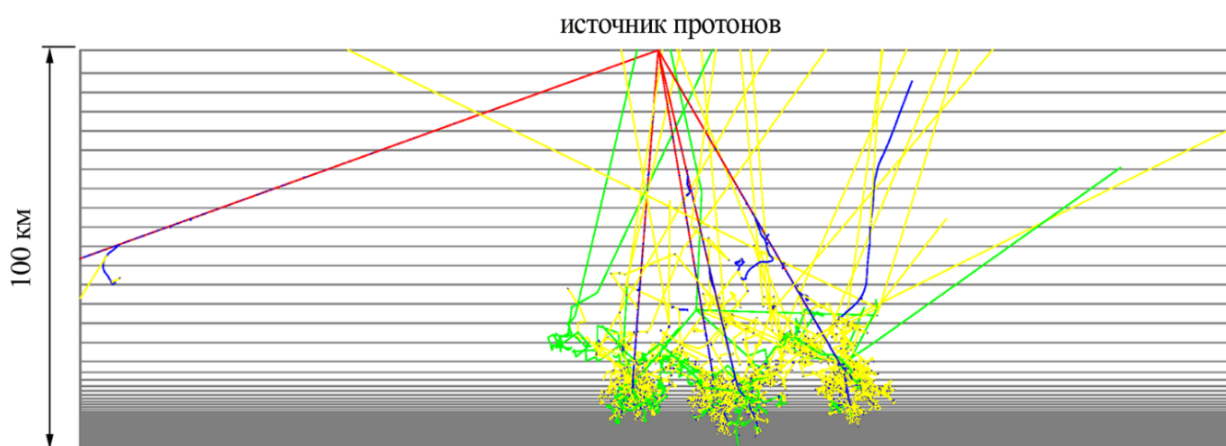


Рис. 2. Трекинг пяти протонов с начальной кинетической энергией 10 ГэВ через атмосферу Земли. Серым цветом представлена геометрия модели атмосферы, разделенная на слои, на верхней границе расположен источник первичных частиц с изотропным угловым распределением. Красным цветом представлены положительно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

Результат

В ходе проведенной работы был разработан программный комплекс, позволяющий производить оценку эквивалентной дозы на заданной высоте в режиме реального времени. При этом используется собственная модель для моделирования прохождения КЛ через атмосферу Земли, модель, позволяющая получать значения вертикальной жесткости геомагнитного обрезания, а также программа, позволяющая использовать спектр протонов первичных КЛ. В первом приближении используется дифференциальный энергетический спектр со спутника GOES. Пример типового распределения эквивалентной дозы излучения на высоте 10 км представлен на рис. 3. На странице проекта это изображение обновляется каждые 5 мин в соответствии со скоростью обновления входных данных.

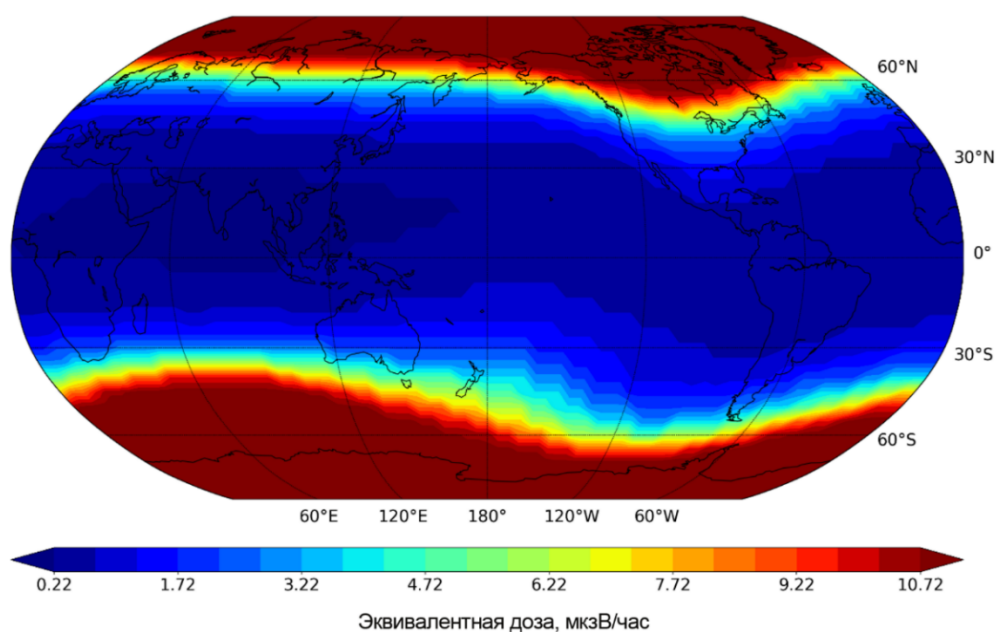


Рис. 3. Типовое распределение эквивалентной дозы по широте и долготе на высоте 10 км, полученное при помощи нашей модели прохождения КЛ через атмосферу Земли и спектра первичных протонов, предоставляемого спутником GOES

