

**О долговременной модуляции
космических лучей в 23-24
циклах солнечной активности**

Id-70

Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т.
ИЗМИРАН, Москва, Троицк

skype: Victor Yanke, yanke@izmiran.ru

Абстракт.

Начавшийся в конце 22-го цикла солнечной активности (СА) тренд магнитного поля Солнца на понижение продолжается до настоящего времени (минимум 24/25 циклов). Основные характеристики солнечного магнитного поля и связанного с ним ММП имеют определяющее значение для модуляции космических лучей (КЛ). В долгопериодных вариациях КЛ в 23-24 циклах СА отображается ослабление солнечного магнитного поля, и сравнение вариаций в этот период с вариациями в предыдущих циклах (21-22-ом), позволяет выявить новые, не наблюдавшиеся до последних двух десятилетий, особенности модуляции КЛ, оказавшейся самой слабой за всё время регистрации вариаций КЛ на Земле и околоземном космическом пространстве. Пониманию процесса модуляции галактических КЛ электромагнитными полями гелиосферы способствует моделирование вариаций КЛ.

В разработанной нами модели модуляции учтено воздействие на КЛ солнечно-гелиосферных характеристик с учетом времени запаздывания вариаций КЛ относительно каждой выбранной характеристики (выполнено обоснование выбора). Модельные расчеты модуляции КЛ для двух временных интервалов (21-22 и 23-24 циклов СА) показали: а) при небольшом отличии полученных регрессионных характеристик распределение вкладов в создаваемую модуляцию КЛ от использованных индексов СА сильно различается в анализируемые периоды; спектральные характеристики (амплитуда и показатель спектра) вариаций КЛ, полученные для двух баз, также имеют свою отличительную специфику. Обсуждаются возможные причины отличий двух последних циклов СА от предыдущих.

Цель работы: сравнить долговременную модуляцию КЛ в 23-ем и 24-ом циклах СА с вариациями в предыдущих 21-ом и 22-ом циклах.

Изучение долговременных вариаций КЛ вызывает большой интерес в связи с результатами наблюдаемого в последнее время тренда основного параметра, модулирующего КЛ - глобального магнитного поля Солнца, его значительному и длительному ослаблению, приводящему к тренду характеристик СА и гелиосферного поля, а именно: полярного магнитного поля Солнца (*Hpol*), энергетической характеристики крупномасштабного поля Солнца (*Bss*), индукции ммп (*Bimf*), площади низкоширотных корональных дыр (*AI3*), спорадической активности Солнца (индекс *CME*) и наклона нейтрального слоя (*hcst*) с его спецификой изменений в последние два цикла. (*Bss* и *hcst* определены на поверхности источника солнечного ветра). На рис.1 представлены долговременные изменения участников взаимосвязанной солнечно- гелиосферной цепи.

Солнечно - гелиосферные индексы в 21-24 циклах

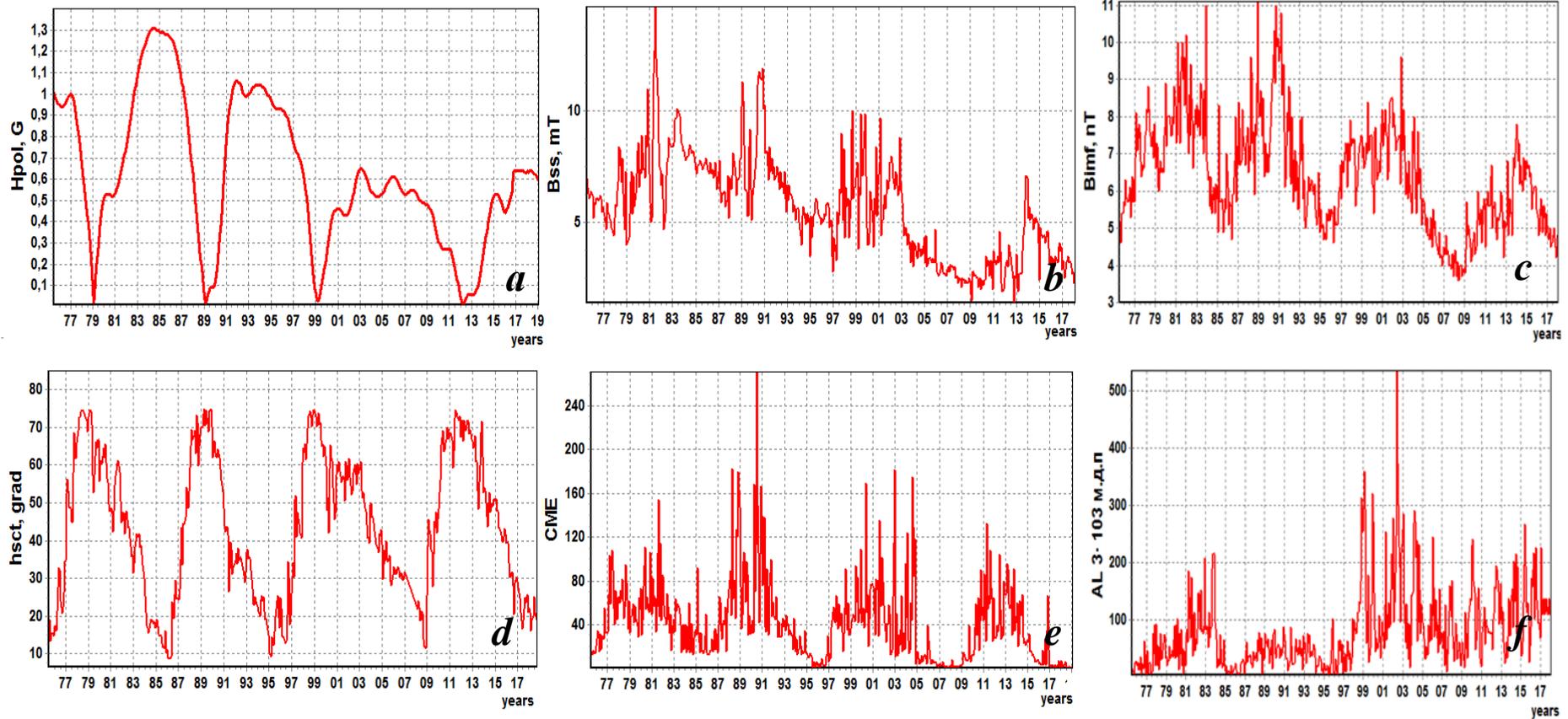


Рис.1. Временные изменения: **a**)-полярного поля Солнца (H_{pol}) (1); **b**)-среднего магнитного поля Солнца (B_{ss}) (2); **c**)-магнитной индукции межпланетного магнитного поля у Земли (B_{imf}) (3); **d**)-наклона гелиосферного токового слоя ($hcst$) (4); **e**)-CME индекса (5); **f**) площади низкоширотных корональных дыр (AL $3 \cdot 10^3$ мдп)

