

МЕТОД ГЛОБАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ МИРОВОЙ СЕТИ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ

© 2018 г. А. В. Белов*, Е. А. Ерошенко**, В. Г. Янке,
В. А. Оленева, М. А. Абунина, А. А. Абуни

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

*e-mail: abelov@izmiran.ru

**e-mail: erosh@izmiran.ru

Поступила в редакцию 05.07.2017 г.

Приведено описание одного из вариантов метода глобальной съемки, который разработан и много лет применяется в ИЗМИРАН. С его помощью обработаны данные мировой сети нейтронных мониторов за каждый час с июля 1957 г. по настоящее время. Получен однородный непрерывный ряд ежечасных характеристик вариаций плотности и векторной анизотропии космических лучей с жесткостью 10 ГВ, на основе которых создана база данных Форбуш-эффектов в галактических космических лучах, обусловленных крупномасштабными возмущениями межпланетной среды за более чем полувековой период. Возможности базы данных позволяют проводить корреляционный анализ различных параметров космической среды (характеристики Солнца, солнечного ветра, межпланетного магнитного поля) с параметрами космических лучей и изучать их взаимосвязи в солнечно-земном пространстве. Рассмотрены особенности приемных коэффициентов для разных станций, позволяющих осуществлять переход от вариаций по наземным измерениям к вариациям первичных космических лучей. Оценены достоинства и недостатки данного варианта метода глобальной съемки и возможности его развития и улучшения. Разработанный метод позволяет свести к минимуму проблемы сети нейтронных мониторов и в значительной мере использовать ее преимущества.

DOI:

1. ВВЕДЕНИЕ

У наземных детекторов космических лучей (КЛ) множество достоинств. У них нет ограничений по весу и поэтому их нетрудно сделать большими по площади, они намного дешевле спутниковых детекторов, их легче контролировать и поддерживать в рабочем состоянии и т.д. Главная проблема любого наземного детектора и, в частности, нейтронных мониторов (НМ) в том, что, созданные для изучения вариаций первичных космических лучей, первичные КЛ они не регистрируют. Методом глобальной съемки мы называем методику, объединяющую одновременные наземные наблюдения космических лучей в разных точках и позволяющую получить основные характеристики вариаций космических лучей за пределами атмосферы и магнитосферы Земли.

Мировая сеть станций КЛ регистрирует вторичные частицы, образующиеся в атмосфере Земли при взаимодействии с ней первичного космического излучения. В общем виде вариации скорости счета наземного детектора можно записать так:

$$\delta = \delta_{\text{вн}} + \delta_{\text{ат}} + \delta_{\text{маг}} + \delta_{\text{ап}} + \varepsilon, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{вн}}$ — вариации внеземного происхождения, зависящие от солнечной активности и процессов, происходящих в межпланетной среде; $\delta_{\text{ат}}$ — атмосферные вариации, связанные с взаимодействием КЛ с веществом атмосферы над детектором; $\delta_{\text{маг}}$ — вариации КЛ магнитосферного происхождения, обусловленные состоянием земной магнитосферы в период измерения; $\delta_{\text{ап}}$ — вариации аппаратного происхождения; ε — случайная часть вариации. Именно вариации внеземного происхождения представляют основной интерес при исследовании солнечно-земных связей, но для их надежного выделения из данных нейтронных мониторов нужно уметь учитывать вариации атмосферного и магнитосферного происхождения.

Возникает вопрос, как изменения вторичных (и даже далеко не первого поколения) космических лучей связаны с вариациями первичных КЛ, с солнечной модуляцией КЛ? Чтобы правильно учитывать влияние изменения атмосферы на изучаемые внеземные эффекты КЛ, была разработана теория метеорологических эффектов КЛ [Дорман, 1957; Дорман и Янке, 1971a, б; Дорман, 1972; Dorman, 2010]. Но уже и на границу атмосферы приходят

измененные космические лучи. Они остаются первичными, но магнитное поле Земли отсекает значительную их часть и меняет траектории оставшихся [McCracken et al., 1962; 1965; Shea et al., 1968; Дорман и др., 1971; Dorman et al., 1973; Bieber and Evenson, 1995].

Необходимость иметь глобальные параметры КЛ за пределами магнитосферы, независимые от положения точки наблюдения, привела к созданию особых методов, которые используют данные с возможно большего числа детекторов, распределенных по земному шару. Одна из самых первых и успешных реализаций глобального метода была создана в Якутске [Крымский и др., 1966а, б; 1967; 1981; Altuchov et al., 1969], и именно она получила название метода глобальной съемки (*Global Survey Method* — GSM). Примерно в то же время свою методику предложили японские исследователи [Nagashima, 1971]. Немного позже, в 70-х гг., модификация этого метода была разработана в ИЗМИРАН [Belov et al., 1973; 1974] и применена для обработки нескольких событий в октябре 1969 г. по часовым данным сети НМ. Группа иркутских исследователей разработала свою версию — глобально-спектрографический метод [Dorman, 2009, 2010], который стал самым сложным и многоцелевым из существующих в мире методов обработки данных нейтронных мониторов и успешно используется для определения вариаций планетарного распределения жесткостей геомагнитного обрезания и вычисления второй гармоники анизотропии КЛ в различных событиях [Dvornikov et al., 1983; Дворников и др., 1986; 2006; Richardson et al., 2000].

В сущности, во всех вариантах, GSM — это метод сферического анализа, где используется разложение вариации КЛ по сферическим гармоникам.

История развития GSM в ИЗМИРАН уже достаточно долгая. После появления в 70-х гг. первого варианта метода, он многократно изменялся и совершенствовался. Наиболее существенные изменения были сделаны в начале 90-х гг. с целью получить упрощенный, но более надежный и удобный в применении, метод. С помощью этого метода нами постепенно были обработаны данные за весь период работы мировой сети нейтронных мониторов, что позволило получить ежечасные значения параметров изотропной составляющей и анизотропии КЛ с жесткостью 10 ГВ. Но несмотря на то, что этот вариант GSM долго и интенсивно используется, он до сих пор практически не был описан. Наиболее детальное, хотя и краткое, описание [Belov et al., 2005] относится к другому варианту, который мы считаем вспомогательным и используем только для обработки отдельных событий. Данная работа предназначена заполнить этот пробел и дать описание постоянно применяемого в ИЗМИРАН варианта GSM, с помощью которого проводятся

основные расчеты параметров галактических космических лучей (ГКЛ) с жесткостью 10 ГВ.

Фактически, GSM в применении к данным нейтронных мониторов является объединением трех методов: метода функций связи, траекторных расчетов движения частиц в магнитном поле и метода сферического анализа. Если бы сеть наблюдательных станций была расположена не на поверхности Земли, а за пределами атмосферы и магнитосферы, то задача сводилась бы просто к сферическому анализу. Функции связи позволяют осуществить переход от вариаций КЛ в точке наблюдения к ожидаемым вариациям на границе атмосферы, т.е. позволяют учесть взаимодействие первичных и вторичных частиц различных энергий с веществом атмосферы [Дорман, 1957, 1972; Дорман и Янке, 1971а, б; Clem and Dorman, 2000]. Второй составляющей является метод траекторных расчетов частиц в магнитном поле Земли. Земная магнитосфера отклоняет приходящие частицы различных энергий от их первоначального направления движения (асимптотического) в околоземном космическом пространстве и действует как своего рода спектрометр. Возмущения магнитного поля Земли могут приводить к существенному изменению траекторий заряженных частиц в магнитосфере, вплоть до того, что разрешенные в спокойной магнитосфере траектории частиц могут стать запрещенными [Дорман и др., 1971]. Вследствие изменения магнитного поля Земли изменяются, во-первых, эффективные пороги жесткостного обрезания; во-вторых, эффективные асимптотические направления для станций. Для того чтобы учесть движение частиц в магнитосфере Земли, каскадные процессы в атмосфере и свойства самих детекторов, используются приемные коэффициенты и функции связи для каждой станции, позволяющие осуществлять переход от наблюдаемых на Земле вариаций вторичных КЛ к интенсивности за пределами магнитосферы. Методы расчета таких коэффициентов и сами расчеты описаны и приведены в работах [McCracken et al., 1962, 1965; Крымский и др., 1966б; Shea et al., 1968; Altuchov et al., 1969; Nagashima, 1971; Belov and Eroshenko, 1981; Yasue et al., 1982; Nagashima et al., 1989; Kobelev et al., 2013].

Третьей частью метода глобальной съемки является метод сферического анализа (см., напр., [Крымский и др., 1966а, б, 1967; Чирков и др., 1967; Nagashima, 1971; Belov et al., 1973]), который позволяет выделить значимые для конкретной задачи сферические гармоники. Это дает возможность исследовать разнообразные возмущения солнечного ветра, характерные времена и масштабы которых часто настолько малы, что метод солнечно-суточных вариаций мало помогает при их изучении.

2. СУТЬ МЕТОДА ГЛОБАЛЬНОЙ СЪЕМКИ

Рассмотрим подробнее суть метода. Интенсивность КЛ, как и любая функция, может быть представлена разложением по сферическим гармоникам (см., напр., [Yasue, 1982]):

$$J(R, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n [a_n^m \cos m\varphi + b_n^m \sin m\varphi] P_n^m(\sin \theta), \quad (2)$$

где θ и φ — широтный и азимутальный асимптотические углы в выбранной системе координат (в частности, это может быть географическая система); n — это номер гармоники; m — номер составляющей для выбранной гармоники; P_n^m — присоединенные функции Лежандра. На рисунке 1 дано схематическое представление угловых характеристик движущейся частицы за пределами магнитосферы (асимптотические направления)

и вблизи Земли (географическая система координат).

Почти во всех случаях вариации космических лучей в любой точке наблюдения можно представить в виде суммы нулевой и первых двух сферических гармоник Фурье-разложения.

