

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 524.1-352

НАПРАВЛЕННЫЙ ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНОВ  
УМЕРЕННЫХ ЭНЕРГИЙ

© 2021 г. Е. А. Михалко<sup>а,\*</sup>, Е. А. Маурчев<sup>а</sup>,  
Ю. В. Балабин<sup>а</sup>, А. В. Германенко<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Полярный геофизический институт  
Россия, 184209, Апатиты, Академгородок, 26а

\*e-mail: mikhalko@pgia.ru

Поступила в редакцию 17.11.2020 г.

После доработки 03.12.2020 г.

Принята к публикации 07.12.2020 г.

Для совместного использования со стандартными детекторами на станции космических лучей г. Апатиты разработан и установлен нейтронный спектрометр с тремя каналами по энергиям и углом приема частиц, составляющим  $15^\circ$ . Такая конфигурация устройства позволяет изучать степень анизотропии потока частиц. Характеристики детектора (функция отклика и угол приема частиц), а также геометрические размеры были получены численным моделированием при помощи пакета программ GEANT4. В ходе работы устройства была собрана база данных наблюдений и получены предварительные результаты.

DOI: 10.31857/S0032816221030228

ВВЕДЕНИЕ

В результате взаимодействия космических лучей с атомами воздуха образуется большое количество различных частиц [1–3]. Если первичная частица имеет достаточно высокую энергию ( $E > 1$  ГэВ), то она производит целый каскад вторичных частиц, которые в процессе распространения в атмосфере испытывают неупругие соударения с ядрами атомов воздуха, в результате чего рождаются каскадные и испарительные нейтроны. Последние рассеиваются и поглощаются атмосферой и постепенно теряют энергию до тепловых значений (доли электронвольт).

Созданная в Полярном геофизическом институте комплексная система мониторинга позволяет регистрировать такие нейтроны в широком диапазоне энергий. Так, стандартный нейтронный монитор типа СНМ-18-НМ-64 предназначен для регистрации нейтронов с энергиями  $E > 50$  МэВ, а бесвинцовая секция нейтронного монитора имеет максимальную эффективность в диапазоне от тепловых и до умеренных энергий ( $0.025 < E < 106$  эВ). Для исследования анизотропии потока нейтронов умеренных энергий был разработан направленный детектор нейтронов (н.д.н.). 20 апреля 2015 г. на станции космических лучей в дополнение к имеющемуся оборудованию был установлен и введен в эксплуатацию н.д.н. Проектирование детектора, а также расчет его чувствительности и энергетического диапазо-

на осуществлялись с помощью численного моделирования с использованием программного па-

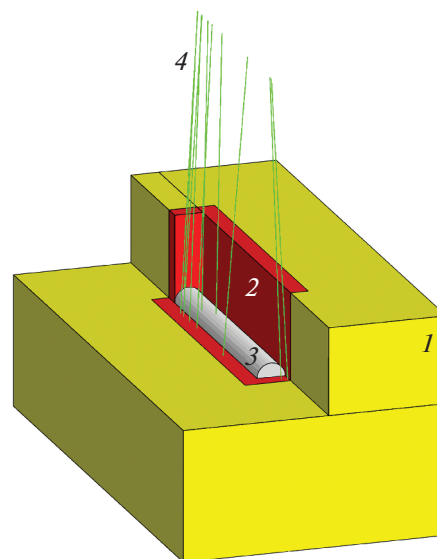


Рис. 1. Конфигурация н.д.н., полученная в результате моделирования при помощи пакета программ GEANT4. 1 – слой парафина; 2 – поглотитель, служащий защитным барьером от попадания тепловых нейтронов, движущихся со стороны парафинового замедлителя; 3 – верхний счетчик; 4 – треки влетающих нейтронов.

