

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 53.082

НАЗЕМНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ
ЛУЧЕЙ “ГАММА-СПЕКТРОМЕТР” В АСТРОНОМИЧЕСКОМ
КОМПЛЕКСЕ CASLEO

© 2021 г. М. В. Филиппов^{a,*}, В. С. Махмутов^a, А. Н. Квашнин^a,
О. С. Максумов^a, Ю. И. Стожков^a, Ж.-Р. Raulin^b, Ж. Tacza^b

^a Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

^b Universidade Presbiteriana Mackenzie, EE, CRAAM, Sao Paulo, Brazil

*e-mail: mfilippov@frtk.ru

Поступила в редакцию 21.01.2021 г.

После доработки 04.02.2021 г.

Принята к публикации 06.02.2021 г.

Представлены описание и технические характеристики научной установки “Гамма-спектрометр” для детектирования космических лучей, сконструированной на Долгопрудненской научной станции ФИАН в сотрудничестве с Университетом Маккензи (Сан-Пауло, Бразилия). Данная установка непрерывно функционирует в астрономическом комплексе CASLEO с 2015 года. Основой детектирующих модулей установки являются сцинтиллятор NaJ(Tl) Ø 76.2 мм и высотой 76.2 мм, фотоэлектронный умножитель Hamamatsu R1307, высоковольтный источник питания и преусилитель. Также приведена методика экспериментальной калибровки спектрометра.

DOI: 10.31857/S0032816221040030

ВВЕДЕНИЕ

В 2014 г. на Долгопрудненской научной станции (ДНС) Физического института им. П.Н. Лебедева, в рамках международного сотрудничества с учеными Бразилии и Аргентины, разработан аппаратно-программный комплекс “Гамма-спектрометр”, предназначенный для детектирования и определения энергетических спектров вторичных γ -квантов [1]. Данная научная аппаратура установлена в обсерватории CASLEO (Аргентина, S31.47°, W69.17°, высота 2550 м над уровнем моря, жесткость геомагнитного обрезания $R_c = 9.8$ ГВ), где в настоящее время функционирует комплекс детекторов космических лучей, ранее разработанных на ДНС ФИАН. В 2006 г. была запущена первая установка, регистрирующая заряженную компоненту космических лучей, CARPET [2–7]. В 2015 г. были запущены “Гамма-спектрометр” и установка для регистрации нейтронной компоненты космических лучей “Нейтронный детектор” [8, 9].

В данной работе представлены схемотехнические решения, использованные при разработке “Гамма-спектрометра”, и его характеристики. Также приведена методика калибровки по фоновому излучению.

УСТРОЙСТВО АППАРАТНО-
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

“Гамма-спектрометр” содержит четыре детектирующих модуля (рис. 1), в основе которых лежит сцинтилляционная сборка 12S12/3.VD.HVG. РА производства фирмы ScintiTech (<http://www.scintitech.com/>). В состав сцинтилляционной сборки входят: фотоэлектронный умножитель (ф.э.у.) Hamamatsu R1307 (<https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/type/R1307/index.html>) диаметром 76 мм, сцинтиллятор NaI(Tl) Ø76.2 мм и высотой 76.2 мм и электронный блок, который состоит из высоковольтного преобразователя, делителя напряжения и преусилителя. Для питания электронного блока необходимы напряжения ± 12 В.

Разработанный нами интерфейсный блок (рис. 2) рассчитан на подключение четырех детектирующих модулей через разъемы питания (XR1–XR4) и сигнальные разъемы (XR6–XR9). Первичные напряжения питания ± 12 В вырабатываются на преобразователях TML05212 (DA_1 и DA_2). Каждый преобразователь питает по два детектирующих модуля. Выходные напряжения высоковольтных преобразователей сцинтилляционных сборок настраиваются в диапазоне от -200 В до -1500 В, что позволяет устанавливать высокое

