

НОВЫЙ УЗКОНАПРАВЛЕННЫЙ НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР В КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА

NEW NARROW-BEAM NEUTRON SPECTROMETER IN COMPLEX MONITORING SYSTEM

Е.А. Михалко

Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, mikhalko@pgia.ru

Ю.В. Балабин

Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, balabin@pgia.ru

Е.А. Маурчев

Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, maurchev1987@gmail.com

А.В. Германенко

Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, germanenko@pgia.ru

E.A. Mikhalko

Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, mikhalko@pgia.ru

Yu.V. Balabin

Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, balabin@pgia.ru

E.A. Maurchev

Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, maurchev1987@gmail.com

A.V. Germanenko

Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, germanenko@pgia.ru

Аннотация. При взаимодействии космических лучей (КЛ) с атмосферой Земли образуются нейтроны в широком диапазоне энергий: от тепловых ($E \approx 0.025$ эВ) до релятивистских ($E > 1$ ГэВ). Для регистрации и исследования КЛ в Полярном геофизическом институте (ПГИ) используется комплексная система мониторинга, содержащая детекторы различной конфигурации. Стандартный нейтронный монитор (НМ) 18-NM-64 чувствителен к нейтронам с энергиями $E > 50$ МэВ. Бессвинцовая секция нейтронного монитора (БСНМ) регистрирует нейтроны с энергиями $E \approx (0.1 \div 1)$ МэВ. Для совместного использования со стандартными детекторами на станции НМ Апатиты был разработан и установлен нейтронный спектрометр с тремя каналами по энергиям и углом приема частиц, составляющим 15° . Такая конфигурация устройства позволяет изучать степень анизотропии потока частиц с различных направлений. Характеристики детектора (функция отклика и угол приема частиц), а также геометрические размеры были получены численным моделированием при помощи пакета GEANT4 [Agostinelli et al., 2003]. В ходе работы устройства была создана база данных наблюдений и получены предварительные результаты.

Ключевые слова: космические лучи, ядерная физика, метод Монте-Карло, регистрация частиц.

Abstract. In the interaction of cosmic rays (CRs) with Earth's atmosphere, neutrons are formed in a wide range of energies: from thermal ($E \approx 0.025$ eV) to ultrarelativistic ($E > 1$ GeV). To detect and study CRs, Polar Geophysical Institute (PGI) uses a complex monitoring system containing detectors of various configurations. The standard neutron monitor (NM) 18-NM-64 is sensitive to neutrons with energies $E > 50$ MeV. The lead-free section of the neutron monitor (BSRM) detects neutrons with energies $E \approx (0.1 \div 1)$ MeV. Also, for sharing with standard detectors, the Apatity NM station has developed and installed a neutron spectrometer with three energy channels and a particle reception angle of 15 degrees. The configuration of the device makes it possible to study the degree of anisotropy of the particle flux from different directions. We have obtained characteristics of the detector (response function and particle reception angle), as well as geometric dimensions through numerical simulation using the GEANT4 toolkit [Agostinelli et al., 2003]. During operation of the device, we collected database of observations and received preliminary results.

Keywords: cosmic rays, nuclear physics, Monte Carlo method, particle detection.

ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи (КЛ) — потоки заряженных частиц различных энергий, на ~ 90 % состоящие из высокоэнергичных протонов. Источники галактических КЛ (ГКЛ) находятся в межзвездном пространстве и к Земле приходят приблизительно изотропно. Солнечные КЛ (СКЛ) также в основном состоят из протонов, но их источником является Солнце. Проникая в атмосферу Земли, КЛ взаимодействуют с ней различными способами в зависимости от

энергии частиц и плотности окружающего их вещества. В верхних слоях вещество атмосферы разряжено и заряженные частицы теряют свою энергию преимущественно в процессе ионизации. Начиная с высоты 15 – 20 км над уровнем моря, возрастает вероятность ядерных реакций, в ходе которых появляются каскады вторичных частиц, состоящие из электромагнитной и адронной, в том числе нейтронной, компонент. Нейтроны, образовавшиеся в результате этих реакций, имеют широкий диапазон энергий (до десятков ГэВ) и распространяются вглубь атмосферы,

достигая поверхности Земли. В процессе распространения они теряют энергию. Таким образом, у Земли существуют потоки нейтронов различных энергий, начиная с тепловых (0.025 эВ). При этом потоки нейтронов малых энергий, как правило, остаются без внимания. В то же время именно они участвуют в ядерных реакциях.

