

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 519.25.256

КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА ГАММА-ЯДЕРНЫХ ПЕРЕХОДОВ УСТАНОВКИ ГИПЕРОН+ С ВНЕШНИМ ТРИГГЕРОМ

© 2024 г. А. М. Горин^а, С. В. Евдокимов^а, А. А. Зайцев^б, В. И. Изучеев^а, Д. С. Криницын^а,
Б. В. Полищук^а, В. И. Рыкалин^а, С. А. Садовский^а*, Ю. В. Харлов^а, А. А. Шангараев^а

^аИнститут физики высоких энергий им. А.А. Логанова Национального исследовательского
центра “Курчатовский институт”, Протвино, Московская обл., 142281 Россия

^бОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

*E-mail: Serguei.Sadovsky@ihep.ru

Поступила в редакцию 27.05.2024 г.

После доработки 21.06.2024 г.

Принята к публикации 01.07.2024 г.

В работе предложена и реализована процедура калибровки счетчиков спектрометра гамма-ядерных переходов, полностью интегрированного в инфраструктуру установки Гиперон+, включая системы триггера и сбора данных установки, при помощи радиоактивных источников ²²Na.

Ключевые слова: эксперимент Гиперон+, гамма-переходы ядер, гамма-спектрометр, калибровка спектрометра, сцинтилляционный кристалл, NaI(Tl), BGO, радиоактивный источник ²²Na

DOI: 10.56304/S2079562924060149

ВВЕДЕНИЕ

Изучение адрон-ядерных взаимодействий при промежуточных энергиях имеет большое значение для понимания механизмов сильного взаимодействия нуклонов в атомных ядрах. Эксперимент Гиперон+ [1] предназначен для изучения методами прецизионной ядерной гамма-спектроскопии возбужденных состояний вторичных ядер, образующихся в результате взаимодействий адронов пучка с ядрами мишени, в корреляции с типом и характеристиками адронных систем, вылетающих при этом в переднюю полусферу реакции после взаимодействия. Это открывает новое интересное направление в ядерной физике на стыке с физикой элементарных частиц промежуточных энергий, подробнее, см. в [1].

Установка эксперимента Гиперон+ расположена на положительном пучке 18 канала ускорительного комплекса У-70 в Протвино. Она предназначена для изучения механизмов адрон-ядерных взаимодействий в диапазоне импульсов пучка от 5 до 10 ГэВ/с. Парциальный состав выводимого на установку пучка зависит от его импульса, энергии ускорения первичных протонов в У-70, материала внутренней мишени. В физических сеансах на У-70, как правило, используются ⁹Be или ¹²C мишени. При этом, например, в пучке с импульсом 7 ГэВ/с содержится до 50% π^+ -мезонов, 46% протонов и 4% K^+ -мезонов. Есть также примеси мюонов и дейтронов в пределах нескольких долей процента.

Схема установки Гиперон+ приведена на рис. 1. Установка включает в себя пучковый телескоп сцинтилляционных счетчиков S_{1-4} , четыре черенковских счетчика C_{1-4} , дипольный магнит М7 наведения пучка на мишень, мишенный сцинтилляционный триггерный счетчик S_5 , ядерную мишень Т, вето-детектор заряженных частиц CPV (Charge Particle Veto), спектрометр гамма-ядерных переходов GNT (Gamma Nuclear Transition), сегментированный сцинтилляционный счетчик S_0 , электромагнитный черенковский спектрометр полного поглощения LGD2 (Lead Glass Detector), который используется для измерения энергий и координат фотонов, образующихся в первичных адрон-ядерных взаимодействиях и вылетающих в переднюю полусферу изучаемой реакции:

$$h^+ + {}^A_Z \rightarrow M^0 (\rightarrow n\gamma) + {}^A(Z+1)^*, \quad (1)$$

где $h^+ = \pi^+, K^+, p$; A_Z – ядро мишени с атомным весом А и зарядом Z; ${}^A(Z+1)^*$ – вторичное ядро (звездочка означает, что оно образовалось в возбужденном состоянии); M^0 – нейтральное мезонное состояние, образующееся в передней полусфере реакции и распадающееся в конечном счете на фотоны. Подробнее описание установки см. в работе [1], а также в [2, 3].

В основе физической программы эксперимента Гиперон+, см. [1], лежит предложение детального изучения образующихся возбужденных состояний вторичных ядер ${}^A(Z+1)^*$ в корреляции с

