

УДК 52.724+52.726

## КАЛЬКУЛЯТОР ЖЕСТКОСТЕЙ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ТРАЕКТОРИЙ ИХ ДВИЖЕНИЯ

© 2021 г. С. М. Белов<sup>1</sup>, Г. И. Зобнин<sup>1</sup>, В. Г. Янке<sup>1</sup>. \*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова  
Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: yanke@izmiran.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

Для проведения экстренных единичных расчетов жесткостей геомагнитного обрезания и траекторий движения частиц в магнитосфере разработана программа-калькулятор Cutoff-2050, позволяющая вычислять необходимые параметры для заданной даты (1900–2050 год) и в заданной географической точке для моделей магнитосферы: диполь, IGRF, модели Цыганенко IGRF+T89 а также моделей более высокого порядка IGRF+T96 и IGRF+T02. Выполнена визуализация всех получаемых результатов: пенумбры, времени движения и траекторий частиц.

DOI: 10.31857/S0367676521110065

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитосферный эффект космических лучей был открыт Клэем в 1927 г. [1], который на маршруте Амстердам-Сидней обнаружил широтный эффект и впервые использовал магнитное поле Земли как спектрометр заряженных частиц. Правильное объяснение этого эффекта и дальнейшее его изучение последовало в работах Боте [2], Бруно Росси [3].

Первым, кто оценил исключительную важность для космической физики проблемы движения заряженных частиц в магнитном поле Земли, был Штермер [4]. Далее вклад многих исследователей позволил в значительной мере развить понимание геомагнитных эффектов и их роли в движении частиц [5–8].

Обширные и наиболее систематические исследования магнитосферных эффектов космических лучей (КЛ) и их долгопериодных изменений, проведены М. Шей и Д. Смартон на основе программного пакета [9]. Были вычислены глобальные распределения вертикальной жесткости геомагнитного обрезания с шагом  $5^\circ \times 15^\circ$  по широте и долготе для эпох с 1955 по 2000 гг. [10–18]. В работах [13–19] показана неравномерность изменений планетарного распределения жесткостей геомагнитного обрезания за 20 лет с 1955 по 1975 г.: в южной акватории Атлантического океана наблюдалось уменьшение, в то время как в северной – сопоставимое увеличение вертикальной жесткости обрезания.

В работе [20] для вертикально приходящих частиц методом траекторных расчетов было получено планетарное распределение жесткостей геомагнитного обрезания с шагом  $5^\circ \times 15^\circ$  по широте и долготе за период 1950–2020 гг. и с прогнозом до 2050 г. Для периода 1950–2050 гг. были получены временные изменения жесткостей геомагнитного обрезания для мировой сети нейтронных мониторов. Для мюонных телескопов были также получены жесткости геомагнитного обрезания для частиц из наклонных направлений прихода.

Цель работы – создание калькулятора жесткостей геомагнитного обрезания для проведения экстренных единичных расчетов с наиболее полным графическим представлением результатов. Для проведения траекторных расчетов использовались уже разработанные и отлаженные программные пакеты.

### МЕТОД ТРАЕКТОРНЫХ РАСЧЕТОВ

Основным методом для определения жесткостей обрезания и получения траекторий заряженных частиц в геомагнитном поле является численное интегрирование уравнения движения заряженных частиц с учетом внутренних и внешних источников магнитного поля. Для проверки правильности численного решения используется метод обратного интегрирования. Интегрирование завершается в трех случаях: 1) либо по истечении заданного времени (частица считается захваченной); 2) либо частица пересекала поверхность маг-

