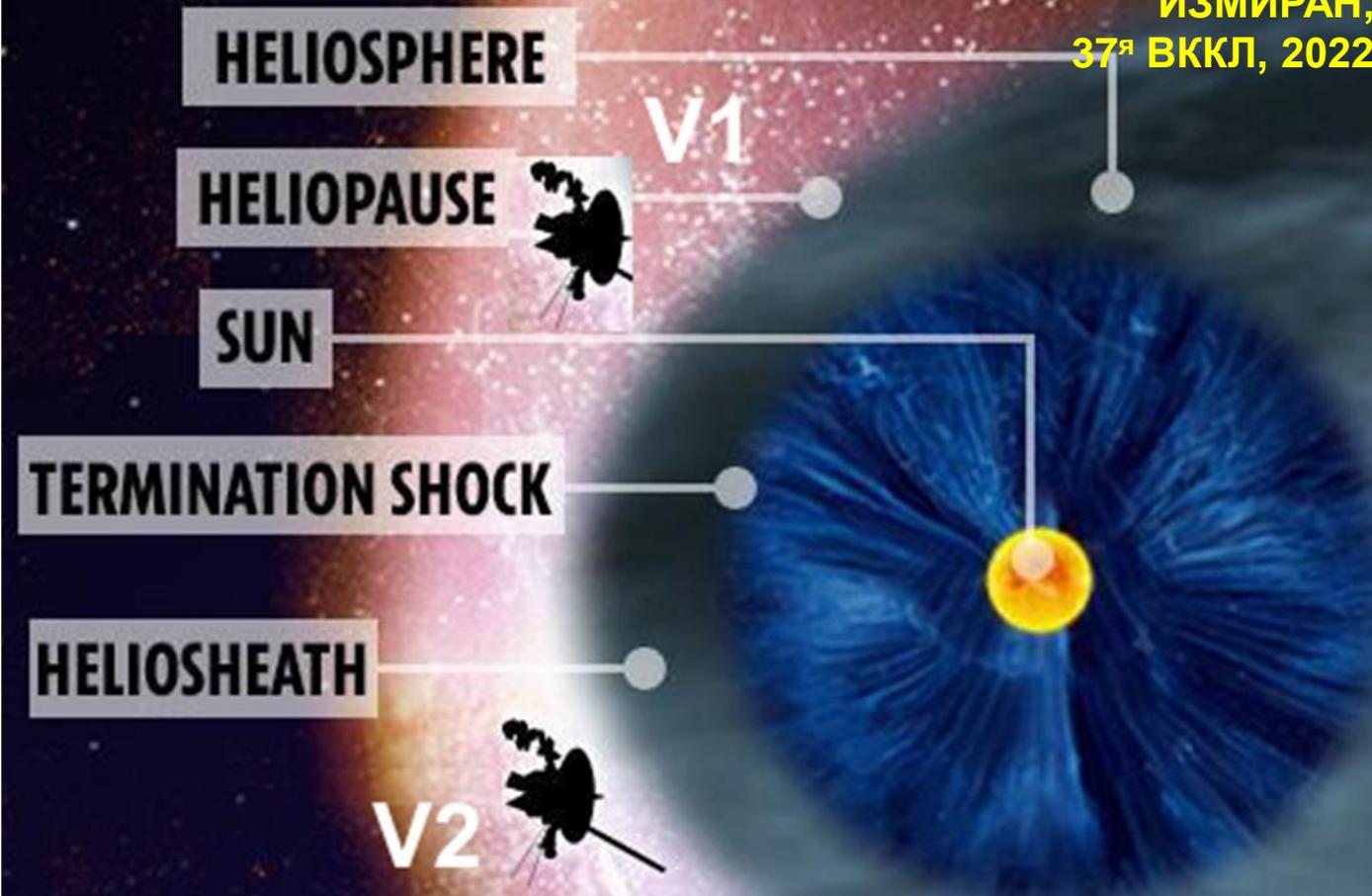


BOW SHOCK

Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т.,
Оленева В.А.
ИЗМИРАН,
37^я ВККЛ, 2022



Содержание

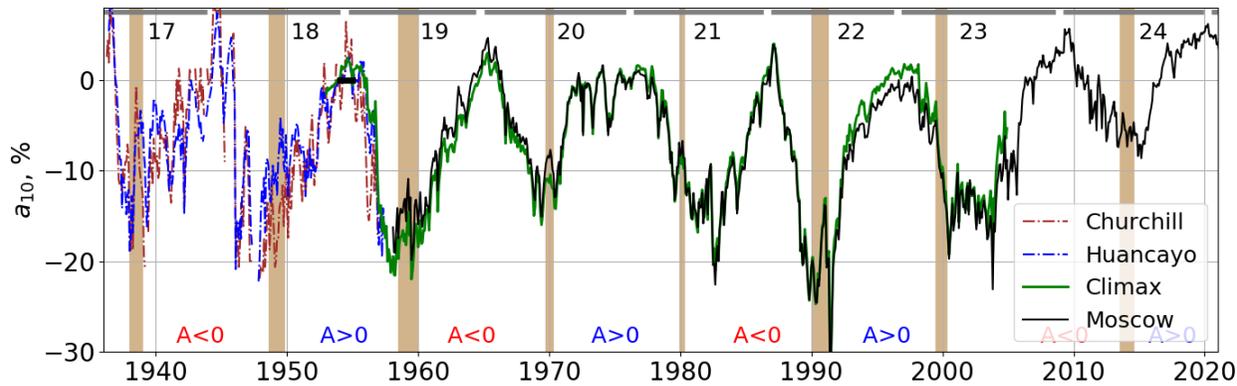
1. Введение
2. Методы анализа
3. Метод GSM
4. Метод GA
5. Анизотропное приближение
6. GSM и экваториальная компонента первой гармоники анизотропии
7. GSM и северо-южная составляющая анизотропии
8. Изотропное приближение
9. Индексы и набор параметров моделирования
10. Многопараметрическая модель вариаций КЛ
11. Жесткостной спектр вариаций КЛ
12. КА и наземная сеть
13. Сравнение PAMELA, AMS-02 и GSM
14. Экспериментальный спектр вариаций
15. Остаточная модуляция

Долговременная модуляция
космических лучей:
взгляд с орбиты Земли

1. Введение

Долгое время и сейчас в эпоху весьма успешных экспериментов в космосе, **Земля** все ещё остается лучшим местом для долговременных наблюдений. Только на Земле имеется многонаправленный детектор, регистрирующий КЛ с хорошей статистикой (~ 30К pps). Рукотворно создателям сети [[Simpson, 1948](#); [Hatton & Carmichael, 1964](#)] пришлось создать только часть установки этого магнитного спектрометра, а система атмосферной генерации и магнитосферной сепарации частиц по энергиям уже существовала в природе.

На рисунке можно видеть долговременные вариации КЛ, зарегистрированные на двух нейтронных мониторах **Москва** и **Climax** более чем за 80 лет наблюдений, стартовавшие, правда, с измерений с помощью ионизационных камер **Churchill** и **Huancayo** в 1937 году.



Долговременные вариации КЛ, зарегистрированные с помощью ионизационных камер Churchill и Huancayo и на нейтронных мониторах Москва и Climax более чем за 80 лет наблюдений.

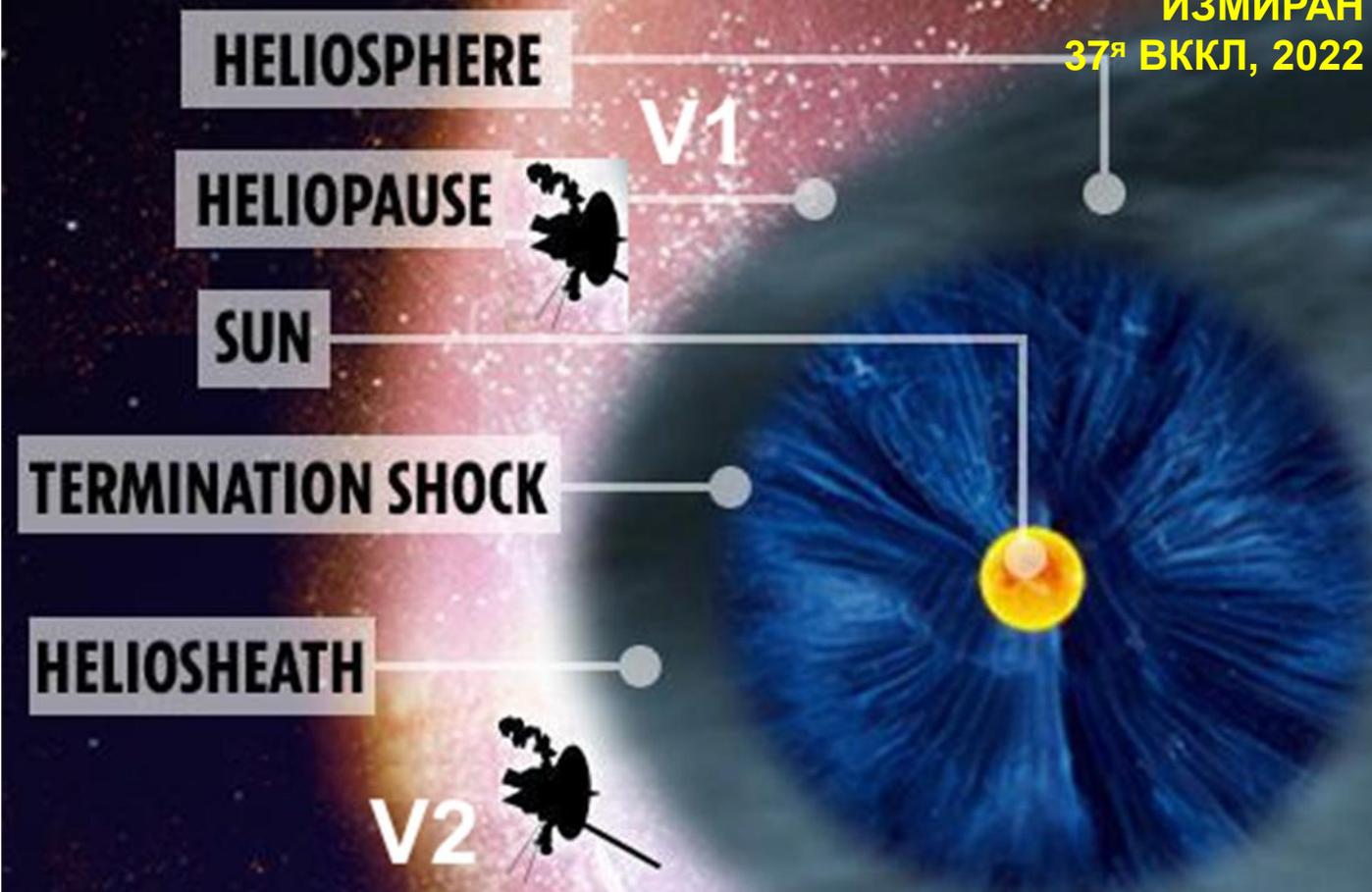
Представленные на рисунке результаты – это, собственно, отчет о модуляции КЛ. Некоторые особенности сейчас достаточно очевидны.

Гелиосферная модуляция выражается в виде 11-летней волны интенсивности КЛ [[Lockwood & Webber, 1967](#)]. КЛ по-разному ведут себя в четных и нечетных циклах СА: плоские и острые пики [[Thomas et al., 2014](#)]. В результате этого возникает 22-летняя вариация интенсивности КЛ, магнитный цикл [[Hale & Nicholson, 1925](#)]. В работе [[Charakhchyan et al., 1973](#)] такое различие между циклами связывалось с переполюсовкой общего магнитного поля Солнца. В последующих работах [[Levi, 1976](#); [Jokipii et al., 1977](#); [Jokipii & Thomas, 1981](#)] это явление объяснялось магнитным дрейфом КЛ, а затем были проведены многочисленные трехмерные модельные расчеты модуляции с учетом большого числа параметров. Видна особенность 23/24 циклов.

BOW SHOCK



Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т.,
Оленева В.А.
ИЗМИРАН
37^я ВККЛ, 2022



Содержание

1. Введение
2. Методы анализа
3. Метод GSM
4. Метод GA
5. Анизотропное приближение
6. GSM и экваториальная компонента первой гармоники анизотропии
7. GSM и северо-южная составляющая анизотропии
8. Изотропное приближение
9. Индексы и набор параметров моделирования
10. Многопараметрическая модель вариаций КЛ
11. Жесткостной спектр вариаций КЛ
12. КА и наземная сеть
13. Сравнение PAMELA, AMS-02 и GSM
14. Экспериментальный спектр вариаций
15. Остаточная модуляция

Долговременная модуляция
космических лучей:
взгляд с орбиты Земли

2. Методы анализа долговременных вариаций

Задача анализа долговременных вариаций космических лучей на базе сети детекторов – это выделение нулевой гармоник и вектора анизотропии космических лучей на орбите Земли для различных периодов усреднения.

При анализе долговременных вариаций можно выделить несколько подходов:

- 1) глобальный метод - объединение данные отдельных детекторов и их совместная обработка (сферический анализ).
- 2) локальный метод - обработка данные отдельных детекторов (гармонический анализ) и объединение результатов,
- 3) все большие возможности дают прямые измерения на космических аппаратах – и продолжительность, и верхние энергии частиц уже сопоставимы с наземными измерениями.

Преимущества **глобального метода** - определение амплитуду, включая северо-южную, и фазу для каждого часа, недостатки – метод требует привлечения большого числа детекторов для анализа: не менее 15, 25 и 45 детекторов в приближении нулевой, первой и второй гармоник.

Преимущества **локального метода** - простота, недостатки – получение только средних за какой то период характеристик амплитуды и фазы, невозможность выделения северо-южной компоненты, необходимость перехода за пределы атмосферы и магнитосферы.

Преимущества **прямых измерений** – прямые возможности мониторинга изотропных вариаций, недостатки – практически невозможно в нашем диапазоне энергий получить анизотропии космических лучей с точностью, сравнимой с наземными методами.

3. Глобально спектрографический

МЕТОД (Оценка плотности КЛ и вектора анизотропии)

Задача сводится к восстановлению спектра вариаций в межпланетном пространстве по данным наблюдений на сети детекторов. Эту задачу решает глобально спектрографический метод (GSM) / метод приемных векторов [Krymsky et al., 1966 ; Nagashima K. 1971] и его модификации [Belov et al., 1983; Дворников & Сдобнов , 1991]. GSM, по существу, представляет собой усложненный вариант сферического анализа, как определил Г.Ф.Крымский. Усложнение заключается в учете атм. и магн.

$$v_i = a_1(t) \cdot C_0^i[\gamma(t)] + x(t) \cdot [C_x^i \cos \omega t - C_y^i \sin \omega t] \\ + y(t) \cdot [C_x^i \sin \omega t + C_y^i \cos \omega t] + z(t) \cdot C_z^i$$

где $\omega=2\pi/24$, t UT время и

v_i - наблюдаемая детектором i вариация, исправленная на барометрический эффект,

a_1 и γ - параметры спектра 0-гармоники, (x, y, z) – компоненты вектора 1-гармоники как функция t ,

- приемные коэффициенты 0 и 1 гармоник, связывающие вариации за пределами магнитосферы

$C_0^i, C_x^i, C_y^i, C_z^i$ вариациями, наблюдаемые на Земле. Приемные коэффициенты определяются через долготу станции φ^i и амплитуду a_{11} и фазу φ_{11} 1-гармоники

$$C_x = -a_{11} \cos(\varphi^i + \varphi_{11}), \quad C_y = -a_{11} \sin(\varphi^i + \varphi_{11}), \quad C_z = -c_{10}$$

Параметры a_1, γ, x, y, z определяются МНК, минимизируя сумму $S = \sum (v^{obs} - v^{cal})^2 / \sigma^2 / i$.

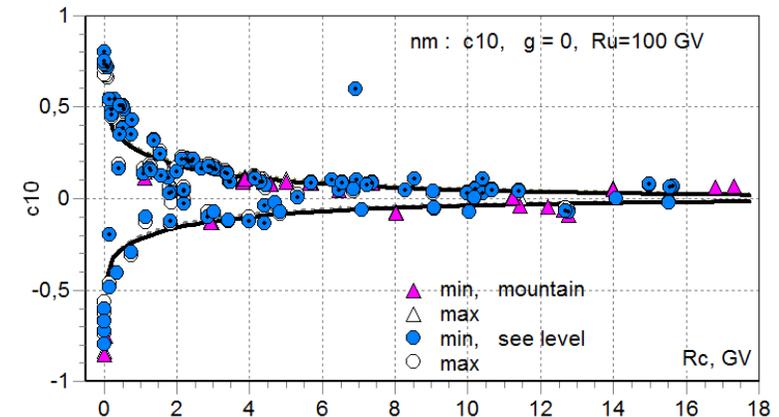
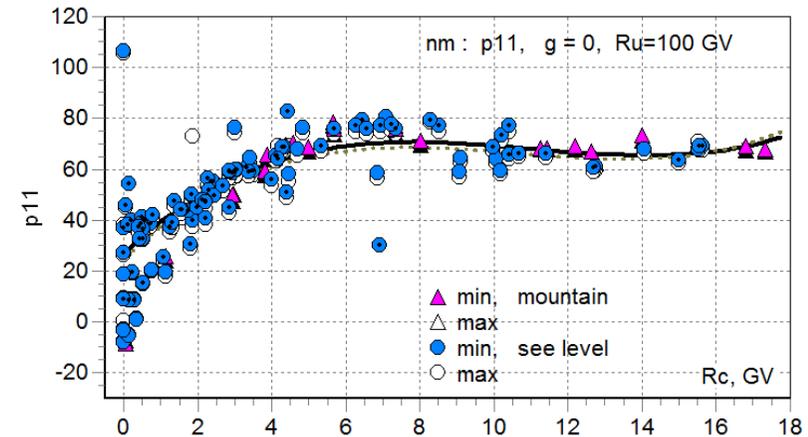
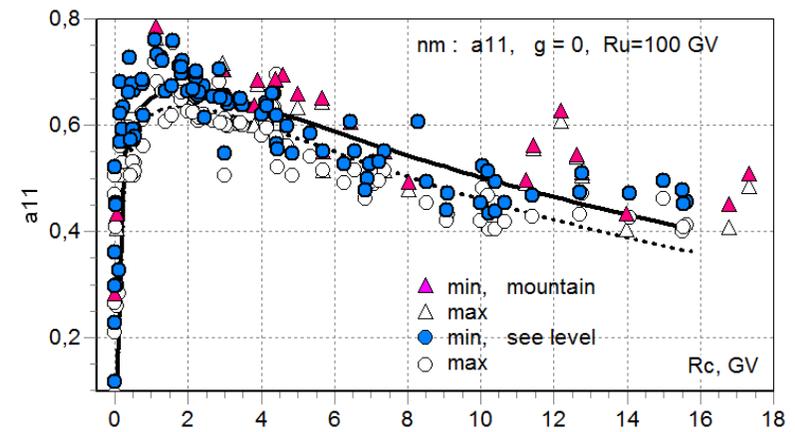
Есть и другая форма записи, векторная – метод приемных векторов

Х 3. Приемные вектора

Вычисления приемных коэффициентов для Мировой сети нейтронных мониторов были вычислены в работе [Yasue et al., 1982], для некоторых мюонных телескопов в работе [Fujimoko et al., 1984].

γ	R_u, GV	c_{00}	c_{10}	a_{11}	φ_{11}°
0.0	30	0.6300	0.0787	0.5490	55.90
0.0	50	0.7240	0.1370	0.6130	53.83
0.0	70	0.7730	0.1710	0.6400	52.67
0.0	80	0.7890	0.1830	0.6490	52.25
0.0	100	0.8150	0.2020	0.6610	51.59
0.0	150	0.8530	0.2310	0.6780	50.55
0.0	200	0.8760	0.2480	0.6870	49.92
0.0	300	0.9020	0.2670	0.6980	49.17
0.0	500	0.9270	0.2870	0.7070	48.43
0.0	1000	0.9510	0.3050	0.7160	47.70

Зависимость приемного коэффициента a_{11} , фазы φ_{11} и северо-южной анизотропии c_{10} от жесткости для показателя спектра первой гармоники $\gamma=0$. Треугольники - горные станции, кружки – уровень моря. Аппроксимирующие кривые для уровня моря вблизи минимума (сплошная) и максимума (пунктирная) солнечной активности.



