

---

**ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА**


---

УДК 539.1.074

## ПЕРЕДНИЕ ДЕТЕКТОРЫ УСТАНОВКИ VM@N И ИЗУЧЕНИЕ ИХ ОТКЛИКА НА ПУЧКЕ ИОНОВ УГЛЕРОДА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ SRC

© 2023 г. В. В. Волков<sup>a</sup>, М. Б. Голубева<sup>a</sup>, Ф. Ф. Губер<sup>a</sup>, А. А. Зубанков<sup>a</sup>, А. П. Ивашкин<sup>a</sup>,  
А. В. Известный<sup>a</sup>, Н. М. Карпушкин<sup>a,\*</sup>, А. И. Махнев<sup>a</sup>, С. В. Морозов<sup>a</sup>, О. А. Петухов<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Институт ядерных исследований РАН  
Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Физическая, 27

\*e-mail: karpushkin@inr.ru

Поступила в редакцию 05.07.2022 г.

После доработки 13.07.2022 г.

Принята к публикации 04.09.2022 г.

В рамках модернизации эксперимента VM@N был создан ряд передних детекторов: передний адронный калориметр FNCal для измерения энергии фрагментов-спектаторов, а также пучковый кварцевый годоскоп FQN и сцинтилляционная стенка ScWall для их идентификации. Эти детекторы предназначены для определения центральности и ориентации плоскости реакции, а также для исследования зарядовых распределений фрагментов-спектаторов, образующихся в ядро-ядерных взаимодействиях. Приводятся результаты исследования отклика передних детекторов, полученные в эксперименте SRC по изучению короткодействующих корреляций в реакции взаимодействия ионов углерода с импульсом 3.5 АГэВ/с в жидководородной мишени.

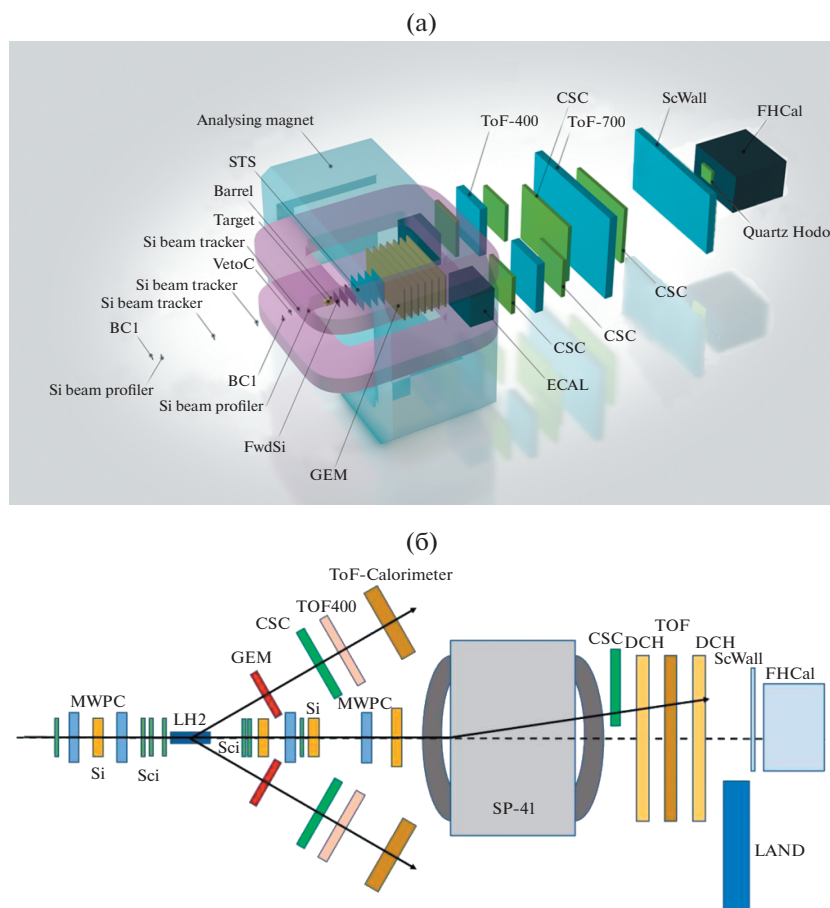
DOI: 10.31857/S0032816223010263, EDN: PWKKEJ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

VM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) [1] является первым экспериментом с фиксированной мишенью на выведенном пучке Нуклотрона ускорительного комплекса NICA. Исследовательская программа эксперимента VM@N направлена на изучение фазовой диаграммы квантовой хромодинамики при больших барионных плотностях, в частности, на изучение образования (мульти) странных гиперонов и на поиск гиперядер в ядро-ядерных столкновениях при энергиях ионов пучка до 4.5 АГэВ ( $A$  – массовое число налетающих ядер) и изучение азимутальной асимметрии выходов заряженных частиц в столкновениях тяжелых ядер. На этой установке уже получены первые экспериментальные результаты в столкновениях легких и средних ядер [2]. После завершившейся значительной модернизации установки первый эксперимент на пучке ионов ксенона запланирован на осень 2022 г.

