

УДК 53.082

СОСТАВ И НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ НАЗЕМНОГО КОМПЛЕКСА АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАРЯЖЕННОЙ И НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

А. Н. Квашнин, М. В. Филиппов, В. С. Махмутов

Для наземных измерений заряженной компоненты, нейтронов и спектров γ -квантов на Долгопрудненской научной станции ФИАН (Лаборатория физики Солнца и космических лучей) был создан комплекс научной аппаратуры, который лег в основу международной сети детекторов космических лучей. В настоящее время аппаратура установлена в четырех научных центрах: ДНС ФИАН (Московская область, г. Долгопрудный), международном астрономическом комплексе CASLEO (Complejo Astronomico el Leoncito; Аргентина, высота 2550 м над уровнем моря), Евразийском национальном университете (ЕНУ, г. Нур-Султан, Республика Казахстан) и Национальном научном центре KACST (Саудовская Аравия, г. Эр-Рияд). В статье приводится краткое описание научной аппаратуры и рассматриваются некоторые методические вопросы ее настройки и обработки экспериментального материала.

Ключевые слова: научная аппаратура, методика, настройка, обработка.

Введение. В работе описаны принципы работы новой наземной научной аппаратуры, предназначенной для изучения вариаций потоков космических лучей (к.л.). Были разработаны 3 типа установок: детектор заряженной компоненты к.л. – “CARPET/КОВЕР”, детектор нейтронной компоненты к.л. – “Нейтронный детектор” и “Гамма-спектрометр”. При разработке данной аппаратуры была применена концепция модульности: в зависимости от поставленных задач количество однотипных модулей

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: mfilippov@frtk.ru, kvashnin37@list.ru.

2 модуля “CARPET” и 1 модуль “Нейтронный детектор”. В КАССТ функционируют 2 модуля “CARPET”.

Детектор заряженных частиц “CARPET/КОВЕР”. Установка “CARPET” (или “КОВЕР”), предназначенная для измерения потоков заряженных частиц, введена в эксплуатацию в 2006 г. в CASLEO [1]. “CARPET” (рис. 1) включает в себя 24 блока детекторов, каждый из которых представляет собой конструкцию из 5 верхних и 5 нижних газоразрядных счетчиков СТС-6, разделенных алюминиевым поглотителем, толщиной 7 мм. Итого, 240 счетчиков.

Результатами измерений установки “CARPET” являются скорости счета (данные) по трем каналам: все верхние счетчики установки (канал “UP”), все нижние счетчики (канал “LOW”) и совпадения (одновременная регистрация частицы в любом верхнем и любом нижнем счетчике – канал “TEL”). Данные передаются на компьютер и записываются с временным разрешением 500 мс. Каналы “UP” и “LOW” установки “CARPET” чувствительны к электронам и позитронам с энергией $E > 200$ кэВ, протонам с $E > 5$ МэВ, мюонам с $E > 1.5$ МэВ, фотонам с $E > 20$ кэВ (эффективность регистрации $< 1\%$). В канале совпадений “TEL” регистрируются более энергичные частицы: электроны с энергиями $E > 5$ МэВ, протоны с $E > 30$ МэВ и мюоны с $E > 15.5$ МэВ.

Для данной установки был определен барометрический коэффициент, а также, несколькими способами, температурный коэффициент. Полученные значения коэффициентов и методики их расчета приведены в работе [2].

Другая установка данного типа, “CARPET – GCR”, используется с 2009 года в международном эксперименте “CLOUD” в CERN [3]. “CARPET – GCR” аналогична установке “CARPET”, установленной в CASLEO, однако, с целью уменьшения размеров, общее число счетчиков в ней было сокращено до 120 (по 60 верхних и нижних), объединенных в 12 детектирующих модулях.

В конце 2014 года была создана новая установка “CARPET”, также содержащая 120 счетчиков, но электроника и программное обеспечение установки [4] разработаны заново благодаря чему удалось сократить время интегрирования исходных данных с 500 мс до 1 мс. К функционалу установки также был добавлен дополнительный канал служебной информации “Телеметрия”, который содержит информацию об атмосферном давлении, температуре внутри кожуха установки и питающих напряжениях счетчиков и электронных плат [4].

