О гелиосфере и модуляции ГКЛ в ней

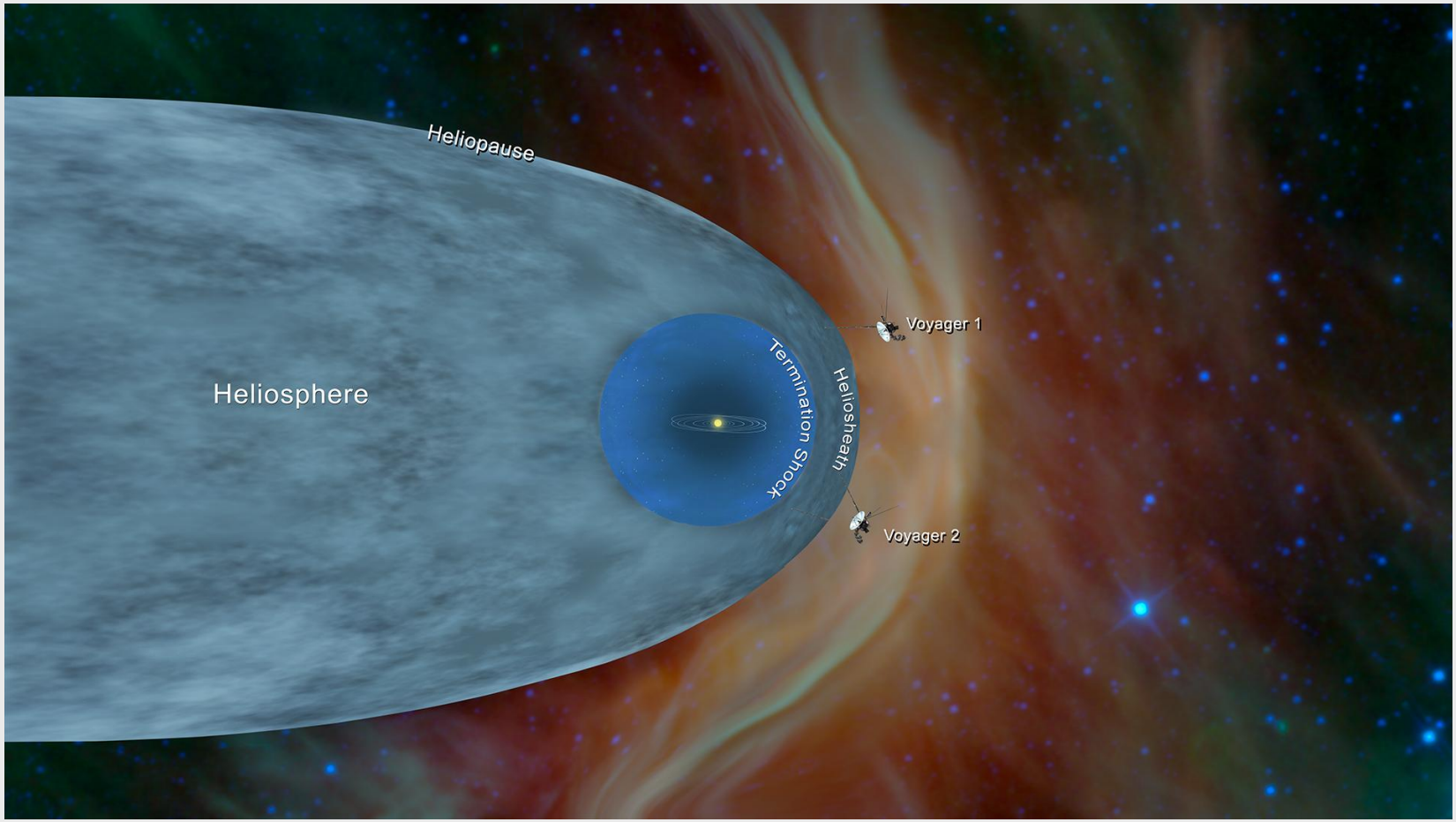
Крайнев М.Б.
ФИАН им. П.Н. Лебедева, РАН, Москва

Основные вопросы:

- Гелиосфера и её основные свойства
- ГКЛ – основные эксперименты, описание и моделирование
- Особенности работ по МОД в России