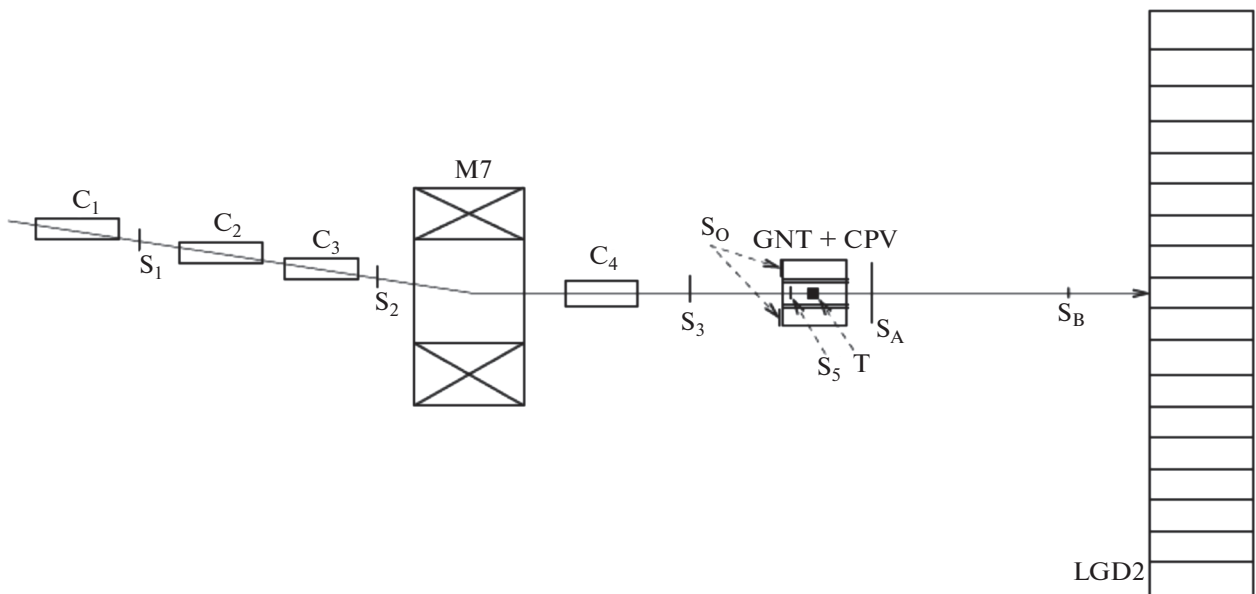


Рис. 1. Схема экспериментальной установки Гиперон+: S_{1–3} — пучковые сцинтилляционные счетчики, C_{1–4} — черенковские счетчики, M7 — магнит наведения пучка на мишень, S₅ — мишеньный триггерный счетчик, T — ядерная мишень, S₀ — сцинтилляционный сегментированный счетчик задней полусферы, S_A — сцинтилляционный вето-счетчик передней полусферы, S_B — триггерный сцинтилляционный антисчетчик пучка, CPV — вето-детектор заряженных частиц, GNT — спектрометр гамма-ядерных переходов, LGD2 — черенковский электромагнитный спектрометр полного поглощения.

типом и свойствами нейтральных систем M⁰, рождающихся в передней полусфере указанной реакции. Возникающая в этой связи задача идентификации возбужденных состояний вторичных ядер решается методами прецизионной ядерной γ -спектроскопии при помощи созданного в рамках эксперимента Гиперон+ спектрометра гамма-ядерных переходов GNT в совокупности со сцинтилляционными детекторами CPV и S₀, см. рис. 1, которые предназначены для подавления фоновых событий в счетчиках GNT. Совместно с ядерной мишенью указанные детекторы образуют мишеньный узел установки. В первом тестовом сеансе на адронном пучке с импульсом 7 ГэВ/с в декабре 2023 г. мишеньный узел в пилотном режиме был запущен практически в полном объеме, проведена калибровка спектрометра GNT в составе установки Гиперон+. Результаты пилотного запуска детекторов мишеньного узла, включая калибровку спектрометра GNT в составе установки, изложены в настоящей работе.

1. МИШЕННЫЙ УЗЕЛ УСТАНОВКИ ГИПЕРОН+

Как уже отмечалось выше, Мишеньный узел установки Гиперон+ включает в себя собственно ядерную мишень T, вето-детектор заряженных частиц CPV, сегментированный счетчик S₀ и спектрометр гамма-ядерных переходов GNT, см. рис. 1. Мишени из легких ядер (углерода, бериллия) пред-

ставляют собой цилиндры диаметром 4 см и длиной в направлении пучка 6 см.

CPV детектор состоит из шести продольных сцинтилляционных счетчиков размером $0.35 \times 8.6 \times 30.9$ см³ со светосбором при помощи спектросмещающих (WLS) волокон и фотодетекторами на основе кремниевых фотоумножителей (SiPM). На рис. 2 показан один такой счетчик без светоизолирующей и светоотражающей обертки, где хорошо видна конфигурация WLS-волокон счетчика. Измерения на космических мюонах показали, что в счетчиках обеспечивается однородность светосбора на уровне $\pm 20\%$ и световыход не менее 87 фэ/МэВ, другие подробности см. в работе [4]. Сигналы со счетчиков CPV в штатном режиме подаются для оцифровки на 12-бит АЦП в стандарте Евро-МИСС [5] с тем, чтобы учитывать их при off-line обработке данных. Однако сигналы со счетчиков при необходимости могут быть использованы и для организации триггера на наличие заряженных частиц в счетчиках CPV.

Сегментированный счетчик S₀ установки Гиперон+ предназначен для подавления фоновых событий в счетчиках GNT-спектрометра от заряженных частиц в гало пучка. Счетчик S₀ состоит из шести трапецеидальных сцинтилляционных пластин толщиной 0.35 см, просматриваемых с одного из углов пластины SiPM фотоумножителем. Детектирующие элементы счетчика также выполнены с использованием WLS-технологии. На рис. 3

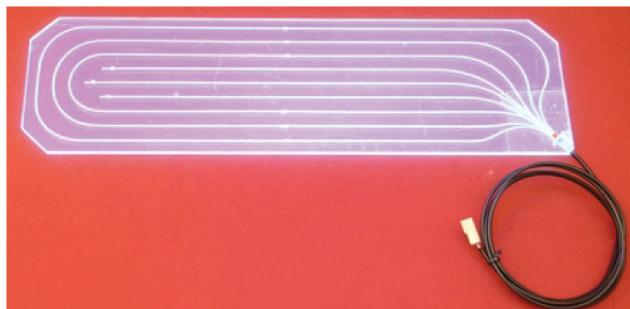


Рис. 2. Продольный сцинтилляционный счетчик вето-детектора заряженных частиц установки Гиперон+ без светоизолирующей и светоотражающей обертки [4]. На рисунке ясно видна конфигурация спектросмещающих волокон счетчика.