Первые два модуля данной установки были запущены в 2015 году в КАССТ [5]. В 2015 и 2016 г.г. в ЕНУ запущены третий и четвертый модули установки: “CARPET-

ASTANA 1” и “CARPET-ASTANA 2” [6, 7]. С 2017 года на территории ДНС запущен пятый модуль: “CARPET-МОСКВА” [4].

Методика определения барометрического коэффициента для данных установок приведена в работе [4]. Температурный коэффициент для установки “CARPET-МОСКВА” был определен с использованием данных атмосферного зондирования Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) [8, 9], также расположенной в г. Долгопрудном.

Таким образом, на сегодняшний день существует сеть научных установок данного типа, состоящая из 6 модулей “CARPET” (1 в CASLEO, 2 в KACST, 2 в ЕНУ и 1 в ДНС), расположенных на различных широтах.

“*Нейтронный детектор*”. Основу установки “Нейтронный детектор” (НД) составляют гелиевые счётчики СНМ-18, чувствительные к тепловым нейтронам ($n + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{He} + p + 0.764 \text{ МэВ}$). Они помещены внутрь замедлителя нейтронов – прямоугольного полиэтиленового блока из пяти пластин со сторонами 420 и 300 мм и толщиной 20 мм каждая.

В 2015 году 3 модуля (“НД CASLEO” 0, 1 и 2) данной установки (рис. 1) запущены в непрерывную работу в CASLEO [10]. В 2017 году в ЕНУ запущен 1 модуль установки “НД ASTANA”. В 2019 году на ДНС ФИАН запущены 2 модуля установки “НД МОСКВА” 0–1 [11].

Таким образом, на сегодняшний день существует сеть научных установок данного типа, состоящая из 6 модулей НД (3 в CASLEO, 1 в ЕНУ и 2 на ДНС).

Темп счета установок передается и сохраняется на компьютере со скважностью 1 мс. Также, аналогично установкам “CARPET”, в каждом модуле “НД” реализован канал “Телеметрия”, который содержит информацию об атмосферном давлении, температуре внутри кожуха установки и питающих напряжениях счетчиков (1500 В) и электронных плат (12 В и 5 В).

В установках “НД” нейтронные счетчики функционируют в коронном режиме. Поэтому для каждого счетчика было определено значение высокого напряжения (в диапазоне 1500–1700 В), соответствующее началу коронного режима. После чего был снят спектр импульсов при облучении их Ро-Ве источником с энергиями нейтронов примерно от 100 кэВ до 10 МэВ [12]. На рис. 2 приведен типичный спектр, полученный для одиночного счетчика за 10 мин измерений от Ро-Ве источника. По полученным спектрам для каждого счетчика был определен порог срабатывания компаратора, устанавливаемый для того, чтобы отстроиться от шумовых импульсов в канале каждого счётчика.

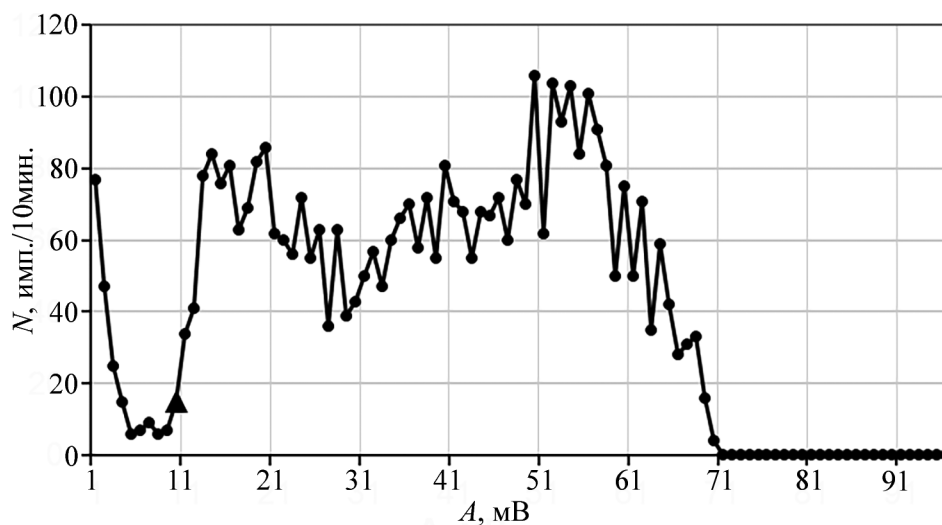


Рис. 2: Типичный спектр импульсов, снятый с анода счётчика СМ-18 (без предварительного усиления). Треугольником отмечен выбранный порог (~ 10 мВ).

