

Физика космических лучей

Редактор тематического выпуска
доктор физ.-мат наук **А. Д. Панов**

УДК 524.1-52

ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ, ЗАДАННОМ МОДЕЛЯМИ IGRF И CHAOS

© 2024 г. С. А. Прошин¹*, В. С. Голубков¹, А. Г. Майоров¹, В. В. Малахов¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ”, Москва, Россия

*E-mail: sergey.proshin.97@mail.ru

Поступила в редакцию 24.05.2023

После доработки 15.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Выполнено моделирование движения частиц галактических космических лучей в магнитосфере Земли, заданном моделями магнитного поля IGRF и CHAOS, при этом во второй из них дополнительно есть литосферная компонента поля, отсутствующая в первой модели. Получены спектры мощности потока галактических космических лучей на фиксированной высоте над поверхностью Земли и обнаружено их различие при больших порядках мультипольного разложения, $l > 7$. При $l > 20$ результат можно объяснить вкладом литосферной компоненты магнитного поля в модели CHAOS по сравнению с IGRF, а при $l \leq 20$ — различием в точности описания главного поля, поскольку IGRF ограничена 13-м порядком разложения.

DOI: 10.31857/S0367676524030202, EDN: QLBLFR

ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты в области физики космических лучей предоставляют важные сведения для исследования многих астрофизических объектов во Вселенной, однако большинство из них проводится на поверхности Земли или на околоземных орбитах, т.е. внутри магнитосферы планеты. Здесь траектории заряженных частиц отклоняются магнитным полем, и в области низких энергий отклонение оказывается значительным, что сказывается на характеристиках измеряемого потока космических частиц. Этот эффект необходимо аккуратно учитывать при анализе экспериментальных данных.

Для описания магнитного поля Земли (МПЗ) в области магнитосферы разработаны разные эмпирические модели. При этом в задачах физики космических лучей [1, 2] область внутренней магнитосферы почти всегда задается моделью IGRF [3], которая имеет определенное пространственное разрешение и описывает только одну компоненту МПЗ — главное поле. В некоторых моделях можно получить более детальное описание этой компоненты или учесть разные составляющие магнитного поля планеты. В данной работе рассматривается влияние литосферной компоненты МПЗ на траектории частиц космических лучей в магнитосфере, и в качестве альтернативы модели IGRF рассматривается модель CHAOS,

где компоненты главного и литосферного полей определяются независимо [4].

В работе демонстрируется различие спектров мощности вариаций потока галактических космических лучей (ГКЛ), проникающих внутрь магнитосферы, полученных при выборе моделей IGRF (мультипольное разложение главного поля до 13-го порядка) и CHAOS (главное поле до 20-го порядка + литосферное до 110).

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для анализа распространения космических лучей в магнитосфере выполнены расчеты их траекторий в выбранных моделях МПЗ с помощью численного решения уравнения движения частиц в электромагнитных полях. Решение основано на использовании схемы “частица в ячейке” с реализацией метода Бунемана—Бориса [5], который обеспечивает сравнительно небольшое время вычисления при приемлемой точности [6].

УГЛОВЫЕ СПЕКТРЫ МОЩНОСТИ ГКЛ

Проведена трассировка частиц ГКЛ с изотропным распределением за условными пределами магнитосферы (на расстоянии 15 радиусов Земли R_E от центра Земли) и с известным энергетическим спектром [7]. Граничные условия, при которых трассировка прекращается: $R_{\min} = R_E$, $R_{\max} = 20R_E$,

где R — расстояние частицы до центра планеты. Первое условие соответствует попаданию частицы в атмосферу Земли, а второе — вылету в межпланетное пространство.

Спектр мощности строится исходя из распределения вероятности $g(p)$ пересечения частиц области p сферы с центром, совпадающим с центром Земли, на некоторой высоте над поверхностью планеты. С одной стороны, $g(p)$ по определению:

$$\overline{g(p)} = \frac{N(p)}{N_{all}} \frac{N_{pix}}{4\pi},$$

где $N(p)$ — количество частиц, пересекающих данную сферу в области p ; N_{pix} — количество пикселей, на которые разбита карта; N_{all} — общее количество частиц, упавшее на данную сферу; p — порядковый номер пикселя из схемы пикселизации HEALPix [8].