слева показан один такой элемент счетчика S_0 , а справа — полностью собранный счетчик S_0 , интегрированный в инфраструктуру установки на 18 канале У-70.

Спектрометр гамма-ядерных переходов GNT в полном объеме состоит из трех колец счетчиков с кристаллами NaI и BGO, каждое из которых включает в себя шесть счетчиков: три с кристаллами NaI и три с кристаллами BGO. Кристаллы представляют собой цилиндры диаметром и длиной, равными 6.3 см. С одного из торцов они просматриваются спектрометрическими фотомножителями ФЭУ-184ТД, подробнее см. [1]. Сигналы с ФЭУ указанных счетчиков подаются для оцифровки на 12-бит АЦП в стандарте ЕвроМИСС и в дальнейшем используются для offline анализа регистрируемых гамма-спектров. В пилотном сеансе в декабре 2023 г. на установке Гиперон+

спектрометр GNT был запущен в составе двух колец γ -счетчиков из трех, т.е. в целом с 12 γ -счетчиками из восемнадцати. Внешний диаметр спектрометра GNT равен 75 см. В составе Мишенного узла установки на пучке 18 канала он показан на рис. 4.

2. КАЛИБРОВКА ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА GNT

Базовыми детекторами установки Гиперон+ являются электромагнитные спектрометры LDG2 и GNT, которые предназначены для измерения энергий фотонов (γ -квантов) в существенно разных энергетических диапазонах. Соответственно и основаны они на различных физических принципах. LGD2-детектор является черенковским спектрометром полного поглощения с радиаторами из свинцового стекла. Он предназначен для регистрации электромагнитных ливней от высокоэнергичных фотонов с энергией порядка нескольких гигаэлектронвольт. В то время как GNT-детектор предназначен для регистрации низкоэнергичных фотонов с энергией до 20 МэВ. В качестве радиаторов в нем используются неорганические сцинтиллирующие кристаллы NaI(Tl) и BGO. Поэтому и процедуры калибровки этих спектрометров тоже существенно разные. Так, калибровка спектрометра LGD2 проводится по массе π^0 -мезонов, регистрируемых в реакции $h^+ + {}^A_Z \rightarrow \pi^0 + X$ параллельно с набором физических данных, см. [6], тогда как в случае GNT-спектрометра набираемые физические данные не позволяют провести его калибровку.

Другим важным отличием LGD2 от GNT являются временные характеристики световых импуль-

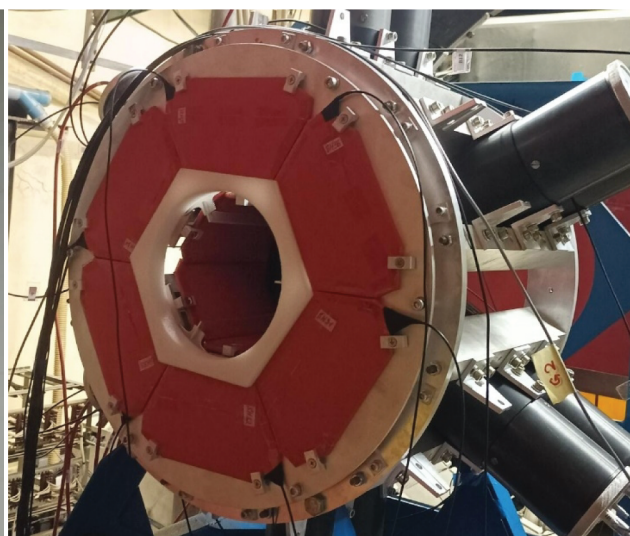
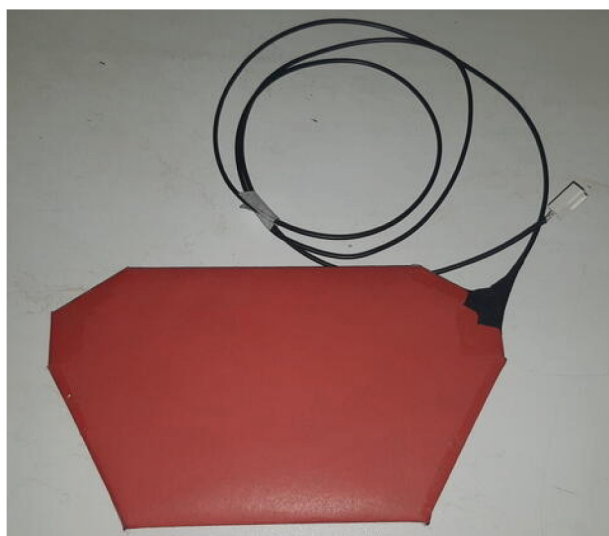


Рис. 3. Слева: элемент сегментированного счетчика S_0 ; справа: полностью собранный сегментированный счетчик S_0 , интегрированный в инфраструктуру установки Гиперон+ на 18 канале У-70.

