

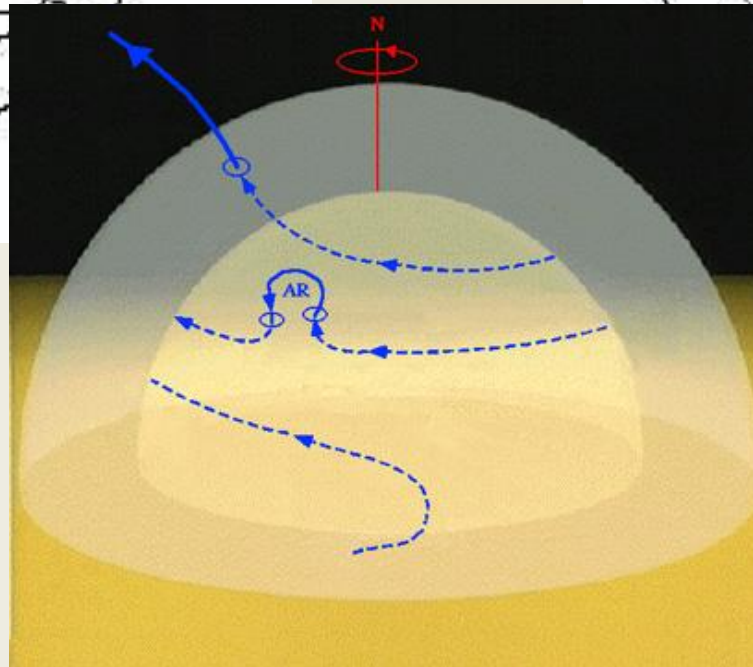
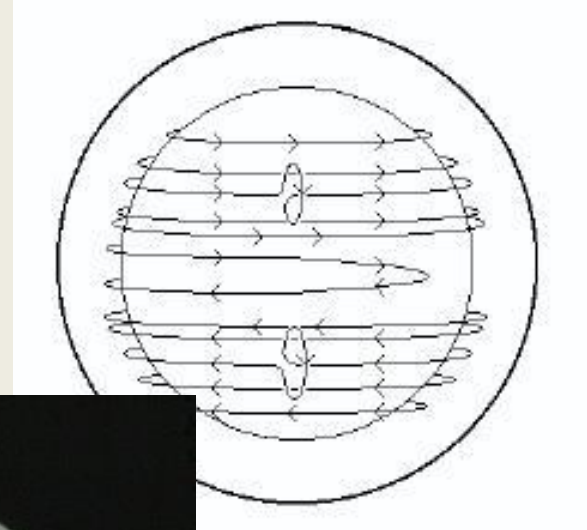
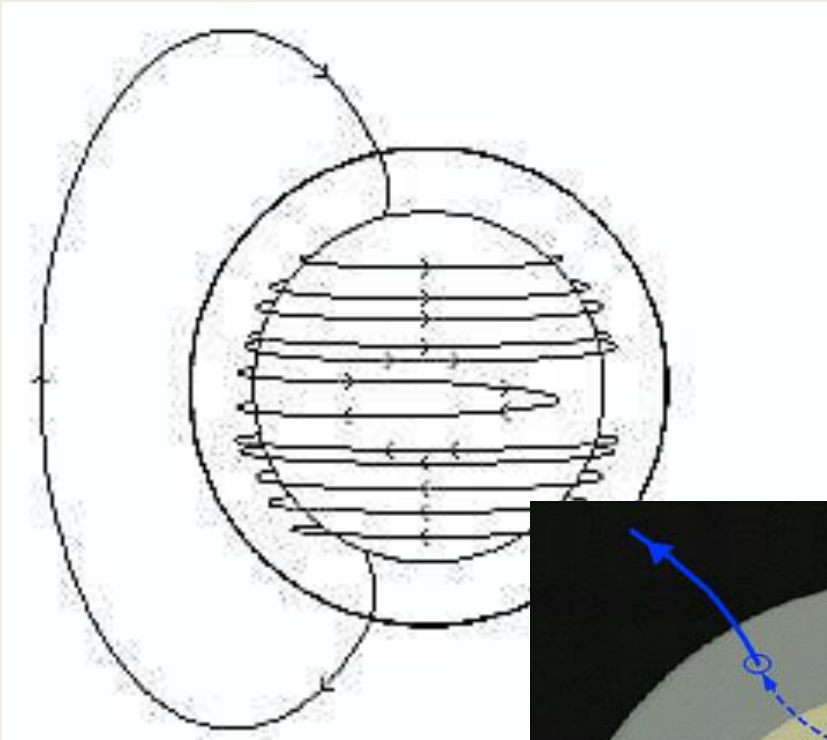
О причинах и механизмах образования долговременных вариаций характеристик ГКЛ в гелиосфере

Крайнев М.Б., ФИАН

Основные вопросы:

1. Соотношение на Солнце и в гелиосфере магнитных полей, связанных с тороидальной и полоидальной ветвями солнечной активности.
2. Интенсивность и анизотропия ГКЛ. 11- и 22-летние циклы в этих характеристиках. Представления о причинах этих вариаций.
3. Моделирование долговременных вариаций интенсивности ГКЛ в гелиосфере.
4. Как проверить, и важна ли разница в этих представлениях?

Полоидальные и тороидальные магнитные поля на Солнце



Ω -эффект:

$$B_{pol} \rightarrow B_{\varphi}$$

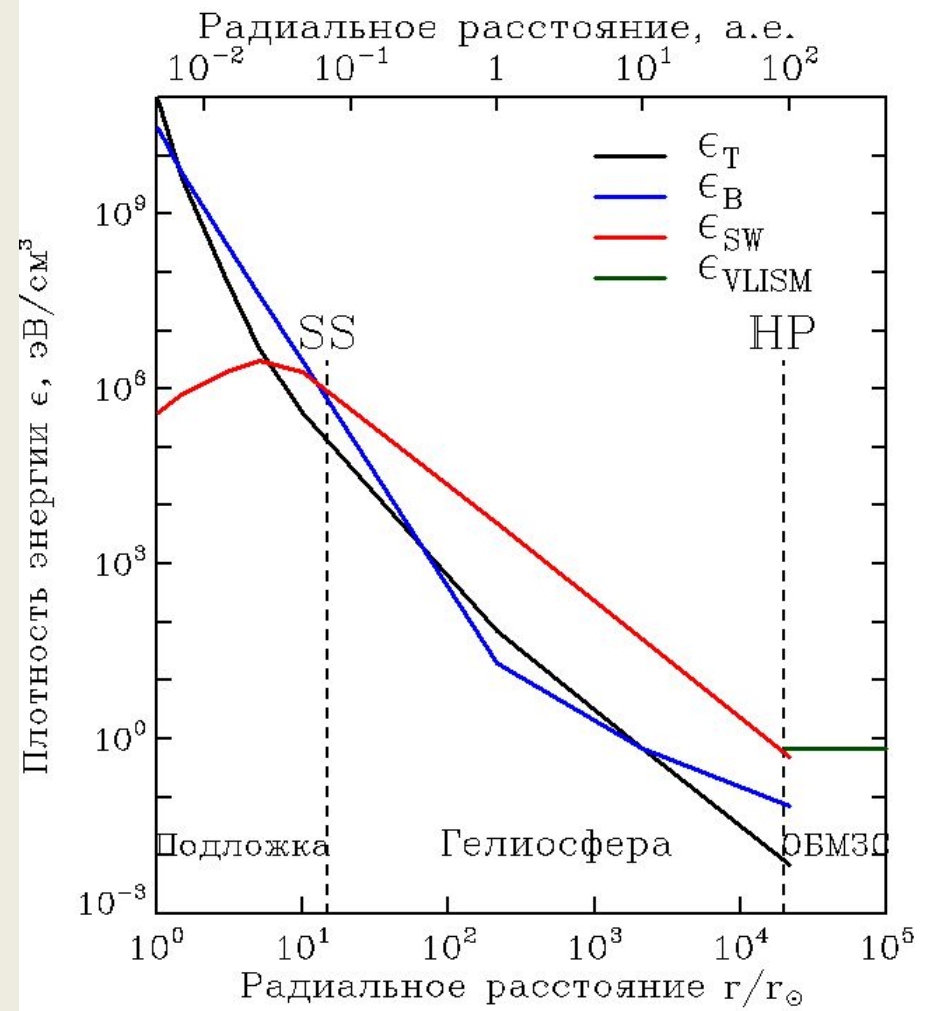
α -эффект:

$$B_{\varphi} \rightarrow B_{pol}$$

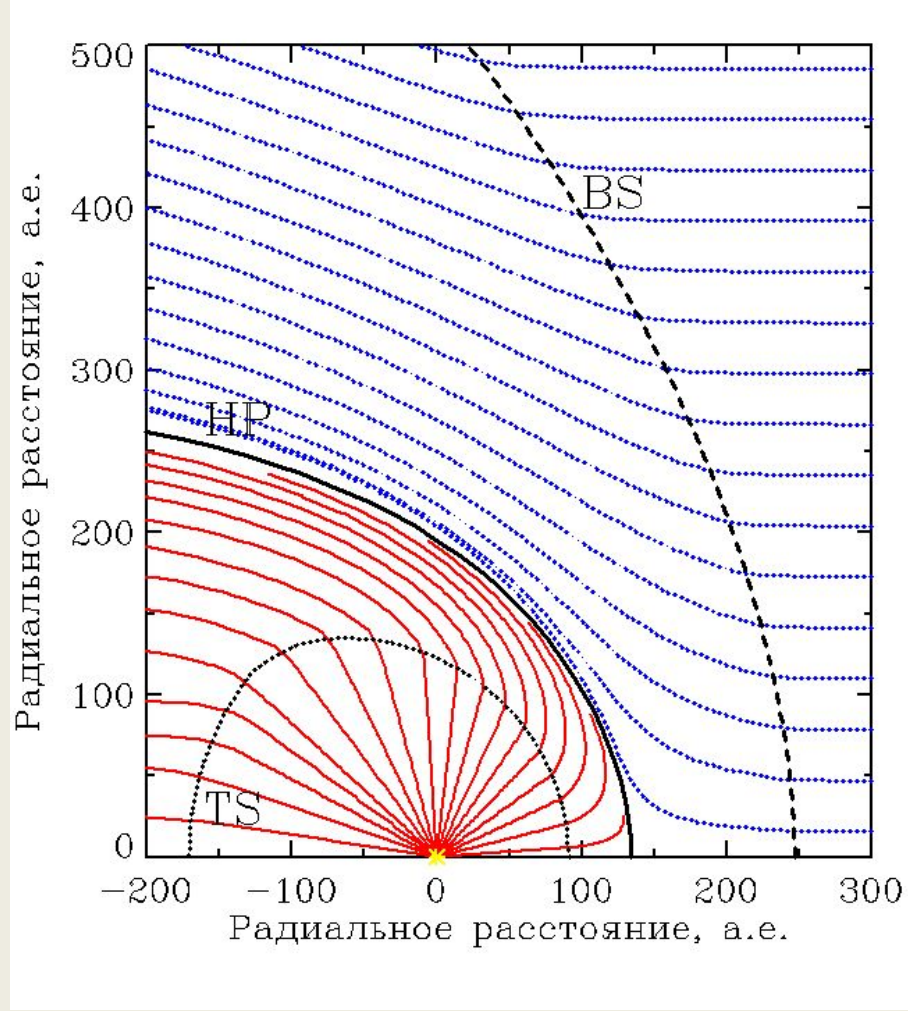
!

