

УДК 524.1-352

МЕТОД КОЛЬЦА СТАНЦИЙ В ИССЛЕДОВАНИИ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ: 1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ

© 2020 г. М. А. Абунина^{1, *}, А. В. Белов^{1, **}, Е. А. Ерошенко^{1, ***},
А. А. Абунин^{1, 2}, В. А. Оленева¹, В. Г. Янке¹, А. А. Мелкумян³

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

²Калмыцкий государственный университет им. Б.Б. Городовикова, г. Элиста, Россия

³Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, г. Москва, Россия

*e-mail: abunina@izmiran.ru

**e-mail: abelov@izmiran.ru

***e-mail: erosh@izmiran.ru

Поступила в редакцию 15.03.2019 г.

После доработки 29.07.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

Уже более 60 лет нейтронные мониторы остаются главным, стандартным и стабильным инструментом для измерения космических лучей с энергией от 400 МэВ до сотен ГэВ. Чтобы получать достаточно полную информацию о распределении космических лучей за пределами магнитосферы, нужно иметь сеть детекторов, достаточно равномерно расположенных по земному шару. Одним из наиболее полезных методов, позволяющих получить свойства углового распределения космических лучей без разложения на гармоники, является метод кольца станций. Он позволяет получить мгновенное (точнее, ежечасное) долготное распределение интенсивности космических лучей, не прибегая к его моделированию. Главная цель данной работы — расширить использование метода кольца станций, удобного и полезного метода исследования вариаций космических лучей.

DOI: 10.31857/S0016794020010022

1. ВВЕДЕНИЕ

Непрерывный мониторинг космических лучей (КЛ) наземными детекторами проводится вот уже более полувека (с 1957 г.), но в последние годы он изменился качественно, и его возможности существенно расширились. Интернет дает возможность, наряду с данными локальных детекторов, оперативно собирать и обрабатывать данные удаленных станций КЛ. Это позволяет определять характеристики релятивистских КЛ за пределами земной магнитосферы, и не ретроспективно, а в режиме реального времени. Более того, эти характеристики можно анализировать совместно с другими регулярно обновляемыми рядами солнечных, межпланетных и геофизических данных. Таким образом, есть возможность использовать наземные наблюдения не только в обычных научных исследованиях, но и для решения повседневных практических задач космической погоды.

Уже более 60 лет нейтронные мониторы (НМ) [Simpson, 1957; Hatton and Carmichael, 1964] остаются главным, стандартным и высокоточным ин-

струментом для измерения космических лучей с энергией от 400 МэВ до сотен ГэВ. Следует подчеркнуть, что наиболее надежная информация о вариациях космических лучей была получена именно благодаря этим детекторам. На сегодняшний день мировая сеть нейтронных мониторов насчитывает ~50 действующих детекторов, из которых 14 — российские.

Данные одного нейтронного монитора не могут дать представления обо всем угловом распределении космических лучей. Чтобы получать достаточно полную информацию о распределении КЛ за пределами магнитосферы, нужно иметь сеть детекторов, достаточно равномерно расположенных по земному шару. Если распределение космических лучей 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 нейтронным монитором уже не обойтись: так, для первой сферической гармоники необходимо, как минимум, четыре детектора, для второй —

уже, как минимум, девять приборов [Крымский и др., 1981].

Основным методом выделения вариаций первичных космических лучей является метод глобальной съемки [Крымский и др., 1966, 1981; Белов и др., 2018; Belov et al., 2018]. Этот метод объединяет одновременные наземные наблюдения космических лучей на отдельных детекторах для получения основных характеристик вариаций космических лучей за пределами атмосферы и магнитосферы Земли. В данном методе вся сеть нейтронных мониторов используется как единый многоканальный прибор, где в роли каждого канала выступает станция, которая получает информацию из определенного конуса приема, а все каналы целиком перекрывают небесную сферу.

Метод глобальной съемки — это лучший выбор для выделения гармоник углового распределения космических лучей, что делает его эффективным средством для большинства периодов и большинства явлений в космических лучах. Однако и этот метод не универсален. Встречаются такие периоды и такие явления, в которых разложение интенсивности КЛ на сферические гармоники не эффективно. Наиболее очевидный и яркий пример такого рода — угловое распределение солнечных КЛ в начале практически любого протонного возрастания (см. напр., [Belov et al., 2005b]). В галактических космических лучах такие ситуации реже, но они, все-таки, встречаются. И они требуют особого подхода и специальных методик. Одним из примеров таких явлений является угловое распределение КЛ, которое может свидетельствовать о необычной ситуации в околоземном космическом пространстве.