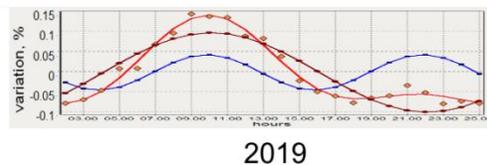
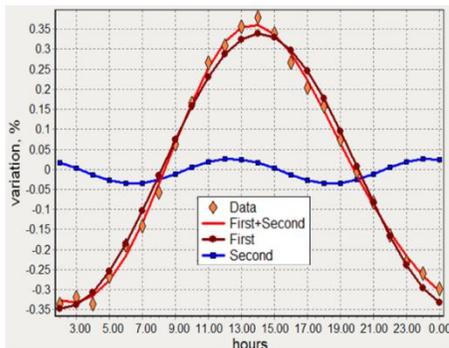
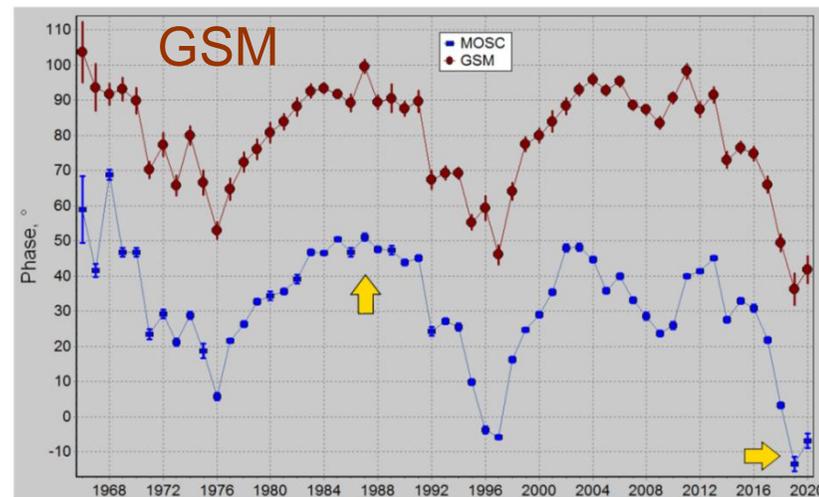
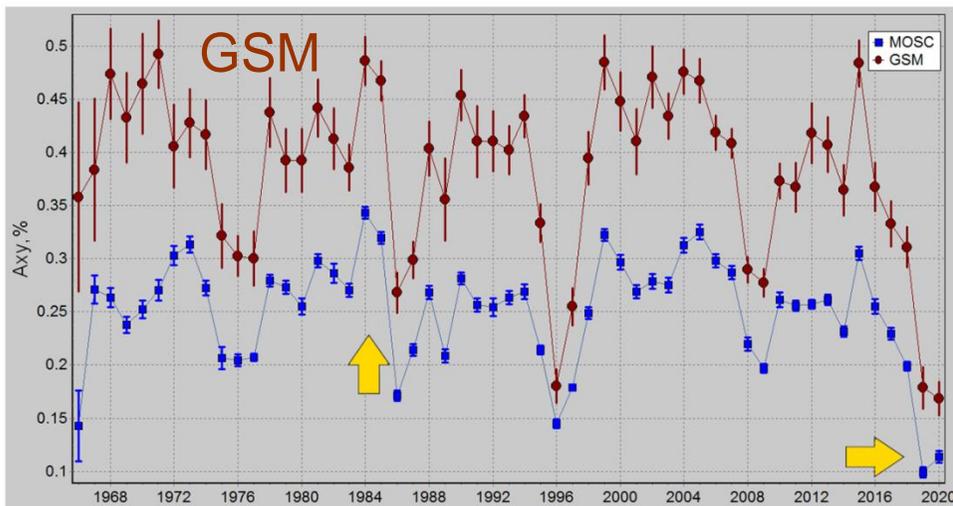
4. Гармонический анализ

$$f(t) = \sum_{m=0}^{\infty} [a_m \cos(m \frac{2\pi}{T} t) + b_m \sin(m \frac{2\pi}{T} t)] = \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos(m \frac{2\pi}{T} t - \varphi_m)$$

$$A_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2}$$

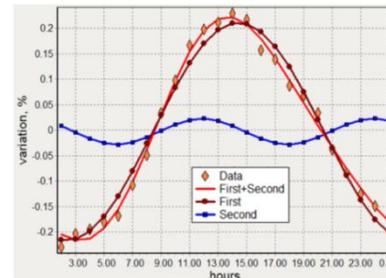
$$\varphi_m = \arctan\left(\frac{b_m}{a_m}\right)$$

Амплитуды и фазы первой гармоники, найденные методом GSM и гармоническим анализом, связаны как $A_1^{GSM} = A_1/A_{11}$ и $\varphi_1^{GSM} = \varphi_1 + \varphi_{11}$.

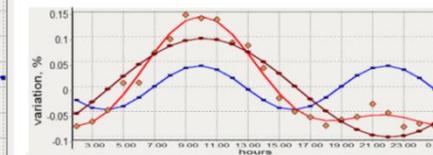


1984

2019



1987



2019

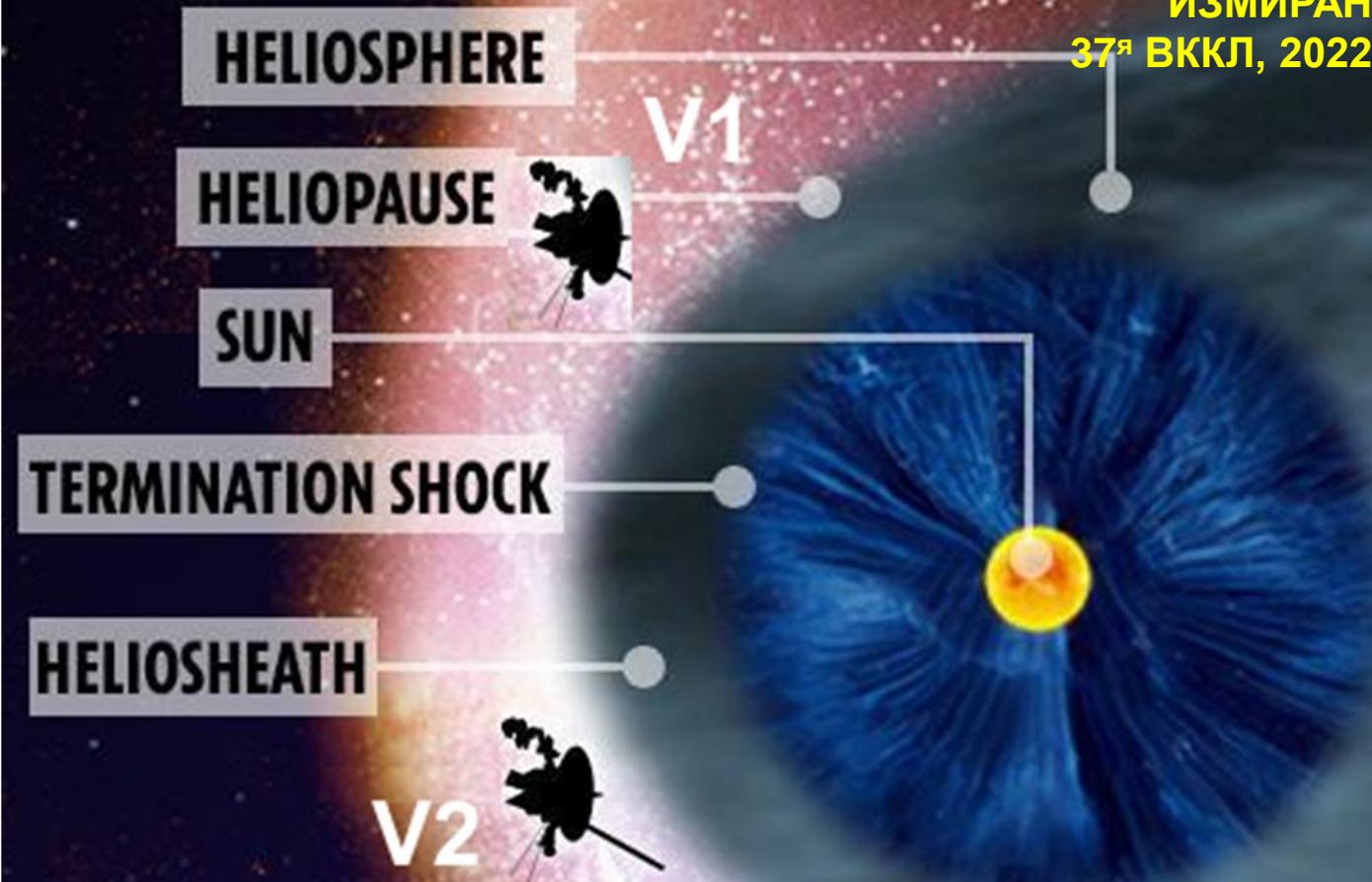
Большая и небольшая амплитуда

Поздняя и ранняя фаза

BOW SHOCK



Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т.,
Оленева В.А.
ИЗМИРАН
37^я ВККЛ, 2022



Содержание

1. Введение
2. Методы анализа
3. Метод GSM
4. Метод GA
5. Анизотропное приближение
6. GSM и экваториальная компонента первой гармоники анизотропии
7. GSM и северо-южная составляющая анизотропии
8. Изотропное приближение
9. Индексы и набор параметров моделирования
10. Многопараметрическая модель вариаций КЛ
11. Жесткоушной спектр вариаций КЛ
12. КА и наземная сеть
13. Сравнение PAMELA, AMS-02 и GSM
14. Экспериментальный спектр вариаций
15. Остаточная модуляция

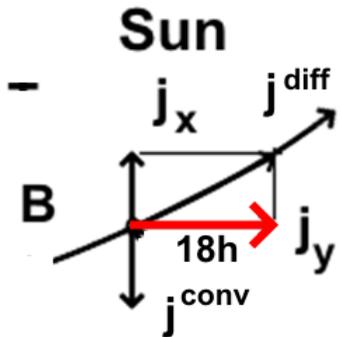
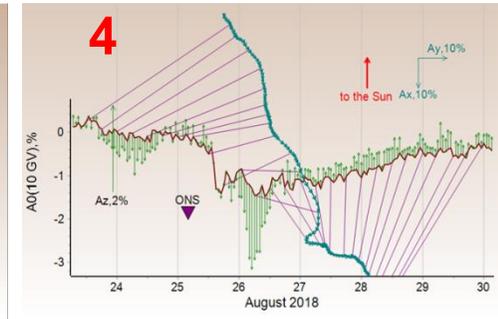
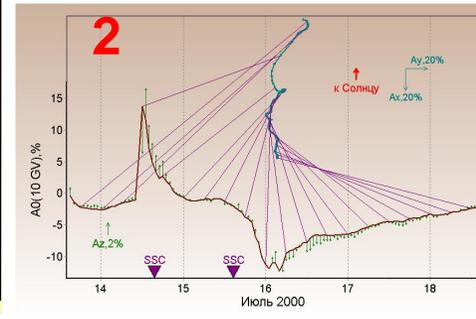
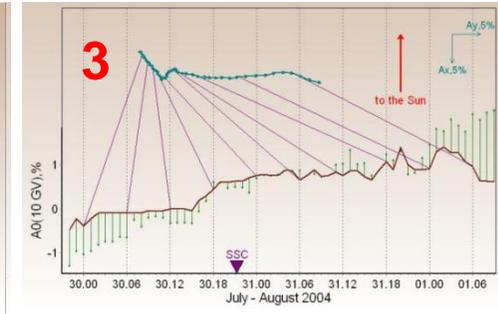
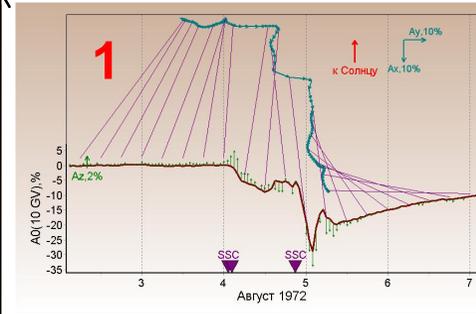
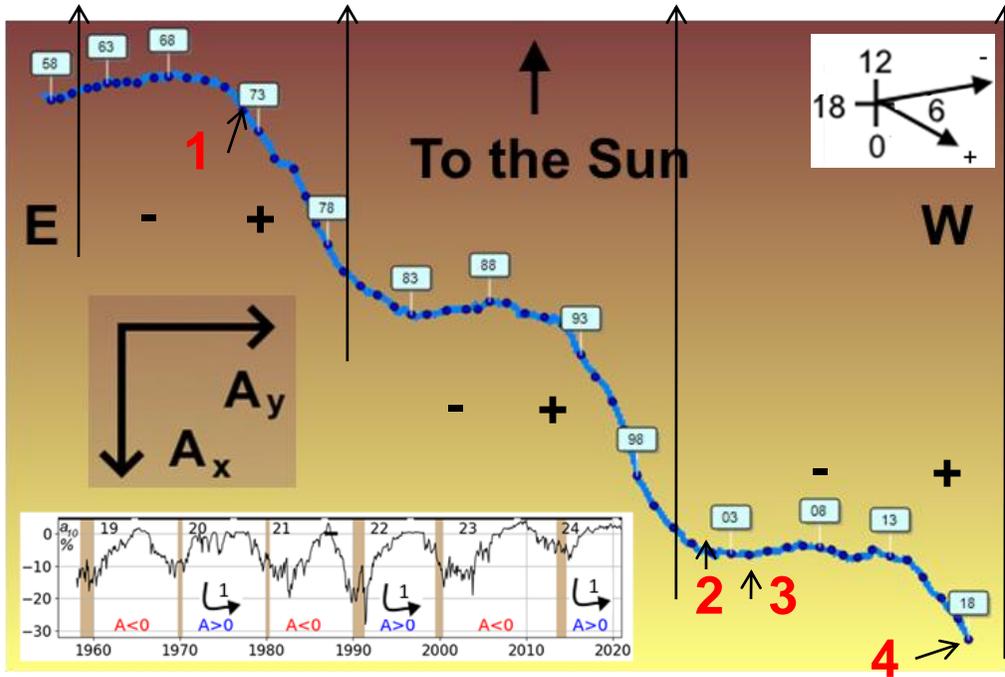
Долговременная модуляция
космических лучей:
взгляд с орбиты Земли

9. Долговременные изменения фазы первой гармоники анизотропии

$$v^i = aC_0^i(\gamma) + C_x^i \cdot A_x + C_y^i \cdot A_y + C_z^i \cdot A_z$$

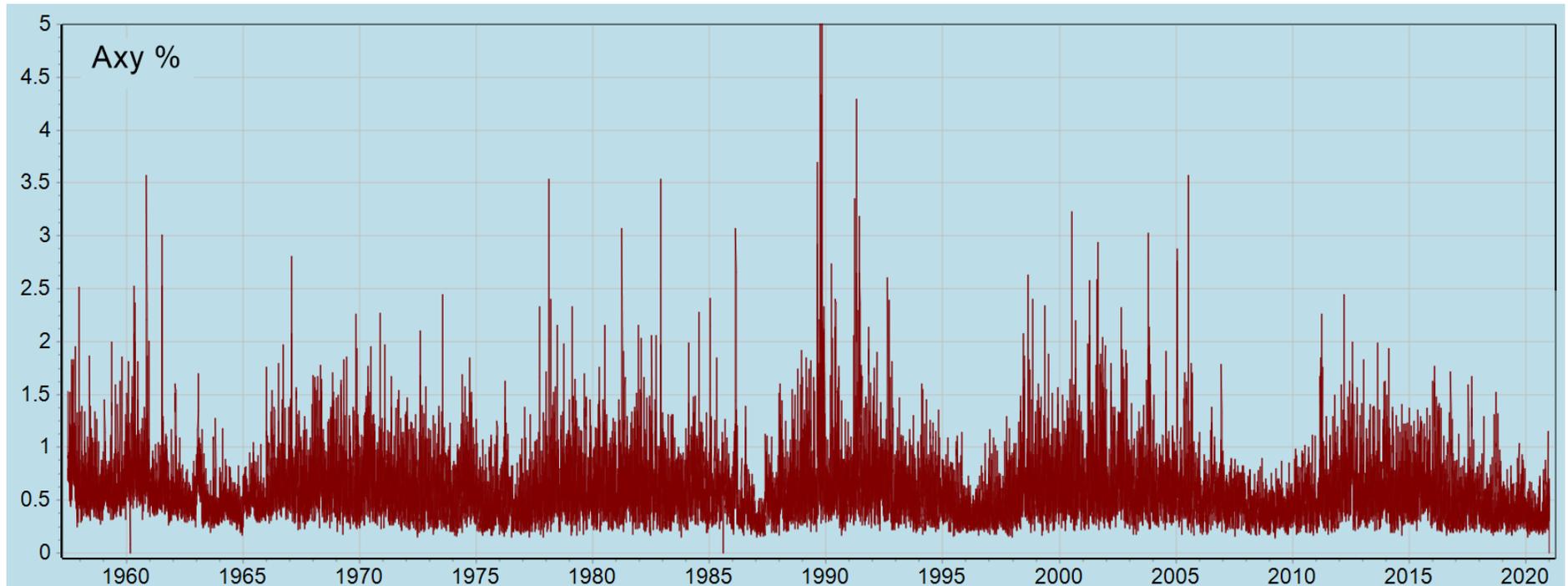
или $v = a_0 + A_{xy} \cos(\omega t + \varphi_1) + \dots$

«Сцепленная» векторная диаграмма солнечно-суточной анизотропии, полученная по часовым данным сети NM и примеры некоторых отдельных событий. [Белов и др., 2015, 2021]



Анизотропия возникает вследствие диффузии КЛ в спиральном магнитном поле Солнца и компенсирует конвекцию КЛ солнечным ветром и направлена внутрь солнечной системы.
 Фазой анизотропии управляет 22 летний цикл. Эта регулярная картина драматически изменяется, если перейти к меньшим временным масштабам (1-4).
 [Крымский, 1964; Паркер 1965]

9. Долговременные изменения экваториальной компоненты первой гармоники анизотропии

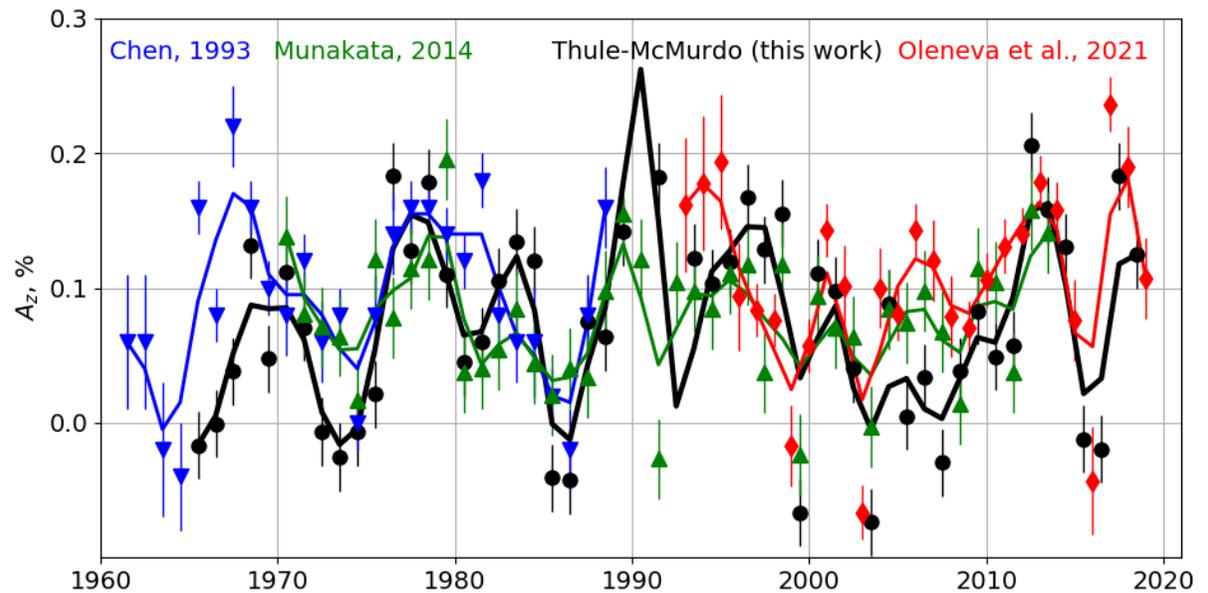
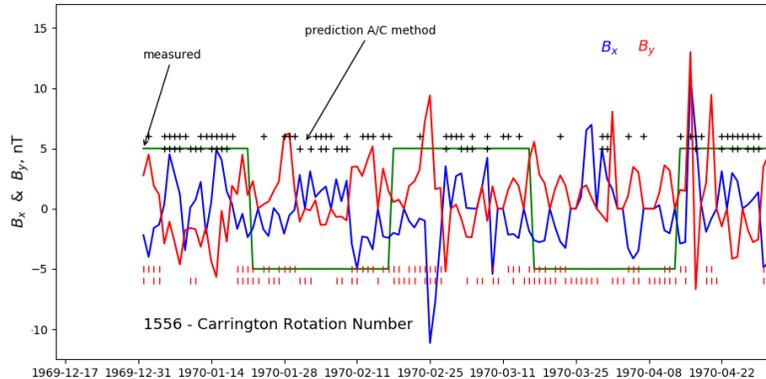


В отличие от фазы, амплитуда анизотропии экваториальной компоненты подчиняется 11-летнему циклу солнечной активности *не очень эффектно смотрится*.