$$B_{\varphi} \gg B_{pol}$$

Образование и структура гелиосферы



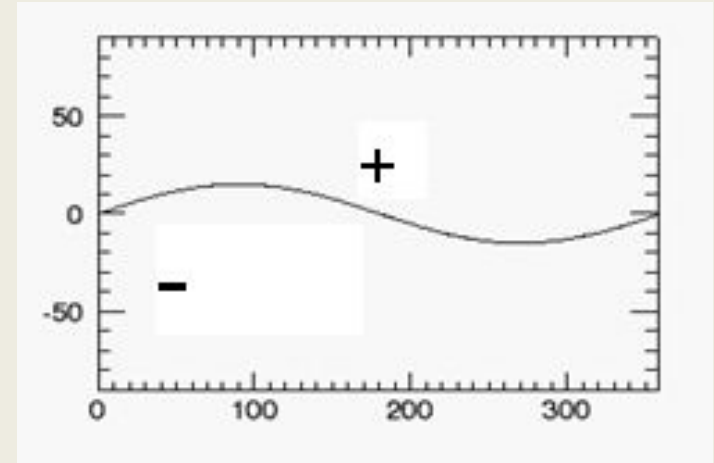
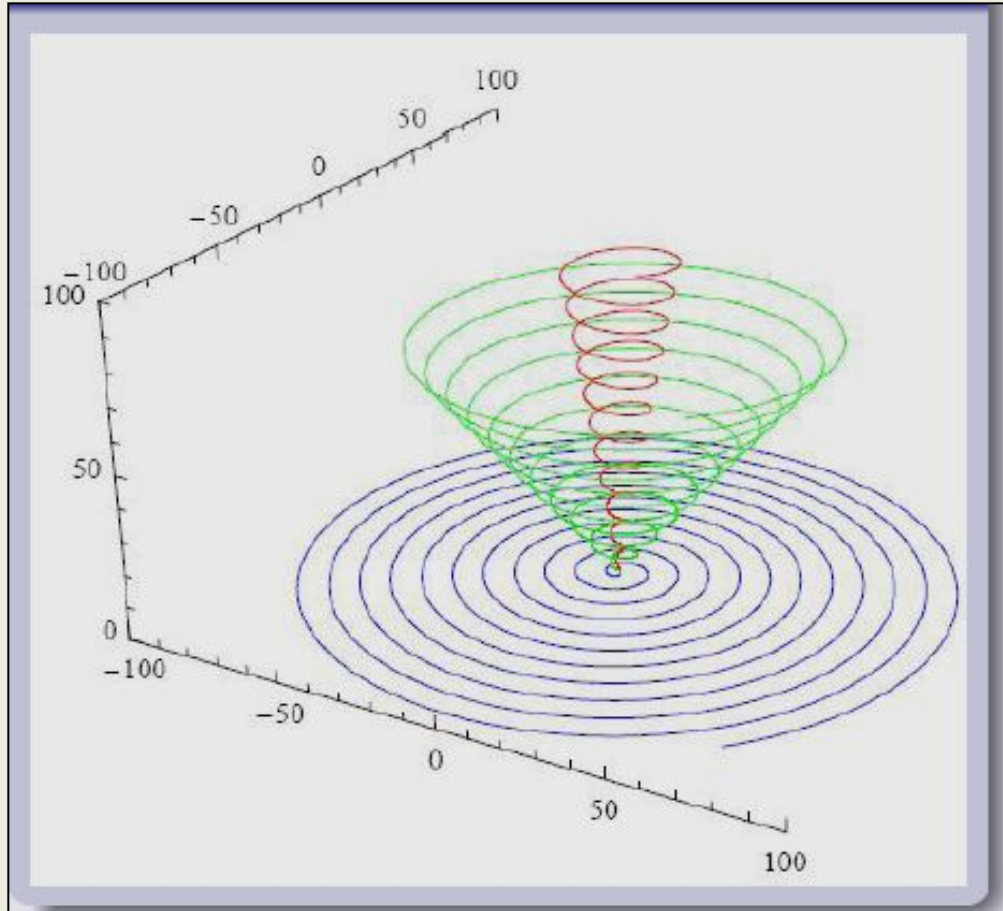
Rossi, Olbert, 1970