В ПГИ мониторинг потока нейтронов различных энергий производится на созданном регистрирующем комплексе [Maurchev, Balabin, 2016; Германенко и др., 2016]. В его состав входят стандартный НМ (счетчики СНМ-15, 18-НМ-64; энергия >50 МэВ), бессвинцовая секция НМ (БСНМ, 4 СНМ-15, эффективная энергия регистрации от тепловых энергий до единиц МэВ). Для расширения возможностей системы сбора данных в дополнение к имеющемуся оборудованию был установлен узконаправленный нейтронный спектрометр (УНС). Особенностью данного устройства является, как следует из названия, довольно узкая диаграмма направленности (~15°), которая обеспечивается конфигурацией защиты вокруг счетчиков. УНС состоит из трех счетчиков, разделенных слоями замедлителя, — таким образом, задаются три диапазона по энергиям. Подробнее конструкция описана в разделе 1. Следует заметить, что предварительно она была рассчитана с помощью пакета GEANT4. Внешний вид модели показан на рис. 1.

1. УСТРОЙСТВО УНС

В результате моделирования были получены геометрические параметры устройства, фронтальная проекция которого показана на рис. 2. В качестве детекторов нейтронов применяются гелиевые счетчики СНМ-18 с эффективностью регистрации ~70 %. С ростом энергии нейтрона эффективность регистрации счетчиком резко падает, высокоэнергичные нейтроны проходят сквозь счетчик без взаимодействия. Счетчики установлены друг над другом и окружены слоем парафина толщиной 15 см, который эффективно замедляет нейтроны с энергией $E < 1$ МэВ. Между счетчиками и парафиновой массой расположен слой вещества толщиной 4 см, содержащий бор, поглощающий тепловые нейтроны. В результате данный детектор практически недоступен для тепловых нейтронов, пришедших в него под большими углами, и имеет небольшой угол приема частиц, составляющий 15°. Между тремя счетчиками проложен дополнительный слой парафина толщиной 5 см, замедляющий попавшие в УНС через окошко нейтроны. Верхний счетчик, не закрытый парафиновым слоем, регистрирует нейтроны тепловых энергий. Средний счетчик, разделенный с входным окошком парафиновой вставкой 5 см — нейтроны с энергиями до $E < 100$ кэВ. Нижний счетчик, разделенный с входным отверстием парафиновым слоем 10 см, регистрирует нейтроны в диапазоне энергий $0.1 < E < 1$ МэВ. Среди преимуществ этого детектора можно выделить его мобильность за счет использования СНМ-18 с малыми габаритами (длина 320 мм, диаметр 32 мм). Вследствие использования этих счетчиков УНС не обладает высокой статистической точностью (его погреш-

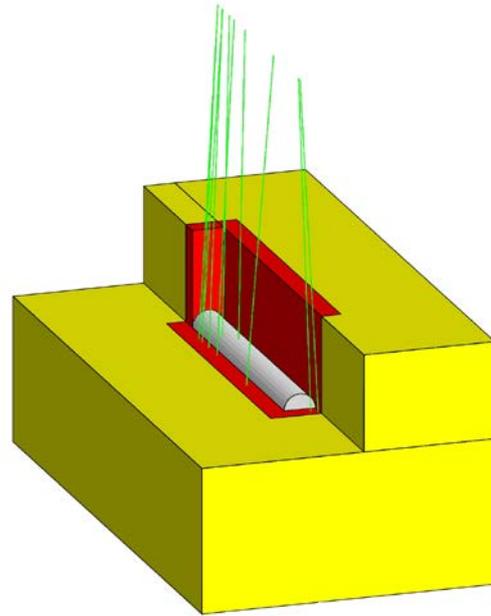


Рис. 1. Трехмерная модель УНС, полученная в результате расчета при помощи GEANT4. Желтым цветом показан парафин, красным — область поглотителя, обеспечивающая защиту от тепловых нейтронов, входящих со стороны парафинового замедлителя. Верхний счетчик показан серым цветом, зеленые линии — треки нейтронов, влетающих в приемное отверстие УНС

