Программа Cutoff считает геомагнитную жёсткость обрезания для заданной географической точки и заданной даты. С заданной высоты выпускаются вверх антипротоны различной жёсткости, и просчитываются их траектории. Если частица вышла из магнитосферы - жёсткость разрешённая, если врезалась в землю или крутится слишком долго (продолжительность полёта задаётся) - жёсткость запрещённая. Программа может считать траектории в одной из заданных моделей магнитосферы: диполь, IGRF, Цыганенко-89, 96, 02. Частицы выпускаются с заданными вертикальными и азимутальными углами.

Все задаваемые параметры прописываются в файле Cutoff.ini.

Input parameters for the program CUTOFF:
 17.05.2014 Date
 02:00:00 Time
 0.4 Solar wind dynamic pressure (nPa)
 -30.0 Dst-index (nT)
 -7.8 IMF By (nT)
 -2.9 IMF Bz (nT)
 1.8 G1
 7.0 G2
 1.7 Kp-index
 10 Model: 00-**dipole**, 10-**IGRF**, 89-**T89**, 96-**T96**, 01-**T01**
 20.00 Height (km)
 40.63 Geographic latitude (90 to -90)
 -3.15 Geographic longitude (-180 to +180)
 0.00 Vertical angle (0 - 90): 0 , 15 , 30 , 45 , 60 , 75 , 85
 0.00 Azimutal angle (0 - 360)
 3.00 lower limit
 8.00 Rigidity upper limit (GV)
 0.001 step
 3.00 Maximum time of flight (s)
 0 Output trace coordinates [1] or not [0]

где

- Дата, время UT.
- Далее идут 7 параметров для различных моделей магнитосферы.
 Диполь и IGRF не нуждаются во входных параметрах.
 T-89 – использует только Kp-индекс.
 T-96 - использует первые 4 параметра, а
 T-01 - использует первые 6 параметров.

Модель	Задаваемые параметры	Диапазон изменений параметров
Диполь	нет	нет
IGRF	Эпоха	1900–2050 (экстраполяция 2020–2050)
IGRF+T89	Дата и время Kp	1900–2050 (экстраполяция 2020–2050) 0÷9
IGRF+T96	Дата и время Динамическое давление солнечного ветра (nPa) Dst-index (nT) IMF By (nT) IMF Bz (nT)	1900–2050 0.1÷4 +50÷-500 ±30 ±20
IGRF+T01	Дата и время Динамическое давление солнечного ветра (nPa)	1900–2050 0.1÷4

	D_{st} -index (nT)	+50÷-500
	IMF B_y (nT)	±30
	IMF B_z (nT)	±20
	G_1	0÷20
	G_2	0÷20

- Далее идёт высота, с которой запускаются вверх антипротоны (20 км).
- Далее - географические координаты (градусы с долями, долготы от -180 до +180) и углы запуска.
- Далее - диапазон жесткостей, который просканирует программа, и шаг по жёсткости. При задании диапазона жесткостей нужно обеспечить полный охват диапазоны пенумбры, но в то же время и не слишком широко, чтобы не затягивать время расчёта.
- Далее - допустимое время полёта. Если частица летает дольше, считаем, что она захвачена - запрещённая траектория. 3 секунды нормальное значение - не слишком задерживает вычисления и достаточно хорошо отделяет захваченные частицы от пролётных.
- В конце ещё идёт флажок, выводить ли в файл траектории полётов и вектор магнитного поля.

ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1) Во время работы программа выводит на экран и в файл **Cutoff.dat** одну строку (три числа) на каждую жёсткость: Жёсткость, флаг разрешённости траектории, время полёта. (Флаг: на экране 0 - запрещённая, 1 - разрешённая траектория. в файле наоборот). В самом конце выводятся нижняя, верхняя и эффективная жёсткость обрезания.

```
...
0.490 0 15.000
0.491 0 12.000
0.492 1 15.045
0.493 2 180.000
0.494 1 18.166
0.495 1 15.202
0.496 0 11.000
0.497 0 7.310
0.498 0 14.000
```

```
...
1.998 0 0.727
1.999 0 0.735
2.000 0 0.743
Cutoff rigidities:
lower 0.465
upper 0.567
effective 0.499
```

Calculation time: 58.746

2) Если *Output trace coordinates=1*, то для каждой жесткости выводится отдельный файл, например, *Trace00312.dat*: время полета частицы, траектория частицы (координаты XYZ в радиусах Земли) и составляющие магнитного поля в этой точке.

```
Time,s  $X_{GSM}$ ,  $R_E$  Y Z  $Bx_{GSM}$ , nT  $B_y$   $B_z$ 
...
0.00297 0.0456 -0.4232 1.0396 6776.1 17070.4 -34103.2
```

Общее число Trace-файлов 1000 на каждый GV при шаге 0.001 GV. Огромное количество файлов. Вам это не нужно – должно быть *Output trace coordinates=0*.

ВЫЧИСЛЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ.

- **Вычисление** динамического давления солнечного ветра.

Давление солнечного ветра – величина производная от скорости и плотности плазмы солнечного ветра и вычисляется по формуле: $P=1.673 \cdot 10^{-6} \times n \times V^2$, где P – давление [нПа], n – плотность частиц [cm^{-3}], V – скорость частиц [km/s].