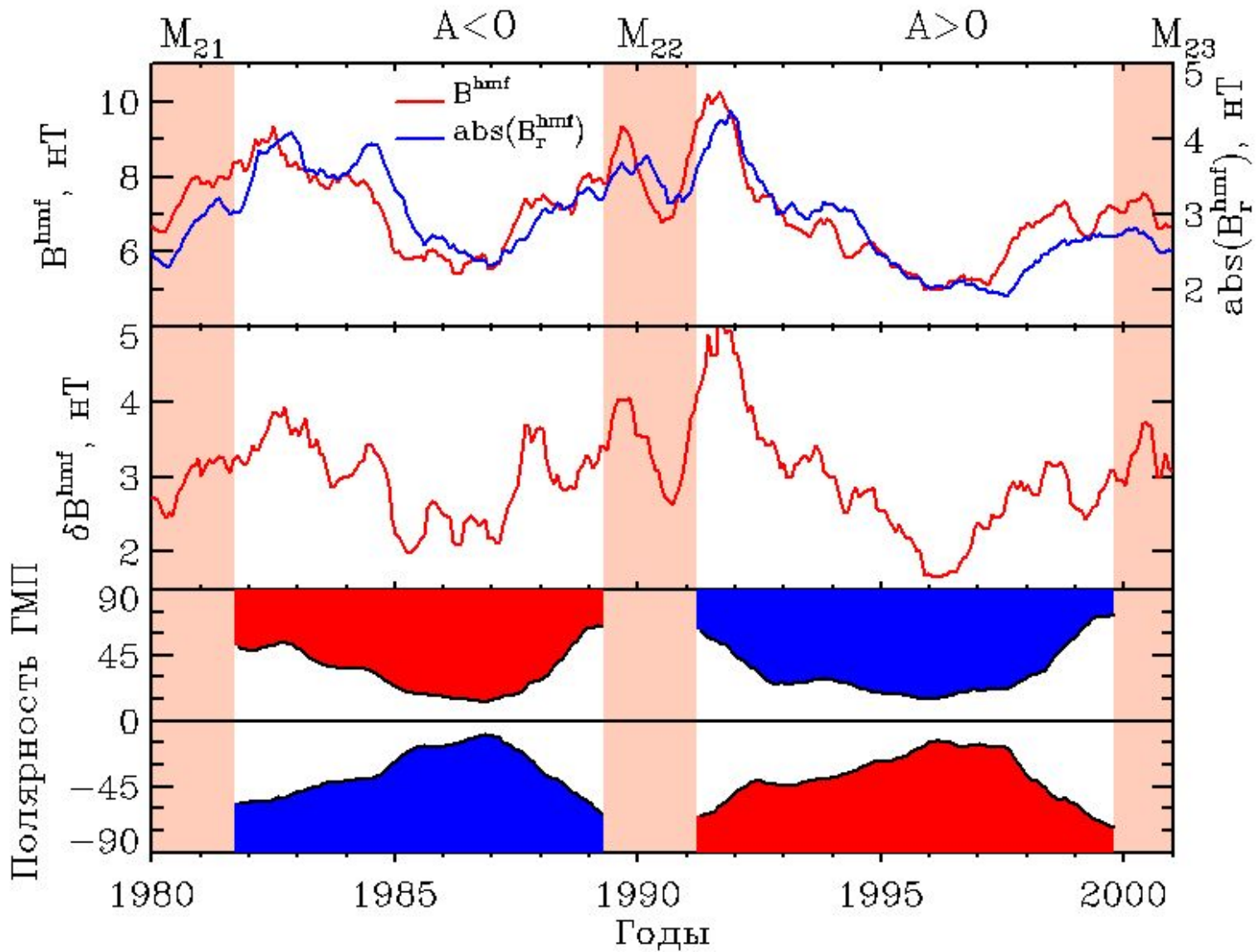
Baranov, Malama., 1993

Регулярное гелиосферное магнитное поле и гелиосферный токовый слой.

$$A = \text{sign}(B_{r,N}) = - \text{sign}(B_{\phi,N})$$



Две ветви солнечной активности в гелиосфере в 1980-2000 гг.



Функция распределения, интенсивность и анизотропия ГКЛ

$$f(\vec{p}) = f(p) \cdot \left(1 + \zeta \frac{\vec{p}}{p} + \dots \right)$$

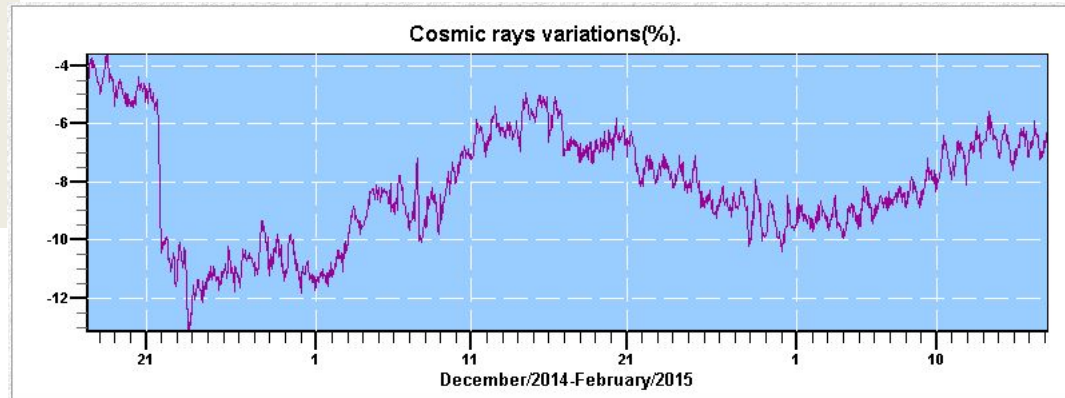
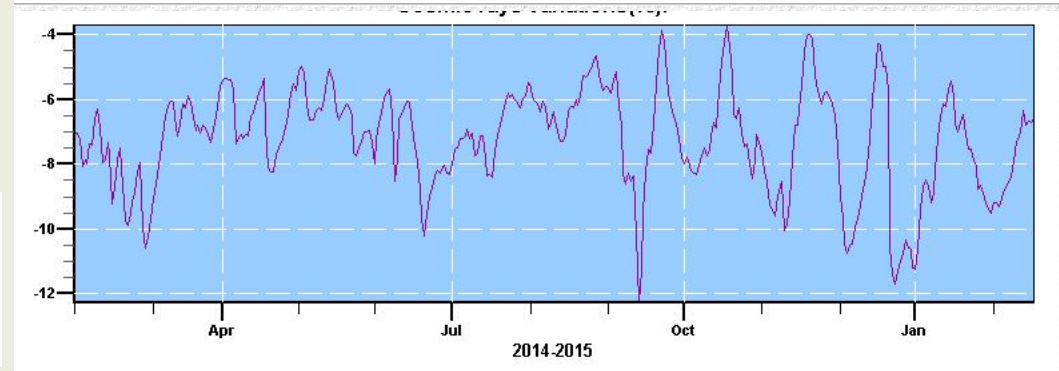
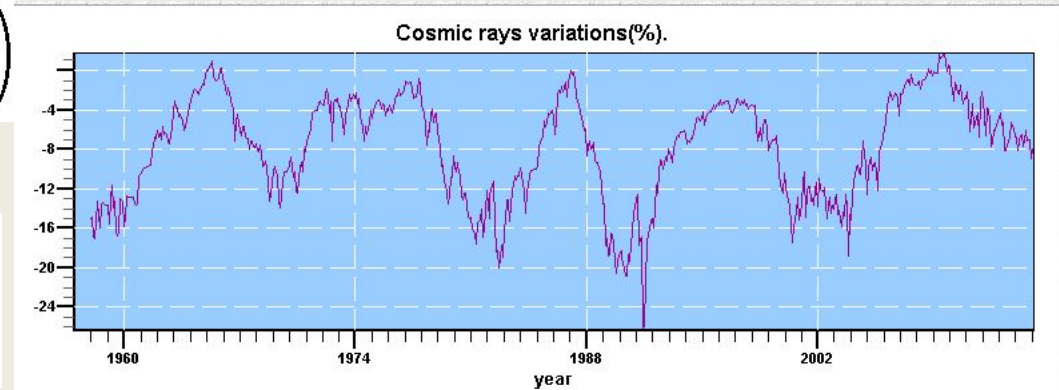
Средне-
месячные