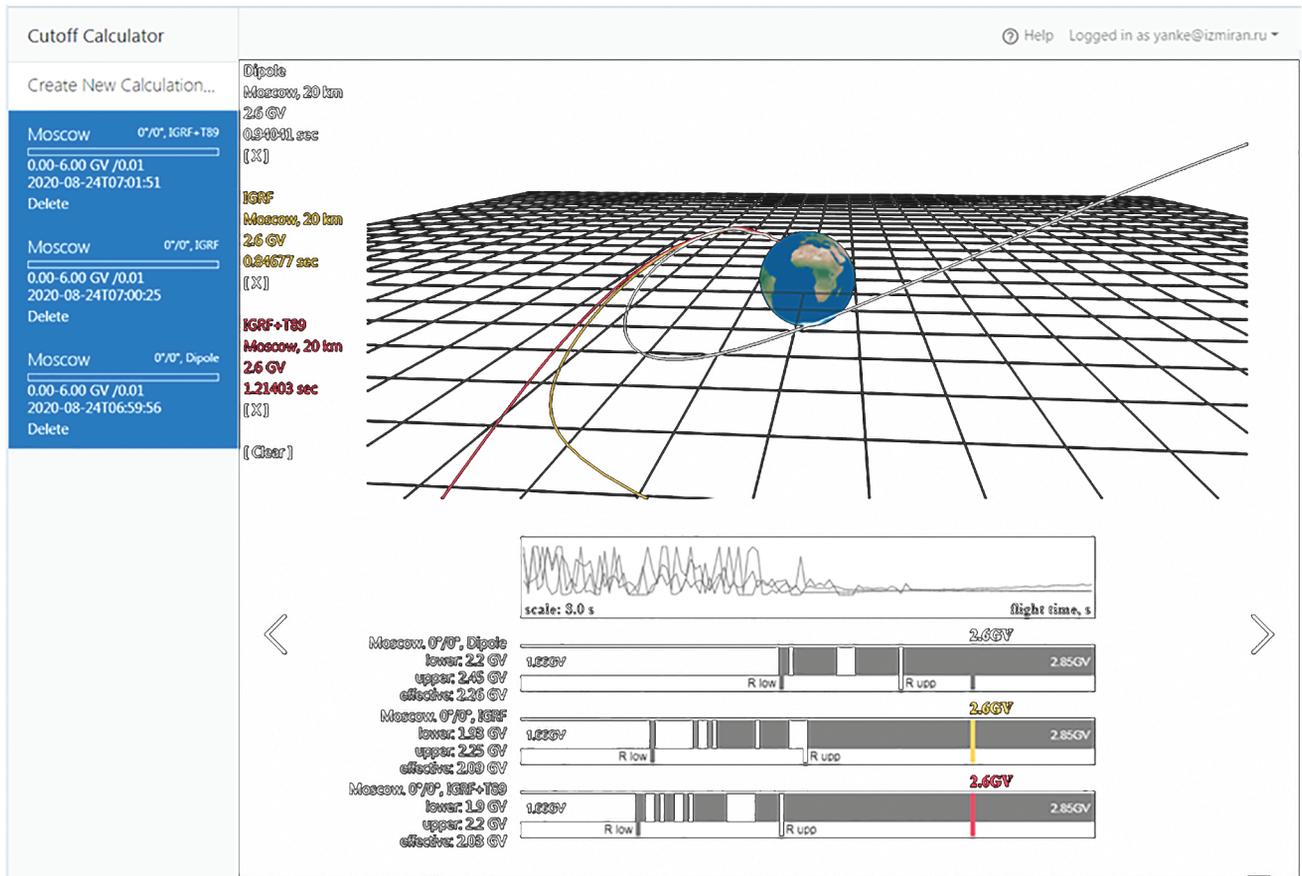


Рис. 1. Скриншот калькулятора в режиме сравнения жесткостей геомагнитного обрезания для вертикально приходящих частиц на станции Москва для моделей Dipole, IGRF, IGRF+T89 при шаге интегрирования 0.01 ГВ.

нитопазы (вышла за пределы магнитосферы); 3) или же ее радиус-вектор оказывался меньше, чем  $(R_E + 20)$  км, где  $R_E$  — радиус Земли (частица вернулась в атмосферу).

Во втором случае данная траектория помечается как разрешенная, во всех других — запрещенная. Эта методика впервые была сформулирована и применена в работе [8], а также описана в [15]. Она реализована также в работах [20–25]. Особое внимание уделялось вопросу учета пенумбры.

### ПРИВЛЕКАЕМЫЕ МОДЕЛИ МАГНИТОСФЕРЫ

Для траекторных расчетов привлекалась модель международного геомагнитного эталонного поля (IGRF-13) для эпохи 2020.0 и прогноз вековой вариации на 2020–2025 [26]. Нами такая линейная аппроксимация коэффициентов разложения Гаусса продолжена до 2050 г. Вклад внешних магнитных полей учитывался на основе эмпирических моделей Цыганенко [27] — разных при разной степени возмущенности внешнего поля: T89 [28], T96 [29], Ts02 [30].

