

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНЫХ ЭНЕРГИЙ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА AMS-02

Сирук С.А., Майоров А.Г., Юлбарисов Р.Ф.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

NEUTRON MONITORS' EFFECTIVE ENERGY CALCULATION USING AMS-02 DATA

Siruk S.A., Mayorov A.G., Yulbarisov R.F.

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

Flux of galactic cosmic rays in the heliosphere changes over time due to solar modulation processes. There are multiple instruments to observe those variations, and the worldwide network of neutron monitors is the most common one. Since neutron monitors are energy integrating detectors, it is usual to describe them using the effective energy concept. In this study we define the effective energy of a neutron monitor as such galactic protons energy that their flux remains directly proportional to the NM count rate during the entire solar activity cycle. The paper presents the results of analysis of AMS-02 and neutron monitors data obtained in 2011–2019. We established experimental values of effective energy and found that it lies between 7 GeV for high-altitude polar neutron monitors and 50 GeV for detectors located in equatorial regions. Additionally, we estimated effective energy values for neutron monitors, located in regions with different atmospheric depths and geomagnetic cutoffs. These calculations were performed using force field model of solar modulation, recent results of atmospheric cascades modeling and modern data about galactic proton and helium spectra as well as heavier elements abundance. Our results show that modeled values of effective energy don't agree with experimental ones. This might be due to excessive simplicity of force field approximation or imperfection of the neutron monitor yield function.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-269-272>

1. Введение

Проходя через гелиосферу, потоки галактических космических лучей (ГКЛ) подвергаются солнечной модуляции, что проявляется в виде вариаций их потока на разных временных масштабах. Основным инструментом для наблюдения модуляции ГКЛ является всемирная сеть нейтронных мониторов (НМ). Поскольку НМ являются интегральными детекторами, их удобно описывать, задействуя концепцию эффективной энергии (ЭЭ) прибора. В рамках данной работы ЭЭ НМ определяется как энергия протонов ГКЛ, при которой их поток остается строго пропорционален темпу счета НМ на протяжении всего солнечного цикла.

Величина ЭЭ НМ зависит от географического положения детектора. В случае изотропного потока космических лучей оно характеризуется двумя параметрами: глубиной атмосферы над прибором [1] и жесткостью геомагнитного обрезания в месте его расположения [2]. Зная значения ЭЭ

каждого НМ сети, можно использовать ее как единый спектрометр, измеряющий высокоэнергетическую часть спектра ГКЛ.

2. Экспериментальные значения ЭЭ НМ

Для определения ЭЭ данные НМ и AMS-02 о потоке ГКЛ нормируются на среднее за рассматриваемый промежуток времени значение, после чего полученные временные ряды сравниваются между собой. Основная идея методики сравнения представлена на левой панели рисунка. Для каждого из рассматриваемых НМ и каждого энергетического бина AMS-02 строится диаграмма рассеяния, через которую проводится прямая. Градиент цвета на диаграмме отражает ход времени: наиболее темные точки соответствуют данным за 2011 год, тогда как наиболее светлые – за 2019. Вычисляется коэффициент корреляции временных рядов, по которому осуществляется отбор, после чего по отобранным для данного НМ бинам путем интерполяции определяется значение энергии, при котором коэффициент пропорциональности между рядами равен единице. Погрешность значения ЭЭ определяется погрешностями восстановления коэффициентов пропорциональности и зачастую оказывается мала.

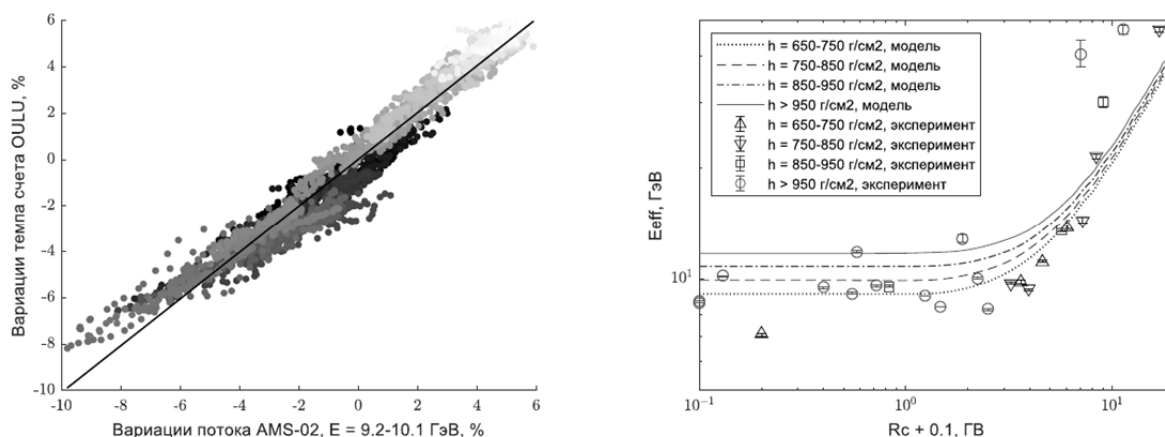


Рисунок.