В статье [11] приводится методика и результат определения барометрического коэффициента для установок “НД”.

Сцинтилляционный детектор “Гамма-спектрометр”. В 2014 г. на ДНС ФИАН разработана научная аппаратура “Гамма-спектрометр”, предназначенная для регистрации γ -излучения. В 2015 г. в обсерватории CASLEO были установлены четыре модуля данной установки (рис. 1).

В состав каждого модуля установки входят: цилиндрический кристалл NaI(Tl) размером 76×76 мм² в комплекте с ФЭУ Hamamatsu R1307, высоковольтный источник питания и усилитель [13]. С выхода усилителя импульсы подаются на один из 8 дифференциальных входов 128-канального АЦП “USB3000”. С АЦП полученная информация через интерфейс USB-2.0 передаётся на компьютер и сохраняется в файлы данных в виде числа импульсов в каждом канале. При текущих настройках программного обеспечения файлы записываются каждые 10 минут.

Для определения энергетической шкалы спектра необходимо было предварительно прокалибровать каждый детектирующий модуль установки. Для калибровки использованы радиоактивные источники γ -квантов. Были получены спектры импульсов при облучении кристаллов радиоактивными γ -источниками ^{137}Cs ($E_\gamma = 661$ кэВ) и ^{60}Co ($E_\gamma = 1173$ кэВ и 1331 кэВ).

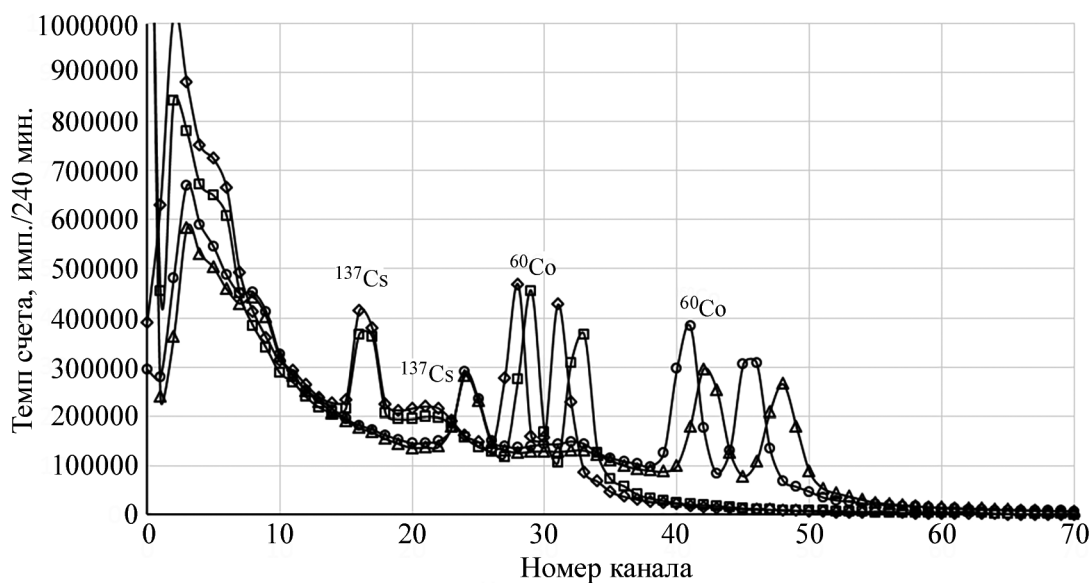


Рис. 3: Калибровочные спектры 4-х модулей аппаратуры “Гамма-спектрометр”: кружки – модуль 0, треугольники – модуль 1, ромбы – модуль 2, квадраты – модуль 3.