Поведение экваториальной компоненты амплитуды анизотропии в слабом 24 цикле **не сильно отличается**, например, от 20 цикла. Модуляция – глобальная картина и определяется всей гелиосферой, а анизотропия – более локальная история.

Х 10. Долговременные изменения северо-южной составляющей анизотропии

$$A_{NS} = 2 \frac{f_N - f_S}{f_N + f_S}; f = N / N_{Base}$$



Полярность поля в секторе [Svalgaard, 1976] или магнитная индукция компонент поля B_{IMF} у Земли.

Ток Холла. Стационарная северо-южная анизотропия [B grad n] представляет собой поток, управляемый радиальным градиентом космических лучей grad n.

Сравнение северо-южной анизотропии A_{NS} , полученной различными авторами по данным пары нейтронных мониторов (медианная жесткость 17 GV): [Chen et al., 1993], [Munakata et al., 2014], [Oleneva et al., 2021] и северо-южная анизотропия, полученная методом GSM по данным сети нейтронных мониторов [Oleneva et al., 2021].

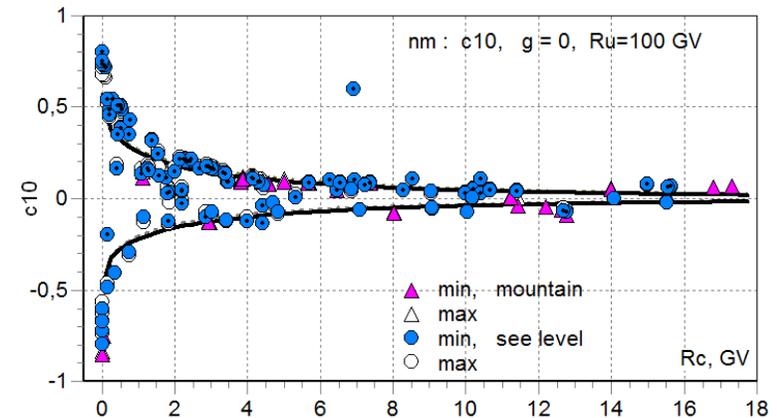
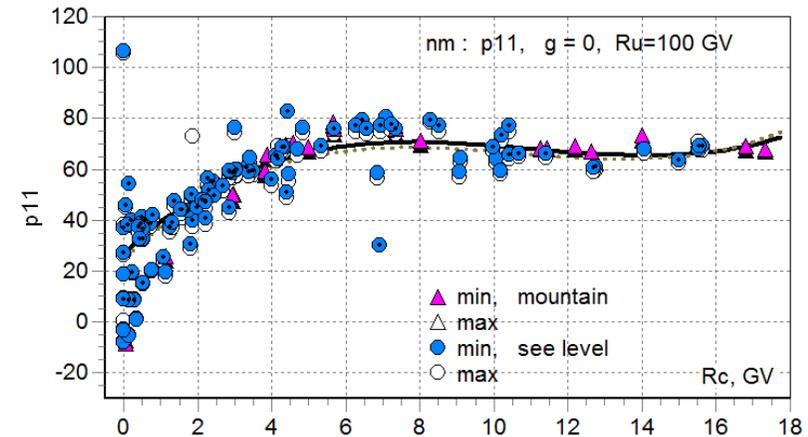
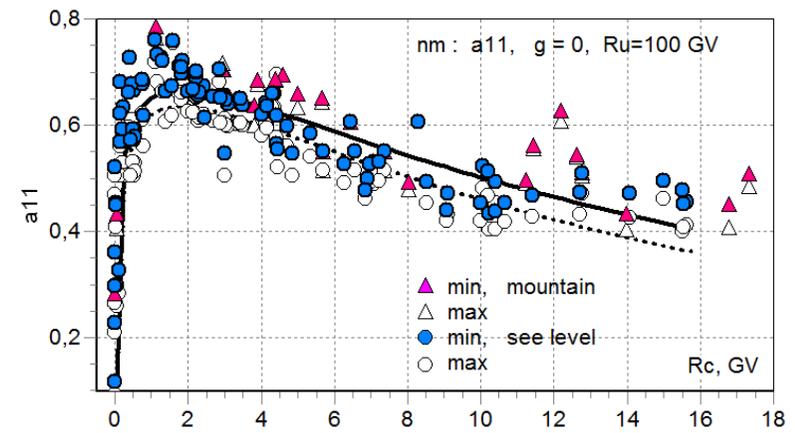
Вывод. Амплитуда северо-южной анизотропии подчиняется 11-летнему циклу солнечной активности. Амплитуда достигает 0.1%.

X 10. Приемные вектора

Вычисления приемных коэффициентов для Мировой сети нейтронных мониторов были вычислены в работе [Yasue et al., 1982], для некоторых мюонных телескопов в работе [Fujimoko et al., 1984].

γ	R_u, GV	c_{00}	c_{10}	a_{11}	φ_{11}°
0.0	30	0.6300	0.0787	0.5490	55.90
0.0	50	0.7240	0.1370	0.6130	53.83
0.0	70	0.7730	0.1710	0.6400	52.67
0.0	80	0.7890	0.1830	0.6490	52.25
0.0	100	0.8150	0.2020	0.6610	51.59
0.0	150	0.8530	0.2310	0.6780	50.55
0.0	200	0.8760	0.2480	0.6870	49.92
0.0	300	0.9020	0.2670	0.6980	49.17
0.0	500	0.9270	0.2870	0.7070	48.43
0.0	1000	0.9510	0.3050	0.7160	47.70

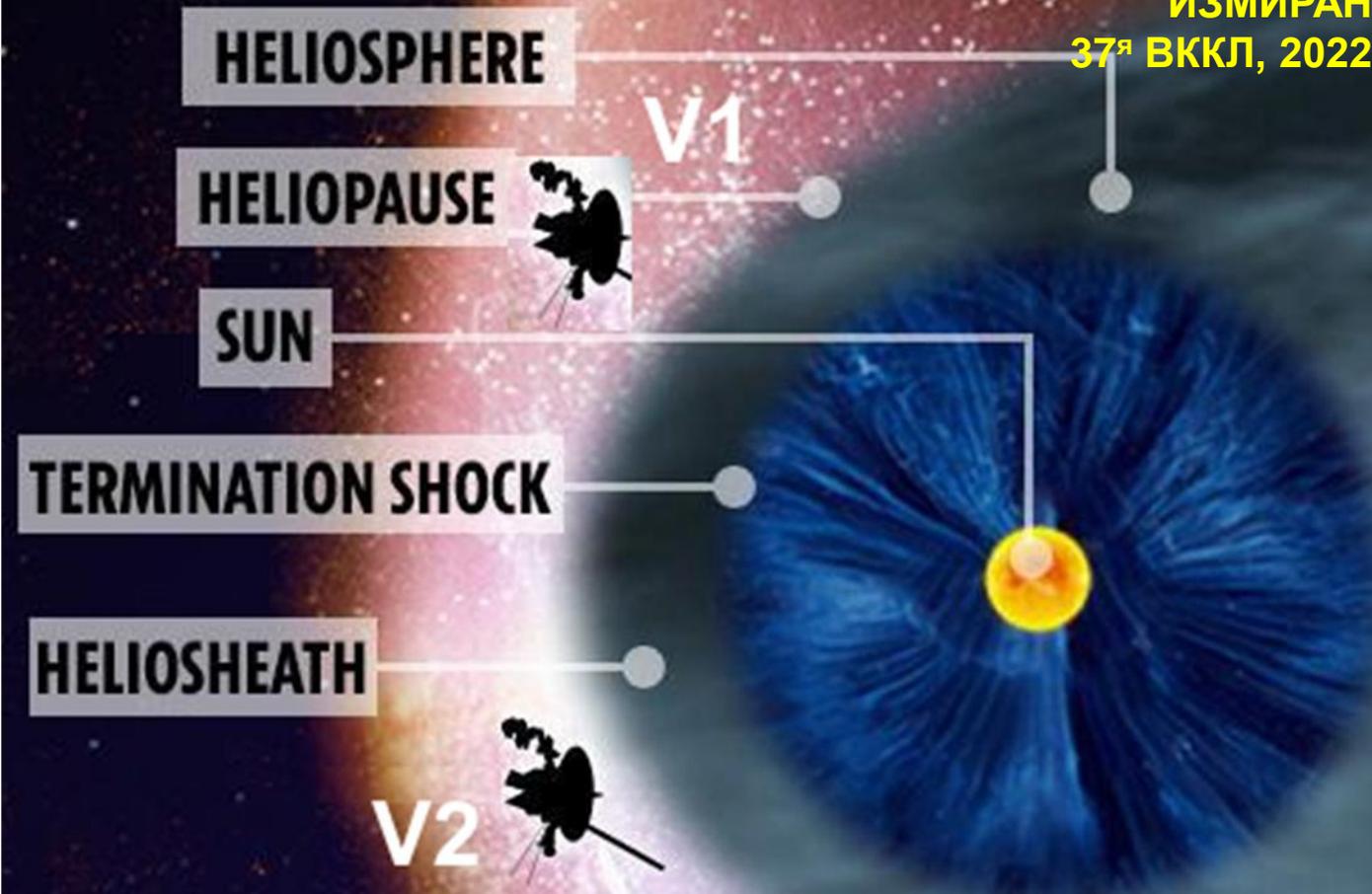
Зависимость приемного коэффициента a_{11} , фазы φ_{11} и северо-южной анизотропии c_{10} от жесткости для показателя спектра первой гармоники $\gamma=0$. Треугольники - горные станции, кружки – уровень моря. Аппроксимирующие кривые для уровня моря вблизи минимума (сплошная) и максимума (пунктирная) солнечной активности.



BOW SHOCK



Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т.,
Оленева В.А.
ИЗМИРАН
37^я ВККЛ, 2022



Содержание

1. Введение
2. Методы анализа
3. Метод GSM
4. Метод GA
5. Анизотропное приближение
6. GSM и экваториальная компонента первой гармоники анизотропии
7. GSM и северо-южная составляющая анизотропии
8. Изотропное приближение
9. Индексы и набор параметров моделирования
10. Многопараметрическая модель вариаций КЛ
11. Жесткоушной спектр вариаций КЛ
12. КА и наземная сеть
13. Сравнение PAMELA, AMS-02 и GSM
14. Экспериментальный спектр вариаций
15. Остаточная модуляция

Долговременная модуляция
космических лучей:
взгляд с орбиты Земли

8. Особенности модуляции в разных циклах

Большое внимание различными исследователями уделяется **23**-му солнечному циклу, который оказался самым продолжительным, а поток галактических КЛ в конце цикла достиг максимального значения за весь период наблюдений КЛ [Lockwood, 2010]. Этот минимум СА считается аномальным и предоставляет уникальную возможность проверки теории модуляции КЛ, а также установления истинных причин такой аномальной интенсивности КЛ.

В работе [Ferreira, Potgieter, 2004] развита многопараметрическая модель, в которой на основе экспериментальных данных определяются временные зависимости коэффициентов в уравнении переноса КЛ. В последующем модель [Manuel et al., 2014] удовлетворительно описывала поведение интенсивности КЛ, зарегистрированной на космических аппаратах Voyager-1/2, IMP-8 и Ulysses. Согласно выводам авторов, наблюдаемое поведение интенсивности КЛ в 2004–2010 гг. в 23-м цикле СА обусловлено, прежде всего, изменениями коэффициента диффузии, а не коэффициента дрейфа. ($A < 0$, $< -$)

В работе [Герасимова и др., 2017] установлено, что аномальное возрастание интенсивности космических лучей в конце **23**-го цикла солнечной активности связано с остаточной модуляцией, производимой дозвуковым СВ-ным ветром за фронтом стоячей ударной волны.

В работе [Gushina et al., 2022] показаны особенности восстановленных потоков частиц в периоды низкой СА и особо отмечаются вариации в минимуме **23**-го цикла СА. В конце этого цикла наблюдалось аномально большое возрастание потоков плотности КЛ, особенно для малых энергий, что являлось КЛ на начавшееся в конце 22-го цикла СА ослабление магнитного поля на Солнце.

В конце **24**-го цикла СА (2020 год) вариации КЛ имеют очень мягкий жесткостной спектр.

В работе [Pacini, Usoskin, 2015] на основе анализа данных полярных нейтронных мониторов для **24**-го цикла СА установлено, что частицы в последнем цикле испытывают более слабую гелиосферную модуляцию, чем в предыдущих. В то же время частицы с более высокими энергиями не испытывают таких значительных изменений в процессе модуляции. Это явление авторы связывают с уменьшением уровня турбулентности ММП в последнем солнечном цикле [Bisoi et al., 2014; Starodubtsev, Grigoryev, 2011], которое существенно влияет на распространение КЛ в гелиосфере. Подобный вывод, но уже на основе численного моделирования уравнения переноса КЛ и данных нейтронных мониторов был получен в работе [Zhao et al., 2014].

9. Модель вариаций

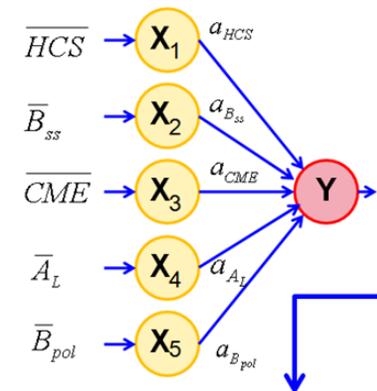
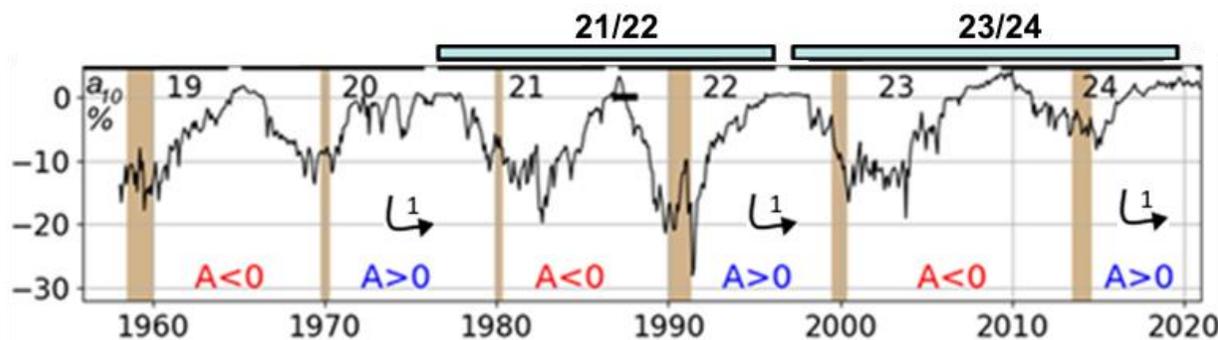
Эмпирические модели модуляции, т.е. модуляция как функция некоторых солнечных параметров, пытались строить с самого начала мониторинга космических лучей. Еще на раннем этапе была выявлена обратная зависимость интенсивности галактических КЛ от СА, изменяющаяся с 11-летним периодом [Глокова, 1952; Forbush, 1954].

Многие исследователи [Stozhkov and Charachchyan, 1970; Moraal, 1976; Dorman and Gushchina, 1977] получали вполне удовлетворительные результаты, связывая поведение космических лучей с различными солнечными индексами. В пределах солнечного цикла корреляция достигала 0.98 и, казалось бы, задача решена.

Но связь различна для различных солнечных и магнитных циклов. Невозможно объяснить суть этой связи, базируясь на однопараметрической модели.

Числа Вольфа, например, не должны иметь прямой связи с вариациями КЛ, должен быть физический посредник, воздействующий непосредственно на космические лучи.

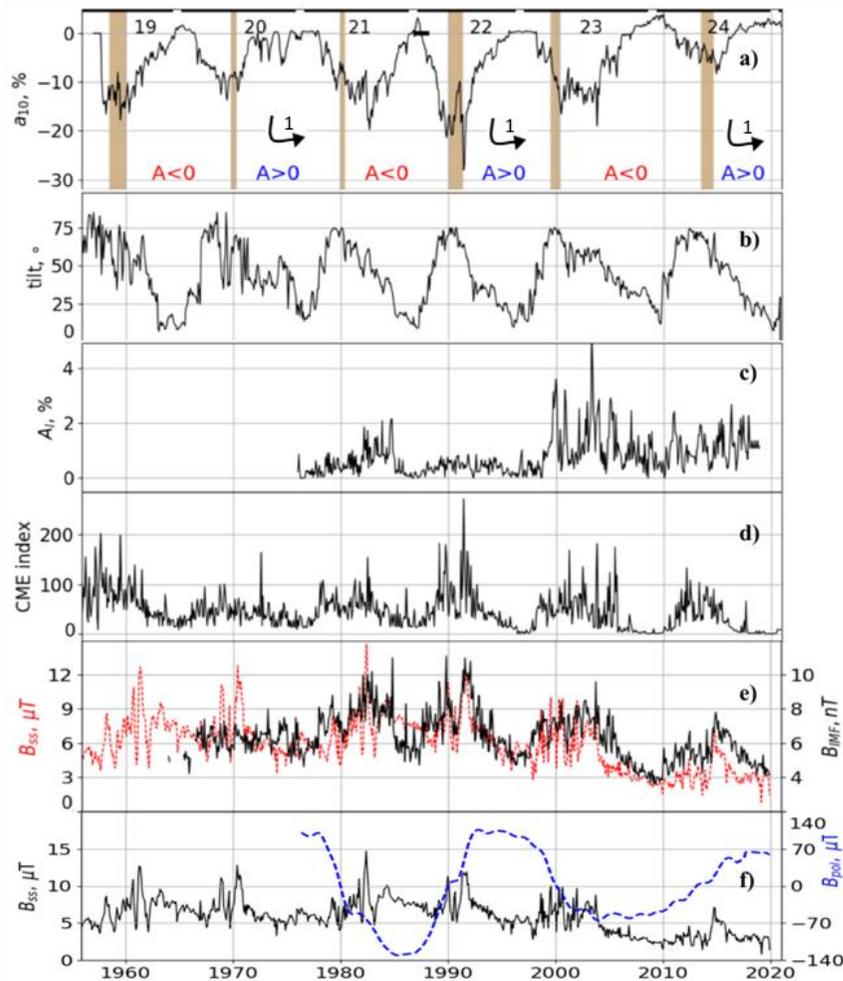
Сегодня ясно, что ключом ко всем активным явлениям, происходящим на Солнце, в солнечной атмосфере и гелиосфере являются магнитные поля. Уравнение множественной регрессии 5 параметров.



$$v(t) = a_0 + a_{\eta_{HCS}} \overline{\eta_{HCS}}(1, t, \tau_{\eta_{HCS}}) + a_{i_{CME}} \overline{i_{CME}}(1, t, \tau_{i_{CME}}) +$$

$$+ a_{A_L} \overline{A_L}(1, t, \tau_{A_L}) + a_{B_{ss}} \overline{B_{ss}}(1, t, \tau_{B_{ss}}) + a_{B_{pol}} \overline{B_{pol}}(1, t, \tau_{B_{pol}})$$

9. Набор параметров моделирования



Линейная модель и управляющие параметры X:

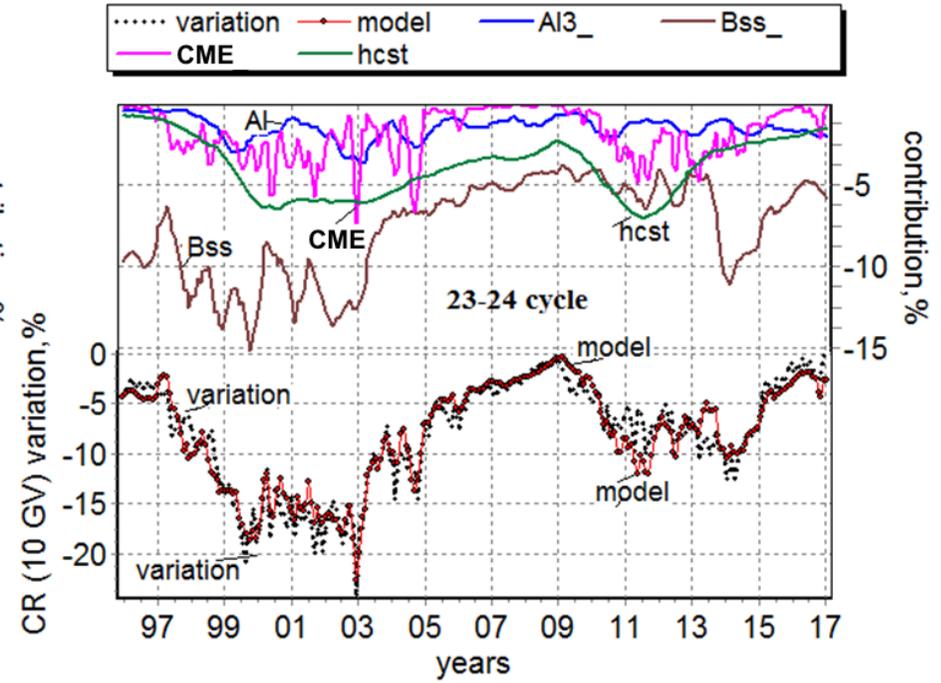
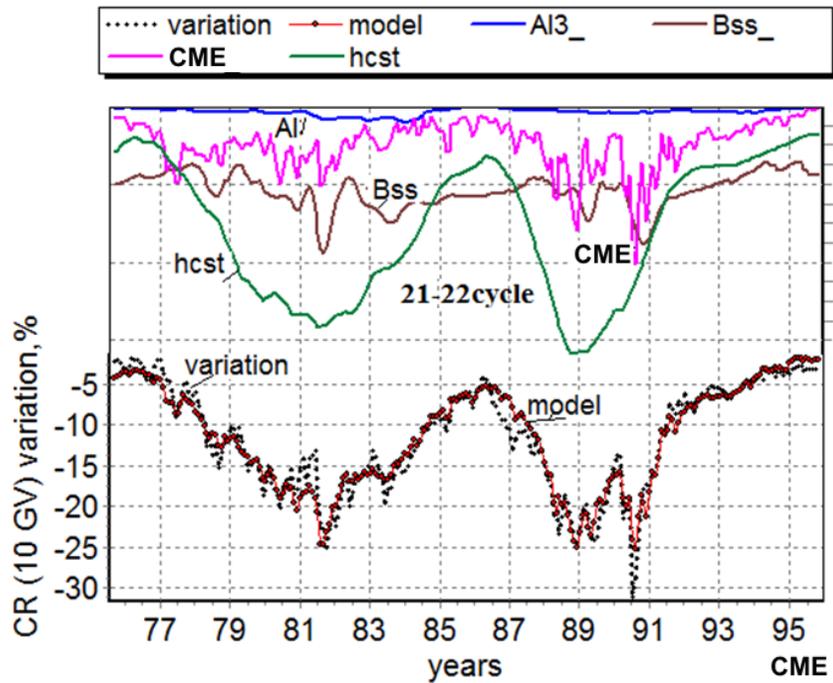
$$v(t) = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5$$

Выбор и анализ солнечно-гелиосферных характеристик выполнялся в работах [Belov et al., 2002] и [Gushchina et al., 2008, 2012, 2013]. При построении современных моделей вариаций привлекались солнечно-гелиосферные индексы.