Метод кольца станций появился раньше метода глобальной съемки, впервые он был описан Parsons [1960]. Сейчас этот метод применяется, в частности, для представления углового распределения данных в реальном времени (напр., Kuwabara et al., 2006]) (<http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather>; <http://cr0.izmiran.ru/AnisotropyCR/main.htm>).

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Одним из наиболее полезных методов, позволяющих получать свойства углового распределения КЛ без разложения на гармоники, является метод кольца станций. Он позволяет получить мгновенное (точнее, ежечасное) долготное распределение интенсивности КЛ, не прибегая к его моделированию. Данный метод основан на том, что хотя нейтронный монитор и не считается узконаправленным детектором, все-таки основной вклад в его скорость счета вносят первичные КЛ, приходящие с достаточно узкой полосы долгот. Каждая станция КЛ (каждая точка наблюдений)

характеризуется своим конусом приема, который определяется асимптотическими направлениями прихода частиц к Земле. Правда, не для всех нейтронных мониторов эти конуса одинаковы: для самых высокоширотных (приполярных) и самых низкоширотных долготная полоса будет слишком широкой, и такие станции не годятся для метода кольца станций.

На рисунке 1 (верхняя панель) показано расположение используемых в методе кольца станций нейтронных мониторов (кружки), а на нижней панели — эффективное асимптотическое направление для первой гармоники анизотропии этих станций. Основные характеристики указанных станций приведены в табл. 1.

Рисунок 1 (нижняя панель) показывает, что эффективные широты станций образуют кольцо около экватора. Эффективные направления прихода частиц даны для спокойных условий для вертикально падающих частиц. Реально направления прихода частиц на конкретный детектор распределены намного шире, что демонстрирует рис. 2, но находятся примерно в указанной области.

На рисунке 2 показаны асимптотические направления некоторых НМ для вертикально падающих частиц разной энергии и выделены точки с жесткостью 10 ГВ, которая близка к эффективной жесткости высокоширотных нейтронных мониторов.

Наиболее подходящими для метода кольца станций являются достаточно высокоширотные, но не приполярные, станции (табл. 1). В табл. 1 и на рис. 1, 2 используются 4-символьные названия станций по формату, разработанному для стандартизации списка станций при исследовании наземных возрастаний солнечных КЛ [Shea et al., 1987]. Благодаря узкой долготной приемной зоне, они обладают самой высокой чувствительностью к долготной анизотропии КЛ, что выражается в самых больших приемных коэффициентах для экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ и самых больших наблюдаемых суточных вариациях. К счастью, таких станций в мировой сети много, больше, чем станций других типов (см., напр., [Moraal et al., 2000]). Они сосредоточены, в основном, в северном полушарии. Это очевидный недостаток для глобальной съемки, но явное достоинство для метода кольца станций. По долготе станции распределены неравномерно, но достаточно широко (рис. 3).

Сравнивая вариации КЛ на таких станциях, можно получить их долготное распределение за любой интервал времени. При этом не важно, будет ли это распределение близко к синусоиде, или к сумме синусоид, или иметь более сложную форму. Однако при выборе станций следует соблюдать и другие требования, чтобы на долготное

