

УДК 524.1-352

ОБ ОСТАТОЧНОЙ МОДУЛЯЦИИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ГЕЛИОСФЕРЕ

© 2023 г. В. Г. Янке¹, *, А. В. Белов¹, Р. Т. Гущина¹, П. Г. Кобелев¹, Л. А. Трефилова¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Россия
*yanke@izmiran.ru

Поступила в редакцию 26.02.2022 г.

После доработки 10.06.2022 г.

Принята к публикации 18.07.2022 г.

Исследована остаточная модуляция галактических космических лучей и ее энергетическая зависимость по данным трех типов наземных детекторов и по данным PAMELA, AMS-02 и Voyager 1/2. Получены количественные оценки остаточной модуляции в диапазоне жесткостей 4–41 ГВ. Показано, что остаточная модуляция примерно такая же по величине, как и модуляция, обусловленная циклом солнечной активности, что позволяет сделать некоторые выводы о модуляционных процессах в гелиосфере. Получен энергетический спектр остаточной модуляции. Проведено сравнение с результатами других авторов.

DOI: 10.31857/S0023420622060115, EDN: FHUEXI

1. ВВЕДЕНИЕ

Точные измерения спектра галактических космических лучей (ГКЛ) на орбите Земли с помощью космических экспериментов PAMELA [1] и AMS-02 [2], а в последующем и измерения межзвездного спектра на границе гелиосферы с помощью Voyager 1/2 [3] стали мощным стимулом для детального изучения модуляции КЛ в гелиосфере. Измерения на космических аппаратах PAMELA и AMS-02 проводятся в широком диапазоне жесткостей достаточно продолжительное время. Их совместное рассмотрение с наземными измерениями позволяет охватить 6 циклов солнечной активности с начала наземного мониторинга в 1950-х годах. В этом контексте рассмотрена проблема долговременной модуляции в гелиосфере, в частности, вопрос об остаточной модуляции космических лучей в периоды “спокойного” Солнца с целью понять и оценить модуляционные свойства гелиосферы.

Уже на раннем этапе исследований долговременных вариаций космических лучей ставился вопрос, насколько измеренная интенсивность в минимуме солнечной активности приближается к истинному значению интенсивности межзвездных космических лучей, т.е. есть ли еще остаточная модуляция, и какое может быть значение этой модуляции для частиц различных энергий.

Понятие остаточной модуляции введено еще в начале космической эры в связи с вопросом о размере гелиосферы [4], который в настоящее время практически решен экспериментально. Вопрос

об остаточной модуляции сегодня больше связан с ролью отдельных областей гелиосферы и с модуляционной эффективностью гелиосферы в целом. Если в минимуме солнечной активности гелиосфера полностью заполняется практически немодулированными галактическими космическими лучами, то соответственно, остаточная модуляция должна быть незначительной. Важна количественная оценка такой модуляции.

С появлением экспериментальных данных о межзвездном спектре космических лучей появилась возможность непосредственно вычислить остаточную модуляцию и, тем самым, оценить скрытые модуляционные возможности гелиосферы при спокойном Солнце.

Ретроспективно остаточная модуляция рассматривалась в работах [5, 6], которые базировались на объединенных данных наблюдений на нейтронном мониторе Climax и на космогенных данных изотопного ¹⁰Be метода.

Исследования остаточной модуляции важны для решения нескольких взаимосвязанных задач: определения динамики модуляции в гелиосфере “спокойного” Солнца, оценки эффективности гелиосферы в целом и отдельных ее областей, численной оценки остаточной модуляции, проверки различных моделей межзвездных спектров нуклонных компонент на низких энергиях.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение спектра остаточной модуляции относительно постоянного базового уровня, определяемого межзвездным спектром.

Решению такой задачи благоприятствуют несколько обстоятельств. Во-первых, это прецизионные и продолжительные измерения с помощью магнитного спектрометра AMS-02 в том числе, высокоэнергичной части спектра частиц. Во-вторых, это выход *Voyager-1* и *Voyager-2* [7] за пределы гелиосферы, что позволило получить более определенные знания о межзвездном спектре различных элементов в диапазоне нижних энергий. В-третьих, проведение с помощью магнитного спектрометра PAMELA измерений спектра космических лучей на орбите Земли в широком диапазоне жесткостей, которые удачно пришлись на период минимума 24-го цикла солнечной активности (2009 г.). Это позволило провести калибровку используемых наземных детекторов (нейтронных мониторов, мюонных телескопов и детекторов стратосферного зондирования заряженной компоненты), результатом мониторинга которых, как правило, являются только вариации космических лучей за пределами магнитосферы Земли.

Задача настоящей работы:

1) Экспериментально определить величину остаточной модуляции (например, для минимума солнечной активности 2009) для детекторов (нейтронные мониторы, мюонные телескопы, стратосферное зондирование) с различными эффективными жесткостями регистрируемых частиц.

2) Определить энергетический спектр остаточной модуляции.

