

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ  
И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**

УДК 524.1

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ ПОТОКОВ  
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ СЕТИ  
НАЗЕМНЫХ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ**

© 2025 г. И. А. Лагойда<sup>а</sup>, \*, И. И. Астапов<sup>а</sup>, П. С. Кузьменкова<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

\*E-mail: IALagoida@mephi.ru

Поступила в редакцию 20.09.2024 г.

После доработки 11.10.2024 г.

Принята к публикации 12.10.2024 г.

На сегодняшний день основная часть научной аппаратуры, предназначенной для регистрации потоков частиц космических лучей (КЛ) расположена на поверхности Земли, и регистрирует потоки частиц, образовавшиеся после взаимодействия КЛ с земной атмосферой. С появлением спектрометрической аппаратуры, установленной на космических спутниках, стали возможны прямые измерения потоков КЛ в широком диапазоне энергий. Однако, данные, измеренные такими приборами, не всегда доступны, а бортовая электроника космических детекторов подвержена радиационному износу, что проявляется в значительном ухудшении эффективности регистрации частиц КЛ с течением времени. Нейтронные мониторы расположенные на поверхности Земли, не подвержены радиационному износу и стабильно ведут измерения интенсивностей космических лучей на протяжении нескольких десятков лет. В работе рассмотрен алгоритм калибровки нейтронных мониторов с помощью данных спутниковых экспериментов и перспективы его применения для анализа потоков частиц космических лучей в периоды минимума и максимума циклов солнечной активности, а также вовремя форбуш понижений.

*Ключевые слова:* космический лучи, нейтронные мониторы, форбуш понижения, солнечная активность

DOI: 10.56304/S2079562925020071

**ВВЕДЕНИЕ**

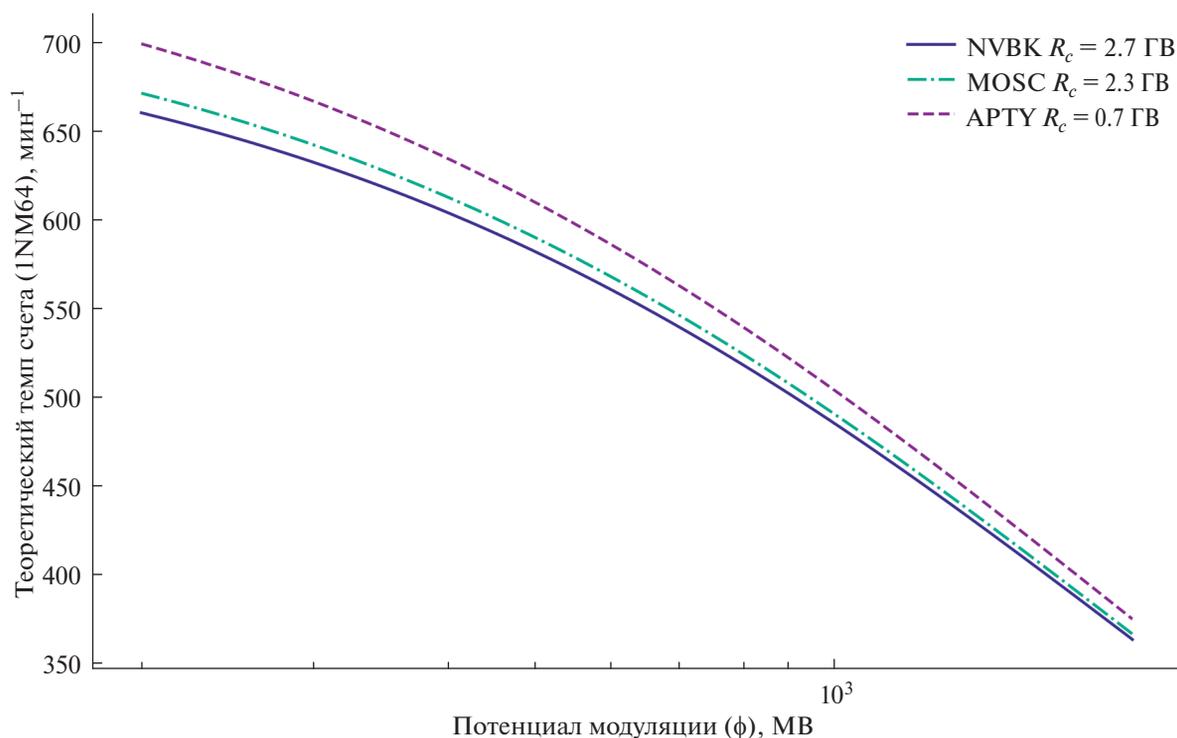
Частицы космических лучей (КЛ), проникая вглубь гелиосферы, взаимодействуют с плазмой солнечного ветра и вмороженным в нее магнитным полем. Данный процесс называется солнечной модуляцией частиц КЛ и проявляется для энергий вплоть до 30 ГэВ/нукл [1]. В следствии чего, энергетические спектры потоков частиц КЛ на границе гелиосферы и в окрестности Земли отличаются. В приближении силового поля [2] изменение формы энергетических спектров КЛ описывается с помощью единственного параметра  $\Phi$ , называемого потенциалом модуляции. Согласно данной модели, потоки частиц КЛ на границе гелиосферы и в межпланетном пространстве связаны соотношением:

$$J_i(T) = J(T + \Phi_i)_{\text{LIS},i} \frac{T(T + 2T_r)}{(T + \Phi_i)(T + \Phi_i + 2T_r)},$$

где  $T$  – кинетическая энергия частиц ГэВ/нукл,  $J_i$  – энергетический спектр потоков частиц  $i$ -ой компоненты КЛ (протоны, ядра гелия) в межпланетном пространстве,  $J_{\text{LIS},i}$  – межзвездный спектр

$i$ -ой компоненты частиц КЛ,  $\Phi_i = (eZ_i/A_i)\phi$  – энергетические потери частиц по мере движения в глубь гелиосферы,  $T_r$  – масса покоя частицы ГэВ/нукл. Таким образом, для заданного межзвездного спектра рассматриваемых частиц, потенциалы модуляции могут быть вычислены с использованием экспериментально измеренных потоков КЛ в окрестности Земли. На сегодняшний день, существует большое количество теоретических расчетов, предсказывающих формы энергетических спектров потоков частиц КЛ на границе гелиосферы [3–5]. В данной работе используются межзвездные спектры, полученные в работе [6], расчет которых основывался на экспериментальных данных космического аппарата Voyager 1, проводившего измерения потоков КЛ на расстоянии порядка 122 а.е. от Солнца.

Частицы космических лучей, достигая окрестностей Земли, взаимодействуют с ядрами газов земной атмосферы, что в свою очередь приводит к образованию вторичных частиц, некоторые из которых способны достичь поверхности Земли [7]. Нейтронный монитор – это интегральный детектор, предназначенный для регистрации вторич-



**Рис. 1.** Распределение теоретического суточного темпа счета одного счетчика 1NM64 в зависимости от потенциала модуляции для трех нейтронных мониторов Апатиты (АРТУ), Москва (MOSC) и Новосибирск (NVBK).