Экспериментальная установка VM@N состоит из широкоапертурного дипольного магнита и ряда детекторных систем, которые позволяют идентифицировать и измерять энергию заряженных и нейтральных частиц, образующихся в процессе ядро-ядерного столкновения, а также ряда пучковых и триггерных детекторов (рис. 1а). В конце установки расположен ряд передних детекторов для определения геометрии ядро-ядерных столк-

новений (центральности и ориентации плоскости реакции), а также для измерения распределений зарядов фрагментов-спектаторов, образующихся в ядро-ядерных взаимодействиях. Передние детекторы – адронный калориметр FNCal, пучковый кварцевый годоскоп и сцинтилляционная стенка – разработаны и изготовлены в ИЯИ РАН. В данной статье приводятся результаты тестирования отклика этих передних детекторов во время состоявшегося в начале 2022 г. эксперимента SRC (Short Range Correlation) по исследованию короткодействующих корреляций в реакции взаимодействия ионов углерода с ядрами водорода. Пучок ионов углерода был впервые после запуска бустера инжектирован из него в Нуклотрон и выведен в экспериментальную зону эксперимента VM@N. Для проведения этого эксперимента установка VM@N была значительно изменена и дополнена рядом детекторных систем, необходимых для эксперимента SRC и расположенных перед анализирующим магнитом (рис. 1б). До и после жидководородной мишени расположены ряд пучковых детекторов, а также два плеча (Arms) с позиционно-чувствительными детекторами (GEM и CSC), времяпролетными и калориметрическими детекторами (TOF и TOF-Cal). Триггерное решение на запись события принималось, исходя из срабатываний либо одного из плеч (Arm-OR), либо обоих плеч одновременно (Arm-AND). Для тестирования передних детекторов триггеры дан-



**Рис. 1.** Схематический вид установки BM@N (а) и эксперимента SRC (б). BC (Beam Counter) – пучковый счетчик; VetoC (Veto Counter) – вето-счетчик; FwdSi (Forward double-sided silicon strip-detector) – передний кремниевый полосовой детектор; STS (Silicon Tracking System) – кремниевая система трекинга; GEM (Gas Electron Multiplier) – газовый электронный умножитель; ECAL (Electromagnetic Calorimeter) – электромагнитный калориметр; CSC (Cathode Strip Chamber) – катодная полосовая камера; ToF (Time-of-Flight) – времяпролетный детектор; ScWall (Scintillation Wall) – сцинтилляционная стенка; Quartz Hodo (Quarz Hodoscope) – кварцевый годоскоп; FHCAL (Forward Hadron Calorimeter) – передний адронный калориметр; MWPC (Multi-wire Proportional Chamber) – многопроводочная пропорциональная камера; Si (Silicon Tracker) – кремниевый трекер; LH2 (Liquid Hydrogen Target) – жидководородная мишень; SP-41 (Spectrometer magnet) – магнит; DCH (Drift Chambers) – дрейфовые камеры; LAND (Large Area Neutron Detector) – детектор нейтронов.

ного типа использовались для отбора событий с взаимодействием в мишени. Также для тестирования передних детекторов использовался и пучковый триггер, который определялся по совпадению срабатываний сцинтилляционных пучковых счетчиков BC1, BC2 и T0.

Краткое описание передних детекторных систем и результаты отклика этих детекторов в реакции  $C + p$  при импульсе 3.5 АГэВ/с приведены в последующих разделах этой статьи.

## 2. ПЕРЕДНИЕ ДЕТЕКТОРЫ УСТАНОВКИ BM@N

Передние детекторы для измерения энергии фрагментов-спектаторов (FHCAL) и их зарядов (FQN и ScWall) расположены в самом конце уста-

новки BM@N на расстоянии 9 м от мишени (см. рис. 1). Эти детекторы необходимы для определения центральности и ориентации плоскости реакции, а также для исследования зарядовых распределений фрагментов-спектаторов, образующихся в ядро-ядерных взаимодействиях.

### 2.1. Передний адронный калориметр

Передний адронный калориметр FHCAL [3] имеет модульную структуру в поперечной плоскости и состоит из 54-х отдельных модулей. Внутренняя часть FHCAL состоит из 34-х малых модулей с поперечными размерами  $15 \times 15$  см<sup>2</sup> и длиной, эквивалентной четырем длинам ядерного взаимодействия. Внешняя часть калориметра состоит из двадцати больших модулей с поперечны-

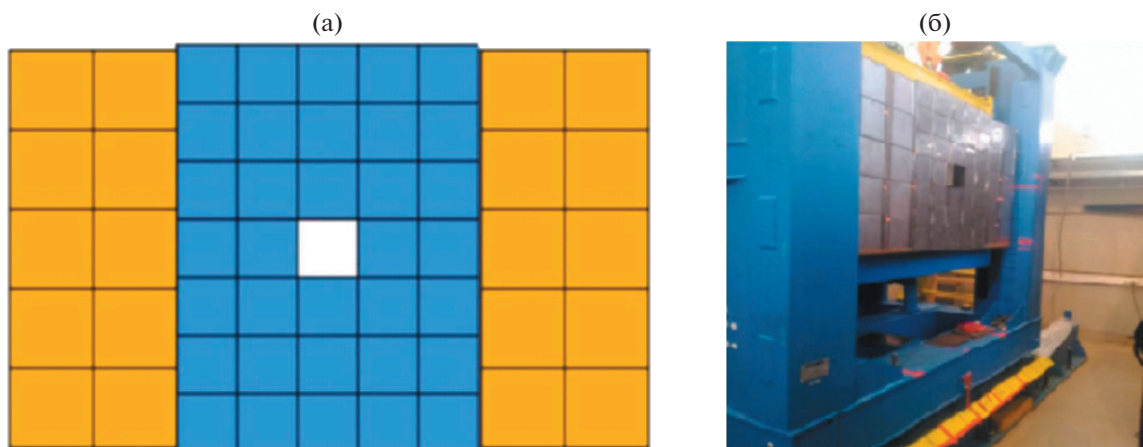


Рис. 2. Схематичный фронтальный вид калориметра FHCAL (а) и фотография калориметра на установке BM@N (б).