Во время калибровки напряжения питания ФЭУ (порядка -1500 В) в спектрометрах были подобраны так, чтобы пики, соответствующие ^{137}Cs попарно, совпали для детектирующих модулей 0-1 и 2-3 установки. Полученные калибровочные спектры (зависимость темпа счета от номера выходного канала амплитудного анализатора) для всех четырех модулей приведены на рис. 3.

Максимальный счёт от источника γ -квантов с данной энергией располагается в определённом выходном канале амплитудного анализатора (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Расположение энергетических пиков по каналам “Гамма-спектрометра” для разных источников γ -квантов

	Модуль 0	Модуль 1	Модуль 2	Модуль 3
E , кэВ	№ кан.	№ кан.	№ кан.	№ кан.
0	0	0	0	0
661	24.3	24.3	16.45	16.5
1173	40.7	42.35	27.85	28.8
1331	45.5	47.85	31.1	32.6

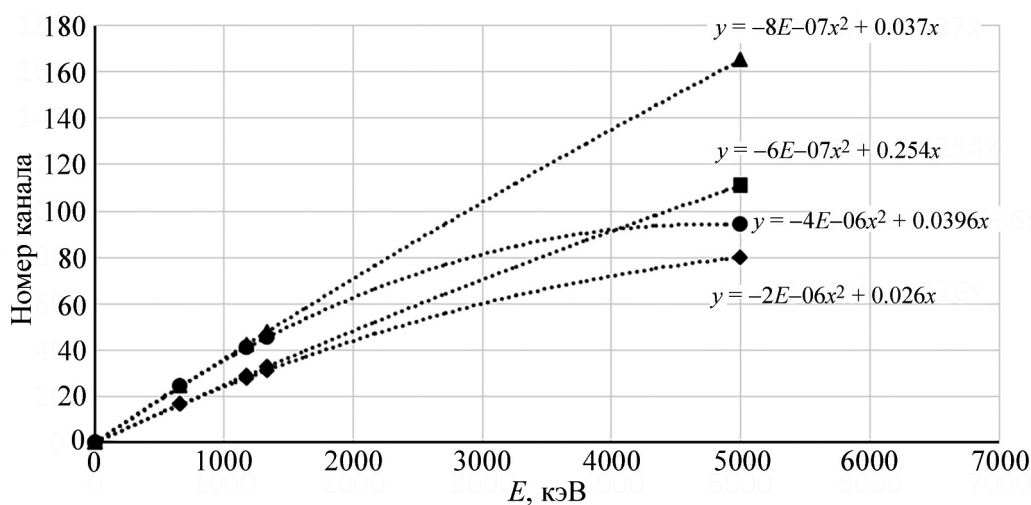


Рис. 4: Результаты калибровки 4-х модулей аппаратуры “Гамма-спектрометр”: кружки – модуль 0, треугольники – модуль 1, ромбы – модуль 2, квадраты – модуль 3.

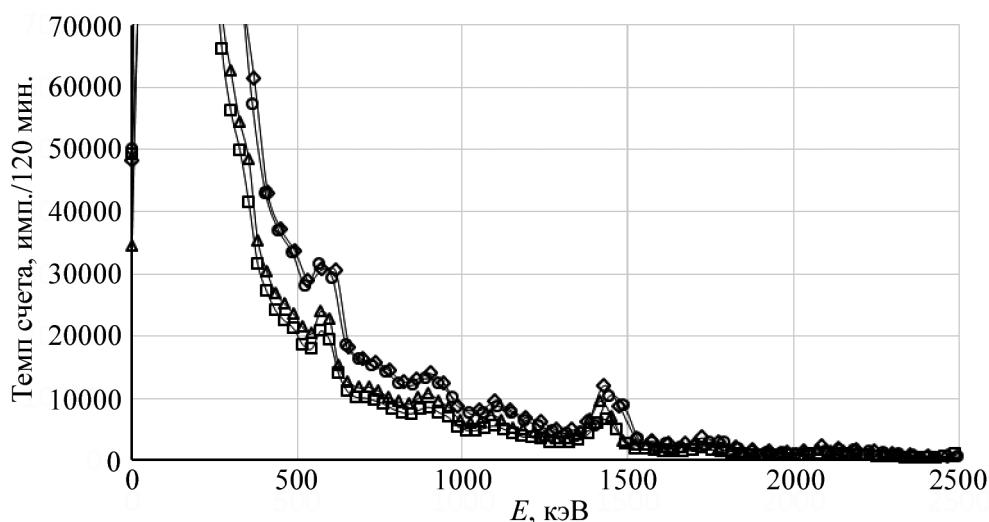


Рис. 5: Спектры γ -квантов по данным за 2 часа: треугольники – модуль 0, квадраты – модуль 1, ромбы – модуль 2, кружки – модуль 3.

