

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2024 г. П. А. Кручинин¹, *, В. В. Малахов¹, В. С. Голубков¹, А. Г. Майоров¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт»,
Москва, Россия

*E-mail: kruchinin_01@inbox.ru

Поступила в редакцию 24.05.2023

После доработки 16.10.2023

Принята к публикации 31.10.2023

Представлен метод определения жесткости геомагнитного обрезания, основанный на трассировке заряженных частиц в магнитном поле Земли по схеме частица-в-ячейке, реализованной в методе Бунемана–Бориса. Приведены результаты проверки метода, сравнение с теоретическими расчетами в поле идеального диполя и существующими расчетами в реальном поле. Разработанный метод показал высокую надежность при воспроизведении ожидаемых эффектов. В дипольном приближении метод показал высокую точность при сравнении с теоретическими значениями, воспроизведена картина полутени геомагнитного обрезания.

DOI: 10.31857/S0367676524020309, EDN: RPSEBE

ВВЕДЕНИЕ

Значение жесткости геомагнитного обрезания (далее ЖГО) используют для описания экранирующего эффекта геомагнитного поля [1]. В частности, оно оказывается важно при изучении космических лучей, т.к. влияет на угловое и энергетическое распределение потоков галактических и солнечных космических лучей в каждой точке [2,3].

Основным методом определения ЖГО является моделирование траектории движения заряженных частиц в магнитном поле Земли (трейсинг), которое может выполняться как упрощенно в дипольном приближении, так и с использованием эмпирических моделей разной степени сложности.

Классическими работами по расчетам ЖГО являются работы Смарта и Ши [4–6]. Для построения траекторий они решали уравнение движения методом Рунге–Кутта 4-го порядка, который является наиболее распространенным методом при трейсинге в магнитном поле. На сегодняшний момент появились новые более точные методы трейсинга в электромагнитных полях, повышена точность моделей магнитного поля Земли, а также существенно выросли вычислительные мощности, доступные исследователям.

В данной работе для трассировки частиц использовался алгоритм, основанный на схеме частица-в-ячейке, реализованной в методе

Бунемана–Бориса [7]. Данный метод, в отличие от методов Рунге–Кутта, дает возможность решать уравнения движения в магнитном поле с сохранением кинетической энергии частицы, благодаря чему, оказывается более точным и быстрым [8,9].

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для расчета ЖГО частицы заданной энергии в выбранной точке пространства и направления используется обратный трейсинг. Его суть состоит в замене направления частицы на противоположное, а самой частицы — на свою античастицу со сменой знака заряда. Восстановленная траектория соответствует траектории частицы, которая достигла бы выбранной точки под выбранным направлением. Полученные в моделировании траектории разделяются на два типа: разрешенные и запрещенные. Разрешенная траектория (например, для частиц галактического происхождения) выйдет за пределы влияния магнитного поля Земли. Запрещенная будет оставаться в окрестности Земли или пересечет ее поверхность (границу атмосферы). При последовательном варьировании жесткости трассируемой частицы определяется момент, когда тип восстановленной траектории меняется с разрешенной на запрещенную. Полученная таким образом жесткость будет наиболее точной оценкой истинной ЖГО. Точность результата увеличивается с уменьшением шага по жесткости.

