

ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ РАЗНОЙ ЭНЕРГИИ В МИНИМУМАХ ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2022 г. В. Г. Янке¹, *, А. В. Белов¹, Р. Т. Гущина¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: yanke@izmiran.ru

Поступила в редакцию 26.02.2022 г.

После доработки 12.03.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

Изменения глобального магнитного поля Солнца – основного параметра, модулирующего космические лучи приводят к изменениям характеристик солнечной активности и гелиосферного поля. В работе рассмотрен вопрос об отклике на длительное ослабление глобального магнитного поля Солнца в долговременной модуляции космических лучей разной энергии в циклах с разным направлением полярного магнитного поля Солнца. Проанализирован период 1991–2020 гг., включающий два интервала с положительным и отрицательным направлениями глобального магнитного поля Солнца. Исследование выполнено на материале непрерывных наблюдений космических лучей сетью нейтронных мониторов, телескопов и стратосферных шаров-зондов. Спектр вариаций для частиц с эффективной жесткостью $R_{\text{eff}} = 5, 10, 20$ ГВ определен с помощью разработанного нами варианта метода глобальной съемки. В минимуме 24/25 цикла, начиная с 2018 г. до настоящего времени, наблюдается плоский максимум потока космических лучей, что подтверждает дрейфовую теорию модуляции для положительного направления глобального магнитного поля на Солнце. В этот период вариации малых энергий (наблюдаемые на космических аппаратах и в стратосфере) превышают значение вариаций базового периода (1987 г.) на ~8% и составляют 0.8 от максимальной вариации в аномальном минимуме 23/24 в 2009 г. Максимум потока частиц средних и высоких энергий, наблюдаемых на нейтронных мониторах и телескопах, на 1–2% ниже максимума 23/24. Пониманию процесса модуляции космических лучей электромагнитными полями гелиосферы способствует их моделирование. В предложенной нами многопараметрической модели долговременная модуляция описывается (с учетом запаздывания) рядом гелиосферных характеристик.

DOI: 10.31857/S0016794022040174

1. ВВЕДЕНИЕ

Установленная Forbush [1954] более шестидесяти лет назад связь наблюдаемого потока космических лучей (КЛ) с солнечной активностью (СА) подтверждена сегодня результатами многолетних наблюдений Солнца, гелиосферных характеристик и КЛ на земле и в космосе. Роль магнитного поля в динамике происходящих на Солнце процессов – ключ ко всем активным явлениям, происходящим на Солнце, в солнечной атмосфере и гелиосфере. При исследовании динамики гелиосферы на долговременном масштабе незаменимым инструментом являются вариации КЛ, наблюдаемые на Земле с помощью мировой сети детекторов (нейтронных мониторов, мюонных телескопов и шаров-зондов). Циклы СА хорошо видны в однородных долговременных рядах данных наземных детекторов и, если бы не было наблюдений Солнца, о солнечной цикличности и ее главных периодах было бы известно из наблюдений

вариаций КЛ. В настоящее время эти ряды включают шесть 11-летних циклов СА и три солнечных 22-летних магнитных цикла, которые являются главной особенностью долговременных вариаций КЛ.

Значительное ослабление магнитного поля Солнца, начавшееся в конце 22-го цикла СА и продолжающееся до настоящего времени, дает нам возможность наблюдать и исследовать особенности долговременной модуляции КЛ в двух последних циклах СА с противоположным направлением знака глобального магнитного поля Солнца. Аномально слабая долговременная модуляция КЛ в 23 и 24-м циклах СА – итог тренда солнечного магнитного поля. При этом в прошлом минимуме в 2009 г., самом низком цикле СА в эпоху регулярных наземных наблюдений КЛ с 1951 г., наблюдался необычно высокий восстановленный поток КЛ (острый максимум КЛ для направления глобального магнитного поля Солнца $A < 0$), превысивший максимумы потоков КЛ с

аналогичным направлением $A < 0$ в предыдущих циклах. По мере прохождения очередного минимума СА 24/25-го цикла СА в вариациях КЛ наблюдается, начиная с 2017 г. и до настоящего времени, плоский (для $A > 0$) максимум. Высота максимума потока КЛ для частиц разной энергии в этот период требует особого внимания и исследования.

Для понимания связи процессов на Солнце и модуляции КЛ при их распространении в гелиосфере, приводящей к изменению жесткостной зависимости спектра 22-летних вариаций КЛ в циклах с разным знаком глобального магнитного поля Солнца [Reinecke and Potgieter, 1994; Heber et al., 1997], нужно обратиться к результатам детального анализа временного хода наблюдаемых на Земле долговременных вариаций КЛ и их связи с солнечными и гелиосферными характеристиками.

Указанный анализ проводился для спектра долговременных вариаций КЛ, рассчитанного по методике [Белов и др., 2002], полученного для частиц с жесткостью $R \leq 100$ ГВ. Знание спектра крайне необходимо при построении модели модуляции КЛ. Основное внимание в работе обращено на определение спектральных характеристик КЛ в минимумах циклов и на особенности модуляции КЛ в эти периоды в циклах с разным знаком глобального магнитного поля Солнца. Для этого проведено модельное описание долговременных вариаций КЛ с помощью регрессионных уравнений, используя различные индексы СА (согласно рекомендациям, изложенным в работе [Белов и др., 2002]). Наблюдаемый в последнее время тренд основного параметра, модулирующего КЛ, — глобального магнитного поля Солнца, его значительное и длительное ослабление проявляется в особенностях корреляционной связи СА и КЛ в анализируемый период 1991–2020 гг.