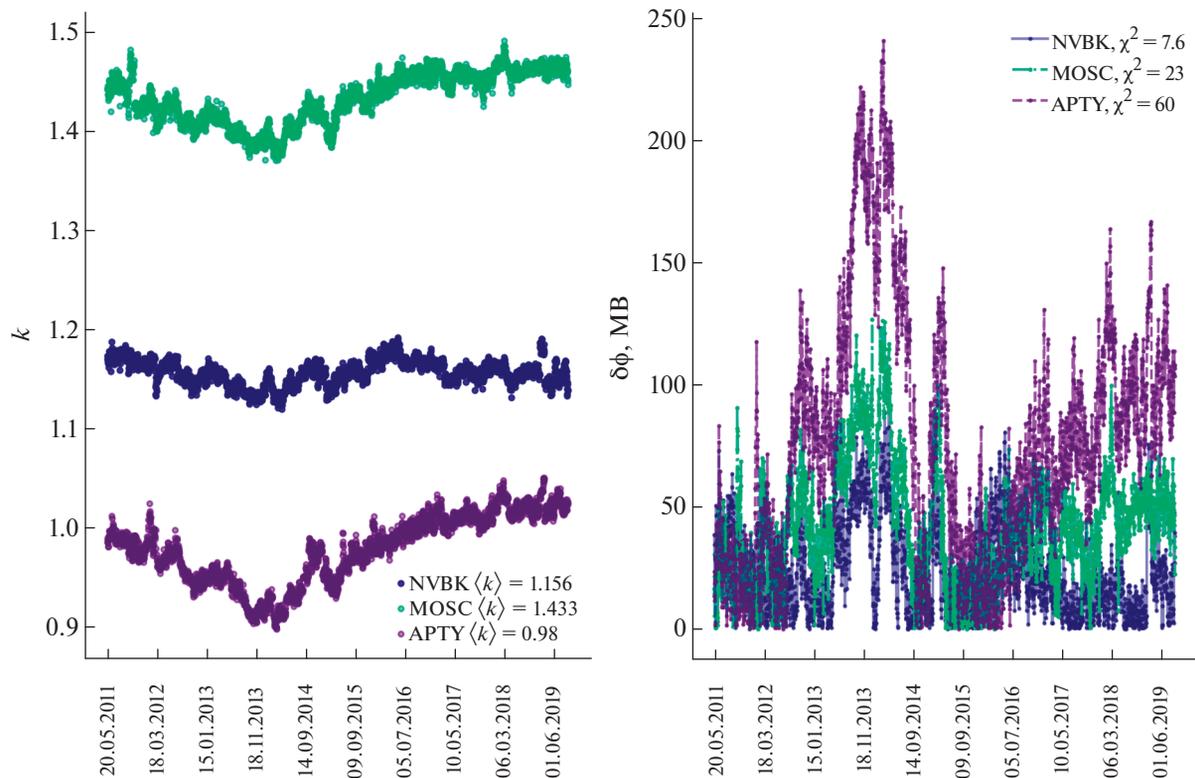
ных частиц КЛ, в основном нейтронов [8]. Каждый нейтронный монитор, в зависимости от места расположения на поверхности Земли, характеризуется жесткостью геомагнитного обрезания, величиной численно равной минимальному значению жесткости первичной частицы, необходимой для создания вторичных частиц, способных достичь точки расположения детектора на Земле. Теоретический темп счета нейтронного монитора может быть представлен как:

$$N = \sum_i N_i = \sum_i \int_{T_{ci}}^{\infty} J_i(T, \phi) Y_i(T) dT,$$

где  $N$  – интегральный темп счета нейтронного монитора,  $N_i$  – вклад  $i$ -ой компоненты КЛ в общий темп счета,  $T_{ci}$  – кинетическая энергия частицы, соответствующая жесткости геомагнитного обрезания заданного нейтронного монитора,  $J_i$  – спектр частиц  $i$ -ой компоненты КЛ в околоземном пространстве,  $\phi$  – потенциал модуляции, характеризующий энергетический спектр КЛ в окрестности Земли,  $Y_i$  – функция отклика нейтронного монитора для заданной компоненты КЛ. Нейтронные мониторы обычно состоят из нескольких идентичных счетчиков, наиболее распространенными из которых являются счетчики типа NM64.

Функции отклика для протонов и ядер гелия были рассчитаны в работе [9], для различных значений атмосферной толщины. Изменяя значение потенциала модуляции, можно получить теоретический темп счета нейтронного монитора. На рис. 1. показано распределение теоретического темпа счета одного счетчика 1NM64, в зависимости от потенциала модуляции и соответствующих ему энергетических спектров космических протонов и ядер гелия, для трех нейтронных мониторов Апатиты (АРТУ), Москва (MOSC), Новосибирск (NVBK).

