

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 524.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ 27-ДНЕВНЫХ ВАРИАЦИЙ ГКЛ

© 2020 г. Н. Г. Галикян^а, *, А. Г. Майоров^а, Р. Ф. Юлбарисов^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Каширское ш. 31, Москва, 115409 Россия

*E-mail: norayrgalikyana@gmail.com

Поступила в редакцию 04.03.2021 г.

После доработки 11.05.2021 г.

Принята к публикации 12.05.2021 г.

Работа посвящена воспроизведению 27-дневных вариаций потока галактических космических лучей (ГКЛ), наблюдавшихся в эксперименте PAMELA, при помощи моделирования распространения ГКЛ в гелиосфере. Построена карта электромагнитного поля в межпланетном пространстве в соответствии с моделью Паркера и экспериментальными измерениями, сделанными космическим аппаратом ACE. Создан алгоритм, который численно решает уравнение движения космических лучей в этом поле и восстанавливает их траекторию. Генерируются заряженные частицы на границе гелиосферы и осуществляется их трассировка с использованием разработанного алгоритма. Начальные характеристики частиц таковы, что формируется их изотропное и однородное распределение. В результате расчетов получены временные зависимости потока космических лучей для энергии 1 ГэВ в околоземном пространстве.

Ключевые слова: гелиосфера, электромагнитное поле в гелиосфере, гелиосферный токовый слой, галактические космические лучи, 27-дневные вариации, солнечная модуляция, моделирование вариаций

DOI: 10.1134/S2079562920060214

ВВЕДЕНИЕ

С конца 30-х годов прошлого века с помощью измерений ионизационных камер наблюдались вариации потоков галактических космических лучей (ГКЛ) с периодом 27-дней [1]. Существование этих вариаций было подтверждено в 60-х годах прошлого века прямыми измерениями в космосе [2].

По современным представлениям вариации ГКЛ возникают при взаимодействии космических лучей с так называемыми коротящими областями взаимодействия (КОВ) в гелиосфере [3]. КОВ возникают вследствие столкновения быстрого солнечного ветра с медленным. В результате в них наблюдаются повышенные значения напряженности межпланетного магнитного поля и плотности солнечной плазмы. Медленный солнечный ветер постоянно истекает в межпланетное пространство и заполняет гелиосферу. Быстрый солнечный ветер испускается из корональных дыр, которые представляют собой области на Солнце, с незамкнутыми силовыми линиями магнитного поля. Из таких областей солнечная плазма истекает с большей скоростью. КОВ возникают, когда корональные дыры являются достаточно стабильными, чтобы существовать в течение нескольких оборотов Солнца. Они вращаются вместе с Солнцем, приобретая форму спирали Паркера.

За время работы спектрометра PAMELA на околоземной орбите обнаружены несколько эпизодов

возникновения 27-дневных вариаций потоков ГКЛ [4]. В частности, такие вариации наблюдались в период 2007–2008 гг. Цель работы заключается в воспроизведении амплитуды вариаций в потоке протонов.

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ КЛ В ГЕЛИОСФЕРЕ

Численное решение уравнения движения в ЭМ поле

Для решения уравнения движения КЛ при распространении через гелиосферу используется численный метод расчета траекторий частиц в ЭМ поле. Расчет проводится по методу частица–в–ячейке по схеме Бунемана–Бориса [5].

Определение ЭМ поля в гелиосфере

Для задания ЭМ поля использовалась модифицированная модель Паркера в солнечно-магнитной системе координат [6]. В рамках этой модели векторы индукции магнитного поля **B** и напряженности электрического поля **E** имеют вид:

$$\mathbf{B} = AB_0 \frac{r_0^2}{r^2} \left(\mathbf{e}_r - \frac{\Omega(r - r_s)}{v} \sin\theta \cdot \mathbf{e}_\varphi \right) H(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

