

УДК 524.1

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ГЕЛИОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СЕТИ СТАНЦИЙ МЮОННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

© 2019 г. В. Г. Григорьев¹, *, П. Ю. Гололобов¹, П. А. Кривошапкин¹,
Г. Ф. Крымский¹, В. Г. Янке²

¹Институт космофизических исследований и аэронауки имени Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра
“Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук”, Якутск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: grig@ikfia.ysn.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

В ИКФИА в 1960-х гг. был разработан метод глобальной съемки, позволяющий использовать всю мировую сеть нейтронных мониторов в качестве единого многонаправленного прибора, позволяющего получать информацию о распределении космических лучей (КЛ) в межпланетном пространстве за каждый измеряемый момент времени. По аналогии с этим подходом в данной работе представлен вариант нового метода, использующий данные измерений станций мировой сети мюонных телескопов Хобарт, Кувейт, Нагоя, Сао-Мартиньо и Якутск. Произведены расчеты приемных характеристик указанных станций, учитывающие: траектории частиц, диаграммы направленности приборов, коэффициенты связи и энергетический спектр предполагаемых вариаций КЛ. Реализация и совершенствование этого метода позволит в дальнейшем получать новую информацию о динамике распределения КЛ в удаленных областях гелиосферы.

DOI: 10.1134/S0367676519050144

ВВЕДЕНИЕ

Разработанный в 1960-х гг. в ИКФИА метод глобальной съемки [1] и другие ее варианты [2–4] позволяют рассматривать мировую сеть нейтронных мониторов как единый многонаправленный прибор, охватывающий в каждый измеряемый момент времени практически всю небесную сферу. Получаемая при этом информация о распределении КЛ отражает глобальную картину процессов модуляции и их динамику в межпланетной среде.

Развитие мировой сети мюонных телескопов, позволяет реализовать на основе их данных, аналогичную методику по исследованию КЛ. Эффективные энергии регистрации мюонной компоненты много выше, чем у нейтронных мониторов, и получаемая информация при таком подходе позволит исследовать динамику процессов в распределении КЛ, отражающих структуру гелиосферы в ее удаленных областях. Современные мюонные телескопы регистрируют КЛ одновременно с более чем 10-ти различных

узкоугольных направлений. Поэтому использование данных даже нескольких разнесенных по долготе и широте стабильно работающих станций мюонных телескопов, позволит реализовать достаточно информативную методику определения параметров распределения КЛ в гелиосфере. Это стало практически возможным с созданием глобальной сети мюонных детекторов GMDN (<http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/db/public/archives/gmdn.php>) и базы данных мировой сети мюонных телескопов MDDDB с ее приложениями (<http://crsa.izmiran.ru/phpmyadmin>). В данной работе приводятся результаты реализации методики, аналогичной методу глобальной съемки, основанной на измерениях сети мюонных телескопов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Для анализа использованы данные измерений в 2012 г. станций: Хобарт (43.0 S, 147.3 E), Кувейт (29.4 N, 48.0 E), Нагоя (35.2 N, 137.0 E) и Сао-Мартиньо (29.4 S, 53.8 W) по направлениям: V,

N 30°, E 30°, S 30°, W 30°, NE 39°, SE 39°, NW 39°, SW 39°, N 49°, E 49°, S 49°, W 49°. Также привлечены данные мюонного телескопа на поверхности Земли станции Якутск по направлениям: V, N 30° и S 30° (www.usn.ru.ipm). Таким образом, общее количество каналов информации составило 55. К этим данным с помощью приложения базы MDDB рассчитаны температурные коэффициенты и введены соответствующие поправки.