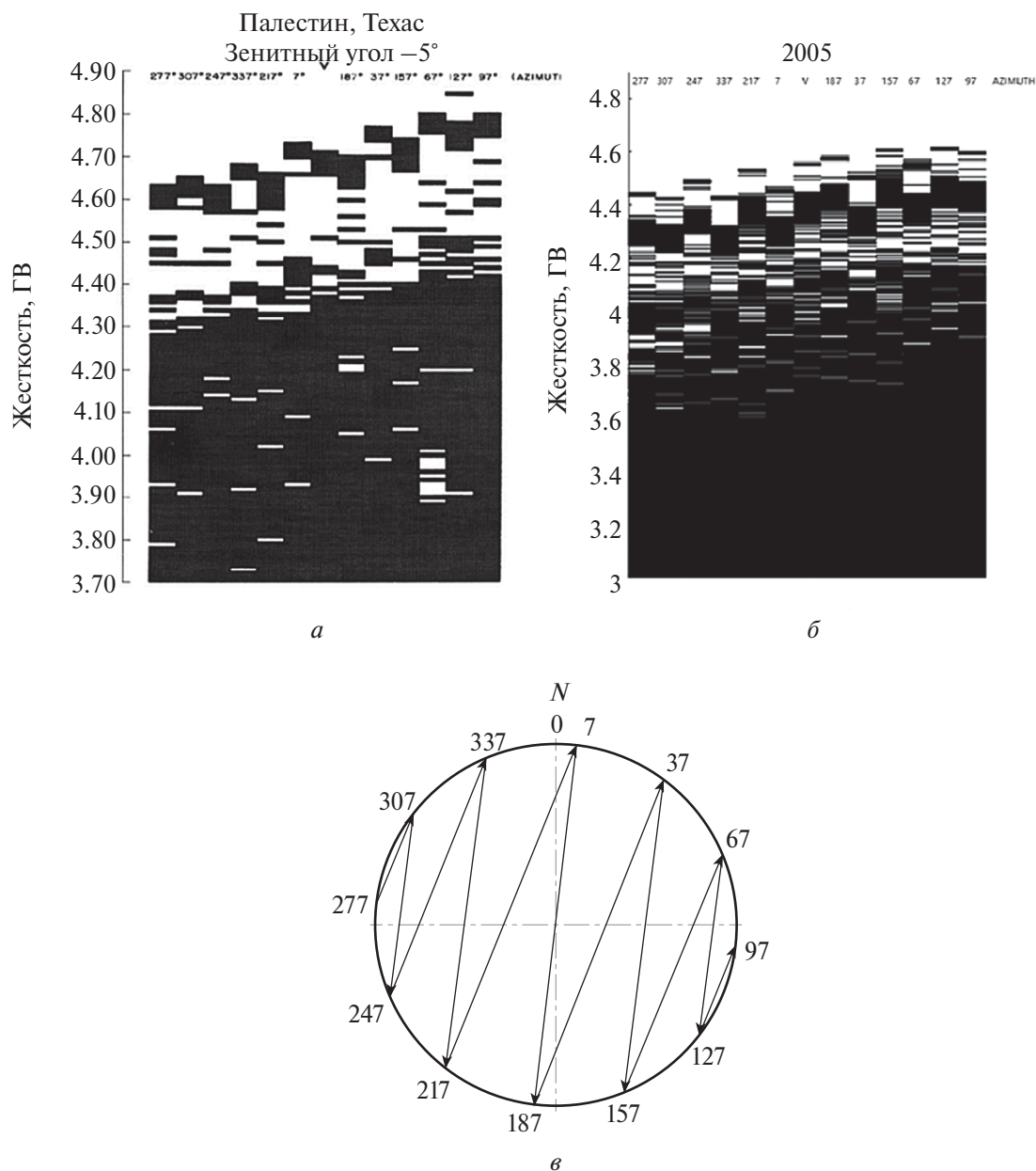


Рис. 1. Иллюстрация Смарта и Ши полутени жесткости геомагнитного обрезания (а), иллюстрация полутени геомагнитного обрезания в модели IGRF-13 (b), изображение направления обхода по азимутальным углам, показывающее расположение столбцов на рис. 1а и 1b (с). Отсчет начинается с азимутального угла $\xi = 277^\circ$. От этого значения на окружности идут стрелки, показывающие дальнейшие значения азимутальных углов и расположение столбцов на оси абсцисс и соответствующее им расположение столбцов на оси абсцисс. Данное расположение соответствует направлению запад–восток.

Для определения типа траектории разработаны следующие условия остановки обратного трейсинга. Если за время трассировки ($t = 100$ с) частица не покидает магнитосферу (условно выбрана в $30 RE$ (радиусов Земли)) или достигает поверхности Земли, то она считается вторичной (захваченной или альбедной, соответственно). В противном случае частица считается галактической.

В данной работе магнитное поле Земли задавалось двумя способами:

1) В форме идеального магнитного диполя, со значением магнитного момента Земли, рассчитанного на условно выбранную дату 01.01.2000, на основании коэффициентов модели IGRF-13 [10]. В этом случае значение ЖГО подбиралось методом последовательных приближений.

Таблица 1. Сравнение результатов ЖГО с теоретическими значениями для идеального диполя:

Широта, λ	Наименьшее относительное отклонение, %	Наибольшее относительное отклонение, %	Среднее относительное отклонение, %	Среднее абсолютное отклонение, МВ
0	0.03	1.19	0.22	1.5
20	0.04	0.97	0.23	1.1
45	0.15	4.44	1.70	2.5
70	27	44	39	2.2

2) При помощи модели IGRF-13. В качестве начального значения жесткости частицы выбирается значение, рассчитанное по формуле Штёрмера. Диапазон жесткостей в районе предполагаемой области полутени проходит с одинаковым шагом для точного восстановления череды запрещенных и разрешенных траекторий (характерная картина «штрих-кода»; рис. 1 в [4]).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные, полученные с использованием дипольного поля, сравнивались с теоретическими, полученными по формуле Штёрмера. Для каждой из широт частица запускалась со следующими начальными данными: расстояние от центра диполя $R = 5 RE$ (данное значение выбрано для иллюстрации); значение азимутального угла $\xi \in [0; 360]$; значение зенитного угла $\epsilon \in [0; 90]$.