Параметры моделирования (вариации КЛ, 10 ГВ):

- наклон гелиосферного токового слоя (HCS);
- магнитная индукция (среднее магнитное поле Солнца $2.5r_{\odot}$ (B_{ss}) [Obridko et al., 1999];
- магнитная индукция полярного магнитное поля Солнца (B_{pol});
- площадь низкоширотных корональных дыр (A_L) [Гущина и др., 2016];
- спорадическая акт. -индекса CME [Белов и др., 2018].

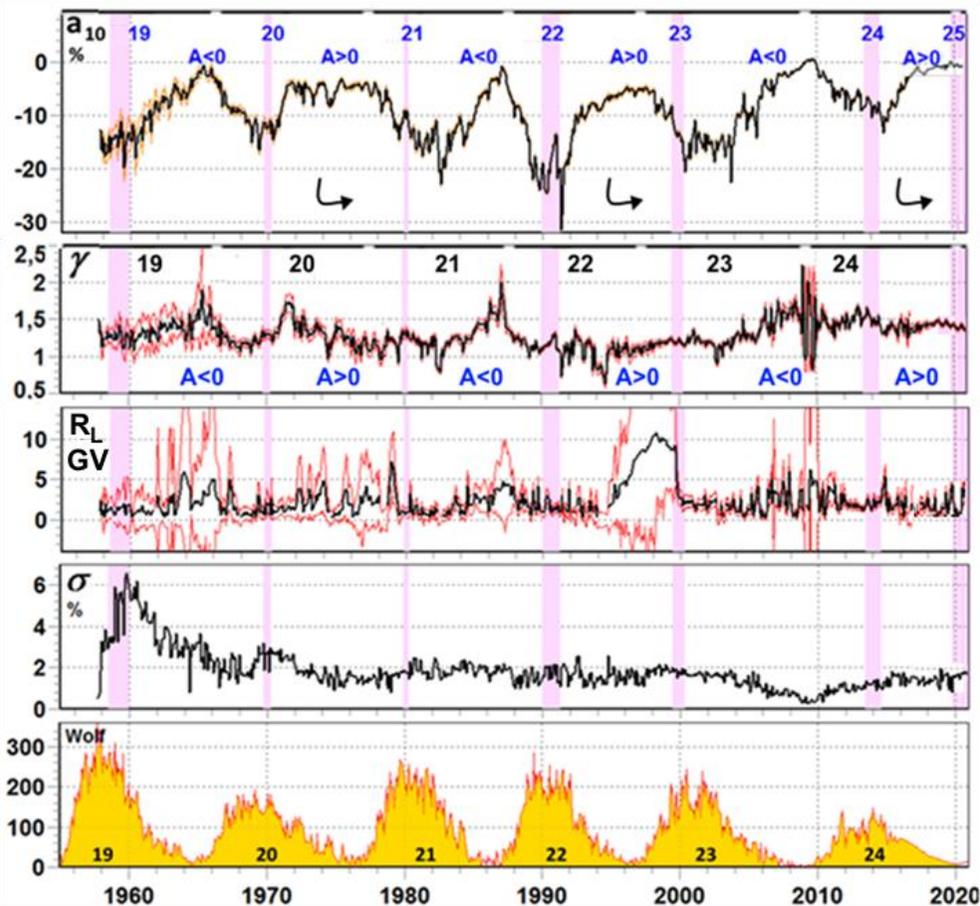
9. Многопараметрическая модель вариаций КЛ



Верхняя панель – вклад от изменений параметров: наклона токового слоя HCS (зеленая кривая), среднего магнитного поля Солнца B_{ss} (коричневая), CME индекса (розовая) и площади корональных дыр A_L (синяя): а) 21-22 и б) 23-24 циклы. Нижняя панель – амплитуда a_{10} вариаций плотности КЛ с жёсткостью 10 ГВ и результат моделирования вариаций (сплошная черная кривая) [Белов и др., 2020]. $\sigma = 0.18\%$, $\rho = 0.94$.

Видно, что определяющая роль в создании модуляции в 21-22 циклах принадлежит **наклону токового слоя**, а в 23-24 циклах - **среднему магнитному полю Солнца**. Модуляция КЛ в 23-24 циклах СА значительно слабее, чем модуляция в 21-22 циклах СА.

11. Жесткостной спектр долгопериодных вариаций



Параметры спектра вариаций галактических КЛ a_{10} , R_L и γ , и стандартная статистическая погрешность σ при моделировании спектра вариаций формой (1) в [Белов и др., 2018].

Спектральные характеристики долговременных вариаций КЛ определяются глобально спектрографическим методом GSM. В нулевом приближении решение задачи сводится к решению системы интегральных уравнений Фредгольма I-го рода:

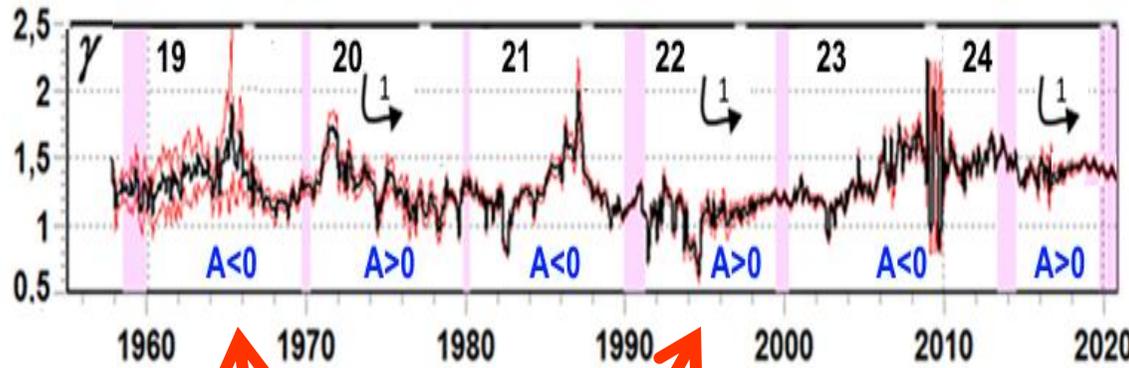
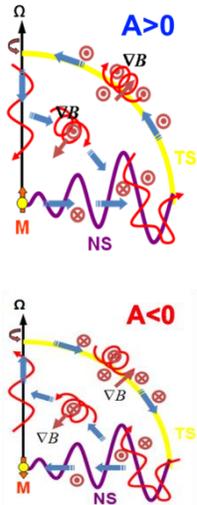
$$v^i = a_1 \int_{R_c^i}^{R_U} W^i(R) \cdot \partial J / J(R) dR \quad (1)$$

где в качестве ядра интегрального уравнения выступает функция связи $W^i(R)$, а в качестве неизвестной функции – спектр вариаций dJ/J , R_U верхняя жесткость частиц, до которой модулируются частицы в гелиосфере. Спектр вариаций космических лучей представлялся в трехпараметрическом виде

$$\partial J / J(R) = a_1 (R_L + R)^{-\gamma} \quad (2)$$

При решении задачи привлекались данные мировой сети нейтронных мониторов [nmdb, 2021], стратосферных наблюдений [Stozhkov et al., 2007] и данных мюонного телескопа Нагойя [mddb, 2021].

Зависимость модуляции от энергии



$$\frac{\delta N}{N} = (2 + \gamma) \frac{\Delta E}{E} \quad (2)$$

$$\Delta E = |q\Phi| + p \int_r^R \frac{u}{\lambda} dr \quad (3)$$

[Kota, 1979]

Важно, что слагаемые в выражении (3) имеют разную зависимость от энергии. Для энергий частиц больше нескольких ГэВ рассеяние происходит на магнитных неоднородностях с масштабами меньшими гирорадиуса частиц. В этом случае теория предсказывает квадратичную зависимость длины свободного пробега от импульса частиц $\lambda \sim p^2$ [Долгинов и др., 1966]. При меньших энергиях длина свободного пробега слабо зависит от импульса частиц.

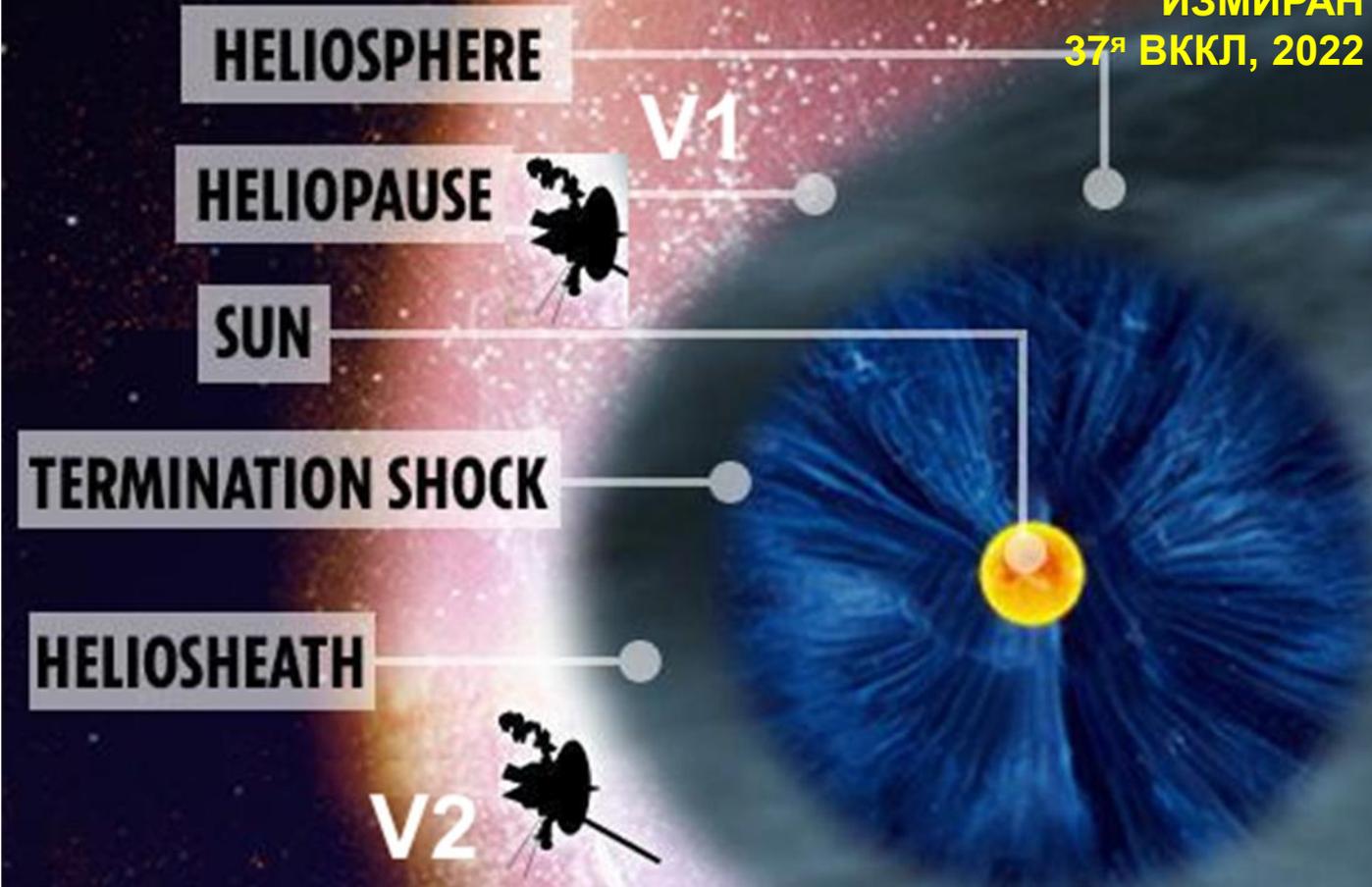
(диффузия) Таким образом, в минимуме отрицательных циклов солнечной активности, когда наклон токового слоя мал ожидается p^2 зависимость модуляции. В реальной ситуации наклон увеличивает длину пути частиц вдоль токового слоя, то есть замедляет их движение к Земле, что должно приводить к большей модуляции [Долгинов и др., 1966] (19, 21, 23). Однако при больших наклонах выражение (2) неприменимо. Ожидается, что при достаточно больших наклонах средняя скорость движения на экваторе определяется только дрейфом в неоднородном поле, что соответствует зависимости p^{-1} модуляции.

(дрейф) В минимумах положительных циклов модуляция в основном определяется первым слагаемым в выражении (3) и ожидается p^{-1} зависимость модуляции. Влияние наклона токового слоя минимально. Ближе к максимуму когда наклон велик, дрейф частиц вблизи токового слоя, направленный во внешнюю гелиосферу может частично компенсировать противоположно направленный дрейф частиц у полюсов, что приведет к усилению модуляции. Зависимость модуляции от энергии не изменится.

BOW SHOCK



Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т.,
Оленева В.А.
ИЗМИРАН
37^я ВККЛ, 2022

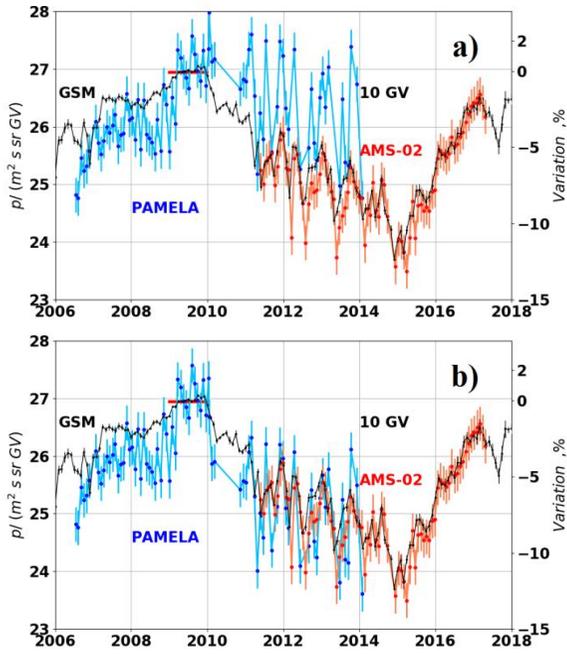


Содержание

1. Введение
2. Методы анализа
3. Метод GSM
4. Метод GA
5. Анизотропное приближение
6. GSM и экваториальная компонента первой гармоники анизотропии
7. GSM и северо-южная составляющая анизотропии
8. Изотропное приближение
9. Индексы и набор параметров моделирования
10. Многопараметрическая модель вариаций КЛ
11. Жесткостной спектр вариаций КЛ
12. КА и наземная сеть
13. Сравнение PAMELA, AMS-02 и GSM
14. Экспериментальный спектр вариаций
15. Остаточная модуляция

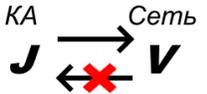
Долговременная модуляция
космических лучей:
взгляд с орбиты Земли

13. Сравнение долговременных наземных изменений с данными PAMELA и AMS-02



По данным PAMELA и AMS-02 впервые была проведена калибровка детекторов наземной сети [Belov et al., 2021].

Детекторы частиц КА калиброваны на ускорителе и при известном геометрическом факторе, определяются абсолютные значения интенсивности.

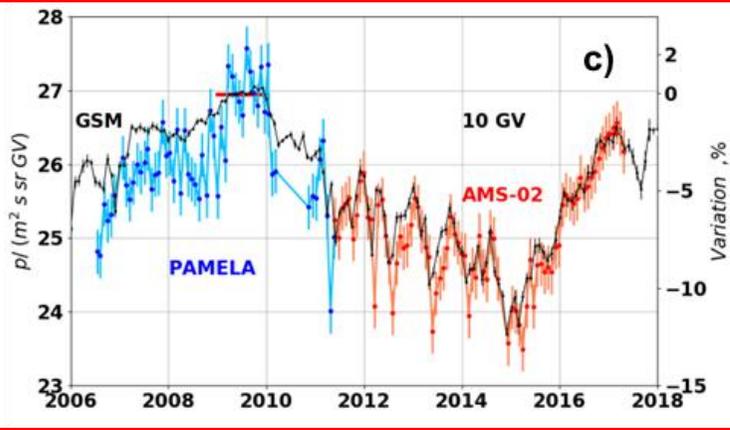


Наземные детекторы не калиброваны и мы вынуждены работать с вариациями. **Переход к вариациям космических лучей фактически означает “калибровку относительно начального базового момента”, т.е. относительно нуля, который мы сами установили.**

Сравнение данных сети необходимо выполнить для AMS-02 (stat).

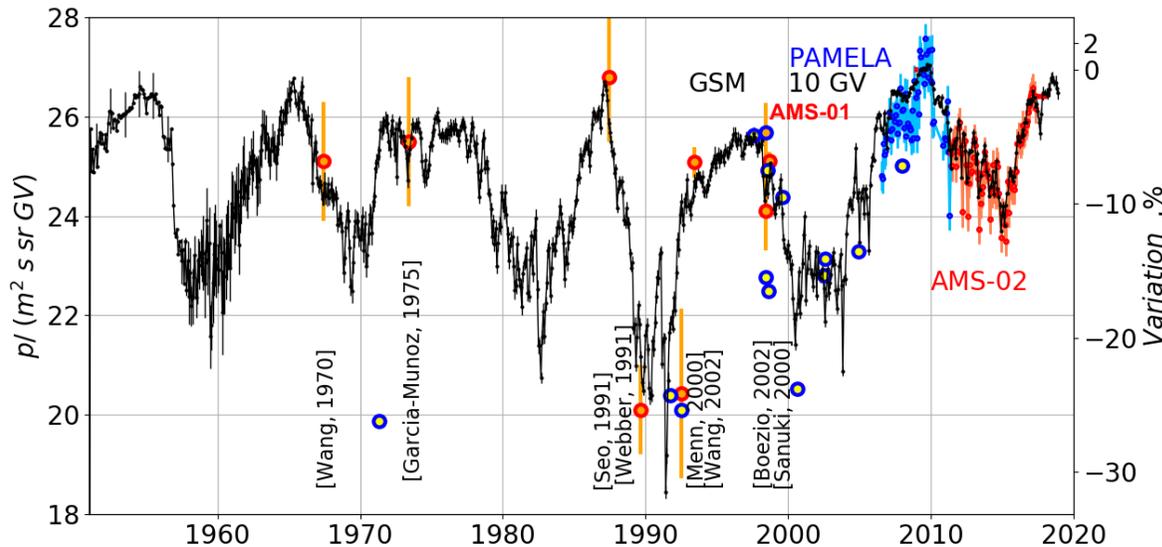
- 1) провести калибровку результатов GSM по данным PAMELA (только 1 подгоночный параметр – калибр. 2009),
- 2) проведено сравнение с данными PAMELA и AMS-02 для жесткости КЛ 10 GV.