В свою очередь, вариация скорости счета для i -й станции может быть записана через приемные коэффициенты как:

$$\left(\frac{\Delta N}{N_0} \right)^i = \delta^i = \sum_{k=0}^{\infty} V_k^i(\gamma) A_k, \quad (3)$$

здесь A_k — это амплитуда составляющей анизотропии при фиксированной жесткости R_0 ; γ — показатель спектра вариаций; V_k^i — приемные коэффициенты k -й составляющей в i -й точке (станции), которые можно описать следующим выражением:

$$V_k^i = \frac{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F_k(\theta_i(\lambda, \psi, R), \varphi_i(\lambda, \psi, R)) f_n(R, \gamma) W(R) N(\lambda, \psi) \sin \lambda \, d\lambda \, d\psi \, dR}{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} W(R) N(\lambda, \psi) \sin \lambda \, d\lambda \, d\psi \, dR}, \quad (4)$$

где λ и ψ — широта и долгота точки наблюдения в географической системе координат; θ и φ — зенитный и азимутальный углы прихода частиц (асимптотические направления); $W(R)$ — коэффициенты связи прибора; $N(\lambda, \psi)$ — диаграмма направленности прибора (т.е. чувствительность прибора к частицам, падающим на него под различными углами); R_c — эффективная жесткость обреза в данной точке; R — жесткость частиц; n — номер гармоники; k — номер составляющей в гармоническом разложении. В зависимости от того, сколько гармоник нам необходимо, будет меняться число приемных коэффициентов для каждой станции. К примеру, для нулевой гармоники необходим один приемный коэффициент ($k=0$), для первой — три приемных коэффициента ($k=1-3$), а для второй гармоники — уже 5 приемных коэффициентов для каждой станции. Различным k соответствуют различные подынтегральные угловые функции $F_k(\theta_i(\lambda, \psi, R), \varphi_i(\lambda, \psi, R))$, определяющие долю частиц, приходящих в данную точку под определенным углом (λ, ψ) из возможных асимптотических направлений $F_k(\theta_i, \varphi_i)$:

$$F_k(\theta_i(\lambda, \psi, R), \varphi_i(\lambda, \psi, R)) = \begin{cases} 1 & k=0 \\ \sin \theta & k=1 \\ \cos \theta \cos \varphi & k=2 \\ \cos \theta \sin \theta & k=3 \\ 3/2 \sin^2 \theta - 1/2 & k=4 \\ \sqrt{3} \cos \theta \sin \theta \sin \varphi & k=5 \\ \sqrt{3} \cos \theta \sin \theta \cos \varphi & k=6 \\ \sqrt{3}/2 \cos^2 \theta \sin 2\varphi & k=7 \\ \sqrt{3}/2 \cos^2 \theta \cos 2\varphi & k=8 \\ \dots & \dots \end{cases} \quad (5)$$

Для расчета приемных коэффициентов необходимо также определить вид спектральной функции $f_n(R, \gamma)$, где γ — это вектор спектральной характеристики: в случае степенного спектра — это просто показатель спектра, а в более сложном случае — набор параметров. Один из вариантов использования такой функции рассматривался в работе [Belov and Eroshenko, 1981].

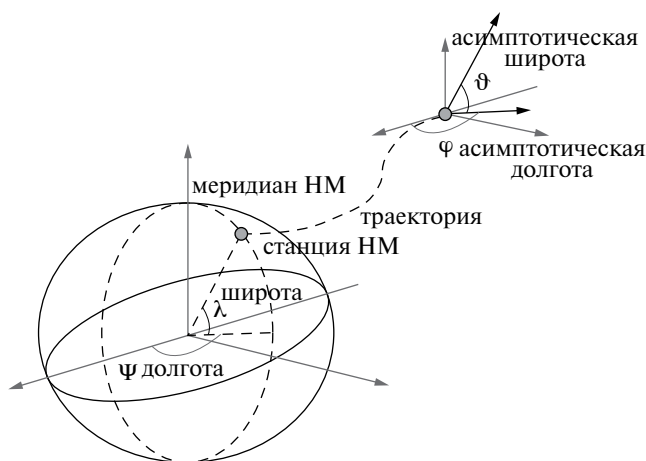


Рис. 1. Определение асимптотических направлений θ и ϕ для движущихся частиц и географических координат точки наблюдения (λ и ψ) (взято из работы McCracken et al., [1962]).

Чтобы получить оптимальный набор параметров A_k и γ_k , определяющих вариации первичных КЛ, обычно используется метод наименьших квадратов, минимизирующий следующее выражение, взятое для каждой из n станций:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \left[\delta^i - \sum_{k=0}^{m-2} A_k V_k^i(\beta) \right]^2}{n - m} = \min, \quad (6)$$

где m — число неизвестных параметров модели ($m = 5$, если ограничиться нулевой и первой гармониками); n — число используемых станций; g_i — весовая характеристика станции.

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ГЛОБАЛЬНОЙ СЪЕМКИ

Как упоминалось выше, почти для всех модуляционных эффектов достаточно использовать три первые гармоники разложения (нулевую, первую и вторую), а для широкого круга задач достаточно и первых двух.

Ограничиваясь нулевой и первой гармониками разложения (изотропная часть и три составляющие первой гармоники анизотропии), ожидаемые на Земле вариации КЛ можно записать как систему из уравнений для каждого пункта наблюдения i на высоте h с жесткостью геомагнитного обрезания R_c , в момент времени t :

$$\delta^i = A_0 C_0^i(\gamma) + (C_x^i A_x + C_y^i A_y + C_z^i A_z) + \varepsilon_{err}, \quad (7)$$

Здесь $A_0 C_0^i(\gamma)$ — вклад нулевой гармоники в вариации КЛ (изотропная часть): A_0 — амплитуда нулевой гармоники вариаций КЛ; γ — показатель

спектра вариаций который, в частности, может определяться как $A_0 R^{-\gamma}$, и с помощью которого учитывается зависимость приемного коэффициента от γ ($C_0(\gamma)$); A_x, A_y, A_z — три компоненты первой гармоники анизотропии КЛ в декартовой системе координат; $C_0^i(\gamma), C_x^i, C_y^i, C_z^i$ соответственно, приемные коэффициенты для каждой компоненты [Asipenka et al., 2008].

Система уравнений (7) решается методом минимизации суммы квадратов невязок относительно неизвестных параметров, характеризующих зависимость спектра вариаций интенсивности первичных КЛ A_0 и γ , а также составляющих вектора анизотропии A_x, A_y, A_z . Эти характеристики определяются в географической системе координат, связанной с нулевым меридианом. Для перехода в систему координат, связанную с Солнцем, необходимо выполнить поворот на угол $\phi_h = 2\pi/24(\text{hour} + 1/2)$ [Russell, 1971]. Приемные коэффициенты нулевой гармоники рассчитываются сравнительно просто:

$$C_0^i(\gamma) = \int_{R_c}^{R_u} R^{-\gamma} W^i(R_c, h, R) dR, \quad (8)$$

где $W^i(R_c, h, R)$ — функция связи вариаций первичных и вторичных КЛ для прибора типа i , расположенного на уровне h в пункте с жесткостью геомагнитного обрезания R_c .

Вычисление приемных коэффициентов первой и более высоких гармоник очень трудоемко, поскольку необходимо учесть не только взаимодействие КЛ с атмосферой Земли (привлекая функции связи $W^i(R_c, h, R)$), но и влияние на космические лучи магнитосферы Земли, используя направления движения КЛ различных энергий за пределами магнитосферы (асимптотику). Асимптотические направления для различных станций мировой сети считались в ряде работ (см., напр., [McCracken et al., 1965; Shea et al., 1968]). Мы пользуемся приемными коэффициентами, рассчитанными группой японских авторов для минимума и максимума солнечной активности. В работе Yasue [1982] представлены таблицы приемных коэффициентов для большого набора станций, посчитанных для различных показателей спектра γ (−1.5, −1.0, −0.5, 0.0, 0.5, 1.0) и значений верхнего порога энергии R_u , выше которой анизотропия исчезает (30, 50, 100, 200, 500, 1000 ГВ). Все эти коэффициенты занесены в базу рабочей программы GSM и используются при обращении к различным станциям во время счета. Часть приемных коэффициентов для ст. Москва (55.47° N, 37.32° E, $h = 200$ м, $H_0 = 1000$ мбар) при $\gamma = -1.5$ и $\gamma = 0.0$ приведена в таблице в качестве примера (в полярной системе координат). Приемные коэффициенты, посчитанные Yasue

Таблица. Приемные коэффициенты для станции Москва для $\gamma = -1.5$ и $\gamma = 0.0$

γ	R_u	C_{00}	C_{10}	C_{20}	C_{11}	Φ_{11}	C_{21}	Φ_{21}	C_{22}	Φ_{22}
-1.5	30	0.9140	-0.0093	-0.4181	0.6850	72.37	0.0864	-35.19	0.4320	136.35
-1.5	50	0.9270	-0.0015	-0.4167	0.6920	71.92	0.0898	-29.65	0.4350	135.72
-1.5	70	0.9300	0.0010	-0.4158	0.6940	71.80	0.0911	-28.37	0.4350	135.58
-1.5	80	0.9310	0.0015	-0.4155	0.6940	71.77	0.0914	-28.10	0.4350	135.56
-1.5	100	0.9320	0.0022	-0.4151	0.6950	71.74	0.0919	-27.80	0.4350	135.52
-1.5	150	0.9330	0.0029	-0.4148	0.6950	71.70	0.0923	-27.53	0.4350	135.49
-1.5	200	0.9330	0.0031	-0.4147	0.6950	71.69	0.0925	-27.45	0.4350	135.49
-1.5	300	0.9330	0.0033	-0.4146	0.6950	71.68	0.0926	-27.40	0.4350	135.48
-1.5	500	0.9330	0.0033	-0.4145	0.6950	71.68	0.0926	-27.38	0.4350	135.48
-1.5	1000	0.9330	0.0034	-0.4145	0.6950	71.68	0.0927	-27.37	0.4350	135.48
0.0	30	0.6300	0.0787	-0.2502	0.5490	55.90	0.1320	32.79	0.3960	108.51
0.0	50	0.7240	0.1370	-0.2383	0.6130	53.83	0.1990	33.71	0.4290	105.63
0.0	70	0.7730	0.1710	-0.2250	0.6400	52.67	0.2320	32.84	0.4390	104.19
0.0	80	0.7890	0.1830	-0.2193	0.6490	52.25	0.2440	32.39	0.4420	103.70
0.0	100	0.8150	0.2020	-0.2100	0.6610	51.59	0.2600	31.60	0.4450	102.96
0.0	150	0.8530	0.2310	-0.1953	0.6780	50.55	0.2850	30.21	0.4480	101.84
0.0	200	0.8760	0.2480	-0.1865	0.6870	49.92	0.2990	29.31	0.4490	101.20
0.0	300	0.9020	0.2670	-0.1761	0.6980	49.17	0.3140	28.21	0.4490	100.46
0.0	500	0.9270	0.2870	-0.1658	0.7070	48.43	0.3290	27.11	0.4490	99.75
0.0	1000	0.9510	0.3050	-0.1559	0.7160	47.70	0.3440	26.05	0.4490	99.07

