

Оценка гелиоширотного градиента галактических космических лучей на орбите Земли в 19-25 циклах солнечной активности по данным наземных детекторов

П.Ю. Гололобов, В.Г. Григорьев, С.К. Герасимова

Институт космofизических исследований и аэрoнoмии им. Ю.Г. Шaфepa
CO PAH

10 июля 2023 г.

e-mail: gpeter@ikfia.ysn.ru

Абстракт

Наблюдаемая на Земле суточная анизотропия ГКЛ определяется их конвекцией, диффузией, дрейфом в ММП, а также наличием радиального и гелиоширотных градиентов плотности ГКЛ. На основе теоретически ожидаемых вкладов каждого вышеуказанного процесса в образование суточной анизотропии и данных прямых измерений параметров межпланетной среды удается определить параметры гелиосферной модуляции ГКЛ. На основе анализа экспериментальных данных комплексом аппаратуры Якутского спектрографа космических лучей им. А.И. Кузьмина определен временной ход гелиоширотного градиента ГКЛ в области энергий 2-300 ГэВ за 1953-2020 гг. Показано, что гелиоширотный градиент обнаруживает зависимость от полярности общего магнитного поля Солнца и, таким образом, подтверждает актуальные представления о дрейфе ГКЛ в гелиосфере.

Введение

[Bieber & Chen, ApJ, 1991] Вектор анизотропии КЛ ($\vec{\xi} = (\xi_x, \xi_y, \xi_z)$) в межпланетной среде в сферической системе координат с осью z направленной на Солнце должен описываться следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\xi_x &= \xi_c \sin\chi - \lambda_{\perp} G_r \sin\chi + \rho G_{\theta} \operatorname{sgn}(B) \\ \xi_y &= \operatorname{sgn}(B) \rho G_r \sin\chi + \lambda_{\parallel} G_{\theta} \\ \xi_z &= \xi_c \cos\chi - \lambda_{\parallel} G_r \cos\chi,\end{aligned}$$

Где χ - угол между направлением ММП и линией Солнце-Земля; G_r и G_{θ} - радиальный и гелиоширтовый градиенты КЛ; λ_{\parallel} и λ_{\perp} - длина свободного пробега частиц вдоль и поперек поля; $\xi_c = 3CV_{cb}/c$ - Комптон-Геттинг анизотропия ($C = 1.5$); ρ - гирорадиус; $\operatorname{sgn}(B) = +1(-1)$ для направлений ММП от (к) и Солнцу.

Методика исследования

Вектор солнечно-суточной анизотропии КЛ в межпланетном пространстве и наблюдаемые наземными детекторами суточные вариации взаимосвязаны следующим выражением:

$$\xi_{\perp} = \xi_x - \xi_c \sin \chi = -\lambda_{\perp} G_r \sin \chi + \rho G_{\theta} \operatorname{sgn}(B) =$$

$$- \eta_{CCB} G(P) \sin(\chi + t_R) + \eta_{CG} \cos \chi - \eta_c \sin \chi$$

$$\xi_{\parallel} = \xi_z - \xi_c \cos \chi = -\lambda_{\parallel} G_r \cos \chi =$$

$$- \eta_{CCB} G(P) \cos(\chi + t_R) - \eta_{CG} \sin \chi - \eta_c \cos \chi$$

где **правые половины выражений** определяются по данным наземных детекторов КЛ с использованием метода приемных векторов [Крымский и др., ГиА, 1967; Fujimoto et al., RCRRL, 1987].

Методика исследования

Вклад симметричной $G_{\theta}^{\text{симм}}$ и асимметричной $G_{\theta}^{\text{асимм}}$ составляющих гелиоширотного градиента различен при смене знака ММП, что позволяет выделять эти составляющие отдельно друг от друга.