**Таблица 1.** Описание материалов, используемых при создании геометрии модели н.д.н.

| Материал (часть детектора, выполненная из этого материала) | Состав материала (процентное соотношение массы элемента)                             | Плотность, кг/м <sup>3</sup> |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Полиэтилен (промежуточные замедляющие пластины)            | (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) <sub>n</sub>                                        | 950                          |
| Парафин (вещество основного замедлителя)                   | C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>                                                      | 900                          |
| Бура (поглотитель тепловых нейтронов)                      | Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> · 10H <sub>2</sub> O                   | 1700                         |
| Сталь (оболочка счетчиков)                                 | B (18.5% <sup>10</sup> B, 81.5% <sup>11</sup> B (Потапов, 1961))<br>Fe (98%), C (2%) | 7850                         |
| Изотоп гелия (активное вещество счетчиков)                 | <sup>3</sup> He (100%)                                                               | 0.134                        |

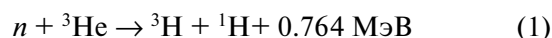
кета GEANT4 [4].

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ

Общая конструкция прибора определялась основным его назначением — обеспечить направленный прием детектируемых частиц. При моделировании н.д.н. были определены его окончательные конструктивные параметры (рис. 1).

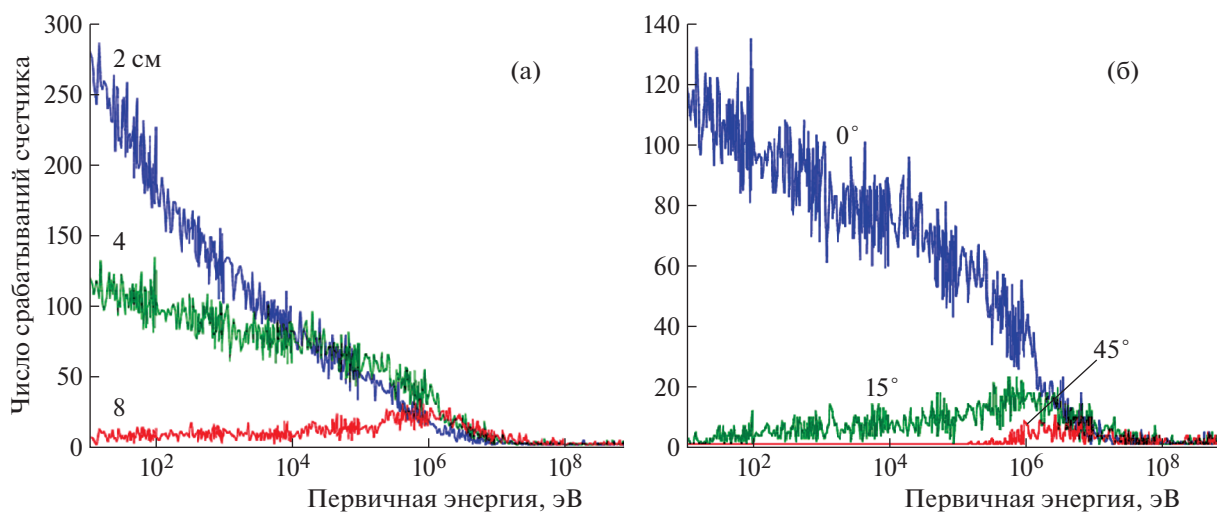
Геометрия задавалась в виде параллелепипеда из парафина, в центре верхней поверхности которого выполнена глубокая полость. Поверхность полости покрыта слоем декагидрата тетрабората натрия (бура) толщиной 2.5–3 см. В полости расположены чувствительные объемы, имитирующие работу счетчиков СНМ-18, между которыми помещены полиэтиленовые пластины различной толщины (2, 4 и 8 см). Список используемых при моделировании материалов представлен в табл. 1.