Долговременные вариации КЛ в 21-24 циклах солнечной активности

Наблюдаемое ослабление глобального магнитного поля Солнца и соответствующий тренд гелиосферных характеристик в 23-24 циклах СА (1996-2019гг) вызывает законный вопрос выяснения отклика этого явления в долговременной модуляции КЛ в указанных циклах. Наиболее наглядно это можно выяснить при сопоставлении наблюдаемых вариаций КЛ в 23-24 циклах (1996-2019гг.) с вариациями в предшествующих 21-22 циклах СА (1976-1996гг.) С этой целью определен спектр долговременных вариаций КЛ за каждый месяц 1976-2019 гг. , используя: 1) данные непрерывных наблюдений на мировой сети станций КЛ (41 станция, оснащенная нейтронными мониторами (НМ), стратосферных наблюдений (3 пункта) и данные многонаправленного мезонного телескопа (станция Нагойя, 17 направлений прихода частиц); 2) метод глобальной съемки и 3) трехпараметрическую жесткостную модель спектра вариаций КЛ $\delta J/J(R) = a/(b+R)^\gamma$, определены a , b и γ - спектральные характеристики долговременных вариаций КЛ в 21-24 циклах СА в области жесткостей $R=1-50$ ГВ.

Дальнейший анализ выполнен для вариаций плотности КЛ в 1976-2019гг с жесткостью 10 ГВ, $a10$ - амплитуда долговременных вариаций галактических КЛ приведена на рис.2 (полученная малая ошибка $a10$ для базовых периодов 01-12.2009г и 01-12.2018г не приведена для более четкого сравнительного представления вариаций в эти два периода, результаты для определения γ с ошибкой показаны на рис.3)

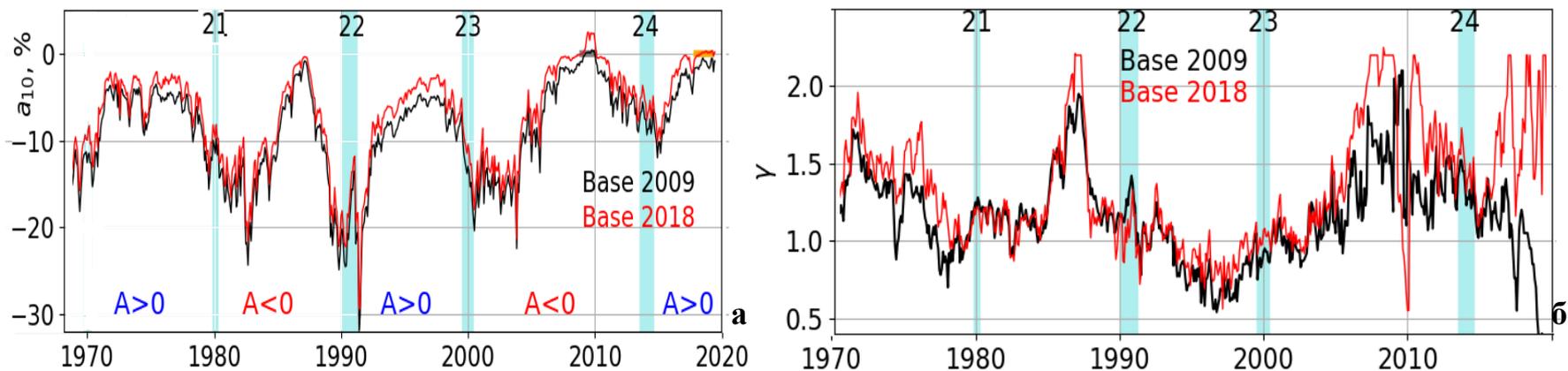


Рис.2. Вариации амплитуды (а) и показателя спектра (б) КЛ с жёсткостью 10 ГВ (красная кривая $a10, \%$ и γ к 2018г., черная- $a10, \%$ и γ к 2009г.)

Спектральные параметры долговременных вариаций КЛ в 21-24 циклах СА:

1. Υ - показатель спектра вариаций

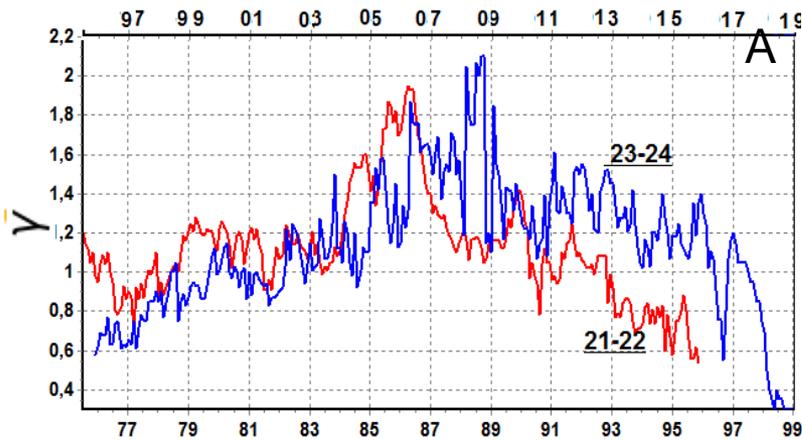


Рис.3. (А) Υ - показатель спектра вариаций КЛ с жёсткостью 10 ГВ (красная кривая Υ для 21-22 циклов, синяя-для 23-14; база -2009г.)