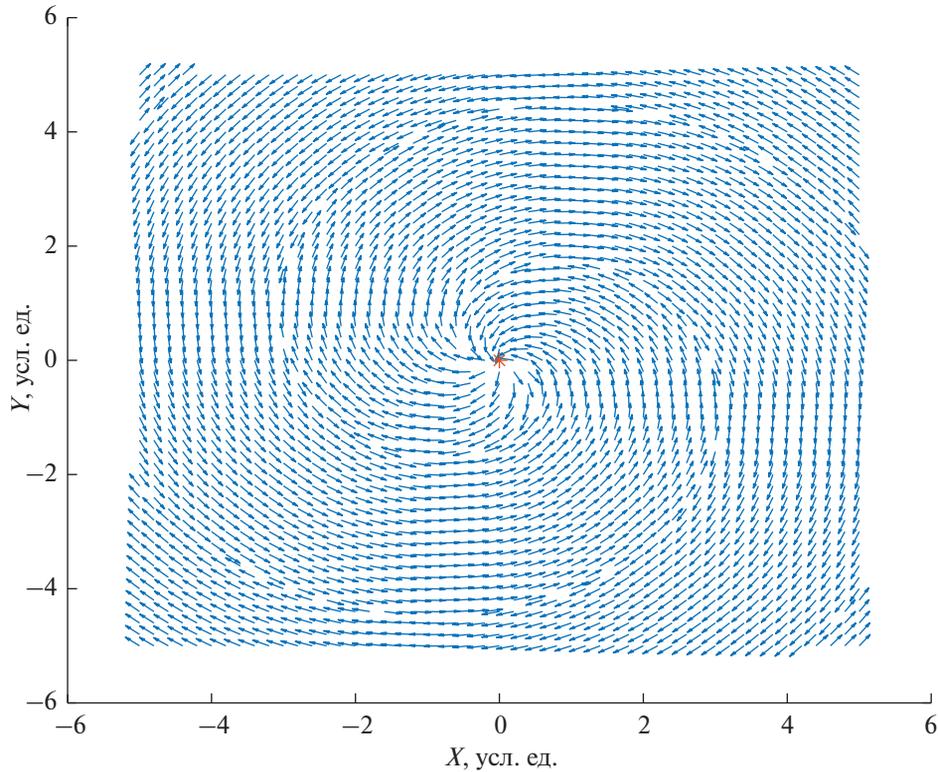


Рис. 1. Векторная карта индукции магнитного поля в плоскости магнитного экватора $z = 0$.

$$\mathbf{E} = \mp AB_0 \frac{r_0^2 \Omega (r - r_s)}{r^4} \times \frac{\delta y}{\delta x} \times (xze_x + yze_y - (x^2 + y^2)e_z) H(\mathbf{r}, t), \quad (2)$$

где Ω – сидерическая угловая скорость вращения Солнца; v – радиальная компонента скорости солнечного ветра; r_s – радиус поверхности источника; r_0 – радиус, где наибольшее значение радиальной компоненты невозмущенного магнитного поля равно B_0 ; A – полярность солнечного магнитного поля; $H(\mathbf{r}, t)$ – функция, которая задает гелиосферный токовый слой (формулы (3) и (4) в работе [6]). Таким образом строится трехмерная модель ЭМ поля в гелиосфере. На рис. 1, 2 представлены векторные карты линий индукции магнитного поля в плоскости магнитного экватора и напряженности электрического поля в плоскости $y = 0$ соответственно.

Определение коротирующих областей в гелиосфере

Для введения в модель КОВ использовались данные космического аппарата ACE, взятые из базы данных OMNI [7]. На рис. 3 представлены временные измерения радиальной компоненты индукции межпланетного магнитного поля. С периодом ~27 дней в них наблюдаются два периодически повторяющиеся выброса (обведены эллип-

сом), которые соответствуют измерениям поля внутри КОВ. Эти измерения отражают пространственное распределение поля на орбите Земли. Для задания аналитического описания КОВ предполагается, что скорость ветра в них постоянна, толщина и высота равны.