Примечание: C_{00} – приемный коэффициент для изотропной составляющей КЛ; C_{10} – для северо-южной компоненты; а C_{11} и Φ_{11} – приемный коэффициент и магнитосферный сдвиг фазы солнечно-суточной составляющей первой гармоники анизотропии КЛ в полярной системе координат; C_{20} – приемный коэффициент для второй зональной компоненты; C_{21} , C_{22} , Φ_{21} , Φ_{22} – приемные коэффициенты и сдвиг фазы для экваториальной составляющей второй гармоники анизотропии КЛ.

для всех станций сети, можно получить по адресу:
<http://spaceweather.izmiran.ru/rus/cc3.html>.

Для перехода в декартову систему координат необходимо провести следующие преобразования для каждой станции с учетом ее долготы φ_s :

$$\begin{cases} C_x^i = C_{11} \cos(\varphi_s + \Phi_{11}) \\ C_y^i = C_{11} \sin(\varphi_s + \Phi_{11}), \\ C_z^i = C_{10} \end{cases} \quad (9)$$

где для первой гармоники C_{11} – амплитуда и Φ_{11} – фаза, определяющая снос частиц в магнитосфере. Приемные коэффициенты нулевой гармоники C_{00} также приведены в таблицах [Yasue, 1982]. Однако, мы проводим независимые вычисления C_{00} согласно соотношению (8) для любого пункта наблюдения, используя функции связи интенсивности КЛ на границе атмосферы и в пункте наблюдения [Дорман, 1957; Dorman et al., 1970; Clem and Dorman, 2000]:

$$W(R) = \alpha(k-1) \exp(-\alpha R^{-(k-1)}) R^{-k}. \quad (10)$$

В работе [Aleksanyan et al., 1979] была получена аппроксимация высотного хода параметров α и k , которую можно представить следующим выражением (h в барах):

– для минимума (1965 г.) солнечной активности:

$$\begin{aligned} \ln \alpha &= 1.84 + 0.094h - 0.09 \exp[-11h] \\ k &= 2.40 - 0.56h + 0.24 \exp[-8.8h] \end{aligned} \quad (11)$$

– для максимума (1969 г.) солнечной активности:

$$\begin{aligned} \ln \alpha &= 1.93 + 0.150h - 0.18 \exp[-10h] \\ k &= 2.32 - 0.49h + 0.18 \exp[-9.5h]. \end{aligned} \quad (12)$$

Как показано в упомянутой выше работе, вплоть до уровня 300 мбар зависимость от высоты интересующих нас параметров имеет практически линейный вид.

3.1. Изотропная часть кл — нулевая гармоника в сферическом разложении

Вычисления функций связи и приемных коэффициентов для изотропной части КЛ проводятся при каждом счете в зависимости от числа станций и выбранного периода.

На рисунке 2 приводятся значения приемных коэффициентов для нулевой гармоники для всех имеющихся станций мировой сети (горных и на уровне моря) в диапазоне жесткостей обрезания от 0 до 16 ГВ при $\gamma=0.5$.

Поведение приемного коэффициента для изотропной составляющей (C_{00}) отражает способность каждой станции откликаться на модуляцию КЛ. Дополнительную информацию о роли станций в регистрации изотропной части КЛ дает рис. 3, где представлено распределение ожидаемой изотропной вариации на работающих сейчас нейтронных мониторах для двух степенных жесткостных спектров первичной вариации с показателями $\gamma=1.0$ (слева) и $\gamma=0.5$ (справа). Такой способностью в наибольшей степени обладают станции в диапазоне жесткостей обрезания R_c от 0.5 до 3.5 ГВ (*Mount Washington (mtws)*, *Calgary (calg)* и *Climax (clmx)*), а наименьшим откликом на модуляцию КЛ обладает недавно открытая тайландская станция *Princess Sirindhorn (prsi)*. Здесь и далее используются 4-символьные названия станций по формату, разработанному для стандартизации списка станций при исследовании GLE-событий [Shea et al., 1987]. Названия станций на рис. 3 приведены для крайних значений C_{00} , все остальные станции группируются вблизи средних значений C_{00} , т.е. вклад изотропной составляющей на этих станциях примерно одинаков.

Наибольшая разница в вариациях наблюдается между станциями с максимальными и минимальными коэффициентами C_{00} (соответственно высокоширотные и приэкваториальные станции). Именно эти станции наиболее ценны для определения наклона и формы жесткостного спектра вариации, причем станции с минимальной чувствительностью к модуляции не менее важны, чем станции с максимальной чувствительностью. Если на верхнем конце коэффициентов C_{00} ситуация благоприятная и существующая сеть нейтронных мониторов достаточно полно использует возможности наземных наблюдений, то на нижнем конце это совсем не так. Известно [Smart, 1997], что на Земле (в Юго-Восточной Азии и Индийском океане) есть пункты, где жесткость геомагнитного обрезания может достигать 17.6 ГВ. На работавших же до недавнего времени станциях максимальная $R_c = 13.3$ ГВ (*Haleakala — hlea*), а если говорить только о станциях, близких к уровню моря, то максимальная $R_c \sim 9.6$ ГВ (*Beijing — bjng*). Недавно

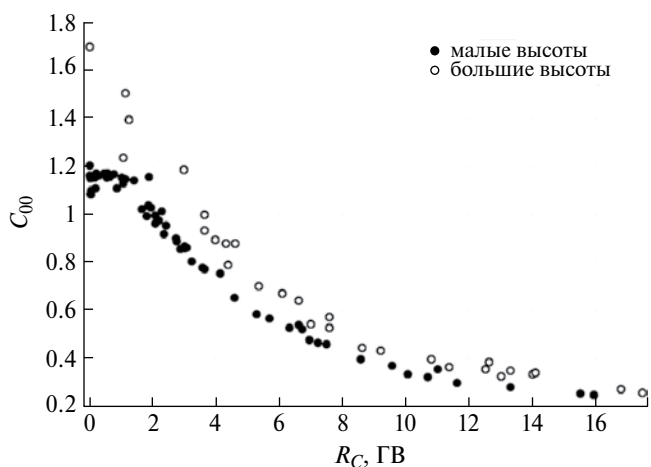


Рис. 2. Приемные коэффициенты нулевой гармоники, вычисленные в соответствии с выражением (8) для $\gamma=0.5$. Точки — НМ на уровне моря (малые высоты, >800 мбар), кружки — НМ на уровне гор, (большие высоты, <800 мбар).

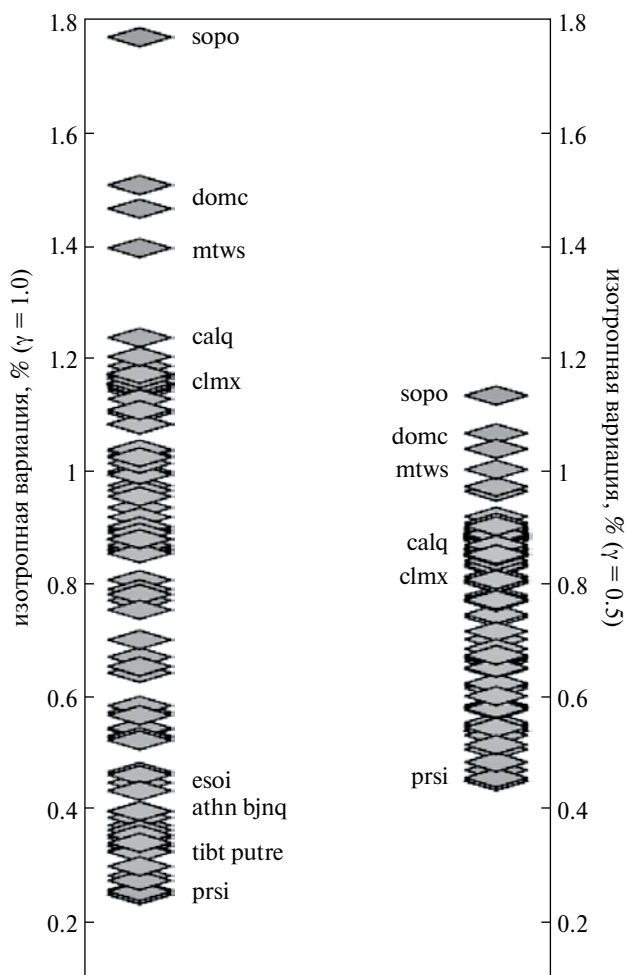


Рис. 3. Распределение ожидаемой изотропной вариации на работающих сейчас нейтронных мониторах для двух степенных жесткостных спектров $R^{-\gamma}$ первичной вариации с показателями $\gamma=1.0$ (слева) и $\gamma=0.5$ (справа).

открытая в районе максимальных жесткостей геоманнитного обрезания новая станция *Princess Sirindhorn – prsi* ($R_c \sim 16.8$ ГВ) только частично решает эту проблему. Это высокогорная станция, а в горах вариации КЛ больше. Но еще важнее то, что высокогорные вариации труднее моделировать.

