

### Цель работы

Работа посвящена воспроизведению 27-дневных вариаций потока галактических космических лучей (ГКЛ), наблюдавшихся в эксперименте PAMELA [1], при помощи моделирования распространения ГКЛ в гелиосфере.

Для моделирования прохождения ГКЛ в гелиосфере численными методами вычисляется траектория движения заряженных частиц в ЭМ поле.

### Построение карты электромагнитного поля в невозмущенной гелиосфере

Для трассировки космических лучей задается электромагнитное поле в гелиосфере с помощью модели Паркера для не возмущенной гелиосферы [2, 4].

#### • Модель Паркера для магнитного поля в гелиосфере

$$\vec{B} = \pm B_0 \frac{r_0^2}{r^2} \left( \vec{e}_r - \frac{r\Omega}{v} \sin\theta * \vec{e}_\phi \right) H(\vec{r})$$

#### • Модель Паркера для электрического поля в гелиосфере

$$\vec{E} = \mp B_0 \frac{r_0^2 \Omega}{r^3} (xz\vec{e}_x + yz\vec{e}_y - (x^2 + y^2)\vec{e}_z) H(\vec{r})$$

Где  $\vec{B}$  и  $\vec{E}$  - векторы магнитной индукции и напряженности электрического поля, тройка  $(r, \theta, \phi)$  - сферические координаты (радиус, полярный угол, азимутальный угол) с началом в центре солнца, тройка  $(x, y, z)$  - соответствующие декартовы координаты,  $r_0$  - радиус где наибольшее значение радиальной компоненты магнитного поля равна  $B_0$ ,  $\Omega$  - сидериальная угловая скорость солнца соответствующая периоду 25.4 дней,  $v$  - радиальная компонента скорости солнечного ветра, знак " $\pm$ " соответствует разным полярностям солнца, функция  $H(\vec{r})$  возвращает число в пределах [-1;1], в зависимости от того где мы находимся относительно ГТС.

