

38 Всероссийская конференция по космическим лучам

Расчёт жёсткости геомагнитного обрезания с помощью трейсинга на основе метода Бунемана-Бориса

Кручинин П.А., Малахов В.В.

Москва 2024

Жесткость геомагнитного обрезания

Жёсткость геомагнитного обрезания (ЖГО) - это предельная жёсткость частицы, при которой она может достигнуть заданной точки пространства. Эта величина определяет угловое и энергетическое распределение галактических космических лучей в каждой точке.



Рис.1 Схема обрезания. Рис. из D.F. Smart, M.A. Shea. A review of geomagnetic cutoff rigidities for earth-orbiting spacecraft

Визуализация траекторий

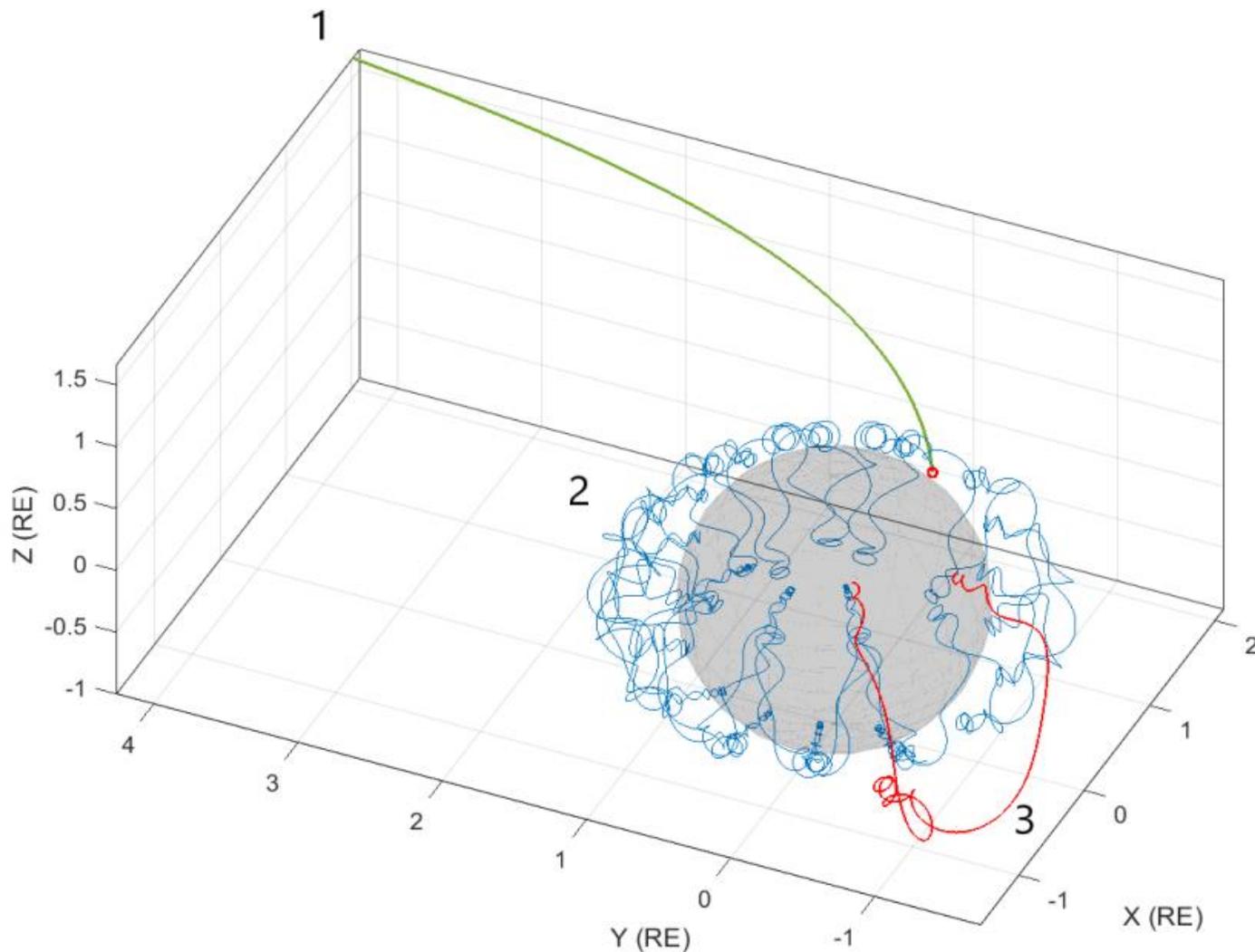


Рис.2 Трассировка частиц в магнитном поле Земли

1 – траектория ГКЛ (разрешенная область); 2 – захваченная (запрещенная);
3 – альбедная (запрещенная)

Относительные отклонения

$$\delta = \frac{R_{theor}}{R}$$

R_{theor} – жёсткость, вычисленная по формуле Штёрмера
 R – жесткость, полученная с помощью метода