Наклон жесткостного спектра вариации КЛ можно определять прямым дифференцированием зависимости наблюдаемой вариации от R_c . Сейчас это возможно только в диапазоне жесткостей 2–9.5 ГВ. Таким образом, имеющаяся сейчас сеть нейтронных мониторов использует только половину земного диапазона жесткостей обрезания. На работавших ранее станциях, таких как *Kodaikanal* ($R_c \approx 17.5$ ГВ), *Lae*, *Ahmedabad*, изотропная вариация при $\gamma = 1.0$ была бы не 0.35% как на ст. *Haleakala*, а 0.25–0.26%. А минимально возможная при этих условиях на уровне моря вариация – 0.22%. Все еще сохраняется возможность изменить сеть нейтронных мониторов таким образом, что диапазон надежного определения спектра вариации по данным мониторов существенно расширится, а точность такого определения существенно возрастет.

3.2. Первая гармоника анизотропии

На рисунке 4(а–в) представлено поведение приемных коэффициентов для различных составляющих первой гармоники анизотропии КЛ в зависимости от жесткости обрезания R_c в точке наблюдения.

При реализации метода глобальной съемки приходится часто использовать станции, для которых отсутствуют приемные коэффициенты в таблицах Yasue [1982]. В таких случаях для их определения проводится интерполяция имеющихся приемных коэффициентов для нейтронных мониторов, расположенных вблизи такой станции.

Анализ жесткостных зависимостей приемных коэффициентов помогает понять роль той или иной станции в регистрации различных составляющих вариаций КЛ и в определении характеристик этих составляющих [Moraal et al., 2000].

Рисунок 5 показывает распределение ожидаемого вклада от северо-южной СЮ (слева) и экваториальной (солнечно-суточной, справа) составляющих анизотропии КЛ в вариации, регистрируемые на работающих сейчас нейтронных мониторах.

Большинство нейтронных мониторов мировой сети собирают частицы из приэкваториальной зоны и только несколько приполярных станций способны “видеть” частицы, приходящие с высоких асимптотических широт. Именно эти станции играют основную роль при определении северо-южной (СЮ) анизотропии. В северном полушарии это станции *Thule* и *Barentsburg*, в южном

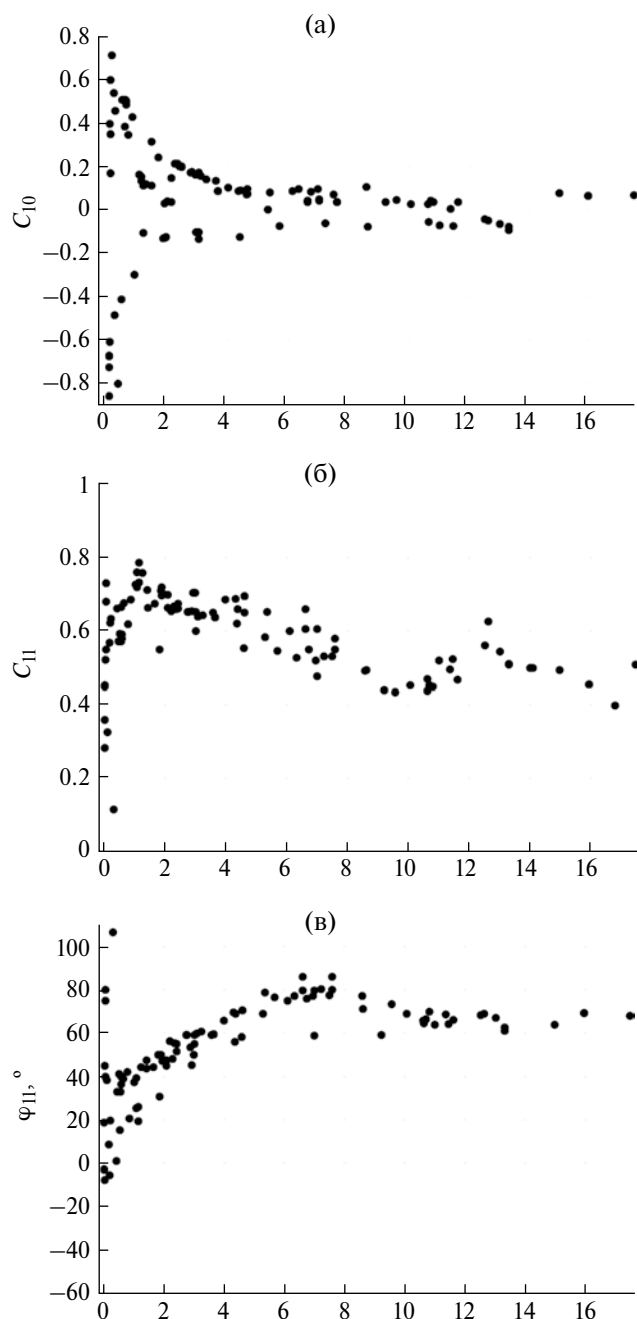


Рис. 4. Зависимость приемных коэффициентов первой гармоники от жесткости обрезания R_c при плоском спектре ($\gamma = 0.0$) до предельной жесткости 100 ГВ: C_{10} – коэффициент северо-южной компоненты (а); C_{11} – коэффициент солнечно-суточной вариации (б); ϕ_{11} – эффективный магнитосферный сдвиг солнечно-суточной вариации (в). Данные приведены для мониторов на уровне моря и уровне гор.

полушарии – *McMurdo* и *Terre Adelie*. Особенно хороша пара станций *Thule* и *McMurdo*. Они максимально и симметрично реагируют на СЮ-анизотропию, одинаково – на изменения плотности КЛ и почти не реагируют на экваториальную

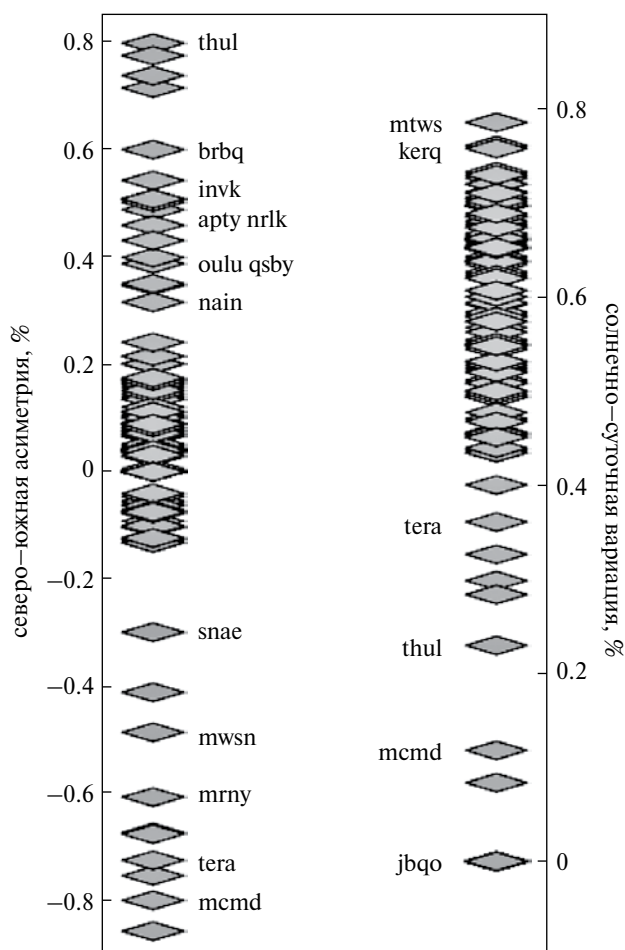


Рис. 5. Распределение ожидаемого вклада от северо-южной (слева) и экваториальной (солнечно-суточной, справа) составляющих анизотропии КЛ в вариации скорости счета нейтронных мониторов, работающих в настоящее время.

анизотропию и геомагнитные вариации. Поэтому вполне разумно использовать полуразность вариаций на этих станциях для оценки амплитуды СЮ-анизотропии, а полусумму — вместо изотропной вариации, как это делали, например, Pomerantz и Duggal [1972], но ограниченное число станций с большими приемными коэффициентами C_{10} для СЮ-компоненты делает такое выделение не

всегда надежным. Так, например, нельзя исключить, что вариации атмосферного или аппаратурного происхождения могут быть приняты за изменения СЮ-анизотропии. Когда-то у ст. *Thule* (*thul*) был полноценный дублер — ст. *Alert* (*alrt*). С сожалением приходится вспоминать и такие закрытые станции, как *Resolute* (*rslt*) — на севере Канады, *Vostok* (*vstk*), *Wilkes* (*wlks*), *Syowa* (*syva*) — в Антарктиде. С другой стороны, недавно появившаяся российская станция *Barentsburg* (*brbg*) ближе всех по своим параметрам к ст. *Thule* и, в какой-то мере, может ее заменить. Большие изменения за последние годы произошли со станцией *McMurdo* (*mcmd*). В 2014 г. одна секция монитора ст. *McMurdo* была перенесена на южнокорейскую антарктическую станцию *Jang Bogo*, где была включена на регистрацию и проработала параллельно с оставшейся на *McMurdo* частью НМ до января 2017 г. В январе 2017 г. оставшиеся секции НМ были перевезены на *Jang Bogo*. Полностью запуск на регистрацию монитора на ст. *Jang Bogo* ожидается в конце 2017 — начале 2018 г., и это по-прежнему единственная полярная станция в южном полушарии [Evenson and Pyle, 2017]. Что касается других антарктических станций вблизи географического полюса (*DomC*, *South Pole*, *Mirny*, *Terre Adelie*), то для космических лучей их нельзя относить к полярным — у них достаточно большая солнечно-суточная вариация и сравнительно небольшой приемный коэффициент для северо-южной анизотропии.