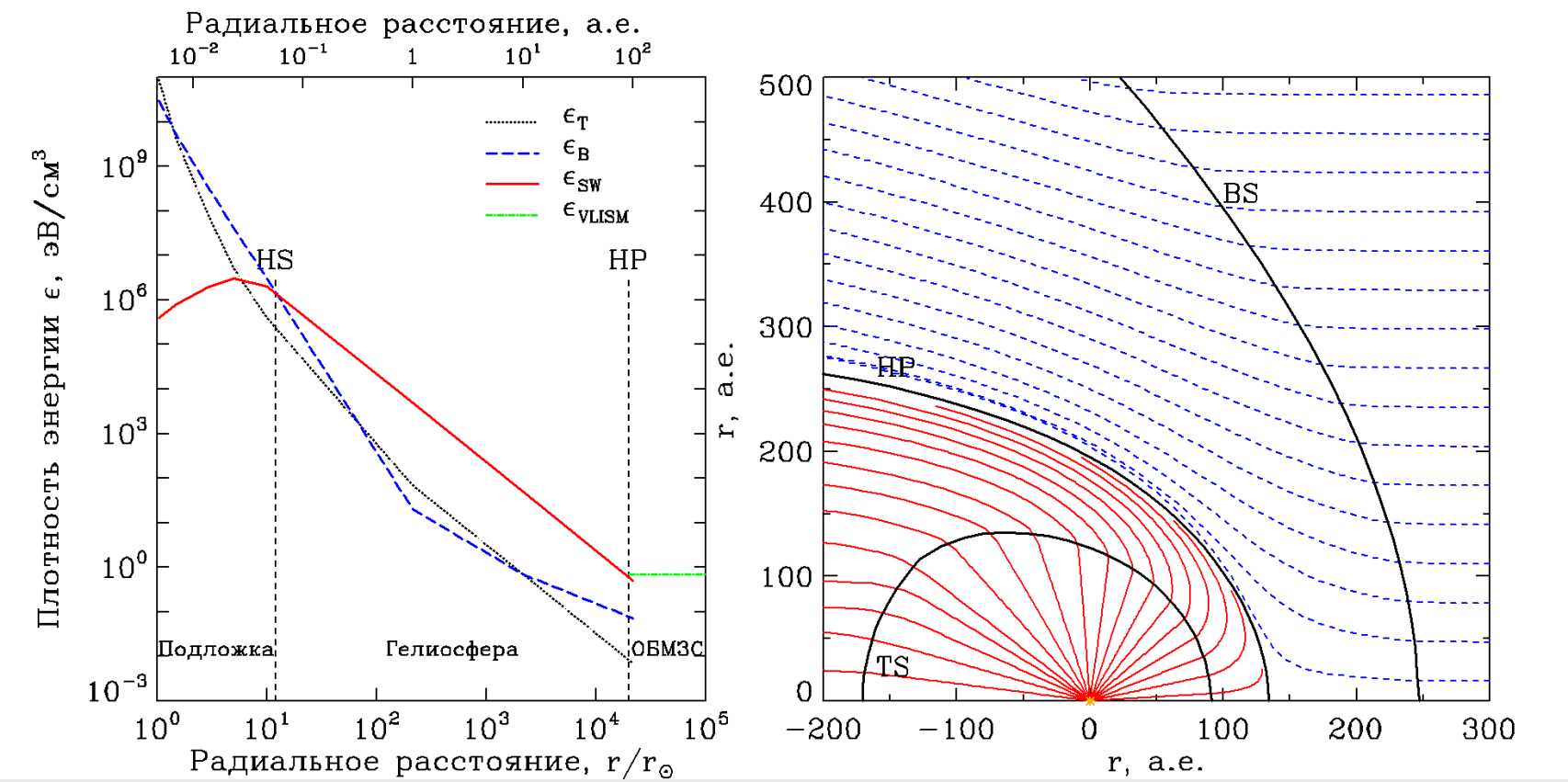
- Доклад будет обзорным по модуляции ГКЛ, но в несколько расширенном понимании этой тематики
- Разобраться в модуляции ГКЛ невозможно без понимания основных свойств гелиосферы. Из пары объектов (Гелиосфера – ГКЛ) первый является основным, независимым от второго.
- Поэтому сначала кратко опишем основные черты структуры гелиосферы

Солнце – Гелиосфера – Галактика
Качественная картина



- Это художественный эскиз простейшей модели гелиосферы с обозначением Солнца, основных областей и КА Voyager 1, 2. Более строгие определения будут даны позже
- По пути к внутренней гелиосфере ГКЛ проходят (и чувствуют) всю гелиосферу в отличие от СКЛ, которым важны лишь первые а. е., т. е. самая сердцевина гелиосферы.

Солнечная корона – Гелиосфера – Галактика
Количественное описание



Росси, Ольберт, 1974 Baranov, Malama, JGR, 1993

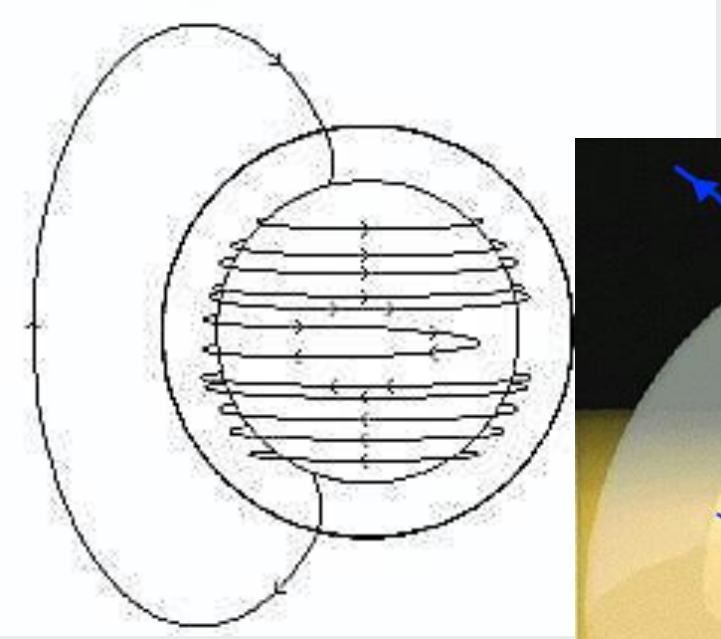
- Слева - примерные радиальные профили плотности энергии разных компонент

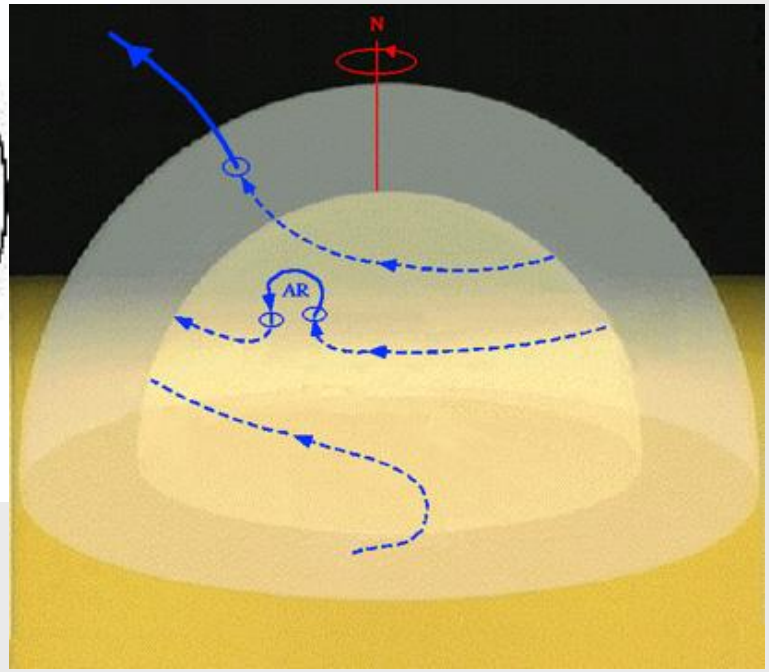
В короне энергия сосредоточена в магнитном поле (~потенциальном), происходит нагрев короны и ускорение СВ. В гелиосфере правит энергия СВ.