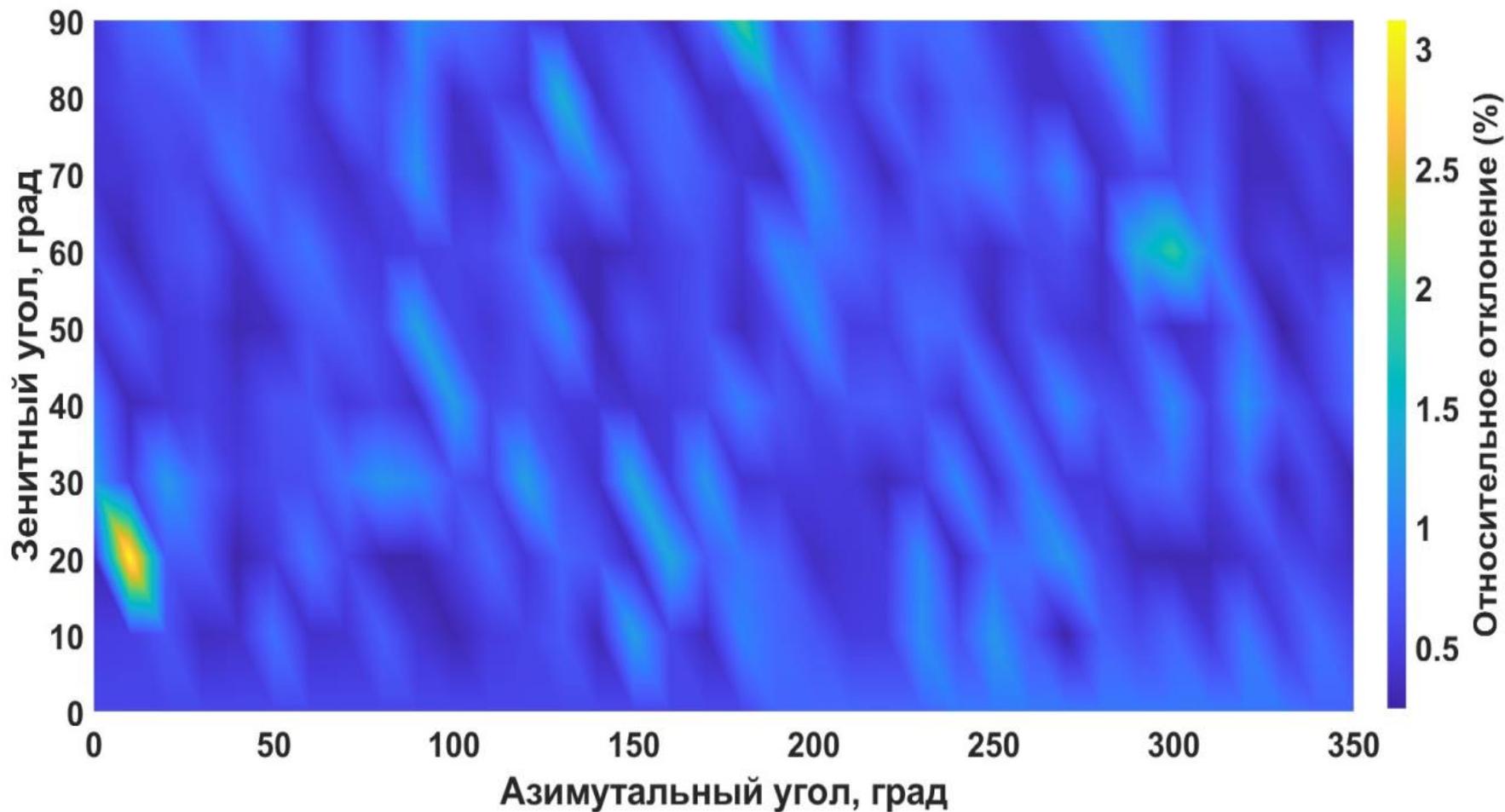


Рис.3 Угловое распределение относительного отклонения. Широта 30°

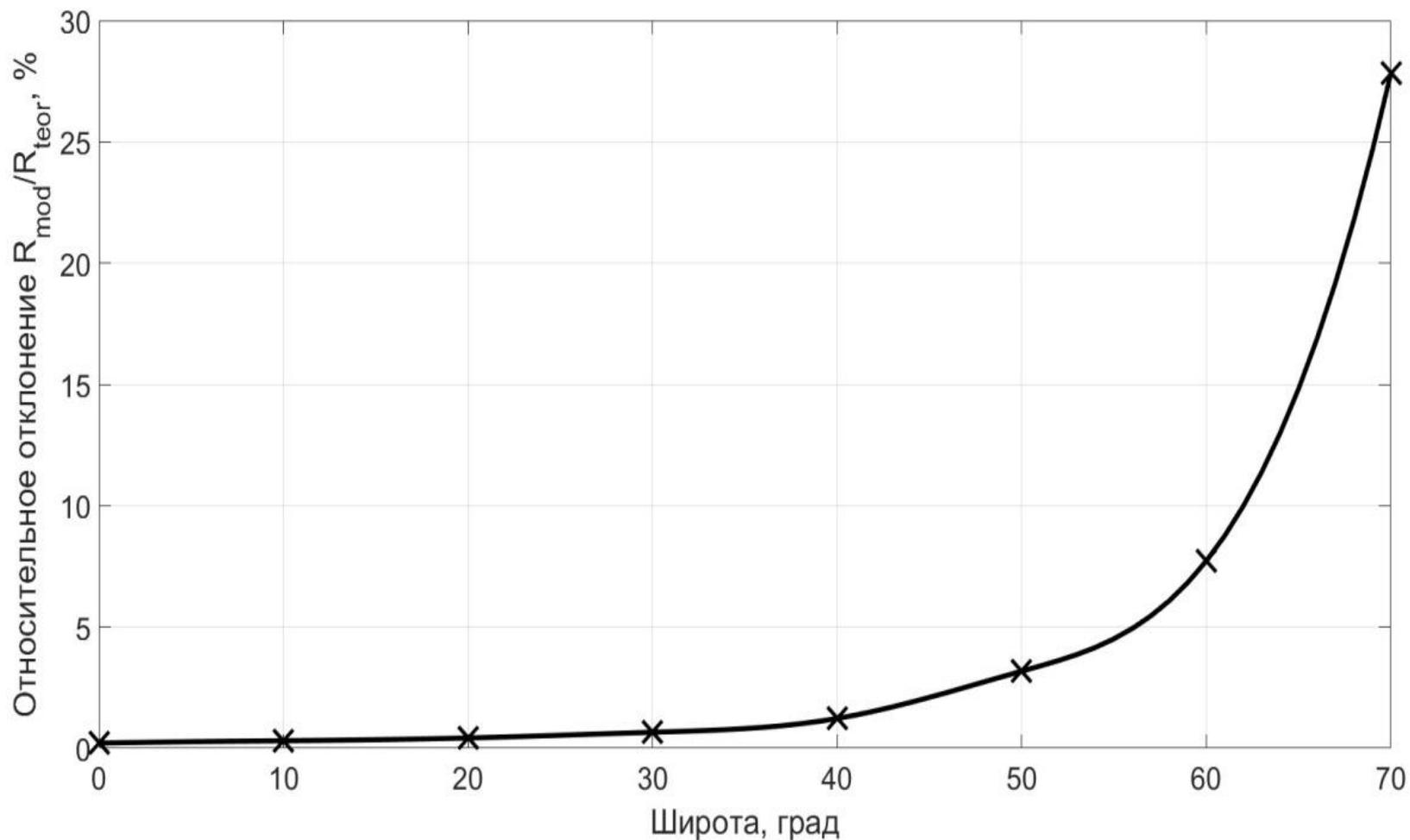


Рис.4 График зависимости среднего относительного отклонения жесткости геомагнитного обрезания смоделированной частицы от значения, полученного по формуле Штёрмера от широты

Исследование стабильности

Верхняя
граница
полутени

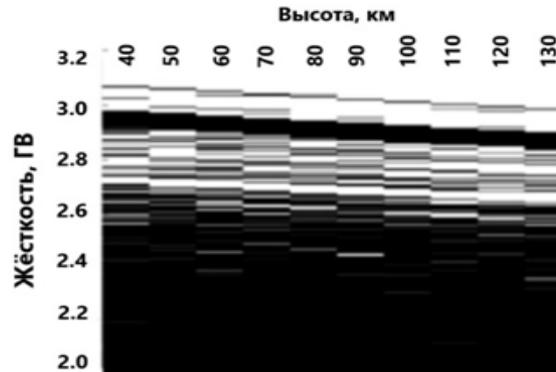
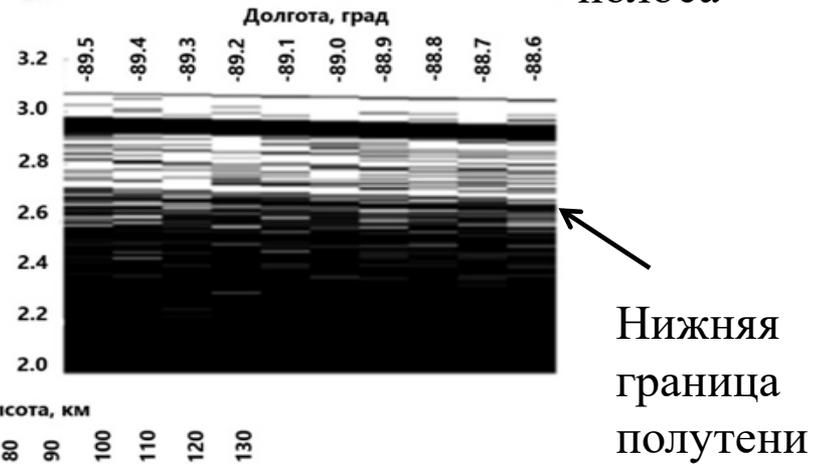
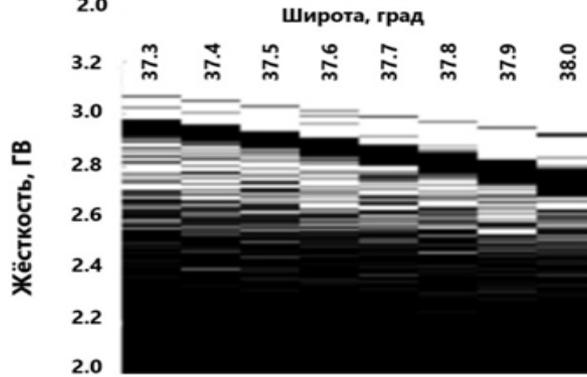
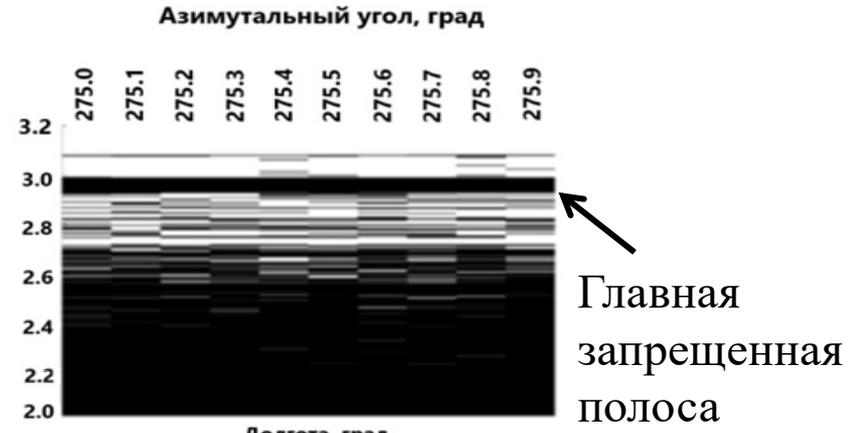
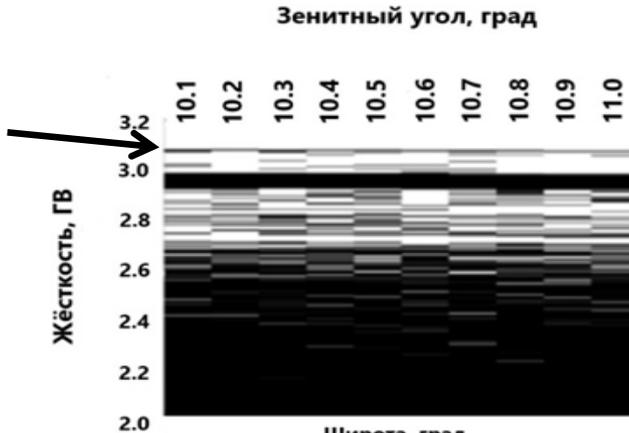


Рис.5 Исследование устойчивости полутени геомагнитного обрезания от начальных параметров прилета частиц.