$$f(p) = J(r, \theta, T) / p^2$$

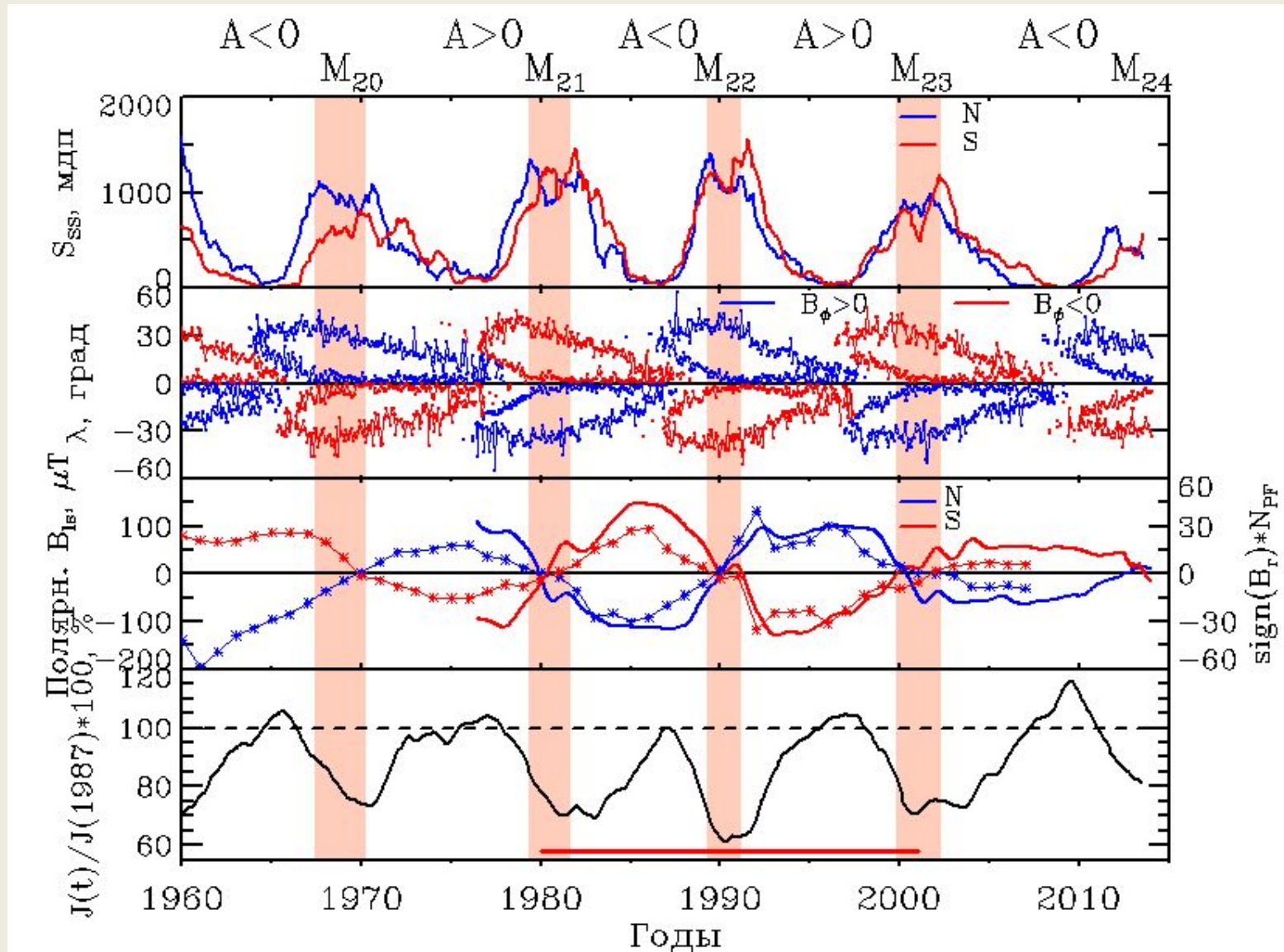
Средне-
суточные

$$\vec{\zeta} \propto -\tilde{K} \nabla f + C_{CG} f \vec{V}^{sw}$$

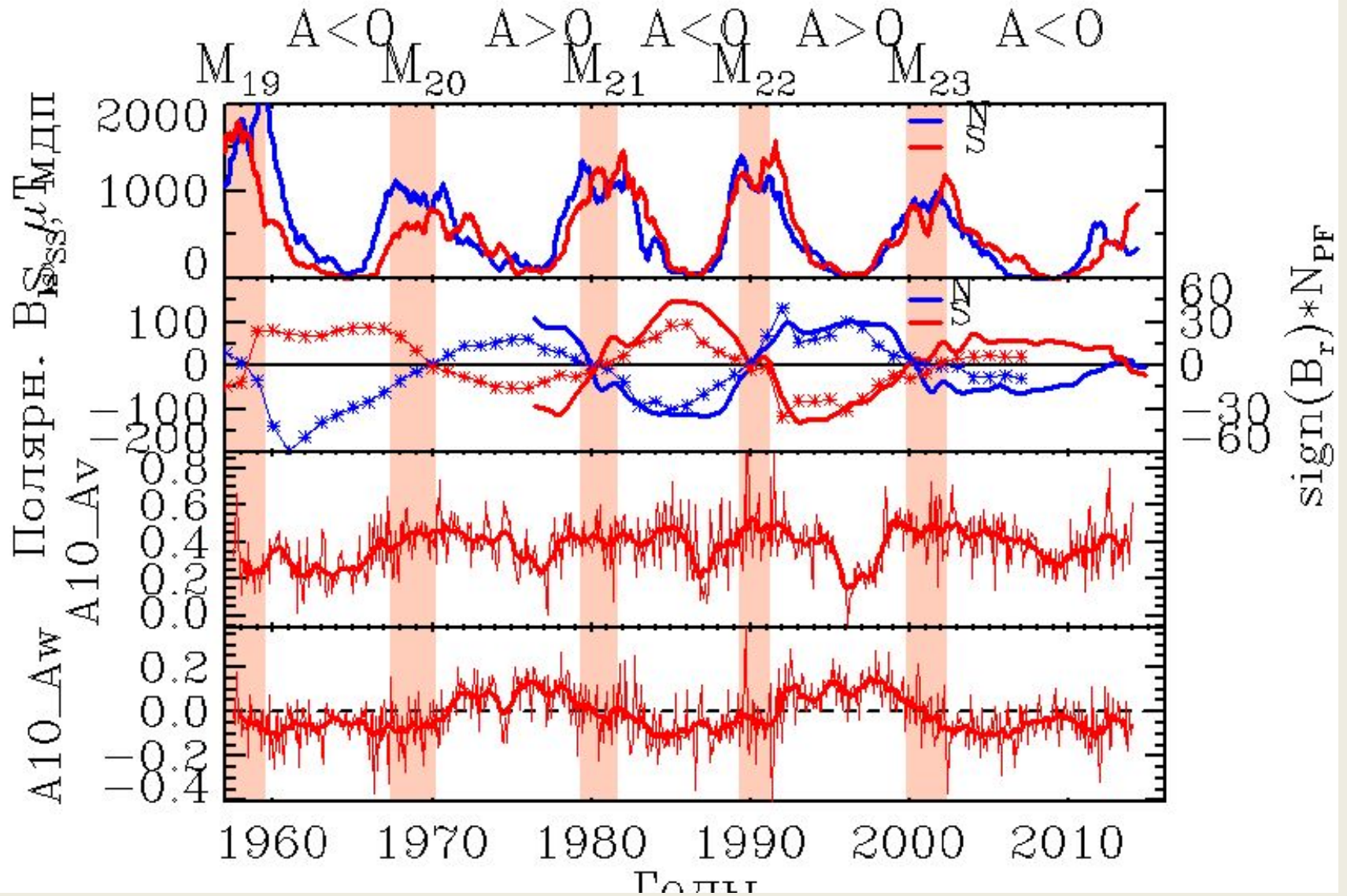
Средне-
часовые



Две ветви активности на Солнце и 11- и 22-летние циклы в интенсивности ГКЛ



Две ветви активности на Солнце и 11- и 22-летние циклы в анизотропии ГКЛ



О причинах образования 11- и 22-летней вариаций в характеристиках ГКЛ. 1.

- **Широкоаспространенная точка зрения:** причина образования 11-летнего цикла – пятенный цикл на Солнце и в гелиосфере, а 22-летнего – цикл в полярности ГМП.

- **Причины:**

1) **Историческая:** первые ~25 лет (1950-1975 гг.) считалось, что в гелиосфере есть только пятенный цикл, а в ГМП преимущественной полярности нет. После 1975 г. – вариация J_{22} есть, но она мала.

2) **Методические (психологические?):**

- 1) **Нет необходимости искать другие факторы** (т. к. сильная корреляция с W , V_{hmf}, \dots);
- 2) **По мощности причины:** чем мощнее вариация модулирующего фактора, тем сильнее эффект. Если меняется только направление поля слабой полоидальной ветви, вариация интенсивности ГКЛ должны быть слабее, чем от сильной вариации сильной тороидальной ветви. Но в гелиосфере - не так!;
- 3) **По периоду вариации причины:** 11-л и 22-л вариации характеристик ГКЛ должны вызываться изменением факторов с теми же периодами.

О причинах образования 11- и 22-летней вариаций в характеристиках ГКЛ. 2.

- **Альтернативная точка зрения:** как 11-л, так и 22-л образуются при совместном действии пятенного цикла в гелиосфере и цикла в полярности ГМП, причём роль последнего в образовании обеих вариаций характеристик ГКЛ может быть велика.
- **Возможные механизмы образования 11-л вариации как 2-ой гармоника от причины, изменяющейся с 22-л:**