### ИМЕЮЩИЕСЯ КАЛЬКУЛЯТОРЫ

В мире уже разработано несколько вариантов калькуляторов для расчета жесткостей геомагнитного обрезания. Простой Интернет проект [31] базируется на модели IGRF и рассматривает только вертикально падающие частицы. Применяется алгоритм, описанный в [15]. Недостатки: не учитывается вклад магнитосферы, рассматриваются только вертикальные траектории, нет графического представления результатов расчета

Другой алгоритм: Интернет-проект [32], базируется на более сложных моделях магнитосферы [29, 30] с автоматическим привлечением необходимых для модели магнитосферы входных параметров межпланетной среды, что является очень удобной и полезной опцией. Программа также восстанавливает траектории частиц внутри магнитосферы. Калькулятор имеет полезную возможность вычисления ларморовского радиуса внутри магнитосферы. Недостатки: рассматриваются только вертикальные траектории, нет графического представления результатов траекторных расчетов — пенумбры.

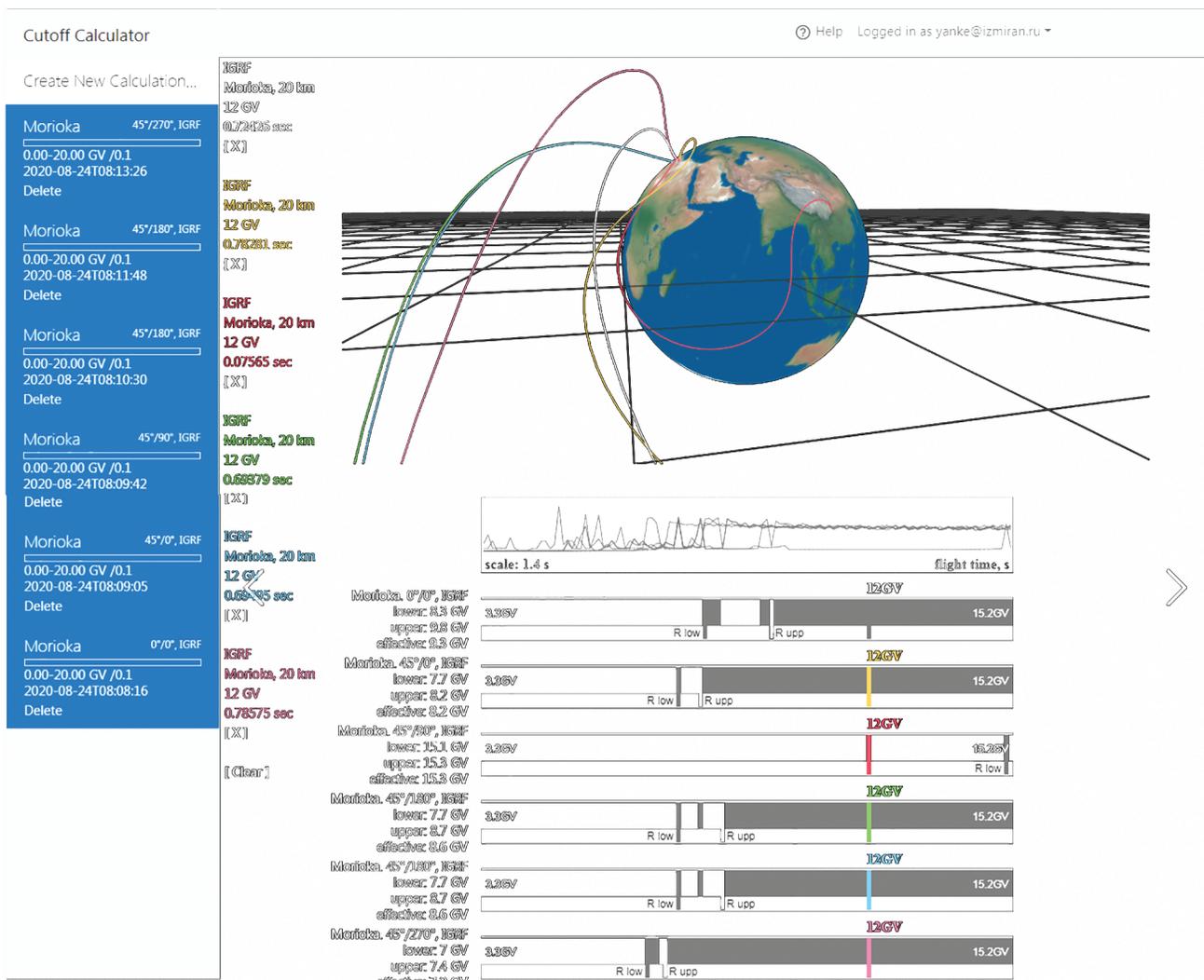


Рис. 2. Скриншот калькулятора в режиме сравнения жесткостей геомагнитного обрезания на ст. Morioka для модели IGRF+T89 и шага интегрирования 0.1 ГВ для вертикали, зенитного угла 45° и азимутальных углов 0°, 90°, 180°, 270°.