Для задания формы и местоположения КОВ необходимо найти аналитическое выражение для силовых линий магнитного поля. Для этого необходимо, используя формулу (1), решить уравнение:

$$\frac{dr}{B_r} = \frac{rd\varphi}{B_\varphi}, \quad (3)$$

где B_r и B_φ – радиальная и азимутальная компоненты вектора \mathbf{B} соответственно. Результатом решения (3) является уравнение силовой линии:

$$\varphi(r) = -\frac{\Omega \sin \theta}{v_{cir}} \left(r - r_s \left(1 + \ln \frac{r}{r_s} \right) \right) + \varphi_s, \quad (4)$$

где v_{cir} – скорость солнечного ветра в коротирующей области, $\varphi_s = \varphi(r_s)$. На рис. 4 показана векторная карта индукции магнитного поля в КОВ в плоскости $z = 0$.

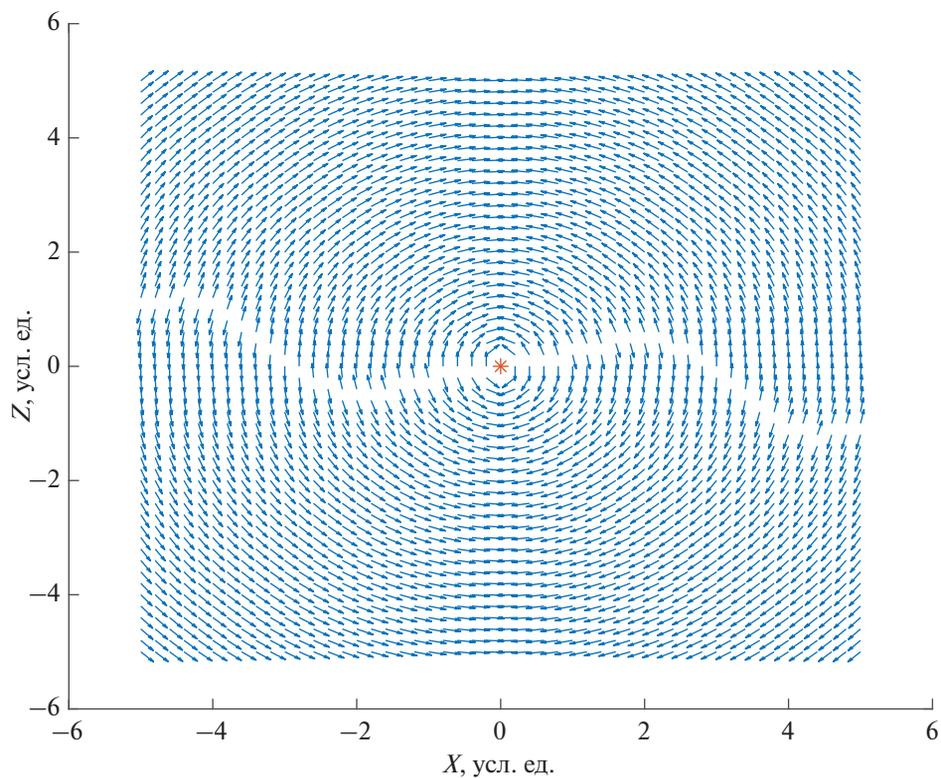


Рис. 2. Векторная карта напряженности электрического поля в плоскости $y = 0$.