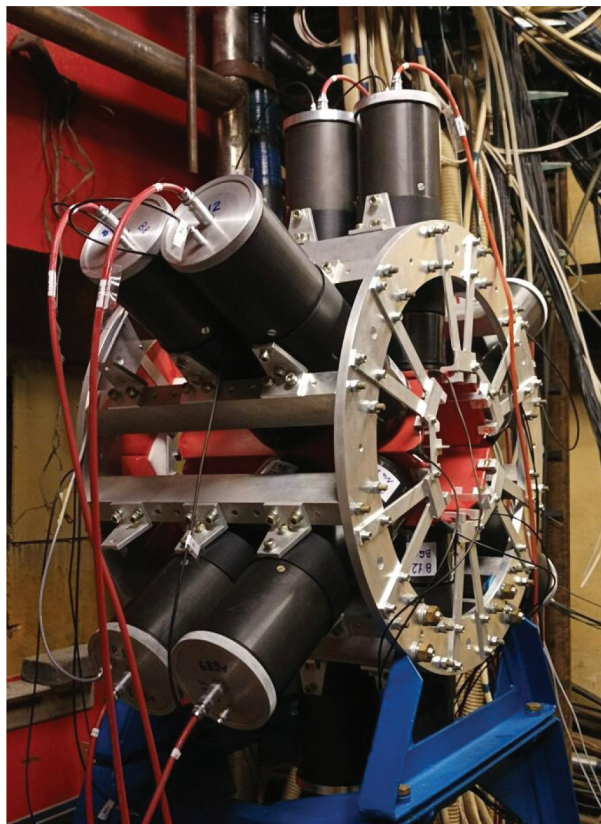


Рис. 4. Мишенный узел установки Гиперон на 18 канале У-70 в декабрьском сеансе 2023 г. Хорошо видны три пары черных тубусов γ -счетчиков спектрометра GNT из шести установленных.

сов в детекторах спектрометров: в LGD2 формируются короткие импульсы черенковского света длительностью порядка нескольких наносекунд, а в GNT характерное время высвечивания кристаллов составляет 230 и 300 нс для NaI(Tl) и BGO, соответственно. В результате длительность сигналов со счетчиков LGD2 определяется временными характеристиками фотодетекторов (ФЭУ-110, ФЭУ-139) спектрометра [7], в то время как со счетчиков GNT — временем высвечивания кристаллов. Цифровая электроника амплитудного анализа установки Гиперон-М, которая используется и в установке Гиперон+, была оптимизирована под длительность импульсов с LGD2, которая составляет ≈ 50 нс, что проявляется прежде всего в длительности стробирующих импульсов (120 нс), подаваемых на блоки АЦП электроники. Для оцифровки импульсов со спектрометра GNT указанная длительность строба заведомо не оптимальна. Использование, тем не менее, стробирующих импульсов длительностью 120 нс в АЦП также и для сигналов со спектрометра GNT приводит к двум эффектам: возможности, в известной мере, улучшить энергетическое разрешение спектрометра за счет оптимизации общего сдвига GNT-импульсов

по времени относительно стробирующего импульса АЦП с одной стороны, а с другой — к зависимости калибровочных коэффициентов спектрометра от этого общего сдвига. Отсюда сразу следует, что калибровку спектрометра GNT лучше проводить непосредственно в составе установки Гиперон+, где автоматически учитываются все временные сдвиги импульсов, имеющие место в реальной экспозиции установки на пучке.

С учетом вышесказанного, была предложена и реализована процедура калибровки спектрометра GNT, полностью интегрированного в инфраструктуру установки Гиперон+, включая триггер и систему сбора данных, при помощи нескольких радиоактивных источников ^{22}Na . Идея калибровки состоит в том, что на пластины CPV, прикрывающие калибруемые счетчики спектрометра GNT, последовательно помещаются радиоактивные источники ^{22}Na , как это показано на рис. 5, и далее запускается штатный прием событий, инициируемый триггером (импульсами) со счетчика детектора CPV, на поверхность которого были помещены источники ^{22}Na :

$$\text{trig}(\beta^+) = \text{CPV}(^{22}\text{Na}). \quad (2)$$

Оставляя пока в стороне шумовые импульсы с триггерных счетчиков CPV и космику, можно с уверенностью утверждать, что значимая часть указанных триггеров будет обусловлена позитронами от β^+ -распада $^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne}^* + e^+ + \nu_e$. При этом практически мгновенно происходит также γ -распад $^{22}\text{Ne}^* \rightarrow ^{22}\text{Ne} + \gamma$ и двухфотонная аннигиляция позитрона от первого распада. В результате такой цепочки процессов в конечном состоянии события образуется три монохроматических фотона: два аннигиляционных с энергией 511 кэВ каждый и один с энергией 1274.5 кэВ от γ -распада $^{22}\text{Ne}^*$. Эти фотоны с конечной вероятностью, определяемой геометрией мишенного узла установки, должны быть зарегистрированы счетчиками GNT спектрометра.

3. ПРОЦЕДУРА КАЛИБРОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Как уже было отмечено выше, в декабрьском сеансе 2023 г. Мишенный узел установки Гиперон+ был установлен на штатное место для пилотной экспозиции в составе установки на пучке 18 канала У-70 с целью комплексного запуска установки и калибровки спектрометра GNT. Прежде чем проводить описанную выше калибровку спектрометра, предварительно было выполнено выравнивание энергетической шкалы счетчиков GNT на расфокусированном мюонном пучке. С этой целью на адронном пучке с импульсом 7 ГэВ/с при закрытом коллиматоре 18 канала был организован мюонный триггер