Онлайн калькулятор [33] выполнен на основе методики, описанной в работе [20]. Результат работы калькулятора – нижнее, верхнее и эффективное значение жесткости и пенумбры для одной из заданных моделей магнитосферы: диполь, IGRF, модели Цыганенко IGRF+T89, IGRF+T96, IGRF+T02. Недостатки: нет графического представления траекторий.

#### ПРОГРАММА КАЛЬКУЛЯТОРА CUTOFF-2050

Программа калькулятор Cutoff-2050 доступна по адресу [34]. Основой калькулятора для расчета жесткостей геомагнитного обрезания является программа CutOff-2050, которая использовалась в работах Гвоздецкого [20–25]. Любому пользователю при первом входе создается личный кабинет, в котором можно накапливать и сравнивать резуль-

таты. При выборе Create New Calculation появляется диалоговое окно с очевидными параметрами.

В качестве примера на рис. 1 приведены расчеты и сравнение вертикальной жесткости геомагнитного обрезания для станции Москва для трех моделей Dipole, IGRF, IGRF+T89 с шагом интегрирования 0.01. Если на шкале пенумбры мышью выбрать жесткость частицы, то отображается траектория этой частицы в данном магнитном поле. Над полем пенумбры приведен график времени движения частицы до выхода из магнитосферы.

На рис. 2 приводятся жесткости обрезания для ст. Morioka для модели IGRF+T89 и шага интегрирования 0.1 ГВ: для вертикали, зенитного угла 45° и азимутальных углов 0°, 90°, 180°, 270°. Траектории частиц также отображаются после выбора на шкале пенумбры соответствующих жестко-

**Таблица 1.** Тестовые расчеты на типичном современном ПК для нижней  $R_S$ , верхней  $R_H$  и эффективной  $R_{eff}$  жесткостей для UT 2017-07-01 00:00:00. Географические координаты  $55^\circ$  с.ш. и  $40^\circ$  в.д., вертикальный и азимутальный угол  $0^\circ$  и  $0^\circ$ . Шаг интегрирования 0.001 ГВ.  $B_y, B_z$  – компоненты межпланетного магнитного поля, параметры  $G_1, G_2$  определены в [30]

Модель	Параметры					Результаты			
	$K_p$	$P_{sw}$ , нПа	$D_{st}$ , нТл	$B_y, B_z$ , нТл	$G_1, G_2$	Жесткость, ГВ			$t$ , с
						$R_S$	$R_H$	$R_{eff}$	
Dipole						2.337	2.737	2.498	10
IGRF						1.765	2.416	2.185	40
IGRF+T89	0					1.582	2.190	1.922	30
IGRF+T96		2	-50	0 и 5		1.518	2.156	1.906	2200
IGRF+Ts02		2	-50	0 и 5	6 и 10	1.649	2.234	1.947	4000

стей. Сравниваются несколько наклонных траекторий для частиц с жесткостью 2.6 ГВ.

В табл. 1 приведены параметры тестовых вычислений калькулятора для различных моделей. Для расчетов с моделями IGRF+T96 и, особенно с моделью IGRF+T02, требуется значительно большее время, и это необходимо учитывать при планировании вычислений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Калькулятор Cutoff-2050 вычисляет жесткость геомагнитного обрезания и траектории движения частиц для заданной даты (в период 1900–2050) и в заданной географической точке для моделей магнитосферы: диполь, IGRF, модели Цыганенко: IGRF+T89, IGRF+T96 и IGRF+T02. Для постоянных пользователей имеется возможность организации на сервере личных кабинетов для накопления и хранения полученных результатов. Выполнена визуализация всех полученных результатов: пенумбры, времени движения и траекторий частиц. Интерфейс калькулятора позволяет наглядно провести сравнительный анализ траекторий для различных моделей и параметров. Калькулятор Cutoff-2050 является эффективным инструментом для экстренного проведения единичных расчетов. У задачи есть существенный образовательный потенциал, поскольку возможности онлайн калькулятора могут быть использованы для обучения студентов соответствующих специальностей.