Цель работы — в рамках разработанной в ИЗМИРАН модели модуляции КЛ определить роль солнечно-гелиосферных характеристик в создании вклада в общую модуляцию КЛ от циклических изменений каждого предложенного индекса СА для частиц с эффективными жесткостями $R_{\text{eff}} = 5, 10, 20$ ГВ в периоды с разным знаком глобального магнитного поля Солнца А.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе используется глобально-спектрографический метод (ГСМ) [Крымский и др., 1966], вариант которого, разработанный для определения спектра долговременных вариаций КЛ с учетом жесткостной зависимости вариаций, предложен на основе всей имеющейся информации об интенсивности КЛ, полученной при регистрации

КЛ наземной сетью детекторов и детекторов, зондирующих стратосферу [Belov et al., 2001]. Анализ энергетических и временных изменений спектра вариаций КЛ проведен за период 1957–2020 гг., когда имелись данные наблюдений нейтронных мониторов (40 станций мировой сети), стратосферных шаров-зондов (3 пункта) (https://sites.lebedev.ru/ru/DNS_FIAN) и телескопа (ст. Нагоя) (<http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/main.php>). При использовании ГСМ сеть перечисленных детекторов рассматривалась как единый многонаправленный детектор, оснащенный высокоточными стандартными приборами. Получены характеристики жесткостного спектра, заданного в виде $\delta(R) = a/(b + R)^\gamma$ в приближении нулевой гармоники. Анализ характеристик спектра (a — амплитуда вариаций, γ — показатель спектра) проведен для галактических КЛ с жесткостью $R = 5, 10$ и 20 ГВ. Среднемесячные вариации КЛ определялись в % относительно базы за 1987 г. Выбор этой базы сделан специально: 1987 г. не очень далеко отстоит по времени от изучаемого периода, поток КЛ в этом году существенно отличается от максимальных потоков в 23/24 циклах, и это позволяет определять жесткостной спектр вариаций КЛ в минимумах СА.

В работе мы рассмотрим и сравним модуляцию КЛ в трех периодах: 1991–1999 гг. ($A > 0$), 2000–2010 гг. ($A < 0$) и 2014–2020 гг. ($A > 0$). Чтобы изучить связь модуляции КЛ с солнечной активностью для каждого периода и для различных жесткостей КЛ, выполнено моделирование долговременных вариаций КЛ с помощью многопараметрической регрессии. Модель включает 5 индексов солнечной активности (все индексы со среднемесячным усреднением). В первую очередь, это индексы, отражающие силу и структуру глобального магнитного поля Солнца: величина средней напряженности поля на Солнце B_{ss} [Obridko and Shelting, 1999] и наклон $hcst$ гелиосферного токового слоя (использована классическая модель) (<http://wso.stanford.edu>). Влияние квазидвадцатидвухлетнего магнитного цикла Солнца входит в модель главным образом через величину полярного магнитного поля H_{pol} (<http://wso.stanford.edu>). Кроме учета характеристик крупномасштабного магнитного поля Солнца, в модели учитываются и спорадические солнечные явления через $SMEi$ -индекс [Белов и Гущина, 2018] и площади низкоширотных корональных дыр A_i [Гущина и др., 2016]. Выбор и анализ солнечно-гелиосферных характеристик для эмпирического описания модуляции КЛ в циклах СА выполнен в работе [Belov et al., 2005].

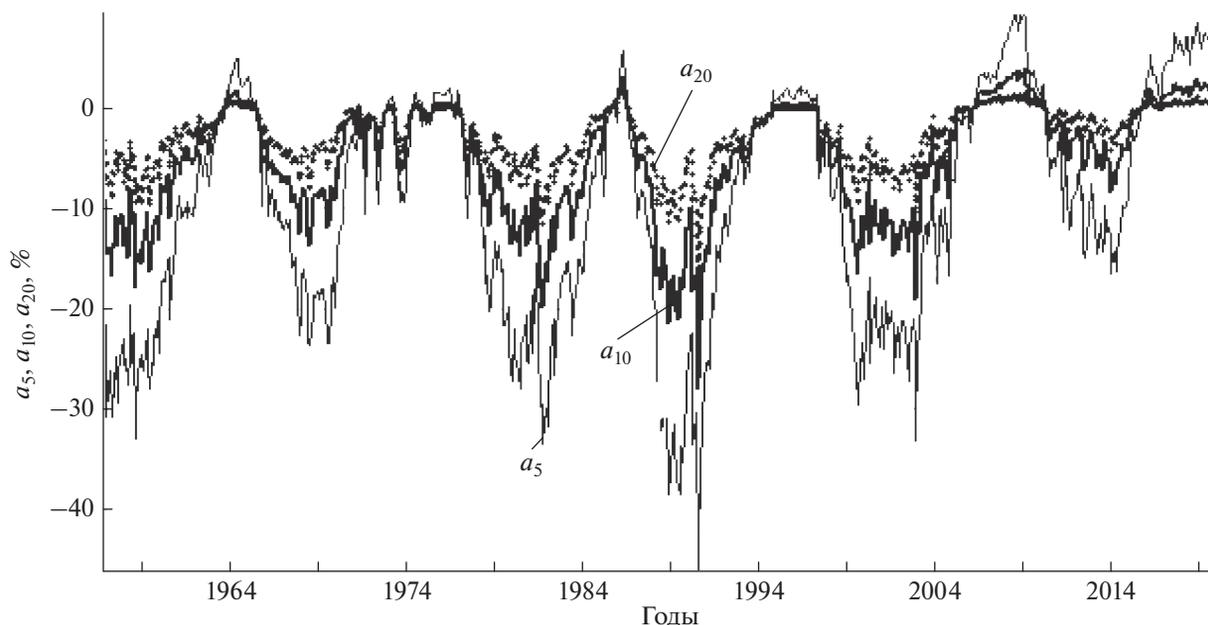


Рис. 1. Временные изменения вариаций КЛ (a_5 , a_{10} , a_{20} , % от среднегодового значения вариаций в 1987 г.), полученные на основе данных комплекса детекторов для $R = 5, 10$ и 20 ГВ.

3. О ВАРИАЦИЯХ КЛ, НАБЛЮДАЕМЫХ В МИНИМУМАХ СА

Вариации КЛ, полученные с помощью ГСМ и трехпараметрической модели жесткостной зависимости приведены на рис. 1. Во временном ходе вариаций КЛ плоские и пикообразные максимумы КЛ чередуются в минимумах СА в 1964, 1976, 1987, 1996, 2009 и 2019 г. Обращает внимание превышение величины вариаций КЛ как для частиц с $R = 5$ ГВ, так и для $R = 10$ и 20 ГВ, наблюдаемое в минимуме 2009 г. по сравнению с другими минимумами, а в следующем минимуме – 2019 г., вариации потока частиц с этими жесткостями несколько меньше, чем в 2009 г., в зависимости от жесткости на разную величину (табл. 1).