3) На основе всех имеющихся к настоящему моменту данных оценить время задержки отклика космических лучей относительно начала длительного периода ослабления магнитного поля гелиосферы (например, для маундеровского периода).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

При выполнении работы использованы результаты мониторинга следующими детекторами:

Данные наземных детекторов на 1AU. Это данные мониторинга мировой сети нейтронных мониторов NM (<https://www.nmdb.eu/nest>, <http://cr0.izmiran.ru/common>), мюонных телескопов MT (<http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/Archives/GMDN.php>) и данные стратосферного зондирования ионизирующей компоненты SS (https://sites.lebedev.ru/ru/DNS_FIAN). По данным сети нейтронных мониторов NM проведен GSM анализ для частиц с жесткостью 10 ГВ [8], результатом которого является спектр вариаций космических лучей $v_{1AU}(R)$ за пределами магнитосферы Земли относительно базового периода (в нашем случае 2009 г.). Для других детекторов (MT и SS), также необходимо перейти к вариациям и выполнить переход за пределы магнитосферы на

основе приемных коэффициентов нулевой гармоники.

Для проведения калибровки всех привлекаемых детекторов необходимо определить эффективные жесткости. Непосредственные вычисления эффективных жесткостей трудоемки и дают неоднозначные результаты, особенно для заряженной компоненты. Нами экспериментально проведена оценка эффективной жесткости R_{eff} методом сравнения вариаций данного детектора с вариациями нейтронной компоненты той же эффективной жесткости [9].

Так, в области максимума каскадной кривой в атмосфере для заряженной компоненты при стратосферных измерениях эффективная жесткость $R_{eff} = 4 \pm 0.15$ ГВ для станции Апатиты, $R_{eff} = 4 \pm 0.1$ ГВ для станции Мирный и $R_{eff} = 5.8 \pm 0.2$ ГВ для станции Москва. Эффективная жесткость мюонной компоненты $R_{eff} = 41 \pm 2.5$ ГВ (вертикальная компонента Nagoya.V). Эффективная жесткость регистрируемых частиц наземной сети нейтронных мониторов $R_{eff} = 10$ ГВ. Результаты GSM анализа в работе [10] были объединены с данными сети ионизационных камер Форбуша с 1933 г. (IC + GSM) с учетом приемных коэффициентов нулевой гармоники мюонной компоненты.

Данные PAMELA для калибровки наземных детекторов. Для калибровки наземных детекторов и определения базовых значений интенсивности незаменимыми оказались данные магнитного спектрометра PAMELA (<https://www.ssdsc.asi.it/pamela>, <https://tools.ssdsc.asi.it/CosmicRays/chargedCosmicRays.jsp>) [11], период работы которого удачно пришелся на минимум 24-го цикла 2009 г. Для перехода к интенсивности космических лучей за пределами магнитосферы проведена калибровка детектора “сеть NM” по данным PAMELA за период 2009 г., т.е. вычислена интенсивность $J = J_{PAMELA}(v_{1AU} + 1)$, где все используемые величины зависят от жесткости частиц. Аналогичным образом проведена калибровка и других детекторов (MTиSS).

Долговременная стабильность магнитного спектрометра PAMELA и точность среднегодовых базовых значений интенсивности, как показано в работе [12], оказались достаточными для калибровки наземных детекторов. Кроме того, измерения магнитного спектрометра PAMELA перекрывают весь энергетический диапазон используемых нами детекторов. Можно было бы использовать результаты магнитных спектрометров стратосферного зондирования, но такие измерения проводятся только около 10 суток. Среднегодовые значения интенсивности по данным PAMELA для 2009 г. для различных R_{eff} приведены в табл. 1.

Данные LIS спектров. Определяющим для вычисления базовых значений интенсивности кос-

Таблица 1. Базовые (2009) значения интенсивности J_{1AU} , калиброванные по данным PAMELA и интенсивности J_{LIS} для различных R_{eff} , найденные по LIS спектрам

Модель спектра $p/(m^2 \text{ с ср ГВ})$	R_{eff} , ГВ						
	2.6	4.0 ± 0.1	5	5.8 ± 0.2	10 ± 0.3	20	41 ± 2.5
J_{1AU} (PAMELA, 2009)	579.0	250.0	149.9	106.0	26.9	4.18	0.57
J_{LIS} (C2016)	968.0	360.3	209.2	143.7	33.2	4.65	0.60
$\Delta = J_{1AU}/J_{LIS} - 1, \%$	-40.2	-30.6	-28.3	-26.2	-19.0	-10.1	-4.5
J_{LIS} (B2019)	1184.4	408.8	227.7	152.6	33.2	4.67	0.60
$\Delta = J_{1AU}/J_{LIS} - 1, \%$	-51.1	-38.8	-34.2	-30.5	-19.1	-10.4	-4.7
J_{LIS} (B2020)	1042.2	363.4	206.7	140.7	32.6	4.6	0.58
$\Delta = J_{1AU}/J_{LIS} - 1, \%$	-44.4	-31.2	-27.5	-24.7	-17.6	-9.3	-2.7
$\langle \Delta \rangle \pm (\text{sys}), \%$	-40 ± 0.3 ± 5	-30 ± 0.3 ± 4	-28 ± 0.3 ± 3	-26 ± 0.3 ± 3	-19 ± 0.4 ± 2	-10 ± 0.5 ± 2	-4.0 ± 0.7 ± 2

мических лучей за пределами гелиосферы для различных детекторов является локальный межзвездный спектр LIS. Существуют десятки моделей межзвездных спектров космических лучей, построенных при разных предположениях. Мы использовали только модели LIS, которые опирались на экспериментальные данные *Voyager-1* (<https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/science/data-access>, <https://voyager.jpl.nasa.gov>) для нижнего диапазона жесткостей (<1 ГВ) и AMS-02 (<https://lpsc.in2p3.fr/crdp>) для верхнего диапазона жесткостей (>100 ГВ). Модуляцией частиц верхнего диапазона жесткостей пренебрегалось, и поэтому можно было привлечь магнитные спектрометры на орбите Земли. Нами рассматривались следующие LIS спектры (в наших обозначениях): V2015, C2016, B2019 и B2020, согласно работам [13–16] соответственно.