Однако, реальный темп счета нейтронного монитора может отличаться от теоретического в силу различных конструктивных особенностей установок, стабильности высоковольтных источников питания и т.д. Вследствие чего вводится поправочный коэффициент  $k$ , равный отношению реального темпа счета нейтронного монитора к теоретическому. Следовательно, зная коэффициент  $k$  для каждого нейтронного монитора и используя зависимость, показанную на рис. 1, можно рассчитать значение потенциалов модуляции используя реальный темп счета детектора, что в свою очередь позволит оценить энергетические спектры потоков частиц КЛ в околоземном пространстве.



**Рис. 2.** Суточные значения коэффициентов  $k$  для трех нейтронных мониторов, рассчитанные с помощью суточных данных о потоках космических протонов, и ядер гелия, полученных спектрометром AMS-02 слева и отклонения по разности реальных и восстановленных потенциалов модуляции по данным нейтронных мониторов справа.

## КАЛИБРОВКА НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ

На сегодняшний день, коэффициенты  $k$  для различных нейтронных мониторов, преимущественно получаются с помощью различных методов оптимизации [10], а полученные ряды потенциалов модуляции широко не применялись для восстановления потоков частиц КЛ, тем более во время турбулентных эффектов таких как форбуш понижения. Из теоретических соображений, потенциалы модуляции не должны зависеть от энергии частиц КЛ. Однако, данная зависимость существует и проявляется во время процедуры нахождения потенциалов модуляции для различных энергетических диапазонов [11–13]. В работе [14] установлено, что потенциалы модуляции, восстановленные по данным сети наземных нейтронных мониторов, согласуются с потенциалами модуляции рассчитанными с использованием экспериментальных данных о потоках космических протонов, полученных спектрометром AMS-02, только с определенной энергии  $T_{\text{low}}$ , приблизительно равной 3 ГэВ.

На основании дневных энергетических спектров космических протонов, измеренных спектрометром AMS-02 произведен расчет суточных значе-

ний потенциалов модуляции для трех диапазонов энергий, нижняя граница которых соответствует жесткости геомагнитного обрезания нейтронных мониторов Новосибирск, Москва и Апатиты. После чего произведен расчет суточных значений теоретических темпов счета, для выбранных нейтронных мониторов и, следовательно, получены суточные значения коэффициентов  $k$ . На рис. 2. слева показаны временные ряды коэффициентов  $k$  для рассматриваемых нейтронных мониторов. Как видно из рисунка, у нейтронного монитора Новосибирск, наиболее стабильное значение коэффициента  $k$ , в то время как изменение коэффициента  $k$  нейтронного монитора Апатиты с 2013 по 2019 г. достигает более 10%. На рис. 2 справа изображены отклонения потенциалов модуляции, рассчитанные по разности между их реальными значениями и восстановленными по данным нейтронных мониторов с использованием среднего значения коэффициентов  $k$ , полученного по данным суточных значений коэффициентов  $k$  на рис. 2 слева.

Как видно из рис. 2, потенциалы модуляции, восстановленные с помощью нейтронного монитора Новосибирск, наилучшим образом согласу-