Значения вариаций в двух последних минимумах, приведенные в табл. 1, отчетливо показывают аномально большое возрастание потоков

плотности КЛ как ответ космического излучения на начавшееся в конце 22-го цикла ослабление магнитного поля на Солнце и на изменения солнечно-гелиосферных характеристик, ответственных за модуляцию КЛ. Отметим, что наибольшее возрастание наблюдается для малых энергий. В последнем минимуме СА (2019 г.) вариации КЛ имеют очень мягкий жесткостной спектр, как и в более ранних минимумах. Об этом говорит тот факт, что вариация для 5 ГВ более чем на порядок превышает вариацию для 20 ГВ. Анализ временного хода вариаций КЛ a_5 , a_{10} , a_{20} (рис. 2a–e), полученных с использованием комплекса детекторов и ГСМ, проводился для периодов относительно спокойной гелиосферы, а именно в минимумах и вблизи минимумов СА в 1964–1966, 1975–1977, 1986–1988, 1995–1997, 2008–2010 и 2018–2020 гг. Временной ход вариаций КЛ дает представление о сложном характере модуляции

Таблица 1. Среднегодовые вариации (% , база 1987 г.) в минимумах 19–24-го циклов для $R = 5, 10, 20$ ГВ

Минимумы циклов	19/20	20/21	21/22	22/23	23/24	24/25
R , ГВ	(05.1965)	(05.1977)	(03.1987)	(05.1997)	(09.2009)	(10.2019)
5	3.4 (04.1965)	1.0 (05.1977)	0 (03.1987)	1.5 (05.1997)	8.6 (01.2010)	6.8 (10.2019)
10	1.1 (04.1965)	0.2 (11.1977)	0.1 (02.1987)	0.3 (05.1997)	3.3 (01.2010)	2.1 (10.2019)
20	0.4	0	0	0.1	1.1	0.7

Примечание. В скобках – месяц, когда наблюдается максимум восстановленного потока КЛ.

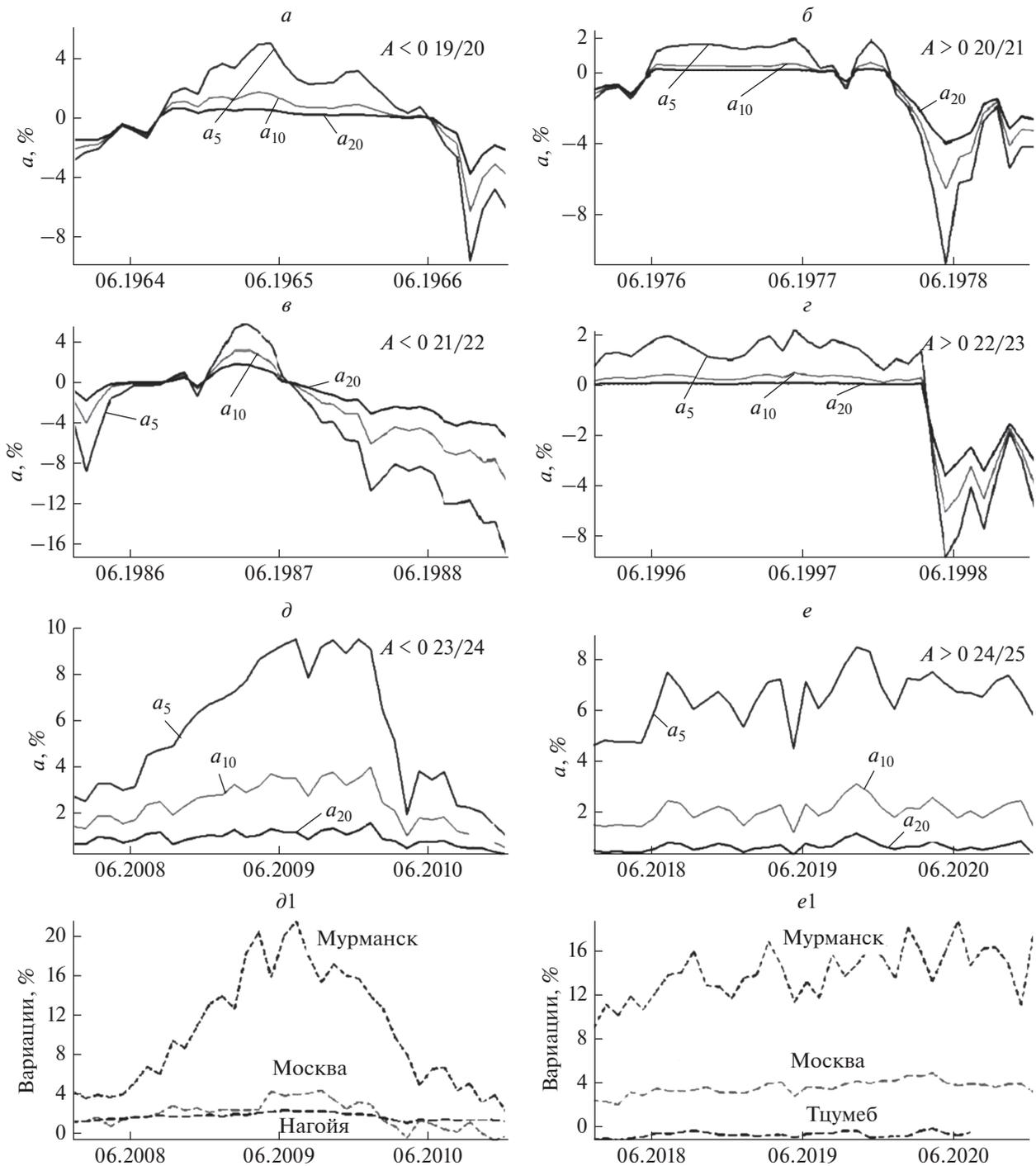


Рис. 2. (а–е) – Вариации КЛ в периоды около минимумов СА в 20–24-м циклах для частиц с жесткостями: $R = 5, 10$ и 20 ГВ, полученные по ГСМ; (д1–е1) – результаты наблюдений вариаций КЛ на станциях (штриховые), оснащенных нейтронным монитором, – Москва, Цумеб; шарами-зондами – Мурманск; телескопом – Нагойя.

