

ВОПРОСЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ГЛОБАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ МЮОННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

П.Ю. Гололобов, В.Г. Григорьев, П.А. Кривошапкин, А.С. Зверев

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия
gpeter@ikfia.ysn.ru

ON IMPLEMENTATION OF GLOBAL SURVEY METHOD WITH MUON TELESCOPE MEASUREMENTS

P.Yu. Gololobov, V.G. Grigoryev, P.A. Krivoschapkin, A.S. Zverev

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia
gpeter@ikfia.ysn.ru

Аннотация. Метод глобальной съемки, разработанный в ИКФИА в 60-х гг. прошлого столетия и основанный на данных мировой сети нейтронных мониторов, предназначен для мгновенного и непрерывного определения углового распределения приходящего к Земле потока галактических космических лучей. В настоящей работе разработан новый вариант метода, основанный на данных мюонных телескопов. Представлены вопросы практической реализации метода по данным измерений станций сети мюонных телескопов GMDN (Хобарт, Кювейт, Нагоя, Сао-Мартиньо) и Якутского спектрографа космических лучей. Показаны результаты расчетов приемных характеристик вышеуказанных станций: траектории частиц в геомагнитном поле, диаграммы направленности приборов, коэффициенты связи и энергетический спектр предполагаемых вариаций космических лучей.

Ключевые слова: космические лучи, мюонный телескоп, метод глобальной съемки.

Abstract. Method of global survey that was developed in ShICRA in 60s of the last century and based on data of the worldwide network of neutron monitors is designed for instant and continuous definition of an angular distribution of cosmic rays that are registered at the Earth. In the current work a new variant of the method that is based on data of muon telescopes. Questions on practical realization of the method by the data of global muon detector network GMDN (Hobart, Kuwait, Nagoya, Sao Martinho) and the Yakutsk spectrograph of cosmic rays are presented. Results of calculation of receiving characteristics of the above mentioned stations are shown, particularly: trajectories of particles in the geomagnetic field, directional sensitivity of the device, response functions and energy spectra of cosmic ray variations.

Keywords: cosmic rays, muon telescope, method of global survey.

ВВЕДЕНИЕ

В 60-х гг. прошлого столетия группой якутских ученых в ИКФИА [Altukhov et al., 1969] был разработан метод для мгновенного определения углового распределения приходящего потока галактических космических лучей (КЛ) на основе их измерений наземными детекторами. Метод, впоследствии, был назван «методом глобальной съемки» (МГС), а основной экспериментальной базой выступала мировая сеть станций нейтронных мониторов. Большое количество разнонаправленных станций сети позволила, вплоть до настоящего времени, успешно производить «съемку» и активно исследовать различные динамические процессы в гелиосфере [Григорьев, Стародубцев, 2015; Григорьев и др., 2017; Гололобов и др., 2017; Starodubtsev et al., 2019]. Успешное и длительное применение МГС подтолкнуло нас на ее модернизацию — расширение экспериментальной базы, а именно использование данных мировой сети мюонных телескопов.

Необходимо отметить, что, кроме вышеуказанного метода, существуют и другие не менее успешные эффективные методы, к примеру: метод глобальной спектрографической съемки ИСЗФ [Кравцова, Сдобнов, 2016], метод глобальной съемки ИЗМИРАН (см. напр. [Белов и др., 2009; Абунина и др., 2013]) и методы зарубежных исследователей [Bieber, Evenson, 1998; Munakata et al., 2006].

Данная работа посвящена практическим вопросам реализации метода глобальной съемки по данным мюонных телескопов.

МЕТОДИКА

В работе предлагается реализация МГС по данным мюонных телескопов глобальной сети GMDN [<http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/db/public/archives/gmdn.php>]. Сеть GMDN состоит из четырех многонаправленных мюонных телескопов станций Хобарт (43.0° S, 147.3° E), Кювейт (29.4° N, 48.0° E), Нагоя (35.2° N, 137.0° E) и Сао-Мартиньо (29.4° S, 53.8° W), каждая из которых способна регистрировать КЛ с тринадцати и более независимых направлений. Такое количество направлений и географическое расположение станций является вполне достаточным для успешного осуществления МГС. Ниже представлено краткое описание метода.

Телескопы, имеющие различные приемные векторы $\vec{R}_n^m = x_n^m + iy_n^m$ по каждому каналу наблюдения, регистрируют интенсивность I , которую можно определить следующим образом:

$$I = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (a_n^m x_n^m + b_n^m y_n^m), \quad (1)$$

где a_n^m , b_n^m — компоненты многомерного вектора распределения КЛ \vec{A}_n^m .