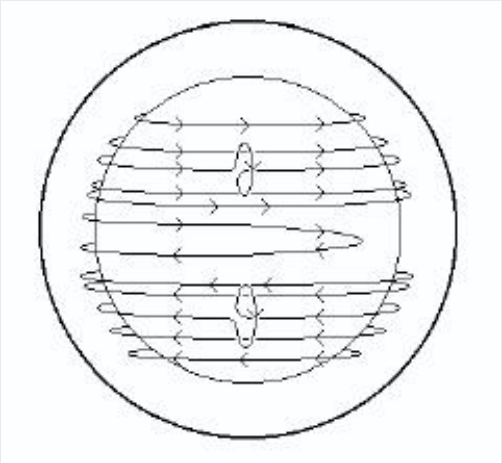
- Справа - линии тока солнечного и межзвёздного ветров и основные поверхности структуры гелиосферы

На терминальной ударной волне СВ становится дозвуковым и отклоняется в хвост.

Полоидальные и тороидальные СМП в динамо-теории







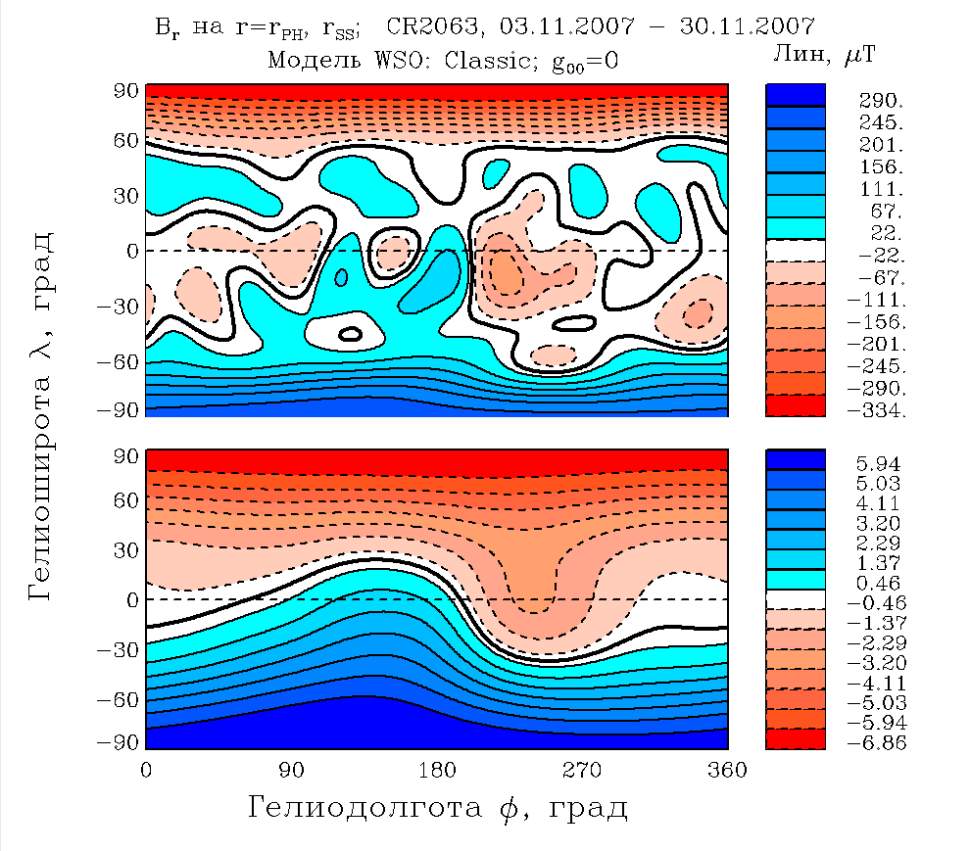
Ω-effect: $B_{pol} \rightarrow B_{\varphi}$

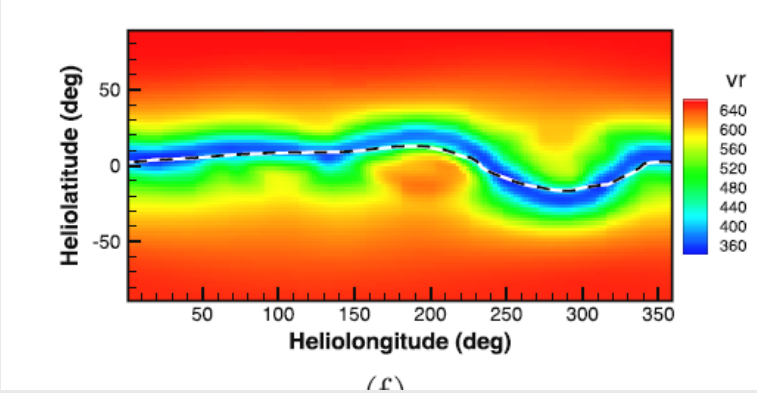
α-effect: $B_{\varphi} \rightarrow B_{pol}$

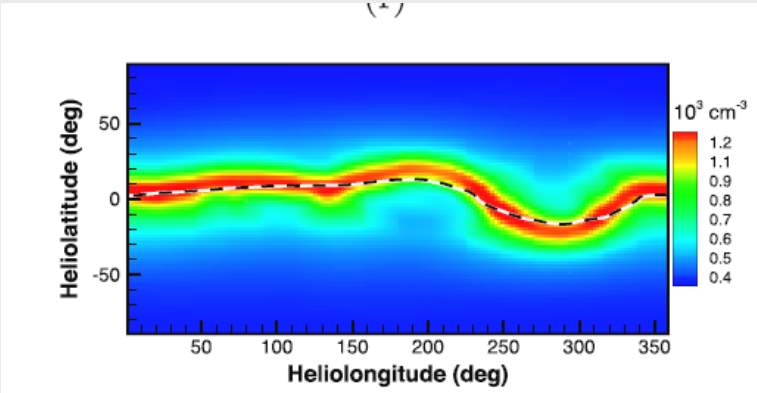
$B_{tor} >> B_{pol}$; $L_{tor} << L_{pol}$

- Основа всего, что происходит в гелиосфере, определяется активностью на фотосфере
- По динамо-теории 22-л цикл солнечной активности - результат взаимодействия двух ветвей солнечных магнитных полей – полоидальной и тороидальной – при активном участии дифференциального вращения и меридиональной циркуляции.
- .Разные напряжённости и размеры полей разных ветвей

Полярность МП на фотосфере и на внутренней границе гелиосферы. V_{SW} и N_{SW} в основании гелиосферы.