Регистрация нейтронов происходила по реакции [5, 6]:

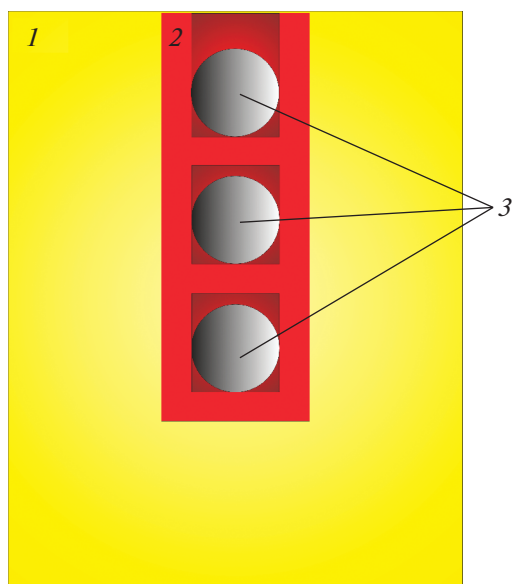


при образовании в счетчике ядра трития и протона.

Весь процесс моделирования разделен на 2 части [4], в первой определялась эффективность регистрации н.д.н. в зависимости от количества замедлителя, во второй — тот же параметр в зависимости от угла падения частиц. В первом случае эксперимент проводился в области приемного окна с моноэнергетическими перпендикулярными пучками нейтронов по 1000 частиц, энергия которых распределена в диапазоне 10<sup>1</sup>–10<sup>9</sup> эВ (шаг изменяется логарифмически). В зависимости от толщины слоя замедлителя над верхним счетчиком оценивалось общее число событий, зарегистрированных при срабатывании счетчиков для каждого пучка. Таким образом набиралась



**Рис. 2.** Эффективность регистрации нейтронов: **а** — в зависимости от энергии при различной толщине (цифры у кривых) промежуточного замедлителя при моделировании облучения н.д.н. потоком перпендикулярно падающих частиц; **б** — в зависимости от угла падения частиц (цифры у кривых) при облучении детектора потоком наклонно падающих частиц при дополнительном условии отсутствия верхней замедляющей пластины, угол наклона 0° — нейтроны падают в приемное окошко, 15° и 45° — нейтроны проходят через полиэтиленовый замедлитель и поглотитель из буры.



**Рис. 3.** Профиль внутренней конструкции н.д.н. 1 – парафин, используемый в качестве замедлителя нейтронов до тепловых энергий; 2 – борсодержащий слой, обеспечивающий защиту от тепловых нейтронов, приходящих из направлений, отличных от диаграммы направленности н.д.н.; 3 – детектирующие элементы.

гистограмма (рис. 2а), представляющая собой эффективность регистрации. Во втором случае движение модельного генератора частиц было организовано так, что его траектория представляла собой отрезок дуги окружности от 0° до 45° относительно центральной точки н.д.н. в плоскости, параллельной торцевой части счетчиков. Таким образом получена эффективность регистрации н.д.н. в зависимости от угла прихода частицы, представленная на рис. 2б.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

По результатам моделирования были определены геометрические параметры устройства ( $D \times \text{Ш} \times B = 60 \times 36 \times 32$  см) и его конструкция, фронтальная проекция которой представлена на рис. 3. В основе работы н.д.н. лежит свойство детектирующего оборудования преобразовывать поток зарегистрированных нейтронов в электри-

ческие импульсы. В качестве элементов, чувствительных к исследуемым частицам, были использованы гелиевые счетчики СНМ-18 (3) в стальной оболочке, основные технические характеристики которых представлены в табл. 2. Выбор в пользу СНМ-18 был определен, исходя из низкого значения рабочего напряжения питания, которое легко стабилизировать. Счетчики 3 установлены, как показано на рис. 3, в горизонтальном положении друг над другом в один ряд и помещены в короб 1 из парафина толщиной 15 см, который выступает в роли замедлителя нейтронов с энергиями  $E < 1$  МэВ.