По результатам калибровки (считаем, что γ -квант от ^{137}Cs с энергией 661 кэВ полностью поглощается в кристалле) определено, что максимальная энергия регистрируемых γ -квантов для модулей 0 и 1 составляет примерно 3.5 МэВ, а для модулей 2 и 3 – примерно 5.2 МэВ, что справедливо для кристаллов достаточно большой величины. Для кристалла в данном спектрометре необходимо вводить поправку в энергетическую шкалу спектра, так как уже примерно при 1 МэВ начинается неполное энергосодержание.

Это хорошо видно на рис. 4, где приведены кривые, полученные по результатам калибровки всех 4-х модулей. Здесь же показаны уравнения, описывающие форму каждой экспериментальной кривой калибровки (точки при энергии 5 МэВ найдены из полученных уравнений). По этим уравнениям и линейным уравнениям прямой для каждого спектрометра, проведенным через точки 0 и 661 кэВ, определена поправка для получения реальной энергии регистрируемого γ -кванта в каждом канале.

В процессе калибровки “Гамма-спектрометра” были измерены также спектры фона на к.л. на уровне Земли в г. Долгопрудном (рис. 5). На спектрах γ -квантов имеются выбросы. Это, по-видимому, излучение от естественной радиоактивности земли и приземной атмосферы. Мы попытались найти соответствующие каждому пику изотопы. Результаты приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Соответствия изотопов пикам γ -квантов на спектре фона на уровне земли

Энерг. эксп. пика, кэВ	Возможный изотоп	Энерг. γ -кванта изотопа, кэВ	Период полураспада
610	^{214}Bi	609	19.7 мин
908	^{208}Tl	908	3.1 мин
1110	^{214}Bi	1120	19.7 мин
1457	^{40}K	1460	$1.3 \cdot 10^9$ лет
1755	^{214}Bi	1760	19.7 мин
2593	^{208}Tl	2615	3.1 мин

Полученные нами результаты достаточно хорошо совпадают с результатами работ [14] и [15].

На рис. 5 приведены спектры γ -квантов всех четырех модулей спектрометра, построенные по измерениям фона в г. Долгопрудном в течение двух часов одновременно (измерения проводились сразу после градуировки модулей 10.07.2014 г.). На рис. 6 приведены такие же спектры, полученные из измерений фона на уровне гор (CASLEO, высота 2550 м) 20 июня 2017 г. Спектры определены с использованием результатов градуировки.

Из рис. 5 видно, что пики на спектрах для различных модулей хорошо совпадают. Небольшое расхождение в положении пиков на спектрах для различных модулей на рис. 6 связано, по-видимому, с разной реакцией модулей на изменение температуры.