Новый метод обработки указанных данных является аналогией метода глобальной съемки [1], который основан на использовании приемных векторов R_n^m [5]. Приборы, имеющие различные приемные векторы R_n^m , регистрируют соответствующую интенсивность I , которую можно определить следующим образом:

$$I = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (a_n^m x_n^m + b_n^m y_n^m),$$

где x_n^m, y_n^m – компоненты R_n^m , a_n^m, b_n^m – компоненты многомерного вектора распределения КЛ \vec{A} . Компоненты \vec{A} в каждый измеряемый момент времени могут быть найдены из решения системы вышеприведенных линейных уравнений, которая в матричном виде имеет вид [6]:

$$I = MA,$$

здесь I – вектор-столбец данных наблюдений и M – прямоугольная матрица коэффициентов приемных векторов. Полученная система решается методом наименьших квадратов в предположении, что ряд быстро затухает.

2. ПРИЕМНЫЕ ВЕКТОРЫ МЮОННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ СТАНЦИЙ ХОБАРТ, КУВЕЙТ, НАГОЯ И САО-МАРТИНЬО

Расчет приемных векторов реальных приборов R_n^m проводится [6], если известны: коэффициенты связи между вторичными и первичными частицами $W(E)$ [7], диаграммы направленности детектора $N(\theta, \phi)d\omega$ [8], отражающие как геометрические особенности прибора, так и зенитно-азимутальную зависимость регистрируемых частиц, энергетический спектр $f_n(E)$ исследуемых вариаций интенсивности КЛ и асимптотические углы прихода частиц. Разложение распределения КЛ в ряд по сферическим функциям быстро сходится. Поэтому, кроме изотропной составляющей, обычно учитывают лишь первые две сферические гармоники распределения, эффекты от которых в эксперименте наблюдаются. В соответствии с этим в векторе R_n^m определяют первые 9 компонент.

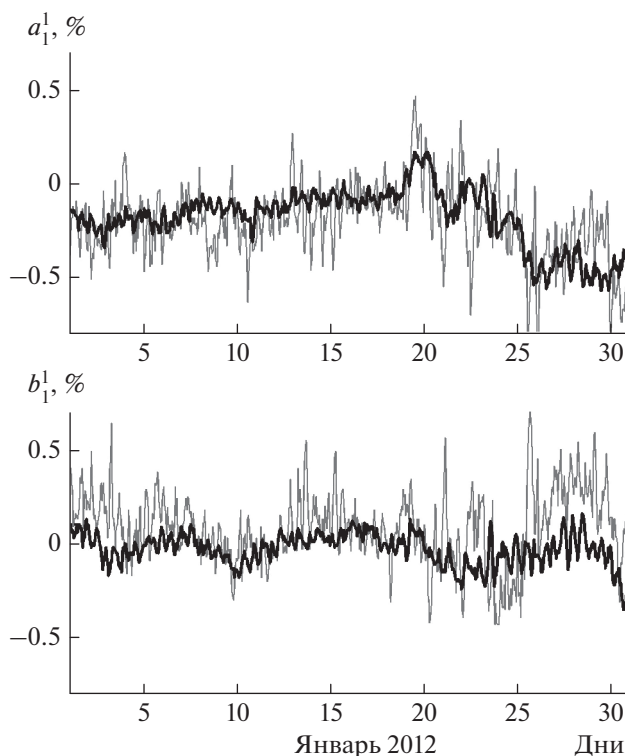


Рис. 1. Динамика поведения компонент суточной анизотропии a_1^1 и b_1^1 полученных по результатам расчета методом глобальной съемки по данным мюонных телескопов (толстая кривая) и нейтронных мониторов (тонкая кривая).