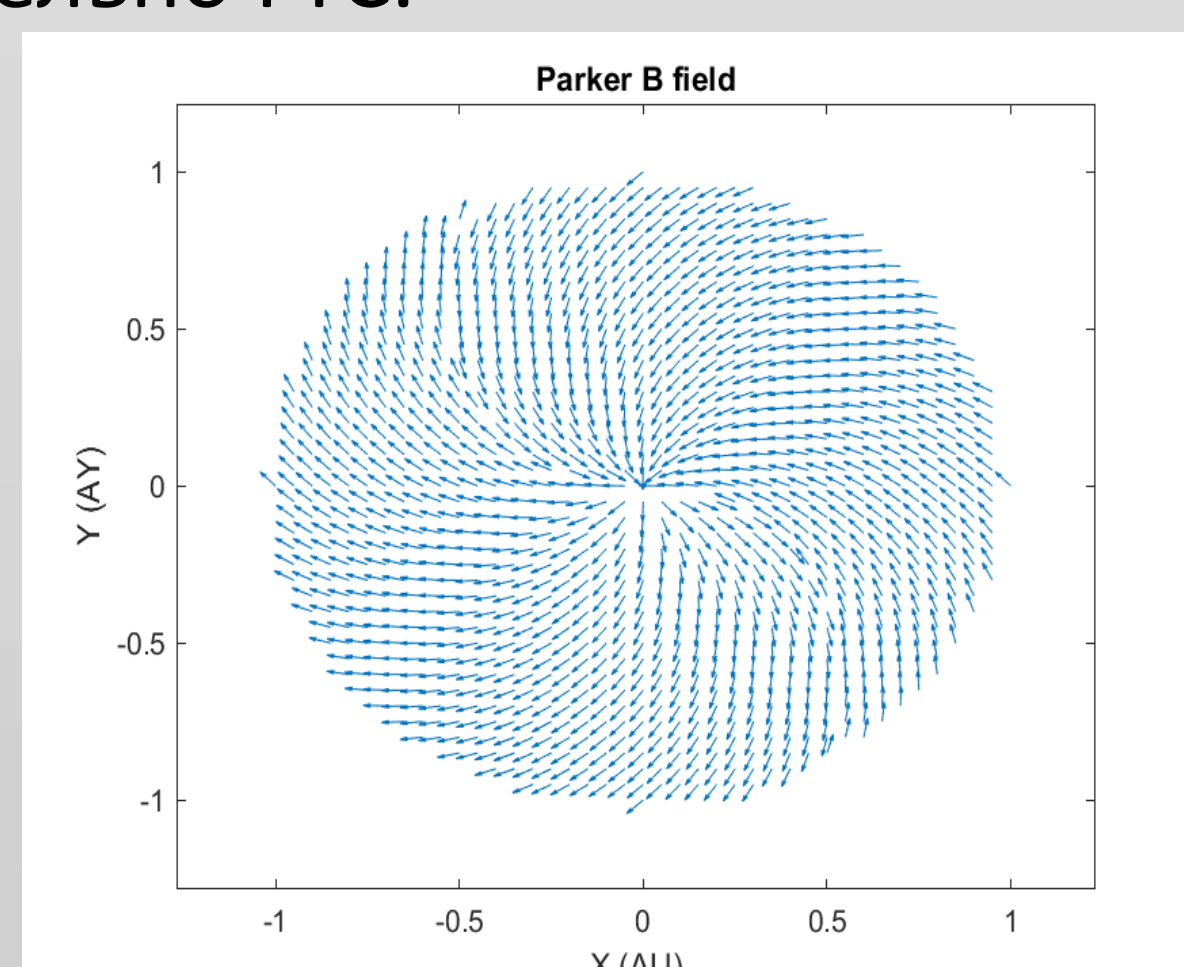


рис. 1

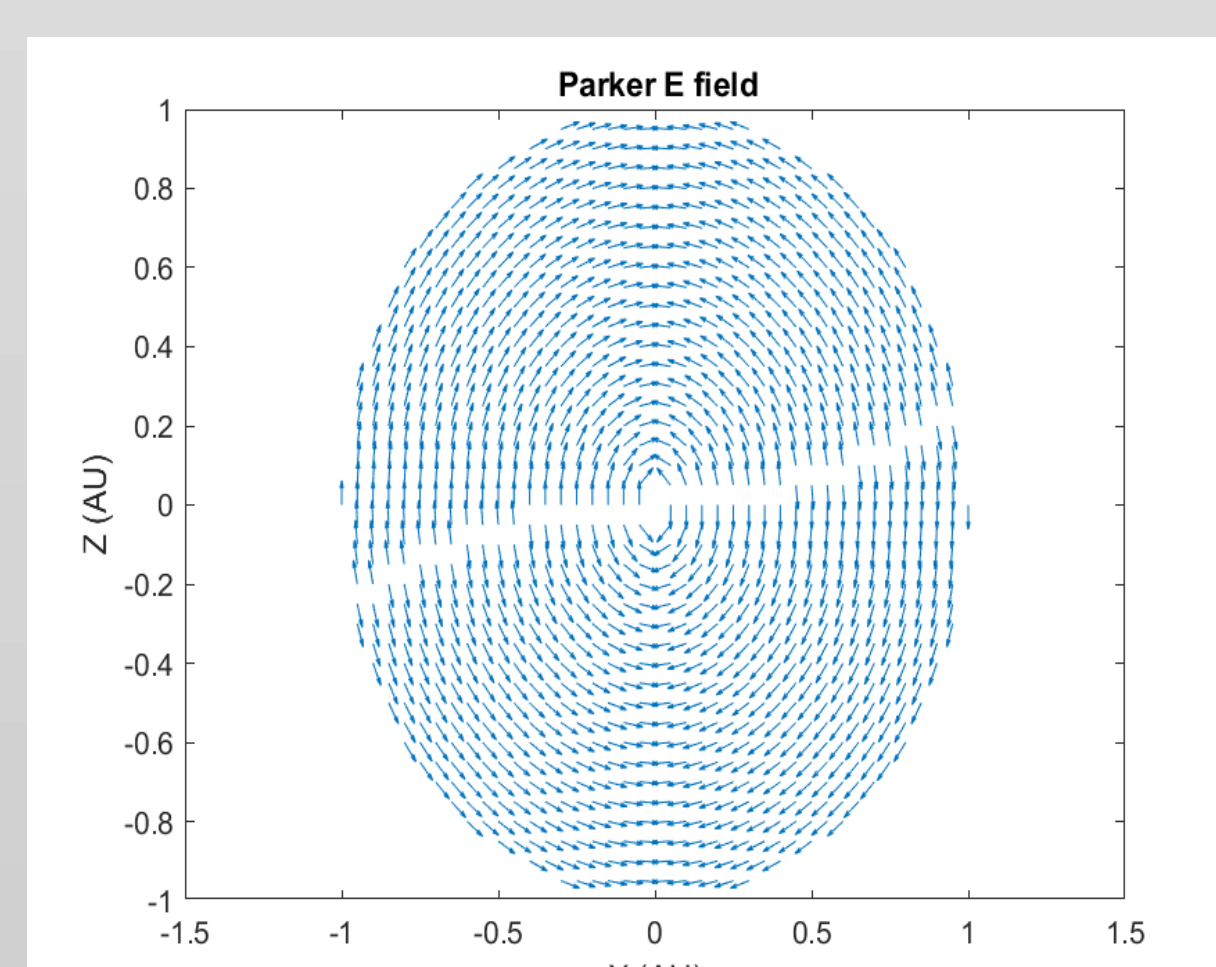


рис. 2

Построены визуализации карт магнитного поля в плоскости магнитного экватора (рис.4) и электрического поля в плоскости  $y=0$  (рис.5).