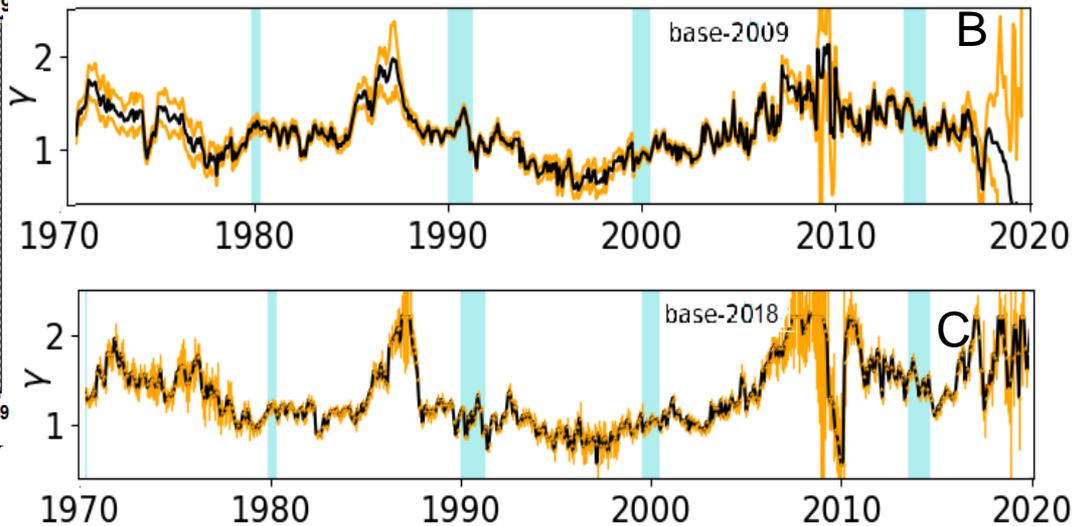


Рис.3. (В, С) Υ - показатель спектра вариаций (с ошибкой модели-желтые кривые) для КЛ с жёсткостью 10 ГВ (В - Υ для данных с базой 2009г. С- для базы- 2018г.)

Определение вариаций КЛ относительно их значений в двух базах выполнено с целью сравнения изменений спектральных характеристик долговременных вариаций КЛ в зависимости от выбора баз. Далее при проведении сравнительного анализа модуляции в 21-22 циклах и 23-24 циклах полученные спектральные характеристики для двух баз показали возможность использовать для поставленной задачи амплитуду изотропной составляющей $a_{10}\%$ относительно 2009г., в этом случае подтверждаются особенности спектра вариаций, выявленные нами в работе (7), а именно: изменения показателя γ указывают на смягчение спектра вариаций КЛ в минимумах отрицательных циклов ($A < 0$) 22-летних циклов СА – 21/22 ($\gamma \approx 2.0$) и 23/24 ($\gamma \approx 2.2$). Что касается большой ошибки в период, близкий к минимуму 24/25, то вероятнее всего, она может объясняться близостью этого периода к выбранной базе (2018г), относительно которой определены вариации КЛ (величина $a_{10}\%$ составляет $\sim -0.5\%$ в 2016-2017г г. и 0.3% в 2019г.). Тем не менее, отиетим, что во время приближения к минимуму 24/25 показатель Υ ведет себя согласно дрейфовой теории при базе 2009г.

Спектральные параметры долговременных вариаций КЛ в 21-24 циклах СА:

2. величина вариаций a_{10}

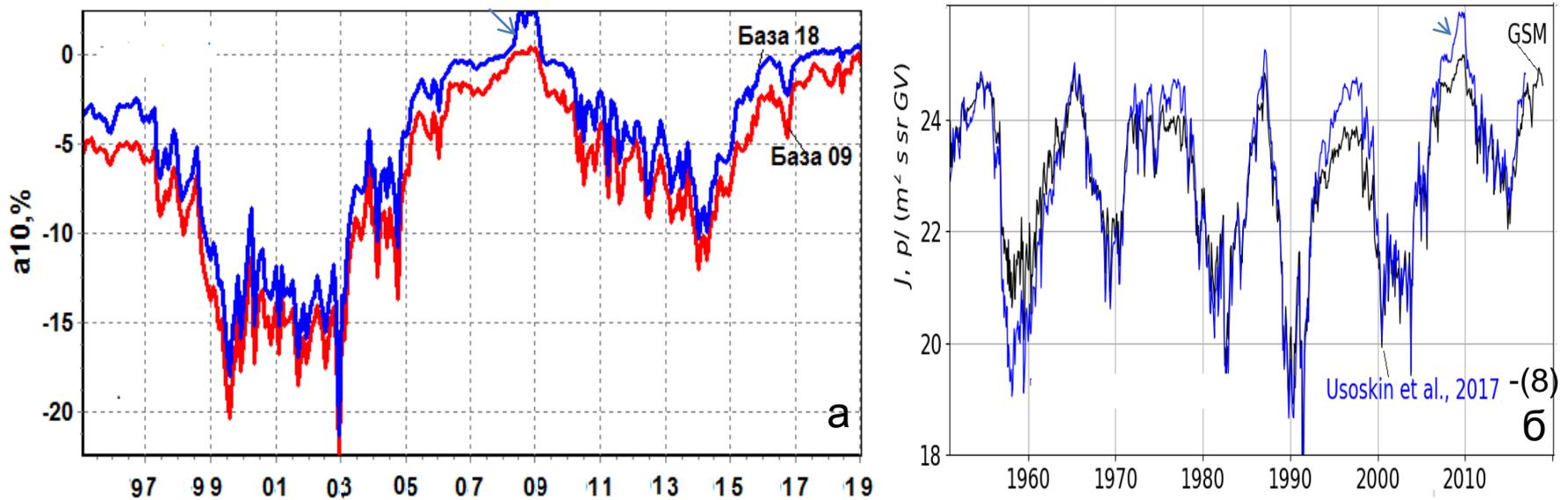


Рис.4. а) Величина вариаций $a_{10},\%$ в 23-24 циклах для частиц с жёсткостью 10 ГВ, полученных GSM методом (красная кривая a_{10} для среднемесячных вариаций с базой 2009г., синяя- база 2018г.); б) вариации КЛ, полученные с помощью GSM метода (черная кривая) и (синяя кривая) на основании данных работы (8)

Сравнение величин вариаций в двух последних циклах, определенных на Земле и в космическом пространстве показывает сильное сходство (особенно в 2009г), фаза минимума 24/25 в вариациях КЛ предположительно будет достигнута в конце 2020г.(если опираться на значения сглаженных W и время запаздывания КЛ относительно СА).