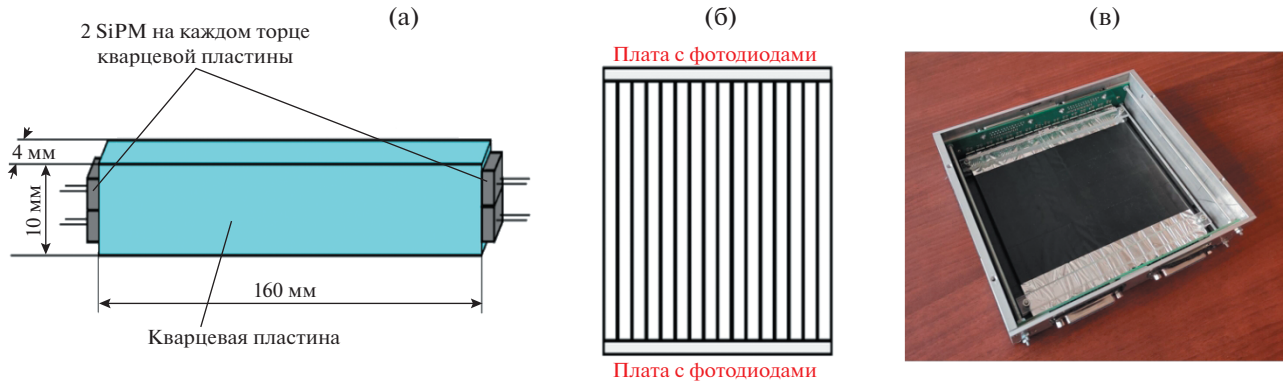
ми размерами  $20 \times 20 \text{ см}^2$  и длиной, эквивалентной 5.6 длины ядерного взаимодействия. Внутренние модули идентичны модулям передних адронных калориметров эксперимента MPD (Multi-Purpose Detector) на ускорительном комплексе NICA [4], а внешние модули были созданы для адронного калориметра эксперимента CBM (Compressed Baryonic Matter) [5] (FAIR, Дармштадт, Германия) и временно используются в адронном калориметре эксперимента BM@N. В центре калориметра имеется отверстие с поперечным размером  $15 \times 15 \text{ см}^2$  для прохождения непрореагировавших в мишени ионов пучка в ловушку, установленную позади калориметра. Это отверстие необходимо, чтобы избежать высокой дозы облучения и сильной активации внутренних модулей калориметра в экспериментах с пучками тяжелых ионов. Схема калориметра показана на рис 2а. Калориметр полностью собран и установлен на BM@N (рис. 2б).

Все модули калориметра состоят из чередующихся слоев свинца и пластиковых сцинтилляторов. Модули адронного калориметра эксперимента CBM/FAIR [6] состоят из 60-ти таких слоев (свинец/сцинтиллятор), тогда как модули эксперимента MPD/NICA имеют 42 подобных слоя. Каждый слой состоит из 16-миллиметровой свинцовой пластины и 4-миллиметровой сцинтилляционной пластины. Свет с каждой сцинтилляционной пластины собирается и транспортируется в конец модуля с помощью спектросмещающего оптоволокна, вклеенного в канавку на одной из поверхностей сцинтилляционной пластины. Волокна с каждых шести последовательных сцинтилляционных пластин, образующих одну продольную секцию, объединяются в один оптический разъем, и свет от этих шести волокон считывается с помощью одного фотодетектора (Hamamatsu MPPC S12572-010P) с чувствитель-

ной областью  $3 \times 3 \text{ мм}^2$ , установленного на печатной плате электроники модуля. Таким образом, большие модули имеют 10 таких продольных секций, малые модули – 7 секций. Продольная сегментация обеспечивает равномерность светосбора по модулю, что дает высокий динамический диапазон отклика калориметра, а также позволяет выполнять энергетическую калибровку FHCAL на космических мюонах [7].

На заднем торце каждого модуля расположена сборка FEE (Front-End Electronics) из двух печатных плат. На первой плате находятся фотодетекторы MPPC с термодатчиком. На второй плате располагаются предусилители с дифференциальным выходом, аналоговый сумматор и цепи питания MPPC с регулируемым в широких пределах опорным напряжением и индивидуальной подстройкой напряжения на каждом MPPC. Там же размещены генератор световых вспышек со светодиодом и PIN-фотодиодом для контроля их амплитуды, два микроконтроллера, управляющих вышеописанными устройствами, а также преобразователи напряжений для питания микроконтроллеров и предусилителей и приемопередатчики шины управления микроконтроллерами. Питание FEE и управление осуществляется от блока HVSystem Module (системный модуль), разработанного и изготовленного в ОИЯИ, г. Дубна [8].

Дифференциальные сигналы от предусилителей подаются на АЦП. Для оцифровки сигналов используются АЦП ADC64s2 [9], разработанные и изготовленные в ОИЯИ, г. Дубна. АЦП ADC64s2 имеет 64 входных канала, работает на частоте дискретизации 62.5 МГц и может записывать до 1024 отсчетов. Возможна работа АЦП как от внешнего запускающего сигнала, так и в режиме самозапуска по произвольно выбранным каналам с индивидуально устанавливаемыми порогами срабатывания. Также ADC64s2 имеет функцию подав-



**Рис. 3.** а – схема одного из кварцевых черенковских детекторов пучкового годоскопа для детектирования заряженных фрагментов; б – схема пучкового годоскопа заряженных фрагментов; в – фотография собранного годоскопа (без верхней светоизолирующей крышки).

ления слабых сигналов с индивидуально настраиваемыми порогами для каждого канала.

Сигнал аналогового сумматора ФЕЕ может использоваться для выработки запускающего сигнала при калибровке FHCaI на космических мюонах. Для синхронизации светодиодных вспышек при калибровке фотодетекторов FHCaI были специально разработаны модули распределения синхронизирующего сигнала.