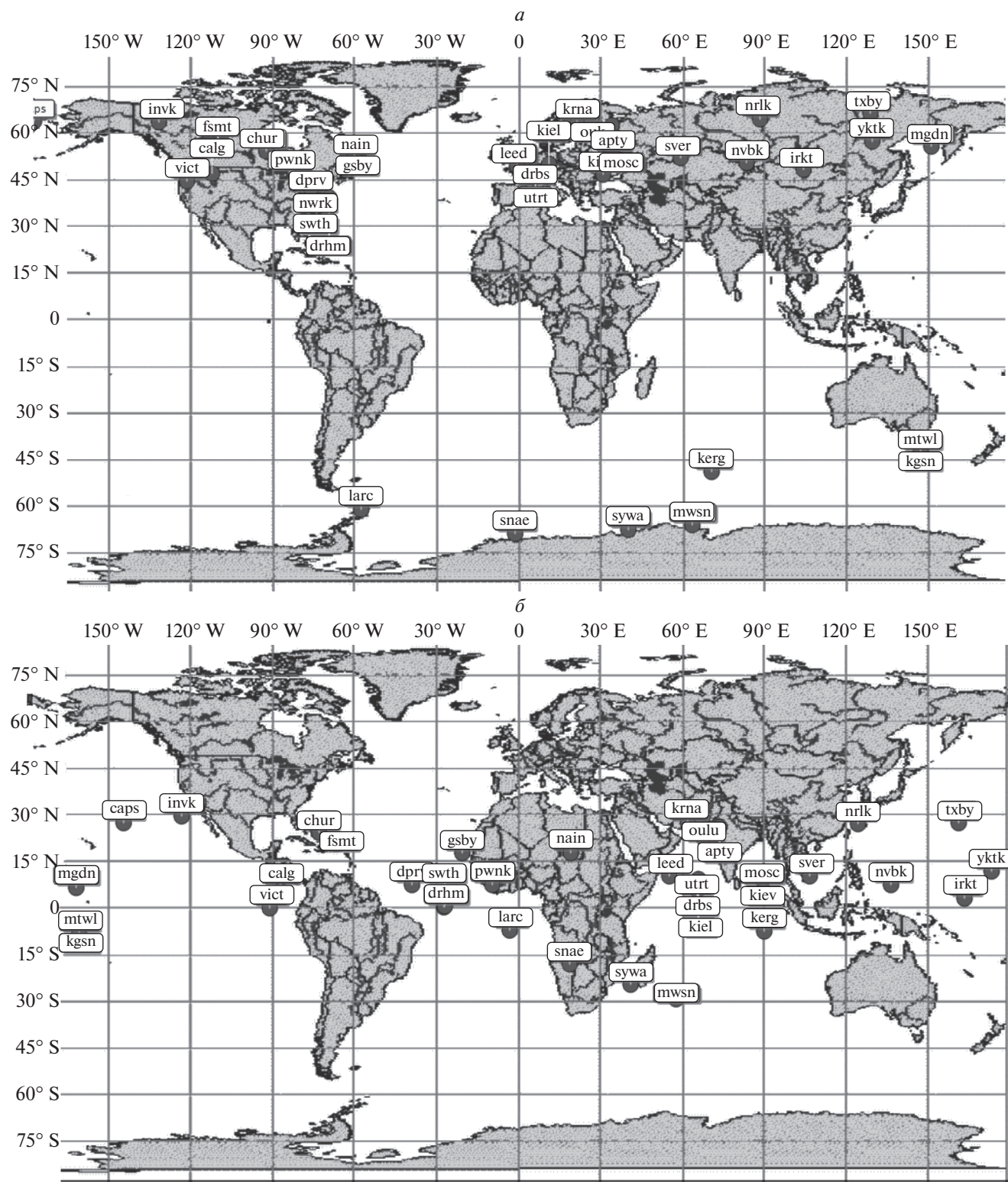


Рис. 1. Станции нейтронных мониторов, подходящие для метода кольца станций: *a* – географическое местоположение; *b* – эффективное асимптотическое направление для первой гармоники анизотропии.

распределение не повлияли другие, не связанные с анизотропией КЛ этого рода, или, вообще, не связанные с анизотропией вариации. В данной

работе обсуждается применение метода кольца станций для изучения вариаций галактических КЛ. Для солнечных КЛ этот метод, по-видимому, так-