Работа выполнена с использованием оборудования УНУ “Сеть СКЛ”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clay J. // Proc. Roy. Acad. Amsterdam. 1927. V. 30. P. 1115.
2. Bothe W., Kolhorster W. // Ztschr. Phys. Bd. 1929. V. 56. P. 751.
3. Rossi B. // Nature. 1930. V. 125. No. 3156. P. 636.
4. Stormer C. // Astrophys. 1930. V. 1. P. 237.
5. Lemaître G.E., Vallarta M.S. // Phys. Rev. 1936. V. 49. P. 719.
6. Lemaître G.E., Vallarta M.S. // Phys. Rev. A. 1936. V. 50. P. 493.
7. Jory F.S. // Phys. Rev. 1956. V. 103. No. 4. P. 1068.
8. McCracken K.G., Rao U.R., Shea M.A. // MIT Tech. Rep. 77. Lab. Nucl. Sci. Eng. Mass. Inst. Technol. Cambridge, 1962.
9. <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/sun/cutoff.html>.
10. Shea M.A., Smart D.F., McCracken K.G. // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. No. 17. P. 4117.
11. Shea M.A., Smart D.F. // Adv. Space Res. 1966. V. 6. P. 177.
12. Shea M.A., Smart D.F. // JGR. 1967. V. 72. No. 7. P. 2021.
13. Shea M.A., Smart D.F. // Proc. 14th ICRC. (Munich, 1975). V. 4. P. 1298.
14. Smart D.F., Shea M.A. // Adv. Space Res. 1994. V. 14. No. 10. P. 787.
15. Smart D.F., Shea M.A. // NASA Tech. Rep. Serve. Final Rep. 2001. 199 p.
16. Smart D.F., Shea M.A. // Adv. Space Res. 2003. V. 32. No. 1. P. 103.
17. Smart D.F., Shea M.A. // Proc. 30th ICRC. (Mexico, 2007). V. 1. P. 733.
18. Smart D.F., Shea M.A. // Proc. 30th ICRC. (Mexico, 2007). V. 1. P. 737.
19. Storini M., Shea M.A., Smart D.F., Cordaro E.G. // Proc. 26th ICRC. SH3.6.30. V. 7. (Salt Lake City, 1999). P. 402.
20. Гвоздевский Б.Б., Кобелев П.Г., Янке В.Г. и др. // Геомагн. и аэронаом. 2016. Т. 56. № 4. С. 411.
21. Gvozdevsky B.B., Dorman L., Abunin A. et al. // Proc. 34th ICRC. (Hague, 2015). Art. No. PoS203.
22. Dorman L., Gvozdevsky B., Belov A., Gushchina R., et al. // Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017). Art. No. PoS(ICRC2017)067.
23. Гвоздевский Б.Б., Янке В.Г., Белов А.В. et al. // Proc. 41st Annual Seminar. (Apatity, 2018). P. 80.
24. Gvozdevsky B.B., Belov A.V., Yanke V.G. et al. // Phys. Atom. Nucl. B. 2018. V. 81. No. 9. P. 1382.

25. *Gvozdevsky B.B., Belov A.V., Yanke V.G. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 2029. Art. No. 012008.
26. *Thebault E., Finlay C. C., Beggan C.D. et al.* // Earth. Planet. Space. 2015. V. 67. P. 79.
27. <http://geo.phys.spbu.ru/magmodel/empiric.html#t13>.
28. *Tsyganenko N.A.* // Planet. Space Sci. 1989. V. 37. No. 1. P. 5.
29. *Tsyganenko N.A., Stern D.P.* // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. Art. No. 27187.
30. *Tsyganenko N.A., Singer H.J., Kasper J.C.* // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. No. A5. P. 1209.
31. <http://cosmos.hwr.arizona.edu/Util/rigidity.php>.
32. <http://www.geomagsphere.org>.
33. <http://crsv.izmiran.ru/cutoff>.
34. <http://tools.izmiran.ru>.

## Calculator of the rigidity of geomagnetic cutoff of cosmic rays and their trajectories

S. M. Belov<sup>a</sup>, G. I. Zobnin<sup>a</sup>, V. G. Yanke<sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup>*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia*

*\*e-mail: yanke@izmiran.ru*

To carry out emergency single calculations of the geomagnetic cutoff rigidities and particle trajectories in the magnetosphere, the Cutoff-2050 calculator program has been developed, which allows calculating the necessary parameters for a given date (1900–2050) and at a given geographic point for magnetosphere models: dipole, IGRF, Tsyganenko IGRF model + T89 as well as higher order models IGRF+T96 and IGRF+T02. Visualization of all the results obtained: penumbra, time of movement and particle trajectories has been performed.