частиц разных энергий в отмеченные периоды с разным направлением глобального магнитного поля Солнца А.

Вариации КЛ в периоды, близкие к минимумам 20–24 циклов по форме, разделяются на два вида 11-летних циклов СА: с острым максимумом

потока КЛ при $A < 0$ (1964 г., 19/20), (1987 г., 21/22), (2009 г., 23/24) (рис. 2а, в, д) и плоские максимумы, когда $A > 0$ (1977 г., 20/21), (1997 г., 22/23), (2019 г., 24/25) (рис. 2б, г, е). Восстановленные потоки частиц в эти периоды низкой СА отличаются высотой и временем достижения

максимума для жесткостей 5, 10, 20 ГВ. В случае пикообразного максимума изменение высоты (в % от 1987 г.) происходит для 3 вышеуказанных минимумов СА следующим образом: (среднемесячные значения) для $R = 5$ ГВ – 5.0, 5.7, 9.5; для $R = 10$ ГВ – 1.7, 3.2, 3.8; для $R = 20$ ГВ – 0.6, 1.7, 1.6. Это указывает на снижение восстановленных потоков высоко- и среднеэнергичных частиц в 2009 г., причем эта аномалия наблюдается в период, когда происходит рост потока малоэнергичных частиц. Полярность глобального магнитного поля Солнца и магнитная конфигурация гелиосферы в эти периоды (1965, 1987, 2009 гг.) были одинаковы. Такая ситуация с уменьшением высоко- и среднеэнергичных частиц требует дальнейшего наблюдения и дополнительного объяснения.

Что касается времени достижения максимума потока КЛ в минимуме 1965 и 1987 гг., он достигается частицами разных жесткостей практически одновременно (для $R = 5$ ГВ в 05.1965 г. и $R = 10$ –20 ГВ в 04.1965 г.; для $R = 5$ и 10 ГВ в 03.1987 г. и $R = 20$ ГВ в 02.1987 г.), т.е. с небольшим опережением максимум достигается частицами с большими жесткостями. О сложном характере модуляции частиц разных энергий говорит достижение максимума КЛ в 2009 г. Обычно, когда в точку наблюдения приходят частицы разных энергий от одного источника, дисперсия по энергии и по скоростям диффузии приводит к более раннему развитию вариаций более жестких частиц. Но здесь другая ситуация. Максимум КЛ достигается тогда, когда прерывается процесс восстановления, характерный для минимума СА, а это происходит с началом нового солнечного цикла. Новый цикл солнечной модуляции КЛ раньше проявляется на частицах сравнительно низкой энергии. Так, в полученной нами картине модуляции происходит опережающее достижение максимума более мягкими частицами, а не наоборот. КЛ с жесткостями $R = 10$ –20 ГВ достигают максимума при восстановлении интенсивности на три месяца позже (01.2010 г.), чем восстановился поток КЛ с $R = 5$ ГВ, как показано в работе [Гушина и др., 2013]. Полученные особенности достижения максимума восстановленного потока КЛ на примере минимумов СА в 1965 и 1987 гг. частицами разной энергии можно объяснить также началом нового цикла в КЛ, но начало нового цикла происходит почти одновременно для всех рассматриваемых жесткостей.

Рассматривая поведение временного хода вариаций КЛ плоского вида в минимумах СА в циклах с направлением полярного поля Солнца $A > 0$ (21-, 23-й и начало 25-го циклов), первое, что нужно отметить, это некая неоднозначность при определении максимума потока КЛ. Величины вариаций в максимумах восстановленных потоков для разных жесткостей в циклах 21 и 23 не

превышают 2% и их значения близки в разные месяцы. Для минимума 24/25 вариации потока низкоэнергичных частиц значительно отличаются от вариаций в других циклах (21 и 23-го) с тем же направлением глобального поля Солнца, причем вариации достигают 8.6% в конце 2019 г. Высота восстановленных потоков КЛ в 24/25 для средне- и высокоэнергичных частиц превышает модуляцию в циклах с аналогичным направлением магнитного поля, но незначительно ($a_{10} = 3.1\%$, $a_{20} = 1.1\%$ в 10.2019 г.) Это обстоятельство может говорить о смягчении спектра в минимуме 24/25, и подтверждением этому является результат определения показателя спектра γ , приведенного со стандартной статистической ошибкой для 1976–2020 гг. на рис. 3, где также приведена картина долговременных вариаций a_{10} с $R = 10$ ГВ. Сравнение показателя спектра γ для минимумов трех последних циклов (22/23, 23/24 и 24/25) показывает, что смягчение началось в 24/25 уже с 2017 г. ($\gamma = 2$), для 23/24 – $\gamma = 1.8$, для 22/23 – $\gamma = 0.9$. Полученный нами мягкий спектр долговременных вариаций КЛ в минимуме 24/25 подтверждается результатами, полученными в работе [Fu et al., 2021] с привлечением данных КА ACE/CRIS и нейтронных мониторов.

Исследуя модуляцию КЛ, довольно часто в качестве данных по их интенсивности используют результаты мониторинга КЛ на отдельных станциях, оснащенных нейтронными мониторами и телескопами или результаты наблюдений в пунктах, выполняющих стратосферное зондирование. С целью сравнения характеристик плотности восстановленных потоков КЛ для тех же периодов минимумов СА (для которых получены вариации с жесткостью $R = 5, 10, 20$ ГВ), были определены вариации КЛ для отдельных станций и пунктов наблюдений КЛ с разными жесткостями геомагнитного обрезания. Для этого в качестве примера на рис. 2d1–e1 приведены вариации для двух последних минимумов (23/24 и 24/25). Вышеприведенное обсуждение вариаций, рассчитанных по ГСМ для жесткостей 5, 10, 20 ГВ не противоречит вариациям, полученным для отдельных детекторов в общем временном ходе вариаций КЛ с разными жесткостями, но расхождение в деталях иногда не позволяет сделать правильный вывод о наблюдаемой модуляции. В работе не делается определенного заключения о различии времени достижения максимума КЛ в минимуме 24/25, полученном с помощью ГСМ и по наблюдаемым вариациям на отдельных станциях с разными детекторами. Понятно, что разные детекторы могут иметь отличия в вариациях, что может быть связано не только с нестабильностью, но и с разными характеристиками детекторов. Существенно, что рассматриваемый последний максимум КЛ плоский, и это вносит неопределенность в положение максимума. К со-