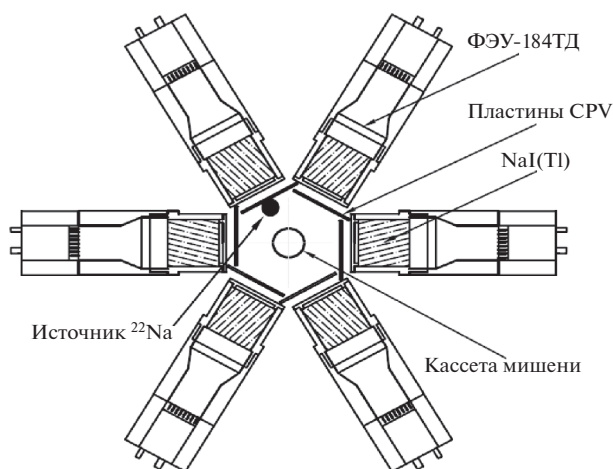


Рис. 5. Фронтальный вид кольца счетчиков спектрометра GNT, состоящего из шести кристаллов (NaI и BGO) с фотоумножителями ФЭУ-184ТД. Дополнительно показаны шесть сцинтилляционных пластин вето-детектора CPV, расположенных на фронтальной поверхности кристаллов, кассета для позиционирования ядерной мишени в центре спектрометра, а также один из двух γ -источников ^{22}Na , примыкающих к внутренней поверхности одной из CPV пластин.

$$\text{trig}(\mu^+) = S_1 S_2 S_0, \quad (3)$$

см. рис. 1 и 3, и проведен прием событий. При этом напряжение U_0 на фотоумножителях счетчиков спектрометра GNT подбиралось по возможности так, чтобы максимум мюонного пика в счетчиках соответствовал амплитуде в 2000 отсчетов АЦП. Полученные в результате мюонные спектры в счетчиках первого кольца спектрометра GNT приведены на рис. 6. Во всех счетчиках ясно наблюдаются достаточно широкие пики от проходящих через них мюонов. Наблюдаемая вариация засветки различных счетчиков обусловлена неоднородностью расфокусированного мюонного пучка. Спектры в счетчиках второго кольца спектрометра выглядят аналогично.

Проведенное Монте-Карло моделирование при помощи пакета GEANT4 [8–11] мюонов с импульсом 7 ГэВ/с, проходящих через счетчики GNT, показало, что в кристаллах NaI(Tl) теряется на ионизацию в среднем 32 МэВ, а в кристаллах BGO — 65 МэВ, см. рис. 7. Поэтому, чтобы эффективно измерять энергии фотонов в области до 5 МэВ при помощи счетчиков на основе кристаллов NaI(Tl), усиление счетчиков надо поднять на порядок величины. А чтобы работать с энергиями фотонов вплоть до 20 МэВ, усиление счетчиков с кристаллами BGO надо увеличить приблизительно в пять раз. В результате аннигиляционные фотоны от β^+ распада ^{22}Na в счетчиках с NaI(Tl) будут иметь амплитуду ≈ 350 отсчетов АЦП, а в счетчиках с BGO кристаллами ≈ 100 отсчетов. Учитывая далее, что усиление ФЭУ-184ТД зависит от приложенного напряжения U пропорционально $(U/U_0)^{10}$, для достижения указанного усиления GNT-счетчиков

напряжение должно быть повышено в среднем на 26% и 17%, соответственно, на счетчиках с кристаллами NaI и BGO по сравнению со значениями, которые использовались при экспозиции GNT-спектрометра на мюонном пучке (рис. 6).

После вышеуказанного повышения напряжения на всех счетчиках спектрометр GNT был последовательно просканирован с целью калибровки двумя радиоактивными источниками ^{22}Na размером $25 \times 25 \times 1 \text{ мм}^3$ каждый, которые размещались на одной сцинтилляционной пластине CPV, напротив соответствующих этой пластине GNT-счетчиков. Полная калибровка спектрометра включала шесть независимых измерений — по числу сцинтилляционных пластин в детекторе CPV. Прием событий инициировался триггером (2). На рис. 8 для иллюстрации представлены полученные в результате спектры энергий для двух счетчиков — на основе кристаллов NaI(Tl) и BGO. В обоих спектрах хорошо видны два характерных для источника ^{22}Na γ -пики — при 511 и 1274.5 кэВ. Аналогичные спектры получены и для других счетчиков спектрометра. Собственно, наличие этих двух пиков в амплитудных спектрах и позволяет провести калибровку энергетической шкалы каждого счетчика GNT.

С целью калибровки спектры амплитуд с GNT-счетчиков были независимо профитированы в областях наблюдаемых пиков функцией Гаусса и полиномом 3-й степени, см. рис. 8. В результате были получены положения максимумов пиков, A_1 и A_2 , в отсчетах АЦП, которые соответствуют энергиям фотонов $E_1 = 511$ и $E_2 = 1274.5$ кэВ от радиоактивного источника ^{22}Na . В свою очередь, это позволяет сразу определить коэффициенты ка-

