

УДК 524.1-352

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ НА ОСНОВЕ 27-ДНЕВНЫХ ВАРИАЦИЙ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2023 г. С. А. Сирук¹, *, А. Г. Майоров¹, Р. Ф. Юлбарисов¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*E-mail: sstepana001@mail.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Предложен новый метод оценки эффективной энергии нейтронных мониторов, основанный на прямых наблюдениях 27-дневных вариаций галактических космических лучей, в частности, в эксперименте AMS-02 в максимуме 24 цикла солнечной активности (2014–2015 гг.). Для этого строится зависимость амплитуды 27-дневных вариаций от жесткости частиц, после чего определяется значение энергии, при котором амплитуда вариаций темпа счета нейтронного монитора в течение того же промежутка времени становится равной амплитуде, полученной в космических наблюдениях. Изучена зависимость восстановленной эффективной энергии нейтронного монитора от жесткости геомагнитного обрезания, полученная в результате обработки данных нескольких нейтронных мониторов.

DOI: 10.31857/S0367676523701855, EDN: OSQFSA

ВВЕДЕНИЕ

По современным представлениям, 27-дневные вариации потока ГКЛ возникают вследствие взаимодействия частиц со структурами в межпланетном пространстве, которые образуются магнитными полями и плазмой солнечного ветра и вращаются вместе с Солнцем [1]. Энергетический спектр амплитуды 27-дневных вариаций ГКЛ (A27) может быть построен по результатам прямых измерений приборами на космических аппаратах, способными определять энергию частиц в широком диапазоне, – такими, как РАМЕЛА [2] и AMS-02 [3]. Подобные спектры, основанные на результатах некоторых экспериментов, представлены в работах [4, 5], однако данные магнитного спектрометра AMS-02 отличаются лучшей статистической точностью, что позволяет наблюдать 27-дневные вариации потока ГКЛ в области более высоких энергий.

В диапазоне энергий от единиц до десятков ГэВ наилучшие по обеспеченности статистикой данные о поведении потока ГКЛ предоставляет всемирная наземная сеть нейтронных мониторов (НМ) [6]. Недостаток этих приборов заключается в том, что они проводят косвенные измерения первичного потока частиц и являются интегральными детекторами с зависящей от энергии функ-

цией отклика — темп счета нейтронного монитора может быть представлен как [7]:

$$N(t) = \sum_{i=1}^n \int_{E_{c,i}}^{\infty} Y_i(E) J_i(E, t) dE, \quad (1)$$

где суммирование производится по видам частиц в составе ГКЛ; $J_i(E, t)$ — спектр частиц вне земной магнитосферы; $Y_i(E)$ — функция отклика нейтронного монитора; $E_{c,i}$ — минимальная кинетическая энергия, которой должна обладать частица i -го сорта, чтобы преодолеть магнитное поле Земли, характеризуемое для каждого НМ величиной жесткости геомагнитного обрезания в месте его расположения.

Поскольку энергия регистрируемых нейтронными мониторами частиц не определяется напрямую, вводят величину, называемую эффективной энергией, однако ее определения могут различаться [8, 9]. Мы определяем эффективную энергию нейтронного монитора E_{eff} как энергию, при которой амплитуда 27-дневных вариаций потока галактических космических лучей равна амплитуде колебаний темпа счета монитора в течение анализируемого промежутка времени. Представлены результаты оценки E_{eff} в период максимума 24 цикла солнечной активности.