Наибольший отклик на солнечно-суточную модуляцию (C_{11}) имеют станции с широтой $\sim 50^\circ$ и жесткостью обрезания ~ 1 ГВ (*Calgary* (*calg*), *Kerguelen* (*kerq*)). Однако здесь нет явных лидеров, и почти все станции мировой сети способны наблюдать солнечно-суточную вариацию, и все вместе дают уникальную информацию об угловом распределении КЛ (рис. 5). На рисунке 6 приведены величины $\phi + \phi_1^1$ (ϕ — долгота станции, ϕ_1^1 — угол сноса частиц в магнитном поле Земли), характеризующие эффективное положение станции при регистрации первой гармоники анизотропии (асимптотическая долгота), для всех существующих (верхняя панель) и для всех когда-либо существовавших станций (нижняя панель). ~~В настоящее время существует~~ определенное распределение

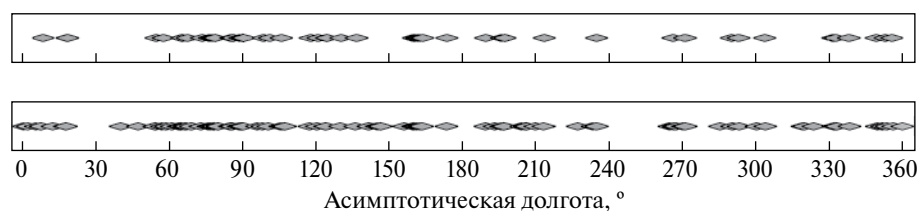


Рис. 6. Распределение существующих (верхняя панель) и когда-либо существовавших (нижняя панель) нейтронных мониторов по асимптотическим долготам.

станций по земному шару, отражающее реальную географию распределения воды, суши и научных исследований. Особенно плохо обеспечен диапазон долгот, соответствующий Тихому и Атлантическому океанам.

Приведенные выше рисунки 4, 5, 6 были построены для плоского спектра ($\gamma = 0.0$) до предельной жесткости 100 ГВ. Для другого жесткостного спектра анизотропии распределение амплитуды и фазы солнечно-суточной вариации может существенно измениться. Причем, на высокоширотных станциях с максимальной чувствительностью к солнечно-суточной анизотропии эти изменения невелики, а на средне- и низкоширотных станциях, приемный конус которых растянут по долготе, они значительно больше [Yasue, 1982]. Именно средне- и низкоширотные ($R_c > 3.5$ ГВ) станции особенно важны для определения жесткостного спектра анизотропии. Иногда простого сопоставления суточных волн, наблюдаемых на двух таких станциях, достаточно для оценки характеристик спектра, в то время как все станции высокоширотного кольца для этого ничего дать не могут.

4. РЕАЛИЗАЦИЯ GSM

В нашей модели нет параметров, которые можно определять только по одной станции, поэтому при практическом использовании метода глобальной съемки мы пошли не по пути усложнения модели, а по методу разумной выборки станций.

При реализации GSM для определения внеземных вариаций КЛ приемные коэффициенты для первой гармоники выбирались при $\gamma = 0.0$ и верхней граничной жесткости $R_u = 100$ ГВ, (т.е. при плоском спектре вариаций). Это упрощение вполне приемлемо, т.к. анизотропия КЛ в спокойные и квазиспокойные периоды не сильно зависит от жесткости частиц [Крымский и др., 1981]. В модели показатель спектра для изотропной части входит как переменная величина, которая оценивается в числе других параметров при решении системы уравнений (7), и соответственно, приемные коэффициенты используются для его разных значений.

4.1. Определение экваториальной составляющей первой гармоники анизотропии кл по данным высокоширотных станций

Из общей сформированной таблицы отбираются только высокоширотные станции на уровне моря ($R_c < 3$ ГВ, $h > 800$ мбар). Затем решается система уравнений (7). Поскольку система нелинейная и плохо обусловлена, один из вариантов ее решения — это линеаризация и решение методом сингулярного разложения SVD [Форсайт и др.,

1980]. При поиске минимума дисперсии для определения параметров ГКЛ применяется метод интерполяции (сплайн-аппроксимация) приемных коэффициентов для промежуточных значений γ и R_u . Поскольку счет на первом этапе проводится по полной модели (7), в результате за каждый час получаются искомые параметры ГКЛ: A_x , A_y , A_z — характеристики первой гармоники анизотропии КЛ; A_0 и γ для изотропной компоненты КЛ. Для расчетов используются не абсолютные скорости счета нейтронных мониторов, а вариации их относительно базового периода $(N_i - N_0)/N_0$, выбор которого (как правило, сутки, одни и те же для всех станций) играет важную роль. Скорость счета каждого конкретного прибора определяется целым рядом трудно учитываемых факторов, и однородность величин N_0 также наверняка нарушается в возмущенные периоды из-за магнитосферных и внеземных вариаций. Это приводит к ложному суточному вращению фазы экваториальной составляющей первой гармоники анизотропии, особенно, если обсчитываемый период находится далеко от базового. Во избежание этого эффекта приходится несколько раз менять базовый период (3–7 раз за месяц). Эта процедура не отражается на уровне A_x - и A_y -составляющих, но поведение A_0 и A_z -компоненты становится многоступенчатым, что делает непригодным использование этих параметров для анализа. Их определение проводится на втором этапе работы программы GSM.

4.2. Определение изотропной компоненты и северо-южной составляющей первой гармоники анизотропии кл

В общий список отбираются все станции, для которых были посчитаны приемные коэффициенты C_{00} ($R_c < 17$ ГВ, $h > 600$ мбар). На основе полученных на первом этапе данных A_x и A_y и приемных коэффициентов из данных каждой станции исключается экваториальная составляющая первой гармоники анизотропии КЛ по алгоритму

$$\delta_i^* = \delta_i - (C_x^i A_x + C_y^i A_y), \quad (13)$$

где δ_i — текущие вариации скорости счета НМ, а δ_i^* — вариации скорости счета, исправленные на солнечно-суточную анизотропию.

Оставшиеся после исправления данные практически содержат отклик на изотропную часть первичных КЛ и северо-южную компоненту первой гармоники:

$$\delta_i^* = A_0 C_0^i(\gamma) + C_z^i A_z + \epsilon_{err}^i. \quad (14)$$

Далее методом наименьших квадратов решается система уравнений (14) относительно параметров A_0 , γ и A_z . Подключение большего количества

станций значительно повышает точность полученных результатов.

4.3. Предложения по усовершенствованию метода глобальной съемки

В процессе работы с GSM накопился ряд предложений по усовершенствованию и оптимальному использованию метода, которые приводятся ниже.

1. Уточнение модельной жесткостной зависимости изотропной части вариации КЛ.
2. Замена степенной спектральной функции на более сложную, что должно сказаться, в первую очередь, на исследовании больших Форбуш-понижений (ФП).
3. Введение второй гармоники анизотропии КЛ в модель вариации.
4. Учет магнитосферных вариаций.
5. Лучший выбор базовых периодов.
6. Определение жесткостной зависимости анизотропии КЛ и/или учет ее изменений (это существенно при больших величинах анизотропии).
7. Учет изменений функций связи (a , следовательно, и приемных коэффициентов) со временем.
8. Улучшение качества входных данных.
9. Уточнение барометрических коэффициентов и пересчет соответствующих поправок. Иногда важны и другие атмосферные эффекты.
10. Добавление к данным НМ данных других детекторов, прежде всего, мюонных телескопов. Легче всего добавить разности вариаций однотипных телескопов.

5. ПРЕИМУЩЕСТВА МЕТОДА ГЛОБАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ПЕРЕД ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ОТДЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Данные одного НМ не могут дать представления обо всем угловом распределении КЛ. Чтобы получать достаточно полную информацию о распределении КЛ за пределами магнитосферы, нужно иметь много детекторов, достаточно равномерно расположенных по земному шару. Если распределение КЛ изотропно, то, зная приемные коэффициенты в точке наблюдения, можно оценить изотропную составляющую интенсивности КЛ и по одной станции, хотя и с невысокой точностью. Но для определения анизотропии КЛ одним прибором уже не обойтись: так, для первой сферической гармоники необходимо, как минимум, четыре НМ, для второй — уже, как минимум, девять приборов [Крымский и др., 1967].

Как отмечалось выше, мировая сеть станций КЛ состоит из отдельных детекторов (в первую

очередь, НМ), расположенных в различных точках земного шара и собирающих частицы в определенных конусах асимптотических направлений (конуса приема). В методе глобальной съемки вся сеть используется как единый многоканальный прибор, где каждый канал-станция обеспечивает информацию в определенном конусе асимптотических направлений, а все каналы целиком перекрывают небесную сферу. Многоканальность такого прибора обеспечивает надежность и непрерывность измерений. В сравнении с отдельными станциями КЛ статистическая точность сети заметно возрастает, а влияние аппаратных эффектов существенно уменьшается. К примеру, отдельный супермонитор обеспечивает статистическую точность $0.1-0.2\%/ч$, в то время как вся сеть станций обеспечивает точность $\sim 0.01\%/ч$. Метод глобальной съемки позволяет определить плотность (изотропную часть интенсивности) и анизотропию галактических КЛ за каждый час за пределами магнитосферы. До развития GSM во многих работах для изучения событий использовались скорости счета одного или нескольких НМ, которые, как правило, содержат и изотропную часть интенсивности, и анизотропию КЛ, характерные для малой части пространства, в пределах асимптотических конусов в точках наблюдения. Поэтому на разных станциях эффекты в КЛ (например, Форбуш-эффекты (ФЭ)) могут выглядеть по-разному. Другим минусом данных, получаемых с одной станции, является наличие в них суточной волны (солнечно-суточная анизотропия). Можно попытаться избавиться от суточной волны путем усреднения данных за сутки [Lockwood, 1990; Alania et al., 2003], но при этом происходит занижение величины реального эффекта, а степень занижения определяется, в основном, длительностью эффекта. Например, если ФП длится менее суток, то усреднение может уменьшить эффект в 2–3 раза. Ниже проводится сравнение результатов GSM с данными одной станции — *Mt. Washington* (*mtws*, координаты: $44.27^\circ N$, $71.30^\circ W$, высота: 1909 м, $R_c = 1.24$ ГВ). Эта станция выбрана, поскольку именно на ее данных основан каталог ФП [Lokwood, 1990] за самый ранний период наблюдений КЛ (начиная с апреля 1954 г.). Напомним, что мировая сеть НМ включает в себя данные с июля 1957 г., а результаты GSM были получены для частиц с жесткостью (R_c) 10 ГВ, как наиболее близкой к эффективной жесткости частиц, регистрируемых НМ.

