

УДК 524.1

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СЕТИ МЮОННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

© 2021 г. П. Ю. Гололобов¹, *, А. С. Зверев¹, В. Г. Григорьев¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований и астрономии имени Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия

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

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

Представлен метод определения углового распределения космических лучей на основе данных наземных мюонных телескопов. Метод представляет собой сферический анализ экспериментальных данных с учетом взаимосвязи первичного и наблюдаемого на Земле вторичного излучения космических лучей. Рассматриваются методические вопросы, связанные с улучшением качества получаемых результатов.

DOI: 10.31857/S0367676521110119

ВВЕДЕНИЕ

Условия распространения галактических космических лучей (КЛ) в гелиосфере определяют наблюдаемую анизотропию их углового распределения в околоземном космическом пространстве. Хотя величина анизотропии КЛ значительно меньше изотропной интенсивности, связь ее со структурой и динамикой гелиосферы является важным каналом информации для исследований в области солнечно-земной физики и космической погоды.

Анизотропия КЛ проявляет себя в виде периодических вариаций интенсивности (например, суточных) измеряемых наземными детекторами КЛ. При этом определение параметров этих вариаций при помощи отдельного детектора не позволяет достигать разрешения менее суток. Для более корректного определения процессов в распределении КЛ в межпланетном пространстве в ИКФИА СО РАН был разработан метод глобальной съемки [1]. Этот метод и другие ее аналоги [2–4] дают возможность использовать всю мировую сеть нейтронных мониторов в качестве единого многонаправленного прибора, который способен непрерывно отслеживать динамику углового распределения КЛ за каждый измеряемый момент времени.

Современный уровень развития мировой сети многонаправленных мюонных телескопов (МТ) позволяет реализовать на основе их данных, ме-

тодику по исследованию распределения КЛ аналогичную глобальной съемке. При этом, энергии первичных КЛ, регистрируемых МТ существенно выше, чем регистрируемых нейтронными мониторами. Поэтому определяемое при таком подходе распределение КЛ является отражением динамики более крупномасштабной структуры гелиосферы. При этом реализация метода глобальной съемки по данным МТ является более информативной, что обусловлено следующими моментами: КЛ с относительно высокими энергиями менее чувствительны к мелкомасштабным неоднородностям солнечного ветра. Получаемые параметры распределения КЛ при помощи МТ являются менее “зашумленным”, поскольку нейтронные мониторы, за исключением единичных станций, собирают КЛ в основном из экваториальных областей, а МТ регистрируют КЛ и с высоких широт.

МЕТОД ГЛОБАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ПО ДАННЫМ СЕТИ МЮОННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

Предлагаемый подход является вариантом известного метода глобальной съемки [1], но основанного на использовании данных МТ (GMDN) и расчетов приемных векторов [5] для этих приборов. МТ имеющие различные приемные векторы $\vec{R}_n^{m,j}$ по каждому каналу наблюдения, реги-

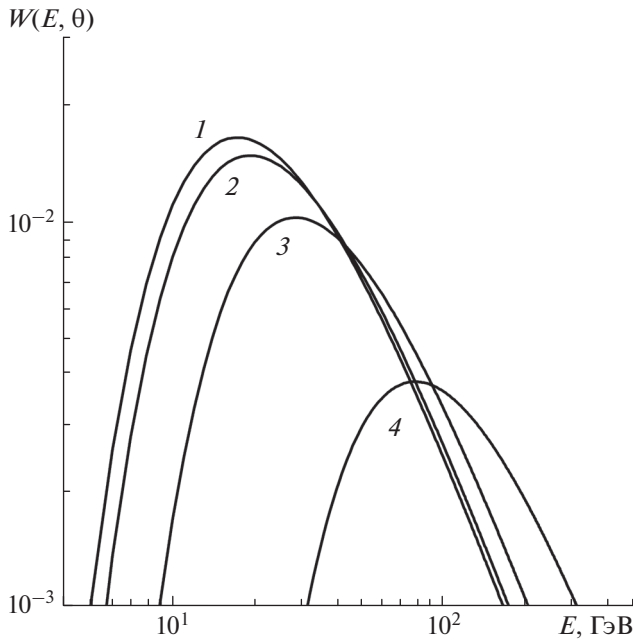


Рис. 1. Коэффициенты связи под зенитными углами 0° (1), 25° (2), 50° (3) и 75° (4) для МТ используемых в данной работе.

стрируют интенсивность I^j , которую можно определить следующим образом:

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

где $x_n^{m,j}$, $y_n^{m,j}$ – компоненты вектора $\overline{R_n^{m,j}}$, a_n^m , b_n^m – компоненты многомерного вектора распределения КЛ $\overline{A_n^m}$. При наличии данных с достаточного количества детекторов, компоненты вектора $\overline{A_n^m}$ могут быть найдены путем решения вышеприведенной системы уравнений.

УЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ПРИЕМНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАНЦИЙ МТ

При расчете компонент приемных векторов $x_n^{m,j}$, $y_n^{m,j}$ учитываются следующие факторы: влияние атмосферы Земли, особенности геометрии и географического положения прибора, снос частиц геомагнитным полем.

Для учета влияния атмосферы используется метод коэффициентов связи [6]. При этом, в отличие от нашей ранней работы [7], для использования МТ в новой методике также введен учет зенитно-угловой зависимости $W(E, \theta)$. Коэффициенты связи $W(E, \theta)$ могут быть определены если известна множественность генерации мюонов в

атмосфере Земли. Теоретические расчеты множественности были получены в работе [8] для Якутского спектрографа КЛ. Для МТ сети GMDN (Нагоя, Сао-Мартиньо, Кювейта и Хобарта) [9] определены согласно аналитическому выражению, полученному в работе [10]. Как правило коэффициенты $W(E, \theta)$ зависят от уровня солнечной активности, однако в случае МТ такая зависимость незначительна и в данной работе игнорируется.

Также уточнены геометрические особенности детекторов. Диаграммы направленности $N(\theta, \varphi)$ определены с учетом схемы совпадений каждого МТ и находятся путем вычисления следующего выражения:

$$N(\theta, \varphi) = [L - H(\sin \varphi \operatorname{tg} \theta - \sin \alpha \operatorname{tg} \beta)] \times [L - H(\cos \varphi \operatorname{tg} \theta - \cos \alpha \operatorname{tg} \beta)] \cos^2 \theta \sin \theta, \quad (2)$$

где θ и φ – зенитный и азимутальный углы прихода частиц, L и H – размеры детектора (считается квадратной формы) и расстояние между верхним и нижним счетчиками, а α и β – зенитный и азимутальный углы, определяющие взаимное расположение верхних и нижних счетчиков.

Найденные параметры $W(E, \theta)$ и $N(\theta, \varphi)$ на примере станции Хобарт приведены на рис. 1 и 2.

УЧЕТ ОРБИТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЗЕМЛИ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ЭФФЕКТА

Движение Земли вокруг своей орбиты приводит к эффекту Комптона–Геттинга (КГ) [11]. Как было показано в [12], создаваемая анизотропия направлена на 6 ч по местному времени и имеет следующие компоненты $a_1^0 = 0$, $a_1^{1, \text{КГ}} = -\frac{(2 + \gamma) v_3}{c}$

и $b_1^{1, \text{КГ}} = 0$, где γ – показатель энергетического спектра ГКЛ, а v_3 и c – скорости Земли и света, соответственно. При известных значениях γ и v_3 амплитуда эффекта будет равна 0.047%. Такая анизотропия считается постоянной, однако, вследствие влияний магнитного поля и атмосферы Земли, регистрируется различными направлениями МТ в разной степени. Учет этого эффекта осуществляется путем определения приемных векторов $x_1^{0, \text{КГ}}$, $x_1^{1, \text{КГ}}$ и $y_1^{1, \text{КГ}}$ для каждого направления МТ и последующей корректировки наблюдательных данных на возникающие вариации интенсивности КЛ $I^{\text{КГ}}$.

Интенсивность КЛ, регистрируемая МТ, имеет большой температурный эффект. Основной сложностью в учете эффекта является недоступность либо недостаточное временное разрешение измерений температурного разреза атмосферы. С другой стороны, такие прямые измерения могут быть заменены спутниковыми. Для анализа привлекались результаты модели атмосферы нацио-