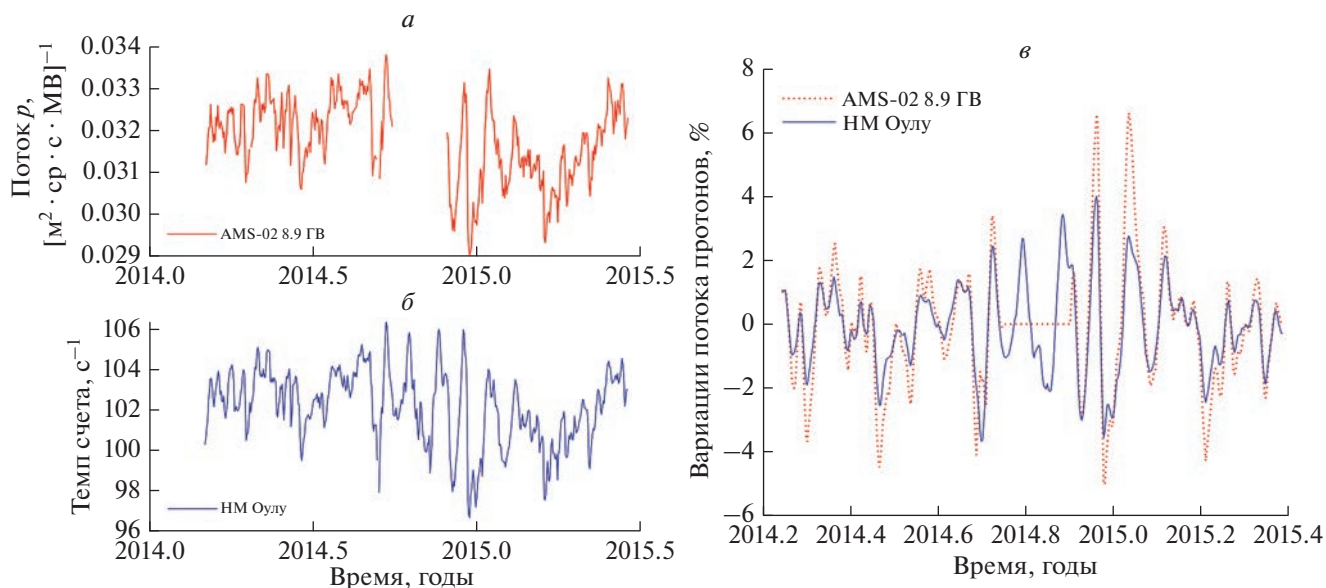


Рис. 1. Поток протонов с жесткостью 8.9 ГВ по данным AMS-02 (а). Темп счета нейтронного монитора Оулу (б). Нормированные потоки ГКЛ (в).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

На рис. 1 приведены временные ряды потока ГКЛ, измеренного спектрометром AMS-02 [10] и нейтронным монитором Оулу [6] в 2014–2015 гг., а также нормированные потоки ГКЛ, представляющие собой их относительные отклонения от медианного значения, вычисленного за 55 дней.

Восстановление амплитуды 27-дневных вариаций производится двумя независимыми подходами. В основе первого подхода лежит применение преобразования Фурье к нормированному потоку ГКЛ на рассматриваемом промежутке времени, и за амплитуду 27-дневных вариаций принимается суммарный вклад гармоник, соответствующих колебаниям с периодом от 25 до 30 сут. В основу второго подхода положен метод наименьших квадратов: нормированный поток ГКЛ за рассматриваемый отрезок времени аппроксимируется синусоидой с периодом колебаний, лежащим в пределах от 26 до 29 сут. Ее амплитуда принимается за амплитуду исследуемых вариаций.

Для оценки погрешностей восстановленных значений амплитуды используется метод перемешивания [11].

АНАЛИЗ СПЕКТРА ГКЛ

В результате применения описанных выше подходов к анализу измерений спектрометра AMS-02 о потоках протонов с жесткостью от 1 до 70 ГэВ получена зависимость амплитуды 27-днев-

ных вариаций ГКЛ от жесткости частиц. На рис. 2а представлен спектр амплитуды вариаций, полученный с помощью метода, основанного на фурье-анализе.

Следуя [12], высокоэнергетическая часть спектра аппроксимируется степенным законом (рис. 2б):

$$A27 = aR^{-\gamma}, \quad (2)$$

где $A27$ – амплитуда 27-дневных вариаций потока ГКЛ; R – магнитная жесткость частиц; a – коэффициент. В результате получены значения показателя спектра, равные $\gamma_1 = 0.89 \pm 0.02$ для метода наименьших квадратов и $\gamma_f = 0.82 \pm 0.02$ для метода, основанного на фурье-анализе.