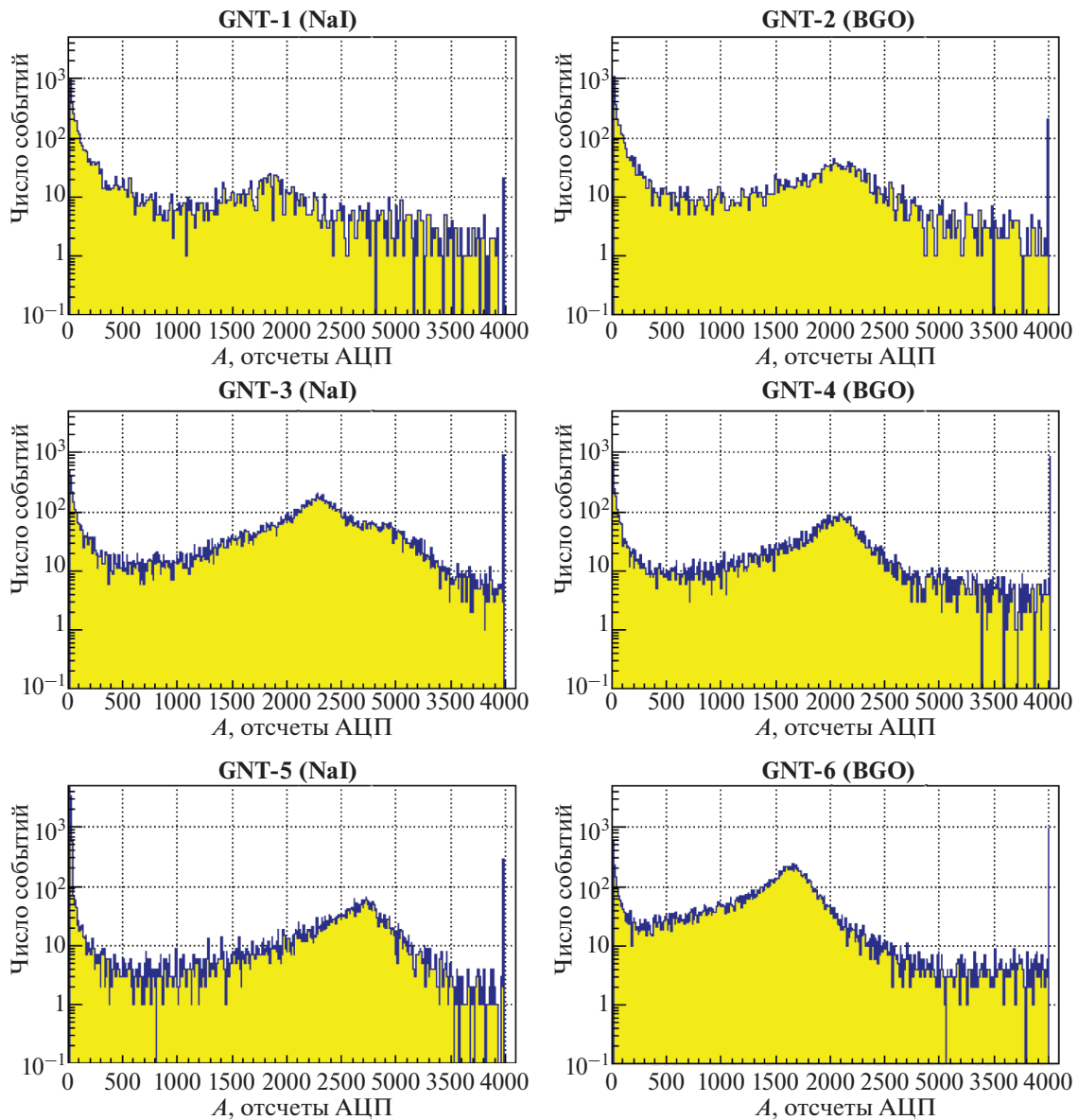


Рис. 6. Спектры амплитуд со счетчиков первого кольца спектрометра GNT на мюонном пучке в событиях, отобранных триггером (3), по данным сеанса 2023 г.

либровочной функции для вычисления энергий фотонов E_γ [кэВ], которая была выбрана в виде полинома 1-й степени

$$E_\gamma = b_0 + b_1 A_\gamma, \quad (4)$$

где $b_0 = (E_1 A_2 - E_2 A_1) / (A_2 - A_1)$, $b_1 = (E_2 - E_1) / (A_2 - A_1)$, а A_γ – измеренная энергия фотона в отсчетах АЦП. Необходимость введения в калибровочную функцию члена b_0 связана с небольшой нелинейностью энергетической шкалы счетчиков GNT, обусловленной вытеканием электромагнитных ливней из кристаллов счетчиков. Учитывая, что радиационная длина X_0 кристаллов BGO в ≈ 2 раза меньше

чем NaI(Tl), этот эффект должен быть более значимым для счетчиков с кристаллами NaI(Tl), что соответствует полученным результатам.

Спектры энергий фотонов со счетчиков первого кольца спектрометра GNT после описанной выше калибровки приведены на рис. 9. Здесь же показаны и результаты фита двух калибровочных пиков для каждого счетчика. Полученные величины параметров пиков с учетом статистических ошибок находятся в хорошем согласии с ожидаемыми значениями. Точность калибровки, проведенной в условиях эксперимента Гиперон+, характеризуется точностью восстановления положения

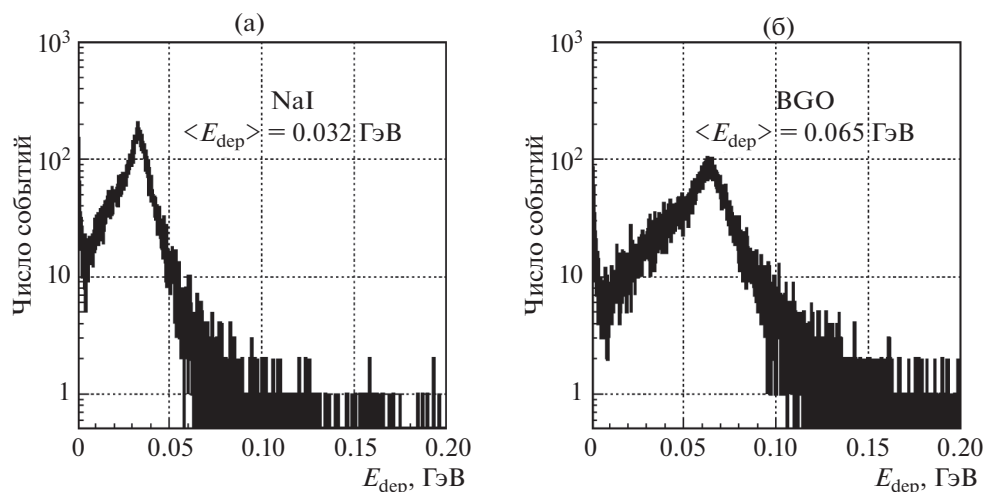


Рис. 7. Спектры радиационных потерь расфокусированного пучка мюонов с импульсом 7 ГэВ/с в кристаллах спектрометра GNT, полученные в результате МК-моделирования с использованием пакета GEANT4: (а) в кристаллах NaI(Tl), (б) в кристаллах BGO.