Заключение

Нами был разработан инструмент для оценки эквивалентной дозы излучения в атмосфере Земли в режиме реального времени, который применяется совместно с данными об энергетическом спектре первичных КЛ с целью обеспечения радиационной безопасности во время полета на авиалайнерах. Здесь следует заметить, что дифференциальные спектры протонов, используемые как входные данные, могут быть замещены данными с других спутников при их наличии в свободном доступе и достаточной частоте обновления (не более одного раза в 5 мин). В совокупности с данными, предоставляемыми наземными детекторами (нейтронные мониторы, мюонные телескопы, сцинтилляционные детекторы гамма и рентгеновского излучения, регулярное проведение балонного эксперимента), это дает возможность постоянного улучшения созданной системы. Следует заметить, что в более ранних работах нами проводилась верификация и корректировка используемой модели прохождения КЛ через атмосферу Земли при помощи экспериментальных данных.

Список литературы

1. Маурчев Е. А., Балабин Ю. В., Германенко А. В., Михалко Е. В., Гвоздевский Б. Б. Расчет скорости ионизации вещества атмосферы Земли протонами галактических и солнечных космических лучей // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5, № 3, С. 81–88.
2. Маурчев Е. А., Балабин Ю. В., Германенко А. В. Компактные счетчики заряженной компоненты как дополнительное средство верификации моделирования прохождения космических лучей через атмосферу Земли // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85, № 11. С. 1634–1636.
3. Маурчев Е. А., Балабин Ю. В., Германенко А. В., Михалко Е. А., Гвоздевский Б. Б. 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. 2021а. Т. 85, № 3. С. 388–392.
4. Маурчев Е. А., Балабин Ю. В., Германенко А. В., Гвоздевский Б. Б. Моделирование прохождения протонов солнечных космических лучей через атмосферу Земли для событий GLE42 и GLE44 // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021б. Т. 85, № 3, С. 383–387.
5. Маурчев Е. А., Михалко Е. А., Балабин Ю. В., Германенко А. В., Гвоздевский Б. Б. Оценка эквивалентной дозы излучения на разных высотах атмосферы Земли // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 3. С. 29–34.

6. Allison J., Amako K. Recent developments in Geant4. Nucl.Instrum. Methods Phys. Res. 2016, V. 835, Sect. A., P. 186.
7. Amelin N. S., Armesto N. Monte Carlo model for nuclear collisions from SPS to LHC energies. THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C — PARTICLES AND FIELDS. 2001, V. 22, P. 149–163.
8. Filges D., Goldenbaum F. Handbook of Spallation Research. Location: WILEY–VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2009, P. 767.
9. Garry S., Leuthold G. GEANT4 Transport Calculations for Neutrons and Photons Below 15 MeV. IEEE transactions on Nuclear Science. 2009, V. 56, № 4, P. 2392–2396.
10. Gvozdevsky B. B., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Gushchina R., Ptuskin V. Geomagnetic cutoff rigidities of cosmic rays and their secular changes. Proc. 42nd COSPAR Scientific Assembly. 2018. –ID. D1.2–31–18.
11. Heikkinen A., Stepanov N. Bertini intra-nuclear cascade implementation in Geant4. Computing in High Energy and Nuclear Physics (ePrint nucl-th/0306008). 2003, P. 1–7.
12. Menzel, H. G. The international commission on radiation units and measurements. J. ICRU. 2010, 10 (2), 1–35.
13. 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. Advances in Space Research. 2015, V. 55, 354–362.
14. Picone J. M., Hedin A. E. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. J. Geophys. Res. 2002, V. 107, A. 12, P. 1468.