Таблица 1. Нейтронные мониторы, используемые в методе кольца станций

№	Расположение	Название	Широта	Долгота	R_c 1973	R_c 2015	Высота, м	Существующие сейчас/год закрытия
1.	Apatity	apty	67.55	33.33	0.59	0.5	177	+
2.	Calgary	calg	51.08	-114.13	1.06	1.13	1128	+
3.	Capeschmidt	caps	68.92	-179.47	0.55	0.45	0	+
4.	Churchill	chur	58.8	-94.1	0.2		39	1973
5.	Deepriver	dprv	46.10	-77.50	1.06		145	1995
6.	Dourbes	drbs	50.10	4.6	3.25	3.31	225	+
7.	Durham	drhm	43.10	-70.83	1.52		0	1991
8.	Fortsmith	frsm	60.02	-112.00	0.29	0.32	0	+
9.	Goosebay	gsby	53.27	-60.40	0.57	0.89	46	+
10.	Inuvik	invk	68.35	-133.72	0.17	0.15	21	+
11.	Irkutsk	irkt	52.47	104.02	3.57	3.11	433	+
12.	Kerguelen	kerg	-49.35	70.25	1.11	1.07	33	+
13.	Kiel	kiel	54.33	10.11	2.29	2.27	54	+
14.	Kiev	kiev	50.72	30.30	3.49		120	1998
15.	Kingston	kgsn	-42.99	147.29	1.81	1.83	65	+
16.	Kiruna	krna	67.8	20.4	0.5		400	1974
17.	Larc	larc	-62.20	-58.96	3.4	2.56	40	+
18.	Leeds	leed	53.8	-1.6	2.17		100	1983
19.	Magadan	mgdn	60.12	151.02	2.04	1.77	0	+
20.	Mawson	mwsn	-67.60	62.88	0.19	0.18	0	+
21.	Moscow	mosc	55.47	37.32	2.35	2.12	200	+
22.	Mt. Wellington	mtwl	-42.92	147.24	1.8	1.86	725	+
23.	Nain	nain	56.55	-61.68	0.35	0.55	0	+
24.	Newark	nwrk	39.68	-75.75	1.99	2.52	50	+
25.	Norilsk	nrlk	69.26	88.05	0.58	0.45	0	+
26.	Novosibirsk	nvbk	54.80	83.00	2.79	2.37	163	+
27.	Oulu	oulu	65.02	25.50	0.78	0.7	15	+
28.	Peawanuck	pwnk	54.98	-85.44	0.34	0.48	0	+
29.	Sanae	snae	-71.67	-2.85	0.87	0.72	856	+
30.	Sverdlovsk	sver	56.4	58.6	2.22		300	1988
31.	Swarthmore	swth	39.9	-75.3	1.94		80	1978
32.	Syowa	sywa	-69	39.6	0.42		15	1974
33.	Tixiebay	txby	71.60	128.90	0.47	0.36	0	+
34.	Utrecht	utrt	52.1	5.1	2.74		1	1978
35.	Victoria	vict	48.4	-123.3	1.78		71	1973
36.	Yakutsk	yktk	62.02	129.73	1.62	1.37	105	+

Примечание: не приведены станции, закрытые до 1971 г. и/или с нейтронными мониторами типа IGY.

же применим, однако особенности его приспособления к такого рода задачам — это тема отдельного обсуждения.

В первом варианте метода кольца станций [Parsons, 1960] использовалось всего девять нейтронных мониторов. Понятно, что этого не до-

статочно, чтобы получить надежные характеристики анизотропии КЛ за каждый час. Сегодня можно использовать больше нейтронных мониторов (десятки) с большой площадью. Увеличение числа станций позволяет существенно улучшить угловое и временное разрешение. Однако