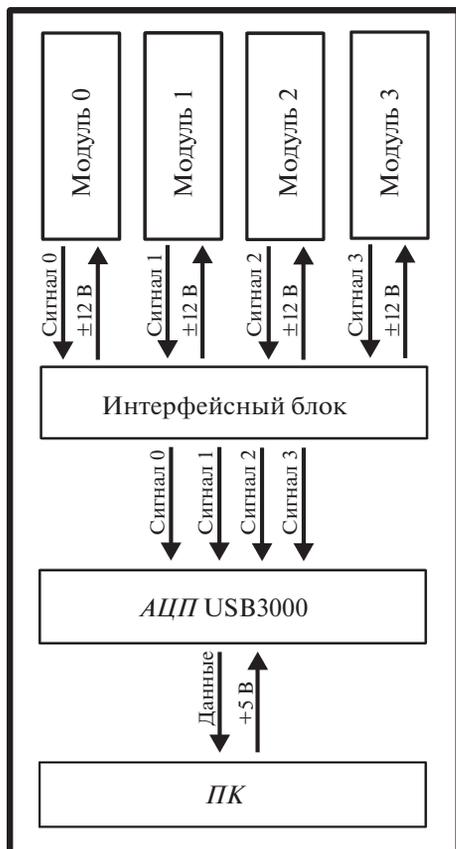


Рис. 1. Блок-схема научной аппаратуры “Гамма-спектрометр”. АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПК – персональный компьютер.

напряжение для каждого ф.э.у. индивидуально с помощью потенциометров R_1-R_4 .

С помощью разъема XR5 сигналы от детектирующих модулей подаются на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) USB3000 (<http://www.r-technology.ru/products/adc/usb3000.php>), где преобразуются в последовательность двухбайтовых отсчетов. Каждый отсчет представляет собой число в диапазоне от -8000 до $+8000$ (максимальное разрешение по амплитуде), что соответствует диапазону сигнала от -5 до $+5$ В. Так как сигналы от детектирующих модулей являются положительными, на выходе АЦП получается последовательность отсчетов в диапазоне от 0 до 8000. Следовательно, шаг квантования сигнала – 625 мкВ.

Передача данных от АЦП к ПК осуществляется по шине USB. В настройках программного обеспечения можно установить частоту дискретизации АЦП (временное разрешение), шаг квантования сигнала по амплитуде (число каналов) и длительность времени накопления данных каждого файла.

Программное обеспечение ПК последовательно формирует файлы, содержащие данные, полученные в течение заданного интервала времени

(длительность). При текущих условиях эксперимента измерения ведутся с установленной длительностью файлов данных 600 с, частотой дискретизации 500 кГц, с энергетическим разрешением 128 каналов.

Каждый файл данных в заголовке содержит информацию о времени начала измерений (UTC), частоте дискретизации АЦП и длительности интервала сбора данных. Далее записывается таблица, в которой указаны номер энергетического канала, число импульсов (γ -квантов), попавших в канал с номером N (дифференциальный спектр), суммарное число γ -квантов, попавших в каналы начиная с номера $N + 1$ и далее (интегральный спектр), и энергия γ -квантов, соответствующая номеру канала, посчитанная по предварительной калибровке с источниками ^{60}Co и ^{137}Cs .

КАЛИБРОВКА СПЕКТРОМЕТРА

Детектирующие модули “Гамма-спектрометра” были предварительно прокалиброваны на ДНС ФИАН с помощью источников γ -излучения ^{60}Co (1.17 МэВ и 1.33 МэВ) и ^{137}Cs (661.7 кэВ). Первичная калибровка была необходима, чтобы корректно подобрать выходные напряжения высоковольтных преобразователей: 775 В для модуля 0, 789 В для модуля 1, 728 В для модулей 2 и 3, которые примерно задают диапазоны детектируемых энергий γ -квантов 50 кэВ–3.5 МэВ для модулей 0 и 1 и 50 кэВ–5 МэВ для модулей 2 и 3. Однако данная калибровка не может считаться окончательной, так как проведена в лабораторных условиях и не учитывает аппаратный эффект – влияние температуры на выходное напряжение высоковольтных преобразователей.

Для иллюстрации температурного эффекта на рис. 3 приведены графики двух дифференциальных спектров для детектирующего модуля 0: спектр 1, полученный методом наложения эпох всех десятиминутных спектров за январь 2020 г., спектр 2 – по данным за июнь 2020 г.

Было необходимо разработать методику непрерывной калибровки спектрометра по имеющимся в распоряжении данным, которая учитывает температурный эффект и не требует дополнительных устройств, так как установка работает в автономном режиме. Для калибровки можно использовать спектральные линии радиоактивных веществ, находящихся в почве. В качестве калибровочных источников γ -излучения использованы изотопы: ^{40}K , ^{214}Bi , ^{208}Tl [10]. На рис. 3 выделены ориентировочные окрестности спектральных линий данных изотопов. В энергетическом диапазоне $\sim 0-0.4$ МэВ преобладает комптоновское рассеяние энергичных γ -квантов, поэтому при калибровке он не используется. Предпоследний энергетический пик, лежащий в диапазоне примерно (65–75)-го номе-