Отметим, что циклическая вариация КЛ, связанная с циклом СА, в последние десятилетия явно ослабевает, но это не относится к более короткопериодной (квазидвухлетней (9)) цикличности, которая на фоне уменьшающейся долгопериодной вариации КЛ становится даже заметнее

Солнечно-гелиосферные индексы для построения модели модуляции КЛ и вариации КЛ в 21-22циклах (1976-1996гг) и 23-24циклах (1996-2019гг)

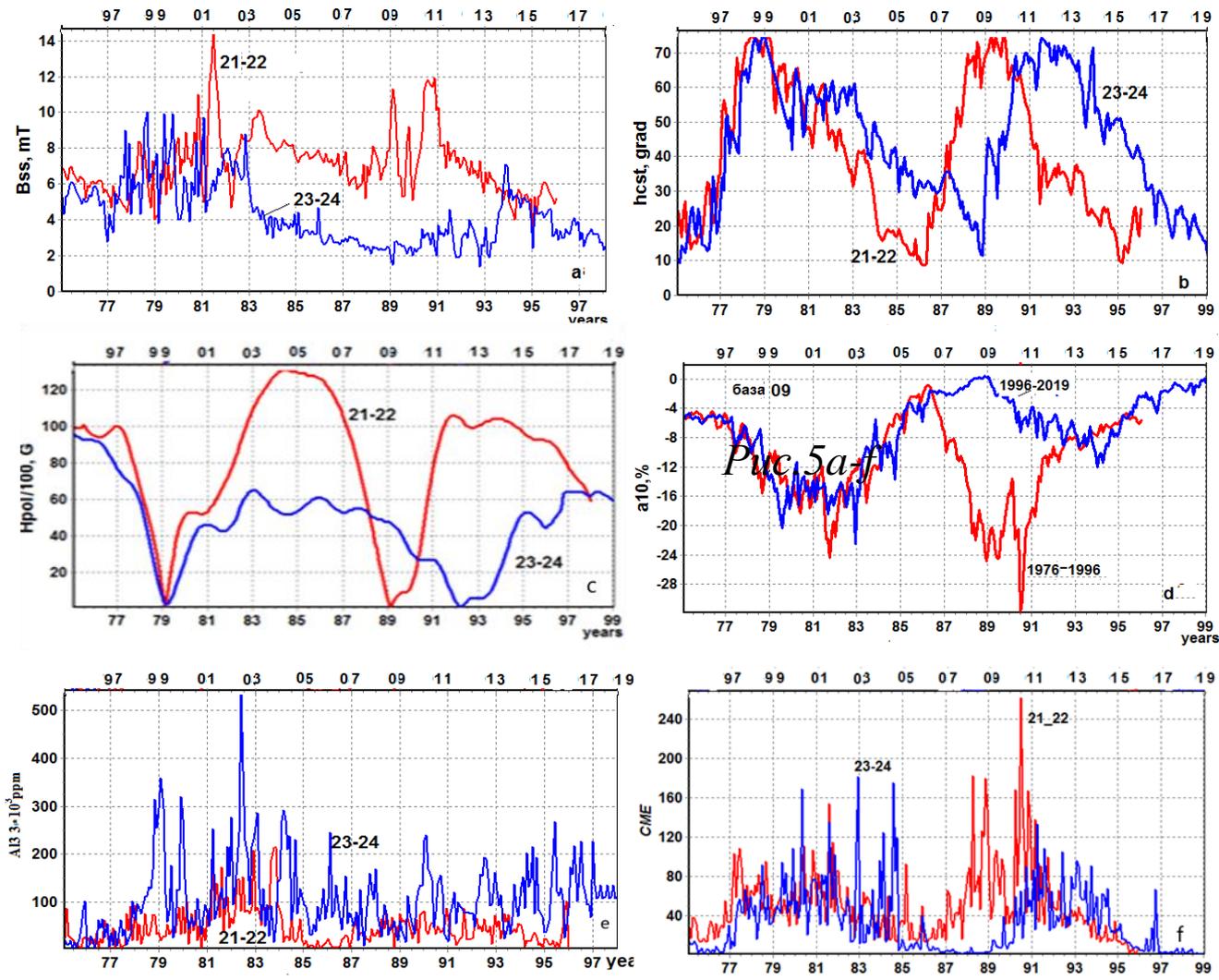


Рис.5а-ф.

Временной ход индексов (красные кривые-21-22 циклы; -23-24: а)- среднего магнитного поля Солнца (Bss); б)- наклона гелиосферного токового слоя (hcst); в)- полярного поля Солнца (Hpol); д)- вариаций плотности КЛ с жёсткостью 10 ГВ (a_{10} , % относительно 2009г.) е)-площади низкоширотных корональных дыр (AL3) $3 \cdot 10^3$ мдп; ф)-СМЕ индекса Индексы а,б,с-определены на поверхности источника солнечного ветра

Об индексах СА

Модель модуляции КЛ в 21-24 циклах построена при дополняющих друг друга перечисленных выше индексах СА, в циклах индексы ведут себя по-разному, это позволяет надеяться: при построении модели мы сможем получить полную картину модуляции КЛ в циклах СА.

Отметим некоторые особенности используемых модулирующих характеристик: $1.B_{ss}$ - квадрат радиальной компоненты магнитного поля, усреднённой по сфере фиксированного радиуса - поверхности источника солнечного ветра - убывает с конца 22-го цикла, в минимуме 23/24 зафиксированы небывало низкие значения, индекс B_{ss} , дает информацию обо всем магнитном потоке, проходящем через поверхность источника. Из общих соображений понятно, что ммп должно быть связано с полем на поверхности источника. По данным полученным при прямых наблюдениях гелиосферного поля и глобального магнитного поля связь между B_{ss} и модулем гелиосферного поля B_{imf} измеряемым у Земли, достаточно тесная (для 1976.06-2017.03 корреляция 0.72) (10). Т.о. **выявлена взаимозаменяемость B_{imf} и B_{ss} в моделях модуляции. Показано (10), замена в эмпирической модели вариаций КЛ модуля гелиосферного поля B_{imf} на величину среднего магнитного поля B_{ss} не только возможна, но даже улучшает качество модели;**