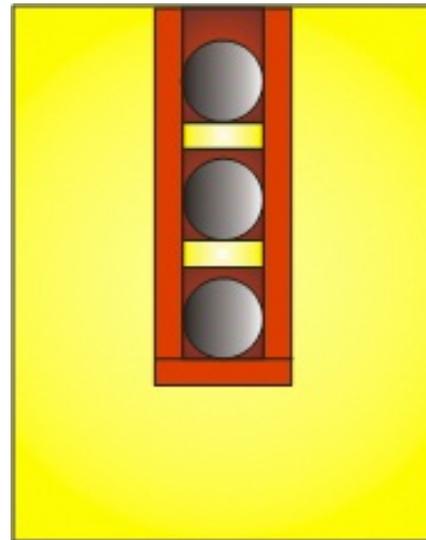


Рис. 2. Сечение проекции модели УНС. Желтым цветом показан парафин, играющий роль замедлителя нейтронов, красным — борсодержащий поглотитель, обеспечивающий защиту от тепловых нейтронов вне приемного окошка, серым — гелиевые счетчики

ность в счете составляет для верхнего счетчика 1.9 %, для среднего 3.2 %, а для нижнего 4.7 %). Скорость счета для каждого из счетчиков очень низкая, поэтому нами использовались среднесуточные значения для наблюдения за вариациями нейтронного потока.

В качестве детектирующих объектов используются пропорциональные ^3He -счетчики, эффективное сечение захвата нейтронов при энергии $E \approx 0.025$ эВ составляет $\sigma = 5400$ барн. Канал реакции может быть выражен формулой



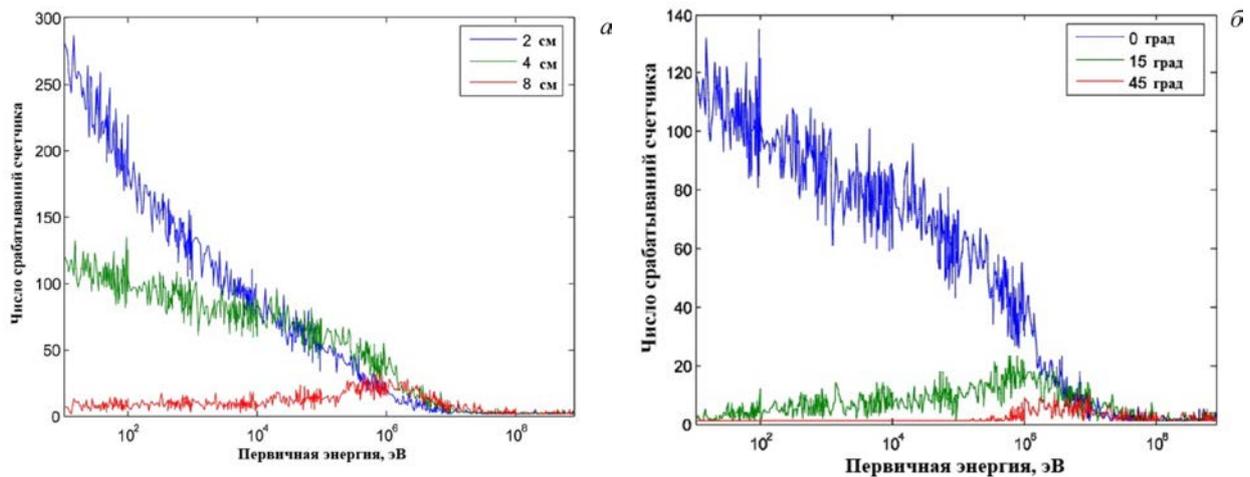


Рис. 3. Расчетная эффективность регистрации нейтронов в зависимости от толщины пластины над счетчиком (а) и угла прихода частиц (б)