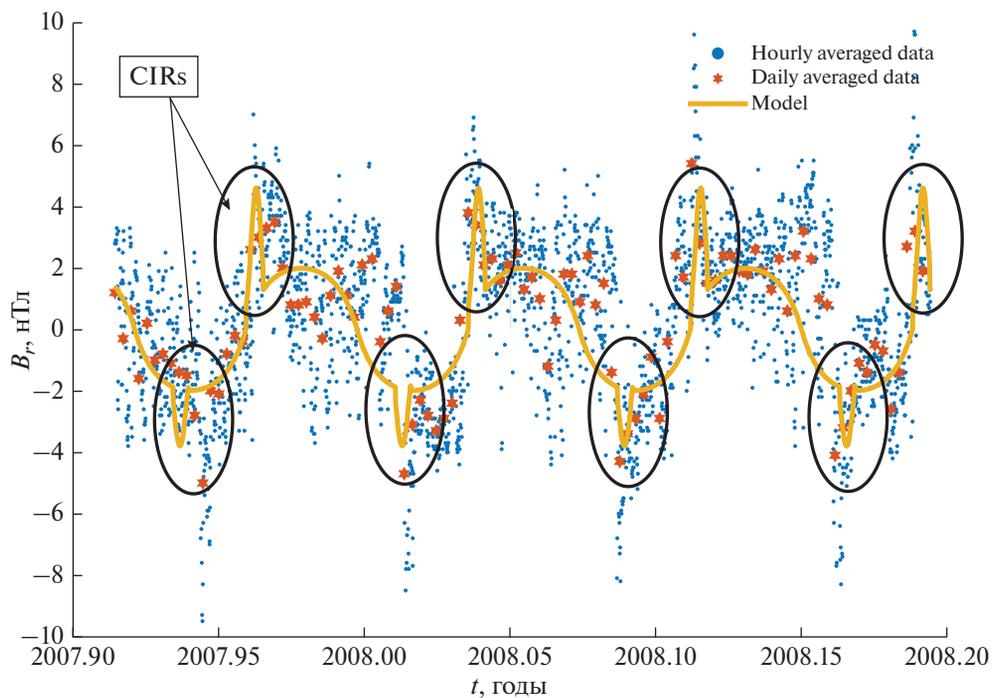


Рис. 3. Временная динамика радиальной компоненты магнитного поля в околоземном пространстве. Сплошной линией изображено значение магнитного поля, получаемое в модели, точками изображены измерения АСЕ, усредненные за час, звездочками изображены измерения АСЕ, усредненные за день, овалами отмечены значения магнитного поля внутри КОВ.

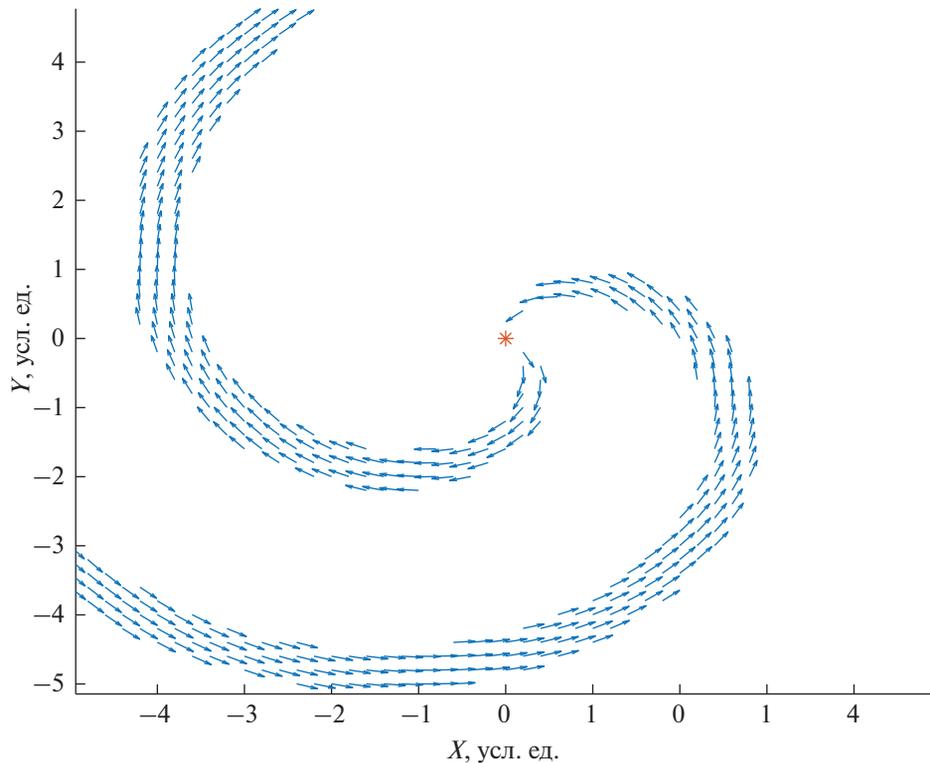


Рис. 4. Векторная карта индукции магнитного поля в КОВ в плоскости $z = 0$.