$hcst$ - угол наклона гелиосферного токового слоя, в качестве главного параметра в модели модуляции КЛ используется довольно давно, лучше всего коррелирует с долгопериодными вариациями КЛ.. **Токовый слой – не только место наиболее эффективного дрейфа. Это и самая большая магнитная неоднородность в гелиосфере, с которой взаимодействуют КЛ, увеличение наклона увеличивает дрейфовый путь и создаёт магнитные неоднородности другого типа, значения $hcst$ возрастают (от 9.3° в минимуме 22/23 до 16.6° в период, близкий к минимуму 24/25). На рост этой структурной характеристики в минимумах СА отмечено в работе (11) с предположением о роли дрейфового эффекта в его создании.**

$Hpol$ -полярное магнитное поле Солнца, учитывается в модели по величине и знаку, в последних двух циклах имеет меньшую, чем ранее, и уменьшающуюся со временем амплитуду;

SME -индекс - характеризует долговременное влияние спорадической СА на долговременную модуляцию КЛ, введен и подробно изложено его влияние на КЛ в (12), убывает, особенно в 24-ом цикле;

$AL3$ - площадь низкоширотных (0° – 45°) корональных дыр, выбор обоснован в (13), усиливают модуляцию в отличие от высокоширотных, В 23-ем цикле при $q_A < 0$ площади корональных дыр модулируют КЛ на $\sim 3\%$, при этом влияние низкоширотных дыр происходит в противофазе с другими модулирующими индексами.

Результаты моделирования долгопериодных вариаций галактических КЛ с помощью полуэмпирической модели, основанной на солнечно-гелиосферных характеристиках

Для вышеперечисленных солнечно-гелиосферных характеристик (B_{ss} , H_{pol} , $hcst$, Al , CME -индекс) и амплитуды долговременных вариаций КЛ с жесткостью 10 ГВ (a_{10}) выполнен многопараметрический регрессионный анализ с учетом запаздывания для каждого параметра и выявлена роль каждого из индексов в модуляции КЛ. Согласно (10) вклад H_{pol} в вариацию плотности КЛ $\delta H_{pol} = -0.025 H_{pol}$ (мТл). ввели в амплитуду вариаций a_{10} поправку δH_{pol} , чтобы учесть модулирующее воздействие индекса H_{pol} . После введения указанной поправки для скорректированной амплитуды $a_{10_{H_{pol}}}$ выполнено дальнейшее моделирование вариаций. В результате получены отдельно для 21-22 и 23-24 циклов: коэффициент корреляции (r), среднеквадратичное отклонение модели (σ), регрессионные характеристики (k) и времена запаздывания вариаций КЛ относительно индексов СА ($t_{зап}$).

Таблица 1 Результаты многопараметрического регрессионного анализа для 21-22 и 23-24 циклов

ЦИКЛЫ	r	σ	k_{hcst}	$K_{B_{ss}}$	K_{cme}	K_{Al}
21-22	0.967	1.665	-0.186	-0.756	-0.049	-0.009
t зап			14	4	1	17
23-24	0.954	1.639	-0.09	-1.867	-0.051	-0.008
t зап месяцы			20	4	1	8

Получена картины распределения вкладов в создаваемую модуляцию КЛ от воздействия указанных индексов СА. Отметим, в модели: 1) наклон $hcst$ определен на $R=2.5 R_{\odot}$, 2) моделирование вариаций проводится для $a_{10_{H_{pol}}}$.

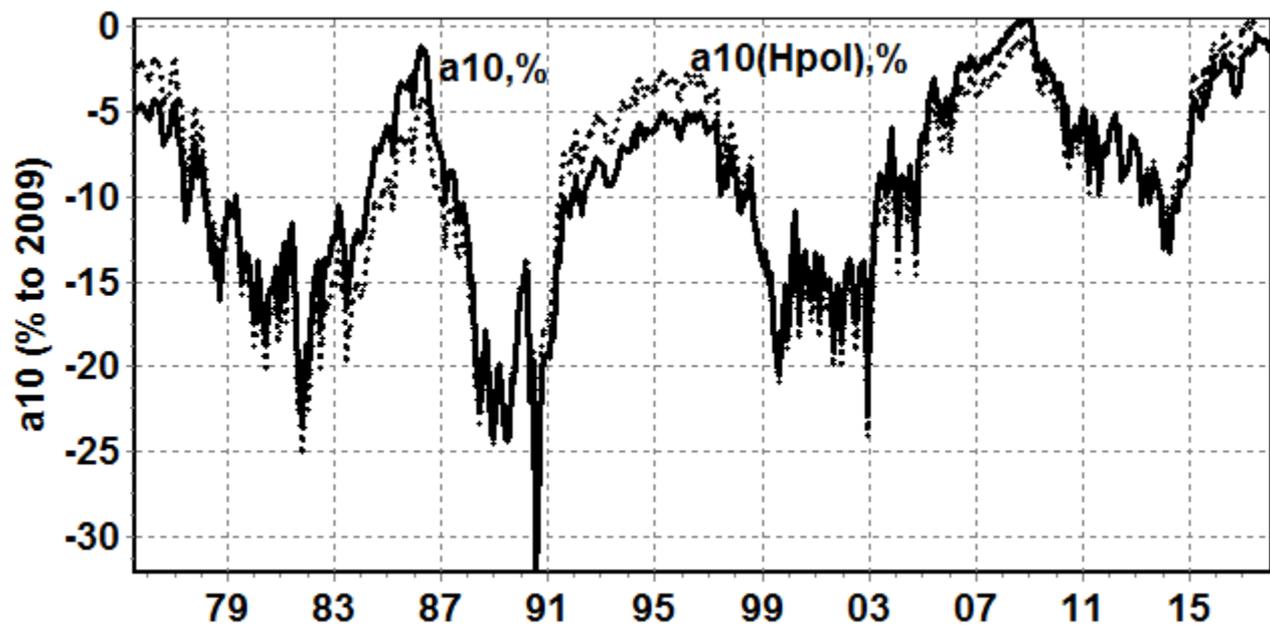


Рис. 6_ Величина вариаций $a_{10},\%$ (к 2009г) в 21-24 циклах для частиц с жёсткостью 10 ГВ (сплошная кривая) и $a_{10_{Hpol}},\%$ с введенной поправкой на воздействие полярного поля Солнца на КЛ

Сравнение величины вкладов в полную модуляцию КЛ от воздействия отдельных солнечно-гелиосферных индексов в 21-22 и 23-24 циклах СА