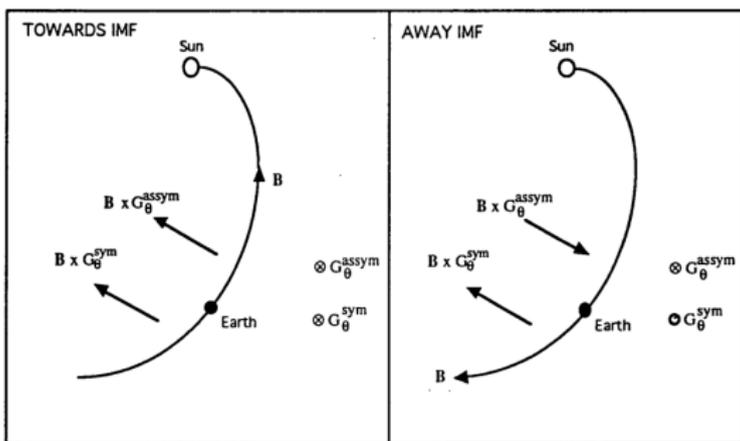


Рис. 1: Наблюдаемый на Земле ток КЛ при асимметричной гелиоширотном градиенте ($\vec{B} \times \vec{G}_{\theta}^{\text{асимм}}$) имеет противоположные направления в разных секторах ММП.

Симметричный гелиоширотный градиент ($\vec{B} \times \vec{G}_{\theta}^{\text{симм}}$), напротив, сохраняет свое направление [Hall et al., 1995]

Методика исследования

Моменты перехода Земли от одного сектора ММП к другому определяются при помощи синоптических карт. В частности, используется каталог Свалгаарда <http://wso.stanford.edu/synsourcel.html>.

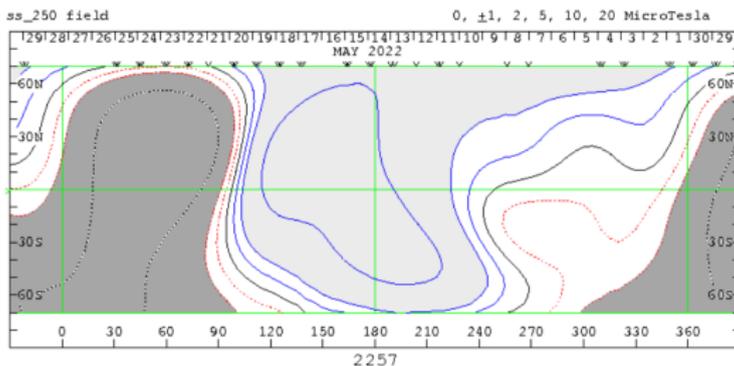


Рис. 2: Синоптическая карта солнечных магнитных полей на расстоянии $2.5 R_S$ согласно каталогу обсерватории Вилкокса <http://wso.stanford.edu/synsourcel.html>.

Методика исследования

Разделяя параметры анизотропии измеренные в положительных и отрицательных секторах ММП (ξ^+ и ξ^-) из представленных выше выражений получаем следующие соотношения

$$\frac{\xi_{\perp}^+ - \xi_{\perp}^-}{2} = -\rho G_{\theta}^{\text{асимм}} \cos\chi \quad [\text{Ahluwalia, ASR, 2015}]$$

$$\frac{\xi_{\perp}^+ + \xi_{\perp}^-}{2} = -\overline{\lambda_{\perp}} G_{\text{r}} \sin\chi - \rho(G_{\theta}^+ - G_{\theta}^-) = -\overline{\lambda_{\perp}} G_{\text{r}} \sin\chi - \rho(G_{\theta}^{\text{симм}})$$

$$\frac{\xi_{\parallel}^+ + \xi_{\parallel}^-}{2} = -\overline{\lambda_{\parallel}} G_{\text{r}} \cos\chi$$

$$\frac{\lambda_{\perp}}{\lambda_{\parallel}} = 0.01 \quad [\text{Bieber Chen, ApJ, 1991}]$$

Полученные результаты

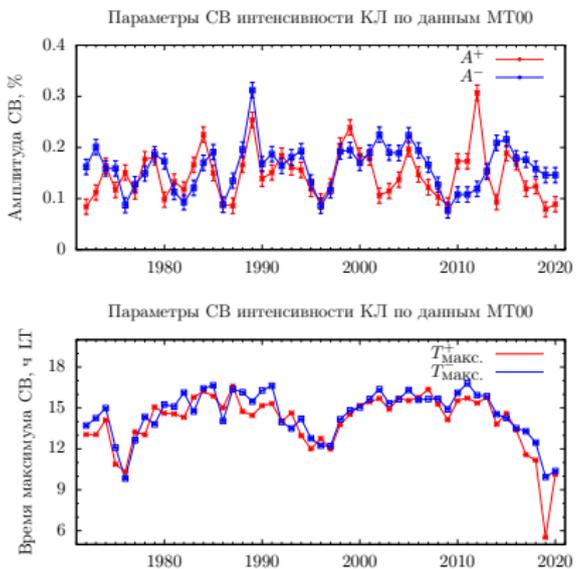


Рис. 3: Амплитуда и фаза суточных вариаций интенсивности КЛ зарегистрированных мюонным телескопом 0 м в.э. (МТ00) Якутского спектрографа КЛ им. А.И. Кузьмина за 1972-2020 гг. в положительной и отрицательной секторах ММП