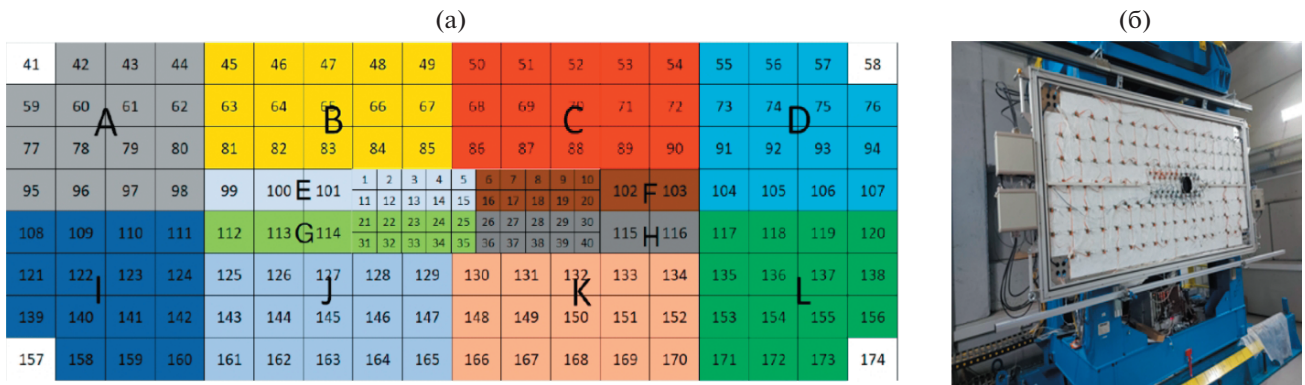
## 2.2. Передний пучковый кварцевый годоскоп

Наличие отверстия в центральной части FHCaI необходимо, как уже отмечалось, для прохождения пучка тяжелых ионов с интенсивностью до  $2 \cdot 10^6$  ионов/с в ловушку, установленную позади калориметра, для предотвращения радиационных повреждений сцинтилляционных пластин центральных модулей калориметра и минимизации активации калориметра. Однако наличие этого отверстия в калориметре приводит к значительной утечке тяжелых фрагментов, что обу-

словливает немонотонность зависимости выделенной энергии в калориметре от центральности в ядро-ядерных столкновениях [10].

Для решения данной проблемы был разработан и изготовлен пучковый черенковский годоскоп ядерных фрагментов FQH (Fragment Quartz Hodoscope), который устанавливается перед отверстием калориметра и полностью перекрывает данное отверстие. Годоскоп служит для измерения зарядов тяжелых фрагментов-спектаторов, которые пролетают через отверстие и не регистрируются калориметром FHCaI. Результаты моделирования зависимости амплитуды сигнала в пучковом годоскопе от реконструированной энергии в калориметре показали возможность разделения наиболее центральных и периферических событий при установлении определенного порога на сигнал с кварцевого годоскопа [10].

С учетом достаточно высокой загрузки этого пучкового детектора (до  $2 \cdot 10^6$  ионов/с) было предложено изготовить его в виде годоскопа, со-



**Рис. 4.** а – схема передней сцинтилляционной стенки (разными цветами и буквами латинского алфавита помечены 12 групп считывания); б – фотография сцинтилляционной стенки (без верхней светоизолирующей крышки), установленной перед передним адронным калориметром на установке ВМ@N.



стоящего из 16-ти отдельных черенковских детекторов. Каждый черенковский детектор состоит из кварцевой пластины длиной 160 мм, толщиной 4 мм и шириной 10 мм, обернутой отражателем – тонкой пленкой алюминированного майлара. Черенковский свет в каждом из 16-ти детекторов считывается с противоположных торцов двумя парами фотодетекторов Hamamatsu MPPC S14160-3015PS, подключенных параллельно, с размером активной области  $3 \times 3 \text{ мм}^2$  и квантовой эффективностью около 32%. MPPC установлены на печатных платах вместе с пассивными элементами фильтрации питания фотодетекторов и термодатчиком. Сборка кварцевых пластин и печатных плат с фотодетекторами заключена в светоизолированный корпус. Схемы отдельного черенковского детектора и пучкового годоскопа показаны на рис. 3а и 3б соответственно, а фотография собранного годоскопа – на рис. 3в. Активная площадь годоскопа составляет  $160 \times 160 \text{ мм}^2$ .

Сигнал с каждой пары фотодиодов MPPC читается цепочкой двух предусилителей с двумя различными коэффициентами усиления ( $\times 1$  и  $\times 4$ ), призванными обеспечить требуемый динамический диапазон работы детектора. Оцифровка сигналов от предусилителей годоскопа осуществляется 16-канальными АЦП TQDC-16 [11], установленными в кейт VME. Платы TQDC-16 способны записывать амплитуду сигнала с частотой дискретизации 80 МГц и разрешением до 14 бит. АЦП интегрированы в систему запуска и сбора данных эксперимента VM@N.

Исследования световых выходов и неоднородности светосбора кварцевых детекторов пучкового годоскопа на пучке электронов на синхротроне “Пахра” в ФИАН показали, что световых выходов при считывании сигналов четырьмя фотодиодами с обоих торцов кварцевой пластины составляет

около 5 фотоэлектронов, а неоднородность светосбора вдоль кварцевой пластины при считывании сигналов парами фотодиодов с обоих торцов кварцевой пластины находится в пределах  $\pm 3\%$  [12].

### 2.3. Передняя сцинтилляционная стенка

Для измерения выходов и идентификации заряженных фрагментов-спектраторов в столкновениях тяжелых ионов был разработан и изготовлен новый детектор – сцинтилляционная стенка ScWall (Scintillation Wall). ScWall состоит из 36-ти малых сцинтилляционных ячеек с поперечными размерами  $7.5 \times 7.5 \text{ см}^2$ , установленных вокруг пучкового отверстия ( $15 \times 15 \text{ см}^2$ ), и 138-ми больших внешних сцинтилляционных ячеек с поперечными размерами  $15 \times 15 \text{ см}^2$ . Толщина сцинтилляционных ячеек составляет 1 см. Поперечные размеры ячеек оптимизированы таким образом, что вероятности двойных хитов не превышают нескольких процентов [13] в одном событии ядро-ядерного взаимодействия в мишени. Схема сцинтилляционной стенки показана на рис. 4а. Полный поперечный размер сцинтилляционной стенки –  $270 \times 120 \text{ см}^2$ . Фото собранной стенки (без передней крышки), установленной перед адронным калориметром на установке VM@N, показано на рис. 4б. В пучковое отверстие монтируется труба, закрепленная с двух сторон светозащитными фланцами. При необходимости труба может быть демонтирована и отверстие может быть закрыто еще четырьмя маленькими детекторами, как это сделано в эксперименте SRC.