Прямые измерения вблизи 10 GV: магнитный спектрометр PAMELA [Adriani et al., 2017] и AMS-02 [Aguilar et al., 2018]. Геометрический фактор MC PAMELA 21.5 cm²sr (4.8%), AMS-02 ~0.5 m²sr (1.5%) [Ting, 2013], а данные описаны в работе [DiFelice et al., 2017]. GSM ~0.3%±syst.



Вывод. Наблюдается хорошее согласие. Нет дрейфа относительно базы 2009 года. Для 2012-2015 годов GSM дает 2х кр. расхождение вариаций.

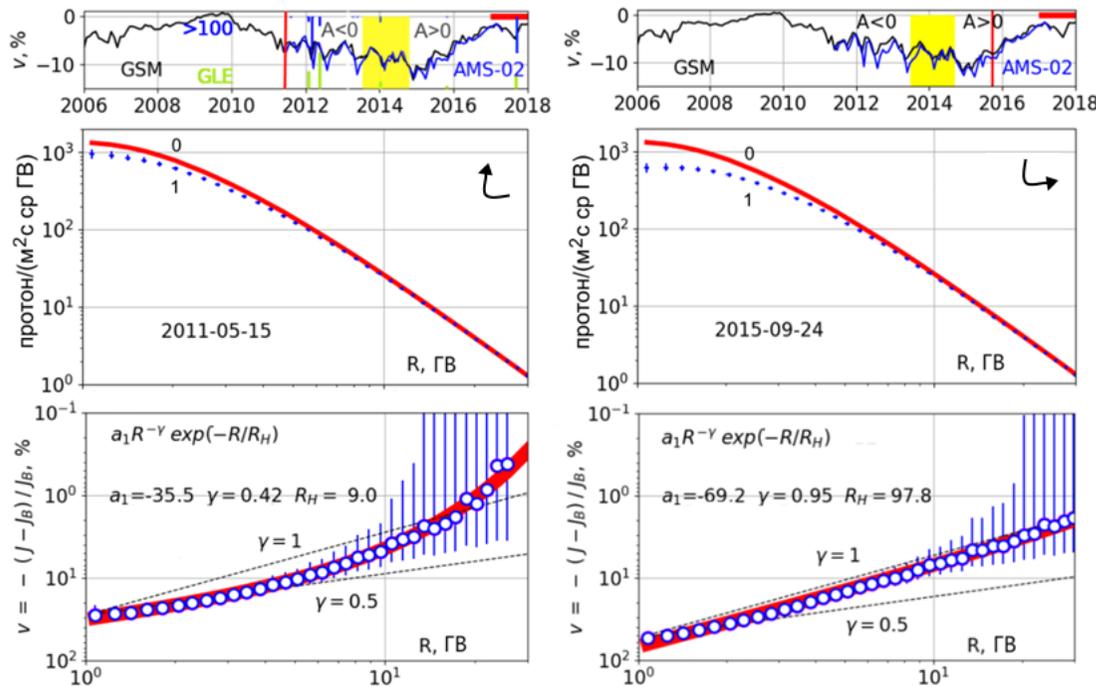
X 13. Сравнение долговременных наземных и аэростатных стратосферных измерений



Сравнение может быть проведено и для более раннего периода. Временные изменения потока протонов GCR на 1AU по данным наземной сети детекторов и сравнение с прямыми измерениями. Точками показаны некоторые данные баллонного стратосферного зондирования. Ссылки в [Yanke et al., 2021; Белов и др., 2021].

Вывод. Методом GSM проведена оценка потока КЛ за пределами магнитосферы за весь период мониторинга. Удовлетворительное согласие с баллонными стратосферными измерениями.

14. Экспериментальный спектр вариаций на орбите Земли по данным AMS-02



Пример результата анализа для периода отрицательной (слева) и положительной полярности (справа) IMF. На средних панелях - спектры частиц и найденные на их основе спектры вариаций - на нижних панелях. [Yanke et al., 2021]

Разнообразие спектров модуляции и сложность их формы еще нуждаются в теоретическом обосновании.

Эмпирический спектр

$$\partial J / J = a_1 (R_L + R)^{-\gamma}$$

Каков спектр вариаций?

Уникальную возможность оценки спектров вариаций КЛ для 1-20 GV на орбите Земли дают высокоточные данные орбитального магнитного AMS-02 [Aguilar et al., 2018], ~1.5% для Каррингтоновского оборота. Наиболее удачным для аппроксимации экспериментального спектра вариаций частиц в широком диапазоне жесткостей оказался степенной спектр, модулированный экспонентой в области верхних жесткостей.

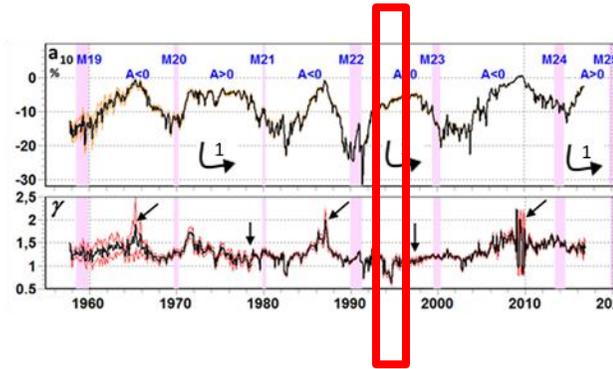
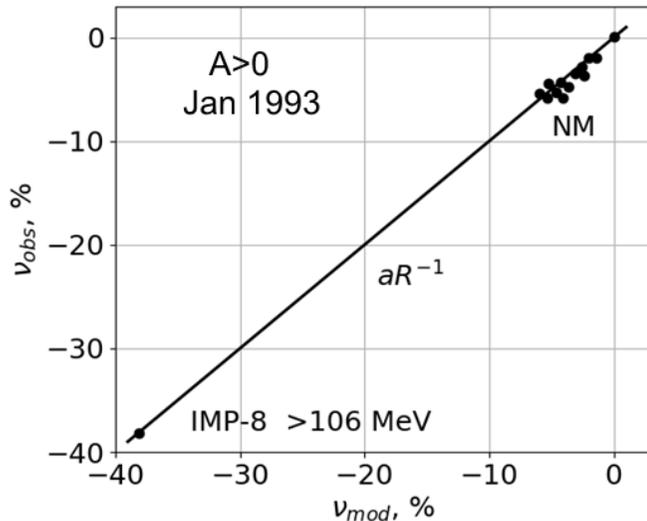
Вывод.

$$\partial J / J = a_1 R^{-\gamma} \exp(-R/R_H)$$

Спектр вариаций КЛ в диапазоне 0.1-10 GeV

Для некоторых периодов в широком диапазоне жесткостей первичная вариация, соответствует простому степенному закону $1/R$ [Belov, 2000]. Пример.

Вариации вычислялись как
$$v^i = \int_{R_c^i}^{R_U} W^i(R) \cdot \partial J/J(R) dR$$



Корреляция расчетной и наблюдаемой нейтронными мониторами и *IMP-8* [IMP-8 Data: 1997] вариаций и их аппроксимация степенным спектром жесткости. Полярность $A>0$. Данные - январь 1993, база 1996. Диапазон жесткостей 0.1 -10 ГэВ.

Этот результат для диапазона жесткостей 2 порядка согласуется с выводом по данным AMS-02: наиболее удачным для аппроксимации спектра вариаций частиц оказался степенной спектр, модулированный экспонентой в области верхних жесткостей, который для $A>0$ переходит в чисто степенной спектр.

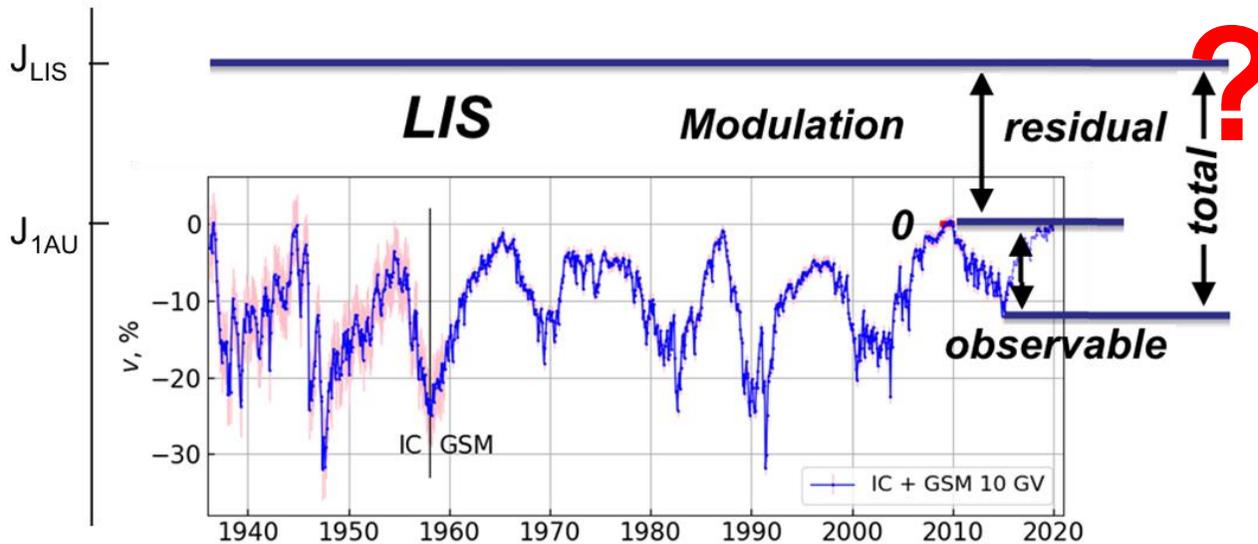
15. Остаточная модуляция в гелиосфере



Что нужно понимать под остаточной модуляцией?

Понятие остаточной модуляции введено еще в начале космической эры в связи с вопросом о размере гелиосферы. По данным КА, достигающих в то время буквально нескольких астрономических единиц, оценивалась остаточная модуляция, т.е. насколько **измеряемая интенсивность частиц** данной энергии отличается от “**интенсивности в межзвездной среде**”.

$$\Delta = J_{1AU} / J_{LIS} - 1$$



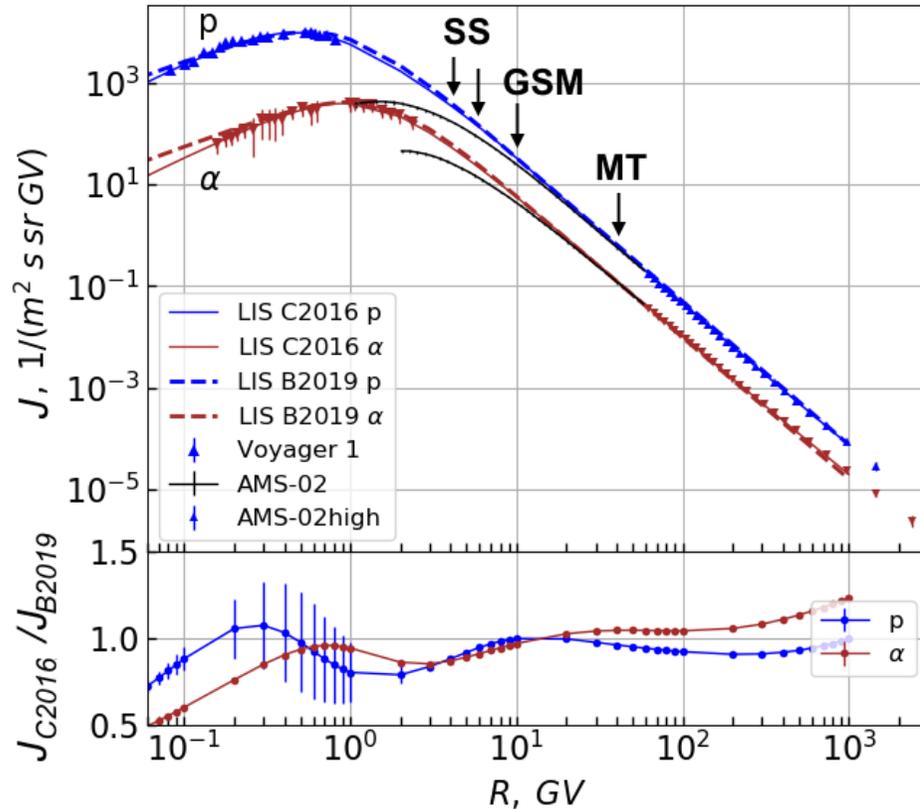
Эту задачу можно ставить и сегодня.

Вопрос: Остаточная модуляция – это несколько % или несколько десятков % и какие выводы о модуляции космических лучей из такого результата можно сделать?

Если магнитное поле Солнца упадет до “нулевых” значений, то через сколько лет гелиосфера заполнится частицами LIS?

Для оценки остаточной модуляции нужно знать интенсивности J_{LIS} и J_{1AU} .

15. Модели LIS спектров, их сравнение



Сравнение двух спектров (верхняя панель) и их отношения (нижняя панель).

Два порядка: от 1 до 100 GV - нет данных!

J_{LIS}

В настоящее время имеется более десятка моделей LIS спектров. Рассматривались только модели спектров, которые привлекали прямые данные *Voyager 1/2* и *AMS-02high*. Рассматривалось 4 модели. Разброс этих моделей определял систематические ошибки: до 10% в крайних интересующих нас точках.

J_{1AU}

Для используемых наземных детекторов SS, NM, MT с эффективной жесткостью $R_{eff} = 4 \pm 0.1, 4.1 \pm 0.1, 5.8 \pm 0.2, 10 \pm 0.3$ и 41 ± 2.5 GV проведена калибровка по данным PAMELA.

C2016 - [Corti et al., *Astrophys. J.*, **829**:8, 9, 2016](#)

B2019 - [Bisschoff et al., arXiv:1902.10438v1, 2019](#)

B2019 - [Boschini et al., arXiv:2006.01337v1 \[astro-ph.HE\] 2020](#)

C2015 - [Vos et al., *Astrophys. J.*, **815**, 119, 2015](#)

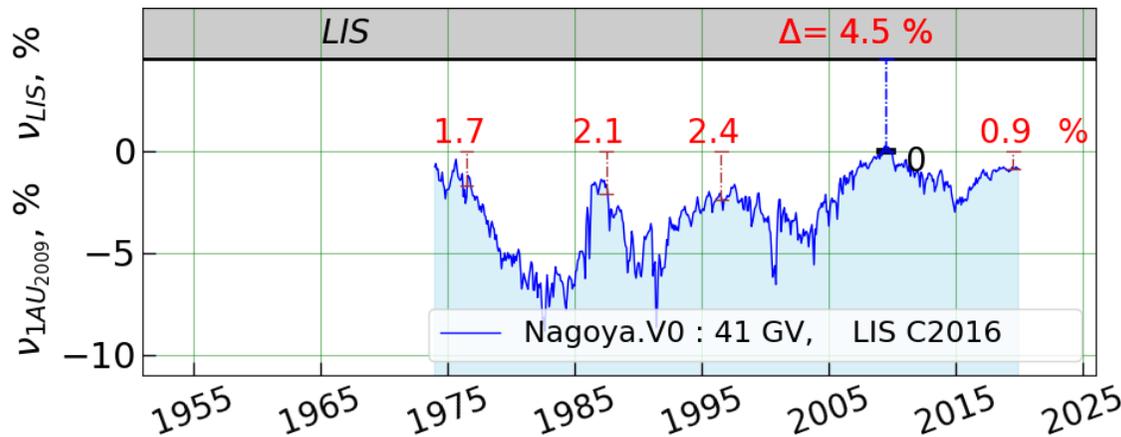
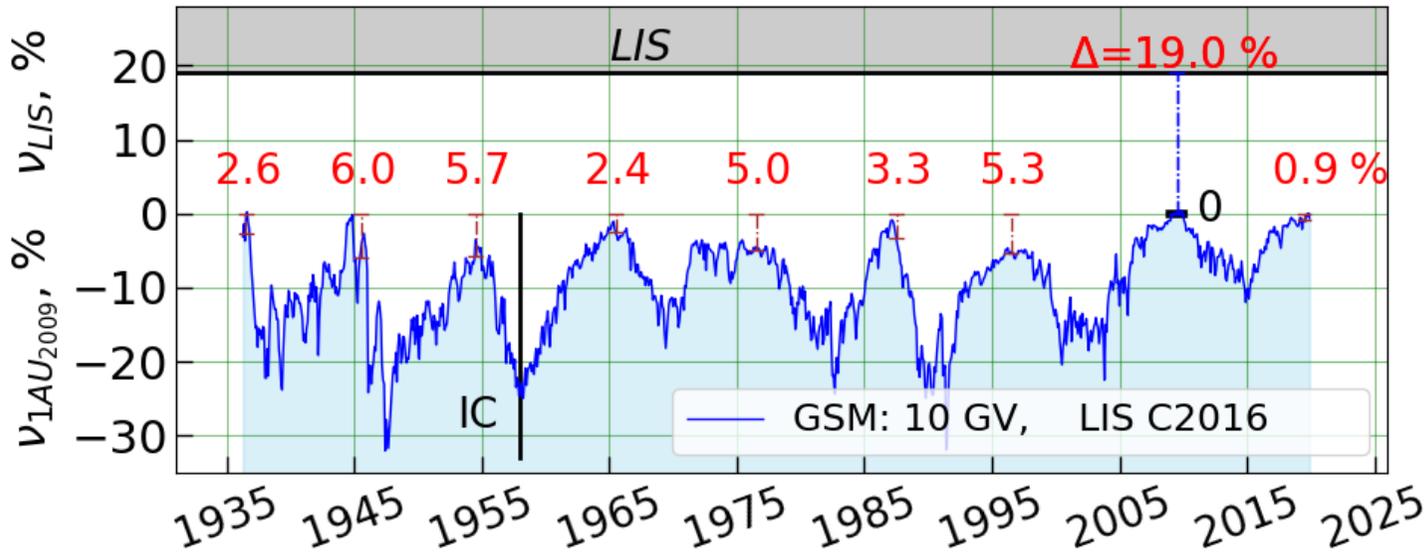
15. Вычисление Δ для 2.6, 4, 5, 5.8, 10, 20, 41 GV

$$\Delta = J_{1AU} / J_{LIS} - 1$$

Model of spectrum p/(m ² s sr GV)	R_{eff} GV						
	2.6	4.0±0.1	5	5.8±0.2	10±0.3	20	41±2.5
J_{1AU} (PAMELA, 2009)	578.984	250.042	149.932	106.015	26.869	4.183	0.569
J_{LIS} (Corti, 2016)	968.016	360.295	209.172	143.745	33.184	4.653	0.596
$\Delta = J_{1AU} / J_{LIS} - 1, \%$	-40.2	-30.6	-28.3	-26.2	-19.0	-10.1	-4.5
J_{LIS} (Bisschoff, 2019)	1184.428	408.766	227.744	152.580	33.225	4.669	0.597
$\Delta = J_{1AU} / J_{LIS} - 1, \%$	-51.1	-38.8	-34.2	-30.5	-19.1	-10.4	-4.7
J_{LIS} (Boschini, 2020)	1042.240	363.382	206.688	140.727	32.617	4.611	0.585
$\Delta = J_{1AU} / J_{LIS} - 1, \%$	-44.4	-31.2	-27.5	-24.7	-17.6	-9.3	-2.7
$\langle \Delta \rangle \pm (\text{stat}) \pm (\text{sys}), \%$	-40±5	-30±0.3±4	-28±3	-26±0.3±3	-19±0.4±2	-10±2	-4.0±0.4±2

В таблице сведены значения LIS и 1AU для минимума 2009 года для рассматриваемых детекторов и полученные значения остаточной модуляции для различных жесткостей.