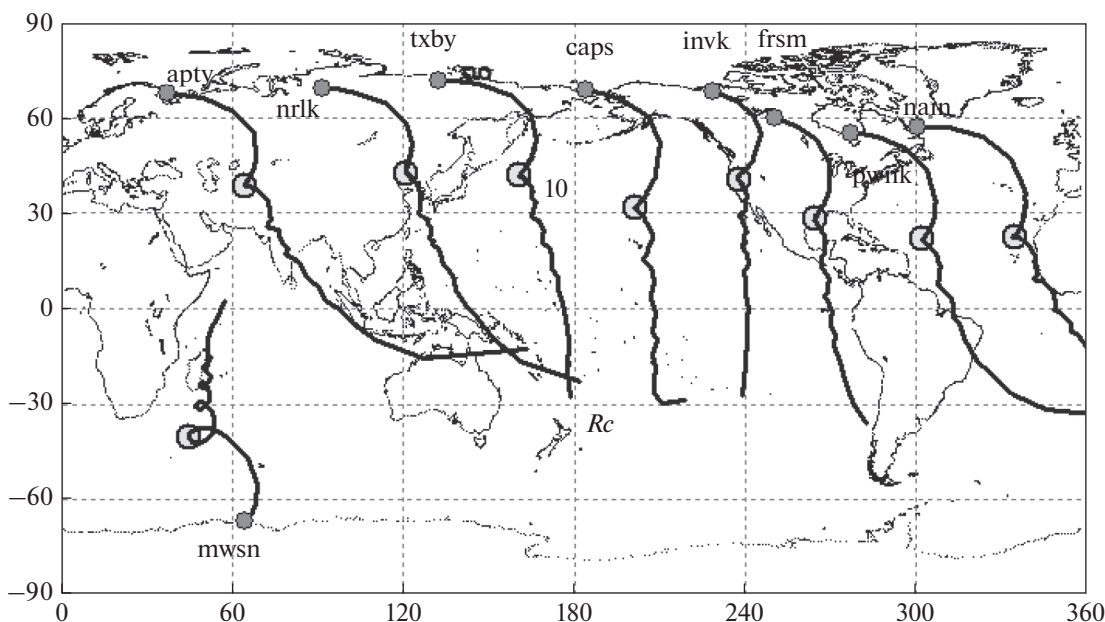


Рис. 2. Асимптотические направления некоторых детекторов для вертикально падающих частиц разной энергии, кружком обозначено асимптотическое направление, соответствующее частицам 10 ГВ.

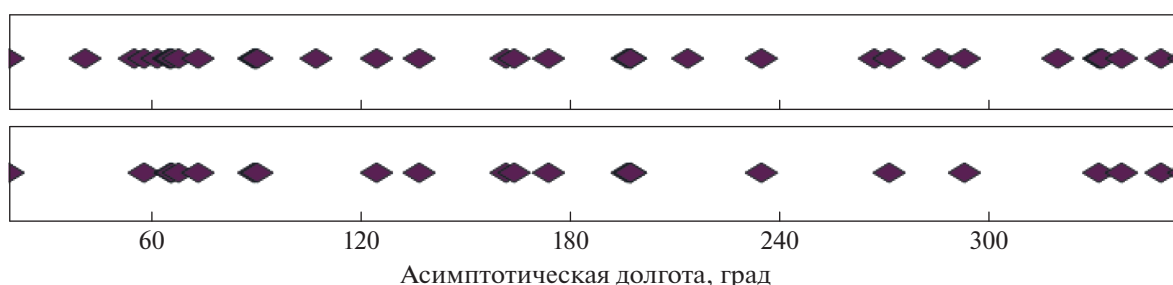


Рис. 3. Распределение используемых в методе кольца станций нейтронных мониторов по асимптотическим долготам: верхняя панель – нейтронные мониторы с 1971 г.; нижняя панель – действующие в настоящее время.

это справедливо не для всех станций, а только для специальным образом отобранных. Выбор станций – это необходимый подготовительный этап, критически важный для качества и надежности результатов метода кольца станций. В достаточно общем виде вариацию скорости счета δ_i нейтронного монитора i можно записать так:

$$\delta_i = \delta_{i0} + \delta_{iae} + \delta_{iaz} + \delta_{imag} + \delta_{iatm} + \delta_{iap} + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где δ_{i0} – вклад изотропной вариации первичных КЛ; $\delta_{iae} + \delta_{iaz}$ – вклад анизотропии первичных КЛ, разделенный на тессеральную δ_{iae} (в плоскости земного экватора) и зональную δ_{iaz} (северо-южную) составляющие; δ_{imag} , δ_{iatm} , δ_{iap} – вариации магнитосферного, атмосферного и аппаратного происхождения соответственно и ε_i – случайная часть вариации (не связанная с перечисленными выше типами вариаций). Метод кольца станций нацелен на выделение δ_{iae} (анизотропии КЛ, наблюдаемой в плоскости земного экватора), остальные же слагаемые (1) являются для него помехой. Более точно, помехой является возможная долготная зависимость различных составляющих вариации, а вариации, не зависящие от долготы, менее критичны.