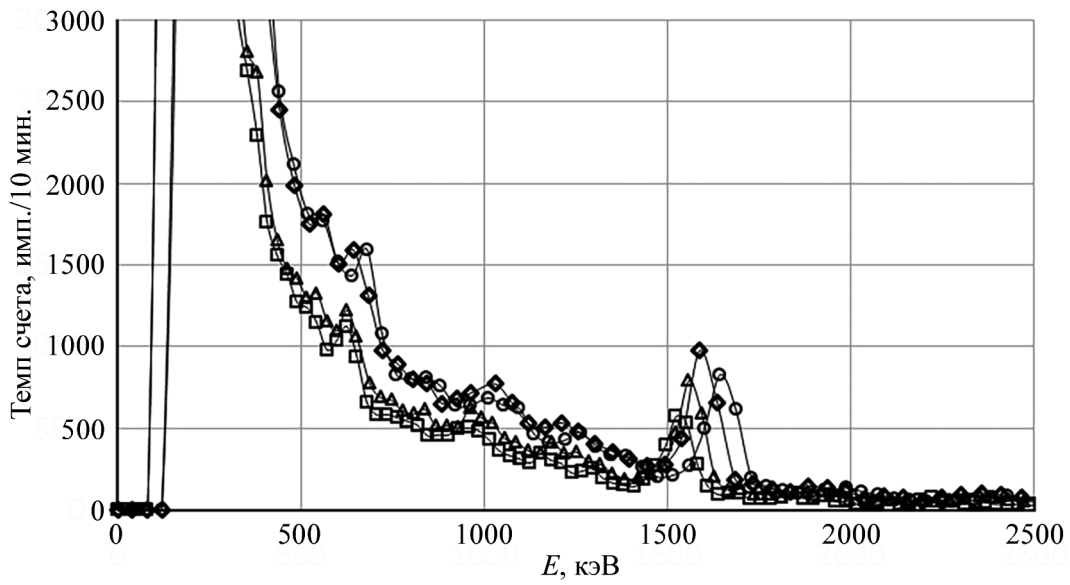


Рис. 6: Спектры γ -квантов по данным за 10 мин: треугольники – модуль 0, квадраты – модуль 1, ромбы – модуль 2, кружки – модуль 3.

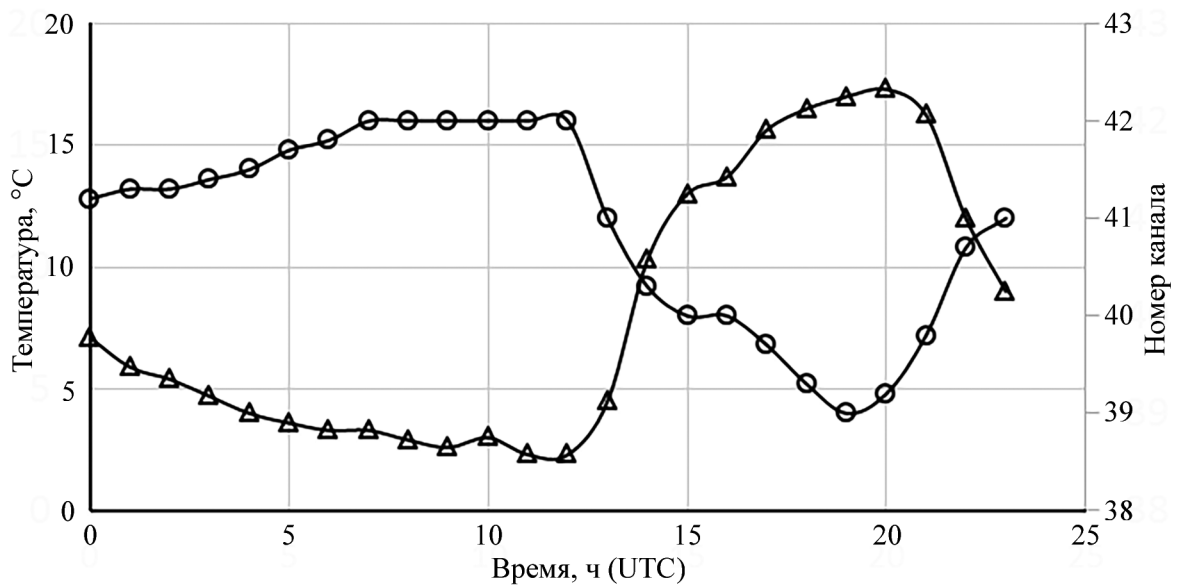


Рис. 7: Смещение пика ^{40}K по шкале амплитудного анализатора с изменением температуры в течение суток, номер канала – кружки, температура – треугольники.

При обработке данных фона было обнаружено, что пики на спектре γ -квантов со временем сдвигаются по шкале амплитудного анализатора. В результате поиска причины этого сдвига мы обнаружили, что этот сдвиг хорошо коррелирует с изменением

температуры. Это можно видеть на рис. 7, где приведено изменение температуры в течение суток и смещение при этом пика ^{40}K по шкале амплитудного анализатора.