Для экваториальных и умеренных широт относительная ошибка метода составляет 2%, а абсолютная – 2 МВ, что показывает высокую точность. Для высоких широт относительная ошибка возрастает до 40% при $\lambda = 70^\circ$. Это связано с тем, что значение ЖГО в этой области становится равным порядку абсолютной ошибки метода, что заметно ниже пороговой энергии частиц ГКЛ. Поэтому с точки зрения практического использования большое несовпадение в этой области не критично.

При расчетах в реальном поле воспроизведено распределение запрещенных и разрешенных областей, полученное в работе Смарт и Ши [4]. Как и в указанной работе, расчет выполняли для точки на высоте 400 км с географическими координатами города Палестин (США) за 2005 год. Зенитный угол, под которым частица достигает заданной точки, $\epsilon = 5$. На рис. 1а и 1б показаны «штрих-коды»: полученный Смартом и Ши и при помощи описанного метода, соответственно. Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1) ЖГО увеличивается в направлении запад-восток в геомагнитных координатах.

2) Между запрещенными (черными) и разрешенными (белыми) областями можно выделить

две полосы: одна с повышенной плотностью запрещенных полос (верхняя часть границы), вторая – разрешенных (нижняя часть границы). Физический смысл такой границы является предметом будущих исследований.

Таким образом, была восстановлена типичная картина полутени геомагнитного обрезания. Показаны те же особенности, которые получили в своей работе Смарт и Ши. Отметим, что различия по абсолютному значению жесткости между полученными данными и результатами Смарт и Ши составляют 0.1–0.2 ГВ. Это может быть связано с разными методами трейсинга, с разными версиями IGRF или разными алгоритмами трейсинга, используемыми при моделировании траекторий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, создана методика определения жесткости геомагнитного обрезания. При помощи карты относительных ошибок жесткостей обрезания показано, что относительная ошибка метода для низких широт составляет не более одного процента, что позволяет применять метод к реальному полю. Выполнена проверка алгоритма трассировки частиц, основанная на схеме частица-в-ячейке, реализованная в методе Бунемана–Бориса. Метод применен к реальному полю. Построены графики зависимости жесткости от азимутального угла, под которым частица достигает заданной точки (рис. 1). Выделены основные особенности, по которым проводилась проверка метода. Получено совпадение с результатом Смарт и Ши с точностью 0.1–0.2 ГВ. Разработанный метод показал высокую надежность при воспроизведении ожидаемых результатов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилова О.А., Демина И.М., Птицына Н.Г., Тясто М.И. // Геомагн. и аэроном. 2019. Т. 59. № 2. С. 160; Danilova O.A., Demina I.M., Ptitsyna N.G.,

- Tyasto M.I.* // Geomagn. Aeronomy. 2019. V. 59. No. 2. P. 147.
2. *Малахов В.В., Майоров А.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 4. С. 515; *Malakhov V.V., Mayorov A.G.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 386.
3. *Голуб О.А., Майоров А.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 4. С. 475; *Golub O.A., Mayorov A.G.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 350.
4. *Smart D.F., Shea M.A.* // Adv. Space Res. J. 2005. V. 36. P. 2012.
5. *Smart D.F., Shea M.A.* // Adv. Space Res. J. 1994. V. 14. No. 10. P. 787.
6. *Smart D.F., Shea M.A.* // Adv. Space Res. J. 2009. V. 44. P. 1107.
7. *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.
8. *Boris J.P.* // Technical Report MATT-152. Princeton: Princeton Univ., 1970.
9. *Boris J.P.* // Proc. Conf. Numerical Simulation of Plasmas (Washington, 1971). P. 3.
10. *Alken P., Thébault E. et al.* // Earth Planets. Space J. 2021. V. 43. P. 49.

Determination of the rigidity of the geomagnetic cutoff and simulation of the motion of particles in the Earth's magnetosphere

P. A. Kruchinin^{1, *}, V. V. Malakhov¹, V. S. Golubkov¹, A. G. Mayorov¹

¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*
**e-mail: kruchinin_01@inbox.ru*

A method for determination of the geomagnetic cutoff rigidity is presented. The method is based on the tracing of charged particles in the Earth's magnetic field using Buneman-Boris' particle-in-cell method. The results of the verification of the method are presented: in particular, a comparison with theoretical calculations in an ideal dipolar field and with previous calculations made under the real field condition. The developed method has shown a high reliability proven by the replication of the known effects. In the dipolar approximation, it has shown high accuracy in comparison with the theoretical calculations. Typical pattern of geomagnetic cutoff penumbra is also reproduced.