- **Вычисление G_1 , G_2 и G_3 .**

На странице Цыганенко <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/modeling.html> есть сведения о модели T02. Имеются ссылки на две статьи ([Paper I](#) и [Paper II](#)), в которых эта модель описана. Во второй статье есть формулы для G_1 и G_2 .

- **Вклад тока в хвосте магнитосферы**, который оказывает большое влияние на внутреннюю и ближнюю магнитосферу, учитывается в линейном приближении введением параметр G_1 .

$$G_1 = V \cdot h(B_{\perp}) \sin^3 \frac{\theta}{2}. \quad (1)$$

Здесь среднечасовые значения параметров, полученные любым способом, а именно V – скорость солнечного ветра,

$B_{\perp}$ -перпендикулярная (transverse) компонента IMF, т.е. $B_{\perp}^2 = B_y^2 + B_z^2$ и всегда положительна. Система координат GSM. Функция $h(B_{\perp}) = B_{\perp}^2 / (1 + B_{\perp/40})$, $B_{\perp/40} = B_{\perp} / B_0$ для значений $B_0 > 40$ нТ.

θ – угол между вектором $B_{\perp}$ и осью Z (Цыганенко называет это "clock angle of the IMF transverse component", а Акасофу "polar angle of the IMF"). Этот угол от 0 до 180 градусов.

Если принять $V=400$ km/s, $B_{\perp}=5$ нТ, $\theta=180$ градусов, то для G_1 получаем $G_1=400 \times 0.014 \times \sin^3(180/2) \approx 6$. Диапазон изменений G_1 $0 \leq G_1 \leq 20$.

- **Сдвиг хвостового тока в хвосте магнитосфере** учитывается в линейном приближении введением параметр G_2 , определяемого как [\[http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/T01b.pdf\]](http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/T01b.pdf):

$$G_2 = aVB_s, \quad (1)$$

где V и B_s скорость солнечного ветра и южная компонента межпланетного магнитного поля IMF ($B_s = |B_z|$ для $B_z < 0$ и $B_s = 0$ при $B_z > 0$) соответственно; данные усреднены за предшествующий 1-часовой интервал. Постоянный множитель $a=0.005$ был введен только для удобства, чтобы сохранить параметр G_2 в диапазоне $0 \leq G_2 \leq 10$, для обычно наблюдаемых значения V и B_s . Например, для нормальных межпланетных условий ($V=400$ км/с, $B_y=0$ и $B_z=5$ нТ) параметр G_2 равен 10. Действительно, $G_2=a400 \times 5=10$.

Уравнение (1) является лишь одним из возможных вариантов реализации предположения, что вариации конвекционного электрического поля, связанные с южной компонентой IMF, должно привести к пропорциональному сдвигу токового слоя в хвосте магнитосферы.

- **Модификация T02 для условий бури (Storm) для описания зависимости кольцевого тока (G_3). Модель T02s.**

[\[https://pdfs.semanticscholar.org/665a/f74079ff64c532e836746fe4fe22995d2fc0.pdf\]](https://pdfs.semanticscholar.org/665a/f74079ff64c532e836746fe4fe22995d2fc0.pdf)

Вместо линейной зависимости кольцевого тока от Dst-индекса в модели T02, введен нелинейный член с управляющей переменной G_3

$$G_3 = anVB_s, \quad (3)$$

основанный на зависимости от энергии солнечного ветра. Как и G_2 , параметр G_3 был определен как средняя за предыдущий 1-часовой интервал геоэффективная характеристика солнечного ветра. Он отличается от параметра G_2 в том, что в дополнение к скорости солнечного ветра V и южный компонент IMF B_s , G_3 также включает плотность частиц солнечного ветра n .

Постоянный множитель $a=0.0005$ введен для удобства, чтобы сохранить параметр G_3 в диапазоне $0 \leq G_3 \leq 10$, для обычно наблюдаемых значения n , V и B_s . Например, для нормальных межпланетных условий ($n=10 \text{ cm}^{-3}$, $V=400 \text{ км/с}$, $B_y=0$ и $B_z=5 \text{ нТ}$) параметр G_3 равен 10. Действительно, $G_3=a \times 10 \times 400 \times 5=10$.

Идея замены Dst функцией G_3 вытекает из того, что быстрое нарастание кольцевого тока является результатом сильной усиленной, непосредственно конвекция из хвоста, и он также должен быстро спадать на этапе восстановления. Этот тип поведения легко воспроизводится ведущей переменной G_3 , тогда как индекс D_{st} может оставаться довольно низким в течение многих часов после того, как основная фаза бури, из-за гораздо более медленно распадающегося симметричного токового кольца.

Этот параметр используется только в модели T01S. Это модификация T01 для условий бури (Storm). (Позднее Цыганенко переименовал T01 в T02. Может быть и T01S сейчас называется T02S. Не знаю.) Мы этой моделью не пользуемся (и, по-моему, вообще мало кто пользуется), но если интересно, я прикладываю статью. Там на странице 10 есть формула для G_3 .