Изменение имеет линейную зависимость и для приборов количественно даёт следующие значения: для модуля 0 поправка 0.28 ± 0.02 кан./град., для модуля 1 – 0.21 ± 0.02 кан./град., для модуля 2 – 0.15 ± 0.02 кан./град., для модуля 3 – 0.15 ± 0.02 кан./град.

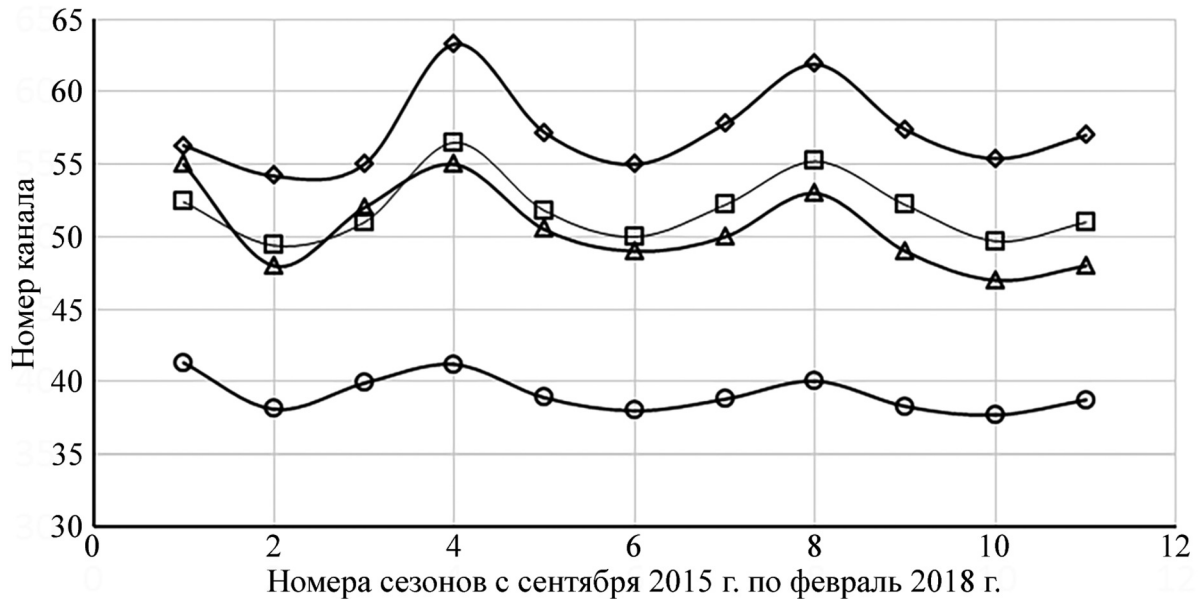


Рис. 8: Смещение пика ^{40}K в зависимости от времени года: треугольники – модуль 0, квадраты – модуль 1, ромбы – модуль 2, кружки – модуль 3.

Влияние температуры на “Гамма-спектрометр” отчетливо видно также из измерений в CASLEO при сравнении величины сдвига пика ^{40}K с сезонным изменением температуры в течение года. На рис. 8 представлены данные о номерах каналов, соответствующих наблюдению пика ^{40}K , полученные с сентября 2015 года по февраль 2018 года. Каждая точка является средней величиной измеренного номера канала по данным за последовательные 3 месяца (осенний, зимний, весенний и летний сезоны). Наибольшие значения номеров канала для пика ^{40}K отмечается в самое холодное время года (4-й и 8-й сезоны, соответствующие зимним условиям в южном полушарии). Для компенсации данного эффекта разработана методика калибровки “Гамма-спектрометра” по естественным источникам γ -излучения, приведенным в табл. 2. Эта методика описана в работе [13].

Заключение. В данной работе приведено описание и текущее состояние новой международной сети детекторов космических лучей, развернутой в 4-х научных центрах, в

основу которой положено 3 типа научных установок: “CARPET”, “Нейтронный детектор” и “Гамма-спектрометр”.

Для установок типа “CARPET” определен температурный и барометрический эффекты. Для установок типа “Нейтронный детектор” был определен барометрический эффект. Для “Гамма-спектрометра” был установлен температурный эффект.