В качестве материала ячеек использовался сцинтиллятор на полистирольной основе, полученный экструзионным способом компанией “Унипласт” (г. Владимир, Россия). На поверхно-

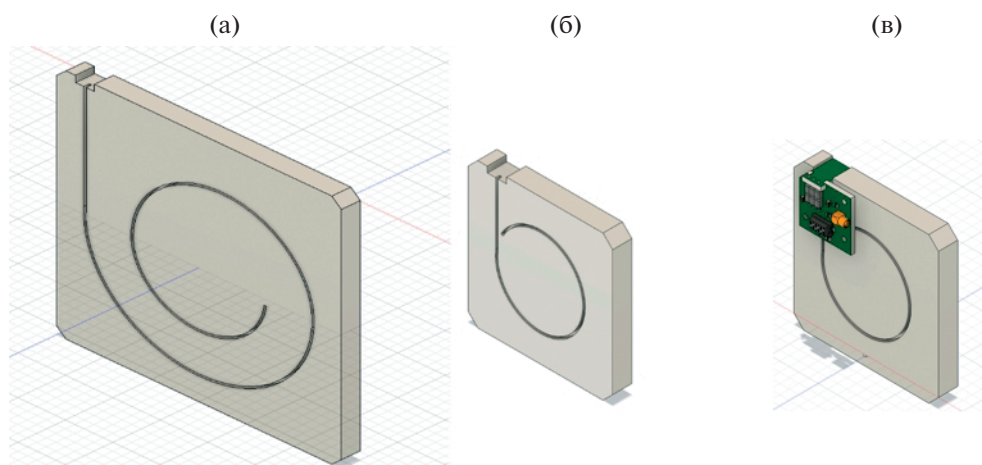
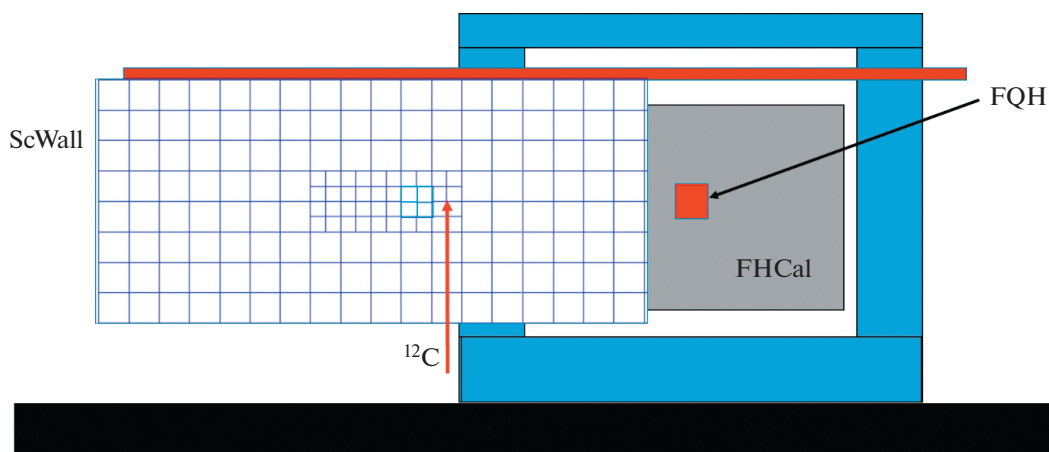
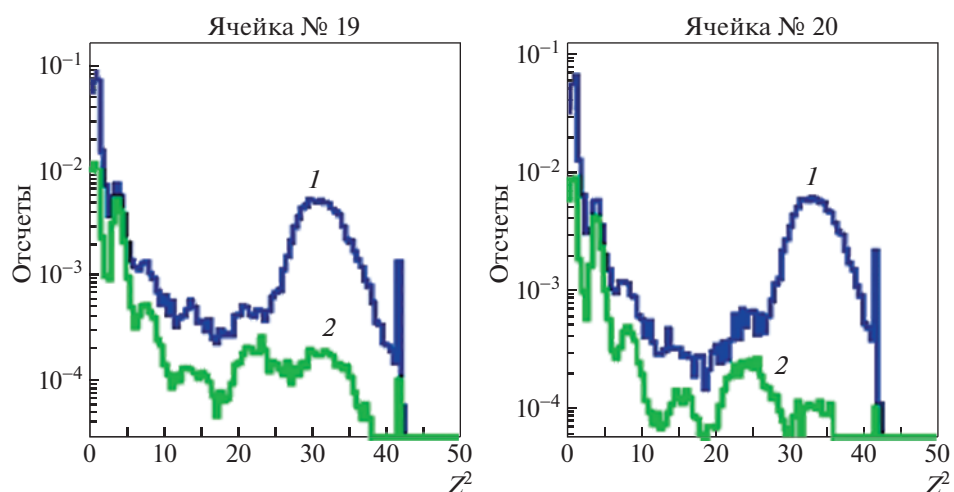


Рис. 5. Схема сцинтилляционных пластин с канавками для вклеивания оптоволокон для большой (а) и малой (б) ячейки; схема малого детектора с установленной на нем платой с MPPC и электроникой (в).



**Рис. 6.** Положение передних детекторов во время физического эксперимента SRC. Черенковский годоскоп ядерных фрагментов FQH установлен перед отверстием в калориметре FHCAL. Положение пучка на сцинтилляционной стенке показано стрелкой.



**Рис. 7.** Распределения по амплитуде сигналов с ячеек № 19 и № 20, в которые преимущественно попадает пучок ионов углерода. 1 – распределения для триггера ВТ; 2 – распределения для триггера ИТ.