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНЫХ ЭНЕРГИЙ

Описание восстановленного для высоких энергий спектра $A27$ степенным законом позволяет произвести расчет значения жесткости, при котором амплитуда 27-дневных вариаций темпа счета нейтронного монитора, полученная с использованием тех же методов, равна амплитуде вариаций ГКЛ по данным AMS-02:

$$R_{eff} = e^{\frac{\ln(a/A27)}{\gamma}}. \quad (3)$$

Для обработки отобранные данные двадцати нейтронных мониторов. Анализ показывает, что эффективная энергия НМ растет с жесткостью геомагнитного обрезания в местах их расположения и изменяется в пределах от 5 до 45 ГэВ (рис. 2в). Для сравнения на этом же рисунке

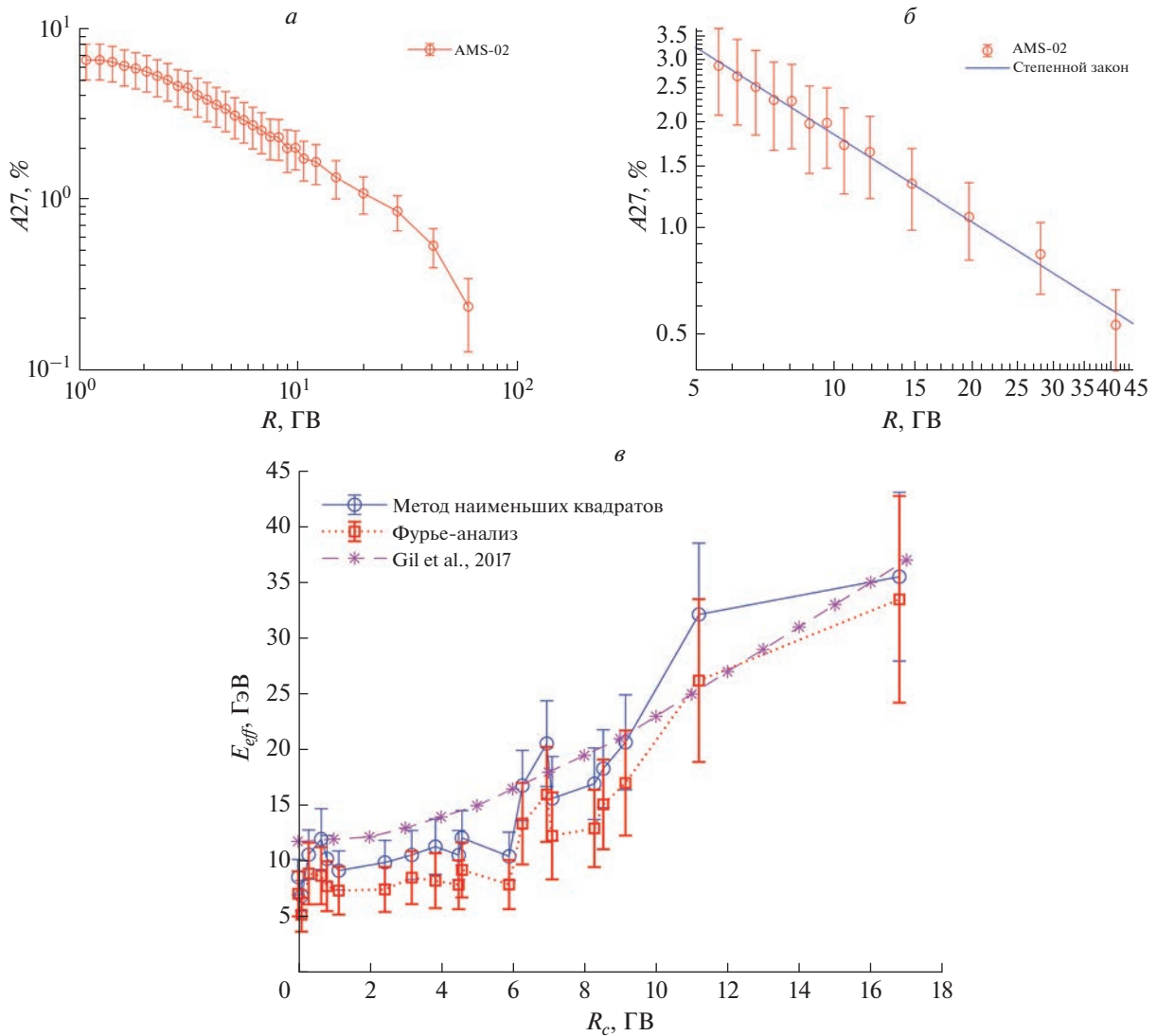


Рис. 2. Спектр A_{27} по данным AMS-02 за 2014–2015 гг. (а). Аппроксимация высокоэнергетической части спектра степенным законом (б). Зависимость эффективной энергии НМ от жесткости геомагнитного обрезания и ее сравнение с результатами, представленными в работе [9] (в).