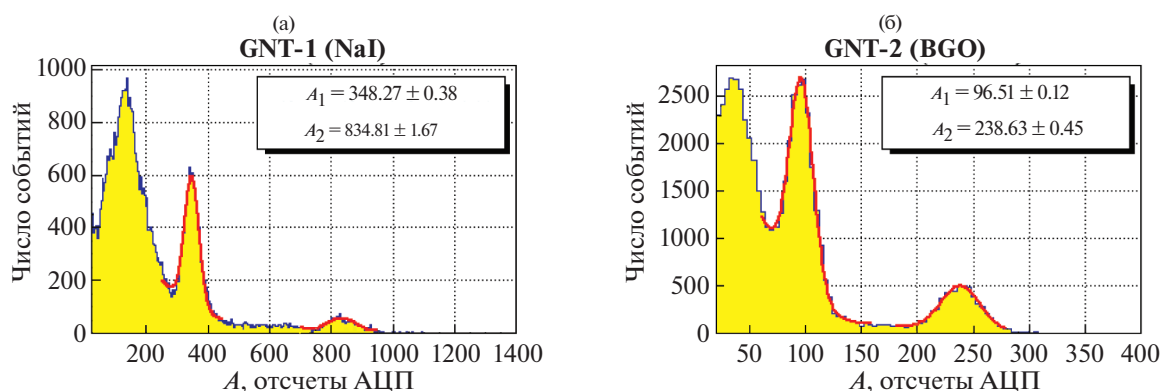


Рис. 8. Спектры амплитуд со счетчиков спектрометра GNT в калибровочных событиях на радиоактивном источнике ^{22}Na , отобранных триггером (2): (а) со счетчика на основе NaI(Tl), (б) на основе BGO. На вставках показаны полученные в результате фита положения пиков в отсчетах АЦП, см. основной текст.

γ -пиков 511 и 1274.5 кэВ изотопа ^{22}Na . Точность восстановления энергий этих пиков определяется статистикой калибровочных данных и примененной процедурой фитирования энергетических спектров. Для кристаллов NaI(Tl) точность измерения γ -линий 511 и 1274.5 кэВ составляет 0.3 и 1.2 кэВ соответственно, а для кристаллов BGO — 0.5 и 0.9 кэВ. Энергетическое разрешение пиков зависит от телесного угла излучения радиоактивного источника, а также от длительности и задержки стробирующего импульса АЦП, как уже обсуждалось в разд. 2 выше. В условиях эксперимента Гиперон+ достигнутое энергетическое разрешение для кристаллов NaI(Tl) составляет 37 и 62 кэВ, а для BGO — 60 и 110 кэВ для линий излучения 511 и 1274.5 кэВ соответственно. Аналогичные результа-

ты получены и для счетчиков второго кольца спектрометра GNT.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена и реализована процедура калибровки счетчиков спектрометра гамма-ядерных переходов, интегрированного в инфраструктуру установки Гиперон+ (включая системы триггера и сбора данных установки), при помощи радиоактивных источников ^{22}Na . Основным недостатком калибровки связан с достаточно высоким уровнем фоновых (пустых) событий, обусловленных мягким триггером (2) на основе лишь счетчиков детектора CPV. Жесткость триггера, однако, может быть повышена, если в триггер ввести на совпадение сигналы с соответствующих счетчиков GNT-спектро-