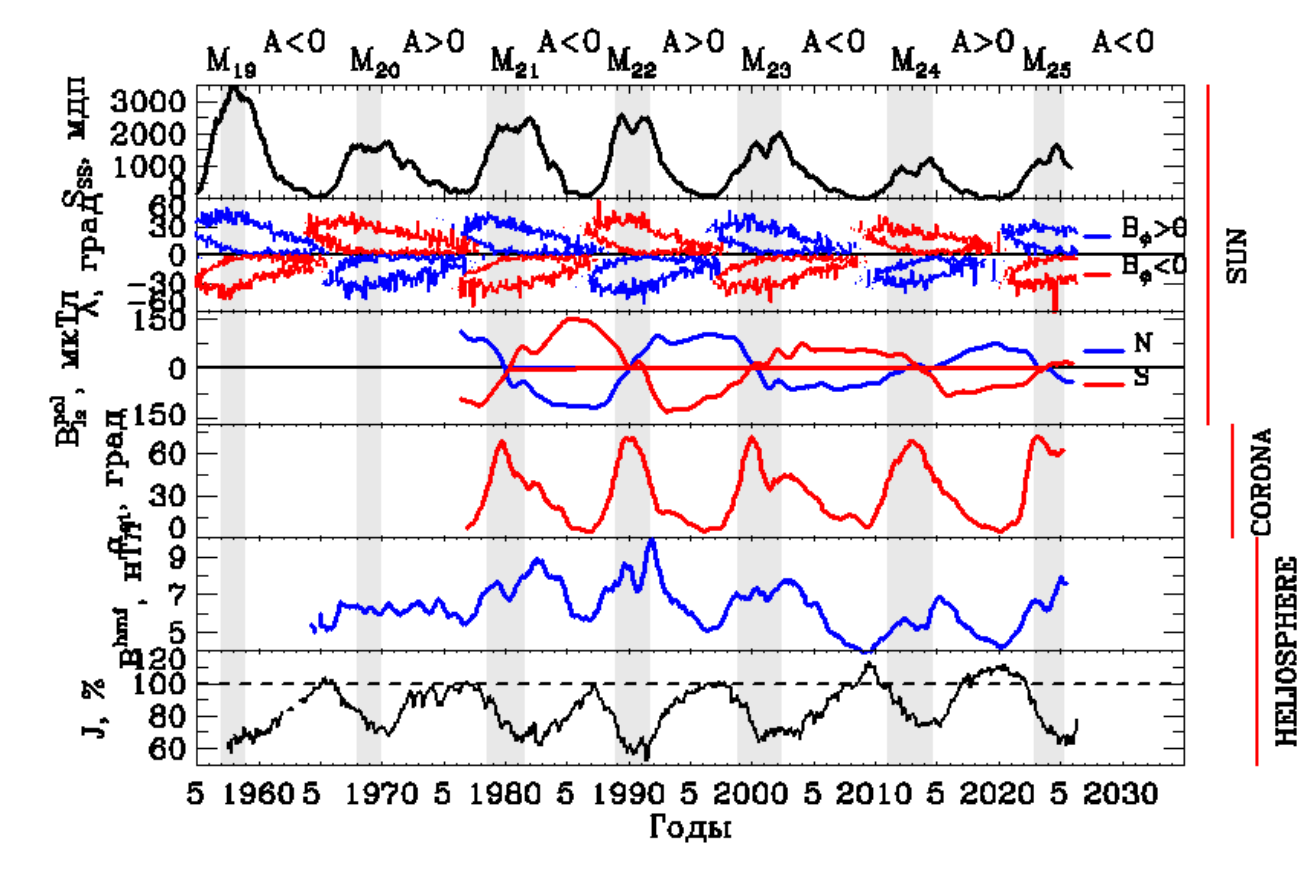






- Слева: распределение полярности магнитных полей -на фотосфере (верх) и на границе гелиосферы (низ) в большей части солнечного цикла
- Из-за примерной потенциальности МП в короне тороидальные поля не проникают, а а полоидальные проникают в гелиосферу. Основание гелиосферы состоит из двух униполярных полушарий, разделённых токовым слоем.(ТС) .
- Справа: скорость СВ растёт с удалением от ТС, а плотность – падает

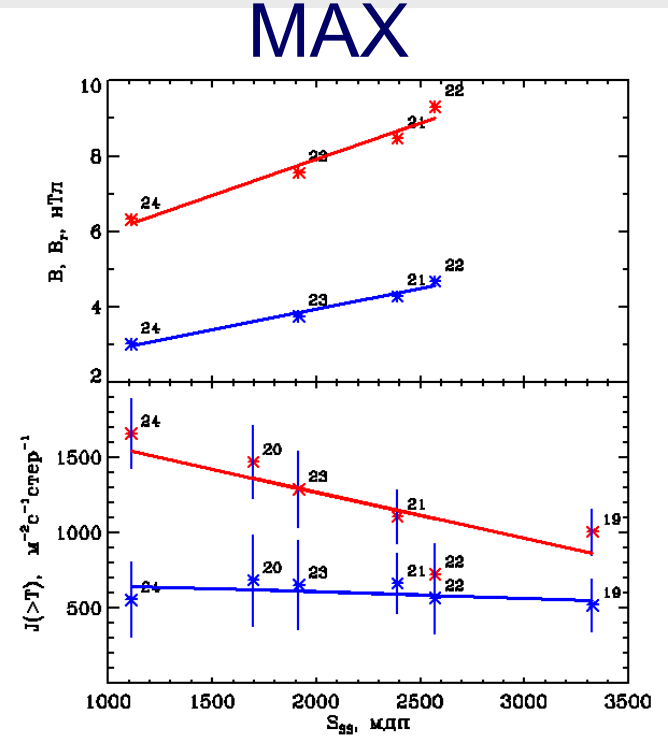
Две ветви солнечных магнитных полей, их инверсии, ГМП и ГКЛ в наблюдениях