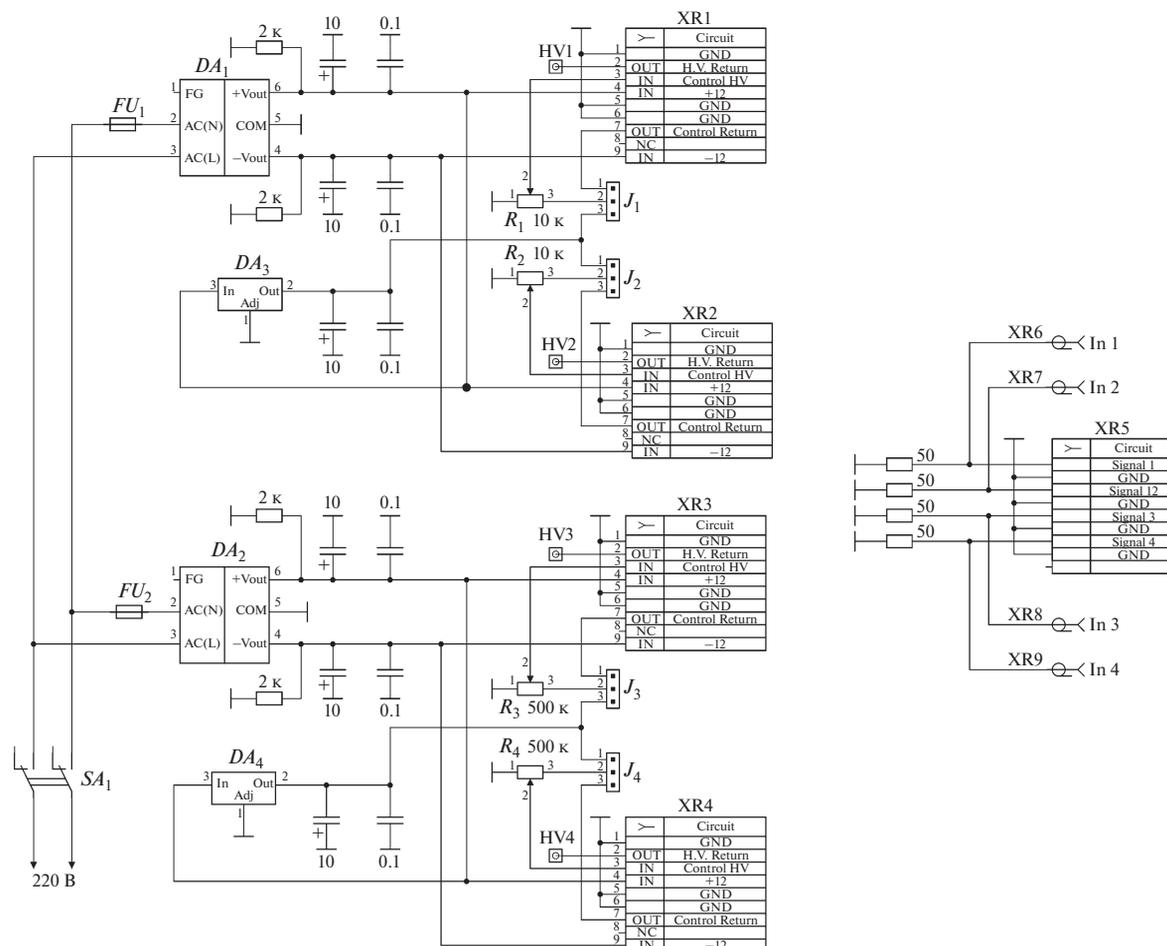


Рис. 2. Принципиальная схема интерфейсного модуля “Гамма-спектрометра”. DA_1, DA_2 – TML05212, DA_3, DA_4 – LM1117-5.0.

ра каналов, является следствием образования электрон-позитронных пар и также не учитывается [11].

Из графиков (рис. 3) видно расхождение между линиями изотопов в спектре, которое увеличивается с ростом энергии (номера канала).

К имеющимся шести спектральным линиям добавляется начальное условие: $E(U) = 0$ при $U = 0$. В результате получается 7 известных точек E_n : $E_0(U_0 = 0)$, $E_1(U_1)$, ..., $E_6(U_6)$, разделяющих весь спектральный диапазон детектирующего модуля на 6 интервалов, значения энергий внутри которых будем заполнять кусочно-линейной функцией:

$$E(U) = E_n + k_n(U - U_n), \quad (1)$$

где $E(U)$ – значение энергии, соответствующее номеру канала U ; E_n – начальное значение энергии в данном интервале, соответствующее номеру канала U_n ; k_n – коэффициент наклона данной интерполяционной прямой:

$$k_n = \frac{E_{n+1} - E_n}{U_{n+1} - U_n}, \quad (2)$$

где E_{n+1} – конечное значение энергии в данном интервале, соответствующее номеру канала U_{n+1} .