Каждый канал (направление) регистрации мюонных телескопов имеют разную энергетическую чувствительность. Поэтому, чтобы система (1) была разрешимой, необходимо ввести спектральные множители, приводящие показания всех используемых данных

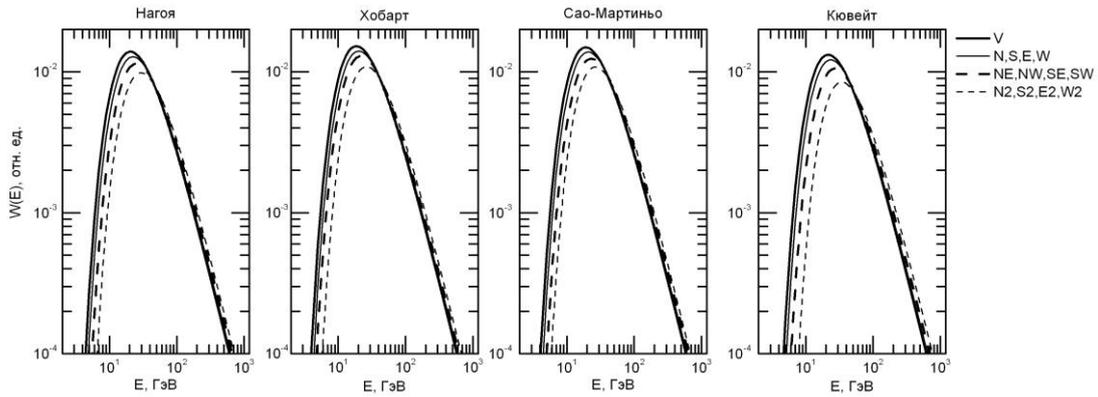


Рис. 1. Коэффициенты связи сети мюонных телескопов GMDN

к одному из каналов с коэффициентом связи W^0 [Altukhov et al., 1969]. Тогда нормировочные коэффициенты для приведения данных i -го канала к данным выбранного канала I^0 будут:

$$K_n^i = \int_{E_{min}}^{\infty} W^i(E) f_n(E) dE / \int_{E_{min}}^{\infty} W^0(E) f_n(E) dE \quad (2)$$

где $f_n(E)$ — энергетический спектр n -го типа вариаций, а $W^i(E)$ — коэффициенты связи i — канала. Система уравнений (1) примет вид:

$$I^i = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (a_n^m x_n^{m,i} + b_n^m y_n^{m,i}) K_n^i \quad (3)$$

где компоненты \bar{A}_n^m уже не зависят от номера канала i . Далее, уравнение (3) решается методом наименьших квадратов с предположением, что ряд быстро затухает. Как правило выделяются первые две сферические гармоники.

Для определения первых двух гармоник необходимо девять каналов регистрации, надлежащим образом ориентированных на небесной сфере. Если имеется несколько многонаправленных телескопов разнесенных на земной поверхности и общее количество каналов соответственно много больше числа компонент вектора \bar{A}_n^m , то решение системы из i алгебраических уравнений вида (3) даст вполне определенные результаты по параметрам распределения КЛ.

Успешность реализации МГС зависит от того, насколько точно определены приемные вектора \bar{R}_n^m [Крымский и др., 1981], что, в свою очередь, требует знания следующих параметров: коэффициентов связи между вторичными и первичными частицами $W(E)$; диаграммы направленности детекторов, отражающие геометрические особенности прибора и зенитно-азимутальную зависимость регистрируемых частиц; энергетический спектр исследуемых вариаций интенсивности КЛ; асимптотические углы прихода частиц.

Коэффициенты связи $W(E)$ для станций GMDN могут быть определены с использованием результатов работы [Fujimoto et al., 1977], где представлен аналитический вид $W(E)$ для различных глубин атмосферы и под Землей. Полученные $W(E)$ для направлений вертикаль и основных зенитных углов регистрации станций GMDN приведены на рис. 1.

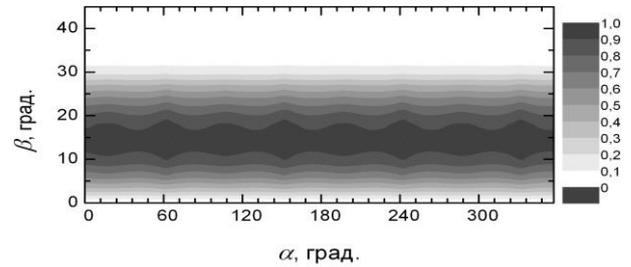


Рис. 2. Диаграмма направленности мюонного телескопа Хобарт в направлении вертикаль. По оси абсцисс отложены азимутальный угол α , по оси ординат — зенитный угол β

Диаграммы направленности $N(\theta, \varphi)$ для станций GMDN определены на основе их геометрии и принципиальных схем совпадений, представленных на [http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Documents/documents.php]. На рис. 2 показаны результаты расчётов азимутальных и зенитных диаграмм направленности на примере вертикального направления мюонного телескопа станции Хобарт.

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: $f_1(E)=const$, 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 [Крымский и др., 1981]: $f_2(E)=(E/E_0)$, 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.

Расчеты асимптотических углов прихода частиц $\Psi(E, \theta, \varphi)$, $\Phi(E, \theta, \varphi)$ проводились согласно методике приведенной в работе [Дорман и др., 1977]. Для определения приемных векторов, расчеты траекторий проводились с разрешением в 3° по зениту от 0° до 64° и азимуту от 0° до 357° .