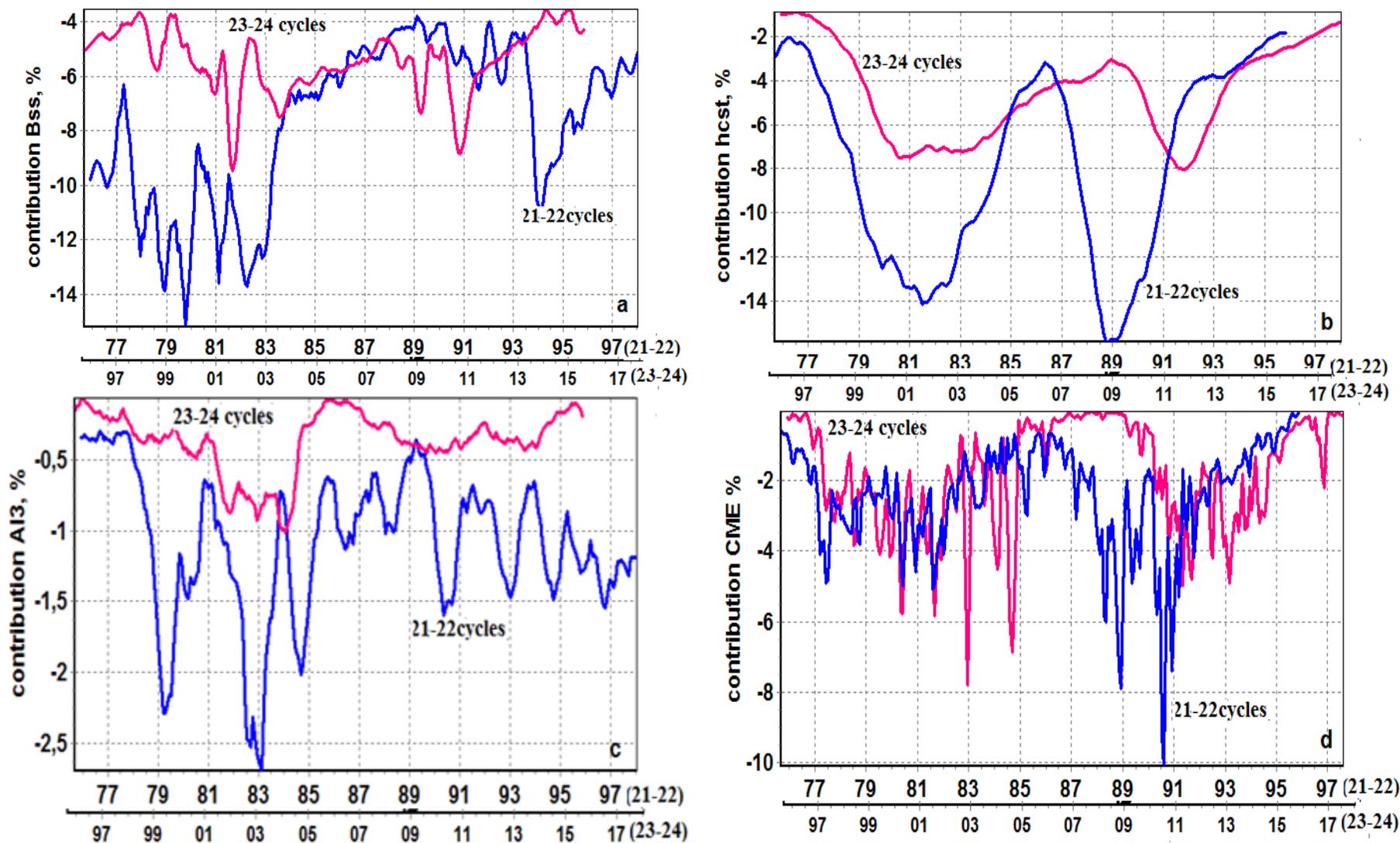


Рис. 6 (a-d) - Вклад (в %) в общую модуляцию КЛ воздействия в 21-22-ом (синяя кривая) и 23-24-ом (красная) циклах: а) среднего магнитного поля Солнца B_{ss} ; б) наклона нейтрального токового слоя $hcst$; в) площади низкоширотных корональных дыр A_{I3} ; д) CME индекса.