На рис. 1 проведено сравнение двух моделей LIS жесткостных спектров C2016 [14] и B2019 [15] для протонов и ядер гелия. Показаны также экспериментальные данные *Voyager-1* и данные AMS-02high в верхней части спектра жесткостей, для которой модуляцией можно пренебречь. Для иллюстрации приведены также модулированные значения AMS-02 (<https://www.ssdsc.asi.it/ams>). На рис. 1 стрелками обозначены участки спектра, характерные для рассматриваемых нами детекторов – SS, GSM, MT. Важно, что интересующая нас область жесткостей находится в районе спектра, который получен интерполяцией, и в этой области можно ожидать больших неопределенностей. На нижней панели приведены отношения для спектров J_{C2016}/J_{B2019} и их зависимость от жесткости; невязка в крайних участках спектра достигает 10%. Значения интенсивностей J_{LIS} для различных значений R_{eff} по данным нескольких LIS спектров также приведены в табл. 1.

3. МЕТОД ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Вариации можно определить относительно выбранного базового периода интенсивности космических лучей $J_{Base} = J_{1AU}$ (обычно максимума интенсивности). В этом случае вариация определяется как

$$v = J/J_{1AU} - 1. \quad (1)$$

Напомним, что J это калиброванная интенсивность космических лучей за пределами магнитосферы.

Вариации можно определить также относительно немодулированной интенсивности локального межзвездного спектра J_{LIS}

$$v_{LIS} = J/J_{LIS} - 1. \quad (2)$$

В (1) и в (2) интенсивность определена для одной заданной жесткости частиц. Вариации v и v_{LIS} относительно разных баз можно связать методом преобразования баз.

Действительно, исключая J из (1) и (2), получим $J_{LIS}(v_{LIS} + 1) = J_{1AU}(v + 1)$.

Откуда

$$v_{LIS} = \frac{J_{1AU}}{J_{LIS}}(v + 1) - 1 = v + \Delta(1 + v), \quad (3)$$

где остаточная модуляция относительно LIS уровня определяется как

$$\Delta = J_{1AU}/J_{LIS} - 1. \quad (4)$$

Для частиц 10 ГВ (см. табл. 1) $\Delta = 26.9/33.2 - 1 = -19.0\%$.

Базовые значения для каждого детектора определялись как среднегодовые для 2009 г. Значения интенсивностей J_{1AU} и J_{LIS} для различных значений R_{eff} по данным нескольких LIS спектров приведены в табл. 1.

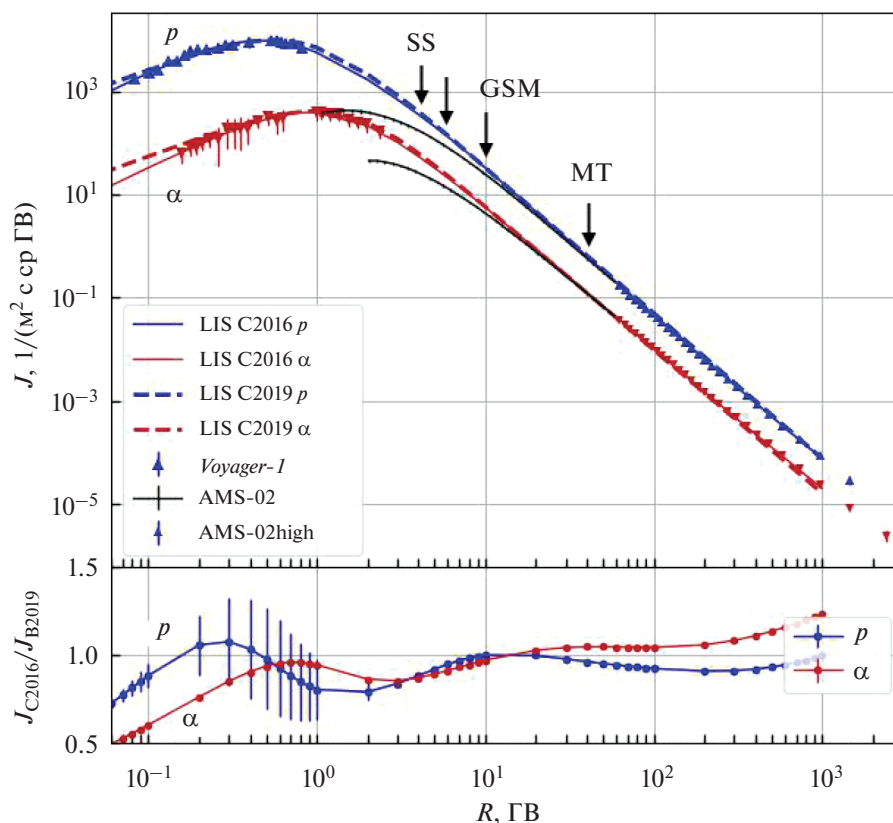


Рис. 1. Сравнение двух моделей LIS спектров C2016 [14] и B2016 [15] (верхние панели) и их отношения (нижние панели). Показаны также данные *Voyager-1* и AMS-02high, на основе которых спектры были получены.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основные результаты для различных R_{eff} и нескольких моделей LIS спектров сведены в табл. 1, в которой даны значения интенсивностей J_{LIS} и J_{LNU} и значения остаточной модуляции в соответствии с выражением (4).