МОДЕЛИРОВАНИЕ 27-ДНЕВНЫХ ВАРИАЦИЙ ПОТОКОВ ГКЛ

Для моделирования влияния КОВ на прохождение галактических протонов через возмущенную гелиосферу разыгрывался однородный и изотропный поток протонов с энергией 1 ГэВ на расстоянии 100 а.е. от Солнца. Производился расчет траекторий разогранных протонов в гелиосфере, для дальнейшего анализа рассматривались только частицы, которые смогли достичь 1 а.е. в плоскости эклиптики. Полученная выборка случайным образом разделена на четыре независимые подвыборки, каждая из которых ассоциируется с одним периодом обращения Солнца. Для них построены распределения количества частиц по азимутальному углу (или времени), которые расположены одно за другим. Общая длина (продолжительность) составляет 1440 градусов (108 дней) (рис. 5).

Для определения амплитуды вариаций потока протонов к полученному временному ряду применено непрерывное вейвлет-преобразование с материнской функцией Морсе. На рис. 6 приведена полученная скалограмма, где по горизонтальной оси отложено время, по вертикальной — период в днях, оттенками серого показана амплитуда вариаций в процентах.

Процедура разбиения на четыре подвыборки с последующим их объединением и вейвлет-преобразованием повторялась многократно. Распреде-

ление полученных относительных амплитуд, соответствующих вариациям с периодом 27 дней, изображено на рис. 7. Характеристики распределения соответствуют найденной амплитуде вариаций $7.8 \pm 0.7\%$.

Также предсказываются вариации с периодом 14 дней. Оценка относительной амплитуды на основании рис. 6 дает значение $5.9 \pm 1.7\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описан способ воспроизведения амплитуды 27-дневных вариаций потока ГКЛ, наблюдавшихся в эксперименте ПАМЕЛА в период 2007–2008 гг. Для этого построена модель электромагнитного поля в гелиосфере с характеристиками, соответствующими наблюдением миссии АСЕ в рассматриваемое время. С помощью численного алгоритма, восстанавливающего траекторию заряженных частиц в ЭМ поле, проведено моделирование распространения протонов КЛ от границы гелиосферы до орбиты Земли. Получено азимутальное распределение частиц на 1 а.е., которое соответствует временной динамике измерений потока ГКЛ на Земле. К этому распределению применено вейвлет-преобразование.

Воспроизведен эффект 27-дневных вариаций для протонов с энергией 1 ГэВ с относительной амплитудой:

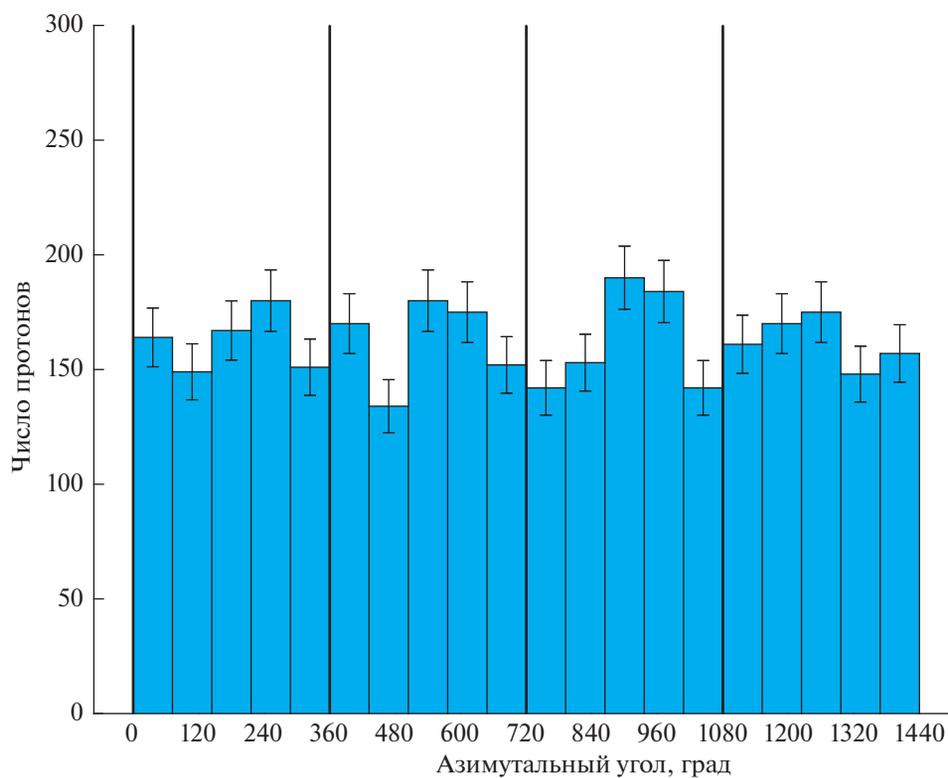


Рис. 5. Азимутальное распределение протонов в плоскости эклиптики, которая соответствует временному ряду с длительностью 108 дня для наблюдателя с Земли.

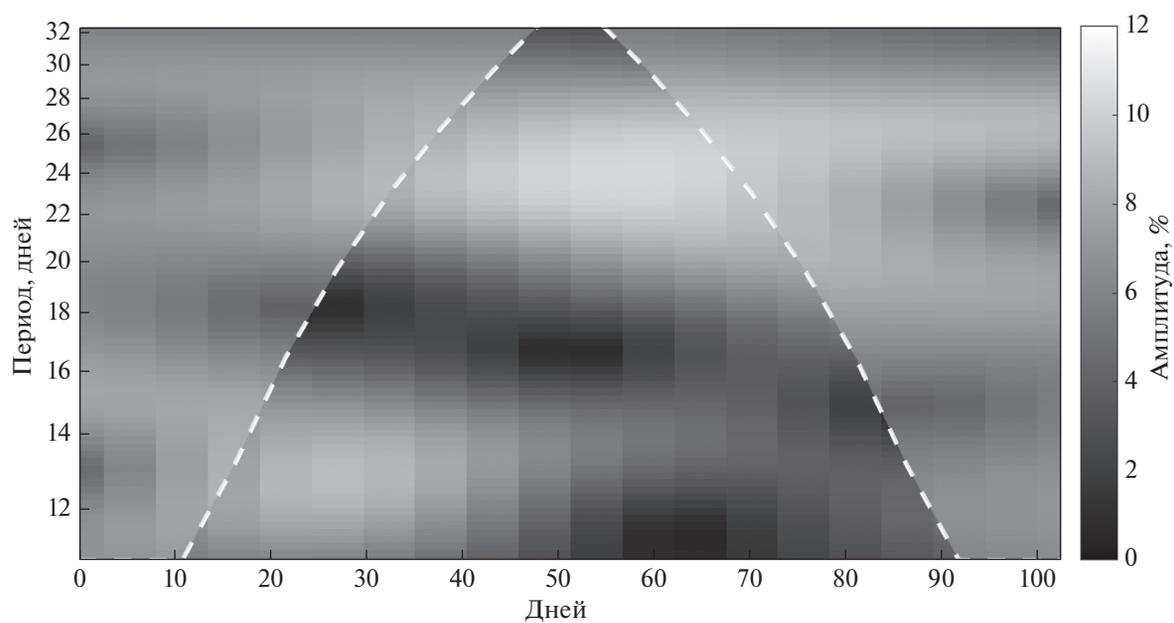


Рис. 6. Скалограмма вейвлет-преобразования распределения на рис. 5. По горизонтальной оси на скалограмме отложено время, по вертикальной — период в днях, оттенками серого показана амплитуда вариаций в процентах.