 - 1) Последовательное действие двух механизмов, действующих с 22-л периодом (например, наружная модуляция, затем дрейф): $J \sim \sin^2(\omega_{22}t) = (1 - \cos(\omega_{11}t))/2$.
 - 2) Одновременное изменение двух факторов в одном механизме, действующем с 22-л периодом (например, направление скорости и канал поступления частиц в механизме магнитного дрейфа).
 - 3) Модуляция 22-л механизма 11-л циклом (например, дрейф зависит от полярности ГМП (22-л), его напряжённости и формы токового слоя (обе 11-л)).

Моделирование интенсивности ГКЛ. 1.

Транспортное уравнение и граничные условия.

Стационарное ТУ

Parker, Крымский, Jokipii

(1950s-1970s)

For 2D (r, θ)

Граничные условия

«Начальное»
условие

$$-\frac{\partial f}{\partial t} = \underbrace{-\nabla(K\nabla f)}_{\text{diffusion}} + \underbrace{\vec{V}^{sw}\nabla f - \frac{\nabla\vec{V}^{sw}}{3}p\frac{\partial f}{\partial p}}_{\text{convection+adiabatic loss}} + \underbrace{\vec{V}^{dr}\nabla f}_{\text{drift}} = 0$$

$$\underbrace{-\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(K_{rr}r^2\frac{\partial f}{\partial r}\right) - \frac{1}{r^2\sin\vartheta}\frac{\partial}{\partial\vartheta}\left(K_{\vartheta\vartheta}\sin\vartheta\frac{\partial f}{\partial\vartheta}\right)}_{\text{diffusion}} + \underbrace{V_r^{sw}\frac{\partial f}{\partial r} - \frac{\nabla\vec{V}^{sw}}{3}p\frac{\partial f}{\partial p}}_{\text{convection+adiabatic loss}} + \underbrace{V_r^{dr}\frac{\partial f}{\partial r} + \frac{1}{r}V_\vartheta^{dr}\frac{\partial f}{\partial\vartheta}}_{\text{drift}} = 0$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial r}\right|_{r=r_{min}} = 0, \quad f|_{r=r_{max}} = f_{nm}(p)$$

$$\left.\frac{\partial f}{\partial\vartheta}\right|_{\vartheta=0} = 0, \quad \left.\frac{\partial f}{\partial\vartheta}\right|_{\vartheta=\pi} = 0$$

$$f|_{p=p_{max}} = f_{nm}(p_{max})$$

Моделирование интенсивности ГКЛ. 2. Коэффициенты транспортного уравнения.