Для двух типов детекторов остаточная модуляция показана также на рис. 2 и рис. 3. На каждом рисунке приведены временные изменения вариаций космических лучей относительно базового периода 2009 г. Для всех минимумов у кривых указаны относительные вариации (в данном случае относительно базового периода 2009 г.). Так, для эффективной жесткости 10 ГВ относительные вариации оцениваются в несколько процентов, что согласуется с работами [17, 18].

На рисунках показан также модуль остаточной модуляции Δ . Такие оценки проведены для нескольких моделей LIS спектров, как это следует из табл. 1, но на рис. 2 и рис. 3 приведен результат только для LIS спектра C2016 [14].

Анализ модуляции космических лучей в геиосфере показал, что даже в период наиболее спокойного Солнца (например, 2009 г.) остаточная модуляция существенна.

Так, для частиц с эффективной жесткостью 10 ГВ остаточная модуляция (последняя строка табл. 1 и рис. 2) достигает $|\Delta| = 19 \pm 0.4(\text{stat}) \pm 2(\text{sys})\%$, что примерно равно модуляции при переходе от минимума к максимуму солнечной активности. Для частиц с эффективной жесткостью 4.0 ГВ остаточная модуляция (последняя строка табл. 1 и рис. 3) достигает $|\Delta| = 30 \pm 0.3(\text{stat}) \pm 4(\text{sys})\%$, что также примерно равно модуляции при переходе от минимума к максимуму солнечной активности. Это справедливо для всех жесткостей. Так для максимальной рассматриваемой нами жесткости 41 ГВ (мюонный телескоп) в период спокойного Солнца остаточная модуляция космических лучей равна $|\Delta| = 4 \pm 0.7(\text{stat}) \pm 2(\text{sys})\%$, что также сравнимо с модуляцией от минимума к максимуму солнечной активности. Из этого следует, что Солнце в своей самой активной фазе способно модулировать космические лучи относительно спокойного периода так же, как спокойное Солнце способно модулировать локальный межзвездный спектр.

Полученные значения остаточной модуляции в широком диапазоне жесткостей позволяют сформировать энергетический спектр остаточной модуляции, который представлен на рис. 4.

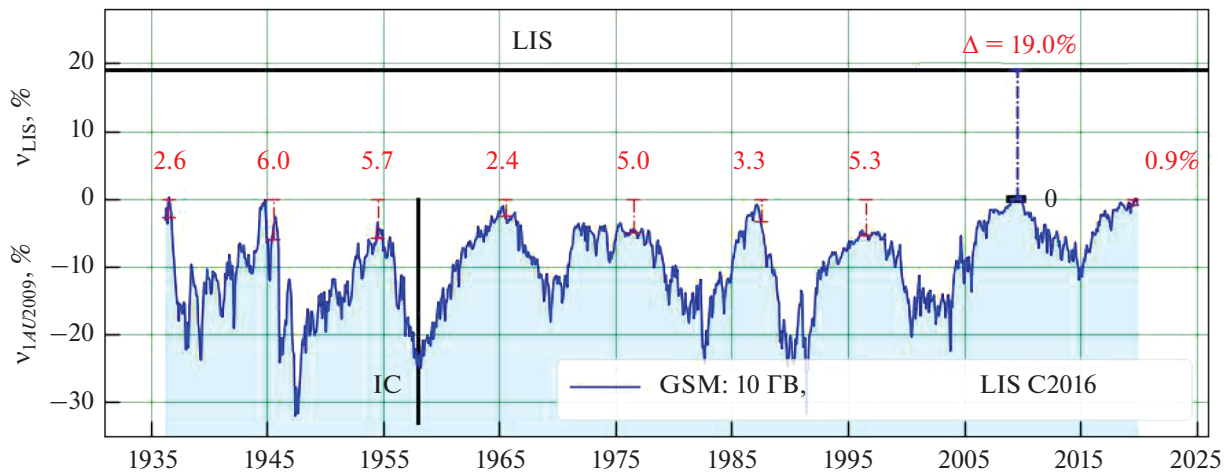


Рис. 2. Остаточная модуляция для эффективной жесткости 10 ГВ.