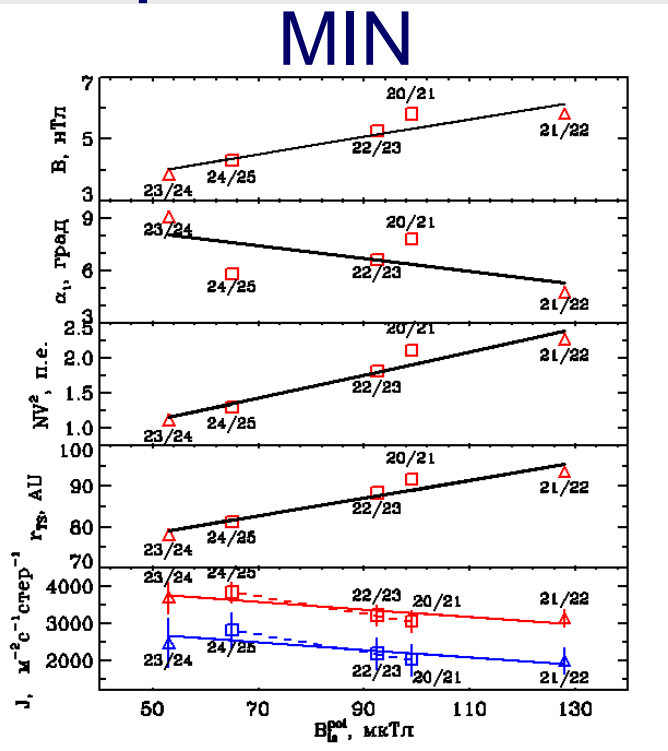
- Итак, в гелиосферу проникают полоидальные поля с инверсией в период максимума пятенного цикла, напряжённость которых в периоды высокой пятенной активности модулируется ею
- Отсюда главенствующее до сих пор представление, что характеристики гелиосферы, включая напряжённость ГМП и интенсивность ГКЛ, определяются тороидальной активностью Солнца .
- Но пятен и активных областей вокруг минимума по пятнам очень мало и они не должны сильно воздействовать на полоидальные поля в гелиосфере, а поток полоидальных полей на Солнце в этот период высок