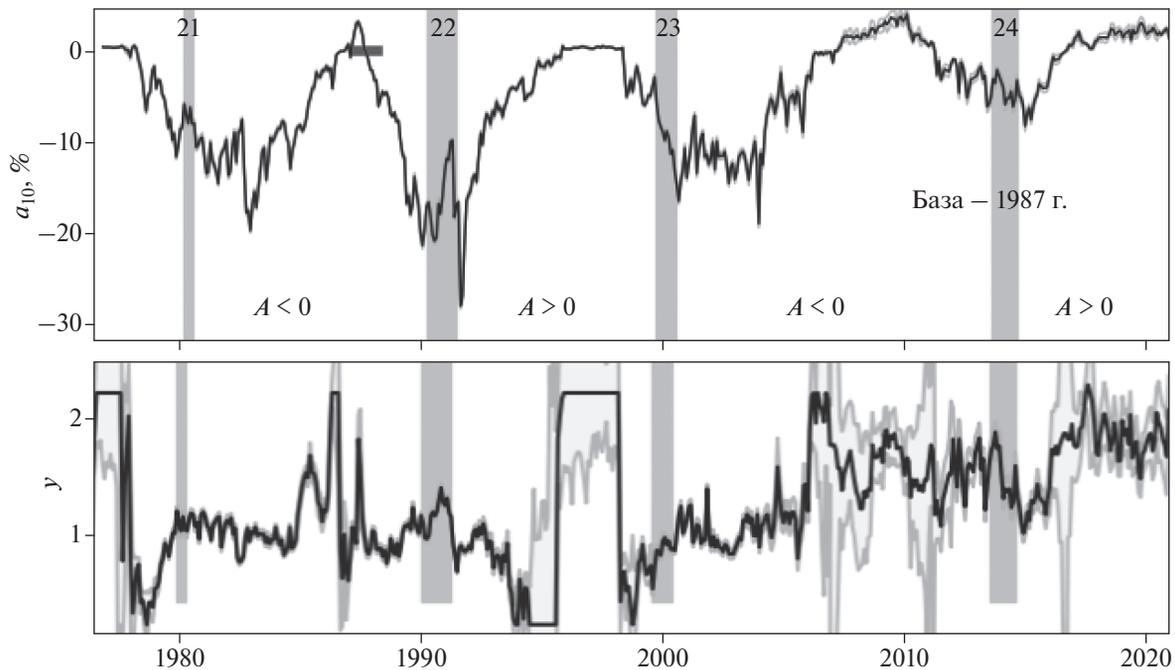


Рис. 3. Временные изменения вариаций КЛ a_{10} и показателя спектра γ (черные кривые) со стандартной статистической ошибкой (серые) для 1976–2020 гг.

жалению, данные по большой энергии имелись только до середины 2020 г., а данные по малым энергиям в данной работе не рассматриваются. Поэтому приведенные результаты следует считать предварительными и их стоит дополнить и уточнить в будущем.

Если при получении вариаций с помощью метода ГСМ для жесткостей 5, 10, 20 ГВ точность результатов в минимуме 24/25 определяется адекватностью используемой модели вариаций КЛ, то для многих отдельных работающих станций КЛ при определении точности необходимо учитывать спорадические изменения эффективности и дрейф данных регистрации КЛ. Вопрос о долгосрочной стабильности детекторов подробно изложен в работе [Белов и др., 2007], выводы которой подтверждаются здесь и говорят о преимуществах использования при исследовании долгосрочных вариаций модельного подхода для определения спектральных характеристик.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПИСАНИЯ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ВАРИАЦИЙ КЛ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ, ОСНОВАННОЙ НА СОЛНЕЧНО-ГЕЛИОСФЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ

Для моделирования вариаций КЛ электромагнитными полями гелиосферы нами предложена полуэмпирическая многопараметрическая модель [Белов и др., 2002; Белов и Гушина, 2018], в которой долгопериодная модуляция КЛ описы-

вается вышеперечисленными характеристиками $hcst$, B_{ss} , H_{pol} , $CMEi$ и A_i с детальным обоснованием их выбора. Для этих индексов и амплитуд изотропной части вариаций КЛ с жесткостью 5, 10, 20 ГВ a_5 , a_{10} , a_{20} (% к базе 01–12.1987 г.) выполнен многопараметрический регрессионный анализ с учетом запаздывания для каждого модуляционного параметра и выявлена роль каждого из них в модуляции КЛ в 1991–1999, 2000–2013 и 2014–2020 гг. Отметим: учет влияния 22-летнего цикла полярного поля Солнца H_{pol} на плотность КЛ выполнен с помощью введения поправки в амплитуду вариаций $a_{H_{pol}}$ (возможность такой процедуры показана в работе [Belov et al., 2017]). Для скорректированных вариаций $a_{H_{pol}}$ выполнена многопараметрическая линейная аппроксимация вариаций КЛ. В дальнейшем предполагается использовать характеристику полярного поля Солнца H_{pol} при построении модели модуляции как отдельный солнечный индекс, учитывая результаты работы [Krainev et al., 2021]. В качестве модуляционной характеристики гелиосферного поля в модели вместо ММП (B_{inf}), используется поле на поверхности источника солнечного ветра B_{ss} , так как ранее в работе [Belov et al., 1999] было показано, что замена в эмпирической модели долгосрочных вариаций КЛ модуля межпланетного магнитного поля у Земли B_{inf} на величину среднего магнитного поля на поверхности источника солнечного ветра B_{ss} не только возможна, но даже улучшает качество модели.