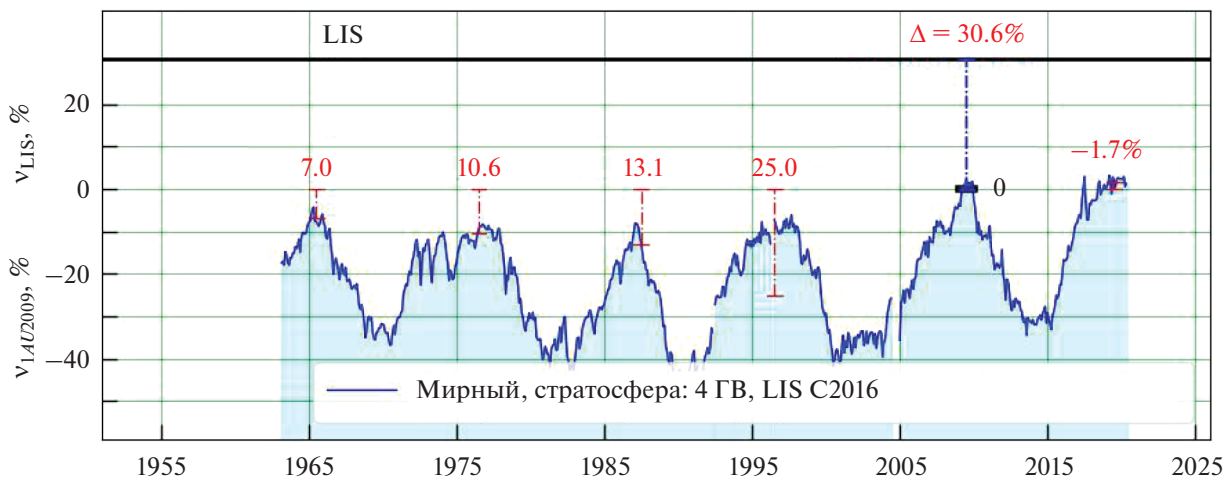


Рис. 3. Остаточная модуляция для эффективной жесткости 4 ГВ (стратосферные измерения, Мирный, Антарктида).

Легко видеть, что этот спектр степенной с переменным показателем, меняющимся от 1 до 2 для энергий от 4 до 40 ГэВ. Очень удачным может оказаться спектр вида $\Delta = \exp(-kR^\alpha)$.

Для жесткости 10 ГВ (нейтронные мониторы) для периода 2009 г. полученная нами оценка остаточной модуляции $19 \pm 2\%$ находится в согласии с работами [19]. Эти работы базировались на объединенных данных нейтронного монитора Climax с космогенными данными по изотопу ^{10}Be . Для современной эпохи авторами получено значение остаточной модуляции 18%, что отмечено нами на рис. 5. Совместные данные показывают, что остаточная модуляция в минимумах солнечных циклов неуклонно увеличивалась (т.е. интенсивность космических лучей уменьшилась) с 5% в минимуме Spörer в 15 веке до 18% в настоящее вре-

мя. Монотонный рост остаточной модуляции – постоянное свойство интенсивности галактических космических лучей на Земле на протяжении последних 400 лет. Это, видимо, свидетельствует о долгосрочном изменении магнитного поля на орбите Земли между 15-ым и 21-ым веком, которое, по оценке работы [19], увеличилось с 0.5 до 5 нТ. Это, к сожалению, зависимая оценка, поскольку она базировалась на данных об интенсивности космических лучей на орбите Земли. Такие результаты были получены также в работе [20].

Один из примеров возможного влияния внешних областей рассмотрен в работе [21], в которой приводятся аргументы в пользу гипотезы того, что в периоды низкой солнечной активности существенное влияние на галактические космические лучи оказывает так называемое внешнее электрическое поле гелиосферы, обусловленное

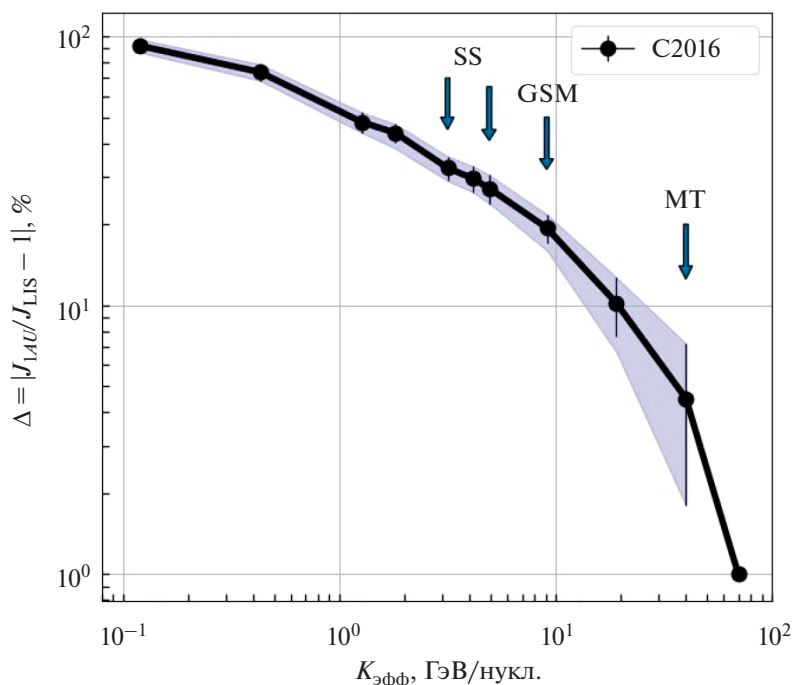


Рис. 4. Энергетический спектр остаточной модуляции для модели LIS спектра [14].

