УДК 524.1
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-449

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С АТМОСФЕРОЙ ЗЕМЛИ

**Е.А. Маурчев[1], К.А. Диденко[1]**

[1]Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Москва, Россия, maurchev@izmiran.ru

# MODELING OF COSMIC RAY INTERACTIONS WITH THE EARTH'S ATMOSPHERE

**E.A. Maurchev[1], K.A. Didenko[1]**

[1]Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, maurchev@izmiran.ru

**Аннотация.** Работа посвящена численному моделированию прохождения частиц космических лучей через атмосферу Земли. Рассматривается методика восстановления спектров протонов первичных космических лучей в случае как галактических, так и солнечных космических лучей. В качестве результатов рассматриваются полученные характеристики частиц вторичных космических лучей (спектры, угловые распределения, интегральные потоки) для большого диапазона высот (0–100 км). Обсуждается возможность верификации полученных результатов при помощи экспериментальных данных. Отдельно рассматривается расчет скорости ионизации для глобальной модели атмосферы Земли.

**Ключевые слова:** метод Монте-Карло, космические лучи, численное моделирование.

**Abstract.** The paper is devoted to the numerical modeling of the cosmic ray particle transport through the Earth's atmosphere. A technique for reconstructing proton spectra of primary cosmic rays, both in the case of galactic cosmic rays and solar cosmic rays, is considered. The obtained characteristics of secondary cosmic ray particles (spectra, angular distributions, integral fluxes) for a large range of heights (0-100 km) are considered as results. The possibility of verifying the obtained results using experimental data is discussed. The calculation of the ionization rate for the global model of the Earth's atmosphere is considered separately.

**Keywords:** Monte Carlo method, cosmic rays, numerical simulation.

## ВВЕДЕНИЕ И МЕТОДИКА

Космические лучи (КЛ) как галактические (ГКЛ), так и солнечные (СКЛ) более чем на 90 % состоят из протонов, которые, вторгаясь в атмосферу Земли, взаимодействуют с окружающим веществом (преимущественно азотом и кислородом) и образуют каскады вторичных частиц. Процессом потери энергии является также ионизация [Filges, Goldenbaum, 2009]. Исследование вторичных частиц является важной задачей, результаты решения которой могут быть полезны как в области химии атмосферы, так и при оценке радиационной безопасности. В этой работе мы моделируем прохождение частиц космических лучей через атмосферу Земли при различных начальных условиях и представляем полученные результаты в виде спектральных, угловых и интегральных характеристик частиц вторичных КЛ.

Для расчета прохождения частиц космических лучей используется созданная нами модель RUSCOSMICS, основанная на пакете для разработки программ GEANT4 [Allison 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 «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 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 et al., 2001; Heikkinen et al., 2003], а также расчет прохождения нейтронов в соответствии с сечениями взаимодействий с энергиями ниже 20 МэВ [Garny et al., 2009].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено моделирование прохождения частиц КЛ через атмосферу Земли и взаимодействие с ней. Показаны основные характеристики частиц вторичных КЛ, получаемые при моделировании как для ГКЛ, так и для СКЛ с учетом разных начальных условий. Отдельно

показаны методики восстановления первичных спектров и обсуждаются различные подходы к решению этой задачи. Реализована модель оценки скорости ионизации атмосферы Земли частицами КЛ для всех широт и долгот в большом диапазоне высот (от уровня моря до 100 км).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


Allison J., Amak K., Apostolakis J., et al. Recent developments in Geant4 // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2016. V. 835. P. 186–225.

Amelin N.S., Armesto N., et al. 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.

Filges D., Goldenbaum F. Handbook of Spallation Research. WILEY–VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.

Garny S., Leuthold G., et al. GEANT4 transport calculations for neutrons and photons below 15 MeV // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2009. V. 56. I. 4. P. 2392–2396.

Heikkinen A., Stepanov N., Wellisch J.P. Bertini intra-nuclear cascade implementation in Geant4 // Computing in High Energy and Nuclear Physics (ePrint nucl-th/0306008). 2003. P. 1–7.

Picone J.M., Hedin A.E., et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. A. 12. P. 1468.