сти сцинтилляторов размером  $15 \times 15 \times 1$  см выполнена канавка глубиной 1.5 мм в виде спирали, в которую вклеено спектросмещающее оптоволокно Y11(200) S-type диаметром 1 мм производства компании Kugaaya [14]. Для сцинтиллятора размером  $7.5 \times 7.5 \times 1$  см канавка имеет форму кольца. На рис. 5а и 5б показаны схемы большой и малой ячеек сцинтилляционной стенки соответственно.

Все ячейки имеют по углам небольшие скосы, которые позволяют монтировать их на алюминиевую пластину толщиной 3 мм с помощью пластиковых втулок, надетых на винты. Данная алюминиевая пластина смонтирована на раме из двойного конструкционного профиля  $40 \times 80$  мм. На раму монтируется съемная крышка, представляющая собой также алюминиевую пластину тол-

щиной 3 мм с одинарным,  $40 \times 40$  мм, конструкционным профилем по периметру. Такая конструкция корпуса сцинтилляционной стенки обеспечивает механическую жесткость и светоизоляцию по значительному ( $\sim 8$  м) периметру конструкции. Сцинтилляционная стенка подвешена к рельсу, закрепленному на подставке адронного калориметра, вдоль которого она может свободно перемещаться. Предусмотрена возможность регулировки положения годоскопа по вертикали и фиксации горизонтального перемещения.

Считывание оптического сигнала в каждой ячейке выполняется с помощью фотодетектора Hamamatsu MPPC S13360-1325CS. Фотодетекторы MPPC имеют площадь активной области  $1.3 \times 1.3$  мм<sup>2</sup>, квантовую эффективность 25% и

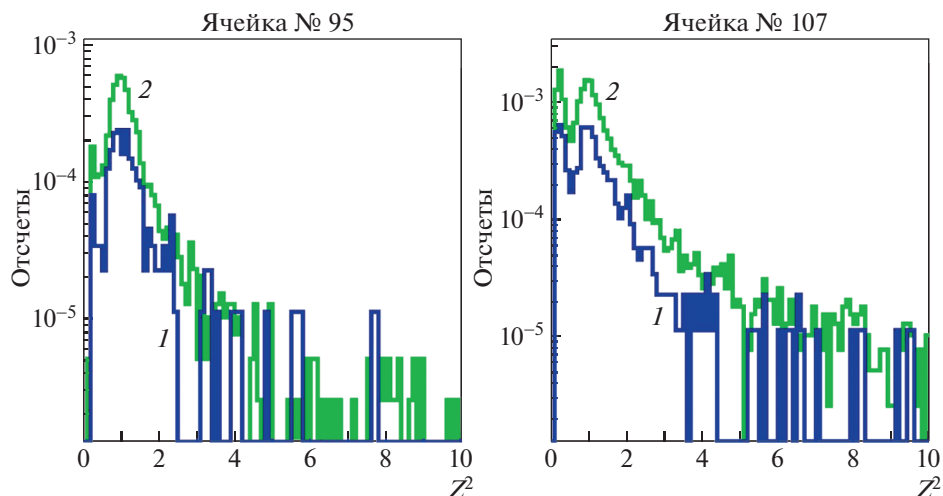


Рис. 8. Распределения по амплитуде сигналов с ячеек № 95 и № 107. 1 – распределения для триггера ВТ; 2 – распределения для триггера IT.

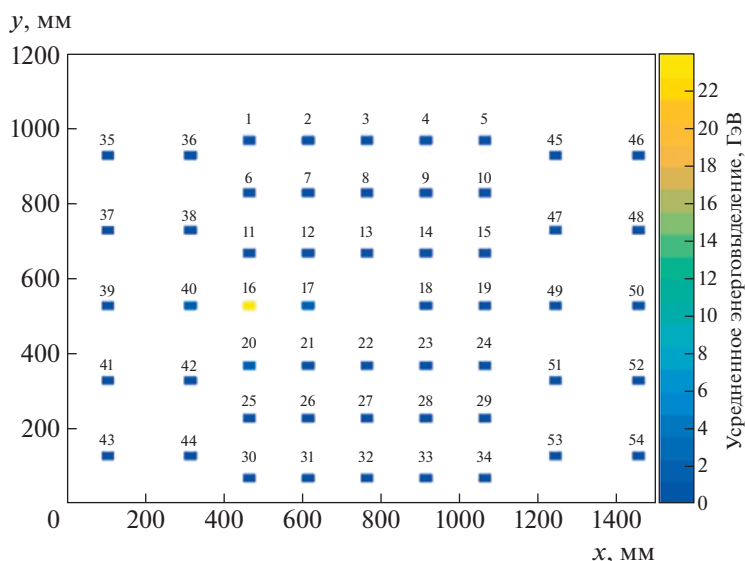


Рис. 9. Распределение выделенной энергии в модулях калориметра FHCAL. Цифры на рисунке соответствуют номерам модулей калориметра.

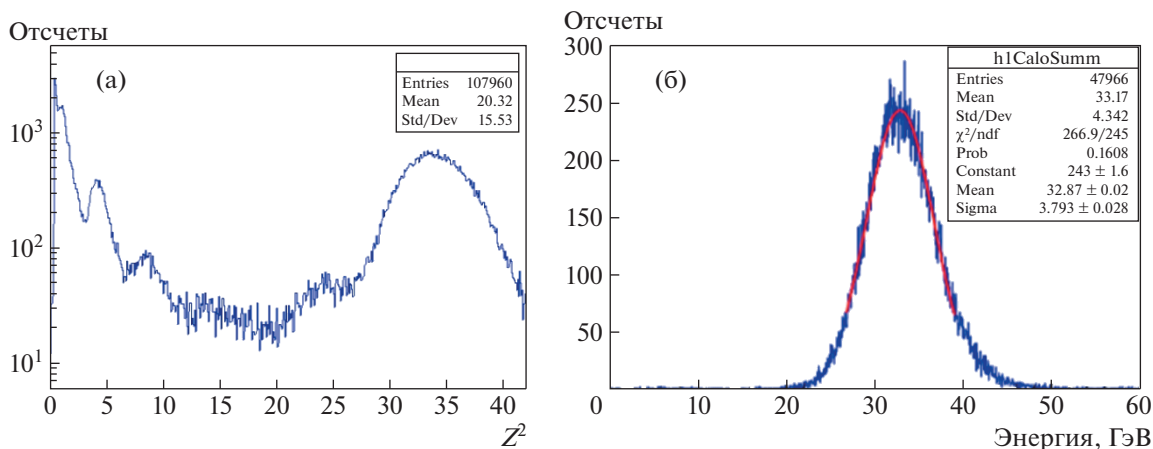
коэффициент усиления  $7 \cdot 10^5$ . Каждый фотодетектор МРРС смонтирован на отдельной печатной плате, которая крепится в пазу сцинтилляционной ячейки (см. рис. 5в). На этой же плате расположены пассивный фильтр питания фотодетекторов, разъем для подключения питания фотодетекторов и считывания показаний датчика температуры, а также разъем для считывания сигнала от МРРС и индивидуальной подстройки напряжения на нем.