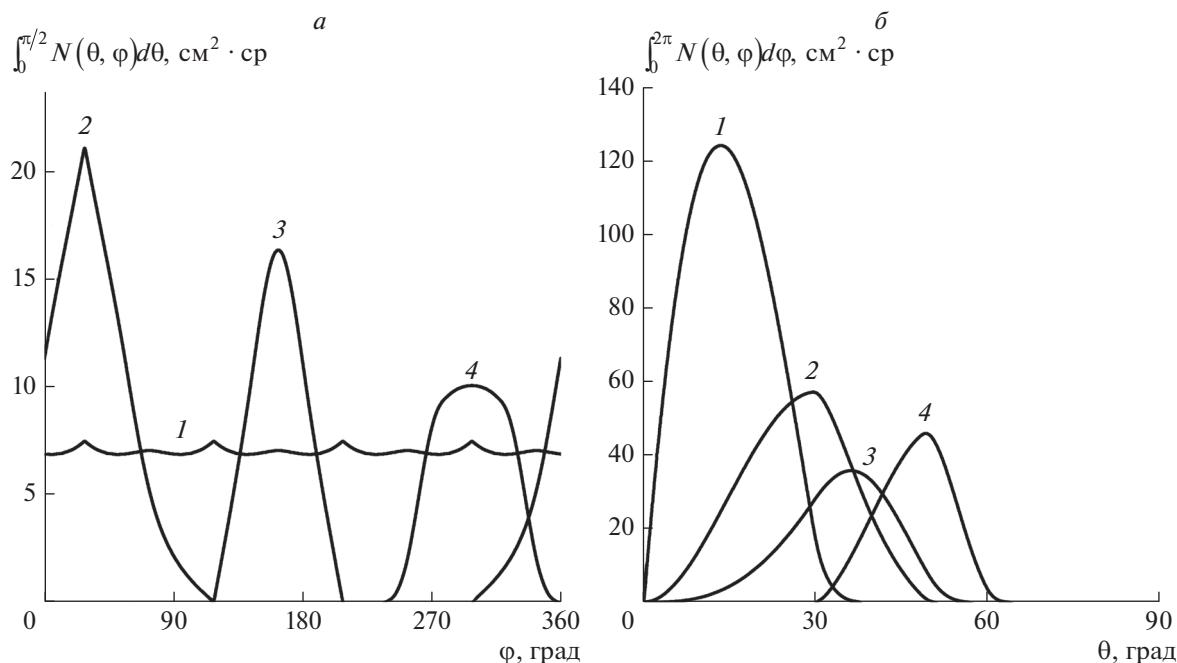


Рис. 2. Интегральные азимутальные (а) и зенитные (б) диаграммы направленности каналов МТ Хобарт: V (1), N (2), SE (3) и $W2$ (4). Каналы обозначены согласно [9].

нального центра экологического прогнозирования США NCER, позволяющие получать через каждые 6 ч (0, 6, 12, 18 UT) данные о температурном разрезе атмосферы на 17 стандартных изобарических уровнях в диапазоне 10–1000 гПа [13]. По данным высотного распределения температуры вычисляются эффективная и среднемассовая температуры необходимые для оценки температурного эффекта вторичной мюонной компоненты КЛ. Применение такого метода позволяет определить интенсивность КЛ, возникающую в результате колебаний температуры атмосферы $I^{\Delta t}$.

В итоге, интенсивность КЛ, входящая в уравнение (1), будет определяться выражением: $\dot{I} = I^{0,j} - I^{КГ} - I^{\Delta t}$, где $I^{0,j}$ – наблюдаемая наземным детектором интенсивность КЛ без учета эффектов температуры и Комптона–Геттинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены дополнительные методические доработки метода глобальной съемки на основе данных мировой сети мюонных телескопов, необходимые для получения более корректной информации по угловому распределению КЛ.

С учетом проведенных методических работ проведены расчеты параметров двух первых моментов функции углового распределения КЛ по данным сети мюонных телескопов GMDN и станции Якутск за 2012–2018 гг. Результаты расче-

тов представлены по ссылке <https://www.ysn.ru/smt/GS-GMDN>.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00451-а и с использованием оборудования уникальной научной установки “Российская национальная наземная сеть станций космических лучей”. Авторы выражают благодарность создателям баз данных NMDB, MDDB и GMDN за предоставленную информацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Чирков Н.П. и др. // Геомагн. и аэроном. 1967. Т. 7. № 1. С. 11.
2. Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г. и др. // Геомагн. и аэроном. 2018. Т. 58. № 3. С. 374; Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. et al. // Geomagn. Aeron. 2018. V. 58. No. 3. P. 356.
3. Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Sergeev A.V. // Proc. 18th ICRC. V. 3. (Bombay, 1983). P. 249.
4. Kuwabara T., Munakata K., Yasue S. et al. // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. Art. No. L19803.
5. Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А. и др. Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука, 1981. 224 с.
6. Дорман Л.И. Вариации космических лучей. М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1957. 492 с.
7. Grigoryev V.G., Gololobov P.Yu., Krivoshapkin P.A. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2019. V. 82. No. 6. P. 786.
8. Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Григорьев В.Г. // Геомагн. и аэроном. 2011. Т. 51. № 5. С. 716; Krymskii G.F., Krivoshapkin P.A., Grigor'ev V.G. // Geomagn. Aeron. V. 51. No. 5. P. 702.

9. <http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/Archives/GMDN.php>.
10. Fujimoto K., Murakami K., Kondo I., Nagashima K. // Proc. 15th ICRC. V. 4. (Budapest, 1977). P. 321.
11. Compton A.H., Getting I.A. // Phys. Rev. 1935. V. 47. P. 817.
12. Munakata K., Kozai M., Kato C., Kota J. // Astrophys. J. 2014. V. 791. P. 22.
13. Беркова М.Д., Григорьев В.Г., Преображенский М.С. и др. // ЯФ. 2018. Т. 81. № 6. С. 673; Berkova M.D., Grigoryev V.G., Preobrazhensky M.S. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2018. V. 81. P. 776.

Improvement of the method for studying the distribution of cosmic rays based on data from the network of muon telescopes

P. Yu. Gololobov^{a,*}, A. S. Zverev^a, V. G. Grigoryev^a

^a*Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy, Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia*

**e-mail: gpeter@ikfia.ysn.ru*

A method for determining the angular distribution of cosmic rays based on data from ground-based muon telescopes is presented. The method represents itself as a spherical analysis of experimental data taking into account the relationship between primary and secondary cosmic ray radiation observed on Earth. Methodological issues related to improving the quality of the obtained results are considered.