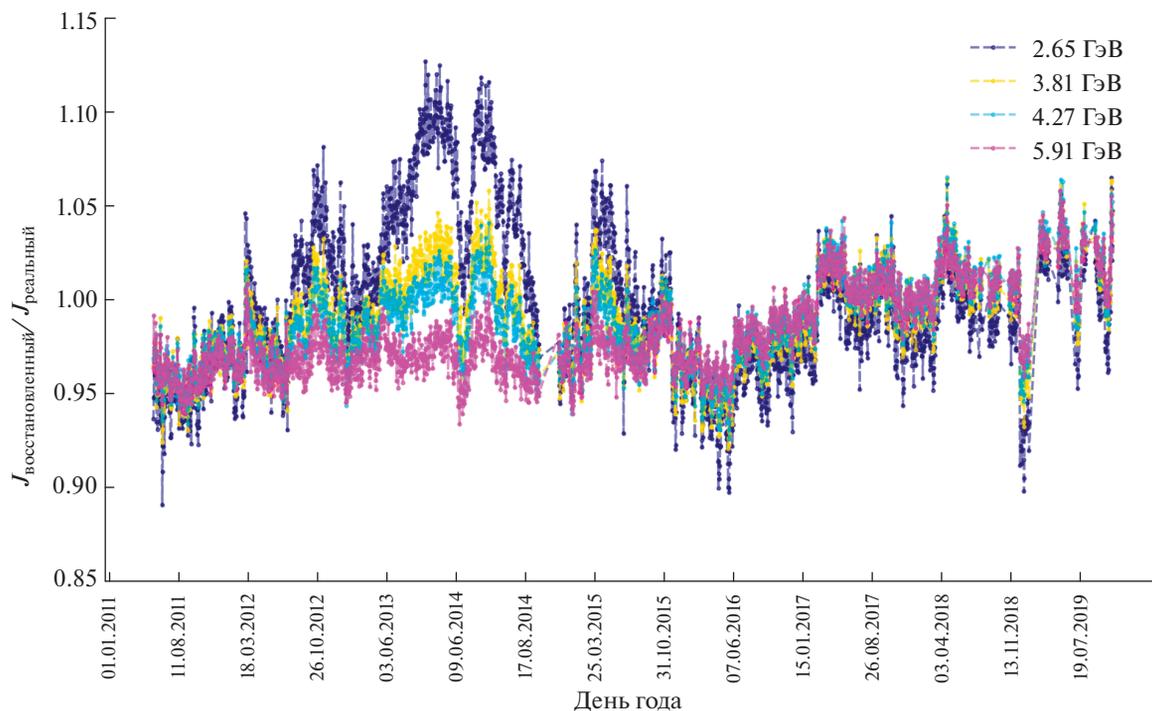


Рис. 3. Отношение значений потоков космических протонов, восстановленных по данным нейтронного монитора Новосибирск и реальных значений, зарегистрированный спектрометром AMS-02, для четырех интервалов энергий.