Таблица 2. Вклады в модуляцию от воздействия различных солнечно-гелиосферных характеристик для частиц с $R = 5, 10, 20$ ГВ

R, ГВ	период/индексы	Вклады, %			
		A_l	B_{ss}	$CMEi$	$hcst$
5	4.1991–7.1999 гг.	5.0	–5.1	–3.6	–11.7
10	4.1991–7.1999 гг.	3.0	–4.0	–2.7	–5.3
20	4.1991–7.1999 гг.	0.8	–2.2	–1.9	–1.6
5	5.2000–7.2013 гг.	–1.5	–16.2	–3.9	–8.8
10	5.2000–7.2013 гг.	–0.9	–9.2	–1.8	–2.8
20	5.2000–7.2013 гг.	–0.4	–5.2	–1.1	0.2
5	8.2014–10.2020 гг.	1.7	–6.4	–3.4	–5.3
10	8.2014–10.2020 гг.	–0.5	–1.9	–3.0	–1.2
20	8.2014–10.2020гг.	–0.2	–1.0	–1.2	0.7

Модуляцию 24/25-го цикла $A > 0$ мы сравниваем с модуляцией в предыдущих циклах 22/23 и 23/24, т.е. в цикле с совпадающим знаком A в минимуме SA (22/23) и соседним минимумом, когда $A < 0$, чтобы сравнить зависимость модуляции частиц разных жесткостей от направления глобального магнитного поля Солнца.

В результате модельного описания вариаций КЛ, проведенного отдельно для вариаций a_5, a_{10}, a_{20} для трех периодов, получены: коэффициент корреляции (ρ), среднеквадратичное отклонение модели (σ), регрессионные характеристики (k) и времена запаздывания вариаций КЛ относительно индексов SA ($t_{зап}$). Совокупность используемых индексов хорошо воспроизводит наблюдаемые вариации (при описании модуляции в анализируемых периодах $\rho = 0.96–0.98$, среднеквадратичное отклонение 0.34–2.43, %); 24-й цикл отличается исключительно слабой модуляцией КЛ; ниже рассмотрены возможные причины такой модуляции КЛ с количественными оценками вклада (табл. 2) в наблюдаемую модуляцию КЛ различных характеристик солнечной деятельности в период 2014–2020 гг. ($A > 0$) и выполнено сравнение с вкладами в 1991–1999 гг. ($A > 0$) и 2000–2013 гг. ($A < 0$).

Соответствующая модель для выбранных характеристик имеет вид:

$$\alpha(t) = k_0 + k_{hcst} \frac{\sum_{\tau=0}^{\tau_{hcst}} [1 + \alpha_{H_{pol}} H_{pol}(t - \tau)] hcst(t - \tau)}{\tau_{hcst} + 1} +$$

$$+ k_{CMEi} \frac{\sum_{\tau=0}^{\tau_{CMEi}} CMEi(t - \tau)}{\tau_{CMEi} + 1} + k_{A_l} \frac{\sum_{\tau=0}^{\tau_{A_l}} A_l(t - \tau)}{\tau_{A_l} + 1} +$$

$$+ k_{B_{ss}} \frac{\sum_{\tau=0}^{\tau_{B_{ss}}} B_{ss}(t - \tau)}{\tau_{B_{ss}} + 1} + k_{H_{pol}} \frac{\sum_{\tau=0}^{\tau_{H_{pol}}} H_{pol}(t - \tau)}{\tau_{H_{pol}} + 1}.$$

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наблюдаемые и ожидаемые вариации КЛ в анализируемых периодах 1991–1999, 2000–2013, 2014–2020 гг. в циклах SA с определенной полярностью глобального магнитного поля Солнца и вклады в модель модуляции от изменений солнечно-гелиосферных характеристик представлены на рис. 4 и в табл. 2. Анализируя полученные результаты моделирования, отметим: в период 1991–1997 гг. $A > 0$ для $R = 5$ ГВ определяющая роль в создании модуляции по величине вклада (11.7%) принадлежит наклону токового слоя $hcst$. На уменьшение влияния угла наклона $hcst$ на модуляцию КЛ и снижение эффективности его воздействия было обращено внимание ранее в работе [Гушина и др., 2014] в период слабой модуляции КЛ, но отмеченное уменьшение влияния $hcst$ относилось к частицам с $R = 10$ ГВ и к периоду, когда $A < 0$. Здесь же эффективность могла измениться по двум причинам: направление глобального поля Солнца $A > 0$ и малая энергия частиц. Для $R = 10$ ГВ и $R = 20$ ГВ для периода 1991–1997 гг. вклады в модуляцию от действия $hcst$ и B_{ss} отличаются незначительно. Для периода 2000–2013 гг. $A < 0$ модуляция КЛ преимущественно определяется изменением характеристики B_{ss} (среднее магнитное поле на поверхности источника солнечного ветра) для всего жесткостного интервала. Для периода 2014–2020 гг. $A > 0$ основную роль в создании модуляции КЛ для $R = 5$ ГВ играют вклад среднего магнитного поля B_{ss} (6.4, %) и наклон токового слоя $hcst$ (5.3, %) с близкими значениями величин вкладов в модуляцию КЛ. Для частиц с жесткостями 10 и 20 ГВ при общей малой амплитуде вариаций в этот период вклад от влияния $CMEi$ индекса на модуляцию несколько превышает вклады в модуляцию от других характеристик (что может быть связано с увеличением величины $CMEi$ -индекса в конце 2014 и в 2015 г.).