В качестве поглотителя тепловых нейтронов, приходящих из направлений, отличных от диаграммы направленности н.д.н., использовалась парафиновая вставка 2 с добавлением тетрабората натрия [7]. Вставка толщиной 2.5–3 см отделяет ряд детекторов от основного слоя замедлителя. Если толщины замедлителя достаточно, чтобы попавший в него нейтрон потерял энергию до тепловых значений, то такой нейтрон эффективно (до 95%) будет захвачен ядром бора и в счетчик не попадет. Если энергия нейтрона столь высока, что он проходит через замедлитель и поглотитель, сохранив часть своей энергии, то такой нейтрон не регистрируется в силу нечувствительности счетчиков к нетепловым нейтронам. Таким образом, счетчики будут регистрировать только нейтроны, попавшие в детектор через приемное окно, что обеспечивает направленность приема нейтронного потока. Дополнительно все счетчики отделены друг от друга парафиновыми пластинками толщиной 5 см. Это обеспечивает разделение по энергиям, что, в свою очередь, позволяет использовать н.д.н. и в качестве простого спектрометра. Верхний счетчик имеет наибольшую эффективность регистрации для нейтронов с тепловыми энергиями (до 1 эВ), средний чувствителен к частицам с энергиями в диапазоне 0.025 эВ–100 кэВ, а нижний – с энергиями от 100 кэВ до ~2 МэВ.

На рис. 4 представлена блок-схема н.д.н., показывающая взаимодействие между составными компонентами: питанием, устройством детектирования и системой регистрации. На детекторы подается постоянное напряжение порядка 1400 В. Полученные гелиевым счетчиком импульсы передаются на соответствующий ему усилитель-дис-

**Таблица 2.** Основные технические характеристики <sup>3</sup>He-детекторов СНМ-18, используемых в составе конструкции н.д.н., предназначенного для исследования анизотропии потока тепловых нейтронов на уровне Земли

| Наименование | Диаметр, мм | Длина, мм | Диапазон рабочих температур, °С | Рабочее напряжение, В | Эффективность регистрации, % |
|--------------|-------------|-----------|---------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| СНМ 18       | 32          | 320       | от –50 до +150                  | 1375                  | 70                           |

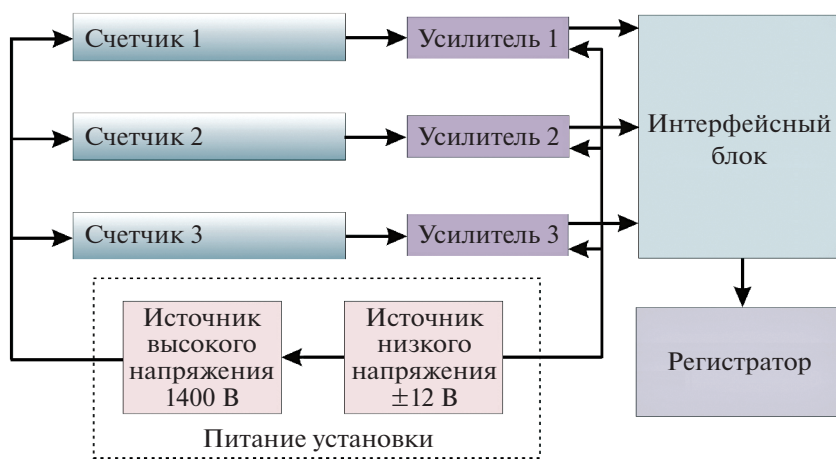


Рис. 4. Блок-схема направленного детектора нейтронов умеренных энергий.