Для демонстрации методики рассмотрим произвольный отрезок времени, например, 01.01.2018 с 01:00 до 02:00 часов UTC (рис. 4). По наиболее выделяющимся пикам, соответствующим ^{40}K , хорошо заметно, что чувствительность детектирующих модулей 0 и 1 выше, чем чувствительность детектирующих модулей 2 и 3, вследствие более высоких установленных напряжений на ф.э.у.

По данной методике спектры, полученные детектирующими модулями, были разбиты на 6 интервалов, в каждом из которых по формулам (1) и (2) получены значения энергий γ -квантов в зависимости от номера канала (рис. 5). На графиках рис. 5 заметно некоторое отличие абсолютных значений темпов счета детектирующих модулей,

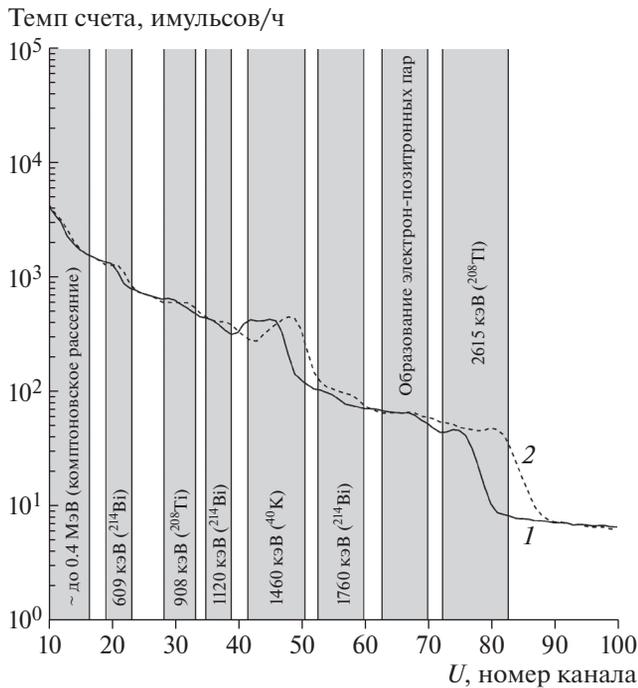


Рис. 3. Графики дифференциального спектра модуля 0 “Гамма-спектрометра”: 1 – по данным за январь 2020 г. (летний период), 2 – за июнь 2020 г. (зимний период).

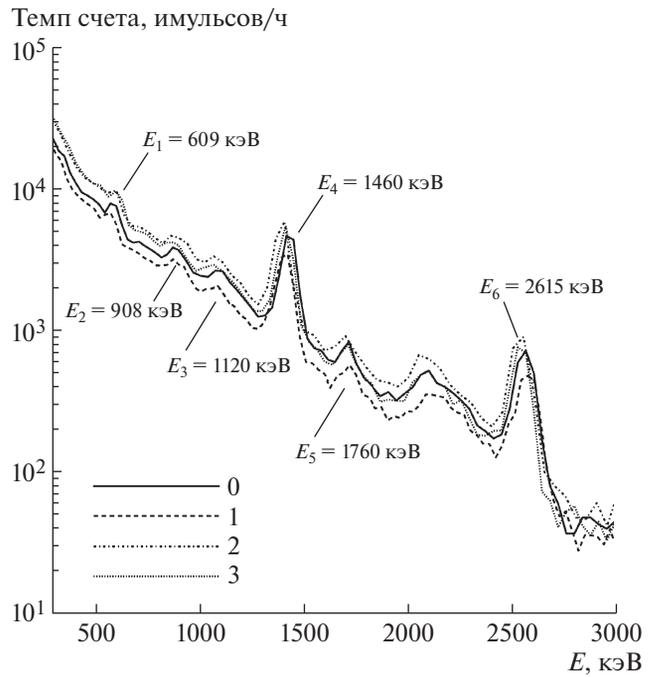


Рис. 5. Дифференциальные спектры для 4-х детектирующих модулей (0–3), после пересчета энергии γ -квантов, по данным за 01.01.2018 с 01:00 до 02:00 часов UTC.