15. Результат. Остаточная модуляция: 10,41GV

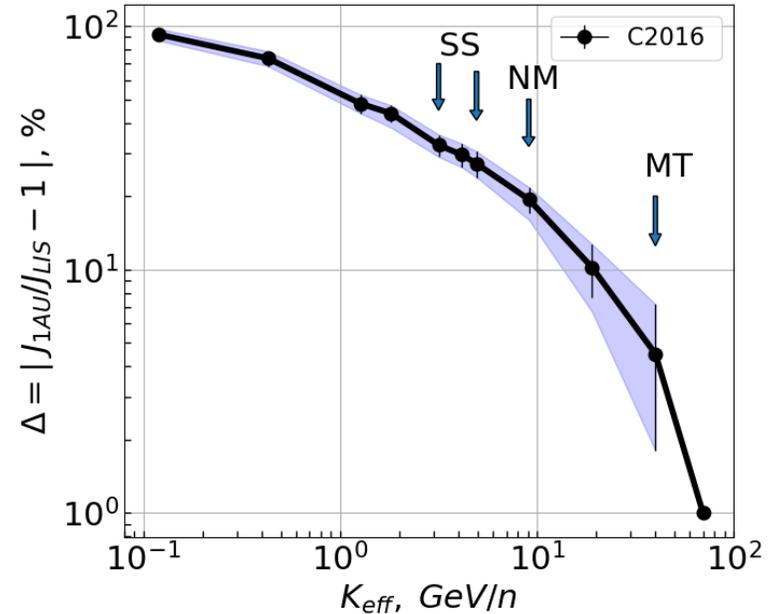
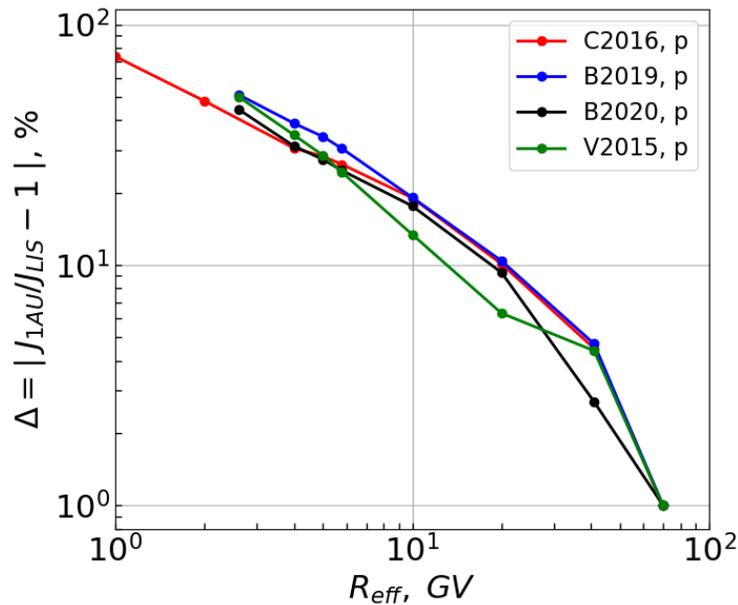


Вариации относительно 2009 года за период с середины 30-х по настоящее время для сети NM для 10 GV. Остаточная модуляция $19\pm 2\%$ (синяя кривая). Для 41 GV остаточная модуляция только $-4.0\pm 2\%$.

Спокойное Солнце способно модулировать локальный межзвездный спектр примерно на ту же величину, на которую Солнце в своей активной фазе способно модулировать космические лучи относительно спокойного периода.

C2016 – спектр протонов из работы [Corti et al., *Astrophys. J.*, **829:8, 9, 2016**]

15. Спектр остаточной модуляции



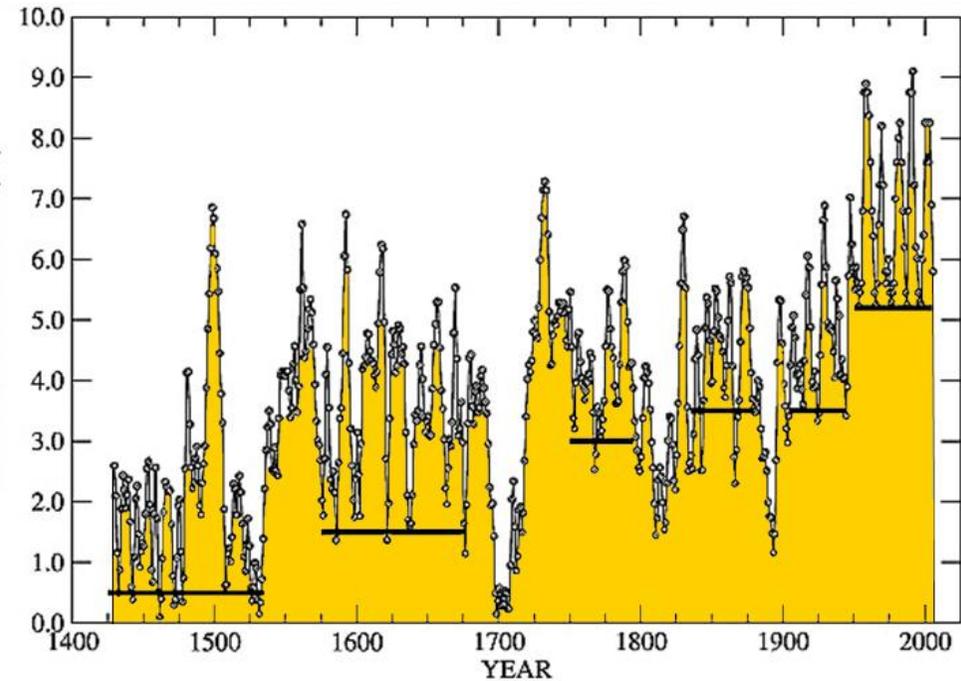
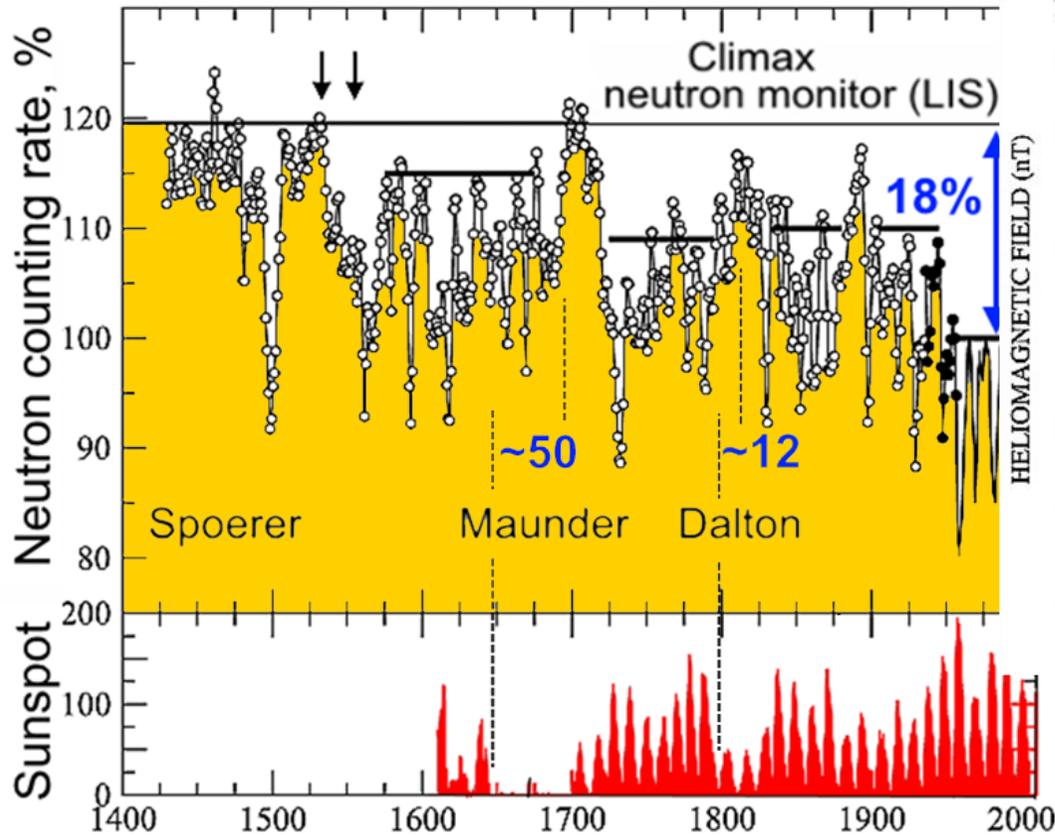
Зависимость остаточной модуляции от эффективной жесткости и энергии детектора в период 2009 года.

Слева приведена зависимость остаточной модуляции от эффективной жесткости детекторов. Разброс остаточной модуляции для различных моделей достаточно велик и составляет около 15%.

Энергетический спектр остаточной модуляции (справа) **степенной с переменным показателем спектра**, меняющимся от -0.8 до -2.4 для энергий от 4 до 40 GeV.

Вариант спектра $\Delta = a \exp(-kR^\alpha)$

15. Долговременные изменения интенсивности космических лучей на Земле с 1428 года



Гелиомагнитное поле вблизи орбиты Земли.
[McCracken, JGR, 112, 2007,
doi:10.1029/2006JA012119]

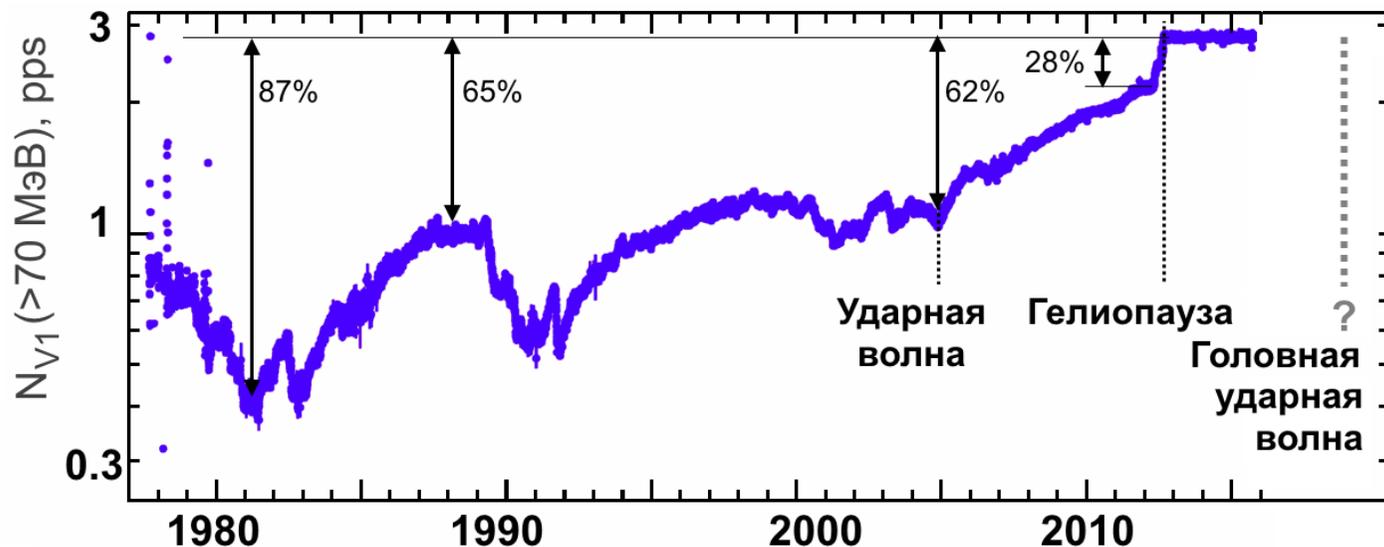
Наблюдаемые (1951-2005 гг.) и оцененные (1428-1954 гг.) нейтронные данные вариаций. LIS линия - расчетная скорость при отсутствии солнечной модуляции. Стрелки показывают интервал в 22 года.
[McCracken & Beer, JGR, V.112, 2007; McCracken et al., 30 ICRC, 2007]. Maunder Minimum — 1645 по 1715 годы, максимум CR ~1700, т.е. задержка 50 лет!

15. Рим в снегу в Маундеровский минимум



Рим в снегу. Giovanni Panini, 1730 <https://li-ga2014.livejournal.com/783077.html>

Остаточная модуляция в ключевых точках траектории Voyager-1



Временная зависимость интенсивность частиц энергий >70 МэВ по данным Voyager-1 [Cummings et al., 2016].

Происходит ли остаточная модуляция во всей гелиосфере?

Прямые измерения Voyager 1/ 2 свидетельствуют о том, что большая часть остаточной модуляции происходит между ударной волной, ограничивающей сверхзвуковое течение солнечного ветра, и гелиопаузой. Это видно на рисунке, где приведена скорость счета канала с преобладанием протонов >70 МэВ по маршруту Voyager 1. Видно, что модуляция за ударным фронтом сравнима с модуляцией от максимума к минимуму в 80-е годы. **На это есть и теоретические соображения, так как за фронтом ударной волны (т.е. на больших расстояниях) возмущенность среды увеличивается, т.е. происходит более сильное рассеяние и, значит, более сильная модуляция.**

Место наземных наблюдений в современных исследованиях модуляции космических лучей и их перспективы на будущее

Возвращаясь к введению можно еще раз утверждать, что и сейчас в эпоху весьма успешных экспериментов в космосе Земля все ещё остается лучшим местом для долговременных наблюдений космических лучей.

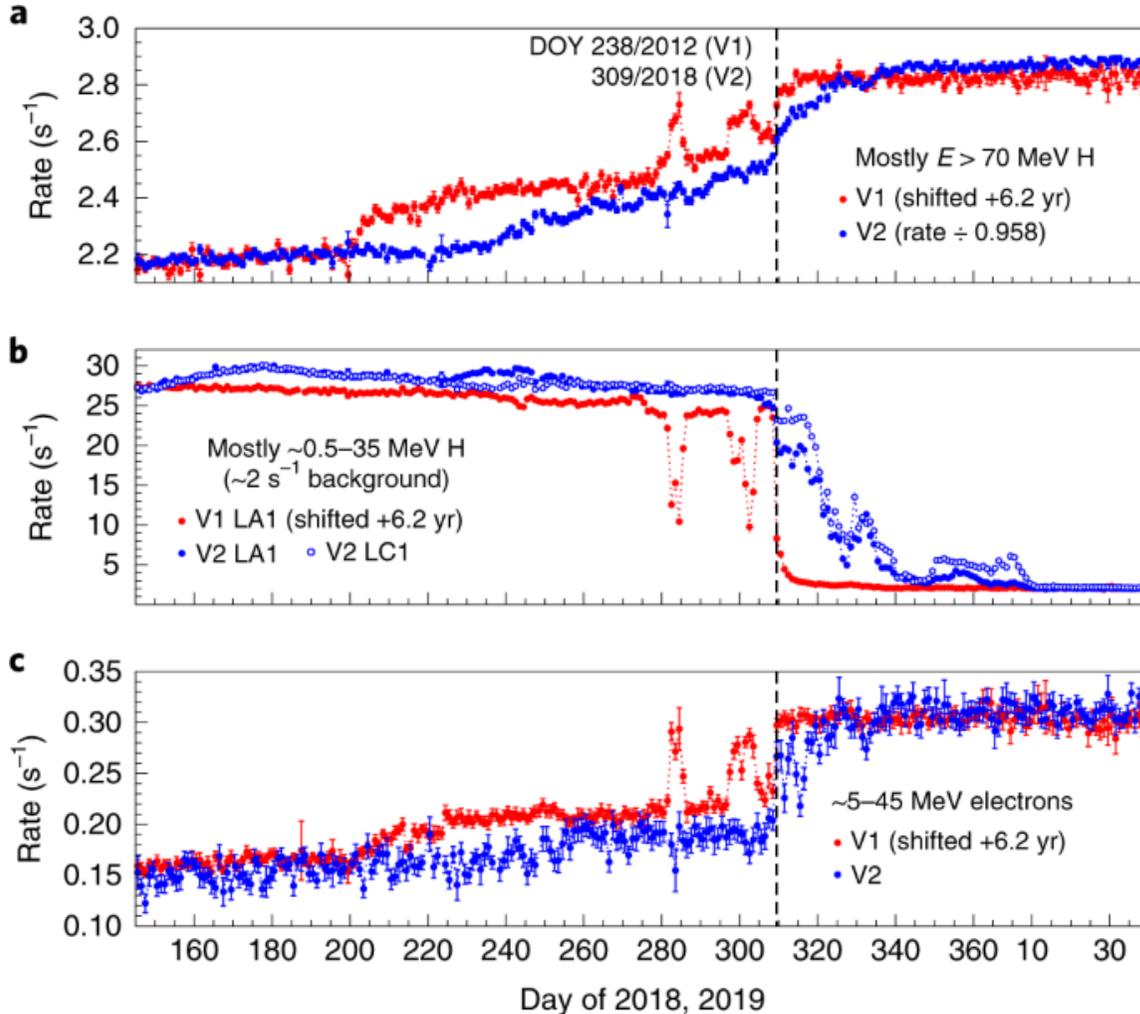
Только на Земле есть многонаправленный детектор КЛ (мировая сеть), регистрирующий с хорошей статистикой космическое излучение.

Именно длительный мониторинг вариаций КЛ создал основу для фундаментальных исследований процессов в КЛ, на Солнце и в гелиосфере, разумеется, вкпе с данными наблюдений солнечной активности (СА).



**Спасибо за
внимание**

Пересечение гелиопаузы



Скорость счета различных типов и энергий частиц на космических аппаратах "Вояджер-1" и "Вояджер-2" во время пересечения ими гелиопаузы [[Stone et al., Nat Astron 3, 1013, 2019](#)]

25 августа 2012 года «[Voyager-1](#)» достиг 122 астрономических единиц.

«[Voyager-2](#)» вошел в межзвездное пространство 5 ноября 2018 года.

Что значит большой форм-фактор! ($21.5 \text{ cm}^2\text{sr}$ и $0.5 \text{ m}^2\text{sr}$)



PAMELA



AMS-02

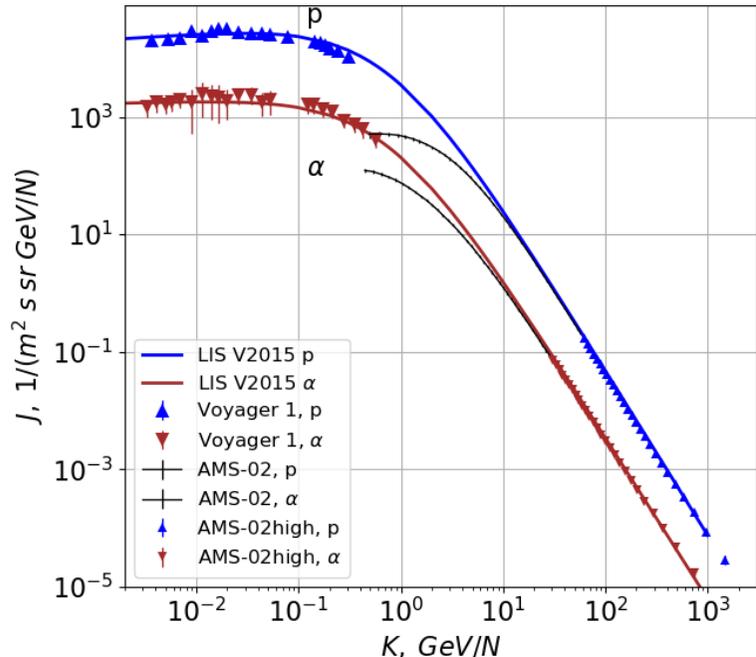


Voyager-1 вышел за пределы магнитосферы Солнца?



25 августа 2012 года «Voyager-1» достиг 122 астрономических единиц, когда резко возрос поток протонов - почти в 100 раз, электронов - в 10 раз.

Однако ожидаемого изменения направлений силовых линий магнитного поля не произошло — после пересечения границы оно должно было смениться с солнечного на межзвездное. «Voyager-2» вошел в межзвездное пространство 5 ноября 2018 года. LIS спектр остаточно модулирован солнечным ветром? В приближении силового поля [] спектры связаны как

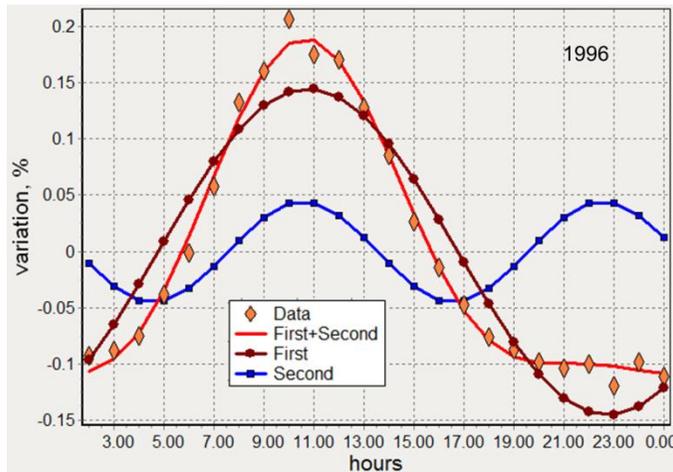


$$J_i(K) = J_{LIS,i}(K + \Phi_i) \frac{K(K + 2M_N)}{(K + \Phi_i)(K + \Phi_i + 2M_N)}$$

где K кинетическая энергия/ N , $M_N=0.938$ GeV, Φ_i - средние потери энергии частиц в гелиосфере, определяемые потенциалом модуляции $\phi(t)$. Средние потери энергии частиц с зарядом Z_i и массовым числом A_i равны $\Phi_i=(eZ_i/A_i)\phi(t)$.