Примером такой, не зависящей от долготы, вариации является изотропная вариация δ_{i0} . Она существует постоянно, и иногда может быть очень большой (до 20%–30% в самых значительных Форбуш-понижениях), но по определению не должна зависеть от долготы. В реальности такая зависимость может обнаружиться, если станции имеют различные жесткости геомагнитного обреза и расположены на различных высотах. Величина δ_{i0} слабо зависит от жесткости геомагнитного обреза для высокоширотных станций с жесткостью геомагнитного обреза $R_i < 2$ ГВ. Для среднеширотных и низкоширотных станций

зависимость δ_{j0} от R_i сильная и близость величин δ_{j0} существует в очень узком диапазоне R_i . Это обстоятельство, а также малое количество станций КЛ с большими величинами жесткостей геомагнитного обрезания делает практически невозможным применение метода кольца станций к данным низко- и среднеширотных нейтронных мониторов. Величины δ_{j0} будут различны даже для станций с одинаковыми R_i , если эти станции расположены на разных высотах, но глубоко в атмосфере зависимость от высоты достаточно слабая. Таким образом, уже рассмотрение влияния изотропных вариаций приводит к выводу, что метод кольца станций можно эффективно использовать только для высокоширотных нейтронных мониторов, расположенных вблизи уровня моря.

Вариация δ_{imag} магнитосферного происхождения [Belov et al., 2005a, 2015], обусловленная изменениями порогов геомагнитного обрезания, существенно меньше, чем изотропная вариация. Она появляется намного реже, но во время геомагнитных возмущений может быть значительной, сравнимой с анизотропными вариациями и даже превышать их. Наибольшие величины магнитосферных вариаций наблюдаются на средних широтах и на высокогорных станциях. В высоких широтах они пренебрежимо малы. Поэтому высокоширотные нейтронные мониторов можно использовать в методе кольца станций и во время значительных геомагнитных возмущений.

Не опасны для этого метода и вариации атмосферного происхождения δ_{iam} , поскольку зависимость скорости счета нейтронных мониторов от атмосферной температуры мала [Belov et al., 2001], а поправка на барометрический эффект обычно вводится достаточно точно. Особые же вариации атмосферного происхождения, например, эффект снега (см., напр., [Korotkov et al., 2013]), проявляются достаточно редко и только в определенных сезоны. Они требуют отдельного анализа, который может исправить на эффект снега или привести к отбраковке данных определенной станции для отдельного периода. То же относится и к возможным вариациям δ_{iap} аппаратного (или методического) происхождения. Достаточно большие вариации такого рода должны отбраковываться на этапе выбора станций, а маленькие, трудно выделяемые, вариации фактически добавятся к статистической погрешности ϵ_i . Таким образом, можно видеть, что все не анизотропные вариации КЛ либо незначительно влияют на долготную зависимость вариаций КЛ, наблюдаемых высокоширотными нейтронными мониторами, либо это влияние нетрудно устранить.

Существенным мешающим фактором может стать влияние зональных составляющих анизотропии, в первую очередь, северо-южной асим-

метрии КЛ. Зональные составляющие имеют величину, сравнимую с величиной солнечно-суточной вариации и могут существенно исказить искомое долготное распределение. Чтобы этого не произошло, надо исключить станции с высокой чувствительностью к зональным составляющим анизотропии. Таких станций немного, это, прежде всего, приполярные детекторы с большими (по абсолютной величине) значениями приемного коэффициента C_{10} для северо-южной анизотропии (станции Thule, McMurdo и еще несколько арктических и антарктических станций). Эти станции чрезвычайно ценны для метода глобальной съемки, но в кольце станций от них будет только вред. Нежелательно также объединять станции из разных полушарий (северного и южного).

Из сказанного следует, что для кольца станций целесообразно отбирать высокоширотные, но не приполярные и не высокогорные нейтронные мониторов, и лучше из одного (северного) полушария. Для этого можно использовать высоту h_i и географическую широту λ_i станций, жесткость геомагнитного обрезания R_i и стандартное атмосферное давление P_i , приемные коэффициенты C_{11}^i для солнечно-суточной и C_{10}^i для северо-южной составляющих векторной анизотропии. Набор ограничений для станций кольца может выглядеть так:

$$\lambda_{id} < \lambda_i < \lambda_{iu}, \quad h_i < h_{iu}, \quad P_i > P_{id}, \quad R_i < R_{iu}, \quad (2)$$

$$C_{10}^d < C_{10}^i < C_{10}^u.$$

Ограничивающие параметры λ_{id} , λ_{iu} , h_{iu} , P_{id} , R_{iu} , C_{10}^d , C_{10}^u можно подбирать исходя из решаемой задачи, исследуемого периода и имеющихся данных. Количество ограничений можно уменьшить, поскольку некоторые параметры отчасти дублируют друг друга, например высота h и атмосферное давление P или географическая широта λ и приемный коэффициент для зональной составляющей первой гармоники C_{10} . Однако в целом, ограничения (2) из всех детекторов мировой сети оставляют только часть и эти детекторы, действительно, охватывают земной шар достаточно узким по широте кольцом.