Полученные результаты

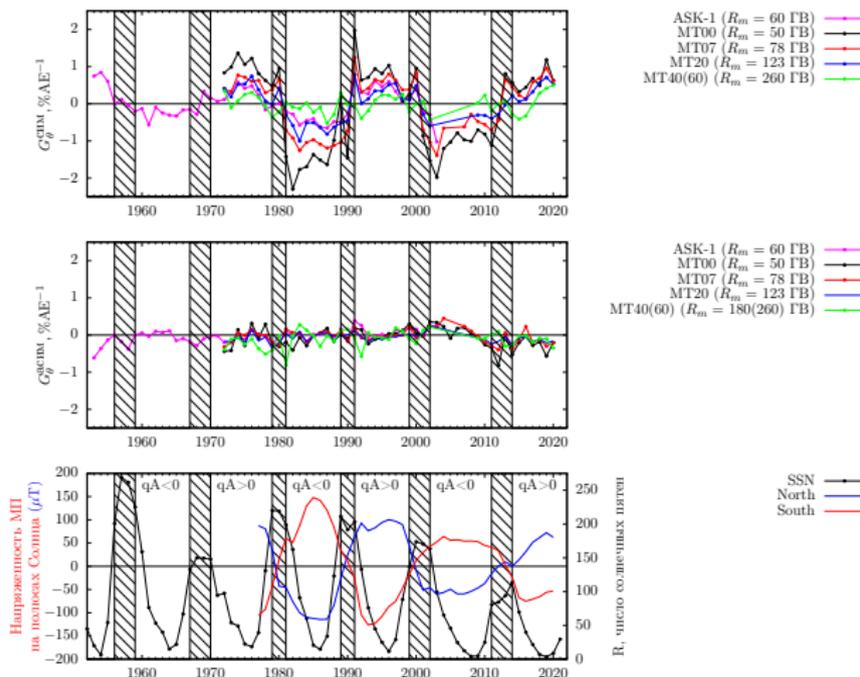


Рис. 4: Результаты расчета симметричного ($G_{\theta}^{\text{сим}}$) и антисимметричного ($G_{\theta}^{\text{асим}}$) гелиоширотных градиентов КЛ по данным Якутского спектрографа КЛ за 1953-2020 гг.

Дрейф ГКЛ в гелиосфере

Согласно современным представлениям направление дрейфа ГКЛ в гелиосфере определяется полярностью ОМПС. Так дрейф ГКЛ в эпоху положительной полярности ОМПС направлен с высоких широт к низким, а в эпоху отрицательной полярности наоборот, к низким широт к высоким. Этим и объясняется обнаруженная нами зависимость гелиоширотного градиента ГКЛ G_θ от полярности ОМПС.

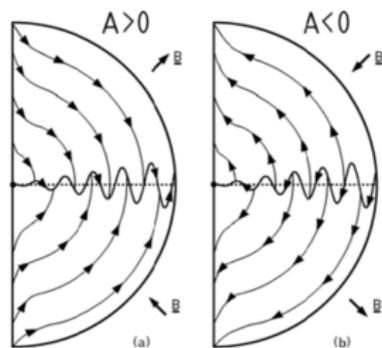


Рис. 5: Схематическое изображение характера дрейфа положительно заряженных частиц при положительной ($A > 0$) и отрицательной ($A < 0$) полярностях ОМПС [Potgieter, *Living Rev. Solar Phys.*, 2013]

Заключение

- По данным измерений Якутского спектрографа КЛ им. А.И. Кузьмина произведена оценка величины симметричного и антисимметричного гелиоширотных градиентов ГКЛ в гелиосфере в области энергий от 50 до 260 ГэВ за 1953-2020 гг.;
- Полученные результаты подтверждают существующие на сегодняшний день представления о дрейфе ГКЛ в гелиосфере;
- Последующий анализ полученной энергетической зависимости G_{θ} будет полезен в развитии теории гелиосферной модуляции ГКЛ.
Работа выполнена в рамках госзадания ИКФИА СО РАН, регистрационный номер ЕГИСУ НИОКТР 122011700180-7.