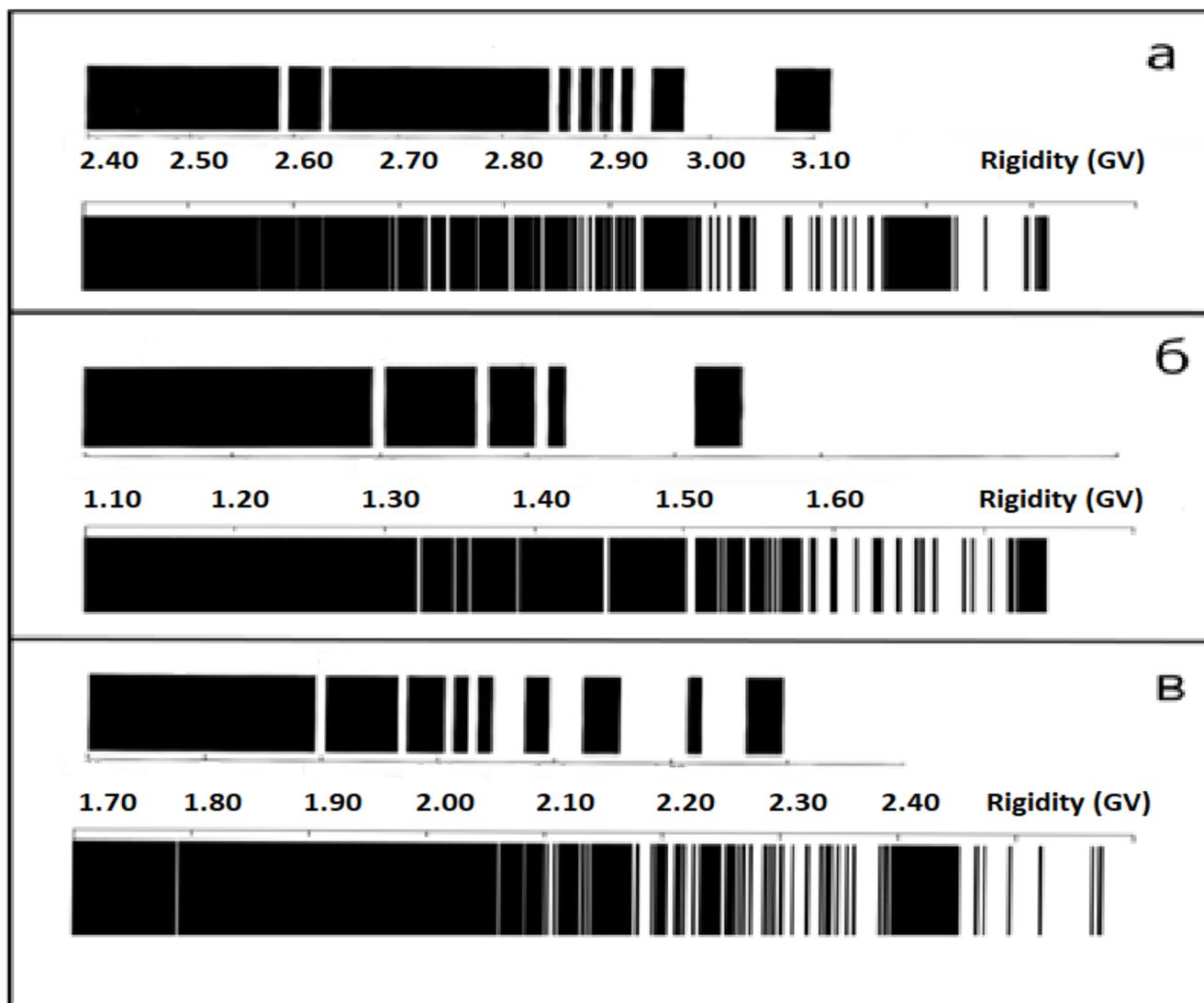


Рис.6 Иллюстрация полутени геомагнитного обрезания на поверхности Земли для вертикального направления прилета частиц. Географические точки: а – Climax; б – mt. Washington; в – Newark. В каждой паре «штрих-кодов» верхний получен Смартон и Ши, а нижний – с помощью разработанного метода.

Влияние внешнего поля на структуру полутени

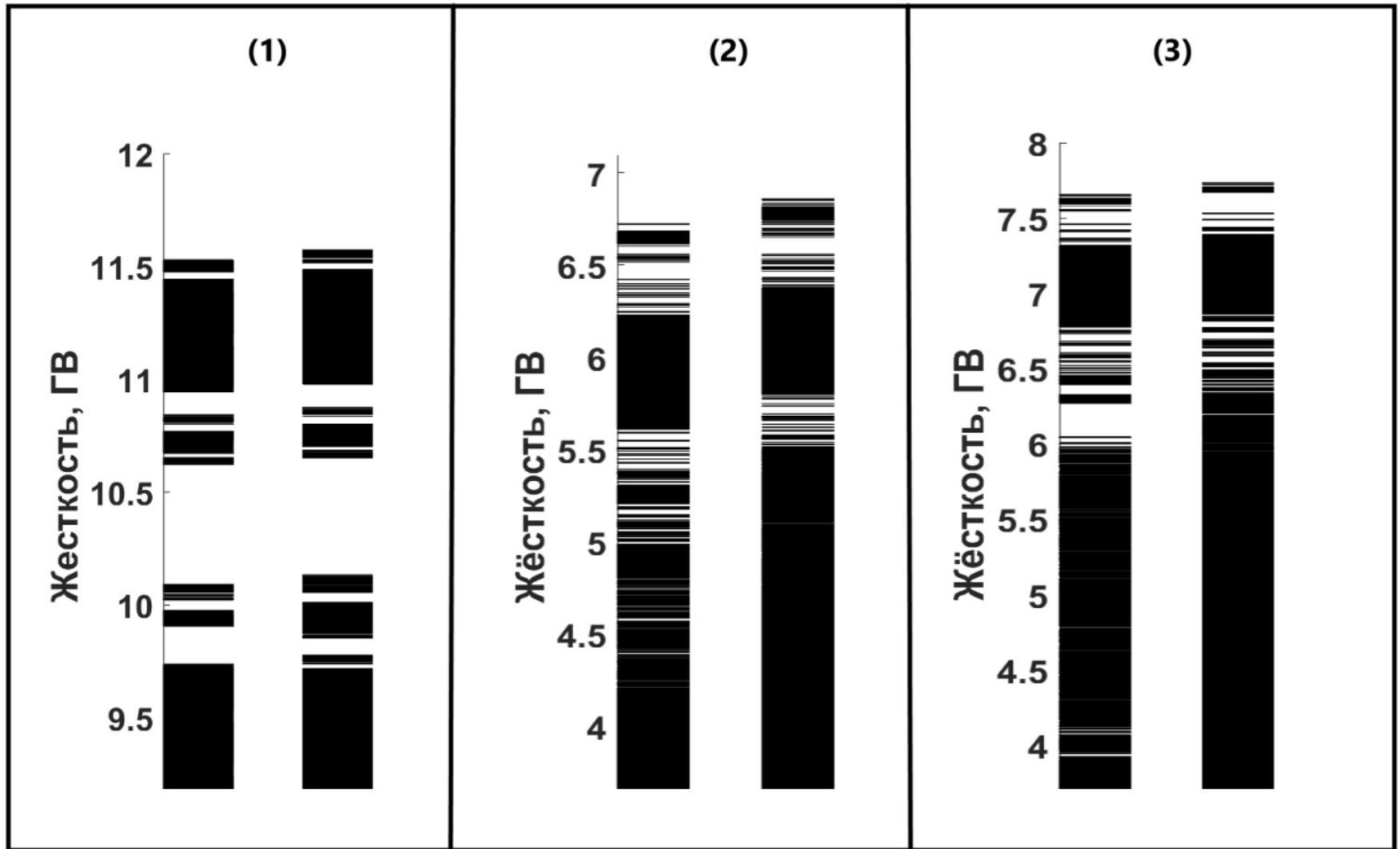


Рис.7 Иллюстрация полутени геомагнитного обрезания для вертикального направления прилета частиц. Географические точки: 1 – $(-20^\circ; 180^\circ)$; 2 – $(40^\circ; 40^\circ)$; 3 – $(-40^\circ; -120^\circ)$. В каждой паре штрих-кодов левый получен в моделях IGRF+T89, правый – в IGRF-13