Для отобранных станций выражение (1) упрощается, в нем можно пренебречь большей частью слагаемых. Это даст:

$$\delta_i = \delta_0 + \delta_{iae} + \epsilon_i,$$

здесь δ_0 — вариация, усредненная по всему кольцу, а ϵ_i — случайная составляющая, в которую кроме статистической погрешности могут входить и остаточные вариации, если вариации, которыми мы пренебрегли, отличаются от нуля.

Наблюдаемая в момент времени t на детекторе i анизотропная часть вариации $\delta(t) = \delta_i - \delta_0$ будет приблизительно соответствовать анизотропии первичных КЛ на асимптотической долготе $\varphi = \varphi_i(t) + \Delta\varphi_i$, где $\varphi_i(t)$ — это географическая долгота станции в фиксированной системе координат и зависящая от времени $\varphi_i(t)$, а $\Delta\varphi_i$ — это эффективный снос частиц в магнитосфере Земли, из-за которого асимптотическое расположение станций обычно существенно восточнее, чем географическое. Вместо асимптотических долгот иногда используются питч-углы (углы между направлением прихода частиц и силовой линией межпланетного магнитного поля); у такого варианта есть свои преимущества, но недостатком является необходимость иметь данные о межпланетном магнитном поле [Kuwabara et al., 2006].

Зависящая от долготы φ часть анизотропии КЛ за пределами магнитосферы Земли, может быть представлена (в отдельных точках, соответствующих отдельным нейтронным мониторам) так:

$$\delta(\varphi_i(t) + \Delta\varphi_i) = (\delta_i - \delta_0) / C_{11}^i,$$

где деление на C_{11}^i выполняет две функции: нормировки и перехода к внешней, не зависящей от конкретных детекторов, анизотропии КЛ. Таким образом, за каждый час можно получать долготное распределение анизотропии первичных КЛ, заранее не предполагая его форму.

Таким образом, критерии выбора НМ, которые можно использовать в методе кольца станций, в общем случае, следующие:

- жесткость геомагнитного обрезания $Rc < 4$ ГВ;
- высота станции над уровнем моря $h_i < 1200$ м;
- приемные коэффициенты для северо-южной составляющей векторной анизотропии КЛ $abs(C_{10}^i) < 0.55$.

Следует помнить и об особенностях исследуемых событий, т.к. при больших возмущениях критерии отбора должны быть более строгими. Например, при большой изотропной и/или магнитосферной вариации лучше использовать только станции с жесткостью геомагнитного обрезания $Rc < 3$ ГВ. Или, в отдельных случаях, если в событии зарегистрирована большая северо-южная анизотропия, то лучше исключить НМ с приемными коэффициентами $abs(C_{10}^i) > 0.3$. Также для исследования лучше не использовать данные станций с нейтронными мониторами типа IGY, поскольку их статистическая точность существенно хуже и применимость этих НМ в методе кольца станций ограничена.

При работе с методом кольца станций следует помнить, что жесткости геомагнитного обрезания меняются со временем [Shea et al., 1975; Gvozdevsky et al., 2018]. Поэтому для более точных

результатов необходимо обновлять эти данные. В таблице приведены жесткости геомагнитного обрезания за 1973 и 2015 гг., рассчитанные группой российских ученых [Gvozdevsky et al., 2018].