Для считывания сигналов с ячеек сцинтилляционной стенки эти ячейки разделены на 12 групп, в каждой группе от 12 до 15 ячеек (помечены разными цветами и буквами латинского алфавита, см.

рис. 4а). В каждой группе на печатной плате одной из ячеек расположен термодатчик, используемый для коррекции напряжения на фотодетекторах в этой группе в зависимости от температуры.

Каждые четыре группы сцинтилляционных ячеек считываются отдельным комбинированным модулем электроники, который содержит АЦП ADC64s2, четыре 16-канальные платы FEE и управляющий модуль с блоком питания.

Результаты измерений на пучке электронов синхротрона “Пахра” в ФИАН показали, что световой выход для больших сцинтилляционных ячеек составляет порядка 32 фотоэлектронов, а неодно-



**Рис. 10.** **а** – распределение амплитуд сигнала в ячейке № 24 ScWall, расположенной перед модулем № 16 адронного калориметра, куда был направлен пучок, крайний правый пик соответствует заряду  $Z = 6$ ; **б** – реконструированный спектр энергий в калориметре FHCAL для ядер углерода с импульсом 3.5 АГэВ/с, полученный при условии отбора событий в сцинтиляционной ячейке № 24 ScWall, соответствующих только ионам углерода.

родность светосбора – около 6%; для малых ячеек световыход равен 55 фотоэлектронам, а неоднородность светосбора – 2.4% [15].

### 3. ТЕСТИРОВАНИЕ ПЕРЕДНИХ ДЕТЕКТОРОВ УСТАНОВКИ VM@N В ЭКСПЕРИМЕНТЕ SRC

Положение передних детекторов во время набора физических данных в эксперименте SRC для реакции  $C + p$  при импульсе ионов пучка углерода 3.5 АГэВ/с схематично показано на рис. 6. Сцинтиляционная стенка в данном положении использовалась для идентификации фрагментов в реакции  $C + p$ . Исследование отклика кварцевого годоскопа и адронного калориметра проводилось только в процессе подготовки эксперимента SRC к набору физических данных.

#### 3.1. Измерение отклика ячеек сцинтиляционной стенки

Пучок ионов углерода, которые не провзаимодействовали в водородной мишени, отклоняется магнитным полем и попадает в основном в ячейки № 19 и № 20 сцинтиляционной стенки (см. рис. 4) при токе 1650 А в анализирующем магните VM@N. На рис. 7 представлены распределения по амплитуде сигналов с этих ячеек, полученные для двух разных триггеров. Ионизационные потери в ячейках пропорциональны квадрату заряда частицы ( $Z^2$ ). Кривая 1 соответствует набору данных, полученных при пучковом триггере (beam trigger – BT), а кривая 2 – триггеру, при котором произошло взаимодействие в мишени (interaction trigger – IT). Спектры нормированы на соответствующие числа триггеров.

В спектрах с триггером взаимодействия наблюдаются пики от фрагментов, соответствующих зарядам от 1 до 6, а также небольшое переполнение в последнем канале, которое обусловлено несколько завышенным напряжением питания фотодетекторов.