Описанная процедура была применена к 27 НМ, 11 из которых являются российскими, работавшим на большей части отрезка времени с 2011 по 2019 год: BRBG, TERA, MRNY, SOPO, THUL, TXBY, APTY, SNAE, OULU, KERG, YKTK, MGDN, MOCW, NVBK, IRK2, IRK3, LMKS, JUNG, BKSН, AATB, CALM, NANM, MXCO, ATHS, TSMB, DJON, PSNM. Темпы счета НМ взяты из баз данных NMDB (<https://www.nmdb.eu/nest/>) и ИЗМИРАН (<http://cr0.izmiran.ru/common/links.htm>), данные AMS-02 – с сайта эксперимента (<https://ams02.space/publications/202105>).

Результаты расчетов представлены на правой панели рисунка. Значения жесткости обрезания R_c взяты из работы [1]. В зависимости от глубины атмосферы в месте их расположения, НМ были распределены на 4

группы, обозначенные разными символами. Можно заключать, что значения ЭЭ НМ лежат в широком диапазоне, меняясь от 7 ГэВ для полярного НМ SOPO до почти 50 ГэВ для экваториального PSNM.

3. Предсказания теории

Значения ЭЭ НМ могут быть не только определены экспериментально, но и вычислены теоретически. Для этого была задействована методика, представленная в работе [3] и основанная на описании долговременных проявлений солнечной модуляции в рамках модели силового поля [4]. По сравнению с [3], в настоящей работе используется функция отклика НМ, представленная в работе [1], которая позволяет производить вычисления для разных значений высоты на уровне моря. Еще одним отличием является использование более современных данных о химическом составе ГКЛ и их энергетическом спектре. На основе измерений в экспериментах Voyager 1 [5] и AMS-02 [6, 7] были построены параметризации локальных межзвездных спектров протонов и ядер гелия, записываемые в следующей форме:

$$J_{LIS}(E) = \frac{J_0}{\beta^2} E^{\gamma_1} (E^{\gamma_2} + a)^{\gamma_3} \left(1 + \left(\frac{E}{E_0} \right)^{\frac{\Delta\gamma}{s}} \right)^s, \quad (1)$$

где поток выражен в 1/[м² ср с ГэВ/нуклон], E – кинетическая энергия в [ГэВ/нуклон], β – отношение скорости частицы к скорости света. Полученные значения параметров представлены в таблице.

Таблица.

	J_0	a	γ_1	γ_2	γ_3	$\Delta\gamma$	E_0	s
p	2.87e+4	0.82	1.03	0.94	-4.19	0.24	250	0.098
He	1.11e+3	0.58	1.19	0.92	-4.30	0.17	158	0.045

Способ учета вклада в темп счета НМ более тяжелых элементов аналогичен таковому в работе [8], во внимание приняты ядра вплоть до Ni. Для элементов, чьи потоки были измерены AMS-02, информация об их распространенности взята из результатов этого эксперимента. Данные по оставшимся ядрам получены из работ [9, 10].

Результаты расчетов изображены в виде линий на правой панели рисунка. Характер возрастания ЭЭ НМ с ростом жесткости геомагнитного обрезания и толщины атмосферы качественно согласуется с результатами прямых измерений, однако смоделированные и экспериментальные значения не совпадают между собой. Объяснений такому результату может быть два: либо ошибка кроется в используемой функции отклика НМ, либо модель силового поля, в силу заложенных в нее предположений, оказыва-

ется слишком грубой даже для описания долговременной солнечной модуляции.

4. Заключение

В работе представлены результаты расчета эффективной энергии нейтронных мониторов. Продемонстрировано, что в зависимости от географического положения детектора значение его ЭЭ может лежать в пределах от 7 до 50 ГэВ. Показано, что экспериментальные значения ЭЭ НМ лишь качественно согласуются с предсказаниями, основанными на смоделированной функции отклика НМ и описании солнечной модуляции в рамках модели силового поля.

Авторы выражают благодарность коллективам экспериментальных установок, чьи измерения были использованы в рамках данного исследования.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание, проект “Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей”, № FSWU-2023-0068).

Литература

1. *Mishev et al.* // Journal of Geophysical Research (Space Physics), 2020, 125.2, e27433.
2. *Gerontidou M. et al.* // Advances in Space Research, 2021, 67.7, 2231.
3. *Asvestari et al.* // Journal of Geophysical Research (Space Physics), 2017, 122.10, 9790.
4. *Gleeson et al.* // The Astrophysical Journal, 1968, 154, 1011.
5. *Stone et al.* // Science, 2013, 341.6142, 150.
6. *Aguilar et al.* // Physical Review Letters, 2015, 114.17, 171103.
7. *Aguilar et al.* // Physical Review Letters, 2015, 115.21, 211101.
8. *Koldobskiy et al.* // Journal of Geophysical Research (Space Physics), 2019, 124.4, 2367.
9. *Israel et al.* // The Astrophysical Journal, 2018, 865.1, 69.
10. *Boschini et al.* // The Astrophysical Journal Supplement Series, 2020, 250.2, 27.