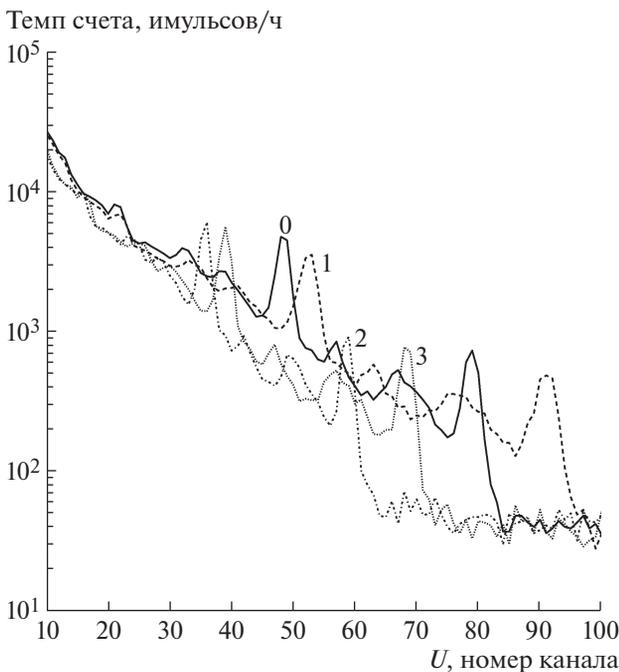


Рис. 4. Исходные дифференциальные спектры для 4-х детектирующих модулей (0–3) по данным за 01.01.2018 с 01:00 до 02:00 часов UTC. Цифры у спектров соответствуют модулям.

которое, при необходимости, может быть устранено с помощью взаимной нормировки по данным одновременных измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены описание и схемотехническая реализация установки для детектирования потоков γ -излучения – “Гамма-спектрометр”, непрерывно функционирующей в астрономическом комплексе CASLEO с 2015 г. по настоящее время. Для комплексного анализа экспериментальных данных этой установки разработана методика калибровки и пересчета измеряемых значений номеров канала аналого-цифрового преобразователя в энергию γ -квантов, основанную на природных фоновых источниках γ -излучения.

Данная установка представляет особый интерес для исследования процессов генерации γ -излучения в грозовых облаках и от молниевых разрядов (так называемые TGF- и TLE-события) [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурзин В.С. Астрофизика космических лучей: уч. пособие для вузов. М.: Логос, 2007.
2. Makhmutov V., Raulin J.-P., De Mendonca R.R.S., Bazilevskaya G.A., Correia E., Kaufmann P., Marun A., Fernandes G., Echer E. // J. Phys. Conf. Ser. 2013.

- V. 409 (1). P. 012185.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012185>
3. *Makhmutov V.S., Stozhkov Y.I., Raulin J.-P., Philippov M.V., Bazilevskaya G.A., Kvashnin A.N., Tacza J., Marun A., Fernandez G., Viktorov S.V., Panov V.M.* // Bull. of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2017. V. 81 (2). P. 241.
<https://doi.org/10.3103/S1062873817020265>
 4. *Мизин С.В., Махмутов В.С., Максумов О.С., Кваши-нин А.Н.* // Краткие сообщения по физике. 2011. № 2. С. 9.
<https://doi.org/10.3103/S1068335611020023>
 5. *De Mendonca R., Raulin J.-P., Bertonni F., Echer E., Makhmutov V., Fernandes G.* // JASTP. 2011. V. 73. P. 1410.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.09.034>
 6. *De Mendonca R.R.S., Raulin J.-P., Echer E., Makhmu-
tov V.S., Fernandez G.* // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2013. V. 118 (4). P. 1403.
<https://doi.org/10.1029/2012JA018026>
 7. *Филиппов М.В., Махмутов В.С., Стожков Ю.И.,
Максумов О.С.* // ПТЭ. 2020. № 3. С. 109.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220030039>
 8. *Philippov M.V., Makhmutov V.S., Stozhkov Y.I., Rau-
lin J.-P., Kalinin E.V.* // Bull. of the Russian Academy
of Sciences: Physics. 2019. V. 83. № 5. P. 611.
<https://doi.org/10.3103/S1062873819050137>
 9. *Филиппов М.В., Махмутов В.С., Стожков Ю.И.,
Максумов О.С., Raulin J.P., Tacza J.* // ПТЭ. 2020.
№ 5. С. 96.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220050298>
 10. *Ford K., Harris J.R., Shives R., Carson J., Buckle J.* //
Geoscience Canada. 2008. V. 35. № 3–4. P. 109.
 11. *Grasty R.L.* // Geophysics and Geochemistry in the
Search for Metallic Ores. Geological Survey of Canada,
Economic Geology Report 31. 1979. P. 147.
 12. *Torii T., Sugita T., Katogawa M., Watanabe Y., Kusu-
nok K.* // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. L24801.
<https://doi.org/10.1029/2011GL049731>