В ходе этой реакции образуются ядро трития и протон, которые вызывают вторичную ионизацию. Продукты реакции, ионизируя газ, накапливаясь на нити (аноде) и на стенках (катоде) детектора, формируют электрический импульс, амплитуда которого пропорциональна энергии этой частицы, а точнее, энергии, затраченной частицей на первичную ионизацию среды детектора [Широков, Юдин, 1980]. Если первичный нейтрон имеет энергию выше тепловой ($0.025 \text{ эВ} < E < 1 \text{ МэВ}$), он замедляется вследствие реакции упругого рассеяния на атомах водорода, входящего в состав парафина. При одном таком взаимодействии нейтрон теряет до половины своей энергии. В случае, когда $E > 1 \text{ МэВ}$, сечение реакции рассеяния резко падает и нейтрон с большой долей вероятности пролетает сквозь материал детектора.

2. РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ УНС

Для расчета геометрических параметров, определяющих угол обзора, и функции отклика устройства в зависимости от энергии и угла прихода частиц в данной работе использовался программный пакет GEANT4. При моделировании расчет параметров материалов и конфигурация приемного окошка устройства определялись таким образом, чтобы максимально расширить диапазон измеряемых энергий, а также обеспечить узконаправленность детектора. Сечения взаимодействий нейтрона с веществом до энергий $E=10 \text{ МэВ}$ выбирались с использованием базы ENDF/B-VII.1 [Chadwick et al., 2011]. Использовались также стандартные электромагнитные процессы для моделирования работы ^3He -счетчиков.

Модельный эксперимент состоял из двух частей. На первом этапе верхний счетчик помещался под пластину замедлителя с разной толщиной (2, 4, 8 см). Генератор частиц был реализован так, чтобы нейтроны падали строго перпендикулярно, имея равномерное распределение по площади окошка. Во второй части эксперимента пластина была убрана и направление частиц генерировалось под разными

углами (0, 15 и 45°) относительно центральной части УНС. Эффективности регистрации, полученные в результате проведенных расчетов, показаны на рис. 3, а, б. Видно, что наличие пластины между счетчиками позволяет реализовать функцию калориметра в устройстве, а окошко обеспечивает узконаправленность детектора, исключая попадание нейтронов, пришедших под большими углами.

3. ГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ НЕЙТРОННЫХ ПОТОКОВ РАЗЛИЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

Регистрация данных с УНС велась в течение года с момента его реализации (с 1 января 2016 по 31 декабря 2016 г.), полученные результаты были сохранены в базе данных общей системы мониторинга. Интенсивности счета УНС совместно с НМ и БСНМ в зависимости от дней года показаны на рис. 4. Видно (рис. 4 а, в), что показания верхнего счетчика УНС хорошо согласуются с результатами регистрации нейтронов при помощи БСНМ и указывают на присутствие сезонной вариации в интенсивности нейтронов с энергиями от 0.025 эВ до 1 МэВ. Зависимость скорости счета от времени года для стандартного НМ 18-NM-64 отсутствует, как и для нижнего счетчика УНС (рис. 4, з, д), что объясняется чувствительностью к более энергичным нейтронам. Средний счетчик УНС имеет слабовыраженную сезонную вариацию (рис. 4, б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Узконаправленный детектор тепловых нейтронов значительно расширяет возможности комплексной системы сбора данных, установленной на станции НМ. За время эксплуатации было показано, что устройство не только обладает функциями спектрометра, включая в себя три канала регистрации, но и позволяет измерять степень анизотропии потока тепловых нейтронов в приземном слое. При помощи УНС проведены наблюдения в течение года и получены данные, которые подтверждают полное соответствие реальной и расчетной эффективности прибора.