Приведены результаты калибровки спектрометра по источникам γ -излучения: ^{137}Cs и ^{60}Co , позволяющие получить из экспериментальных данных спектр γ -квантов, падающих на кристалл. Также разработана методика калибровки установки “Гамма-спектрометр” по естественным источникам γ -излучения.

В настоящее время проводится анализ экспериментальных данных, накопленных за последние годы. В работе [7] на примере данных из ЕНУ показана чувствительность установок “CARPET” к вариациям первичных к.л., таких как Форбуш-понижения, являющиеся следствием проявления солнечной активности и возмущения межпланетного магнитного поля. В этой же работе приводятся результаты сравнительного анализа данных установок “CARPET-ASTANA” и данных сети нейтронных мониторов [16] на примере нескольких событий, произошедших в 2017 г.

В работах [17, 18] приводятся предварительные результаты анализа данных вариаций потоков к.л. во время грозовой и сейсмической активности.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] С. В. Мизин, В. С. Махмутов, О. С. Максумов, А. Н. Квашнин, Краткие сообщения по физике ФИАН **38**(2), 8 (2011). DOI: 10.3103/S1068335611020023.
- [2] R. R. S. De Mendonca, J.-P. Raulin, E. Echer, et al., J. Geophys. Res.: Space Phys. **118**(4), 1403 (2013). DOI: 10.1029/2012JA018026.
- [3] J. Kirkby et al., Nature **476**, 429 (2011). DOI: 10.1038/nature10343.
- [4] М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков, О. С. Максумов, Приборы и техника эксперимента, № 3, 109 (2020). DOI: 10.31857/S0032816220030039.
- [5] A. Maghrabi, V. S. Makhmutov, M. Almutairi, et al., Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics **200**, 105194 (2020). DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105194.
- [6] M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, Yu. I. Stozhkov, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. **959**, 16356 (2020). DOI: 10.1016/j.nima.2020.163567.
- [7] Е. А. Тулеков, В. С. Махмутов, Г. А. Базилевская и др., Геомагнетизм и аэрономия **60**(6), 704 (2020). DOI: 10.31857/S0016794020060139.

- [8] M. Philippov, V. Makhmutov, G. Bazilevskaya, et al., *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* **10**, 219 (2021). DOI: gi-10-219-2021.
- [9] A. V. Kochin, F. A. Zagumennov, V. L. Fomenko, *J. Atmos. Ocean. Tech.* **39**(9), 1491 (2021). DOI: 10.1175/JTECH-D-20-0158.1.
- [10] М. В. Филиппов, Ю. И. Стожков, В. С. Махмутов и др., *Изв. РАН, сер. физ.* **79**(5), 753 (2015). DOI: 10.7868/S036767651505021X.
- [11] М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков и др., *Приборы и техника эксперимента*, № 5, 96 (2020). DOI: 10.31857/S0032816220050298.
- [12] *Справочник по ядерной физике* (М., Государственное издательство физико-математической литературы, 1963), перевод с: *The nuclear handbook*, consulting editor O.R.Frisch, O.B.E., F.R.S. with 22 specialist contributors. London GEORGE NEWNES LIMITED 1958 под редакцией акад. Л.А. Арцимовича.
- [13] М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, А. Н. Квашиин и др., *Приборы и техника эксперимента*, № 4, 74 (2021). DOI: 10.31857/S0032816221040030.
- [14] K. Ford, J. R. Harris, R. Shives, et al., *Geoscience Canada* **35**(3-4), 109 (2008).
- [15] R. L. Grasty, *Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration-theory and operational procedures*; in *Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores*; Peter J. Hood, editor; Geological Survey of Canada, // *Economic Geology Report* **31**, 147 (1979).
- [16] База данных сети нейтронных мониторов: <http://www01.nmdb.eu/>
- [17] В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков, Ж.-П. Ролан и др., *Изв. РАН, сер. физ.* **81**(2), 262 (2017). DOI: 10.7868/S0367676517020260.
- [18] А. А. Орлов, В. С. Махмутов, М. В. Филиппов и др., *Изв. РАН, сер. физ.* **85**(11), 1666 (2021). DOI: 10.31857/S0367676521110272.

Поступила в редакцию 8 ноября 2021 г.

После доработки 23 ноября 2021 г.

Принята к публикации 24 ноября 2021 г.