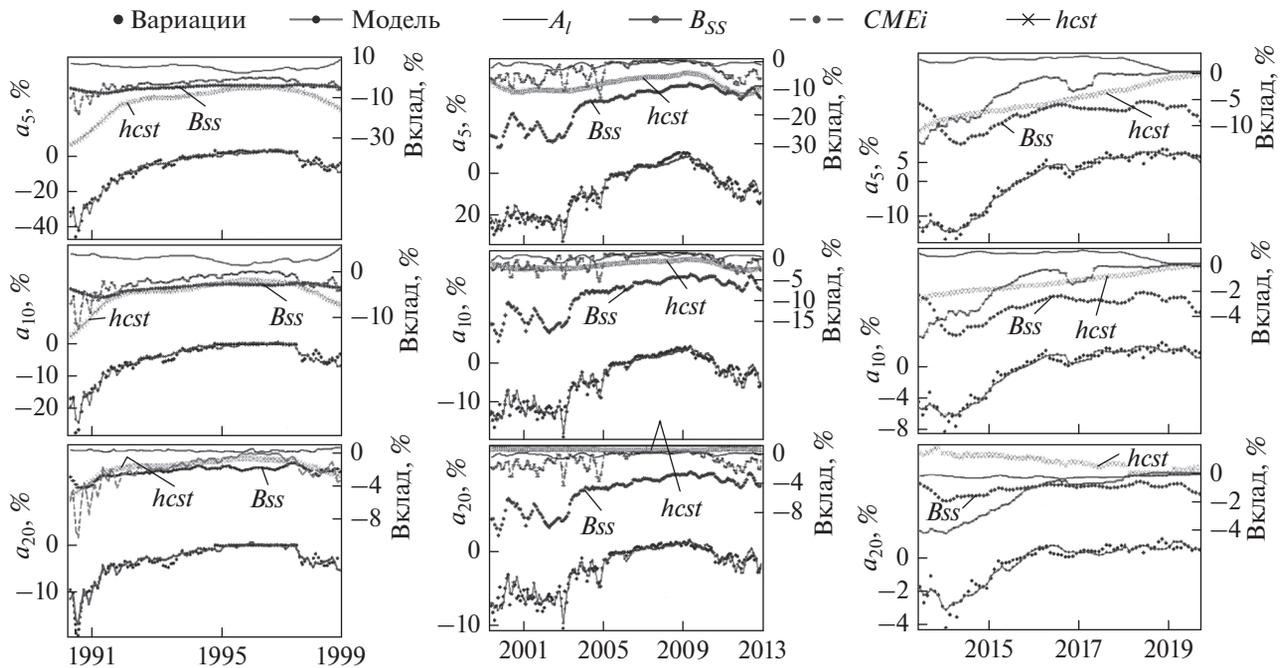


Рис. 4. a_5 , a_{10} , a_{20} (левая шкала – % к 1987 г.) – вариации плотности КЛ с жесткостью 5, 10, 20 ГВ (точки, в нижней части рисунков) и результат их моделирования (сплошная кривая); верхняя часть рисунков – вклад от изменений: наклона $hcst$ (крестики), среднего магнитного поля Солнца B_{ss} (ромбики), $CMEi$ -индекса (пунктир) и площади приэкваториальных корональных дыр A_1 (сплошная тонкая); правая шкала – вклад в полную модуляцию в % от действия вышеперечисленных индексов СА в периоды: 1991–1999 гг. (левый столбик), 2000–2013 гг. (в центре) и в 2014–2020 гг. (правый столбик).

Модуляция КЛ в 24-м и начале 25-го циклов СА, самая слабая (по сравнению с другими циклами) за время наблюдения КЛ, что должно объясняться разным 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 [Potgieter, 2013; Belov et al., 2017]. Токовый слой – самая большая магнитная неоднородность в гелиосфере, с которой взаимодействуют КЛ, место наиболее эффективного дрейфа. Сравнивая модуляцию частиц разной энергии в периоды с одинаковым направлением глобального магнитного поля, отметим: в минимуме СА значения $hcst$ падают (от 9.3° в минимуме 22/23 до 6.6° в период минимума 24/25), что может отразиться на эффекте дрейфа при распространении КЛ.

Выше подробно сказано о различии величин вклада в модуляцию от воздействия солнечно-гелиосферных индексов на частицы с жесткостью 5, 10, 20 ГВ в периоды разного направления глобального поля Солнца. В представленной модели модуляции вклад в общую модуляцию от эффекта дрейфа КЛ в 24-м цикле ниже. В работе [Modzelewska et al., 2019] получена значительно мень-

шая величина эффекта дрейфа в 24-м цикле СА по сравнению с начавшимся 24/25 минимумом 24/25 (2017–2018 гг.). В модели модуляции для периода 2000–2013 гг. $A < 0$ упомянутое выше преобладание вклада от воздействия на КЛ крупномасштабного магнитного поля на Солнце, которое выражено в предложенной модели в величине индекса B_{ss} , может говорить (с учетом связи B_{inf} и B_{ss}) о возрастании роли диффузии КЛ при распространении в гелиосфере с пониженным ММП [Калинин и др., 2017]. Преобладание процесса диффузии в модуляции КЛ при $A < 0$ (в нашем анализе период 2000–2013 гг.) подтверждают также результаты работы [Modzelewska et al., 2019], вывод которой сделан из анализа 22-летней периодичности анизотропии потока КЛ.

6. ВЫВОДЫ

Выполнен анализ вариаций КЛ, полученных с помощью ГСМ и многопараметрической модели жесткостной зависимости в периоды, близкие к минимумам 20–24 циклов СА для частиц с жесткостями $R = 5, 10, 20$ ГВ. Показаны особенности восстановленных потоков частиц в периоды низкой СА, отличающихся высотой и временем достижения максимума для анализируемых жесткостей. Особо отмечаются вариации в двух послед-

них минимумах СА, указывающих на аномально большое возрастание потоков плотности КЛ (особенно для малых энергий) как ответ космического излучения на начавшееся в конце 22-го цикла СА ослабление магнитного поля на Солнце и изменений солнечно-гелиосферных характеристик, ответственных за модуляцию КЛ. В последнем минимуме СА (2019 г.) вариации КЛ имеют очень мягкий жесткостной спектр.

Проведенное исследование говорит о преимуществах использования глобально-спектрографического метода и модельного подхода при исследовании долговременных вариаций для определения спектральных характеристик, а не данных регистрации КЛ на отдельных станциях.

В последние 15 лет наблюдается общее существенное смягчение спектра вариаций КЛ.

Сравнение модуляции в 24/25-м цикле ($A > 0$) с модуляцией в предыдущих циклах 22/23 и 23/24-м, т.е. в цикле с совпадающим знаком A в минимуме СА (22/23) и соседним минимумом, когда $A < 0$, выявило зависимость модуляции частиц анализируемых жесткостей ($R = 5, 10, 20$ ГВ) от направления глобального магнитного поля Солнца.