Сравнение с экспериментальными данными спектрометра PAMELA

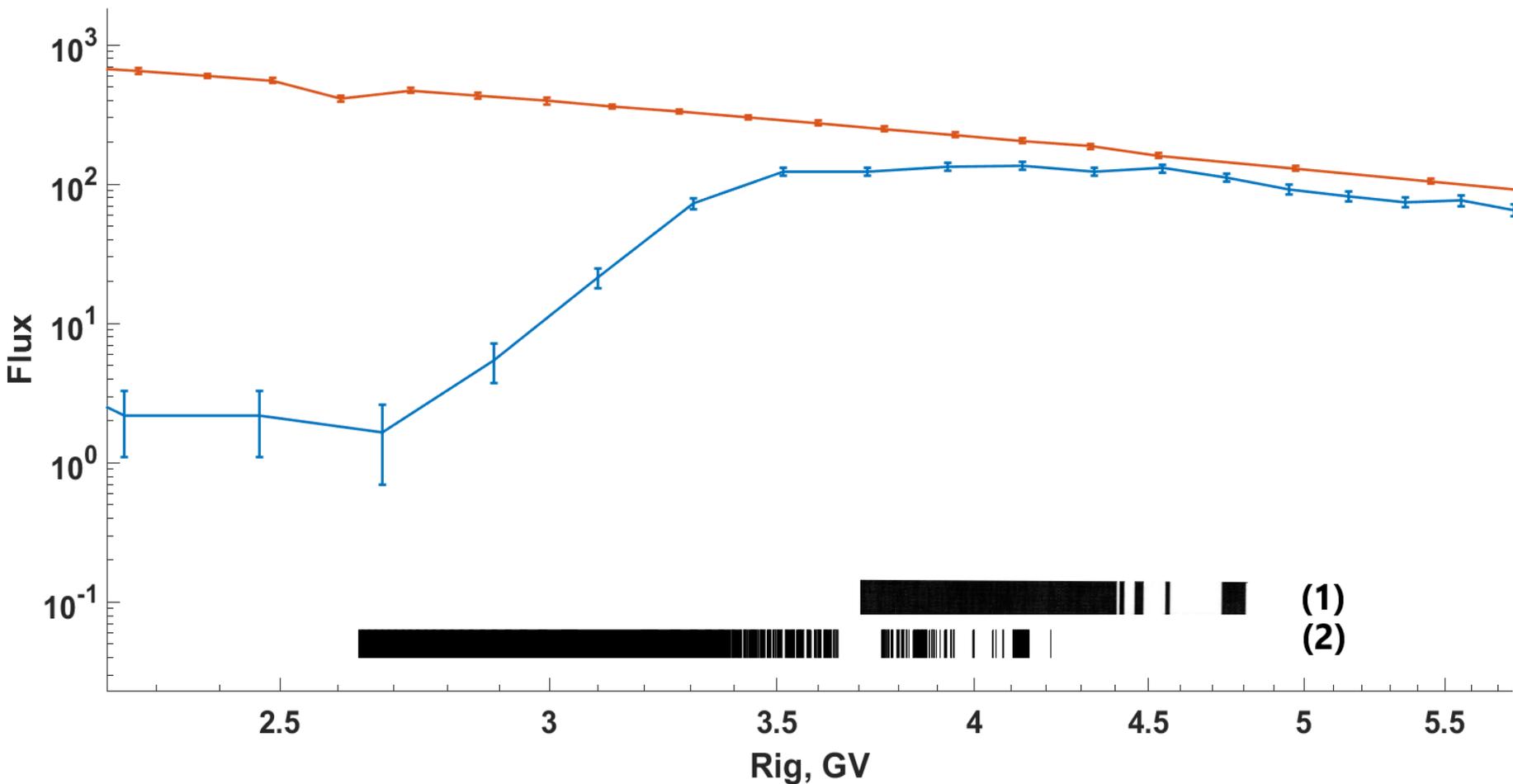


Рис.8 Полутень геомагнитного обрезания в области географической точки Палестин, США. Красным цветом обозначен поток ГКЛ. Синим – поток в рассматриваемой области на высоте полета низкоорбитальных спутников. Полутень (1) – результат, приведенный в работе Смарта и Ши для вертикального направления. Полутень (2) – результат, полученный с помощью разработанного алгоритма в модели поля IGRF

Изменение азимутального угла

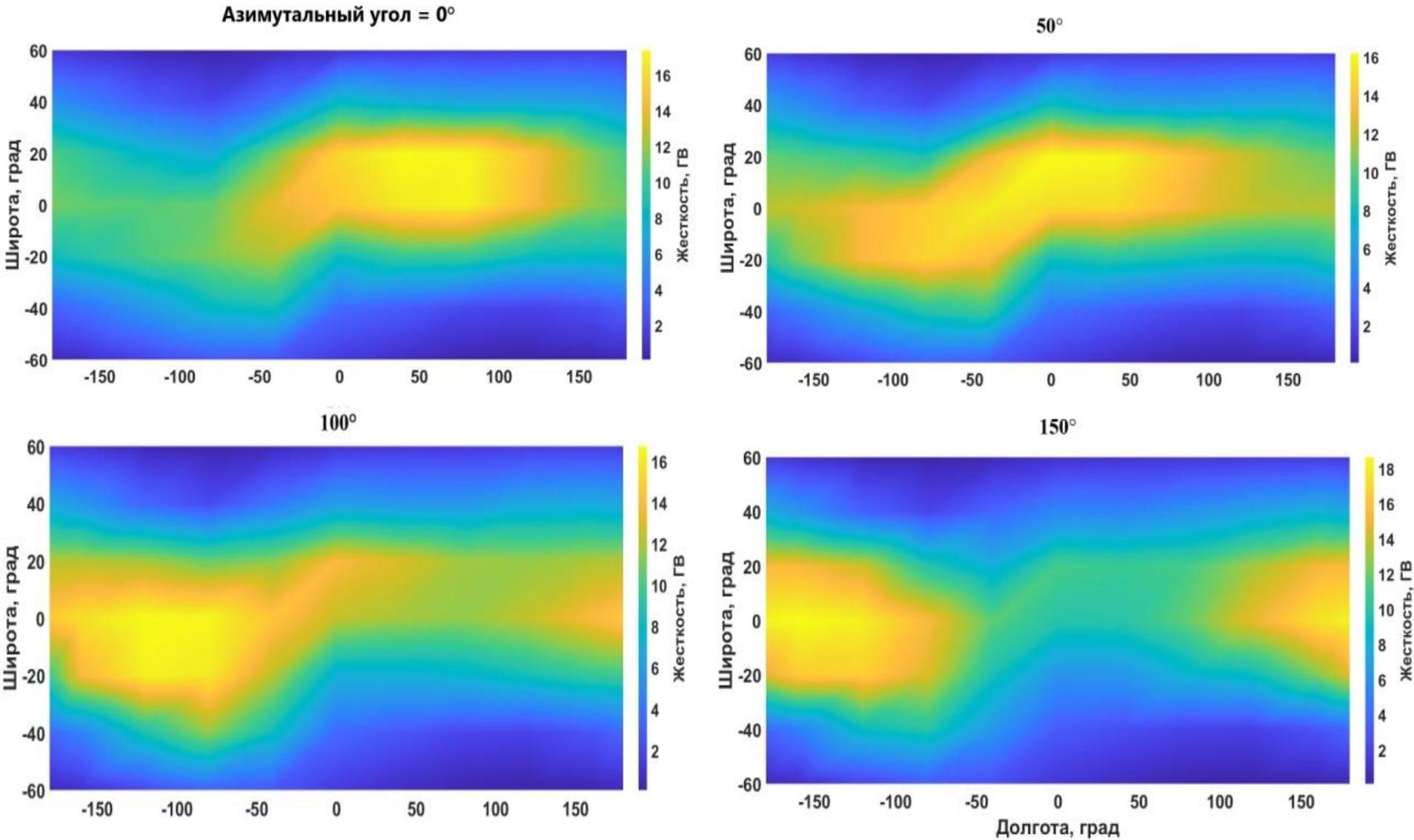


Рис.9а Карты жёсткости геомагнитного обрезания. Зенитный угол: 30° . Модель IGRF-13. 2006 год. Высота: 400 км.