представлены результаты расчета, полученные в работе [9], где эффективная энергия определяется как энергия E , при которой поток космических лучей $J(E, t)$ остается пропорционален темпу счета нейтронного монитора $N(t)$ на протяжении всего цикла солнечной активности. Указанные оценки величины эффективной энергии НМ сравнимы между собой: при высоких значениях жесткости геомагнитного обрезания они совпадают в пределах погрешности, тогда как в области низких жесткостей полученные значения E_{eff} систематически ниже, чем в модели [9]. Вероятно, это может быть объяснено различиями в форме спектров 27-дневных и долговременных вариаций потока космических лучей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных магнитного спектрометра AMS-02, собранных в 2014–2015 гг., получен спектр $A_{27}(R)$, высокоэнергетическая часть которого использована для расчета величины эффективной энергии нейтронных мониторов. Показано, что она принимает характерные значения от $E_{eff} \approx 10$ ГэВ для полярных мониторов до $E_{eff} \approx 35$ ГэВ для экваториальных. Проведено сравнение полученных результатов с данными более ранних исследований и установлено хорошее согласие в пределах погрешностей. В некоторых случаях наблюдается отличие, которое можно объяснить разной природой коротко- и долгопериодических вариаций потоков ГКЛ. Таким об-

разом, предложенный метод может быть использован для независимой оценки характерных энергий отклика НМ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание, проект “Фундаментальные проблемы космических лучей и темная материя”, № 0723-2020-0040; государственное задание, проект “Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей”, № FSWU-2023-0068). Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. Базилевской Г.А. за предложенную идею определения эффективной энергии НМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Richardson I.G.* // *Living Rev. Sol. Phys.* 2018. V. 15. No. 1. P. 1.
2. *Picozza P., Galper A.M., Castellini G. et al.* // *Astropart. Phys.* 2007. V. 27. No. 4. P. 296.
3. *Aguilar M., Ali Cavasonza L., Ambrosi G. et al.* // *Phys. Reports.* 2021. V. 894. P. 1.
4. *Modzelewska R., Bazilevskaya G.A., Boezio M. et al.* // *Astrophys. J.* 2020. V. 904. No. 1. P. 3.
5. *Юлбарисов Р.Ф., Галикян Н.Г., Майоров А.Г. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85. № 11. С. 1611; *Yulbarisov R.F., Galikyan N.G., Mayorov A.G. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2021. V. 85. No. 11. P. 1272.
6. <https://www.nmdb.eu>.
7. *Usoskin I.G., Alanko-Huotary K., Kovaltsov G.A., Mursula K.* // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. Art. No. A12108.
8. *Alanko K., Usoskin I.G., Mursula K. et al.* // *Adv. Space Res.* 2003. V. 32. No. 4. P. 615.
9. *Gil A., Asvestari E., Kovaltsov G.A.* // *Proc. Sci. 35th ICRC (Busan, 2017).* P. 32.
10. *Aguilar M., Ali Cavasonza L., Ambrosi G. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2021. V. 127. No. 27-31. Art. No. 271102.
11. *Cassiday G.L., Cooper R., Corbató S.C. et al.* // *Nucl. Phys. B. Proc. Suppl.* 1990. V. 14. No. 1. P. 291.
12. *Gil A., Alania M.V.* // *Solar Physics.* V. 291. No. 6. P. 1877.

Estimation of the neutron monitors' effective energies based on the 27-day galactic cosmic rays variations

S. A. Siruk^{a, *}, A. G. Mayorov^a, R. F. Yulbarisov^a

^a *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: sstepana001@mail.ru*

We presented a new method of the neutron monitors' (NM's) effective energy estimation based on the 27-day galactic cosmic rays (GCR) variations: using AMS-02 measurements we study rigidity dependence of 27-day variations' amplitude and calculate the energy value so that the variability of the GCR particles at this energy is equal to that of the NM's count rate. We examined how NM's effective energy depends on the geomagnetic cutoff rigidity using data of several NM.