Характеристики Гелиосферы и ГКЛ в экстремумах СЦ

MAX



MIN

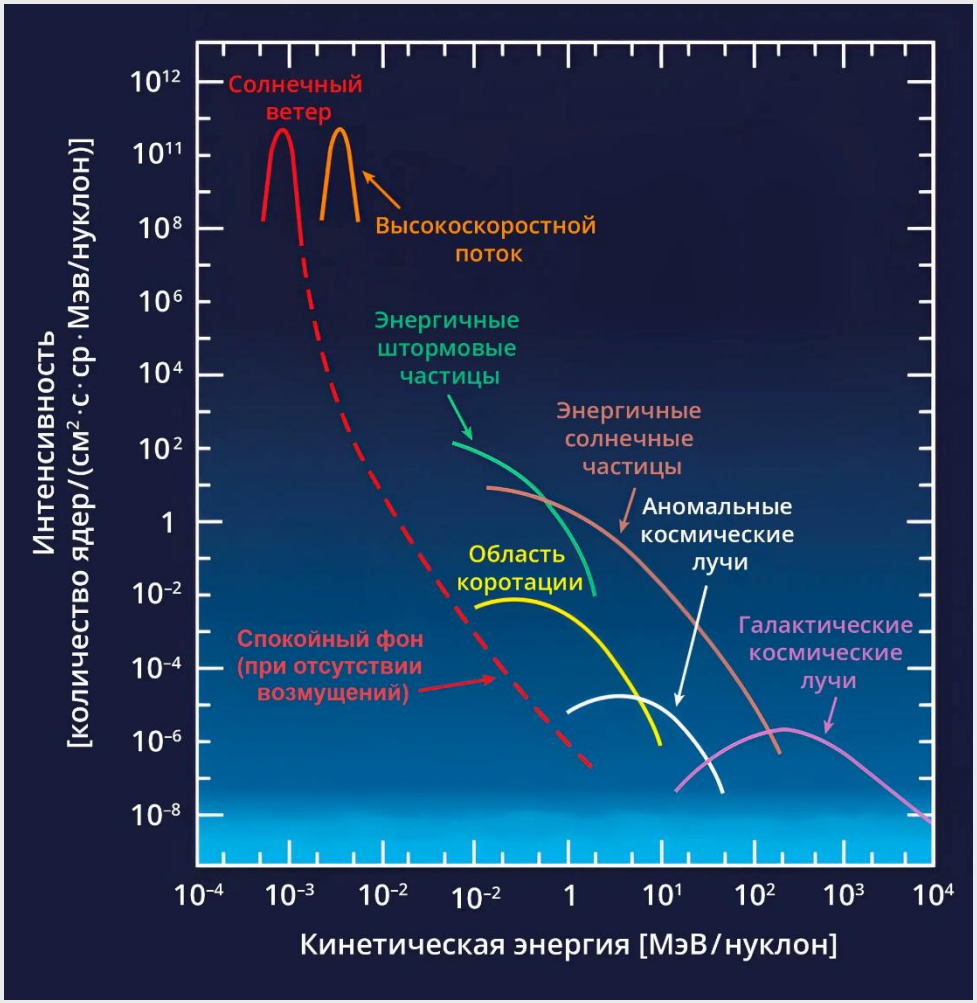


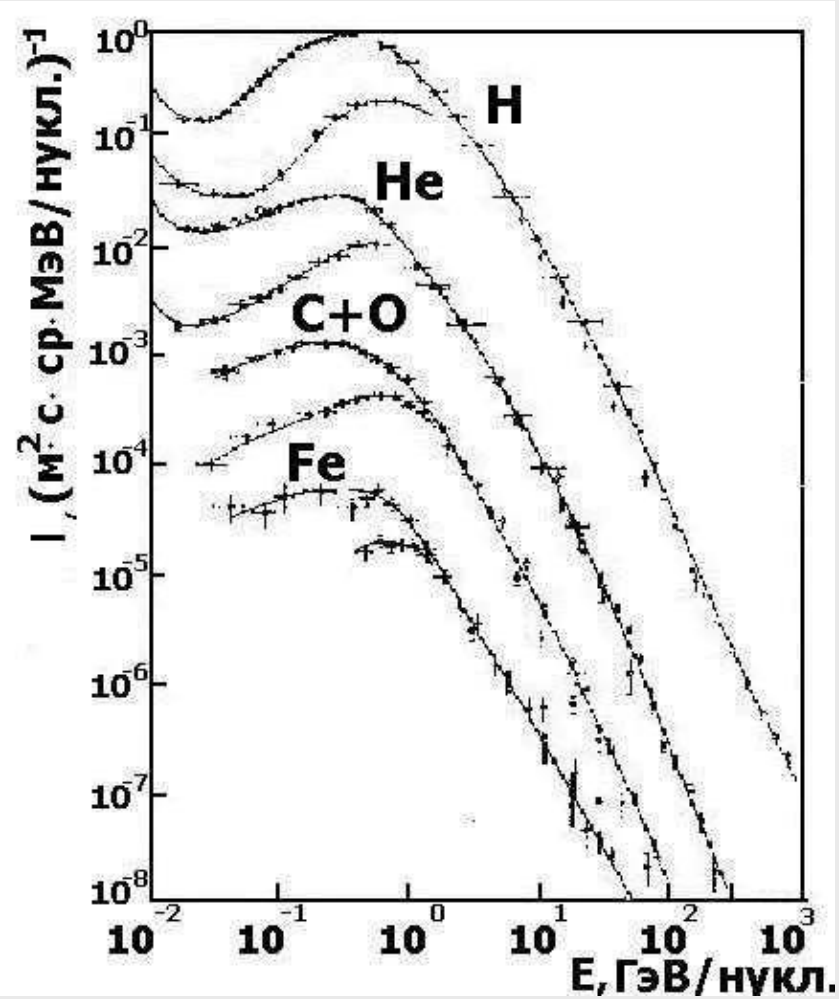
Тороидальная ветвь СМП

Полоидальная ветвь СМП

- Логично предположить, что в течении части цикла вокруг пятенного минимума ГМП и интенсивность ГКЛ определяются тороидальной ветвью (площадь и число пятен и т. д.), а в части вокруг пятенного максимума – полоидальной ветвью (корональные дыры…)
- Это подтверждается корреляцией гелиосферных характеристик и интенсивности ГКЛ в максимуме по пятнам с максимальной площадью пятен (слева), а в минимуме – с индексом полоидального поля (справа) .
- Но надёжной теории - как нагревается корона, ускоряется СВ и формируются ГМП – пока нет и изложенные представления основываются на корреляциях (т. е. на песке!)

Общая информация о заряженных КЛ и ГКЛ





- Переходя с КЛ - обычно в рамки секции МОД включается воздействие гелиосферы, кроме ГКЛ, ещё и на КЛ гелиосферного происхождения (АКЛ), а воздействие внутренней гелиосферы на СКЛ – относится к соответствующей секции
- Естественно, к нашей секции относятся ГКЛ только тех энергий, для которых воздействие гелиосферы существенно – с T < несколько десятков ГэВ/ нуклон

Наблюдения МОДулируемых ГКЛ и АКЛ

- **r ≤ 1 а. е., |λ| ≤ 7°**
  - Стандартные детекторы МОД-КЛ **на Земле:** НМ, МТ, РБМ
  - Детекторы МОД-КЛ **на КА у Земли:** IMP-8, CRIS/ACE, PAMELA, AMS-02, HEPD/CSES
  - Детекторы МОД-КЛ **на КА между Землёй и Солнцем (**Helios 1, 2, PSP, Solar Orbiter,
  - Каналы в детекторах высоких энергий **на Земле и на КА**
- **1.2 а. е., ≤ r ≤ 5 а. е., |λ| ≤ 82°**
  - Ulysses
- **1 а. е., ≤ r ≤ 150 а. е., -35 ° ≤ λ ≤ 35°**
  - Pioneer 10, 11; Voyager 1, 2

- Наблюдения модулируемых КЛ в основном проводятся на орбите Земли – на или вблизи поверхности 70 лет и на спутниках 50 лет, причём последние 20 лет мониторинг на спутниках стал систематическим, высокой точности и в широком диапазоне энергии (эксперименты PAMELA и AMS-02).
- Вне орбиты Земли надо выделить уже завершённые эксперименты Ulysses, Pioneer 10, 11; работающие, но вышедшие из гелиосферы Voyager 1, 2 и Parker Solar Probe.

Описание интенсивности ГКЛ

Два первых члена функции распределения

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

Граничная и «начальная» задача для f=J/p^2

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

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

Анизотропия

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

Parker, 1958 ; Krymsky, 1964

Parker, 1965; Jokipii et al., 1977

- При описании модуляции КЛ учитывают высокую степень изотропии их функции распределения, для изотропной части решают граничную задачу с уравнением Паркера, учитывающим диффузию, конвекцию, адиабатическое замедление и дрейф в неоднородном ГМП.
- А по вычисленной изотропной части (или интенсивности) определяется анизотропия.

Моделирование вариаций интенсивности ГКЛ

Конечные Разности / МПН для 3D/2D. В каждом прогоне:
Весь спектр во всей гелиосфере. Однако – численные трудности

СДУ (Монте-Карло): прямые и обратные схемы. В каждом прогоне:
:Для одной энергии в одной точке. Однако – проще численно

$$dr = \left[\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\kappa_{rr}\right) + \frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial\kappa_{r\phi}}{\partial\phi} - V_{sw} - v_{dr}\right]ds$$
$$+\sqrt{2\kappa_{rr} - \frac{2\kappa_{r\phi}^2}{\kappa_{\phi\phi}}}dW_r + \frac{\sqrt{2}\kappa_{r\phi}}{\sqrt{\kappa_{\phi\phi}}}dW_\phi$$
$$d\theta = \left[\frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}(\sin\theta\kappa_{\theta\theta}) - \frac{v_{d\theta}}{r}\right]ds + \frac{\sqrt{2\kappa_{\theta\theta}}}{r}dW_\theta$$
$$d\phi = \left[\frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\kappa_{\phi\phi}}{\partial\phi} + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\kappa_{r\phi}\right) - \frac{v_{d\phi}}{r\sin\theta}\right]ds + \frac{\sqrt{2\kappa_{\phi\phi}}}{r\sin\theta}dW_\phi$$
$$dE = \left[\frac{1}{3r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2V_{sw}\right)\Gamma E\right]ds \qquad (7)$$