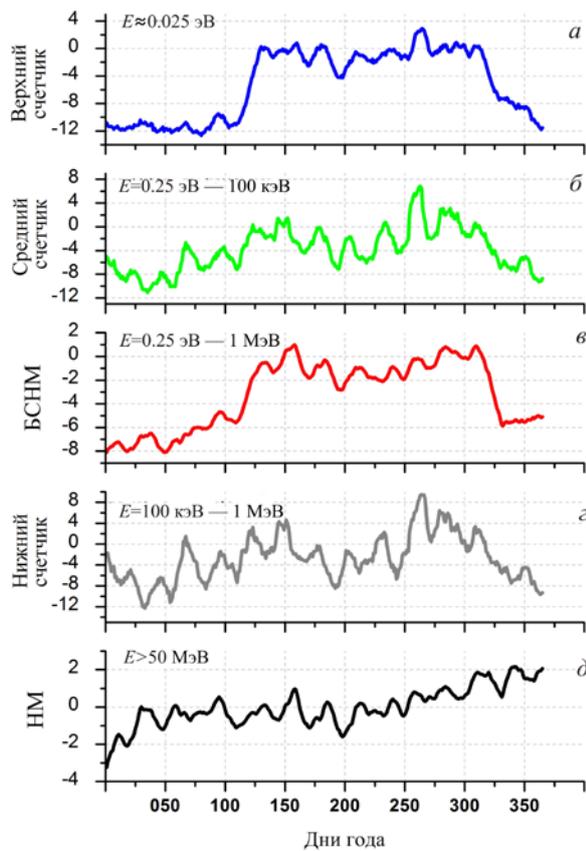


Рис. 4. Профили счета детекторов: верхний счетчик нейтронного спектрометра (а); средний счетчик спектрометра (б); бессвинцовая секция нейтронного монитора (в); нижний счетчик спектрометра (г); стандартный нейтронный монитор (д)

Следует заметить, что устройство не только способно работать в составе существующей системы сбора данных, но может также дополнить знания о тепловой части спектра нейтронов у Земли, полученного в [Pioch et al., 2011].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Германенко А.В., Балабин Ю.В., Гвоздецкий Б.Б., Щур Л.И. Природа вариаций гамма-излучения во время осадков // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 1. С. 56–63. DOI: 10.12737/19880.

Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. 2-е изд. М.: Наука, 1980. 728 с.

Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al. Geant 4 — a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2003. V. 506, N 3. P. 250–303. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.

Chadwick M.B., Herman M., Obložinský P., et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data // Nuclear Data Sheets. 2011. V. 112, iss. 12. P. 2887–2996. DOI: 10.1016/j.nds.2011.11.002.

Maurchev E.A., Balabin Yu.V. RUSCOSMIC — the new software toolbox for detailed analysis of cosmic ray interactions with matter // Solar-Terr. Phys. 2016. V. 2, N 4. P. 3–10. DOI: 10.12737/24269.

Pioch C., Mares V., Vashenyuk E.V., et al. Measurement of cosmic ray neutrons with Bonner sphere spectrometer and neutron monitor at 79° N // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. 2011. V. 626. P. 51–57. DOI: 10.1016/j.nima.2010.10.030.