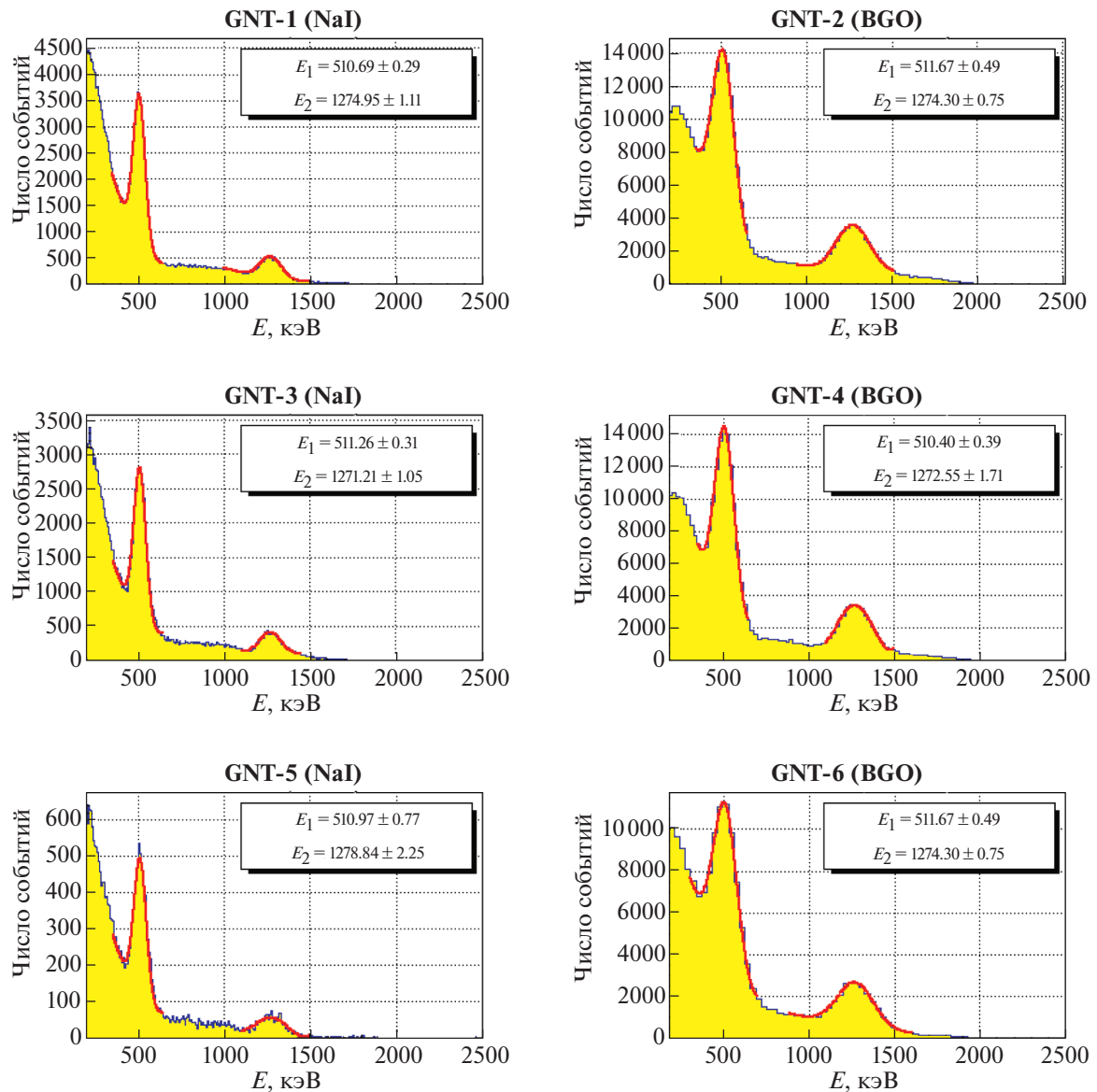


Рис. 9. Спектры калиброванных амплитуд со счетчиков первого кольца спектрометра GNT, интегрированных в инфраструктуру установки Гиперон+ на 18 канале У-70, по данным экспозиции спектрометра на радиоактивных источниках ^{22}Na . На вставках приведены полученные в результате фита положения характерных для ^{22}Na обоих пиков. Фитирующие кривые показаны красным цветом.

метра, что, в общем, требует разработки специальной электроники, чтобы не ухудшить при этом энергетическое разрешение спектрометра. Вместе с тем такая модификация триггера потенциально позволила бы принимать калибровочные события параллельно с приемом экспериментальных данных во время экспозиции установки на пучке, что способствовало бы весьма заметному улучшению энергетического разрешения спектрометра, учитывая известную зависимость светового хода кристаллов NaI(Tl) и BGO от температуры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00095, <https://rscf.ru/project/22-12-00095/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Горин А.М., Евдокимов С.В., Зайцев А.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87 (8). С. 1109.
2. Bogolyubskiy M.Yu., Evdokimov S.V., Izucheev V.I., et al. // Phys. At. Nucl. 2013. V. 76 (11). P. 1324.

3. *Evdokimov S.V., Izucheev V.I., Kondratyuk E.S., et al.* // JETP Lett. 2021. V. 113 (5). P. 289.
4. *Brekhovskikh V.V., Gorin A.M., Dyatchenko V.A., et al.* // Preprint No. 15. 2023. Protvino: NRC “Kurchatov institute” – IHEP.
5. *Bukreeva S.I., Emel'yanov N.M., Isaev A.N., et al.* // Preprint No. 19. 2013. Protvino: IHEP.
6. *Bogolyubskiy M.Yu., Patalakha D.I., Polishchuk B.V., et al.* // Nucl. Exp. Tech. 2011. V. 54 (5). P. 682.
7. *Blik A.M., Kolosov V.N., Kut'in V.M., et al.* // Preprint No. 136. 1994. Protvino: IHEP.
8. *Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2003. V. 506. P. 250.
9. *Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. V. 53. P. 270.
10. *Allison J., Apostolakis J., Lee S.B., et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2016. V. 835. P. 186.
11. *Hrivnacova I., Adamova D., Berejnoi V., et al.* // Proc. 13th Int. Conf. on Computing in High-Energy and Nuclear Physics (CHEP 2003). March 24–28, 2003. La Jolla, California. eConf C0303241 THJT006. 2003.

Calibration of the Hyperon+ Gamma-Nucleus Transition Detector with an External Trigger

A. M. Gorin¹, S. V. Evdokimov¹, A. A. Zaitsev², V. I. Izucheev¹, D. S. Krinitsyn¹, B. V. Polishchuk¹,
V. I. Rykalin¹, S. A. Sadovsky¹*, Yu. V. Kharlov¹, and A. A. Shangaraev¹

¹ Logunov Institute for High Energy Physics, National Research Centre “Kurchatov Institute”,
Protvino, Moscow oblast, 142281 Russia

² Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

*e-mail: Serguei.Sadovsky@ihep.ru

Received May 27, 2024; revised June 21, 2024; accepted July 1, 2024

Abstract—A calibration procedure with ²²Na radioactive sources for the counters of gamma-nuclear transition spectrometer, which is fully integrated in the infrastructure of the Hyperon+ setup, including trigger and data acquisition systems, is proposed and implemented.

Keywords: Hyperon+ experiment, gamma nuclear transition, gamma spectrometer, spectrometer calibration, scintillation crystal, NaI(Tl), BGO, radioactive source ²²Na