Zhang, 1999;

Моделирование 11-22-летней вариации,

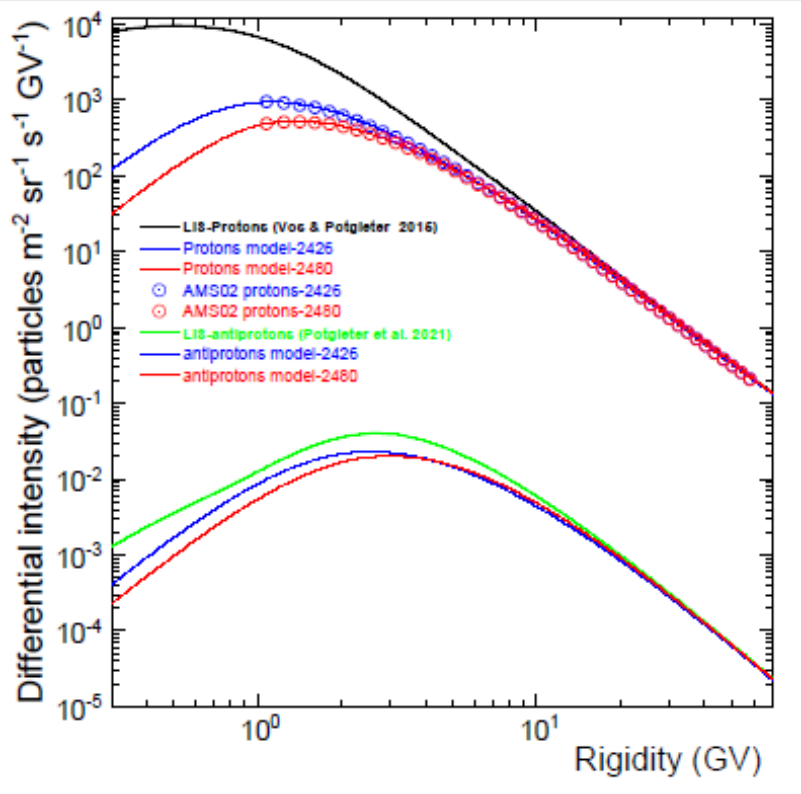
Коротирующие области взаимодействия

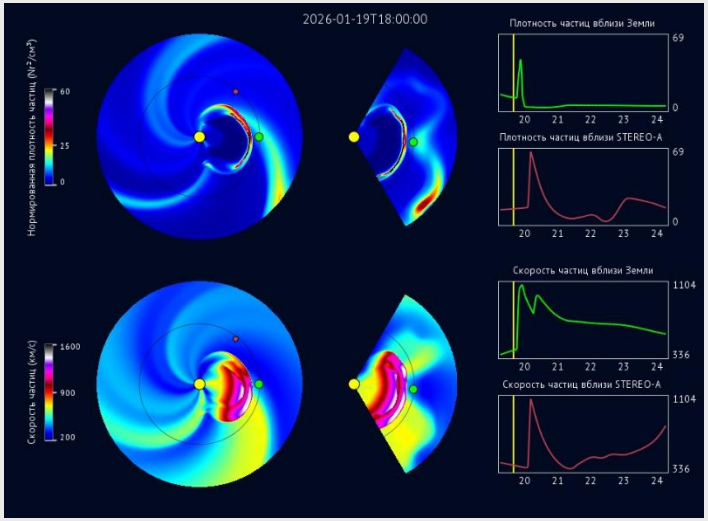
Guo & Florinski, ,2014.2016 Wiengarten+, 2014, Kopp+, 2017;

Luo et al., 2013, 2020, 2024

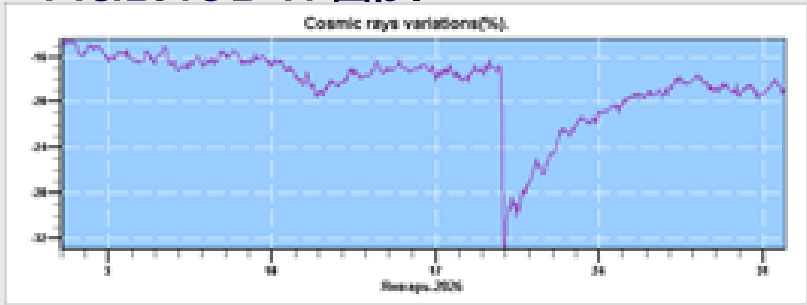
- Сначала формулировали простейшие модели гелиосферы (1D или 2D) и решали краевую задачу для ГКЛ методами конечных разностей. Такое моделирование продолжается и до сих пор..
- Модели гелиосферы стали усложняться, их рассчитывают в МГД-приближении, а краевую задачу для ГКЛ стали решать методом стохастических дифференциальных уравнений (Монте-Карло). Этот метод распространён в последние 25 лет.

Моделирование 11-л и 22-л вариаций и КВМ / ФЭ





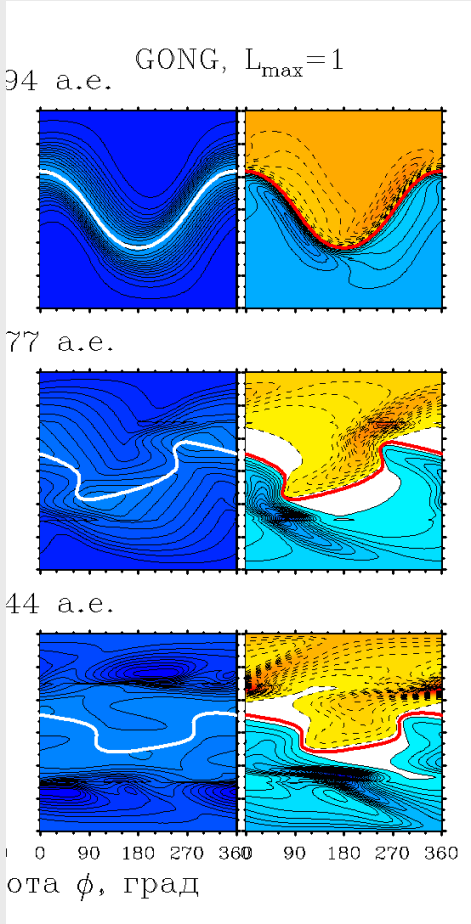
https://solarwind.entroforce.ru
Павлов и др.