$$\vec{V}^{sw} = V_r^{sw}(\vartheta) \cdot \vec{e}_r \quad \rightarrow \quad \tan \chi = \frac{r\omega \sin \vartheta}{V_r^{sw}}$$

$$\vec{B} = \underbrace{\langle F \rangle}_{\langle \mathcal{F} \rangle_\varphi} \cdot \vec{B}^m = F \underbrace{|B_{r,E}| \left(\frac{rE}{r}\right)^2 (\vec{e}_r - \tan \chi \vec{e}_\varphi)}_{\text{Parker, 1958}} \cdot \underbrace{\sqrt{1 + (r \cos \chi \cdot \delta_{JK})^2}}_{\text{Jokipii, Kóta, 1989}}$$

$$\vartheta^{cs} = \vartheta^{cs}(r, \varphi), \quad \mathcal{F} = A \cdot [1 - 2H(\vartheta - \vartheta^{cs})]$$

$$\vec{V}^{dr} = K_0^{dr} \cdot pv/3q \left[\nabla \times \frac{\vec{B}}{B^2} \right] = K_0^{dr} \cdot \left\{ \underbrace{F \frac{pv}{3q} \left[\nabla \times \frac{\vec{B}^m}{B^2} \right]}_{\vec{V}^{dr,reg}} + \underbrace{\frac{pv}{3qB} \left[\nabla F \times \vec{b}^m \right]}_{\vec{V}^{dr,cs}} \right\}$$

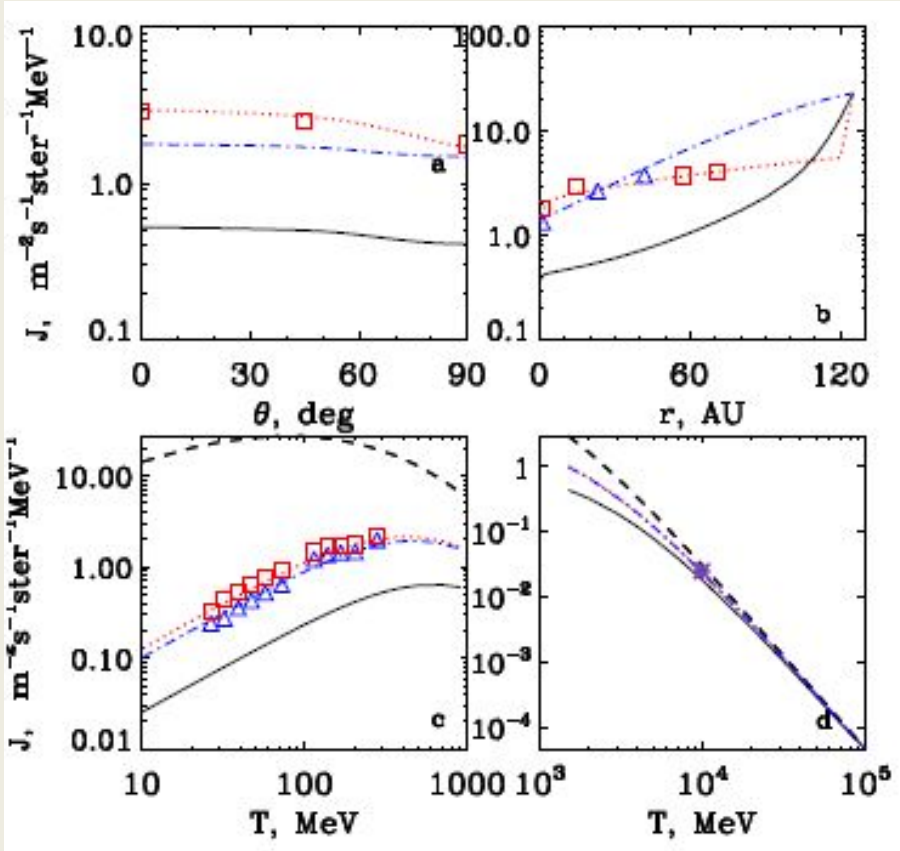
$$\mathcal{K} = K_{||} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{\perp, \vartheta} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{\perp, r} \end{vmatrix}, \quad \underline{\alpha_{\perp, \vartheta} \gg \alpha_{\perp, r}}$$

$$K_{||} = K_0^{diff}(t) \cdot K_{\vec{r}}(\vec{r}) \cdot K_p(p), \quad K_{\vec{r}}(\vec{r}) = \frac{5}{B(\vec{r})}, \quad K_p(p) = pv \cdot R^{\gamma(R)}$$

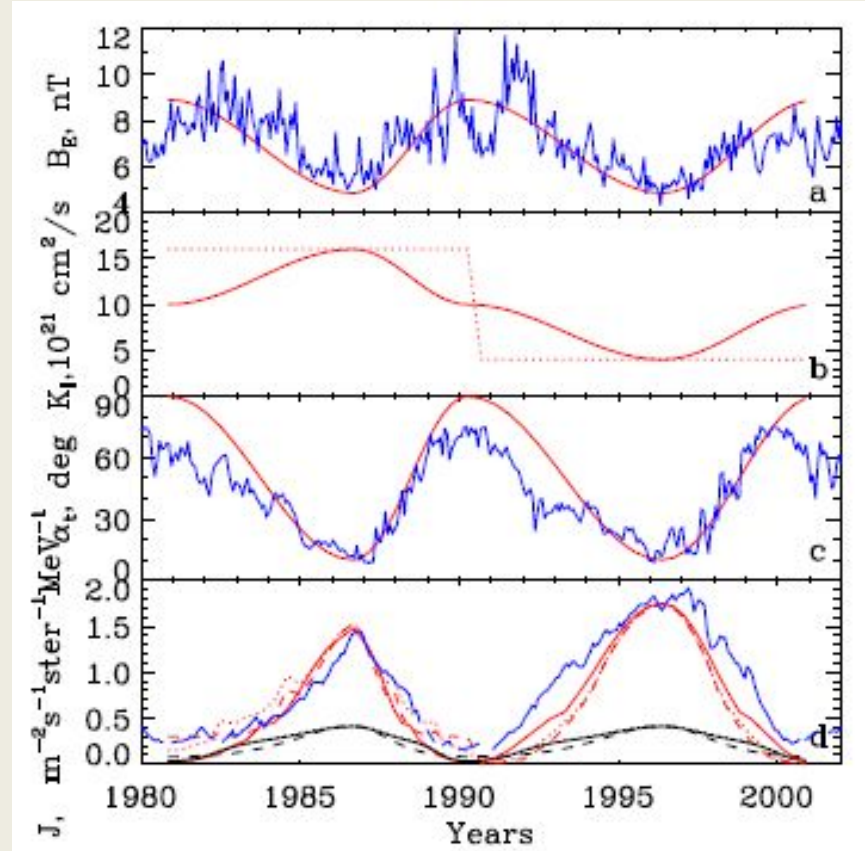
$$K_0^{diff} = K_0^{ss} + K_0^m \cdot \text{sign}(qA), \quad \text{for } q > 0 \quad K_{0,+}^{diff} < K_{0,-}^{diff}$$

Только V^{dr} и $K_{||}$ зависят от преимущественной полярности (A), которая может быть включена ($A > 0$, $A < 0$) и выключена ($A = 0$) при решении граничной задачи.