References

1. Mauricev E. A., Balabin Ju. V., Germanenko A. V., Mihalko E. V., Gvozdevskij B. B. Raschet skorosti ionizacii veshhestva atmosfery Zemli protonami galakticheskikh i solnechnykh kosmicheskikh luchey [Calculation of the rate of ionization of the Earth's atmosphere by protons of galactic and solar cosmic rays, Solnechno-zemnaya physics]. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics], 2019, vol. 5, no. 3, pp 81–88. (In Russ.)
2. Mauricev E. A., Balabin Ju. V., Germanenko A. V. Kompaktnye schetchiki zarjazhennoj komponenty kak dopolnitel'noe sredstvo verifikacii modelirovaniya prohozhdeniya kosmicheskikh luchey cherez atmosferu Zemli [Compact charged component counters as an additional means of verifying the simulation of the passage of cosmic rays through the Earth's atmosphere,]. *Izvestija RAN. Seriya fizicheskaja* [Bulletin of the RAS: Physics], 2021, vol. 85, no. 11, pp. 1643–1636. (In Russ.)
3. Mauricev E. A., Balabin Ju. V., Germanenko A. V., Mihalko E. A., Gvozdevskij B. B. Raschet skorosti ionizacii vo vremja sobytija GLE s ispol'zovaniem global'noj modeli atmosfery Zemli i ocenka vклада v jetot process chastic galakticheskikh kosmicheskikh luchey s $Z > 2$ [Calculation of the ionization rate during a GLE event using a global model of the Earth's atmosphere and assessment of the contribution to this process particles of galactic cosmic rays with $Z > 2$]. *Izvestija RAN. Seriya fizicheskaja* [Bulletin of the RAS: Physics], 2021a, vol. 85, no. 3, pp. 388–392. (In Russ.)
4. Mauricev E. A., Balabin Ju. V., Germanenko A. V., Gvozdevskij B. B. Modelirovanie prohozhdeniya protonov solnechnykh kosmicheskikh luchey cherez atmosferu Zemli dlja sobytij GLE42 i GLE44 [Modeling the passage of solar cosmic ray protons through the Earth's atmosphere for the GLE42 and GLE44 events]. *Izvestija RAN. Seriya fizicheskaja* [Bulletin of the RAS: Physics], 2021b, vol. 85, no. 3, pp. 383–387. (In Russ.)
5. Mauricev E. A., Mihalko E. A., Balabin Ju. V., Germanenko A. V., Gvozdevskij B. B. Ocenka jekvivalentnoj dozy izluchenija na raznyh vysotah atmosfery Zemli [Estimation of the equivalent dose of radiation at different altitudes of the Earth's atmosphere]. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics], 2022, vol. 8, no. 3, pp 29–34. (In Russ.)
6. Allison J., Amako K. Recent developments in Geant4. Nucl.Instrum. Methods Phys. Res., 2016, vol. 835, sect. A, p. 186.
7. Amelin N. S., Armesto N. Monte Carlo model for nuclear collisions from SPS to LHC energies. THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C — PARTICLES AND FIELDS, 2001, vol. 22, pp. 149–163.
8. Filges D., Goldenbaum F. Handbook of Spallation Research. Location: WILEY–VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009, pp. 767.
9. Garry S., Leuthold G. GEANT4 Transport Calculations for Neutrons and Photons Below 15 MeV. IEEE transactions on Nuclear Science, 2009, vol. 56, no. 4, pp. 2392–2396.
10. Gvozdevsky B. B., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Gushchina R., Ptuskin V. Geomagnetic cutoff rigidities of cosmic rays and their secular changes. Proc. 42nd COSPAR Scientific Assembly, 2018, ID. D1.2–31–18.
11. Heikkinen A., Stepanov N. Bertini intra-nuclear cascade implementation in Geant4. Computing in High Energy and Nuclear Physics (ePrint nucl-th/0306008), 2003, pp. 1–7.
12. Menzel, H.G. The international commission on radiation units and measurements. J. ICRU 10 (2), 1–35, 2010.

13. 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. *Advances in Space Research*, vol. 55, 354–362, 2015.
14. Picone J. M., Hedin A. E. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.*, 2002, vol. 107, A12, pp. 1468.

Информация об авторах

Е. А. Маурчев — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник;

А. В. Германенко — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник;

Ю. В. Балабин — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией;

Б. Б. Гвоздевский — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник.

Information about the authors

E. A. Maurchev — PhD (Physics), senior researcher;

A. V. Germanenko — PhD (Physics), researcher;

Yu. V. Balabin — PhD (Physics), Head of Laboratory;

B. B. Gvozdevskiy — PhD (Physics), researcher.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 17.04.2023; принята к публикации 03.05.2023.

The article was submitted 10.04.2023; approved after reviewing 17.04.2023; accepted for publication 03.05.2023.