REFERENCES

Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M., Axen D., Banerjee S., Barrand G., Behner F., Bellagamba L., Boudreau J., Broglia L., Brunengo A., Burkhardt H., Chauvie S., Chuma J., Chytráček R., Cooperman G., Cosmo G., Degtyarenko P., Dell'Acqua A., Depaola G., Dietrich D., Enami R., Feliciello A., Ferguson C., Fesefeldt H., Folger G., Foppiano F., Forti A., Garelli S., Giani S., Giannitrapani R., Gibin D., Gomez Cadenas J.J., Gonzalez I., Gracia Abril G., Greeniaus G., Greiner W., Grichine V., Grossheim A., Gumplinger P., Hamatsu R., Hashimoto K., Hasui H., Heikkinen A., Howard A., Ivanchenko V., Johnson A., Jones F.W., Kallenbach J., Kanaya N., Kawabata M., Kawabata Y., Kawaguti M., Kelner S., Kent P., Kodama T., Kokoulin R., Kossov M., Kurashige H., Lamanna E., Lampen T., Lara V., Lefebvre V., Lei F., Liendl M., Lockman W., Longo F., Magini S., Maire M., Medernach E., Minamimoto K., Mora de Freitas P., Morita Y., Murakami K., Nagamatsu M., Nartallo R., Nieminen P., Nishimura T., Ohtsubo K., Okamura M., O'Neale S., Oohata Y., Paech K., Perl J., Pfeiffer A., Pia M.G., Ranjard F., Rybin A., Sadilov S., Salvo E Di, Santin G., Sasaki T., Savvas N., Sawada Y., Scherer S., Sei S., Sirotenko V., Smith D., Starkov N., Stoecker H., Sulkimo J., Takahata M., Tanaka S., Tcherniaev E., Safai Tehrani E., Tropeano M., Truscott P., Uno H., Urban L., Urban P., Verderi M., Walkden A., Wander W., Weber H., Wellisch J.P., Wenaus T., Williams D.C., Wright D., Yamada T., Yoshida H., Zschiesche D. Geant 4 — a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2003, vol. 506, no. 3, p. 250. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.

Chadwick M.B., Herman M., Obložinský P., Dunn M.E., Danon Y., Kahler A.C., Smith D.L., Pritychenko B., Arbanas G., Arcilla R., Brewer R., Brown D.A., Capote R., Carlson A.D., Cho Y.S., Derrien H., Guber K., Hale G.M., Hoblit S., Holloway S., Johnson T.D., Kawano T., Kiedrowski B.C., Kim H., Kunieda S., Larson N.M., Leal L., Lestone J.P., Little R.C., McCutchan E.A., MacFarlane R.E., MacInnes M., Mattoon C.M., McKnight R.D., Mughabghab S.F., Nobre G.P.A., Palmiotti G., Palumbo A., Pigni M.T., Pronyaev V.G., Sayer R.O., Sonzogni A.A., Summers N.C., Talou P., Thompson I.J., Trkov A., Vogt R.L., van der Marck S.C., Wallner A., White M.C., Wiarda D., Young P.G. ENDF/B-VII.1 Nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data. *Nuclear Data Sheets*. 2011, vol. 112, iss. 12. pp. 2887–2996. DOI: 10.1016/j.nds.2011.11.002.

Germanenko A.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B., Shchur L.I. Nature of variations of gamma-radiation during precipitation. *Solnechno-zemnaya fizika [Solar-Terrestrial Physics]*. 2016, vol. 2, no. 1. pp. 56–63. (In Russian). DOI: 10.12737/19880.

Maurchev E.A., Balabin Yu.V. RUSCOSMIC — the new software toolbox for detailed analysis of cosmic ray interactions with matter. *Solar-Terr. Phys.* 2016, vol. 2, no. 4. pp. 3–10. DOI: 10.12737/24269.

Pioch C., Mares V., Vashenyuk E.V., Balabin Yu., Rühm W. Measurement of cosmic ray neutrons with Bonner sphere spectrometer and neutron monitor at 79° N // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A*. 2011, vol. 626, pp. 51–57. DOI: 10.1016/j.nima.2010.10.030.

Shirokov Yu.M., Yudin N.P. *Yadernaya fizika [Nuclear Physics]*. 2nd Edition. Moscow, Nauka Publ., 1980. 728 p. (In Russian).

Как цитировать эту статью

Михалко Е.А., Балабин Ю.В., Маурчев Е.А., Германенко А.В. Новый узконаправленный нейтронный спектрометр в комплексной системе мониторинга. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 1. С. 85–88. DOI: 10.12737/szf-41201808.