Расчётная $J(r, \theta, T; t)$ для $A > 0$, $A < 0$, $A = 0$



Kalinin, Krainev, JoPCS, 2013



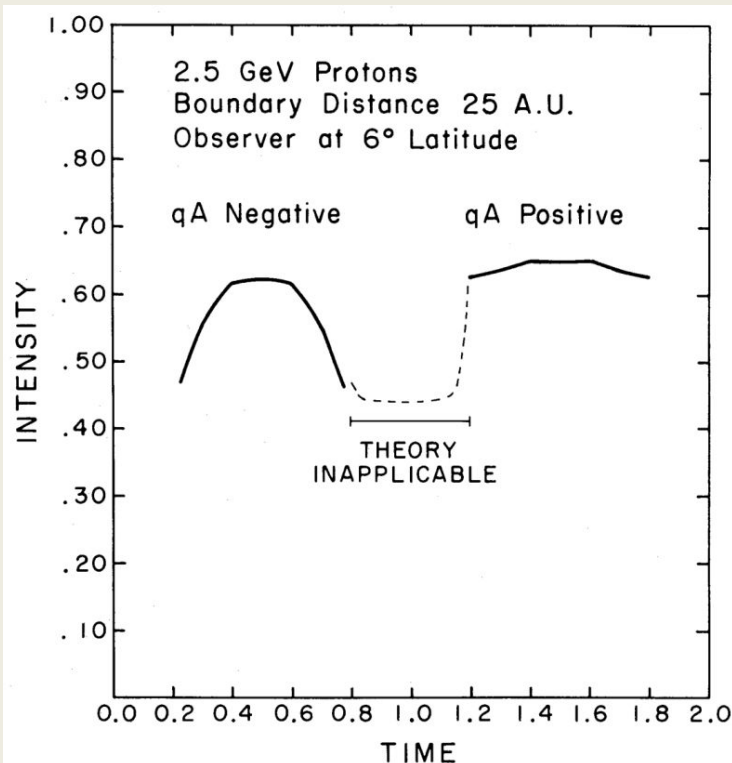
Krainev, Kalinin, JoPCS, 2013

При выбранных параметрах модели в основном описываются J_{11} и J_{22} . При выключении преимущественной полярности ГМП ($A = 0$) расчётная интенсивность (чёрные линии) почти везде падает в 3-5 раз, т. е. вклад дрейфа составляет 70-80% от полной интенсивности как при $A > 0$ (красные), так и при $A < 0$ (синие линии), а значит и в J_{11} и J_{22} !

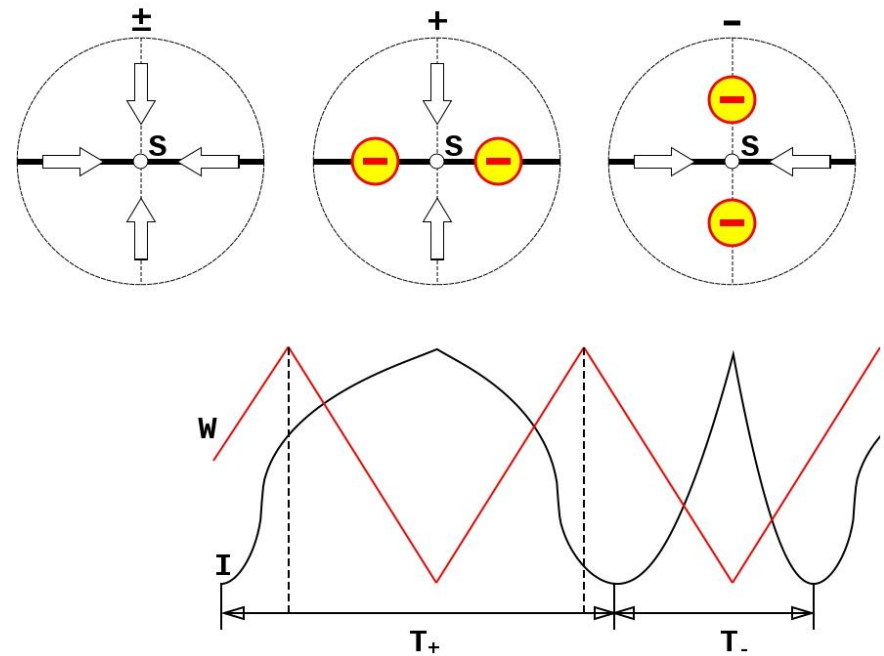
Результаты других моделей

Только дрейф; изменяется только наклон ГТС

Дрейфом определяются каналы доступа ГКЛ; наружная модуляция



Жокири, Thomas, 1981



Крымский и др. (2007-2014)

Как проверить, какое из представлений правильно, и важно ли это?

- Возможно ли проверить, какое из представлений правильно:
а) из наблюдений и б) расчётным путём?

а) Возможно (по данным об интенсивности и анизотропии как ядер, так и электронов, и АКЛ), **но я не знаю, как это сделать;**

б) Рассчитать можно многое, но **количественные результаты сильно зависят от модели.** Надо исследовать разные модели гелиосферы и взаимодействия ГКЛ с электромагнитными полями.

- Важен ли выбор из этих представлений также и для нашей рутинной работы (подходы к анализу данных и интерпретации)?

- **На мой взгляд, несомненно.** Например, при альтернативном взгляде на причины долговременных вариаций в характеристиках ГКЛ надо искать другие индексы, ответственные за дрейф (кроме тилта); нельзя серьёзно относиться к сферически симметричным моделям модуляции ГКЛ (например, приближению силового поля) и т. д.