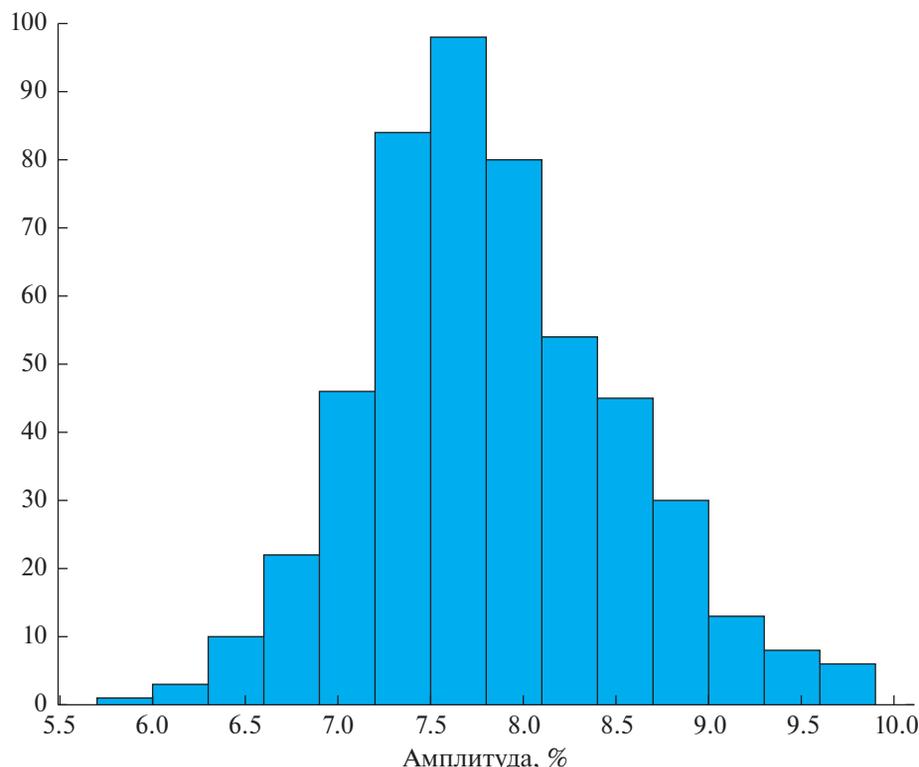


Рис. 7. Гистограмма распределения относительной амплитуды 27-дневных вариаций.

$$A_{27} = 7.8 \pm 0.7\%.$$

Предсказывается существование вариаций с периодом 14 дней. Оценка его относительной амплитуды дает значение:

$$A_{14} = 5.9 \pm 1.7\%.$$

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект “Фундаментальные проблемы космических лучей и темная материя” № 0723-2020-0040) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00582).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Forbush S.E.* // Terr. Magn. Atmos. Electr. 1938. V. 43. No. 3. P. 203.
2. *Bryant D.A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1963. V. 11. P. 144.
3. *Richardson I.G.* // Living Rev. Sol. Phy. 2018. V. 15. P. 1.
4. *Modzelewska R. et al.* // Astrophys. J. 2020. V. 904 P. 3.
5. *Голубков В.С., Майоров А.Г.* // Известия российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. С. 512-514.
<https://doi.org/10.31857/S0367676521040128>
6. *Pei C. et al.* // Astrophys. J. 2012. V. 744. P. 170.
7. *King J.H., Papitashvili N.E.* // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. A02104.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010649>.

Simulation of the 27-Day Variations of GCR

N. G. Galikyan¹, *, A. G. Mayorov¹, and R. F. Yulbarisov¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye sh. 31, Moscow, 115409 Russia

*e-mail: noraygalikyan@gmail.com

Received March 4, 2021; revised May 11, 2021; accepted May 12, 2021

The work is devoted to reproduction of the 27-day variations of the galactic cosmic rays (GCR) flux, observed in the PAMELA experiment, by simulating the propagation of GCR in the heliosphere. The map of the interplanetary electromagnetic field has been constructed in accordance with the Parker model and measurements of the ACE spacecraft. We have created an algorithm, which numerically solves the motion equation of cosmic rays in that field and reconstructs their trajectory. Charged particles are generated on the edge of

the heliosphere, then the particles are traced with help of the numerical algorithm. The initial characteristics of the particles correspond to the uniform and isotropic distribution. As a result of calculations we have obtained the time dependencies of the GCR flux in the near-Earth space for energy 1 GeV.

Keywords: heliosphere, heliospheric electromagnetic field, heliospheric current sheet, galactic cosmic rays, 27-day variations, solar modulation, simulation of variations