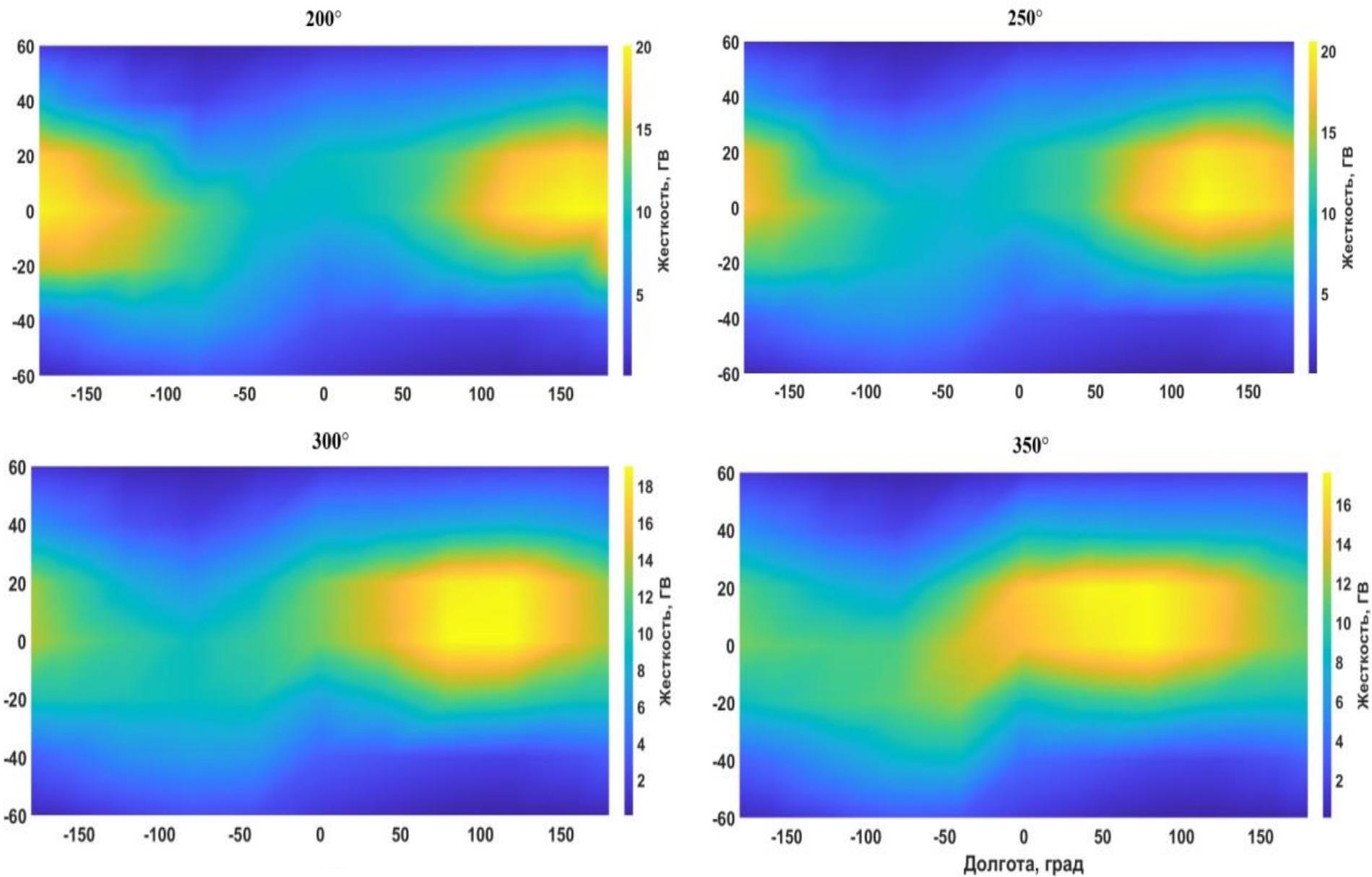


Рис.9б Карты жёсткости геомагнитного обрезания. Зенитный угол: 30° . Модель IGRF-13. 2006 год. Высота: 400 км.

Временные вариации

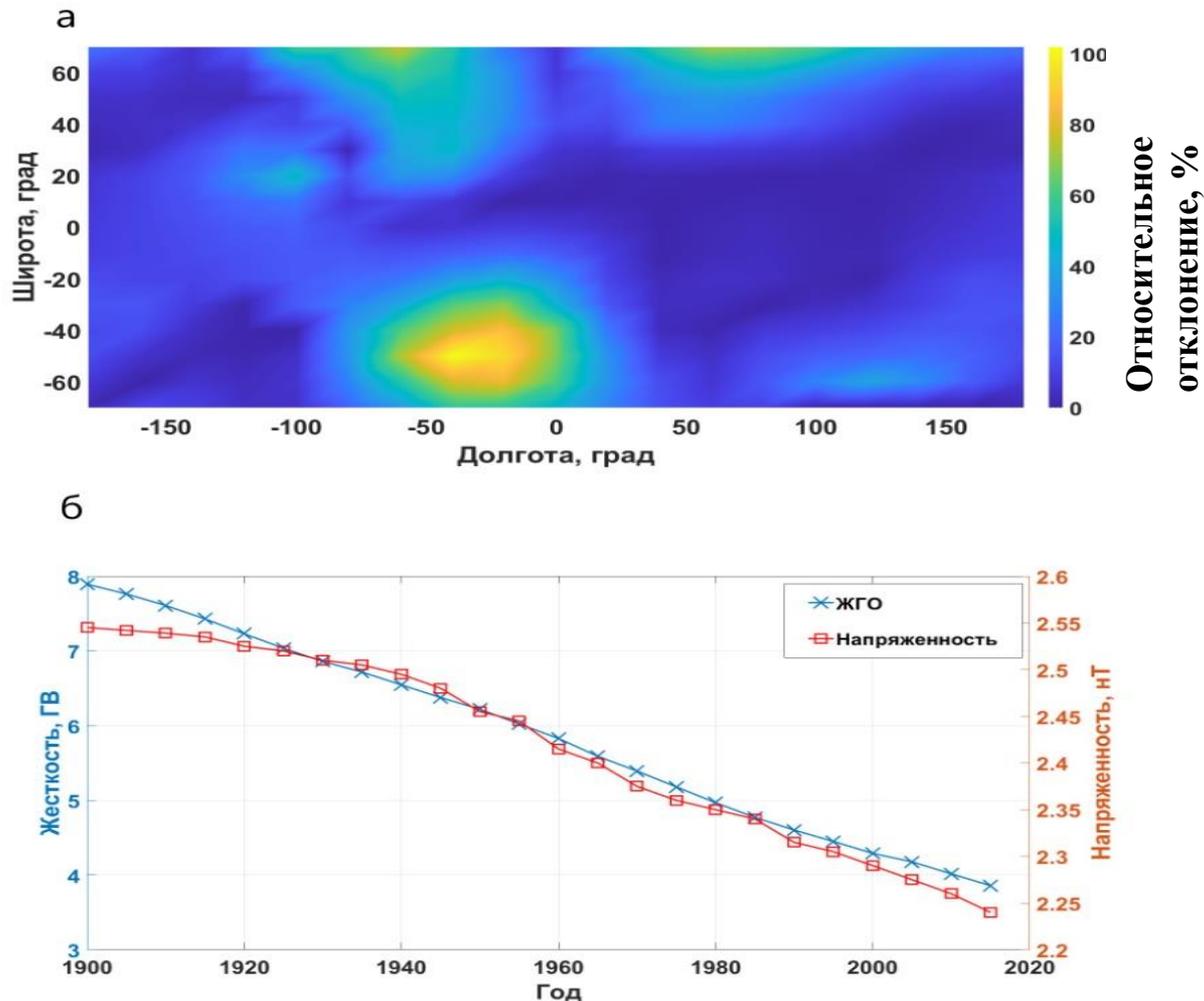


Рис.10 а) Карта относительных отклонений значений жесткости геомагнитного обрезания в 1903 и 2023 годах; б) Зависимость от времени жесткости геомагнитного обрезания (синий) и напряженности магнитного поля (красный) в области Южно-Атлантической магнитной аномалии.

Заключение

В данной работе была проведена проверка разработанного метода расчета ЖГО и алгоритма трассировки частиц, основанного на методе частица-в-ячейке реализованной по схеме Бунемана–Бориса:

- 1) В модели дипольного поля построены угловые распределения относительных ошибок ЖГО.
- 2) В модели поля IGRF построены картины полутени геомагнитного обрезания.
- 3) Изучено влияние внешнего поля на структуру полутени в условиях спокойной магнитосферы.
- 4) Показано, что полутень, полученная с помощью разработанного алгоритма, по сравнению со штрих-кодом в работе Смарта и Ши, лучше согласуется с экспериментальными данными спектрометра PAMELA.

Построены карты жесткости геомагнитного обрезания для различных направлений прилета частиц .