### Добавление коротящих областей

Используя данные эксперимента ACE за 2008 год было определено значение  $B_0$  на  $r_0 = 1$  а.е. (рис. 3). Были введены коротящие области в предположении, что они имеют вид спирали Паркера и равные полярные и азимутальные размеры. Эти размеры взяты из анализа данных ACE. На рисунке 4 показана одна такая область, размерность осей астрономическая единица. В результате были получены зависимости показанные на рисунках 5 и 6, для радиальной компоненты и модуля магнитного поля в плоскости магнитного экватора и радиуса 1а.е.

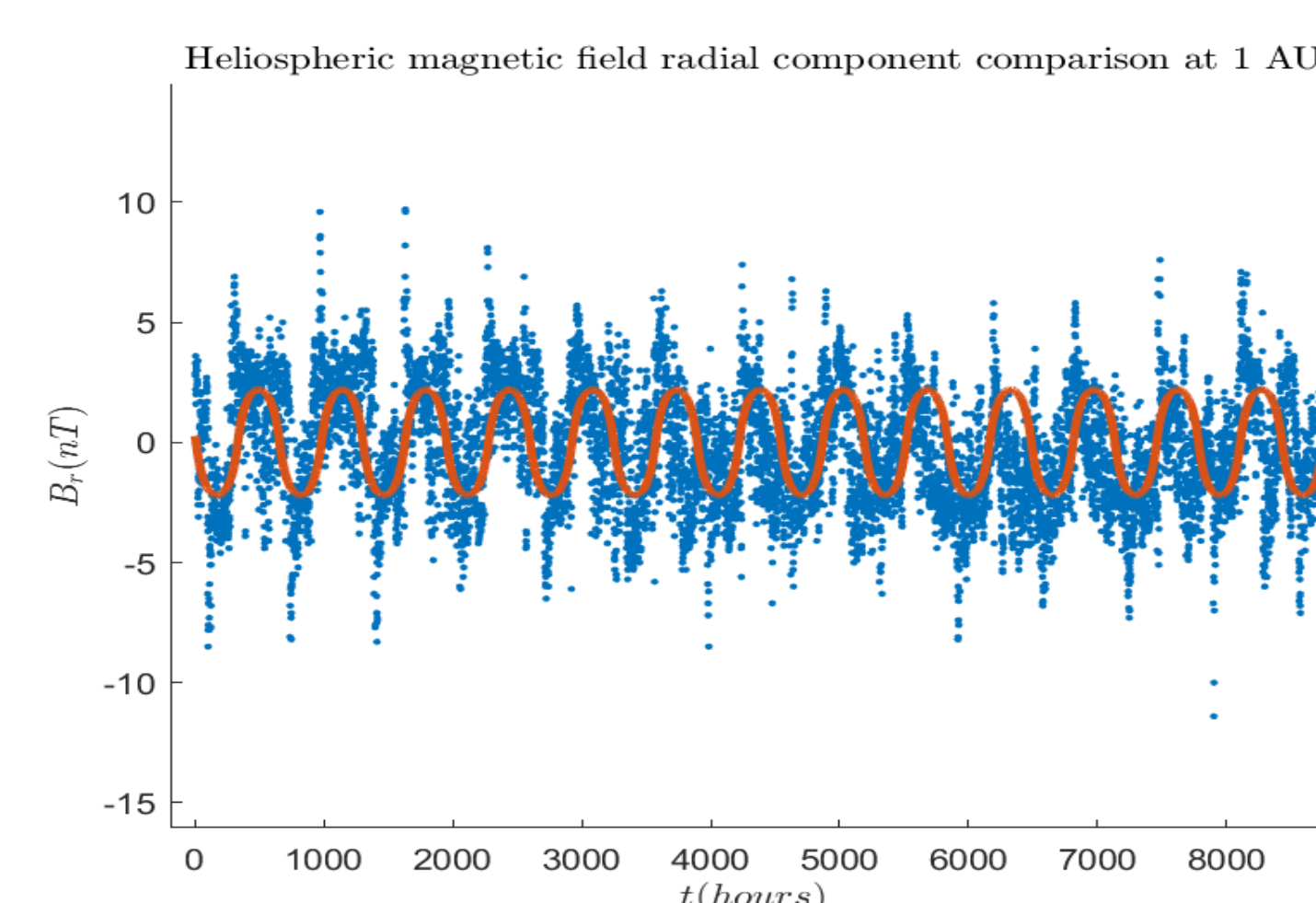


рис. 3

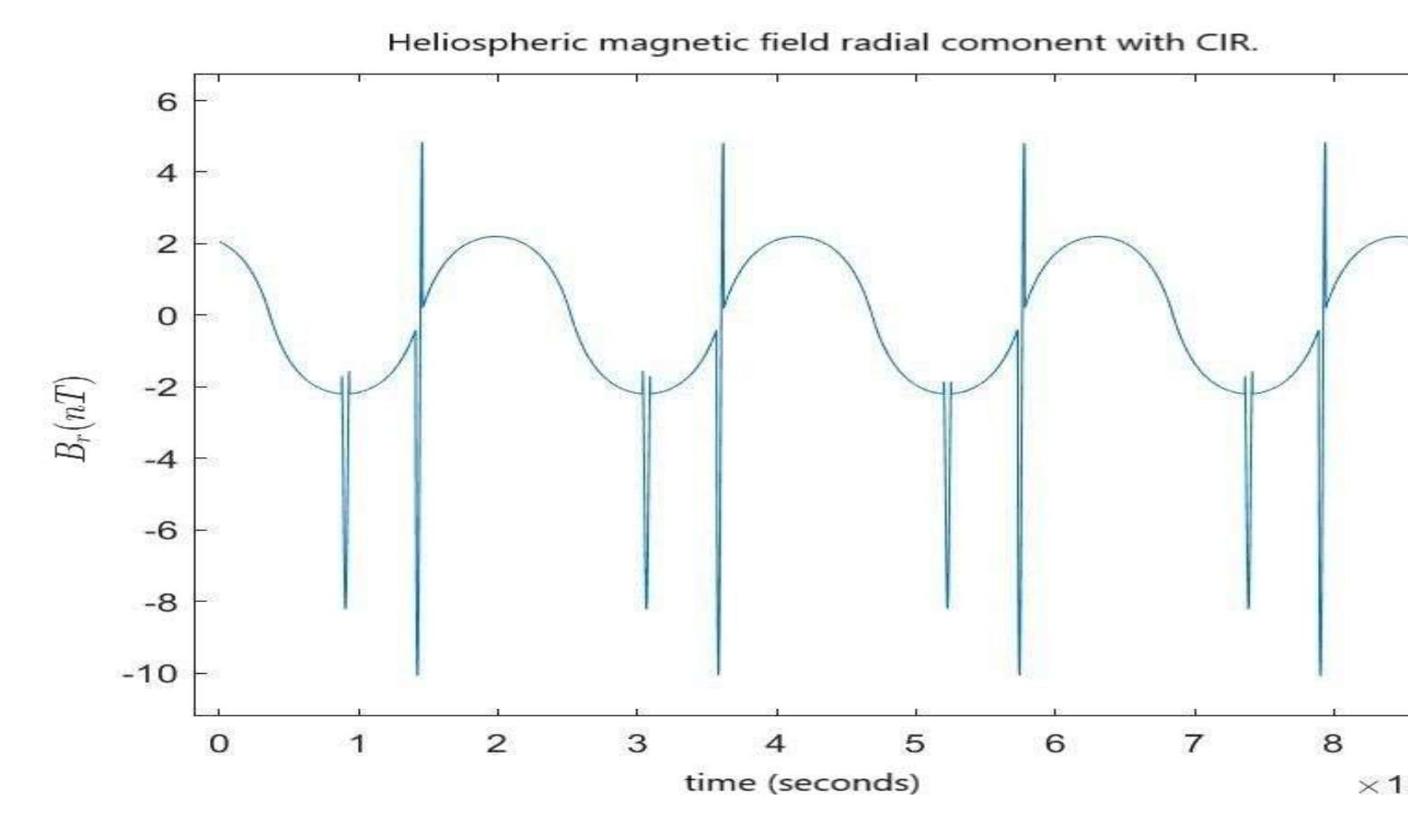


рис. 5

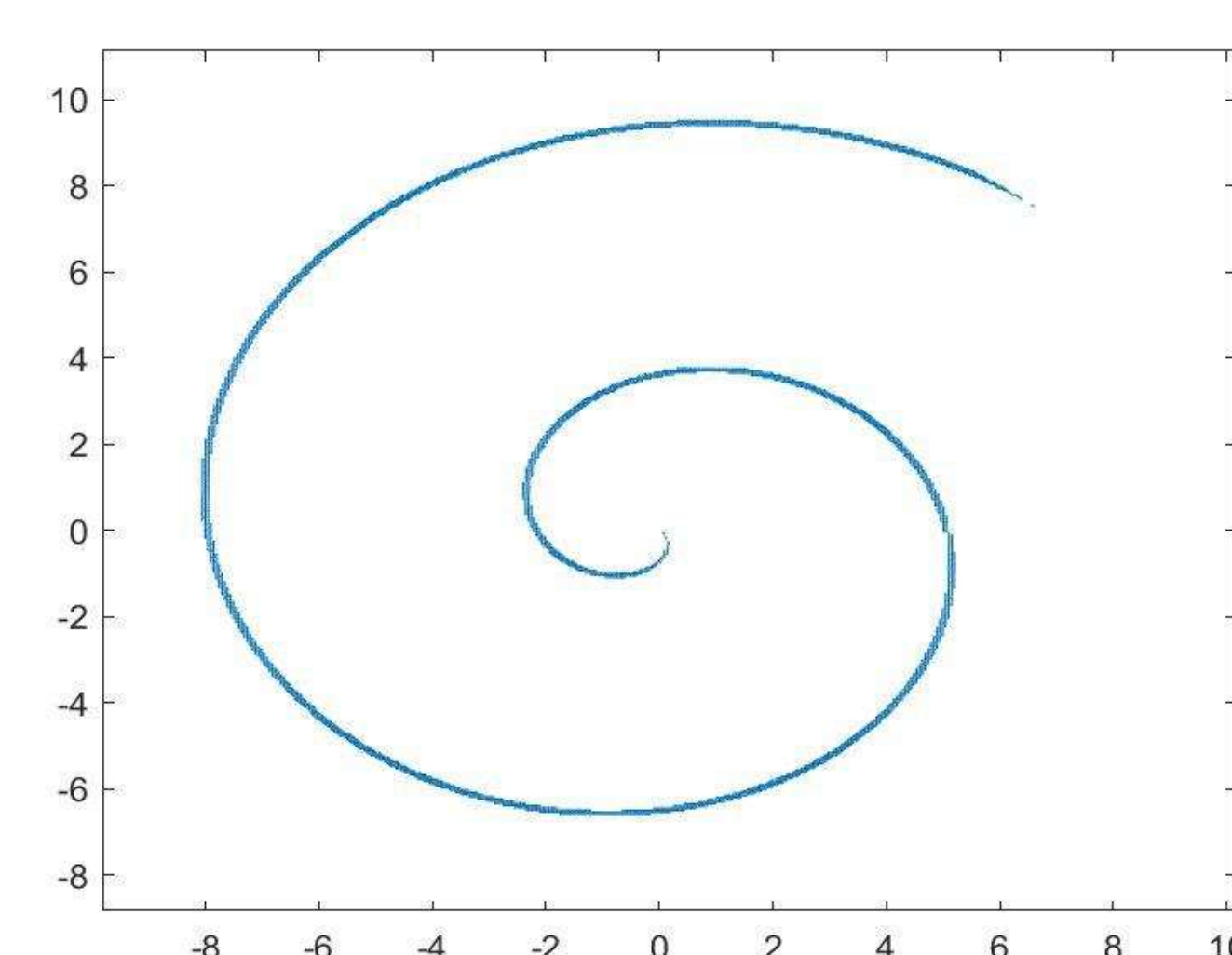