криминатор (рис. 5), состоящий из трех каскадов на основе операционных усилителей AD825 ( $AD_1$ – $AD_3$ ). Эти усилители являются надежными и недорогими, и с учетом быстродействия и универсальности они способны поддерживать стабильное усиление при различных нагрузках. Каждый каскад имеет рабочее усиление, равное  $K_y = 13$ , соответственно суммарный коэффициент составляет порядка 2000 при двухполярном питании  $\pm 12$  В. Первый и третий каскады представляют собой простые усилители, а второй каскад – инвертирующий усилитель. Сигнал после усиления подается на компаратор LM211 ( $AD_4$ ), устраняющий лишние шумы ниже 1 В. Параллельно этому сигнал подается на аналоговый выход для его последующей калибровки. Последняя осуществляется за счет изменения общего  $K_y$  для каждого усилителя-дискриминатора индивидуально. Коэффициент усиления устанавливается в процессе регулировки делителя напряжения, размещенного перед выходным каскадом. Формирователь импульсов собран на микросхеме K561JE5 ( $DD_1$ ) и настроен на формирование импульсов длительностью 10 мкс ( $\pm 5\%$ ).

#### ИЗМЕРЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Наличие у н.д.н. довольно узкой диаграммы направленности можно проверить измерениями потоков нейтронов при различных углах к горизонту. В течение месяца н.д.н. работал в трех различных позициях по отношению к вертикали: в первую неделю диаграмма была направлена вертикально вверх, во вторую – под углом  $45^\circ$  относительно горизонта, в третью – находилась в горизонтальном положении.

Поток нейтронов у поверхности Земли определяется не только интенсивностью космических лучей, но и локальными условиями [8]. Поскольку имеется только один прибор и проводятся измерения потоков под различными углами в разные моменты времени, необходимо вначале выполнить коррекцию изменения потоков нейтронов в период проведения эксперимента. Данные о вариациях космических лучей были взяты из работы [9]. Однако стандартный нейтронный монитор специально разработан так, чтобы локальные условия (влажность почвы, осадки) оказывали на него малое воздействие. Так как поток тепловых нейтронов у Земли является изотропным, то вариации счета в других каналах н.д.н. определялись по отношению к первому (внешнему) счетчику, для которого изменение положения н.д.н. не влияет на счет. Это обеспечивает измерение потоков энергичных нейтронов по отношению к фоновому потоку тепловых нейтронов. Поскольку полученные величины дают лишь относительные вариации, то отношение второго или третьего каналов к первому в вертикальном положении было принято в качестве базового. Это позволило нагляднее представить наличие анизотропии.

На рис. 6 во втором (угол  $45^\circ$ ) и третьем (угол  $90^\circ$ ) положениях н.д.н. наблюдается увеличение счета относительно первого счетчика (относительно изотропного потока тепловых нейтронов). При наклонном положении н.д.н. наблюдается увеличение потока частиц с энергией до 100 кэВ на 7.5%, а в горизонтальном – темп счета снова уменьшается. В третьем канале для нейтронов с энергиями от 100 кэВ до  $\sim 2$  МэВ наблюдается возрастание потока регистрируемых частиц на  $\sim 14\%$ . При увеличении угла наклона до  $90^\circ$  поток нейтронов возрастает незначительно.