Зимний пейзаж, Питер Брейгель, 1565



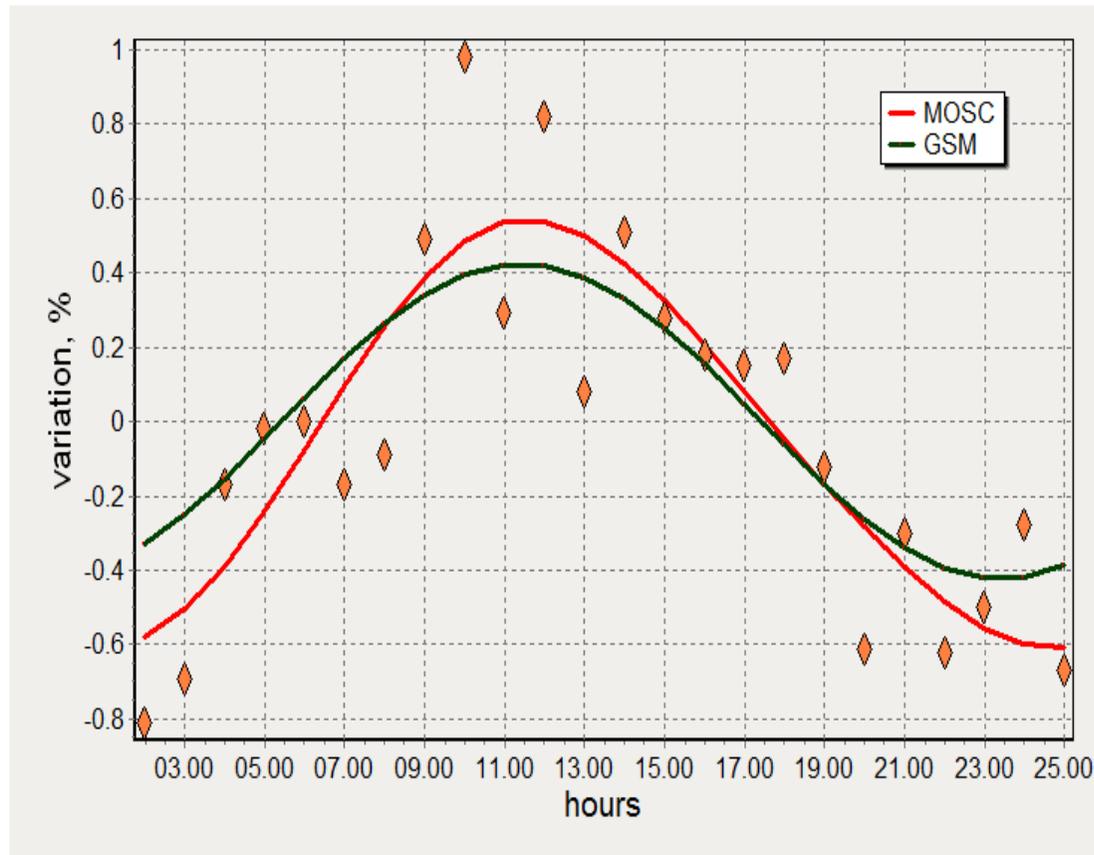
Выводы раздела

Сравнение результатов солнечно-суточной вариации, наблюдавшейся на нейтронном мониторе станции Москва, со среднесуточными характеристиками экваториальной составляющей векторной анизотропии, полученными с помощью GSM, показало хорошее их согласие. Средний суточный ход на станции Москва практически полностью объясняется двумя гармониками солнечно-суточной анизотропии и не содержит признаков других влияний (исключение 1996).

При правильном применении глобальная и локальная методики выделения векторной анизотропии надёжны и дополняют друг друга.

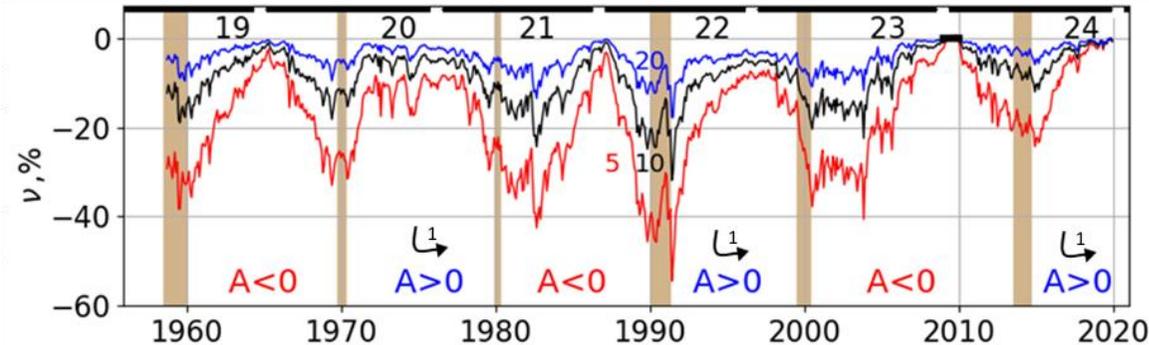
Обсуждены и обоснованы ограничения локальной методики. Во время Форбуш-эффекта она не даёт надёжных результатов.

Москва и GSM



20 декабря 2020 г.

1. Введение



Долговременные изменения плотности космических лучей с жесткостью **5, 10, 20** ГВ, полученные методом GSM по данным сети [Белов и др., 2019].

Долговременная модуляция исследуется уже много десятилетия, но по солнечным часам это совсем небольшой период – всего 6 циклов солнечной или 3 цикла магнитной активности Солнца. Что сейчас хорошо известно?

Модулирующие процессы описываются уравнением переноса КЛ в гелиосфере [Крымский, 1964; Parker, 1965]. Гелиосферная модуляция выражается в виде 11-летней волны интенсивности КЛ [Lockwood & Webber, 1967] и отражает изменения условий их распространения в гелиосфере.

Современные модели модуляции галактических КЛ в гелиосфере дают правильное и достаточно детальное описание процессов, с привлечением многочисленных факторов, изменяющиеся с солнечным циклом, и описываются те или иные детали модуляции КЛ в гелиосфере. Теория, рассматриваемая в этих работах, опирается на понятие диффузии КЛ и конвекции, а также воздействию СВ и магнитном дрейфе. В качестве примера можно упомянуть работы [Kota, Jokipii, 1983; Potgieter et al., 2001; Крайнев, 2021; Manuel et al., 2011; Manuel et al., 2014] и содержащиеся там ссылки на более ранние работы. Однако при подобной детализации трудно уловить главный фактор и проследить доминирующий процесс модуляции.

В работе [Герасимова и др., 2017] рассматривалась модель с выделением единственного фактора, который меняется с солнечным циклом и значительно влияет на долговременную модуляцию КЛ. Свободный параметр модуляции — это отношение регулярного магнитного поля к турбулентному — и может применяться для описания вариаций интенсивности космических лучей в широкой области энергий от 100 МэВ до 100 ГэВ.

Х

Уравнение переноса КЛ и приближения

Уравнение переноса

[Крымский, 1964; Parker, 1965]

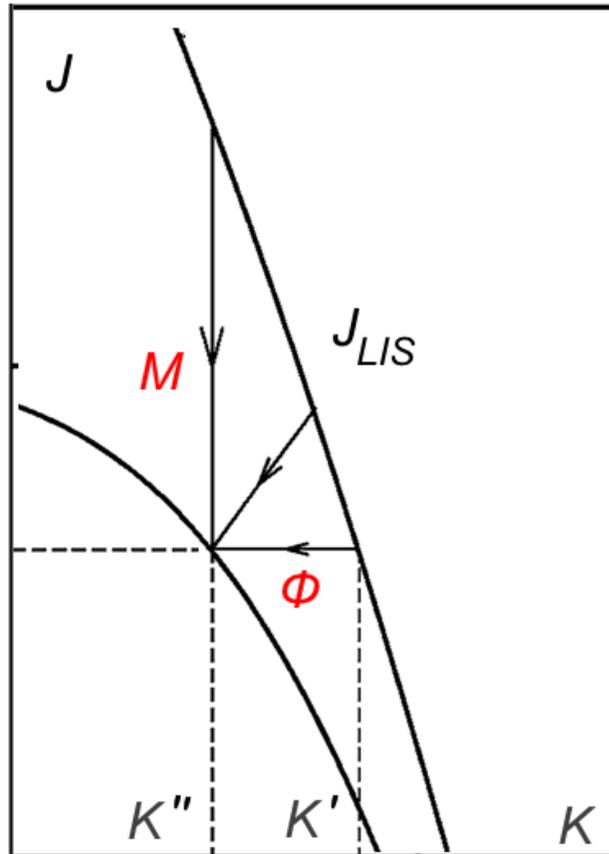
$$\frac{\partial f}{\partial t} + \underbrace{\nabla \cdot (\underbrace{Cf \cdot \vec{V}}_{\text{SW convection}} - \underbrace{\vec{K} \cdot \nabla f}_{\text{diffusion, drift}})}_{\vec{S}(r,p,t)} - \underbrace{\frac{1}{3} (\nabla \cdot \vec{V}) \frac{\partial f}{\partial \ln p}}_{\text{adiabatic cooling}} = q$$

Конвективно-диффузионное приближение

Приближение силового поля

$$J = J_{LIS} \exp(-M)$$

$$M = -\int_r^{r_0} \frac{CV_{SW}}{\kappa_0} dr$$

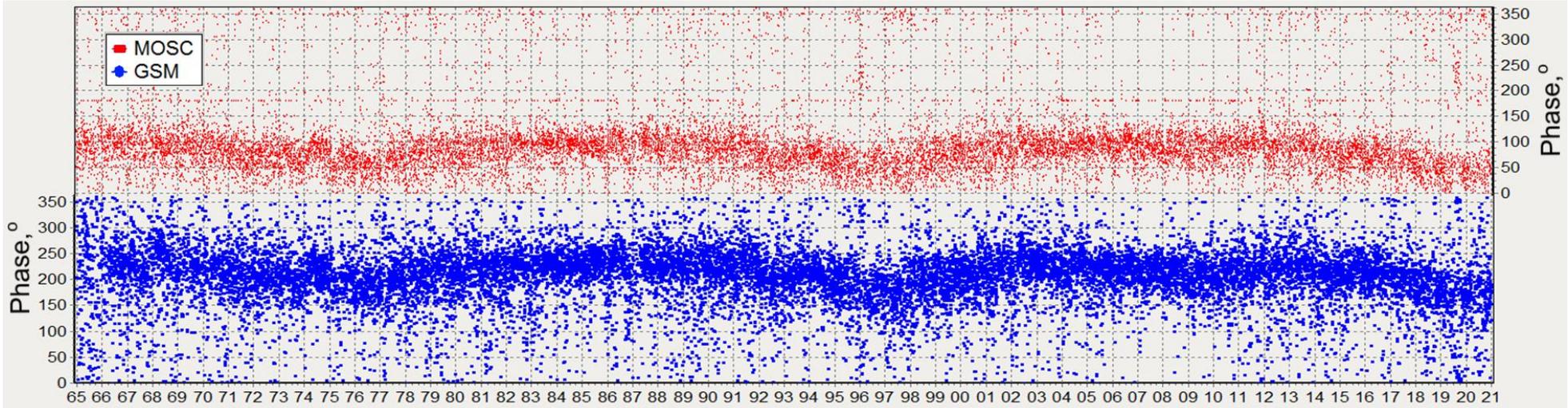
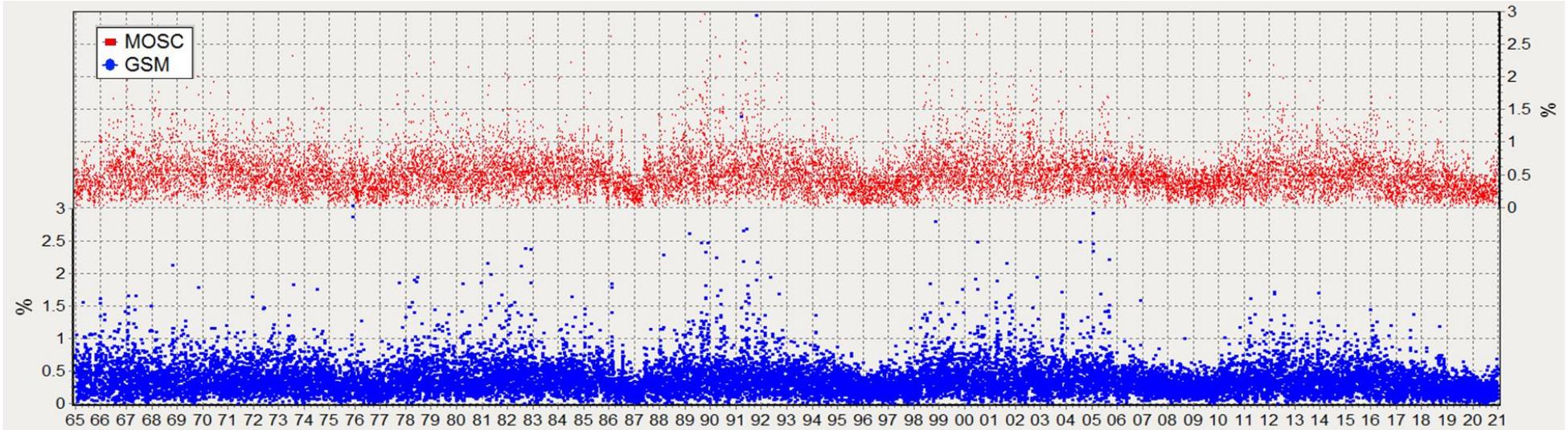


$$J_i(K) = J_{LIS,i} (K + \Phi_i) \frac{K(K + 2M_N)}{(K + \Phi_i)(K + \Phi_i + 2M_N)}$$

[]

Графическое представление конвекционно-диффузионного (вертикальная линия с M) и приближения силового поля. Наклонная линия представляет собой актуальную модуляцию, описываемую уравнением переноса.

X 4. Сравнение амплитуды и фазы 1^й гармоники (методы GA и GSM)



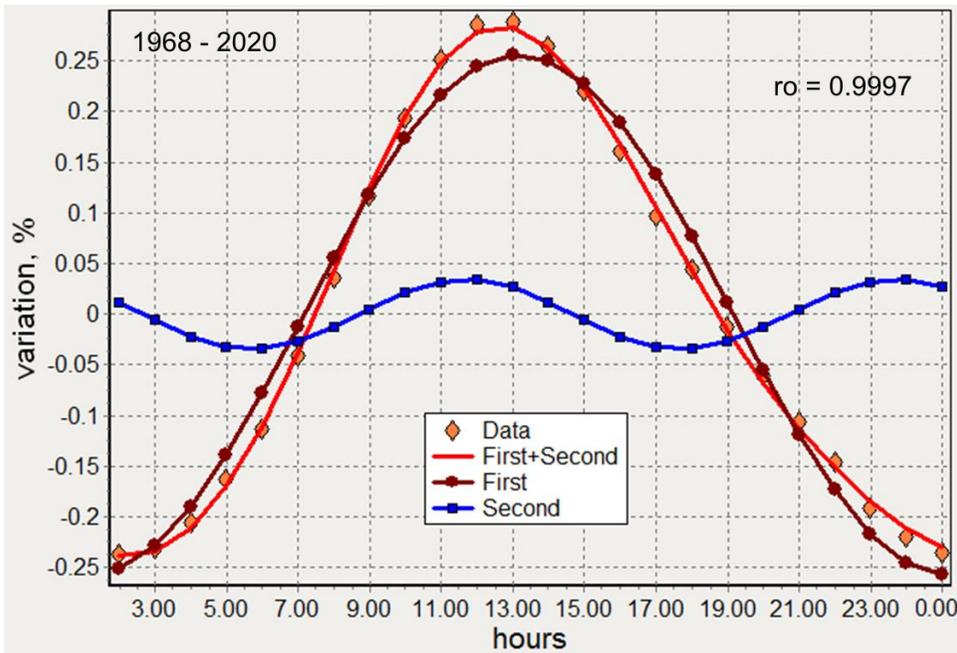
4. Гармонический анализ.

Среднесуточный ход за весь период или один день

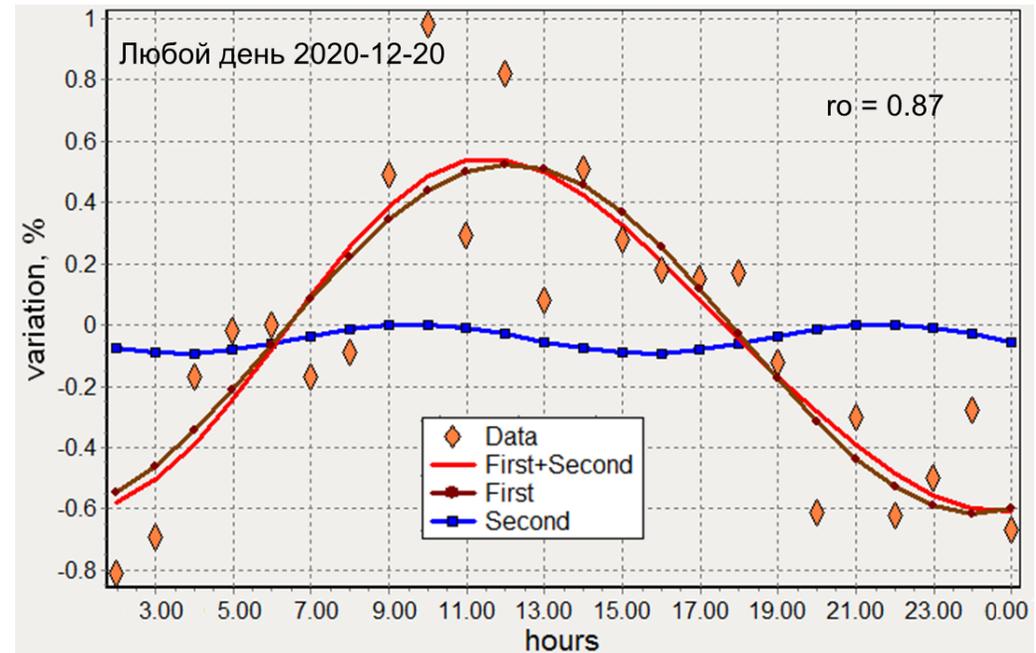
$$f(t) = \sum_{m=0}^{\infty} [a_m \cos(m \frac{2\pi}{T} t) + b_m \sin(m \frac{2\pi}{T} t)] = \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos(m \frac{2\pi}{T} t - \varphi_m)$$

$$a_0 = \frac{1}{2k} \sum_{i=1}^{2k} y_i = \bar{y} \quad a_m = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{2k} y_i \cos(mt_i) \quad b_m = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{2k} y_i \sin(mt_i) \quad m=0,1,2\dots$$

$$A_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2} \quad \varphi_m = \arctan\left(\frac{b_m}{a_m}\right)$$



Весь период 1968-2020 год.