рис. 4

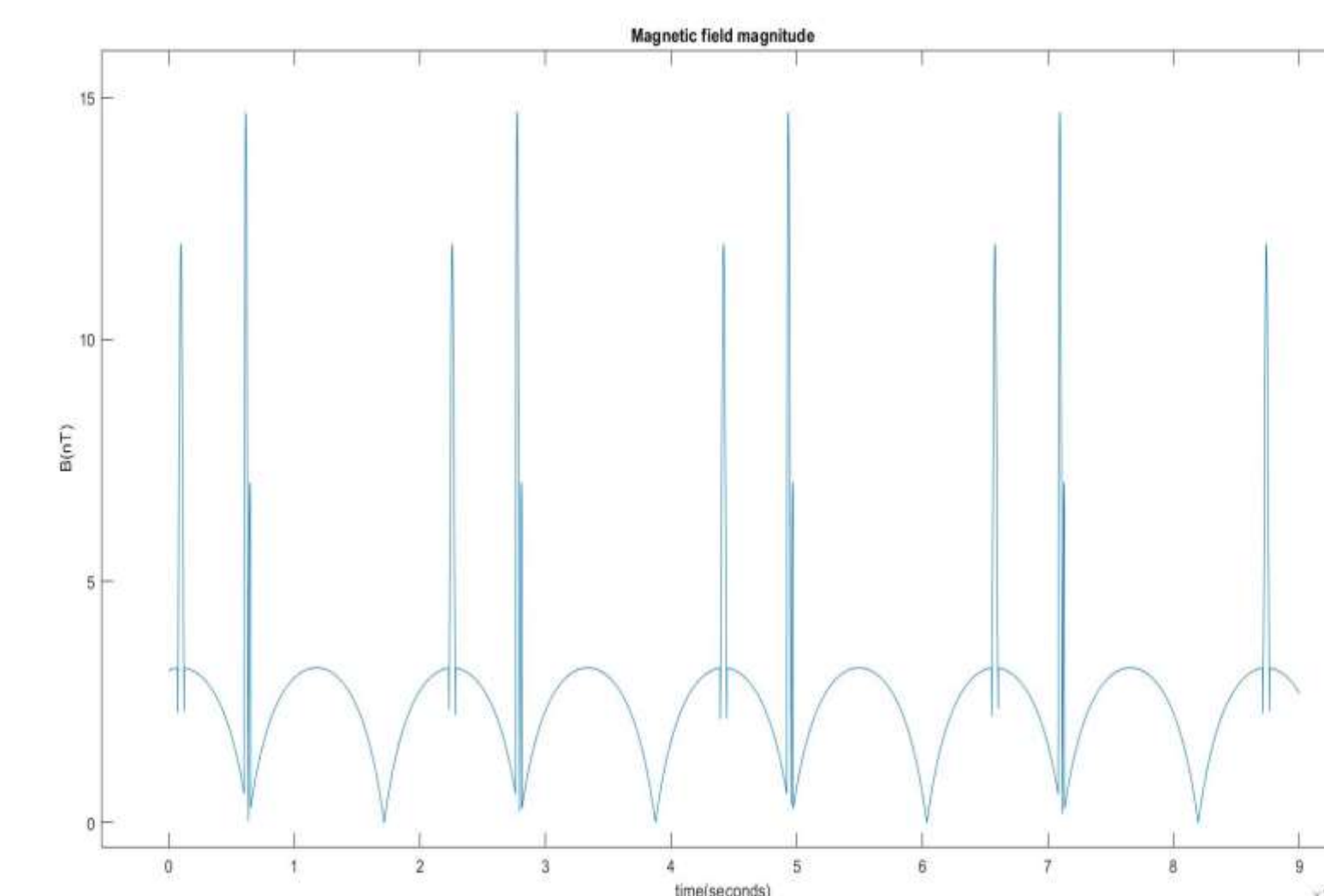


рис. 6

### Моделирование распространения частиц в гелиосфере

На границе гелиосферы генерируются протоны соответствующие однородному и изотропному распределению, с распределением энергии соответствующим локальному межзвездному энергетическому спектру [3], и осуществляется их трассировка.