На рисунке 7а приведено событие 18.09.1959 г., в котором ФЭ успел развиваться в пределах суток. В данных одной станции (на этом и других рисунках) отчетливо видна суточная волна, которая исчезает в поведении плотности КЛ, полученной GSM. В результате, при обработке данных с помощью GSM, величина ФП получилась $\sim 8.8\%$, в то

время как при суточном усреднении данных станции *mtws* всего $\sim 3.8\%$. Таким образом, наблюдаемый эффект по отдельной станции был занижен более чем в 2 раза. Подобная же ситуация наблюдается при исследовании события 08.05.1960 г. (см. рис. 7б). Величина ФП при обработке GSM оказалась $\sim 10.1\%$, а при суточном усреднении получилась $\sim 3.9\%$. В этом случае наблюдаемый эффект на отдельной станции был занижен уже более чем в 2.5 раза.

Таким образом, изучение коротких по продолжительности ФП становится затруднительным при использовании данных одного НМ, даже если эффект имеет большую величину. Но усреднение за сутки нельзя считать полностью отрицательным фактором.

Важно отметить, что степень занижения будет зависеть не только от продолжительности эффекта в КЛ, но и от места расположения детектора. Геомагнитная широта задает жесткость обрезания первичного потока КЛ в данной точке (см., напр., [Carmichael et al., 1969]). Чем меньше жесткость обрезания, тем больший эффект будет наблюдаться на детекторе в месте регистрации, и наоборот. Например, рассмотрим снова событие 8 мая 1960 г., но используя данные станции с любой другой пороговой жесткостью (рис. 8).

В качестве новой станции КЛ взят нейтронный монитор, расположенный в Буэнос Айресе (*Buenos Aires, buen*, координаты: -34.6° , -58.48° , высота: 0 м, $R_c = 10.63$ ГВ). Из рисунка 8 видно, что усредненный эффект имеет величину чуть больше 1% ($GSM = 10.1\%$, *buen* = 5.9%). Таким образом, в зависимости от жесткости обрезания на каждой станции будет наблюдаться различный эффект.

Еще одним недостатком использования данных отдельных станций может являться вклад анизотропии в вариации интенсивности КЛ. Если в больших событиях анизотропия не может кардинально исказить эффект, то в относительно малые по величине эффекты она вносит существенный вклад. Например, в событиях 03.09.1959 г. (рис. 9а) и 29.04.1960 г. (рис. 9б) видно уменьшение величины ФП за счет вклада анизотропии в эффект — в это время наблюдается большая солнечно-суточная волна в данных станции *mtws*. В первом случае наблюдаемая величина ФЭ на станции *mtws* равна 4.3%, в то время как при обработке GSM величина эффекта равна 6.2%. Аналогичная ситуация наблюдается на рис. 9б — используя данные станции *mtws*, мы получаем величину ФП $\sim 5\%$, в то время как в результате обработки GSM величина ФЭ равна $\sim 7.5\%$.

Можно выделить еще целый ряд преимуществ GSM перед использованием отдельных станций КЛ. Одним из таких преимуществ является

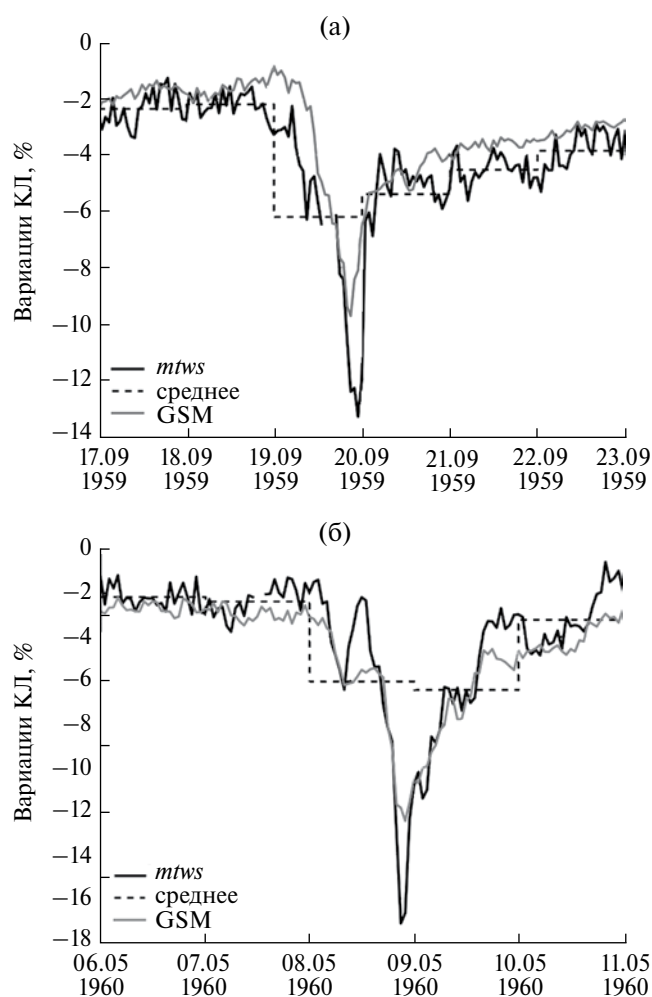


Рис. 7. Вариации космических лучей, наблюдаемые на станции *mtws* и полученные методом GSM за периоды: 17–23.09.1959 г. (а); 6–11.05.1960 г. (б).

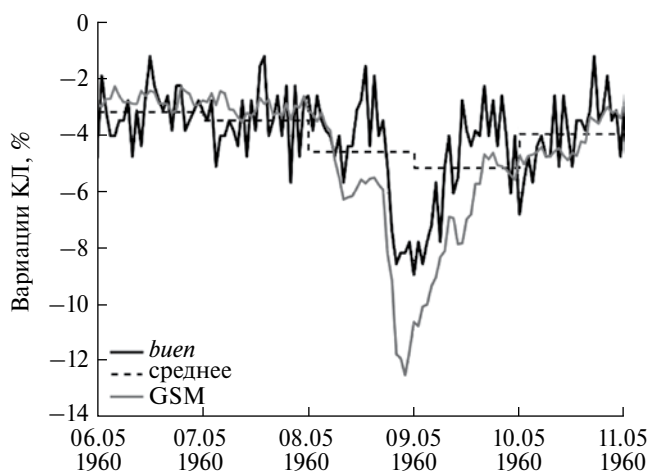


Рис. 8. Вариации космических лучей, наблюдаемые на станции *buen* (черная кривая) и полученные GSM (серая кривая) за период 5–11.05.1960 г.

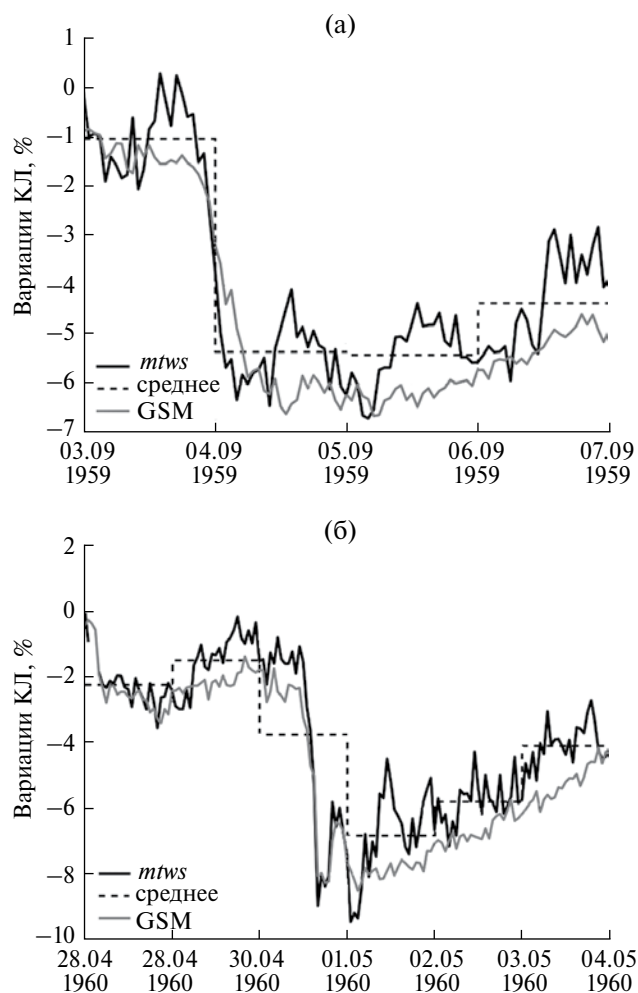


Рис. 9. Вариации космических лучей, наблюдаемые на станции *mtws* и полученные методом GSM за период: 03–7.09.1959 г. (а); 28.04–04.05.1960 г. (б).

обеспечение непрерывности измерений. При использовании GSM, в случае выхода из строя одного НМ, мы потеряем только один канал (т.е. данные по одному направлению). При этом данные по остальным направлениям все равно будут собираться, причем качество данных практически не изменится. Но если исследовать эффекты, используя только один НМ, то при сбоях в его работе можно потерять все данные за промежуток времени сбоя.

Другим недостатком использования данных отдельных НМ является наличие различного рода “артефактов”. Под артефактами понимается изменение плотности КЛ, которое не связано с внеземными вариациями. Примером может служить выпавший снег и дальнейшее его скапливание на крыше здания, в котором находится монитор, в результате чего могут наблюдаться “ложные” вариации [Коротков и др., 2011; Korotkov et al., 2013].

6. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ GSM

Мировая сеть НМ – это прекрасный инструмент для измерения анизотропии, и большая часть наших знаний об анизотропии КЛ получена с помощью сети нейтронных мониторов. На рисунке 10 представлена “зацепленная” векторная диаграмма из векторов экваториальной компоненты первой гармоники анизотропии КЛ (или солнечно-суточной анизотропии), полученных за каждый час в течение 58 последних лет. Таким образом, в рис. 10 объединено ~500 000 векторов. Долгопериодное поведение анизотропии КЛ (для частиц с жесткостью 10 ГВ) весьма хорошо отражает регулярную солнечную цикличность. Первое, что бросается в глаза, – это солнечный (22-летний) магнитный цикл, который управляет фазой анизотропии. Это управление столь очевидно, что одних наблюдений космических лучей было бы достаточно, чтобы догадаться о существовании магнитного цикла. В отличие от фазы, амплитуда анизотропии подчиняется 11-летнему циклу солнечной активности [Belov, 2000]. Эта картина содержит ценные сведения о долговременных изменениях структуры гелиомагнитосферы и пространственного распределения ГКЛ.

Показанная здесь регулярная картина драматически изменяется, если перейти к меньшим временным масштабам. Именно в данных нейтронных мониторов обнаружилось, что анизотропия галактических КЛ иногда (как правило, во время прихода к Земле больших межпланетных возмущений) существенно увеличивается, в отдельные часы достигая 10% [Белов и др., 2009]. В эти периоды анизотропия КЛ претерпевает быстрые и значительные изменения, которые отражают структуру

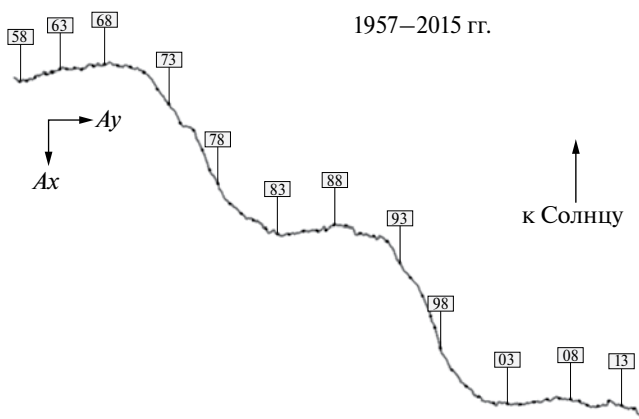


Рис. 10. Векторная диаграмма солнечно-суточной анизотропии КЛ за 1957–2015 гг., полученная по часовым данным нейтронных мониторов после обработки методом глобальной съемки.

и динамику межпланетных возмущений. Таким образом, изменения анизотропии, определяемой по данным нейтронных мониторов, — это история солнечного ветра, которая постоянно дополняется и распространяется даже на те периоды, когда прямых измерений солнечного ветра не было [Белов и др., 2009].

Форбуш-понижения (другое название — Форбуш-эффекты) это, возможно, самые яркие и разнообразные явления в вариациях КЛ (см., напр., [Lockwood, 1971; Cane, 2000; Belov, 2009]), обусловленные выбросами солнечного вещества (СМЕ — *Coronal Mass Ejection*) или высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр. Именно нейтронные мониторы дали и продолжают давать основную часть сведений о Форбуш-эффектах. В 90-х гг. в ИЗМИРАН начала создаваться база данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений, основанная на изменениях плотности и анизотропии КЛ, рассчитанных с помощью GSM за каждый час. По настоящее время эта база данных непрерывно пополняется, расширяется, дорабатывается и улучшается. К настоящему времени она включает в себя более 7000 событий за период 1957–2016 гг.

В 19 и 20-м солнечных циклах СМЕ не могли наблюдаться, да и позднее их наблюдения были неполными. Однако Форбуш-эффекты дают полную историю геоэффективных выбросов солнечного вещества. Другие особенности Форбуш-эффектов: 1) изменения плотности и анизотропии КЛ во время ФП отражают структуру межпланетных возмущений (ударные волны, границы магнитных облаков и т.п.); 2) изменения в КЛ начинаются задолго до прихода возмущений солнечного ветра к Земле и могут быть их предвестником; 3) Форбуш-эффекты, как правило, наблюдаются одновременно с геомагнитными и ионосферными возмущениями и их наблюдения могут использоваться для геомагнитных и ионосферных прогнозов; 4) частота и величина ФП отражают изменения солнечной активности и могут использоваться для анализа и прогноза всплесков солнечной активности [Belov et al., 2008]. Все это повышает ценность наблюдений Форбуш-эффектов и данных нейтронных мониторов.

Разные типы измерений КЛ не могут вполне заменять друг друга, зато способны друг друга хорошо дополнять: чем важнее и продолжительнее космическая миссия, тем более нуждается она в наземной поддержке, тем чаще востребованы данные тех же нейтронных мониторов. Примером такой миссии может послужить чрезвычайно успешный полет аппарата *Ulysses*, который, во многом, обеспечил современное понимание структуры гелиосферы и ее циклических изменений.

По сравнению с аппаратом *Ulysses*, который перемещался в широком диапазоне гелиоширот, Земля, можно сказать, находилась в неподвижности. Поэтому вариации КЛ, наблюдавшиеся на Земле нейтронными мониторами, использовались для разделения пространственных и временных вариаций в данных *Ulysses* [Belov et al., 2003; Белов и др., 2003]. Одним из результатов такой работы стало распределение высокоэнергичных КЛ во внутренней гелиосфере в периоды низкой (1994–1996 гг.) и высокой (1998–2001 гг.) солнечной активности (рис. 11). В минимуме активности плотность КЛ сильно зависит от гелиодолготы и почти не зависит от расстояния до Солнца. В максимуме, напротив, широтная зависимость уменьшается, а радиальная становится главной.

Интересно отметить одно из следствий глобальной перестройки гелиосферы, в которой участвуют космические лучи. Величина 11-летней вариации КЛ вблизи полюсов оказывается существенно больше, чем вблизи гелиоэкватора, и, в частности, на Земле. В данных *Ulysses* есть указания на то, что во второй половине 2001 г. и в 2002 г. пространственное распределение КЛ во внутренней гелиосфере стало вновь перестраиваться, потеряв простую сферически симметричную форму и, возможно, частично восстановив положительный широтный градиент в высоких гелиоширотах.

Еще одним результатом использования GSM стала работа [Abunina et al., 2016], в которой исследовалось поведение КЛ в высокоскоростных потоках (ВСП) солнечного ветра. Изучение изменения индексов геомагнитной активности, а также плотности и анизотропии космических лучей в ВСП солнечного ветра из корональных дыр показало, что поведение векторной анизотропии космических лучей (особенно ее северо-южной составляющей) существенно зависит от полярности

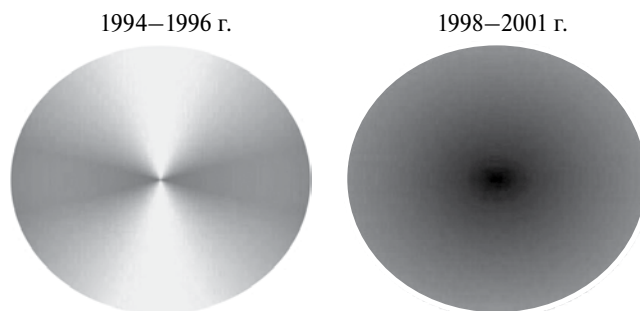


Рис. 11. Рассчитанное для минимума (1994–1996 гг.) и максимума (1998–2001 гг.) солнечной активности распределение протонов с энергией > 2 ГэВ/нуклон в сфере радиусом 5 а.е. вокруг Солнца, полученное по данным КА *Ulysses* и сети НМ.

магнитного поля в высокоскоростном потоке. Полученные результаты должны быть полезны для прогнозирования геомагнитной активности и диагностики крупномасштабных межпланетных возмущений.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная в ИЗМИРАН и описанная в данной работе версия метода глобальной съемки (GSM) позволила получить важные характеристики космических лучей (плотности и анизотропии КЛ) за пределами магнитосферы по данным мировой сети нейтронных мониторов. Параметры КЛ были получены для частиц с жесткостью 10 ГВ за каждый час для периода 1957–2015 гг. и объединены в специальную базу данных “Форбуш-эффекты и межпланетные возмущения” вместе с сопутствующими параметрами по солнечному ветру, межпланетной среде, с солнечными и геомагнитными данными. Это позволило максимально использовать результаты GSM для анализа различных проявлений солнечно-земных связей. Созданная база может также служить основой для разработки и улучшения различных методов прогнозирования космической погоды, для оценки предвестников Форбуш-эффектов и геомагнитных возмущений. Предварительная версия этой базы данных в интернете с открытым доступом находится по адресу <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>.

Авторы благодарны коллективам мировой сети станций космических лучей, обеспечивающим данные непрерывной регистрации нейтронной компоненты: http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/Our_Acknowledgment.pdf; благодарим базу данных NMDB (www.nmdb.eu), созданную в рамках программы FP7 Европейского Союза (контракт № 213007), за возможность использования большого объема данных нейтронных мониторов. Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 23 “Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика”, Программы № 7 “Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и взрывные процессы в астрофизике” и гранта РФФИ № 17–02–00508. Работа базируется также на экспериментальных данных УНУ № 85 “Российская национальная сеть станций космических лучей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Мюллер-Меллин Р., Хибер Б., Янке В.Г., Кунов Х. Широтные и радиальные вариации протонов и альфа частиц с энергией >2 GeV/p в южной гелиосфере в максимуме солнечной активности: наблюдения на КА Ulysses и сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 43. № 4. С. 1–9. 2003.
- Белов А., Асипенка А., Дрынъ Е., Ерошенко Е., Крякунова О., Оленева В., Янке В. Поведение векторной анизотропии космических лучей вблизи межпланетных ударных волн // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 73. № 3. С. 348–350. 2009.
- Дворников В.М., Сдобнов В.Е., Сергеев А.В. Метод спектрографической глобальной съемки для изучения вариаций интенсивности космических лучей межпланетного и магнитосферного происхождения / Вариации космических лучей и исследования космоса. ИЗМИРАН. С. 232–237. 1986.
- Дворников В.М., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Корональные выбросы массы и эффекты в космических лучах // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 70. № 10. С. 1504–1507. 2006.
- Дорман Л.И. Вариации космических лучей. М.: Гостехтеориздат, 492 с. 1957.
- Дорман Л.И., Янке В.Г. К теории метеорологических эффектов космических лучей, I // Изв. АН СССР. Сер. физ. Т. 35. № 12. С. 2556–2570. 1971a.
- Дорман Л.И., Янке В.Г. К теории метеорологических эффектов космических лучей, II // Изв. АН СССР. Сер. физ. Т. 35. № 12. С. 2571–2582. 1971b.
- Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясто М.И. Космические лучи в магнитном поле Земли. М.: Наука, 399 с. 1971.
- Дорман Л.И. Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 211 с. 1972.
- Коротков В.К., Беркова М.Д., Белов А.В., Кобелев П.Г., Ерошенко Е.А., Янке В.Г. Эффект снега в вариациях космических лучей и методы его учета // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 2. С. 250–256. 2011.
- Крымский Г.Ф., Алтухов А.М., Кузьмин А.И., Скрипин Г.В. Новый метод исследования анизотропии космических лучей // Исследование по геомагнетизму и аэрномии. М.: Наука, 105 с. 1966a.
- Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Чирков Н.П. и др. Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов. I. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 6. № 8. С. 991–996. 1966b.
- Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Чирков Н.П. и др. Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов. II. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 7. № 1. С. 11–15. 1967.
- Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А., Самсонов И.С., Скрипин Г.В., Транский И.А., Чирков Н.П. Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука, 224 с. 1981.
- Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 280 с. 1980.