С другой стороны, из разложения на дискретные сферические функции $g(p)$ приобретает вид

$$g(p) = \sum_{l=0}^{l_{max}} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(p),$$

где a_{lm} — комплексные коэффициенты разложения; Y_{lm} — комплексные дискретные сферические функции a_{lm} . Коэффициенты разложения вычисляются следующим образом:

$$a_{lm} = \frac{4\pi}{N_{pix}} \sum_{p=0}^{N_{pix}-1} Y_{lm}^*(p) g(p).$$

Спектр мощности представляет собой зависимость величины C_l от порядка разложения l :

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l |a_{lm}|^2.$$

Погрешность C_l вычисляется как погрешность сложной функции $C_l(a_{lm}(g(p)))$. Погрешность $g(p)$, в свою очередь, определяется как

$$\Delta g(p) = \sigma_{g(p)}^{stat} + \sigma_{g(p)}^{transf} + \sigma_{g(p)}^{trace},$$

что является верхней оценкой для данной величины. Здесь $\sigma_{g(p)}^{stat} = \frac{N_{pix}}{4\pi} \sqrt{N(p) \frac{(N_{all} - N(p))}{N_{all}^3}}$;

$\sigma_{g(p)}^{transf}$ определяется как разница значений $g(p)$ до преобразования и после преобразования вида $f^{-1}(f(g(p)))$, где f — функция преобразования карты $g(p)$ в набор коэффициентов a_{lm} [9]; $\sigma_{g(p)}^{trace}$ определяется как разница карт $g(p)$, полученных при трассировке с шагом $\Delta t = 5 \times 10^{-5}$ с и 2.5×10^{-5} с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате выполненного моделирования получены распределения $g(p)$ для моделей магнитного поля магнитосферы IGRF и CHAOS. На рис. 1 приведено такое распределение для модели IGRF. Для обеих моделей получены угловые спектры мощности для частиц в энергетическом диапазоне от 1 до 50 ГэВ, показанные на рис. 2. Первые три порядка разложения согласуются между собой для обеих моделей в пределах погрешности.

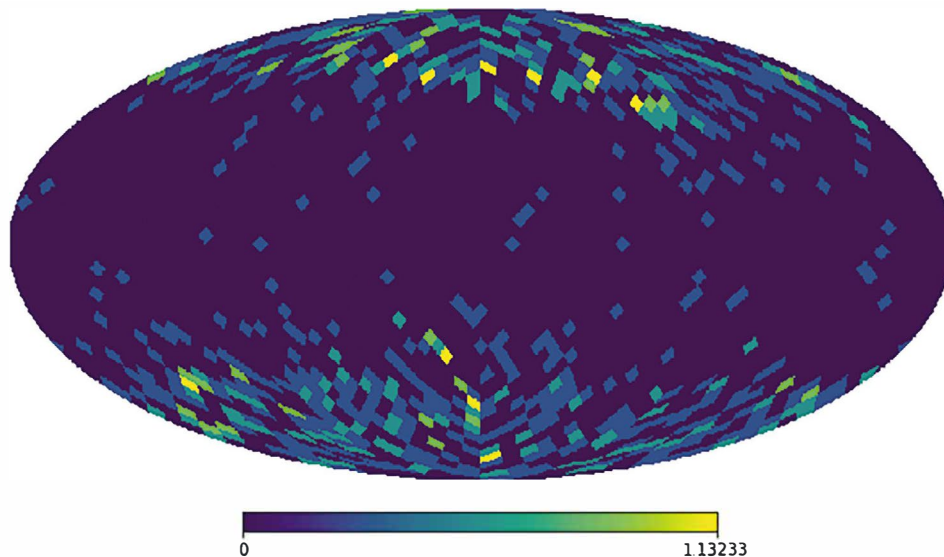


Рис. 1. Карта значений $g(p)$ для модели поля IGRF на высоте 350 км при количестве пикселей на карте, равном 2700. Учитывались частицы всех энергий.