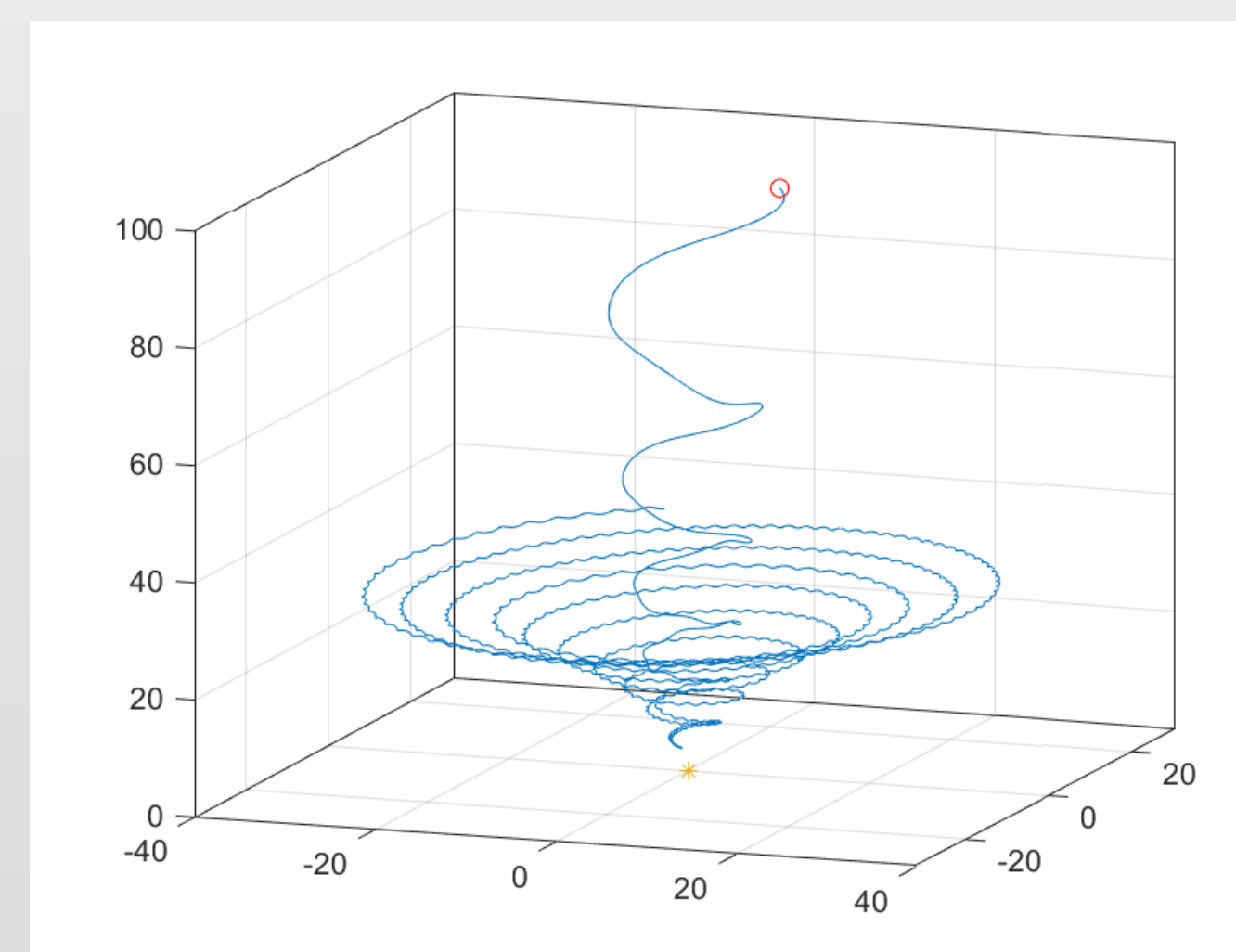


рис. 7

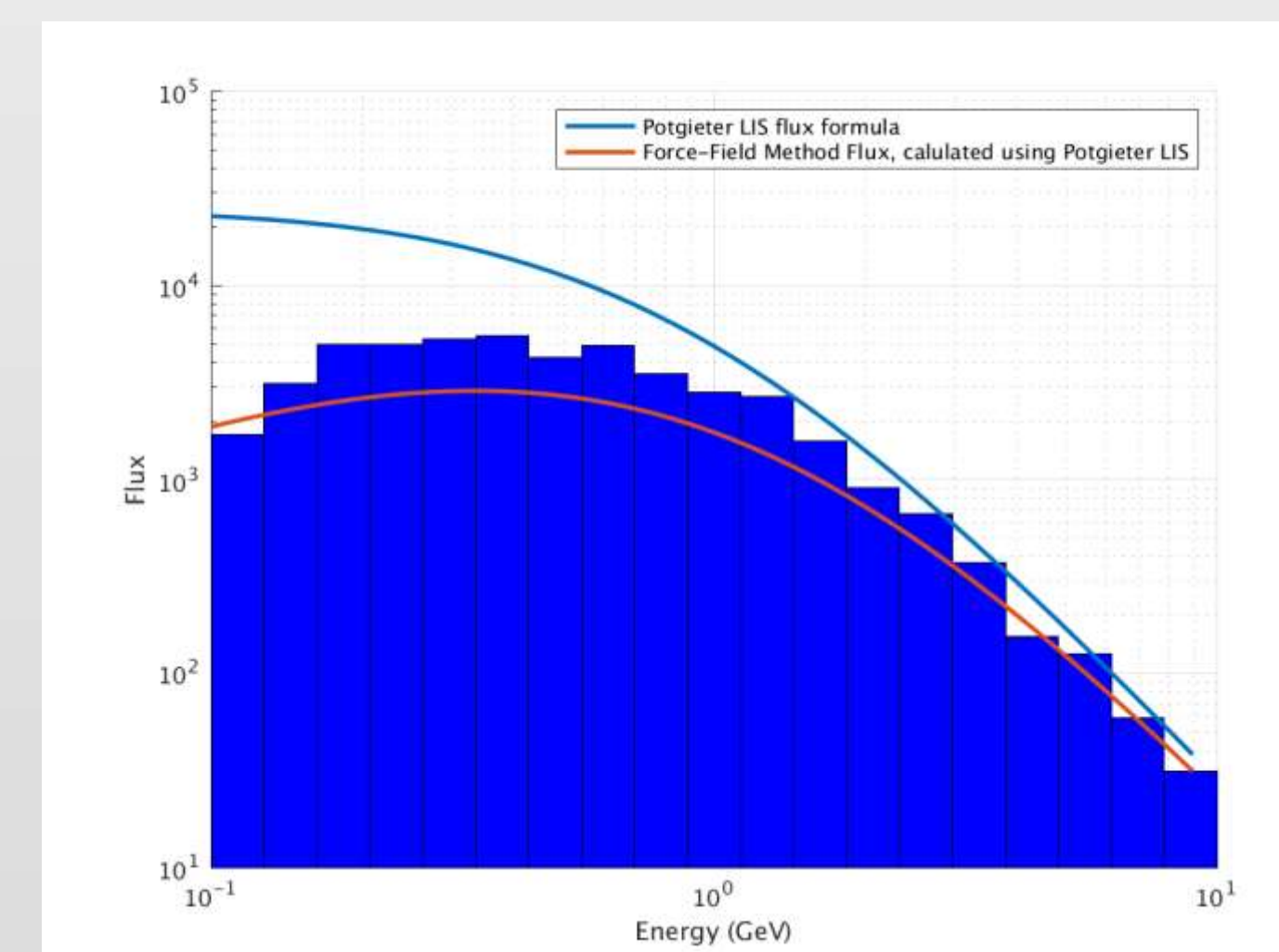


рис. 8

На рисунке 7 показан пример трассировки протона энергии 1 ГэВ. Красным кружочком показано начальное положение частицы, звездочкой солнце, размерность осей астрономическая единица.

Построен энергетический спектр протонов долетевших до сферы с радиусом 1 а.е. с центром в Солнце (гистограмма на рис. 8). Также для сравнения на рисунке 8 построен локальный межзвездный энергетический спектр протонов [3] (синяя линия), и рассчитан энергетический спектр протонов на 1 а.е. с использованием модели силового поля (оранжевая линия). Из рисунка видно, что происходит модуляция энергетического спектра, что свидетельствует о работоспособности нашей модели.

### Результат

На границе гелиосферы генерированы протоны соответствующие однородному и изотропному распределению, и начальной энергии 1 ГэВ, и была произведена их трассировка. В результате были отобраны протоны долетевшие до сферы с радиусом 1 а.е. с центром в Солнце. Построено распределение протонов по азимутальному углу, что эквивалентно 27 дням (рис. 9).