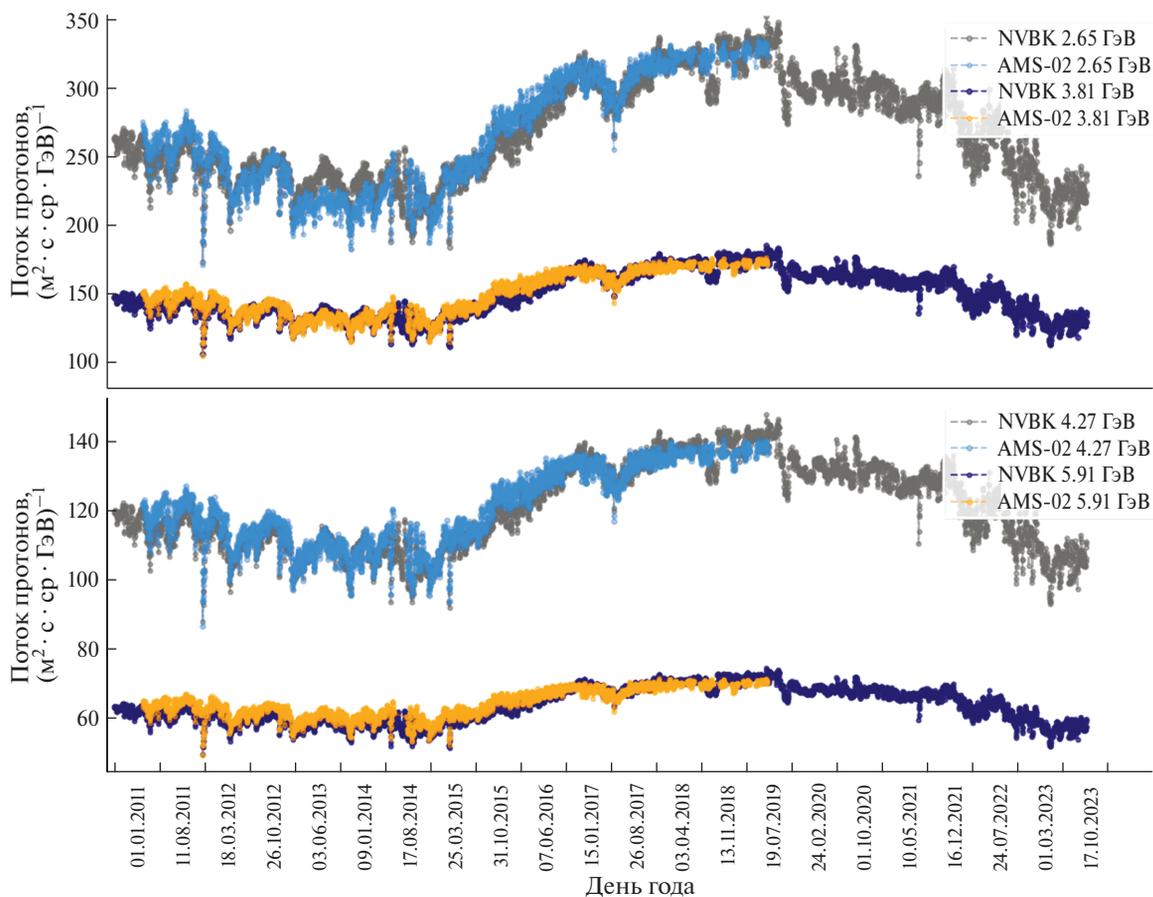


Рис. 4. Потоки протонов КЛ, измеренные спектрометром AMS-02 и восстановленные по данным нейтронного монитора Новосибирск (NVBK), для четырех интервалов энергий.