Backup slides

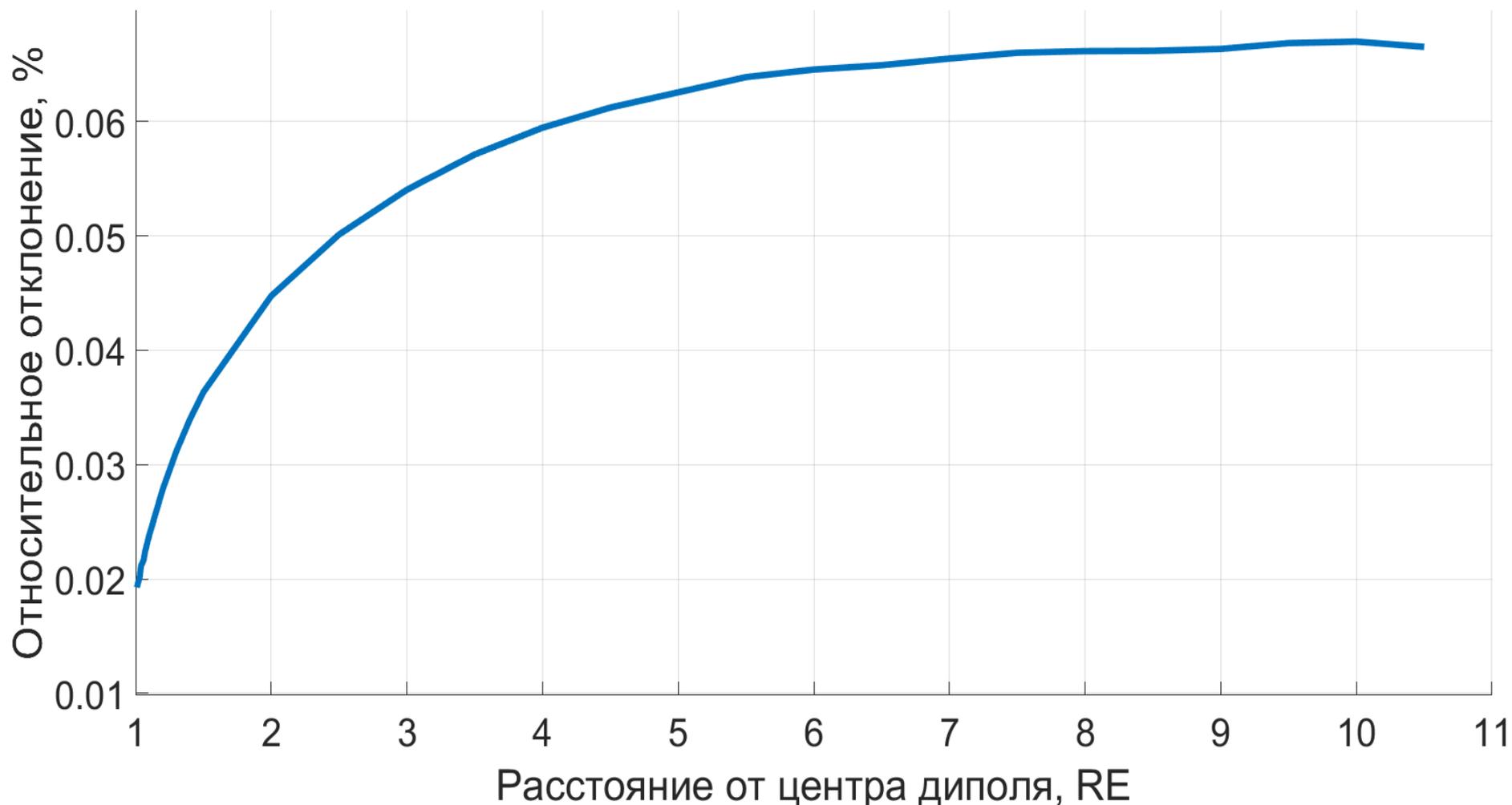
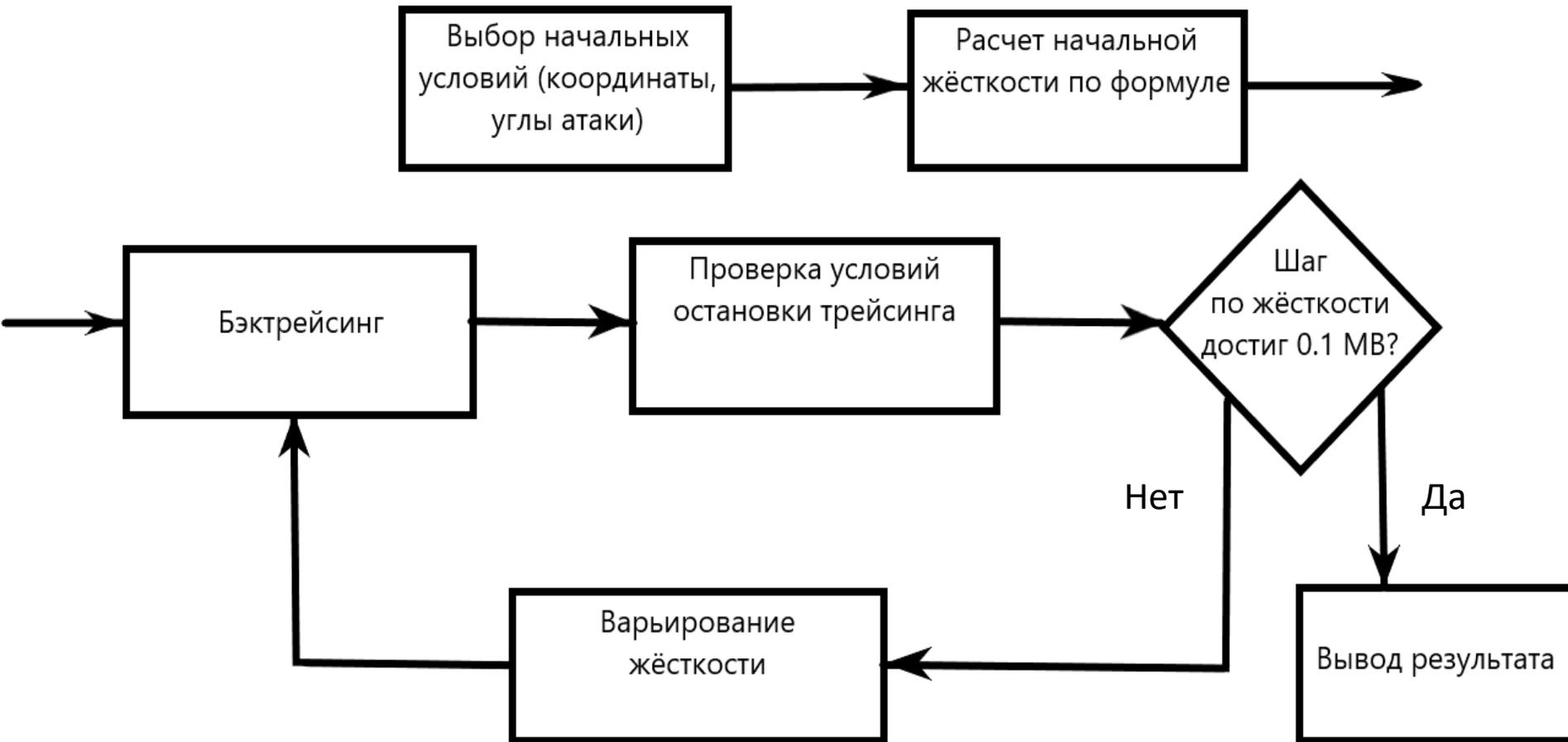


Рис.4 График зависимости относительного отклонения от расстояния от центра диполя в экваториальной области. Вертикальное направление прилета частиц.

Описание методики для идеального дипольного поля



$$R_c = [M \cos^4 \lambda] / \{r^2 [1 + (1 - \sin \epsilon \sin \xi \cos^3 \lambda)^{1/2}]^2\} \quad (1)$$

Полутень геомагнитного обрезаия

Зона полутени – область хаотически запрещенных и разрешенных зон космических лучей, характерная для реального магнитного поля.