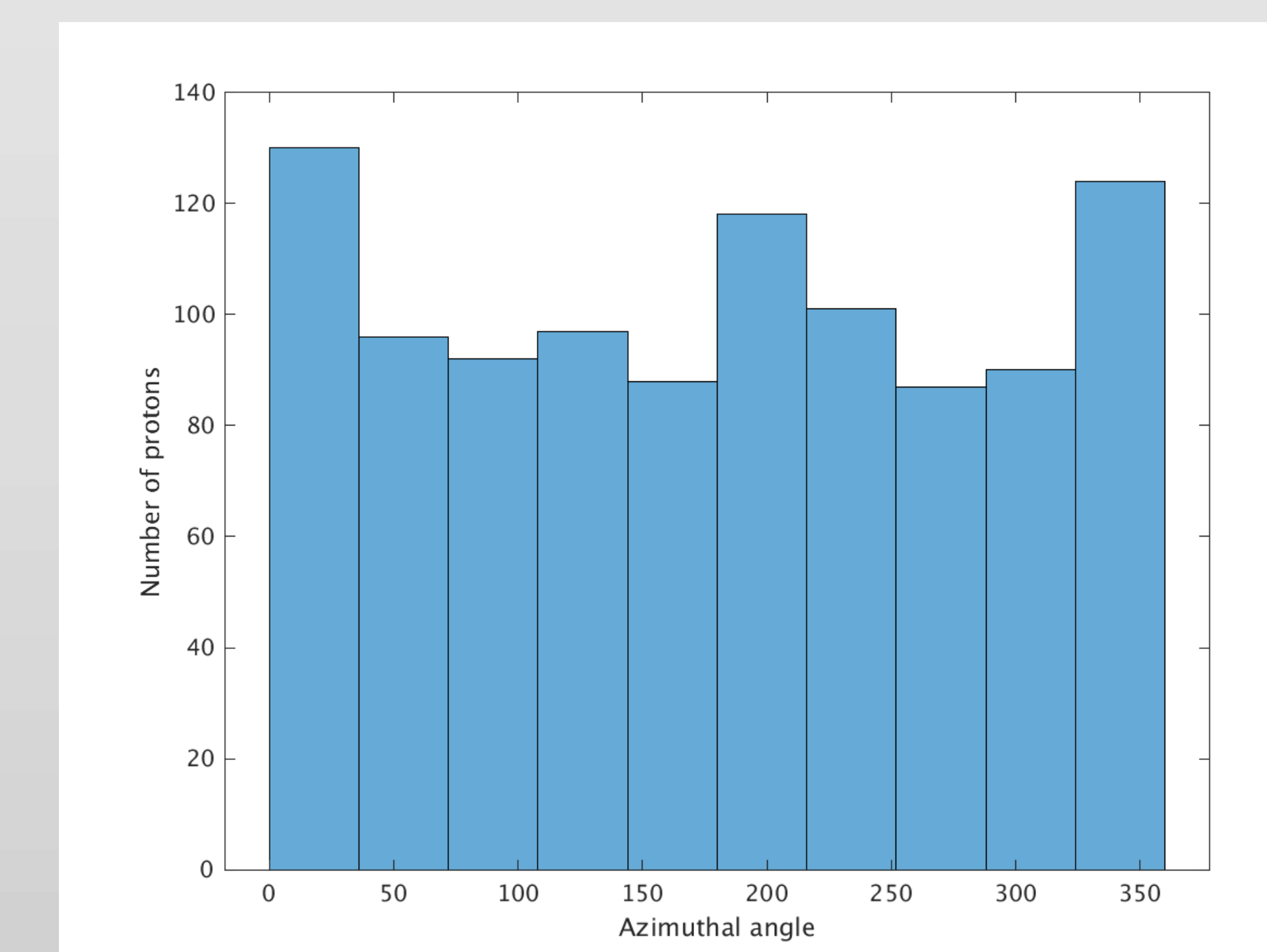


рис. 9

В результате были получены 14-дневные вариации потока протонов.

### Вывод и дальнейшая работа

Полученные результаты требуют дальнейшего анализа и сравнения с экспериментальными данными, также требуется моделирование других энергий и анализ амплитуды вариаций.

Важно научиться распознавать другие случаи возникновения вариаций, поскольку такой результат поможет лучше понять как различные эффекты происходящие в гелиосфере влияют на распространение ГКЛ.

### Список литературы

1. I. K. Troitskaya, A. G. Mayorov, V. V. Malakhov, R. Modzelewska, and S. A. Rodenko // ISSN 1062-8738, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2019, Vol. 83, No. 5, pp. 576–578.
2. C. Pei, J. W. Bieber, R. A. Burger, and J. Clem // The Astrophysical Journal, 744:170 (5pp), 2012 January 10
3. D. Bisschoff, M.S. Potgieter: // Astrophys Space Sci (2016) 361:48.
4. Paolo Lipari // INFN, sezione di Roma, Piazzale Aldo Moro 2, 00185 Roma, Italy, August 2, 2014.