- Чирков Н.П., Алтухов А.М., Крымский Г.Ф. и др. Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов. III. // Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 7. № 4. С. 621–631. 1967.
- Abunina M., Abunin A., Belov A., Eroshenko E., Gaidash S., Oleneva V., Yanke V., Kryakunova O. On the influence of the coronal hole latitude and polarity on the geomagnetic activity and cosmic ray variations / PoS (ICRC2015). Den Haag, Netherlands, 2015. ID082. 2016.
- Alania M., Szabelski J., Wawrzynczak A. Modeling and experimental study of the Forbush effects of galactic cosmic rays / Proc. 28th ICRC. Tsukuba, Japan, 2003. P. 3585–3588. 2003.
- Aleksanyan T.M., Bednazhevsky V.M., Blokh Y.L., Dorman L.I., Starkov F.A. Coupling coefficients of the neutron component for the stars of various multiplicities inferred from the measurements of the broad research vessel ‘Academician Kurchatov’ / Proc. 16th ICRC. Kyoto, Japan, 1979. V. 4. P. 315–320. 1979.
- Altuchov A.M., Krinsky G.F., Kuzmin A.I. The method of “Global survey” for investigation cosmic ray modulation / Proc. 11th ICRC. Budapest, Hungary, 1969. V. 4. P. 457–460. 1969.
- Asipenka A.S., Belov A.V., Eroshenko E.A., Klepach E.G., Oleneva V.A., Yanke V.G. Interactive database of cosmic ray anisotropy (DB A10) / Proc. 30th ICRC. Merida, Yucatán, Mexico, 2007. V. 1. P. 629–632. 2008.
- Belov A.V., Blokh Ya.A., Dorman L.I., Eroshenko E.A., Inozemtseva O.I., Kaminer N.S. Studies of isotropic and anisotropic cosmic ray variations in the Earth’s vicinities during disturbed periods / Proc. 13th ICRC. Denver, USA, 1973. V. 2. P. 1247–1255. 1973.
- Belov A.V., Blokh Ya.L., Dorman L.I., Eroshenko E.A., Inozemtseva O.I., Kaminer N.S. Anisotropy and time-dependent changes in the spectrum of cosmic-ray intensity variations during August, 1972 // Izv. AN SSSR. Ser. Fiz. V. 38. P. 1867–1875. 1974.
- Belov A.V., Eroshenko E.A. The reception coefficients of neutron monitors / Proc. 17th ICRC. Paris, France, 1981. V. 4. P. 97–100. 1981.
- Belov A.V. Large scale modulation: view from the Earth // Space Sci. Rev. V. 93. P. 79–105. 2000.
- Belov A. V., Eroshenko E.A., Heber B., Yanke V.G., Raviart A., Muller-Mellin R., Kunov H. Latitudinal and radial variation of >2 GeV/n protons and alpha particles in the southern heliosphere at solar maximum: Ulysses COSPIN KET and neutron monitor network observations // Ann. Geophysicae. V. 21. N 6. P. 1295–1302. 2003.
- Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., Yanke V., Mavromichalaki H., Plainaki C., Mariatos G., Pchelkin V. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // J. Geophys. Res. V. 110. A09S20. doi: 10.1029/2005JA011067. 2005.
- Belov A., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V. Connection of Forbush effects to the X-ray flares // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 70. N 2–4. P. 342–350. 2008.
- Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena / Proc. IAU Symposium. N 257. P. 119–130. 2009.
- Bieber J., Evenson P. Spaceship Earth – an optimized network of neutron monitor / Proc. 24th ICRC. Rome, Italy, 1995. V. 4. P. 1316–1319. 1995.
- Cane H. Coronal mass ejections and Forbush decreases // Space Sci. Rev. V. 93. N 1/2. P. 55–77. 2000.
- Carmichael H., Shea M.A., Smart D.F., McCall J.R. Geographically smoothed geomagnetic cutoffs // Canadian J. Phys. V. 47. P. 2067–2072. 1969.
- Clem J.M., Dorman L.I. Neutron Monitor Response Functions // Space Sci. Rev. V. 93. P. 335–359. 2000.
- Dorman L.I., Fedchenko S.G., Granitsky L.V., Rishe G.A. Coupling and barometer coefficients for measurements of cosmic ray variations at altitudes of 260–400 mb / Proc. 11th ICRC, Budapest, Hungary, 1969. V. 29. P. 233–236. 1970.
- Dorman L.I., Smirnov V.S., Tyasto M.I. Cosmic rays in the Earth’s magnetic field. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, (for sale by the National Technical Information Service, Springfield, VA), 431 p. 1973.
- Dorman L.I. Cosmic rays in magnetospheres of the Earth and other planets. Springer Science+Business Media B.V., 800 p. 2009.
- Dorman L.I. Cosmic rays in the Earth’s atmosphere and underground. Springer, 862 p. 2010.
- Dvornikov V. M., Sdobnov V.E., Sergeev A.V. Analysis of cosmic ray pitch-angle anisotropy during the Forbush-effect in June 1972 by the method of spectrographic global survey / Proc. 18th ICRC. Bangalore, India, 1983. V. 3. P. 249–252. 1983.
- Evenson P., Pyle R. The University of Delaware’s Bartol Neutron Monitor Network. http://cosray.phys.uoa.gr/images/Pres/Posters/P01_Evenson_Pyle.pdf. 2017.
- Kobelev P., Belov A., Eroshenko E., Yanke V. Coupling coefficients and energy characteristics of the ground level cosmic ray detectors / Proc. 33rd ICRC. Rio de Janeiro, Brazil, 2013. ID878. 2013.
- Korotkov V., Berkova M., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Pyle R. Procedure to emend neutron monitor data that are affected by snow accumulations on and around the detector housing // J. Geophys. Res.— Space. V. 118. N11. P. 6852–6857. 2013.
- Lockwood J.A. Forbush decreases in the cosmic radiation // Space Sci. Rev. V. 12. N5. 658–715. 1971.
- Lockwood J.A. List of Forbush decreases 1954–1990 with supplemental information // Solar Geophys. Data. N 549. P. 154–163. 1990.
- McCracken K.G., Rao V.R., Shea M.A. The trajectories of cosmic rays in a high degree simulation of the geomagnetic field. Technical report (Massachusetts Institute of Technology), 77 p. N77. 1962.
- McCracken K.G., Rao V.R., Fowler B.C., Shea M.A., Smart D.F. Cosmic ray tables (asymptotic directions, variational

- coefficients and cut-off rigidities). IQSY instruction manual, 183 p. N 10. 1965.
- *Moraal H., Belov A., Clem J.* Design and co-ordination of multi-station international neutron monitor network // *Space Sci. Rev.* V. 93. P. 285–303. 2000.
- *Nagashima K.* Three-dimensional cosmic ray anisotropy in interplanetary space // *Rep. Ionosphere Space Res.* V. 25. P. 189–211. 1971.
- *Nagashima K., Sakakibara S., Murakami K., Morishita I.* Response and yield functions of neutron monitor, galactic cosmic-ray spectrum and its solar modulation, derived from all the available world-wide surveys // *Nuovo Cimento C.V.* 12. N 2. P. 173–209. 1989.
- *Pomerantz M.A., Duggal S.P.* North-south anisotropies in the cosmic radiation // *J. Geophys. Res.* V. 77. P. 263–265. 1972.
- *Richardson I.G., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Cane H.V.* Bidirectional particle flows at cosmic ray and lower (~ 1 MeV) energies and their association with interplanetary coronal mass ejections/ejecta // *J. Geophys. Res.* V. 105. N A6. P. 12579–12592. 2000.
- *Russell C.T.* Geophysical coordinate transformations // *Cosmic Electrodyn.* V. 2. P. 184–196. 1971.
- *Shea M.A., Smart D.F., McCall J.R.* A five degree by fifteen degree world grid of trajectory-determined vertical cutoff rigidities // *Canadian J. Phys.* V. 46. P. 1098–1101. 1968.
- *Shea M.A., Smart D.F., Humble J.E., Fluckiger E.O., Gentile L.C., Nichol M.R.* A revised standard format for cosmic ray ground-level event data / *Proc. 20th ICRC.* Moscow, USSR, 1987. V. 3. P. 171–174. 1987.
- *Smart D.F.* World grid of calculated cosmic ray vertical cutoff rigidities for epoch 1990.0 / *Proc. 25th ICRC,* Durban, South Africa, 1997. V. 2. P. 401–404. 1997.
- *Yasue S., Mori S., Sakakibara S., Nagashima K.* Coupling coefficients of cosmic ray daily variations for neutron monitor stations. Nagoya, 225 p. N 7. 1982.