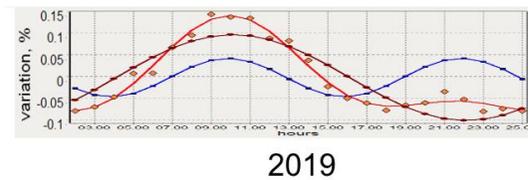
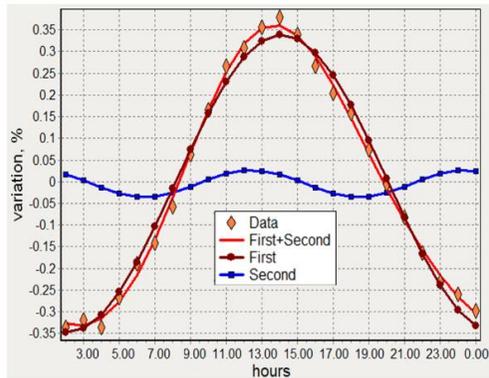
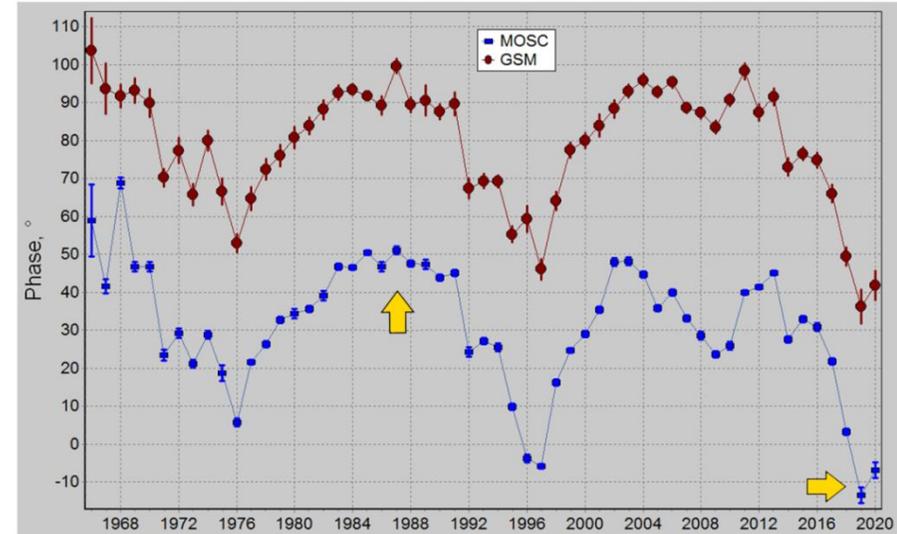
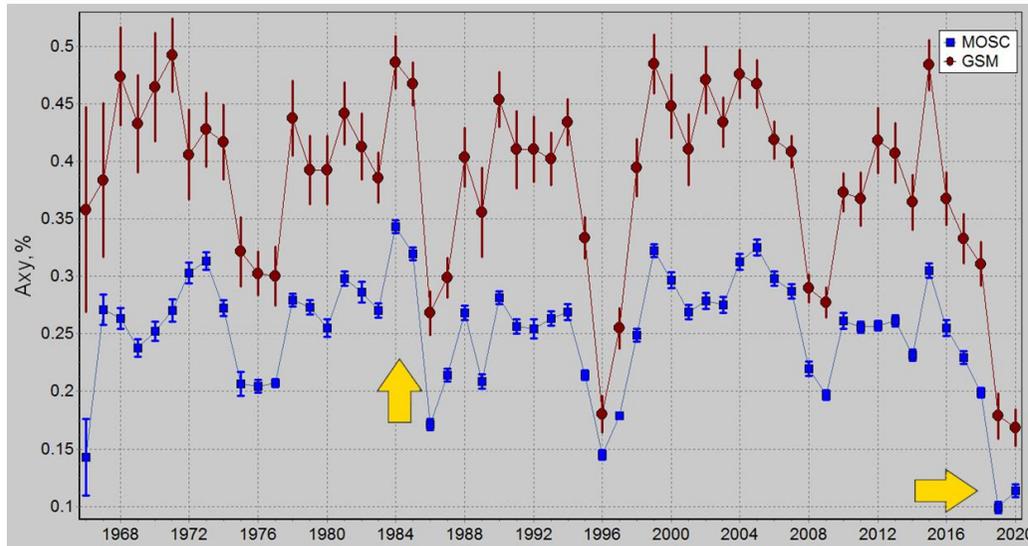


Один день 2020-12-20

Х 4. Сравнение амплитуды и фазы 1^й гармоника (методы GA и GSM)

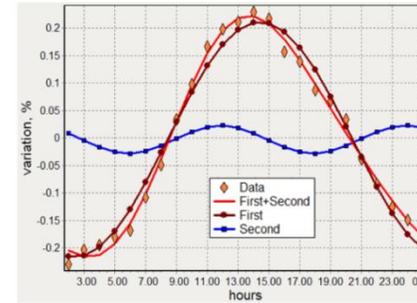
Амплитуды и фазы первой гармоника, найденные методом GSM и гармоническим анализом, связаны как

$$A_1^{GSM} = A_1/A_{11} \text{ и } \varphi_1^{GSM} = \varphi_1 + \varphi_{11}.$$

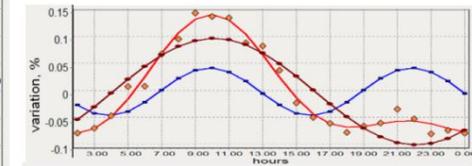


1984

2019



1987



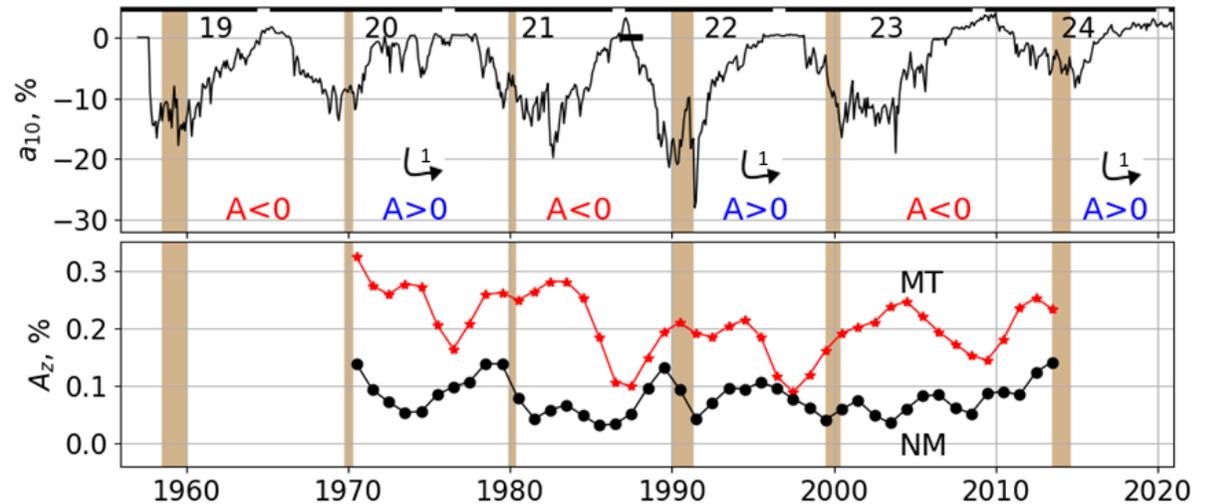
2019

Большая и небольшая амплитуда

Поздняя и ранняя фаза



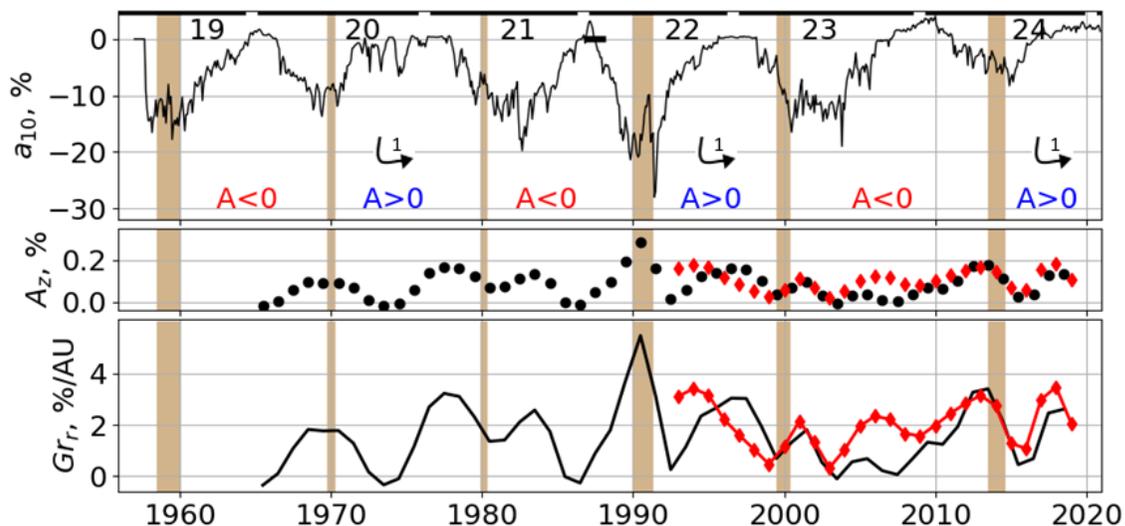
10. Долговременные изменения северо-южной составляющей анизотропии



Сравнение северо-южной анизотропии A_{NS} , по данным пары **нейтронных мониторов** (медианная жесткость 17 GV) и **мюонных телескопов** [Munakata et al., 2014].

Вывод. Амплитуда северо-южной анизотропии по данным MT также достигает 0.1%, но смещена на 0.1%. Отличается от NM также временной ход анизотропии MT.

10. Долговременные изменения северо-южной составляющей анизотропии



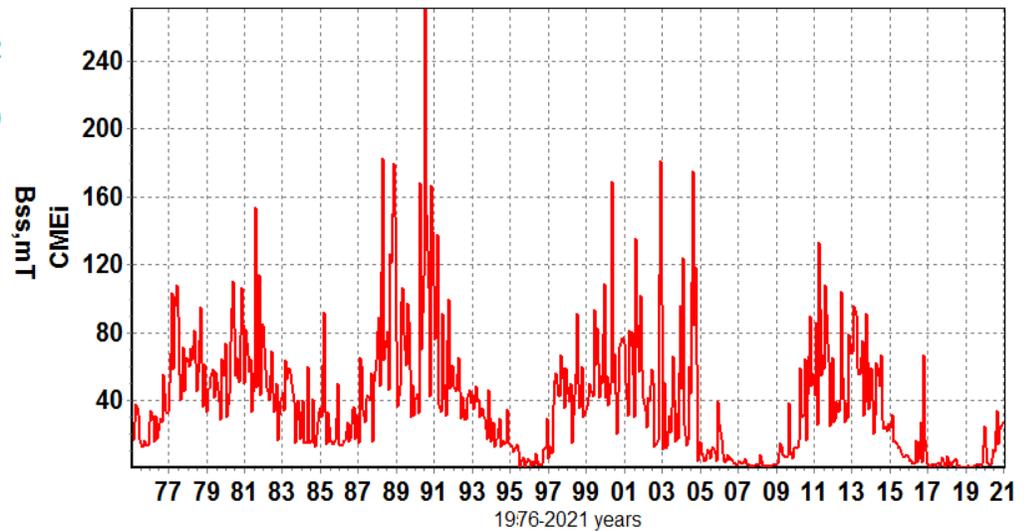
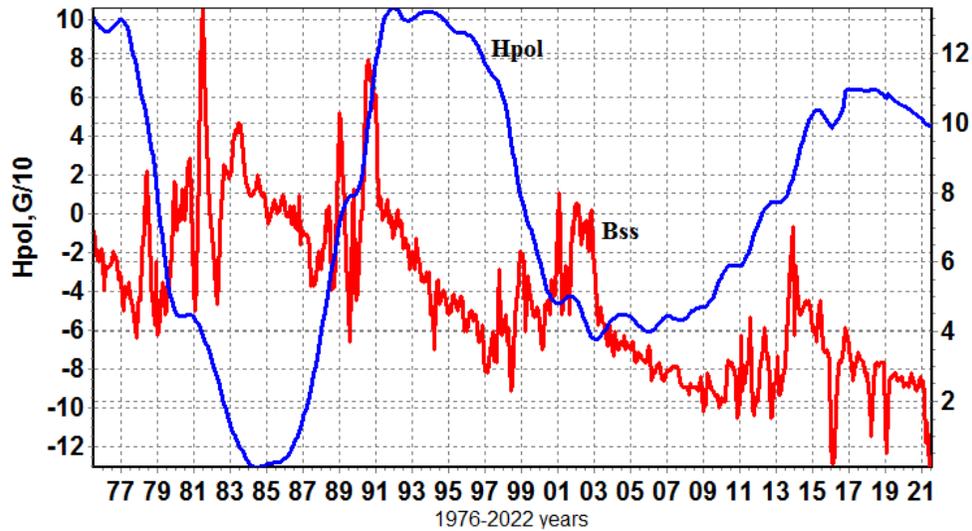
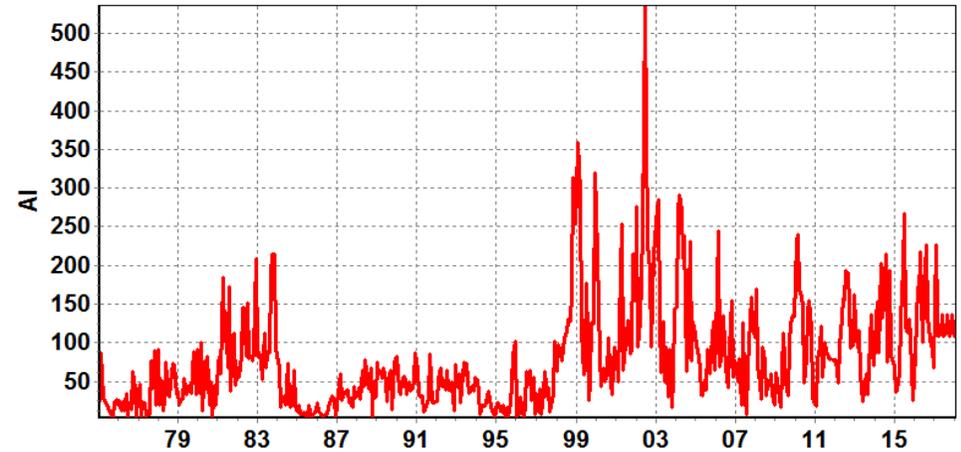
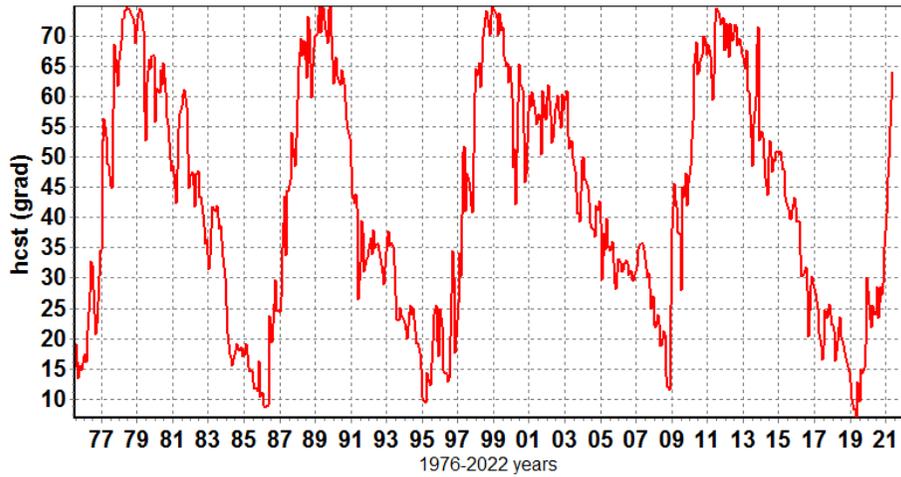
Амплитуда нулевой гармоники (верхняя панель), анизотропия A_z (средняя панель) и радиальный градиент Gr_r космических лучей (нижняя панель) по данным [Oleneva et al., 2021] (черная линия) и [Oleneva et al., 2021] (красная линия).

$$A_{NS} = 2\rho \cos \theta \cdot d \ln n / dr \quad A_z = A_{NS} / \cos \Psi$$

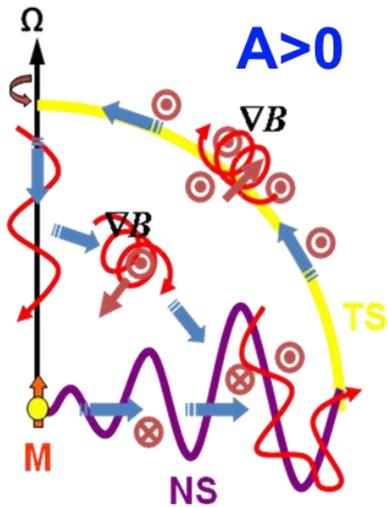
$$A_z = 2\rho \cos \theta \cdot (1 + \rho^2 / \lambda^2)^{-1} \cdot d \ln n / dr$$

Вывод. Радиальный градиент Gr_r космических лучей по данным северо-южной анизотропии NM меняется в пределах от десятых долей до 3 %/AU и более в периоды максимальной СА.

9. Обновленный набор параметров моделирования



Дрейфовые эффекты и зависимость модуляции от энергии



Спектр вариаций КЛ, определенный из экспериментальных данных за длительный период, дает возможность проверить некоторые выводы теории гелиосферной модуляции КЛ, касающиеся роли магнитного дрейфа частиц в циклах с различным направлением глобального магнитного поля Солнца.

В приближении слабой модуляции [Kota, 1979] уменьшение интенсивности КЛ в гелиосфере δN определяется потерями энергии частиц ΔE :

$$\delta N / N = (2 + \gamma) \Delta E / E \quad (2)$$

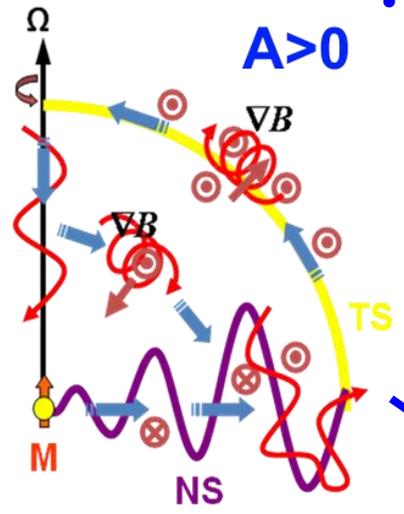
где γ - показатель дифференциального спектра КЛ. Потери энергии в идеализированной гелиосфере радиуса R с плоским нейтральным токовым слоем определяются выражением [Kota, 1979]

$$\Delta E = |q\Phi| + p \int_r^R \frac{u}{\lambda} dr \quad (3)$$

здесь u - скорость солнечного ветра, λ , q и p - длина свободного пробега, заряд и импульс частиц, Φ — некая электрическая разность потенциалов.

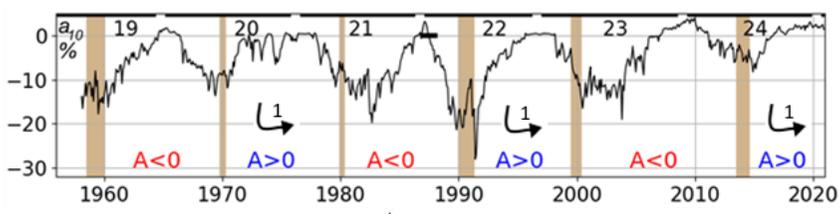
X

Дрейфовые эффекты в циклах

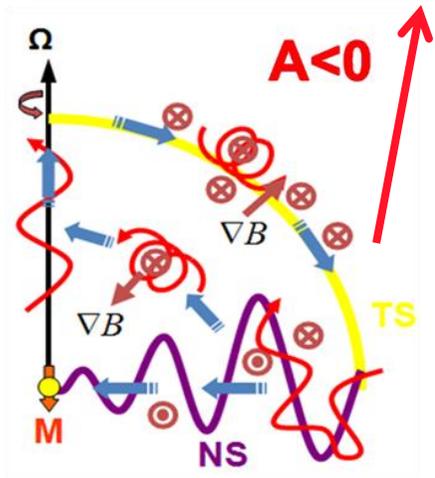


При $A > 0$ ГКЛ попадают в гелиосферу в полярных областях, дрейфуют в неоднородном магнитном поле по широте к экватору, и уходят из гелиосферы вдоль нейтрального токового слоя. При дрейфе от полюса к экватору частицы теряют энергию, равную потенциалу гелиосферы Φ_0 и определяется магнитным полем B_0 , радиусом r_0 и скоростью вращения Солнца Ω , но может быть выражен через скорость солнечного ветра и азимутальную компоненту магнитного поля B_e на орбите Земли:

$$\Phi = \Phi_0 = B_0 r_0^2 \Omega / c = 180 \text{ MV} \frac{V}{400 \text{ km/c}} \frac{B_e}{3 \cdot 10^{-5} \text{ G}}$$



$$\Delta E = |q\Phi| + p \int_r^R \frac{u}{\lambda} dr \quad (3)$$



При отрицательной полярности $A < 0$ протоны дрейфуют из внешней гелиосферы вдоль нейтрального токового слоя, затем по широте к полярным областям и покидают гелиосферу за счет положительной дрейфовой скорости на полюсах. Следовательно, разность потенциалов $\Phi = 0$. Т.о., модуляция определяется только потерями энергии при распространении в экваториальной области (второе слагаемое в выражении (3)).

[Jokipii et al., 1977]