SIOUX FALLS

CAPE GIRADEAU

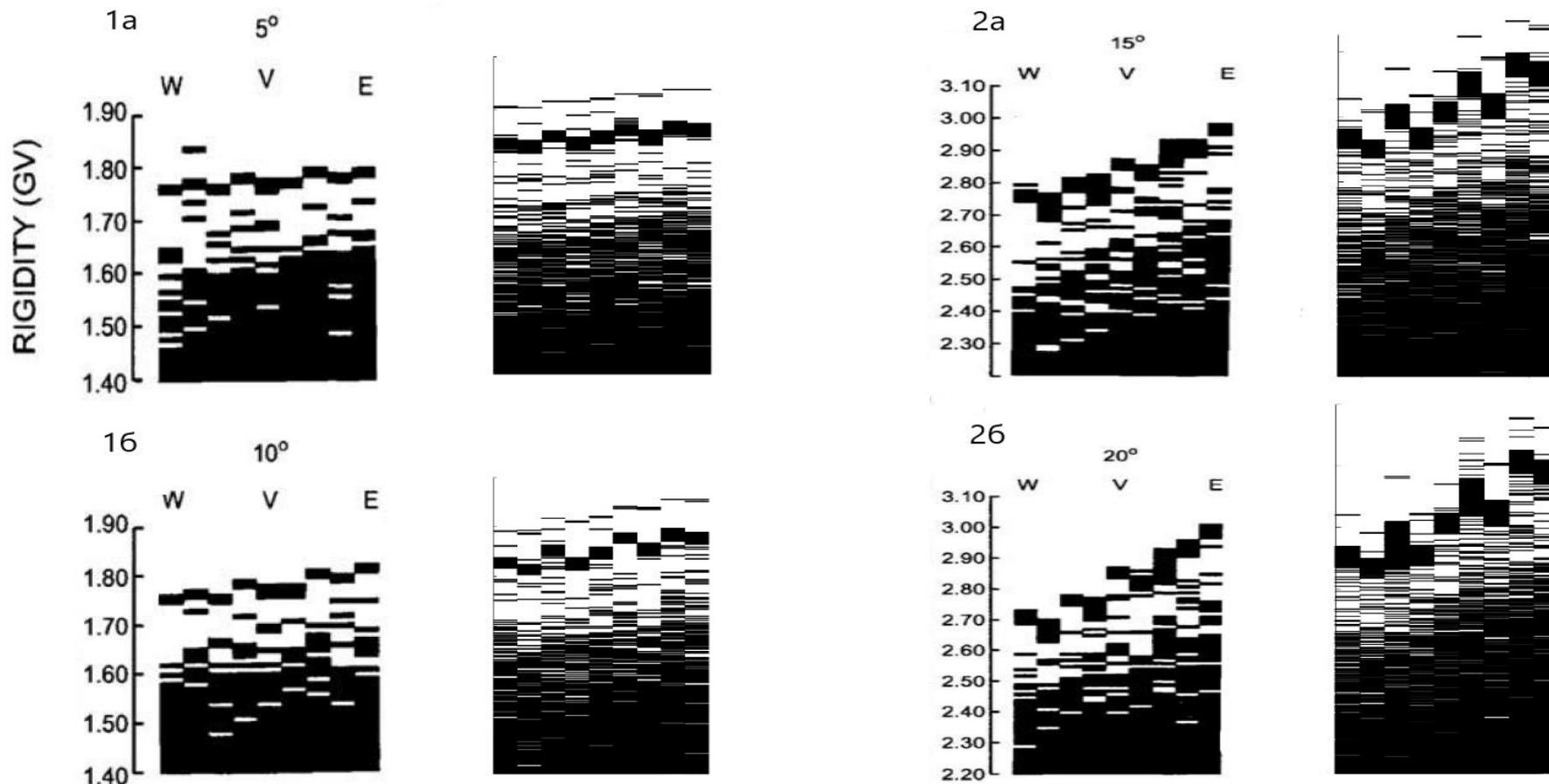


Рис.5 Иллюстрация полутени геомагнитного обрезаия. Черная область – запрещенные траектории. Белая область – разрешенные траектории

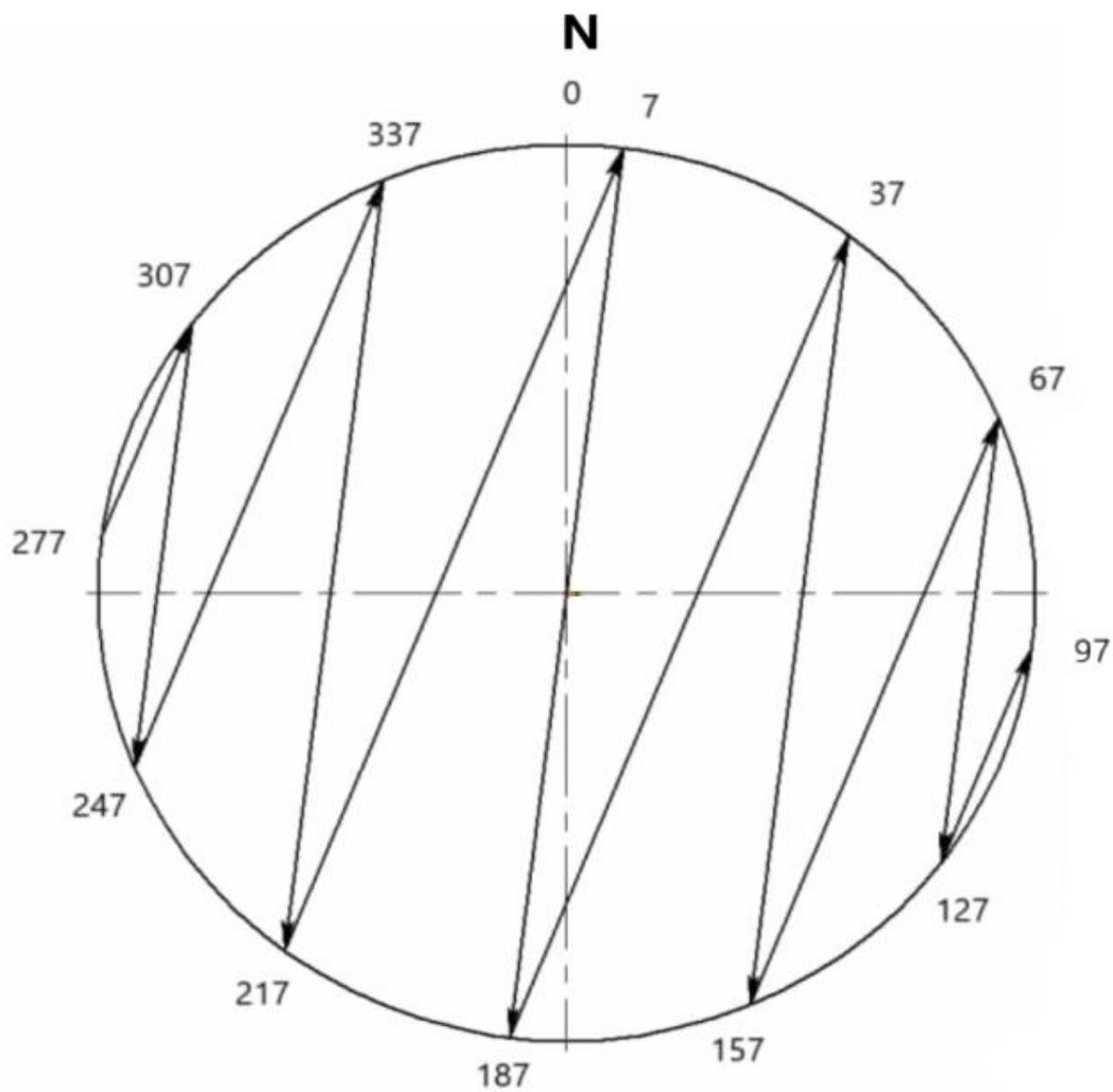
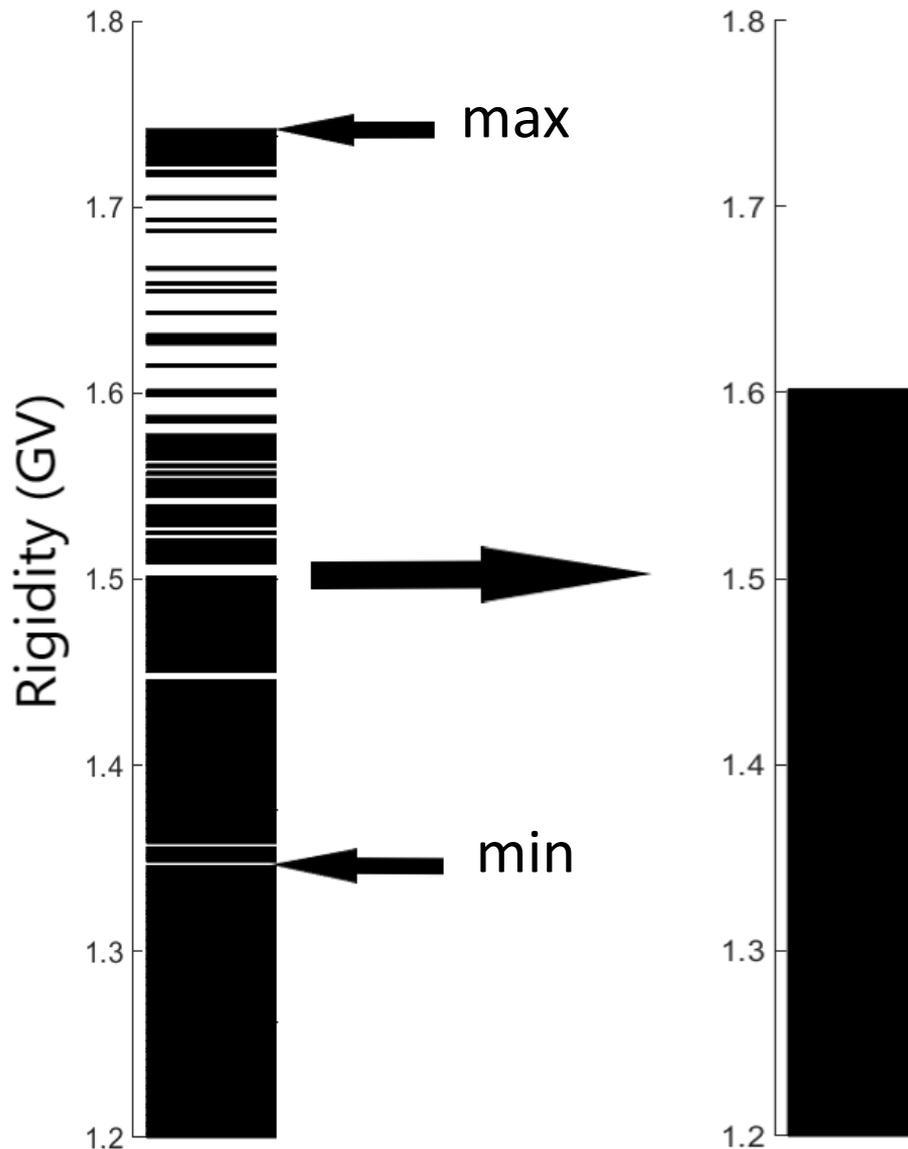


Рис.5 Изображение направления обхода по азимутальным углам в иллюстрации полутени геомагнитного обреза

Расчёт ЖГО



$$R_c = R_{max} - n_{allowed} \cdot \Delta R$$

$$R_{max} = 1.74 GV$$

$$R_{min} = 1.344 GV$$

$$R_c = 1.602 GV$$

$$\Delta R = 2 MV$$

Формула из Dr. Laurent Desorgher, M. Gurtner, E.O. Flückiger // PLANETOCOSMICS Software User Manual. – 2005.