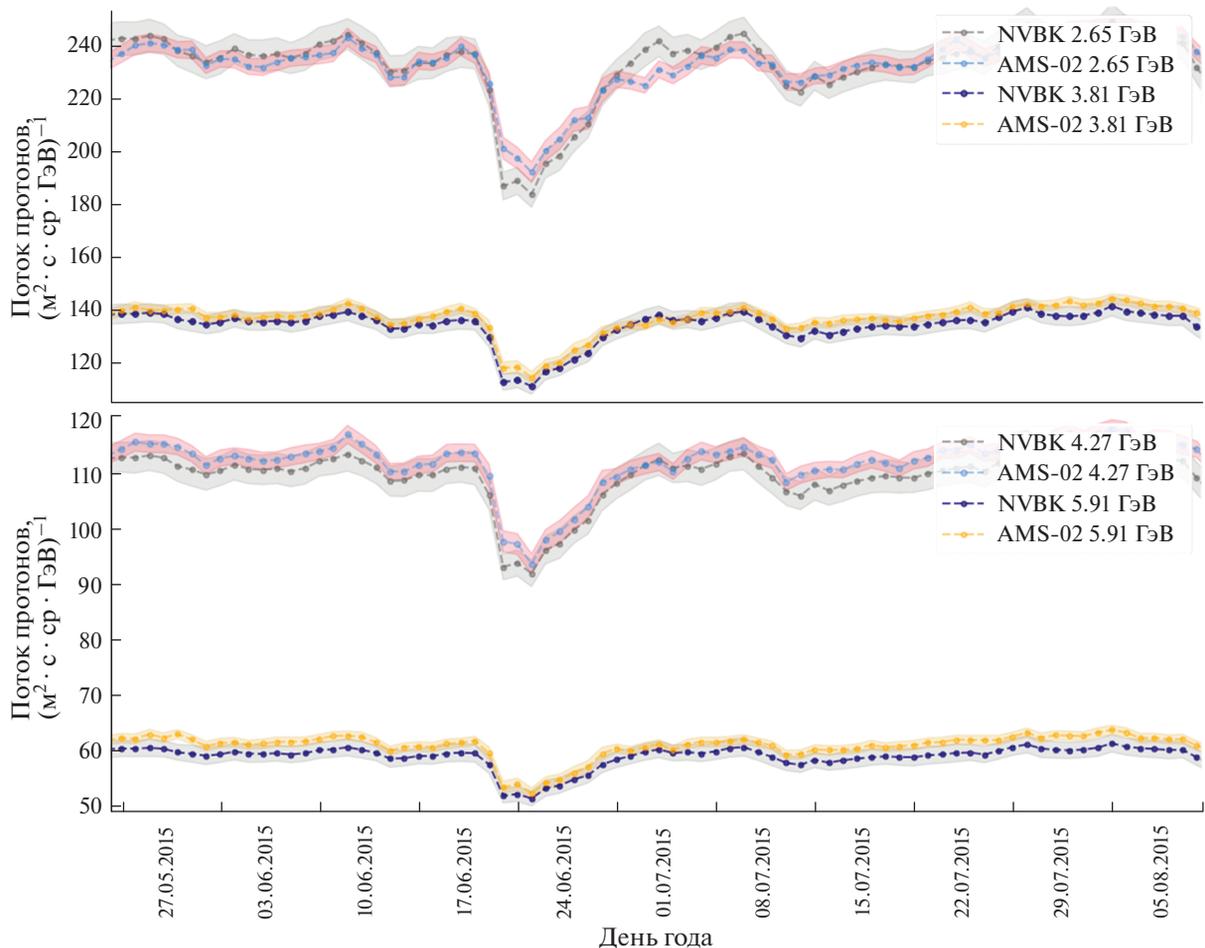


Рис. 5. Реальные (AMS-02) и восстановленные (NVBK) потоков протонов КЛ для нескольких интервалов энергий во время форбуш понижения в июне 2015 г.

ются с их реальными значениями полученными по данным спектрометра AMS-02. Коэффициент детерминации для данного нейтронного монитора, рассчитанный между реальными значениями потенциалов модуляции и восстановленными  $\approx 0.95$ . На рис. 3 изображено отношение потоков протонов КЛ, восстановленных по данным нейтронного монитора Новосибирск с их реальными значениями, измеренными спектрометром AMS-02.

Согласно рис. 3, наибольшие отклонения восстановленных потоков наблюдаются в течение максимума цикла солнечной активности, с максимальным отклонением более 10% для низкоэнергетической компоненты  $E_p = 2.65$  ГэВ. На рис. 4, показаны временные ряды потоков космических протонов, восстановленных в плоть до конца 2023 г. для четырех энергетических интервалов.

На рис. 5 показаны потоки протонов КЛ, восстановленные по данным нейтронного монитора Новосибирск, во время классического форбуш понижения [16] вызванного прохождением одно-

го выделенного коронального выброса массы и соответствующей ему ударной волны в околоземном пространстве. Как видно из рисунка, наблюдается согласие реальных и восстановленных потоков КЛ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен алгоритм калибровки наземных нейтронных мониторов Апатиты (АРТУ), Москва (МОС) и Новосибирск (NVBK), с помощью которого восстановлены потоки протонов КЛ с середины 2011 до конца 2023 г. Установлено, что потенциалы модуляции, восстановленные по данным нейтронного монитора Новосибирск, наилучшим образом коррелируют с реальными значениями полученными по данным спектрометра AMS-02, что вероятно обусловлено расположением данного нейтронного монитора ( $R_c = 2.7$  ГВ), обеспечивающим постоянство нормировочного коэффициента  $k$ . Протестирована возможность восстановления временных профилей потоков КЛ во время турбулентных процессов в околоземном