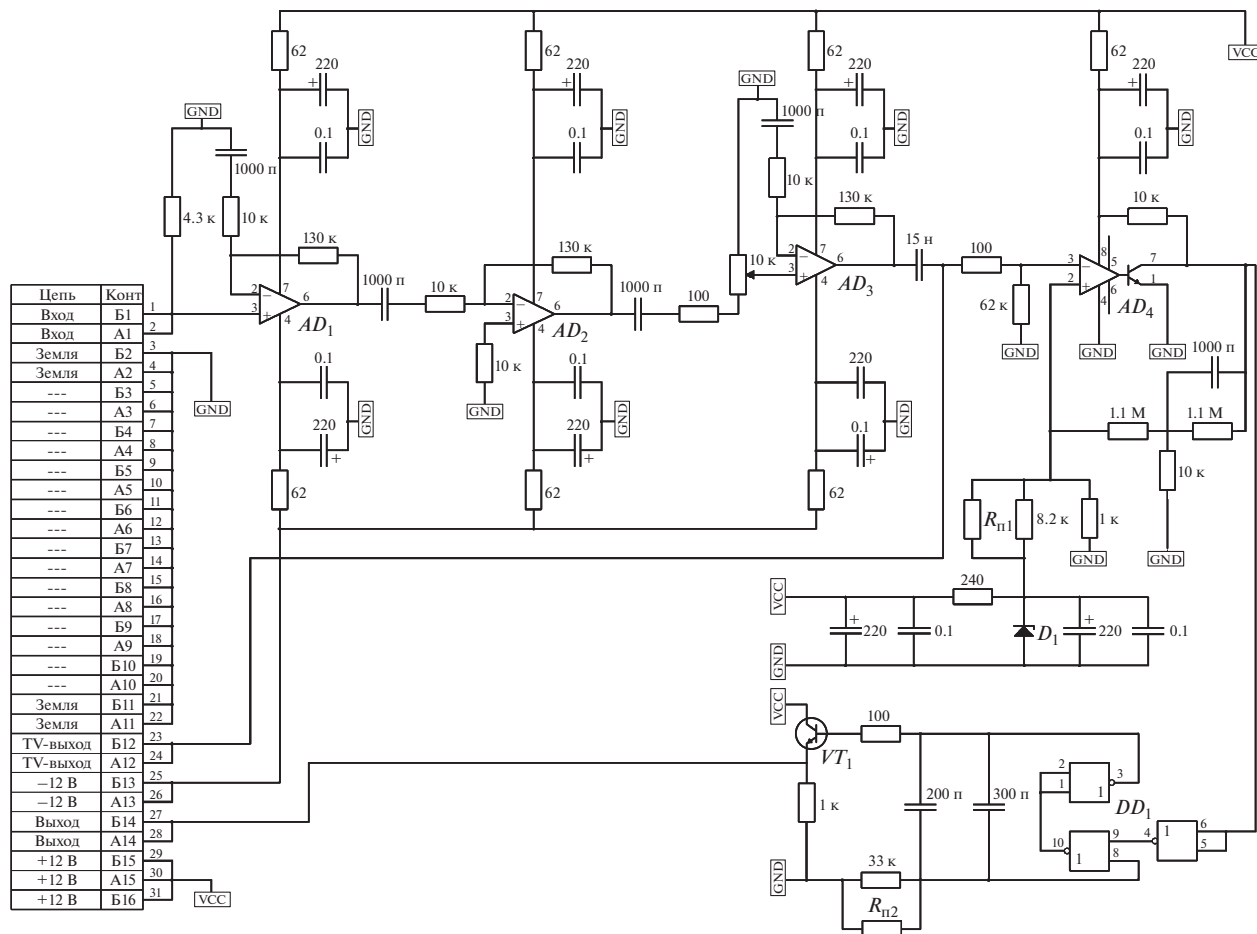


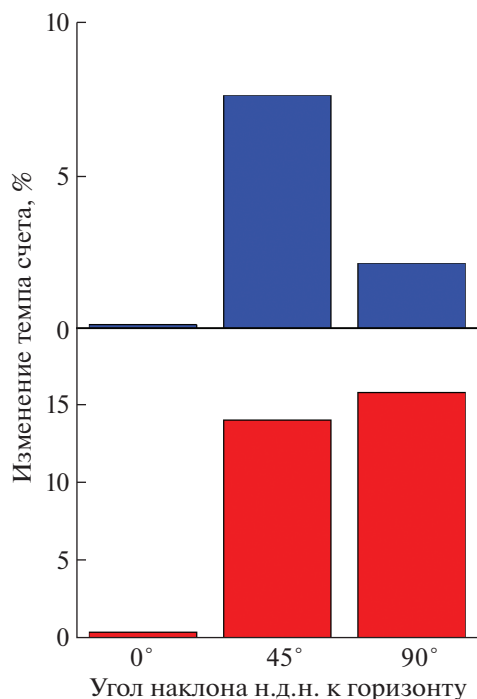
Рис. 5. Принципиальная схема используемого в работе трехкаскадного усилителя для н.д.н.  $AD_1$ – $AD_3$  – операционные усилители AD825;  $AD_4$  – компаратор LM211;  $DD_1$  – микросхема K561ЛЕ5;  $VT_1$  – транзистор КТ3201Б;  $D_1$  – стабилитрон Д818Е.