Вклады в модуляцию КЛ от изменений характеристик СА в 21, 22, 23 и 24 циклах

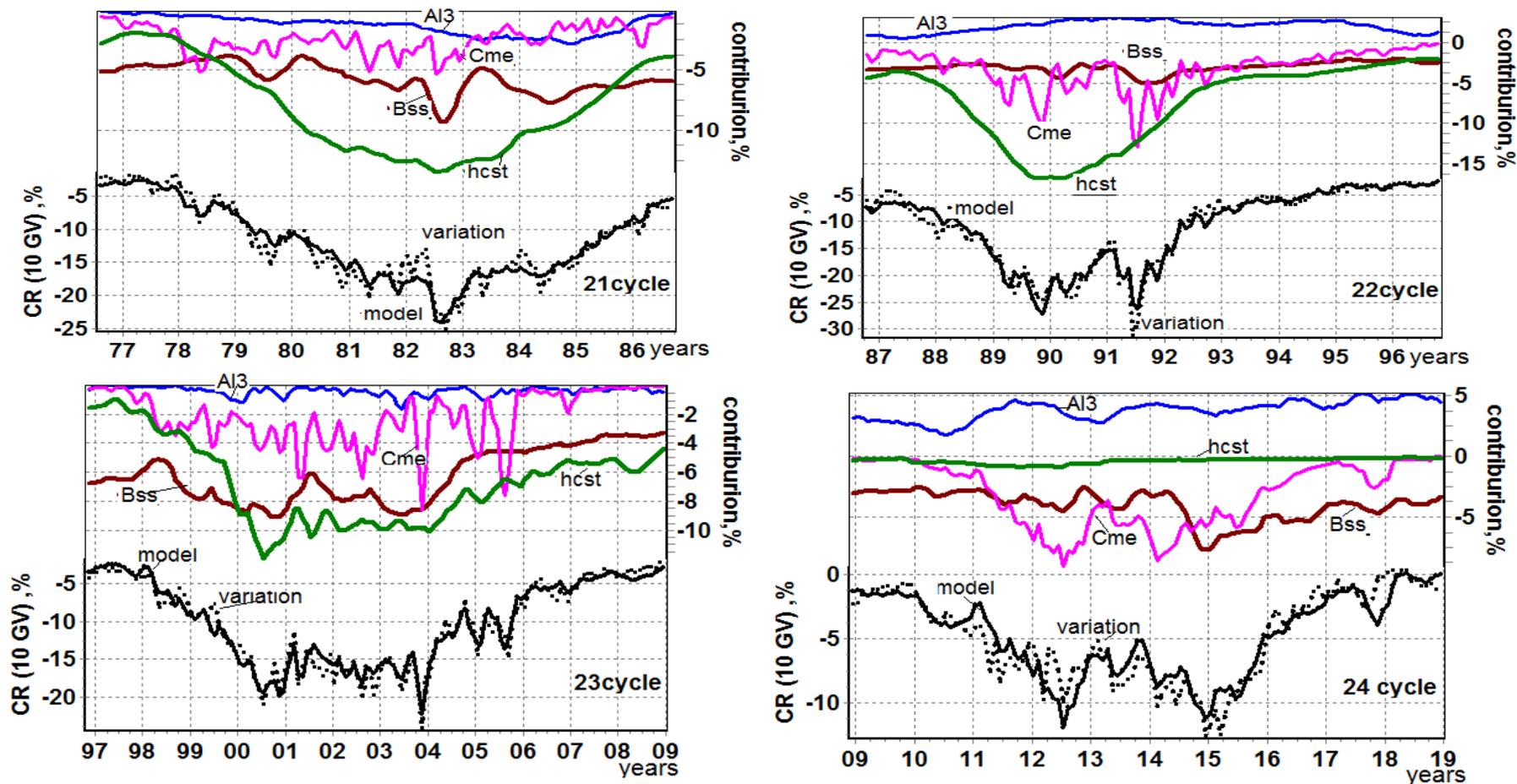


Рис.7. Левая шкала - $\Delta 10\%$ долговременные вариации КЛ в 1976-1986гг.(21-й цикл), 1986-1996гг.(22-й цикл), 1996-2008гг, (23-й цикл) и в 2009-2019гг. (24-й цикл), (модель - сплошная кривая; точки - наблюдаемые вариации); правая шкала - вклад в модель модуляции КЛ от воздействия: среднего магнитного поля Солнца (Bss)- коричневая кривая; наклона токового слоя (hcst)-зеленая; влияния спорадической СА - CME индексовозрозовая; площади низкоширотных корональных дыр (AL3) – синяя.

Особенности вкладов в общую модуляцию в циклах

В 23-м цикле (показано на примере изменения *hcst* в [Gush]) подтверждается заключение об определяющем значении наклона для процесса модуляции в эпоху минимума СА при отрицательном направлении глобального магнитного поля на Солнце.

в 24-ом цикле -- временные изменения вклада от СМЕ-индекса четко отражаются в наблюдаемых вариациях КЛ, наибольший вклад в период максимума СА (2012г. И 2014г.) описывая осцилляции с переменным периодом на фоне уменьшения 11-летней вариации КЛ. Время запаздывания для СМЕ-индекса (1 месяц) получилось самым коротким по сравнению с другими индексами, означая значимое влияние СМЕ во внутренней гелиосфере на интенсивность КЛ у Земли.

Остальные солнечные индексы, используемые в модели модуляции, имеют значительно большее запаздывание (*Al3-8*, *Bss-4* и *hcst-20* месяцев) и отражают крупномасштабные воздействия структуры и состояния гелиосферы на модуляцию КЛ. Анализ наблюдаемого 24-го цикла, самого низкого за время наблюдения КЛ, позволяет предположить, что малая глубина модуляции объясняется не только низкой СА и соответственно малыми величинами модулирующих характеристик, но и меньшей эффективностью их воздействия на КЛ. Что касается воздействия на КЛ в период роста СА в 24-ом цикле энергетики крупномасштабных магнитных полей на Солнце (индекс *Bss*), то оно явно понижено по сравнению с предыдущими циклами в аналогичных эпохах СА. Но это, в основном, обусловлено снижением самой величины *Bss*. Как показывает модель в 24-м цикле вклад *hcst* на фазе роста СА меньше 5 %. Это говорит об уменьшении эффективности воздействия наклона гелиосферного токового слоя, главного модулирующего индекса, на модуляцию КЛ.

Вклады в модуляцию КЛ от изменений характеристик СА в 21-22 и 23-24 циклах

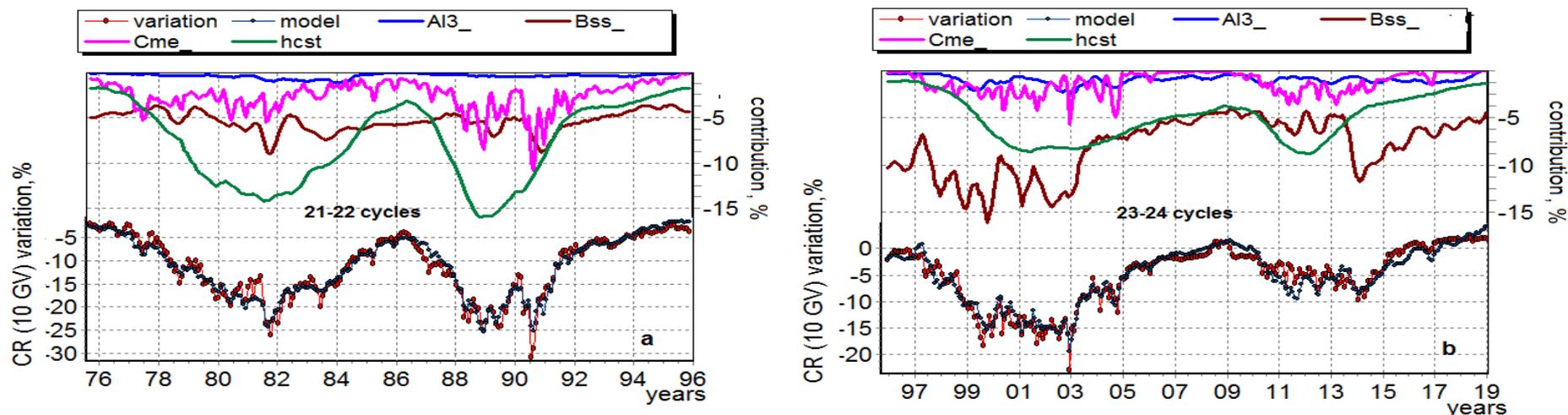


Рис.8- а10 (% к 2009) - вариации плотности КЛ с жёсткостью 10 ГВ(красная кривая с точками в нижней части рис.) и результат их моделирования (сплошная черная кривая); верхняя часть рис.- вклад от изменений: наклона $hcst$ (зеленая кривая), среднего магнитного поля Солнца B_{ss} (коричневая), CME-индекса (розовая) и площади корональных дыр $AI3$ (синяя): (a)- 21-22 и (b)-23-24 циклы