пространстве, вызванных прохождением корональных выбросов масс. Нейтронные мониторы могут применяться для восстановления различных событий в потоках частиц КЛ, однако не все из них могут обеспечить достаточную точность в низкоэнергетической компоненте КЛ, в связи с возрастающей чувствительностью нормировочных коэффициентов  $k$  к фазе цикла солнечной активности с уменьшением жесткости геомагнитного обрезания. Более того, применимость нейтронных мониторов для восстановления потоков КЛ, в рамках рассматриваемого метода, должна быть ограничена пределами применимости самого приближения силового поля. Возможности восстановления потоков КЛ для других нейтронных мониторов, а также поиск альтернативных методов калибровки, будут предметом будущих исследований.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Обработка данных наземных нейтронных мониторов выполнена при поддержке государственного задания “Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей” № FSWU-2023-0068. Обработка данных спектрометра AMS-02 и идентификация форбуш понижений в потоках КЛ выполнена с при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-72-10170-П).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Strauss R.D., Potgieter M.S.* // *Adv. Sp. Res.* 2014. V. 53 (7). P. 1015–1023. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.01.004>
2. *Usoskin I.G. et al.* // *J. Geophys. Res. Sp. Phys.* 2005. V. 110. P. A12. <https://doi.org/10.1029/2005JA011250>
3. *Burger R.A., Potgieter M.S., Heber B.* // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105 (27) P. 447. <https://doi.org/10.1029/2000JA000153>
4. *Webber W.R., Higbie P.R.* // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. P. A9. <https://doi.org/10.1029/2003JA009863>
5. *Vos E.E., Potgieter M.S.* // *Astrophys. J.* 2015. V. 815 (2). P. 119. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/815/2/119>
6. *Bischoff D., Potgieter M.S., Aslam O.P.M.* // *Astrophys. J.* 2019. V. 878 (1). P. 59. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.10438>
7. *Vaisanen P., Usoskin I., Mursula K.* // *J. Geophys. Res. Sp. Phys.* 2021. V. 125 (5). P. e2020JA028941. <https://doi.org/10.1029/2020JA028941>
8. *Hatton C.J., Carmichael H.* // *Can. J. Phys.* 1964. V. 42 (12). P. 2443–2472. <https://doi.org/10.1139/p64-222>
9. *Mishev A.L. et al.* // *J. Geophys. Res.* 2020 V. 125 (2). P. e2019JA027433 <https://doi.org/10.1029/2019JA027433>
10. *Vaisanen P. et al.* // *J. Geophys. Res.* 2023. V. 128 (4). P. e2023JA031352. <https://doi.org/10.1029/2023JA031352>
11. *Corti C. et al.* // *Astrophys. J.* 2016. V. 829 (8). P. 9. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/829/1/8>
12. *Giesler J., Heber B., Herbst K.* // *J. Geophys. Res. Sp. Phys.* 2017. V. 122 (11). P. 10694–10979. <https://doi.org/10.1002/2017JA024763>
13. *Kuhlen M., Mertsch P.* // *Phys. Rev. Lett.* 2019. V. 123 (25). P. 251104. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.251104>
14. *Koldobskiy S.A., Usoskin I.G.* // *PoS.* 2023.V. 444. P. 1325. <https://doi.org/10.22323/1.444.1325>
15. *Aguilar M. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2021. V. 127 (27). P. 271102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.271102>
16. *Cane H.V.* // *Sp. Sc. Rev.* 2000. V. 93. P. 55–77. <https://doi.org/10.1023/A:1026532125747>

## Reconstruction of Cosmic Ray Fluxes Time Profiles from Ground-Based Neutron Monitor Network Data

I. A. Lagoida<sup>1,\*</sup>, I. I. Astapov<sup>1</sup>, and P. S. Kuzmenkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

\*e-mail: IALagoida@mephi.ru

Received September 20, 2024; revised October 11, 2024; accepted October 12, 2024

**Abstract**—Today, most scientific equipment designed to measure cosmic ray particle fluxes is located on the Earth’s surface. Those instruments record the intensities of secondary cosmic rays, which are created after the interaction of cosmic rays with the Earth’s atmosphere. With the advent of spectrometric equipment installed on space satellites, direct measurements of cosmic ray fluxes in a wide energy range have become possible. However, precise information on such measurements is not always available. Scientific equipment in outer space is subject to radiation wear, which manifests in a significant deterioration in the efficiency of particle registration. Neutron monitors have been stably measuring cosmic ray intensities for several decades. They are located on the Earth’s surface therefore they are not subject to radiation wear and. The paper discusses an algorithm for calibrating neutron monitors using satellite experiment data and the prospects for its application in analyzing cosmic ray particle fluxes during periods of minimum and maximum solar activity cycles, as well as during forrush decreases.

**Keywords:** cosmic rays, neutron monitors, forrush decrease