Предлагается следующее объяснение аномальному пику во втором канале. Из-за невозможности размещения на улице и для соблюдения постоянного температурного режима н.д.н. был установлен на подоконнике здания станции с очень толстыми стенами (>60 см). При вертикальном положении прибора часть его поля зрения оказалась закрытой верхней частью стены. В этом случае увеличение потока нейтронов умеренных энергий (до 100 кэВ) в наклонном под углом 45° положении н.д.н. может быть связано с тем фактом, что в этом направлении диаграмма приема прибора полностью открыта, тогда как в горизонтальном направлении поток нейтронов умеренных энергий закономерно падает. Увеличение потока нейтронов, по данным третьего канала (энергии от 100 кэВ до ~2 МэВ), в наклонном и горизонтальном положениях вполне объяснимо. Указанный энергетический диапазон приходится на пик “испарительных” нейтронов, которые ис-

пускаются ядрами атомов, возбужденных в столкновениях с первичной частицей космических лучей, в произвольном направлении. С попаданием в поле зрения различных плотных объектов поток испарительных нейтронов возрастает [10].

### ВЫВОДЫ

Для совместного использования со стандартными детекторами на станции космических лучей в г. Апатиты был разработан и создан направленный детектор нейтронов, конфигурация и параметры которого определены при помощи моделирования. Регистрация потока частиц ведется по трем энергетическим каналам, что позволяет прибору работать в качестве спектрометра. На протяжении нескольких лет осуществляется непрерывный мониторинг с помощью н.д.н. В процессе эксплуатации прибор показал надежность и стабильность рабочих параметров. Данные, полученные в ходе измерения анизотропии потоков



**Рис. 6.** График изменения темпа счета в различных направлениях: **а** – от второго счетчика к первому, **б** – от третьего счетчика к первому.

нейтронов у Земли, не противоречат опубликованным в других источниках информации расчетам и результатам моделирования. Поскольку точных данных об анизотропии потоков нейтронов у Земли и ее зависимости от энергии нейтронов на данный момент нет, использование нескольких одновременно работающих н.д.н., направленных под разными углами, могло бы внести ясность в этот вопрос.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда 18-77-10018.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maurchev E.A., Balabin Yu.V.* // Solar-Terrestrial Physics. 2016. Т. 2. № 4. С. 3. <https://doi.org/10.12737/24269>
2. *Широков Ю.М., Юдин Н.П.* Ядерная физика. (2-е изд.) М.: Наука, 1980.
3. *Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В., Михалко Е.А., Маурчев Е.А., Шур Л.И.* // ПТЭ. 2020. № 6. С. 71. <https://doi.org/10.31857/S0032816220060038>
4. *Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Михалко Е.А., Гвоздевский Б.Б.* // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 3. С. 81. <https://doi.org/10.12737/szf-53201908>
5. *Векслер В., Грошев Л., Исаев Б.* Ионизационные методы исследования излучений. М.: Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры, 1949.
6. *Калашикова В.И., Козодаев М.С.* Детекторы элементарных частиц. М.: Наука, 1966.
7. *Рисованый В.Д., Захаров А.В., Клочков Е.П., Гусева Т.М.* Бор в ядерной технике. 2-е, перераб. и доп. Димитровград: ОАО "ГНЦ НИИАР", 2011.
8. *Дорман Л.И.* Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975
9. <https://cosmicray.pgia.ru/nmonitors.html>
10. *Pioch C., Mares V., Vashenyuk E.V., Pioch C., Mares V., Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Rühm W.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 2011. V. 626–627. P. 51. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.10.030>