Определяющая роль в создании модуляции 21-22 циклах принадлежит наклону токового слоя $hcst$, а в 23-24 циклах- B_{ss} . Коэффициент регрессии для наклона токового слоя $hcst$ в модели 23-24 циклов $-0.1\% / ^\circ$. Это в ~ 2 раза меньше, чем в 21-22 циклах ($-0.19\% / ^\circ$). Коэффициент регрессии для B_{ss} в 23-24 циклах $-1,9\% / \mu T$, а в 21-22циклах $-0,76\% / \mu T$. Модуляция КЛ в этих циклах СА значительно слабее, чем модуляция в 21-22 циклах СА.

Причиной являются аномалии, возникшие на Солнце и в гелиосфере в последние два цикла вследствие ослабления солнечного магнитного поля и состояния гелиосферы. Анализ 23-го цикла со слабой модуляцией КЛ и 24-го цикла СА, самого низкого за время наблюдения КЛ, может объясняться разным (по сравнению с другими циклами) воздействием на КЛ конкретных физических процессов (дрейфа, диффузии, конвекции и адиабатического изменения энергии), создающих модуляцию.

Взаимодействие главных механизмов модуляции и роль модуляционных характеристик в создании общей модуляции меняется с солнечными циклами (10,14,15). В представленной модели модуляции вклад в общую модуляцию от эффекта дрейфа КЛ в 24-ом цикле ниже (обращает внимание период роста и максимума СА 2010-2014гг.). В модели модуляции для 23-24 циклов упомянутое выше преобладание вклада от воздействия на КЛ крупномасштабного магнитного поля на Солнце, выраженной в величине индекса B_{ss} (с учетом связи B_{imf} и B_{ss}), может говорить о возрастании роли диффузии КЛ при распространении в гелиосфере с пониженным ММП (15).

В 23-24-ом циклах выявлено уменьшение влияния угла наклона токового слоя на модуляцию КЛ. Изменение его величины происходит в тех же пределах, что и в других циклах, но эффективность воздействия на модуляцию сильно снижена. (дополнительное объяснение нужно!). В 23-24-ом циклах СА в общей модуляции КЛ преобладает воздействие на КЛ крупномасштабного магнитного поля на Солнце, выраженной в индексе B_{ss} , несмотря на снижение самой величины B_{ss} .

Ожидания: плотность КЛ в 24-ом цикле (за период 11.2009-12.2019) не достигла своего максимального значения. Солнце находится в положительной фазе 22-летнего солнечного магнитного цикла ($qA > 0$) и предстоящий максимум потока КЛ ожидается продолжительным (подобно периодам 1974-1976 гг. и 1994-1997 гг.). Фаза минимума 24/25 в вариациях КЛ предположительно будет достигнута в конце 2020г. (если опираться на значения сглаженных W и учитывая время запаздывания КЛ относительно СА).

Плотность космического излучения, непрерывные наземные наблюдения которого на мировой сети станций космических лучей проводятся с помощью нейтронных мониторов с 1957г., в последние два цикла (23-ем и 24-ом) сильно отличается от того, что мы видели в предшествующие циклы. Во-первых, низкий минимум СА в конце 2009 г. (минимум СА 23/24 цикла) вызвал рекордный рост плотности КЛ и сопоставимый с ним минимум 24/25 цикла (в январе 2020г в СА по предварительным данным <http://www.sidc.be/silso> и в конце 2020 г в КЛ с учетом времени запаздывания) отличается продолжающимся ростом интенсивности КЛ. За более чем шестидесятилетний период непрерывных наблюдений КЛ ранее *в наземных наблюдениях не достигались такие значения плотности КЛ, величина которых может приближаться к внегелиосферному уровню*. Во-вторых, удивляет необычно слабая модуляция КЛ в 23-ем и 24-ом циклах СА.

Литература

- 1 - <http://wso.stanford.edu>
- 2 - Obridko V.N. and Shelting B.D. Solar physics. V.184. P.187. 1999
- 3 - <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omni> web
- 4 - <http://wso.stanford.edu>
- 5 - Белов А. В., Гущина Р. Т., Геомаг. и аэр., т. 58, № 1, с. 3. 2018
- 6 - Белов А.В., Гущина Р.Т., Тлатов А.Г., Янке В.Г., Геомаг. и Аэрономия, Т.56, N3 с.275.. 2016
- 7 - Yanke, V., Belov, A., Gushchina, R., Zirakashvili, V., 2019, Journal of Physics: Conf. Series 1181
- 8 - Usoskin et al, 2017, JGR, v.122 p.3875
- 9 - G. Bazilevskaya, A.-M. Broomhall, Y. Elsworth, and V. M. Nakariakov, 2014, Space Sci. Rev. 186, 359
- 10 - Белов А.В., Гущина Р. Т., Янке В.Г. Известия РАН, серия физ, 2017, т. 81, № 2, с. 165
- 11 - Gushchina, R. et al., 2012, Geomagnetism and Aeronomy, 52, № 4, 1–7
- 12 - Белов А. В., Гущина Р. Т., Геомагнетизм и аэрономия, , т. 58, № 1, с. 3. 2018;
- 13 - Гущина Р.Т., Белов А.В., Тлатов А.Г., Янке В.Г., Геомаг. и Аэрономия, Т.56, N3 с.275.. 2016.
- 14 - Potgieter, M., 2013, Living Reviews in Solar Physics, 10(3), DOI 10.12942/lrsp
- 15 - Kalinin, M., Bazilevskaya, G., Krainev, M., et. al, 2017, Geomagnetism and Aeronomy, 57, No.5, 549