На рис. 3 приведены примеры рассчитанных приемных векторов первой сферической гармоники углового распределения КЛ для станций сети GMDN.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены основные вопросы практической реализации МГС по данным мировой сети мюонных телескопов GMDN и Якутского спектрографа КЛ. Описаны подходы к решению вышеуказанных задач

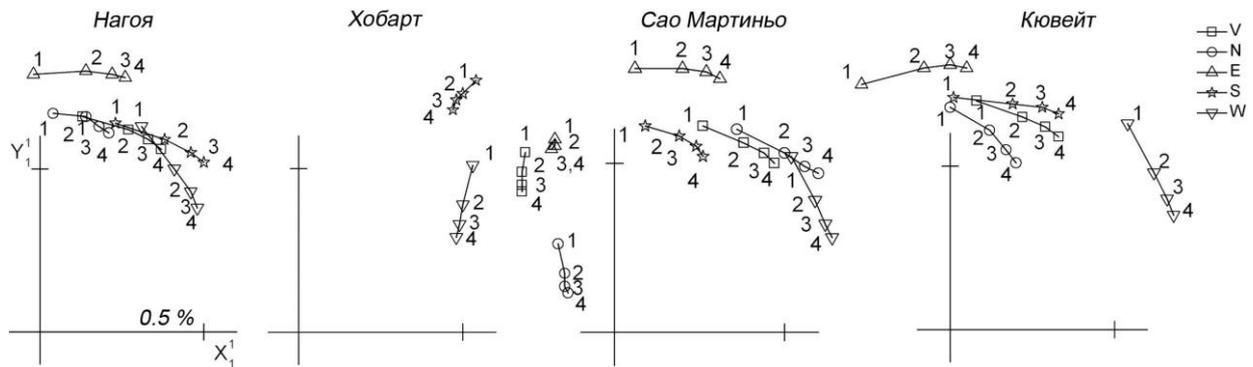


Рис. 3. Значения модуля и фазы компонент приемных векторов, отражающих изменения параметров наблюдаемых вариаций относительно первичных, для первой сферической гармоники. Цифры возле символов показывают значения $E_0=40$ (1), 60 (2), 80 (3) и 100 ГэВ (4) в их вышеуказанном энергетическом спектре

и с их помощью них рассчитаны приемные вектора для всех четырех станций сети GMDN. Результаты расчетов представлены в сети Интернет по ссылке [http://www.ysn.ru/smt/characteristics_GMDN].

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-02-00451-а. Авторы благодарят команду сети GMDN за предоставление экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абунина М.А., Абунин А.А., Белов А.В. и др. Связь параметров форбуш-эффектов с гелиодолготой солнечных источников // Геомагнетизм и Аэронавигация. 2013. Т. 53, № 1. С. 13–21.

Белов А.В., Асипенка А., Дрынть Е.А. и др. Поведение векторной анизотропии космических лучей вблизи межпланетных ударных волн // Изв. РАН. Серия физ. 2009. Т. 73, № 3. С. 348–350.

Гололобов П.Ю., Кривошапкин П.А., Крымский Г.Ф. и др. Распределение тензорной анизотропии космических лучей в окрестности нейтрального токового слоя // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 2. С. 18–21.

Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Гололобов П.Ю. Мониторинг предвестников геомагнитных возмущений по данным наземных измерений космических лучей // Изв. РАН. Серия физ. 2017. Т. 81, № 2. С. 219–221.

Григорьев В.Г., Стародубцев С.А. Метод глобальной съемки в режиме реального времени и прогноз космической погоды // Изв. РАН, Сер. физич. 2015. Т. 79. С. 703–707

Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясто М.И. Космические лучи в магнитном поле Земли М.: Наука, 1971. 400 с.

Кравцова М.В., Сдобнов В.Е. Космические лучи во время гигантских геомагнитных бурь 23-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и Аэронавигация. 2016. Т. 56, № 2. С. 154–162.

Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А. и др. Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука, 1981. 224 с.

Altukhov A.M., Krymsky G.F., Kuzmin A.I. The Method of «Global Survey» for Investigating Cosmic Ray Modulation // Proc. 11th ICRC. 1969. V. 4. P. 457–460.

Bieber J.W., Evenson P.. CME geometry in relation to cosmic ray anisotropy // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25, N 15. P. 2955–2958.

Munakata K., Kuwabara T., Bieber J.W. et al. CME-geometry and cosmic-ray anisotropy observed by a prototype muon detector network // Adv. Sp. Res. 2006. V. 36. P. 2357–2362.

Starodubtsev S.A., Grigoryev V.G., Gololobov P. Yu. Behavior of zonal components of cosmic ray distribution and Dst index of geomagnetic field during periods of geoeffective disturbances of solar wind // J. Physics. Conference Series. 2019. V.1181, 012011.

URL: <http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/db/public/archives/gmdn.php>.

URL: <http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Documents/documents.php>.

URL: <http://www.ysn.ru/smt>.