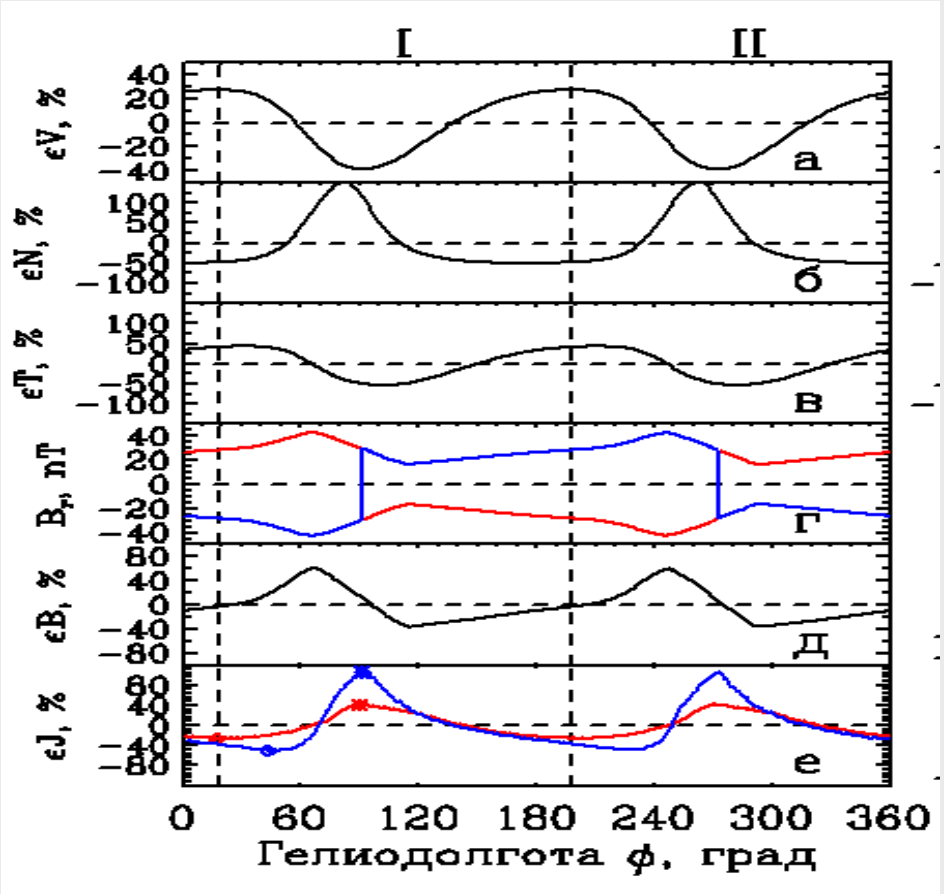


Potgieter+, North-West University, South Africa

- Слева: пример моделирования долговременных вариаций интенсивности ГКЛ (простая 3D модель гелиосферы и решение краевой задачи методом Конечных Разностей) – описывает практически все результаты AMS-02, но с многими свободными параметрами..
- Справа: МГД-моделирование КВМ (январь 2026 г.; от Солнца до 1.7 а. е.). Но чтобы моделировать весь ФЭ (быстрый спад и медленное восстановление), нужна МГД-модель до значительно больших расстояний

Моделирование КОВ / 27-дн вариации ГКЛ





Павлов и др., СЗФ, 2025 Крайнев и др., СЗФ, 2026 (в печати)

- Второй пример - МГД-моделирование КОВ до ~ 30 а. е.
- Слева: изменение распределения скорости СВ и напряжённости ГМП с расстоянием..
- Справа: долготное распределение ГС характеристик на экваторе на 1 а. е.) и расчёт долготного распределения интенсивности ГКЛ там же, обусловленного этим КОВ

Особенности работ по МОД в России

Метод и предмет исследования	МОД ВККЛ-2024 (14)	МОД ВККЛ-2026 (14)	МОД/SH ICRC-2025 (21)
Анализ данных экспериментов на Земле	8	10	12
Методические вопросы экспериментов на Земле	1	2	5
Анализ данных экспериментов на КА	1	1	8
Методические вопросы экспериментов на КА	0	0	6
Сравнение характеристик С-ГС-ГКЛ	3	1	1
Расчёты каскада в атмосфере	0	0	2
Расчёты траекторий в магнитосфере	0	1	0
Расчёты интенсивности в гелиосфере	2	2	6
Моделирование структур Гелиосферы и ГКЛ в них	0	0	2
Вариации: Долго/QBO/ 27д/ ФЭ/Анизотропия	2/0/1/5/1	2/1/0/5/1	6/0/3/7/1

Доклады с двух последних ВККЛ и на последней ICRC по тематике:

<u>В России относительно меньше:</u>

- использования данных и метод. работ по КА,
- моделирования и расчётов в гелиосфере

Отсутствие планов на дальнюю гелиосферу

<u>В мире</u>:

- Interstellar Probe (USA),
- Interstellar Express (Shensuo; China)

Выводы

1. Гелиосфера, определяющая модуляцию ГКЛ, - очень важный слой атмосферы Солнца со специфической структурой и закономерностями её изменения. Из-за её размеров прямое исследование затруднено и роль моделирования очень велика. Основные процессы в короне – её нагрев, ускорение СВ и формирование МП на внутренней границе пока моделируются с трудом и обычно используются эмпирические связи.
2. Наблюдения вариаций ГКЛ систематически проводятся в районе орбиты Земли, в последние годы довольно детально. Очень важны прямые измерения ГС и ГКЛ в основном объёме гелиосферы. Принципы описания вариаций ГКЛ известны и разработаны эффективные методы их моделирования, но нужны надёжные модели ГС структур и характеристик.
3. Основные особенности работ по исследованию ГС и модуляции ГКЛ в России – меньшее внимание к данным КА и расчётам в гелиосфере. Важно неучастие в прямых исследованиях короны и основного объёма ГС и отсутствие даже планов такого участия. Упор сделан на изучении процессов внутри орбиты Земли (физика солнечно-земных связей, а не физика гелиосферы и процессов в ней).

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!