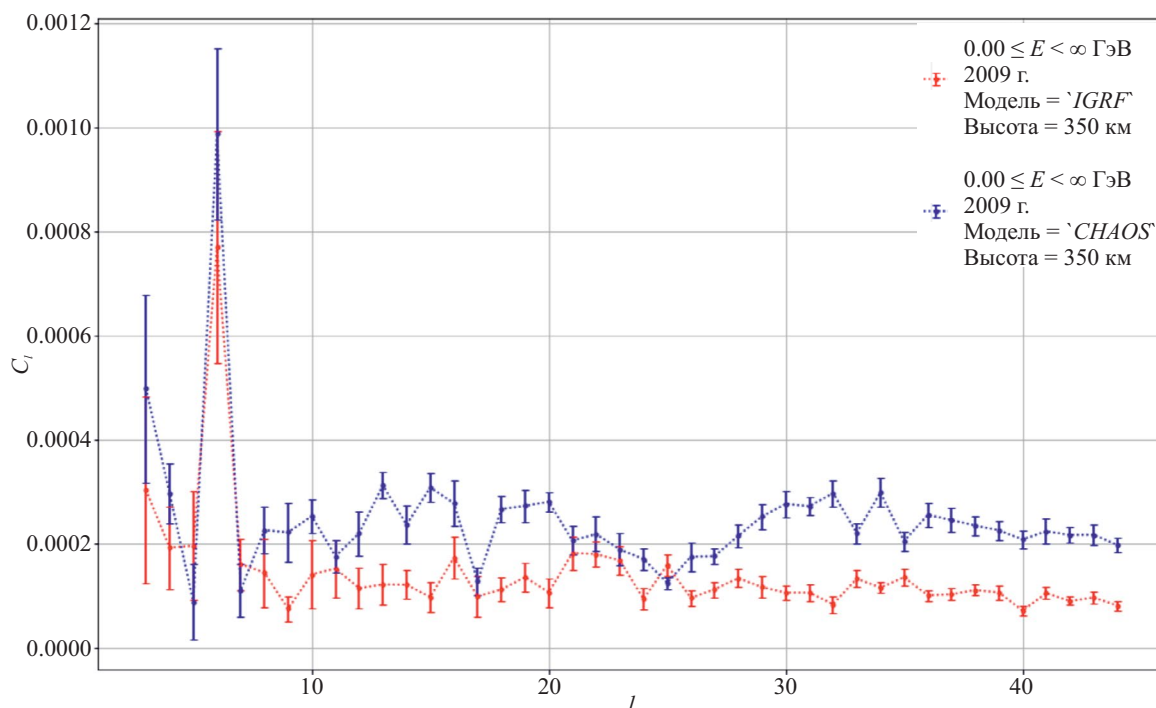


Рис. 2. Угловой спектр мощности для частиц всех энергий.

Как видно на рисунке, угловой спектр на высоких мультиполях ($l > 7$) для модели CHAOS в основном превышает угловой спектр IGRF. Это означает, что различие между моделями сказывается на траекториях частиц на малых масштабах (30° или 3500 км для измерений на высоте 350 км). Эти масштабы соответствуют частицам с энергиями от 1 ГэВ до 3—4 десятков ГэВ. Такой результат можно было ожидать, поскольку учет литосферного поля и главного поля высоких порядков мультипольного разложения в модели CHAOS приводит к учету мелкомасштабных структур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенного исследования можно сделать вывод, что на больших гармониках и, следовательно, на мелких масштабах возникает заметное различие между траекториями частиц, движущихся в магнитном поле Земли с учетом литосферного поля и без. Это обстоятельство влияет на корректность определения природы регистрируемых частиц, выполняемого методом восстановления траекторий, и его необходимо учитывать при анализе экспериментальных данных, полученных приборами внутри магнитосферы Земли, особенно близко к поверхности планеты.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-72-10161, <https://rscf.ru/project/19-72-10161/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шутенко В.В., Астапов И.И., Барбашина Н.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 213; Shutenko V.V., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 2. P. 194.
2. Белов С.М., Зобнин Г.И., Янке В.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 11. С. 1637; Belov S.M., Zobnin G.I., Yanke V.G. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 11. P. 1297.
3. Alken P., Thebault E., Beggan C.D. et al. // Earth. Planets Space. 2021. V. 73. Art. No. 49.
4. Finlay C.C., Kloss C., Olsen N. et al. // Earth. Planets Space. 2020. V. 72. Art. No. 156.
5. Голубков В.С., Майоров А.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 4. С. 512; Golubkov V.S., Mayorov A.G. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 383.
6. Mao H., Richard W. // Proc. 42nd AIAA Plasma Dynam. Lasers Conf. (Honolulu, 2011). Art. No. 3739.
7. Aguilar M. et al. (AMS Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 127. No. 2. Art. No. 159901.
8. Gorski K.M., Hivon E., Banday A.J. et al. // arXiv: astro-ph/0409513v1. 2004.
9. <https://healpy.readthedocs.io/en/latest/generated/healpy.sphtfunc.map2alm.html#healpy.sphtfunc.map2alm>.

Cosmic ray particles propagation in the Earth's magnetic field defined with IGRF and CHAOS models

S. A. Proshin¹, *, V. S. Golubkov¹, A. G. Mayorov¹, V. V. Malakhov¹

¹*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: sergey.proshin.97@mail.ru*

We simulated the galactic cosmic rays particles propagation in the Earth's magnetosphere, given by the IGRF and CHAOS magnetic field models, while the second of them additionally has a lithospheric field component that is absent in the first model. The power spectra of the flux of galactic cosmic rays at a fixed height above the Earth's surface are obtained and their difference is found for large orders of the multipole expansion, $l > 7$. For $l > 20$, the result can be explained by the contribution of the lithospheric component of the magnetic field in the CHAOS model compared to IGRF, and for $l \leq 20$, the difference in the accuracy of the description of the main field, since IGRF is limited to the 13th order of expansion.