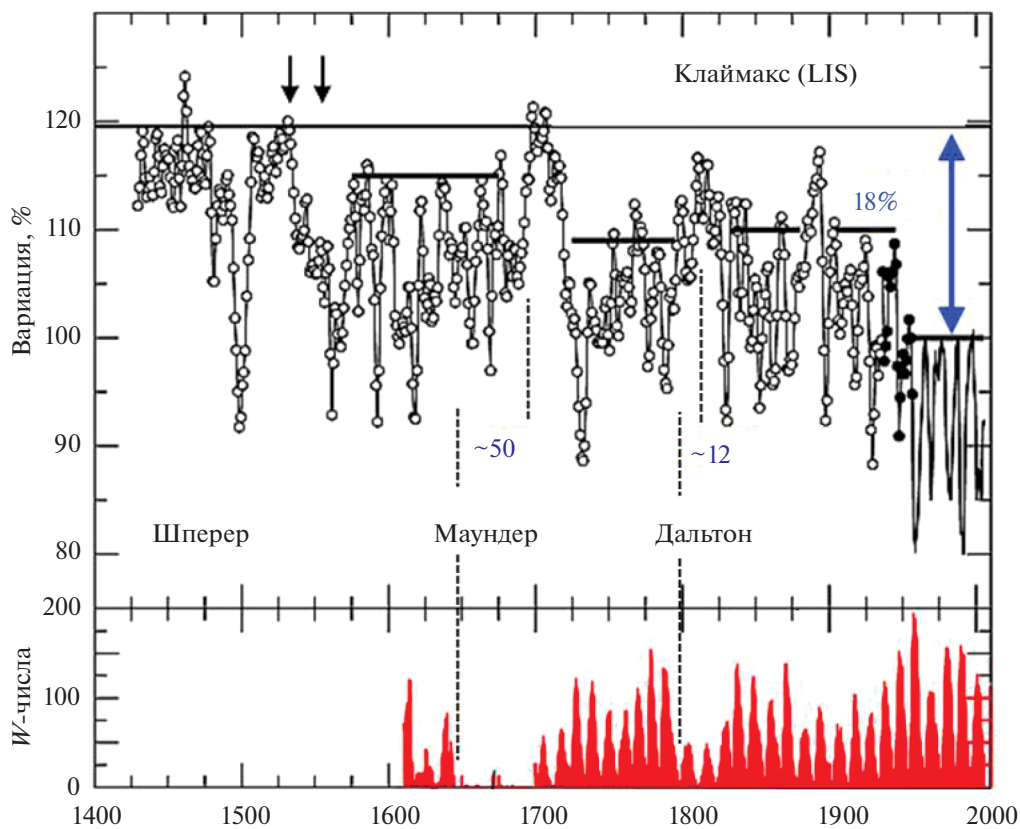


Рис. 5. Оцененные (1428–1954 гг.) и наблюдаемые (1951–2005 гг.) вариации нейтронной компоненты. Стрелки показывают интервал в 22 года [19]. Отмеченная нами задержка приведена в годах.

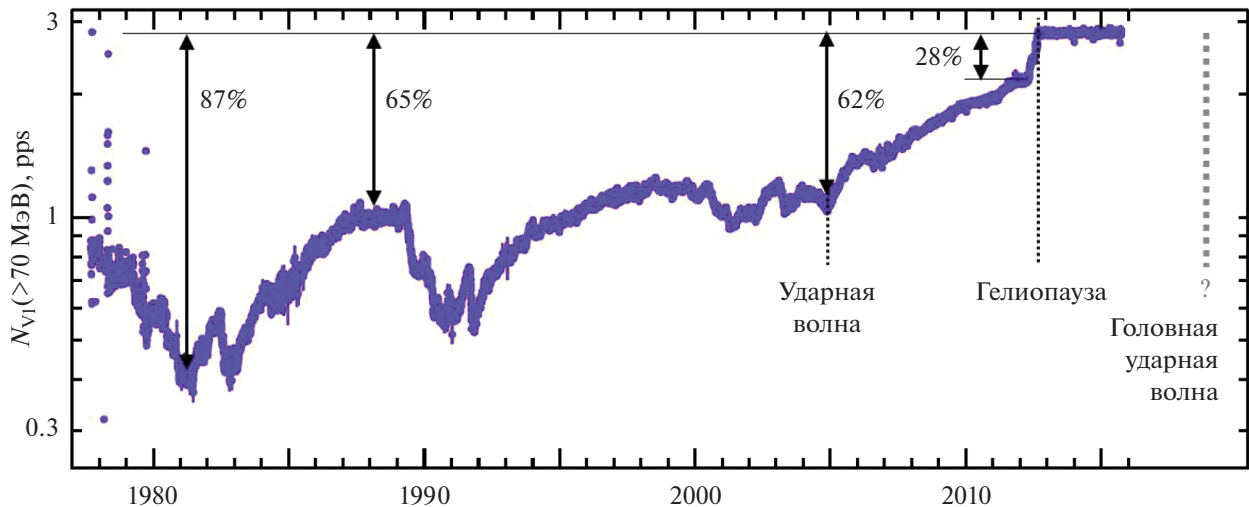


Рис. 6. Временная зависимость интенсивность частиц энергий >70 МэВ по данным *Voyager-1* [23]. Оценка остаточной модуляции в ключевых точках траектории *Voyager-1*.