Для расчета приемных векторов использованы коэффициенты связи $W(E)$, приведенные в аналитическом виде в работе [9]. Диаграммы направленности $N(\theta, \phi)$ для станций GMDN определены на основе их геометрии и принципиальных схем совпадений, представленных в <http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Documents/documents.php>. Выбор энергетических спектров 1-й и 2-й сферических гармоник зависит от поставленных задач по исследованию распределения КЛ. В нашем случае для определения компонент первой сферической гармоники выбран спектр $f_1(E)$ вида: $f_1(E) = \text{const}$, если $E \leq E_0$, и $f_1(E) = 0$, если $E > E_0$, где $E_0 = 40, 60, 80, 100$ ГэВ. Спектр для второй сферической гармоники $f_2(E)$ имеет следующий вид [6]: $f_2(E) = (E/E_0)$, если $E \leq E_0$ и $f_2(E) = (E/E_0)^{-2}$, если $E > E_0$, где $E_0 = 50, 70, 100, 150$ ГэВ. Асимптотические углы прихода частиц $\Psi(E, \theta, \phi)$, $\Phi(E, \theta, \phi)$ рассчитывались с разрешением в 3° по зениту от 0° до 64° и азимуту от 0° до 357° . Расчеты траекторий проводились согласно методике, приведенной в работе [10]. Результаты проведенных расчетов коэффициентов свя-