Однако у метода кольца станций есть свои проблемы и ограничения. Понятно, что из-за того что нейтронные мониторы собирают частицы с широкой долготной зоны, нельзя рассчитывать на выявление мелких деталей (шириной 5–10 град.). Такие особенности будут сглаживаться, и анизотропия в этих случаях будет занижаться. Не менее очевидно, что из-за неравномерности в распределении нейтронных мониторов по земному шару, в тех зонах, которые в данный момент соответствуют европейской или американской части мировой сети станций, долготная зависимость будет определяться точнее и надежнее, чем в зонах, соответствующих Атлантике и, тем более, Тихому океану. Нужно также учитывать, что энергетический спектр анизотропии КЛ может изменяться и отличаться от того спектра, который применялся при вычислении параметров C_{11}^i и $\Delta\varphi_i$. Это (и другие возможные отличия) приведет к искажению получаемой долготной зависимости, правда, эти искажения при хорошем подборе станций не могут быть велики. Более серьезной проблемой могут стать особенности, принципиально отличающие метод кольца станций от метода глобальной съемки: его результаты трудно выразить количественно и трудно организовать контроль качества этих результатов.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод кольца станций, наряду с методом глобальной съемки, является полезным инструментом для изучения вариаций космических лучей, в первую очередь Форбуш-эффектов и их предвестников.

Главным достоинством этого метода является его независимость от конкретных моделей: фактически он является удобным представлением необработанных вариаций скорости счета отдельных нейтронных мониторов.

Эффективность метода была неоднократно доказана на практике, что будет детально обсуждено (с описанием примеров использования метода) в следующей статье [Абунина и др., 2020].

4. БЛАГОДАРНОСТИ

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). Работа базируется на экспериментальных данных УНУ

“Российская национальная сеть станций космических лучей”.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 3, гранта РФФИ № 17-02-00508 и гранта РНФ № 15-12-20001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абунина М.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г., Мелкумян А.А. Метод кольца станций в исследовании вариаций космических лучей: 2. Примеры использования // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 60. № 2. 2020.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г., Оленева В.А., Абунин А.А., Абунина М.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 3. С. 374–389. 2018.
- 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. 1966.
- 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.
- Belov A.V., Bieber J.W., Eroshenko E.A., Evenson P., Pyle R., Yanke V.G. Pitch-angle features in cosmic rays in advance of severe magnetic storms: neutron monitor observations / Proc. 27th ICRC. Hamburg, Germany, 2001. P. 3507–3510. 2001.
- Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Yanke V., Pchelkin V., Plainaki C., Mariatos G. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // J. Geophys. Res. V. 110. A09S20. 2005a. <https://doi.org/10.1029/2005JA011067>
- Belov A., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Plainaki C., Yanke V. Solar cosmic rays during the extremely high ground level enhancement on 23 February 1956 // Ann. Geophys. V. 23. I. 6. P. 2281–2291. 2005b.
- Belov A., Abunin A., Abunina M., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V., Papaioannou A., Mavromichalaki H. Galactic cosmic ray density variations in magnetic clouds // Solar Phys. V. 290. I. 5. P. 1429–1444. 2015.
- Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Oleneva V., Abunin A., Abunina M., Papaioannou A., Mavromichalaki H. The Global Survey Method applied to ground-level cosmic ray measurements // Solar Phys. V. 293. I. 4. ID 68. 2018.
- Gvozdevsky B., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Gushchina R., Ptuskin V. Geomagnetic cutoff rigidities of cosmic rays and their secular changes / Proc. 42nd COSPAR Scientific Assembly. California, USA, 2018. ID. D1.2-31-18. 2018.
- Hatton C.J., Carmichael H. Experimental investigation of the NM-64 neutron monitor // Can. J. Phys. V. 42. P. 2443–2472. 1964.
- 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. № 11. P. 6852–6857. 2013.
- Kuwabara T., Bieber J. W., Clem J. et al. Real-time cosmic ray monitoring system for space weather // Space Weather. V. 4. S08001. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005SW000204>
- 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.
- Parsons N. Effects of short-term world-wide modulation of the primary cosmic radiation on observed daily intensity variations // J. Geophys. Res. V. 65. № 10. P. 3159–3161. 1960.
- Shea M.A., Smart D.F. A five by fifteen degree world grid of calculated cosmic ray vertical cutoff rigidities for 1965 and 1975 / Proc. 14th ICRC. Munchen, Germany, 1975. V. 4. P. 1298–1303. 1975.
- 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.
- Simpson J.A. Cosmic-radiation neutron intensity monitor // Annals of the IGY. V. 4. P. 351–373. 1957.