крупномасштабной структурой объемных электрических зарядов внутри нее. Для учета этого предложено включить в рассмотрение дополнительную (так называемую внешнюю) модуляцию на пути из той области гелиосферы, где ГКЛ не модулированы, до ее границы. Граница модуляции должна охватывать все области пространства, где происходит какое-либо воздействие гелиосферных магнитных и электрических полей на ГКЛ.

Также не исключена возможность пересоединения высокоширотных силовых линий гелиомагнитосферы и галактического магнитного поля [22]. Там, где знаки полей противоположны, магнитное поле ослабевает, и наоборот.

Можно задаться вопросом об инерционности гелиосферы, т.е. о том, через какое время космические лучи межзвездного спектра заполняют всю гелиосферу после достижения солнечной активностью минимальных значений. Маундеровский минимум длился с 1645 по 1715 гг., а интенсивность космических лучей достигла LIS уровня [19] только через ~50 лет после начала маундеровского минимума, как это видно из рис. 5. Следовательно, солнечная система освобождается от влияния маундеровского минимума с задержкой в 50 лет. Минимум Дальтона длился с 1790 по 1830 гг., а интенсивность космических лучей достигла локального максимума примерно через 12 лет.

Исходя из значений остаточной модуляции, можно рассмотреть две возможности реализации радиальной зависимости коэффициента диффузии.

При активном Солнце, коэффициент диффузии $K \sim r$. Тогда модуляция $M \sim \ln(r)$ и при скорости солнечного ветра V_{SW} согласно модели Паркера градиент $dJ/dr = \frac{V_{SW}}{K_0} J(r) \propto r^{-1}$, т.е. модуля-

ция в основном происходит в ближней гелиосфере. При спокойном Солнце коэффициент диффузии $K = const$. Тогда модуляция линейна $M \sim r$ и $\text{grad}(J) \approx 1\%/AU$. Модуляция происходит во всей гелиосфере, и, следовательно, вычисленная остаточная модуляция реально достижима.

Но происходит ли остаточная модуляция во всей гелиосфере? Прямые измерения *Voyager-1* и *-2* свидетельствуют о том, что большая часть остаточной модуляции происходит между ударной волной, ограничивающей сверхзвуковое течение солнечного ветра, и гелиопаузой. Это видно на рис. 6, где приведена скорость счета канала с преобладанием протонов >70 МэВ (с некоторой долей электронов с энергией >15 МэВ) по маршруту *Voyager-1* [23]. Видно, что модуляция за ударным фронтом сравнима с модуляцией от максимума к минимуму в 80-е годы. На это есть теоретические соображения: за фронтом ударных волн возмущенность среды увеличивается, происходит более сильное рассеяние и, значит, более сильная модуляция.

ВЫВОДЫ

1) Анализ модуляции космических лучей в гелиосфере показал, что даже в период спокойного Солнца (2009) остаточная модуляция существенна для всего диапазона рассматриваемых жесткостей:

$\Delta = 30 \pm 0.3(\text{stat}) \pm 4(\text{sys})\%$ для частиц 4.0 ГВ (высокоширотные стратосферные измерения); $\Delta = 19 \pm 0.4(\text{stat}) \pm 2(\text{sys})\%$ для частиц 10 ГВ (нейтронные мониторы, GSM) и $\Delta = 4 \pm 0.7(\text{stat}) \pm 2(\text{sys})\%$ для эффективной жесткости 41 ГВ (мюонный телескоп Nagoya.V).

2) Энергетический спектр остаточной модуляции — степенной с переменным показателем

спектра, меняющимся от -1 до -2 для энергий от 4 до 40 ГэВ.

3) Солнце в своей активной фазе способно модулировать космические лучи относительно спокойного периода, создавая модуляцию до 30%. Солнце в своей спокойной фазе модулирует локальный межзвездный спектр, создавая, примерно, такую же модуляцию в $(19 \pm 2)\%$. Прямые измерения *Voyager-1* и *-2* свидетельствуют о том, что остаточная модуляция формируется во всей внешней гелиосфере, однако большая ее часть происходит между ударной волной, ограничивающей сверхзвуковое течение солнечного ветра, и гелиопаузой.

4) Полученная в работе остаточная модуляция $19 \pm 2.4\%$ для жесткости 10 ГВ находится в хорошем согласии с работой [19], которая базировалась на объединенных современных данных нейтронного монитора Climax и на космогенных данных по изотопу ^{10}Be . Для современной эпохи авторами получена оценка остаточной модуляции в 18%, которая приближается к нулю в маундеровский период. Время задержки отклика космических лучей с жесткостью 10 ГВ относительно начала маундеровского минимума около 50 лет.

Авторы благодарны коллективам мировой сети станций космических лучей, обеспечивающим данные непрерывной регистрации нейтронного компонента: 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

1. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevska G.A. et al.* Time Dependence of the Proton Flux Measured by PAMELA during the 2006 July–2009 December Solar Minimum // *ApJ*. 2013. V. 765. № 2. P. 91–100. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/765/2/91>
2. *Aguilar M., Cavazonza L. Ali, Alpat B. et al.* (AMS-02 Collaboration) “Observation of the Identical Rigidity Dependence of He, C, and O Cosmic Rays at High Rigidities by the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station” // *Phys. Rev. Lett.* 2018. 121, 051101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.251101>
3. *Stone E.C., Vogt R.E., McDonald F.B., Teegarden B.J., Trainor J.H., Jokipii J.R., Webber W.R.* Cosmic ray investigation for the Voyager missions: energetic particle studies in the outer heliosphere—and beyond // *Space Sci. Rev.* 1977. 21, 355–376.
4. *Nagashima K., Morishita I.* Long term modulation of cosmic rays and invariable electromagnetic state in solar modulating region // *Planet. Space Sci.* 1980. V. 28. № 2. P. 177–194. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(80\)90094-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(80)90094-X)
5. *McCracken K.G.* Long Term Changes in the Residual Modulation of the Galactic Cosmic Radiation. Proc. 30th ICRC, Mexico, July 3–11 2007.
6. *McCracken K.G., Beer J.* Long-term changes in the cosmic ray intensity at Earth // *J. Geophys. Res. Atmospheres*. 2007. V. 112. Iss. A10. Art. No. A10101. <https://doi.org/10.1029/2006JA012117>
7. *Stone E.C., Cummings A.C., Heikkila B.C. et al.* Cosmic ray measurements from Voyager 2 as it crossed into interstellar space // *Nat Astro.* 2019. V. 3. P. 1013–1018. <https://doi.org/10.1038/s41550-019-0928-3>
8. *Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г. и др.* Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2018. Т. 58. № 3. С. 374–389. <https://doi.org/10.7868/S0016794018030082>
9. *Yanke V.G., Belov A.V., Gushchina R.T., Zirakashvili V.N.* The rigidity spectrum of the long-term cosmic ray variations during solar activity cycles 19–24. Proc. 26th Extended ECRS + 35th RCRC, Salt Lake City, USA // *J. Physics: Conference Series*. 2019. V. 1181. P. 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1181/1/012007>
10. *Belov A.V., Gushchina R.T., Oleneva V.A., Yanke V.G.* Large scale modulation: view from the Earth points // *Physics of Atomic Nuclei*. 2021. V. 84. № 6. P. 40–51. <https://doi.org/10.1134/S1063778821130056>
11. *Maurin D., Dembinski H., Gonzalez J. et al.* Cosmic-ray database update: ultra-high energy, ultra-heavy, and antinuclei cosmic-ray data (CRDB v4.0) // *Universe*. 2020. V. 6. № 8. <https://doi.org/10.3390/universe608010005>
12. *Белов А.В., Гущина Р.Т., Шлык Н.С., Янке В.Г.* Сравнение долговременных изменений потока космических лучей по данным сети наземных детекторов PAMELA и AMS-02 // *Изв. РАН. сер. физ.* 2021. Т. 85. № 9. С. 1347–1350. <https://doi.org/10.31857/S0367676521090040>
13. *Vos E.E., Potgieter M.S.* New Modeling of Galactic Proton Modulation during the Minimum of Solar Cycle 23/24 // *Astrophys. J.* 2015. V. 815. P. 119. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/815/2/119>
14. *Corti C., Bindi V., Consolandi C., Whitman K.* Solar modulation of the local interstellar spectrum with Voyager 1, AMS-02, PAMELA and BESS // *Astrophys. J.* 2016. V. 829. P. 8–17. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/829/1/8>
15. *Bischoff D., Potgieter M.S., Aslam O.P.M.* New very local interstellar spectra for electrons, positrons, protons and light cosmic ray nuclei // *Astrophys. J.* 2019. V. 878. № 1. P. 59–67. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab1e4a>
16. *Boschini M.J., Della Torre S., Gervasi M. et al.* Inference of the Local Interstellar Spectra of Cosmic Ray Nuclei $Z \leq 28$ with the GALPROP–HELMOD Framework // *Astrophys. J.* 2020. V. 250. № 2. P. 27–57. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/aba901>
17. *Thomson D.M.* The residual cosmic ray modulation at the 1954 solar minimum // *Planetary and Space Sci.*

- ence. 1972. V. 20. № 12. P. 2196–2197.
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(72\)90073-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(72)90073-6)
18. *Gushchina R.T., Belov A.V., Eroshenko E.A. et al.* Cosmic Ray Modulation during the Solar Activity Growth Phase of Cycle 24 // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014. V. 54. № 4. P. 430–436.
19. *McCracken K.G.* Heliomagnetic field near Earth, 1428–2005 // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P. A09106.
<https://doi.org/10.1029/2006JA012119>
20. *Caballero-Lopez R.A., Moraal H., McCracken K.G., McDonald F.B.* The heliospheric magnetic field from 850 to 2000 AD inferred from ^{10}Be records // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. P. A12102.
doi: 10:1029/2004JA010633
21. *Крайнев М.Б., Калинин М.С.* Аргументы в пользу влияния внешнего электрического поля гелиосферы на галактические космические лучи // *Изв. РАН. сер. физ.* 2003. Т. 67. № 10. С. 1439–1442.
22. *Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Мамрукова В.Н., Скрипин Г.В.* Эффекты взаимодействия гелиомагнитосферы с галактическим полем в космических лучах // *Геомагнетизм и Аэронамия*. 1981. Т. 21. № 5. С. 923–925.
23. *Cummings A.C., Stone E.C., Heikkila B.C. et al.* Galactic cosmic rays in the local interstellar medium: voyager 1 observations and model results // *The Astrophysical J.* 2016. 831 : 18 (21pp). № 1.
<https://doi.org/10.3847/0004-637X/831/1/18>