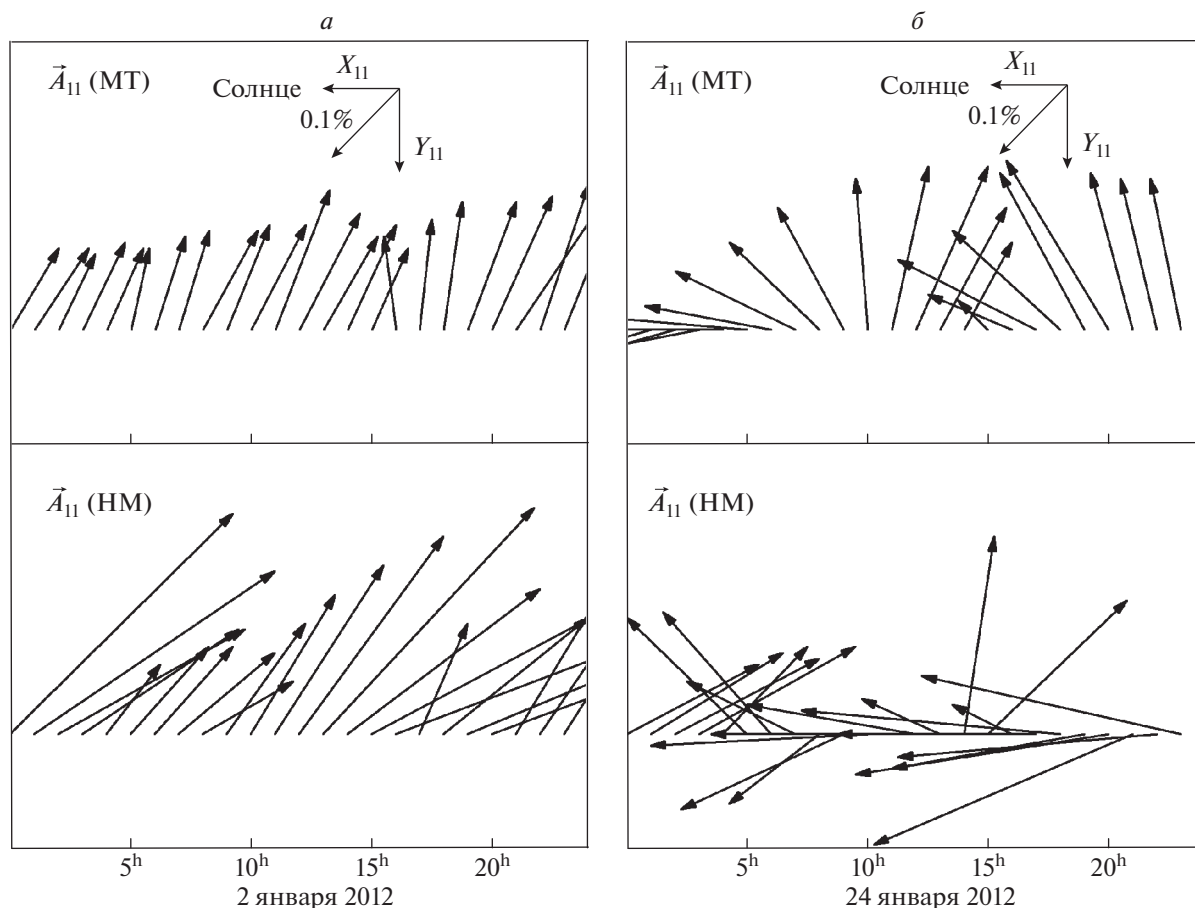


Рис. 2. Поведения векторов \vec{A}_{11} , полученных по данным мюонных телескопов и нейтронных мониторов в спокойный (а) и возмущенный (б) периоды межпланетной среды.

зи, диаграмм направленности, траекторий КЛ и приемных векторов приведены на сайте ИКФИА по адресу: www.usn.ru/smt.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведена реализация нового метода определения углового распределения КЛ в межпланетном пространстве на основе измерений вышеуказанных мюонных телескопов. Параметры рассчитанных с помощью нового метода радиальной a_1^1 и азимутальной b_1^1 компонент первой сферической гармоники распределения КЛ \vec{A}_{11} сопоставлялись с результатами, полученными с применением метода глобальной съемки по данным нейтронных мониторов (рис. 1). Как следует из рисунка, при схожей средней временной динамике поведения их величин, результаты определения указанных компонент вектора \vec{A}_{11} по данным мюонных телескопов являются относительно бо-

лее устойчивыми. На рис. 2 в системе координат GSE показано поведение векторов \vec{A}_{11} , полученных по данным мюонных телескопов и нейтронных мониторов в периоды спокойного (а) и возмущенного (б) состояний межпланетной среды.

Из этих рисунков также следует, что использование нового метода дает более надежные результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование в предложенном методе глобальной съемки данных многонаправленных мюонных телескопов Хобарт, Кувейт, Нагоя, Сао-Мартиньо и Якутск дает новые результаты в определении параметров суточной анизотропии в распределении КЛ в межпланетной среде. Есть все основания полагать, что дальнейшее развитие предложенного варианта метода глобальной съемки и использование его результатов в научных исследованиях даст новые сведения о струк-

туре и динамике гелиосферы в ее отдаленных областях и в целом.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 18-02-00451-а, № 18-32-00064-мол_а) и с использованием оборудования УНУ Сеть СКЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Altukhov A.M., Krymsky G.F., Kuzmin A.I.* // Proc. 11-th ICRC. 1969. V. 4. P. 457.
2. *Nagashima K.* // Rep. Ionos. Space Res. Japan. 1971. V. 25. P. 189.
3. *Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г. и др.* // Геомагн. и аэрон. 2018. Т. 58. № 3. С. 374; *Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. et al.* // Geomagn. Aeron. 2018. V. 58. № 3. P. 356.
4. *Дворников В.М., Сдобнов В.Е., Сергеев А.В.* // Вариации косм. лучей и исслед. космоса: Сб. науч. тр. М.: ИЗМИРАН, 1986. С. 232.
5. *Крымский Г.Ф., Алтухов А.М., Кузьмин А.И. и др.* // Геомаг. и аэрон. 1966. Т. 6. № 6. С. 991.
6. *Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А. и др.* Космические лучи и солнечный ветер Новосибирск: Наука, 1981. 224 с.
7. *Дорман Л.И.* Вариации космических лучей М.: Гостехиздат, 1957. 492 с.
8. *Кузьмин А.И.* Вариации космических лучей и солнечная активность. М.: Наука, 1968. 157 с.
9. *Fujimoto K., Murakami K., Kondo I. et al.* // Proc. 15th ICRC. 1977. V. 4. P. 321.
10. *Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясто М.И.* Космические лучи в магнитном поле Земли М.: Наука, 1971. 400 с.