Рис.9 Вертикальная жесткость

Изменение зенитного угла

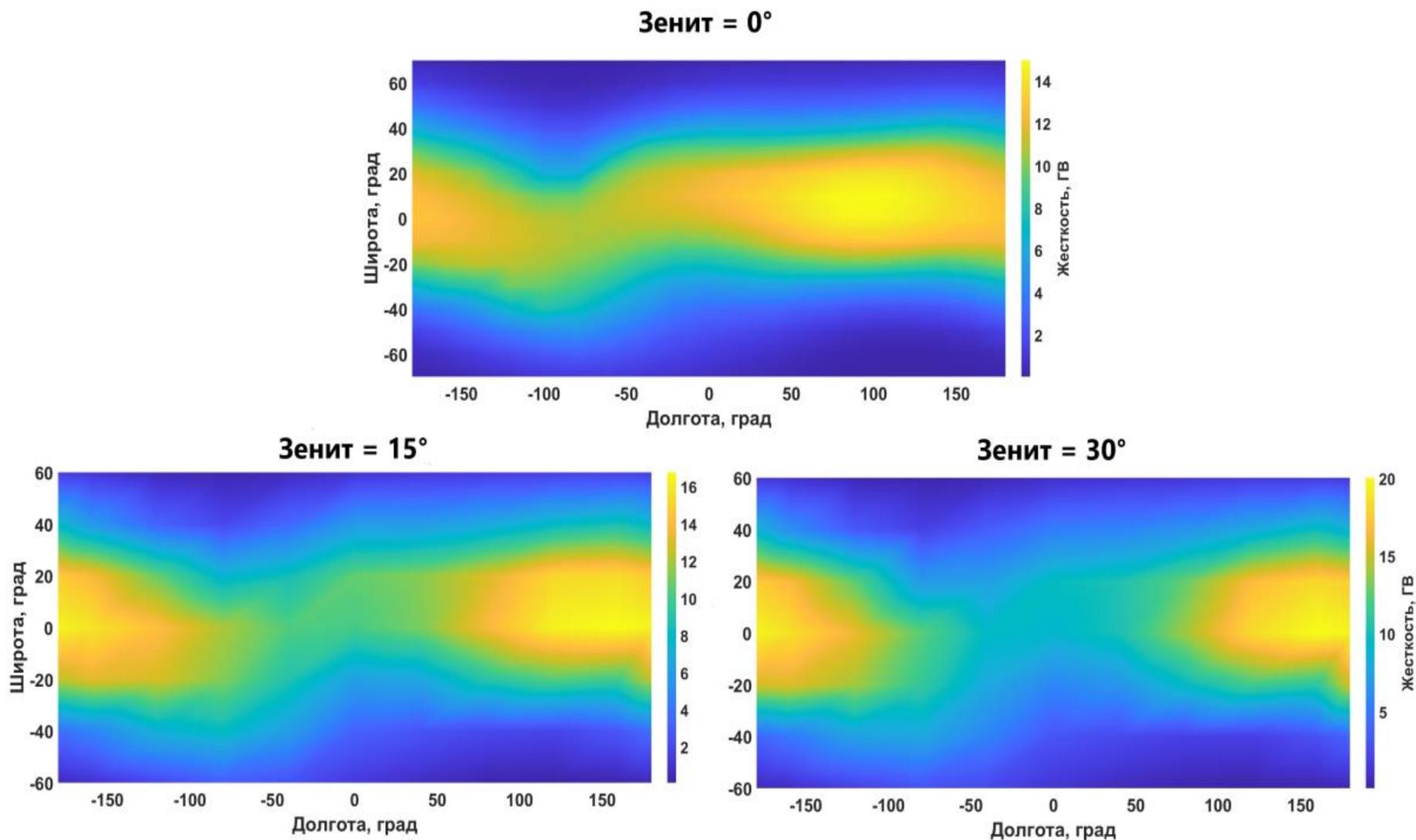


Рис. 8 Карты жесткости геомагнитного обрезания различных зенитных углов прилета частиц. Модель IGRF-13. 2006 год. Высота: 400 км. Азимутальный угол: 200°;

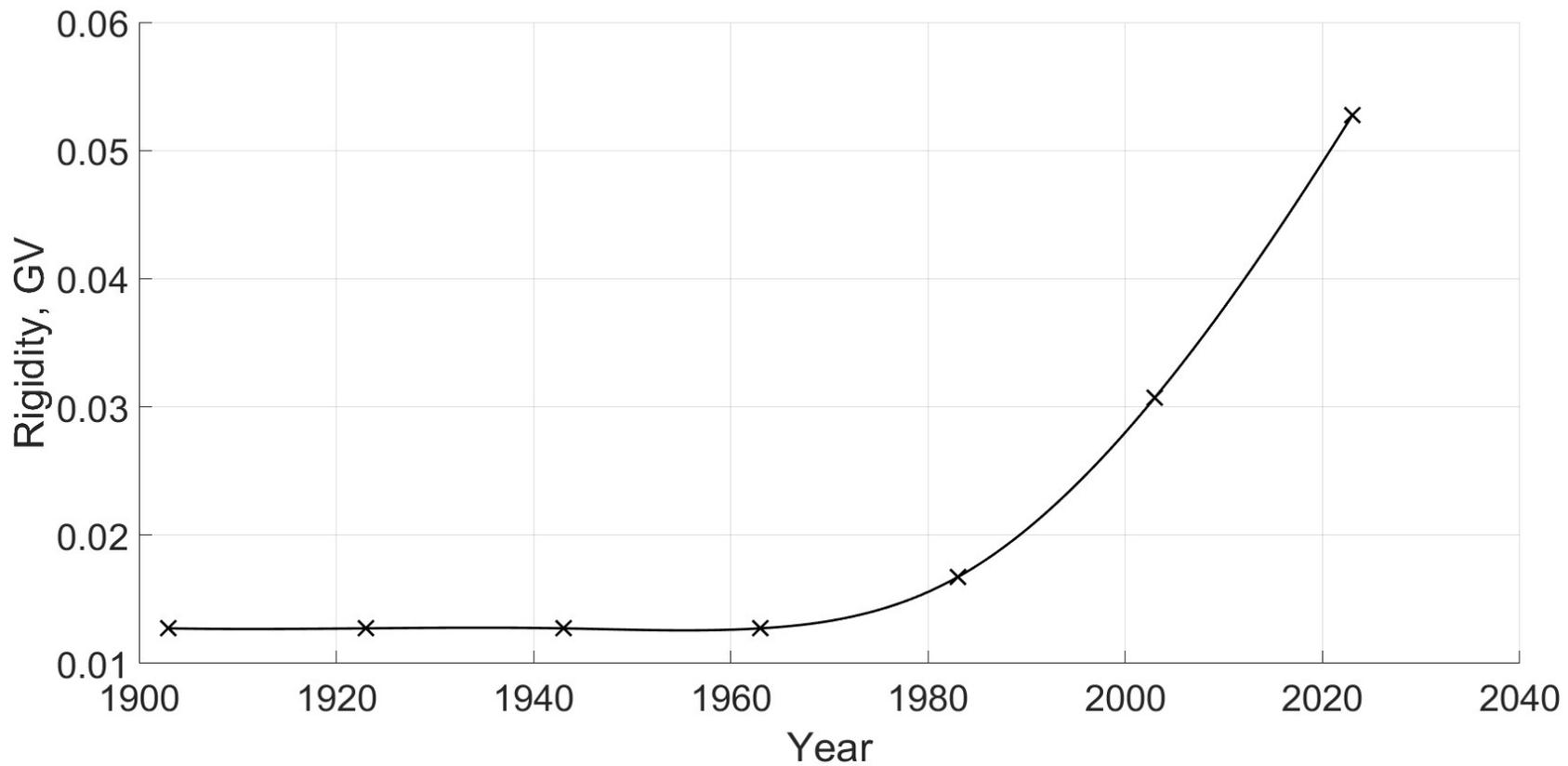


Рис.17 Зависимость от времени жесткости геомагнитного обрезания (70 °; -60 °)