В результате модельного описания вариаций КЛ, проведенного отдельно для вариаций a_5, a_{10}, a_{20} для трех периодов с разным направлением глобального магнитного поля Солнца, впервые определены вклады в модель модуляции от изменений солнечно-гелиосферных характеристик и сделано предположение о роли процессов дрейфа, диффузии и корональных выбросов массы в создании наблюдаемой плотности космического излучения.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны коллективам мировой сети станций космических лучей, обеспечивающим данными непрерывной регистрации нейтронной компоненты: (http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/Our_Acknowledgment.pdf); благодарим базу данных NMDB (www.nmdb.eu). Работа базируется на экспериментальных данных УНУ “Российская национальная сеть станций космических лучей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А.В., Гущина Р.Т., Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д., Янке В.Г. Связь долговременной модуляции космических лучей с характеристиками глобального магнитного поля Солнца // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 42. № 6. С. 727–735. 2002.
- Белов А.В., Гущина Р.Т., Ерошенко Е.А., Юдахин К.Ф., Янке В.Г. Оценка долговременной стабильности детекторов глобальной сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 47. № 2. С. 267–271. 2007. <https://doi.org/10.1134/S0016793207020144>

— Белов А.В., Гущина Р.Т., Янке В.Г. Вклад изменений различных солнечных индексов в циклах 20–23 и 24 в модуляцию космических лучей // Известия РАН. Сер. физ. Т. 81. № 2. С. 165–169. 2017. <https://doi.org/10.3103/S1062873817020101>

— Белов А.В., Гущина Р.Т. Индекс долговременного влияния спорадической солнечной активности на модуляцию космических лучей // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 1. С. 3–10. 2018. <https://doi.org/10.7868/S0016794018010030>

— Гущина Р.Т., Белов А.В., Янке В.Г. Спектр долгопериодных вариаций в минимуме солнечной активности 2009 г. // Известия РАН. Сер. физ. Т. 77. № 5. С. 577–580. 2013. <https://doi.org/10.7868/S0367676513050244>

— Гущина Р.Т., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Обридко В.Н., Паорис Е., Шельтинг Б.Д. Модуляция космических лучей на фазе роста солнечной активности 24-го цикла // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 54. № 4. С. 470–476. 2014. ISSN: 0016-7940

— Гущина Р.Т., Белов А.В., Тлатов А.Г., Янке В.Г. Корональные дыры в долговременной модуляции космических лучей // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 56. № 3. С. 275–282. 2016. <https://doi.org/10.7868/S0016794016030068>

— Калинин М., Базилевская Г., Крайнев М., Свирижевская А., Свирижевский Н., Стародубцев С. Модуляция галактических космических лучей в солнечных циклах 22–24: анализ и физическая интерпретация // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 57. № 5. С. 592–601. 2017. <https://doi.org/10.7868/S001679401705011>

— Крымский Г.Ф., Алтухов А.М., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А., Скрипин Г.В., Чирков Н.П. Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 6. № 6. С. 991–996. 1966.

— Belov A.V., Veselovsky I.S., Gushchina R.T., Dmitriev A.V., Panassenko O.V., Suvorova A.V., Yanke V.G. Relation of the long time galactic cosmic rays variations with the magnetic field on the Sun and in the solar wind // Izvestia RAN. Ser. Phys. V. 62. № 8. P. 1606–1610. 1999.

— Belov A.V., Shelting B.D., Gushchina R.T., Obriдко V.N., Kharshiladze A.F., Yanke V.G. Global magnetic field of the Sun and long term variations of galactic cosmic rays // J. Atmos. Terr. Phys. V. 63. № 18. P. 1923–1929. 2001. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00073-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00073-6)

— Belov A.V., Dorman L.I., Gushchina R.T., Obriдко V.N., Shelting B.D., Yanke V.G., Prediction of expected global climate change by forecasting of galactic cosmic ray intensity time variation in near future based on solar magnetic field data // Adv. Space Res. V. 35. № 3. P. 491–495. 2005.

— Belov A.V., Gushchina R.T., Yanke V.G. Contributions from changes in various solar indices in cycles 20–23 and 24 to the modulation of cosmic rays // Bull. RAS: Physics. V. 81. № 2. P. 146–150. 2017. <https://doi.org/10.3103/S1062873817020101>

— Forbush S.E. World wide cosmic ray variations, 1937–1952 // J. Geophys. Res. V. 59. P. 525–542. 1954.

— Fu Shuai, Zhang Xiaoping, Zhao Lingling, Li Yong. Variations of the galactic cosmic rays in the recent solar cycles // Astrophys. J. Suppl. S. V. 254:37 (12pp). № 2. 2021. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/abf936>

- *Heber B., Belov A.V., Raviart A., Paizis C., Eroshenko E.A., Yanke V., Droge W., Green G., Rohrs K.* Latitudinal and radial variation of >2 GeV/n protons derived by UlyssesCO-SPIN/KET and neutron monitor network observations // Proc. 25th ICRC. Durban. V. 2. P. 85–88. 1997.
– <http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/>
– <http://wso.stanford.edu/>
– https://sites.lebedev.ru/ru/DNS_FIAN
- *Krainev M., Kalinin M., Aslam O.P.M., Ngobeni D., Potgieter M.* On the dependence of maximum GCR intensity on heliospheric factors for the last five sunspot minima // Adv. Space Res. V. 68. № 7. P. 2953–2962. 2021.
- *Modzelewska R., Iskra K., Wozniak W., Siluszyk M., Alania M.V.* Features of the galactic cosmic ray anisotropy in solar cycle 24 and solar minima 23/24 and 24/25 // Solar Phys. V. 294. № 148. P. 1–16. 2019.
<https://doi.org/10.1007/s11207-019-1540-5>
- *Obridko V.N., Shelting B.D.* Structure of the heliospheric current sheet as considered over a long time interval (1915–1996) // Solar Phys. V. 184. № 1. P. 187–200. 1999.
- *Potgieter M.* Solar Modulation of Cosmic Rays // Living Rev. Solar Phys. V. 10. № 3. 2013.
<https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-3>
- *Reinecke J.P., Potgieter M.S.* An explanation for the difference in cosmic ray modulation at low and neutron monitor energies during consecutive solar minimum periods // J. Geophys. Res. V. 99. № A8. P. 14761–14768. 1994.
<https://doi.org/10.1029/94JA00792>