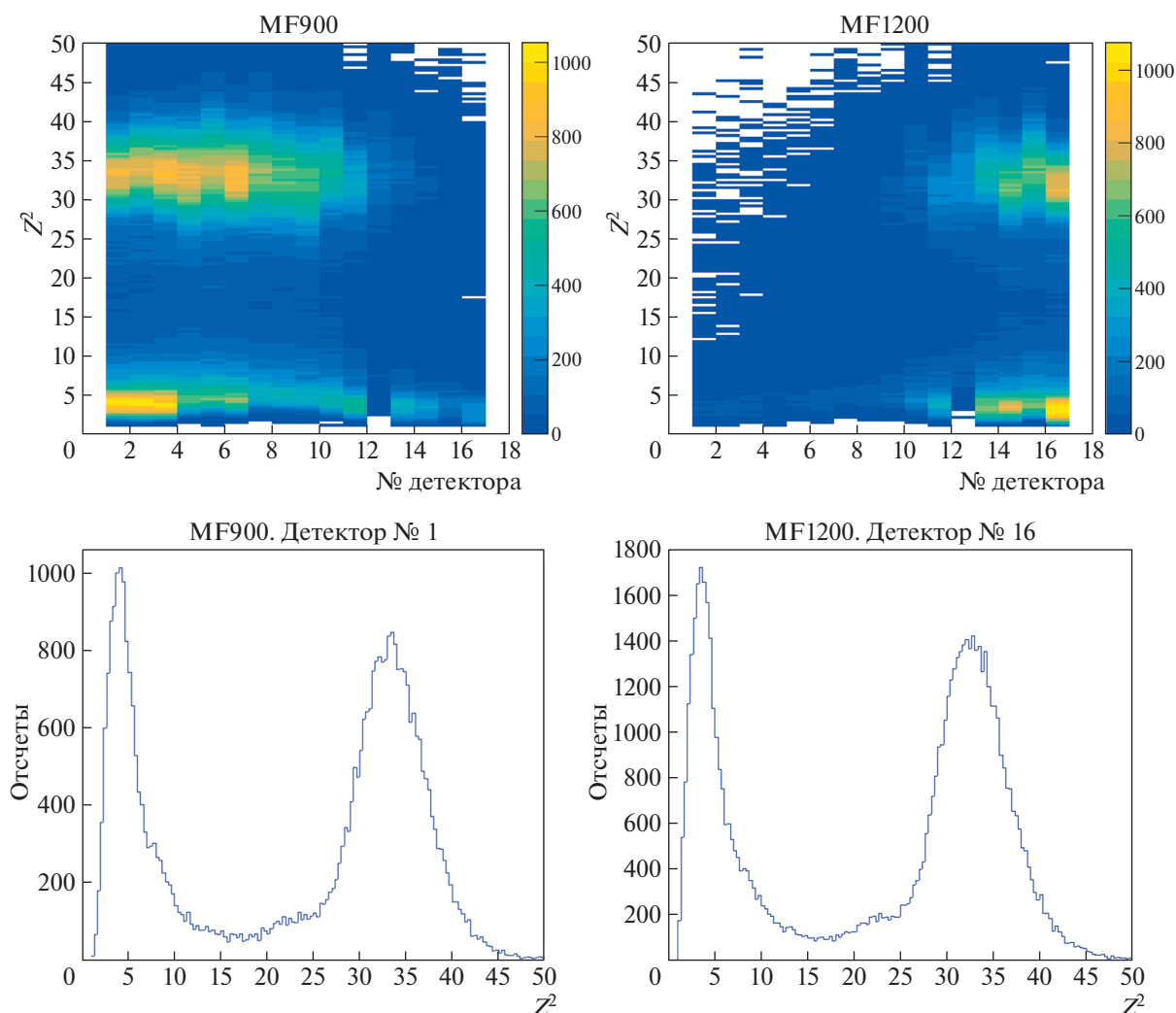
На рис. 8 представлены распределения по амплитуде сигналов для крайних ячеек № 95 и № 107, расположенных в том же ряду, что и ячейки № 19 и № 20. В этих распределениях наблюдается только один пик, соответствующий единичному заряду. Это может быть и протон (дейтрон, тритон), а также  $\pi$ -мезоны. Следует также отметить, что площади этих ячеек в 4 раза больше, чем площади ячеек № 19 и № 20.

#### 3.2. Измерение отклика переднего адронного калориметра

Отклик адронного калориметра изучался только при подготовке и настройке основных пучковых детекторов эксперимента SRC в процессе их сканирования пучком при разных значениях тока в отклоняющем магните. Пространственное распределение выделенной энергии в модулях калориметра при попадании пучка ионов углерода в модуль № 16 показано на рис. 9 (цифры на рисунке соответствуют номерам модулей калориметра). Данные набраны в ходе эксперимента SRC без мишени с пучковым триггером. Видно, что при этом практически вся энергия выделяется в этом модуле.

Наличие сцинтиляционной стенки перед калориметром позволило провести отбор событий по амплитуде сигнала только для ядер углерода, попавших в детектор № 24 сцинтиляционной стенки, расположенный непосредственно перед





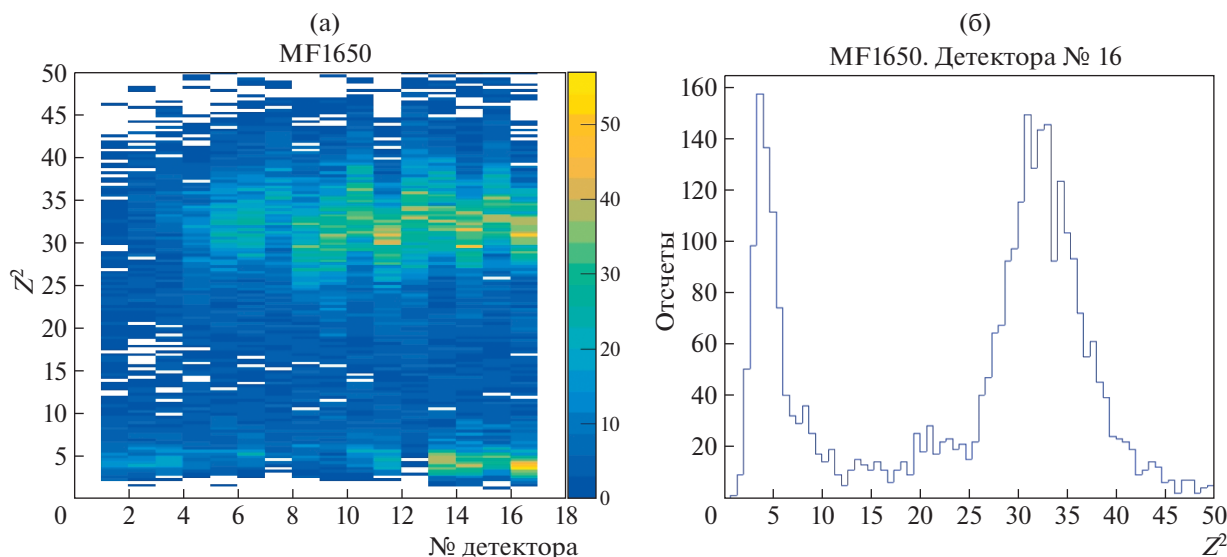
**Рис. 11.** Вверху – двумерные зависимости распределений зарядов от номера детектора в годоскопе, полученные для набора данных без мишени, с ВТ-триггером и с магнитными полями в магните для токов 900 А (слева) и 1200 А (справа). Внизу – зарядовые распределения в первом (слева) и шестнадцатом (справа) детекторах кварцевого годоскопа.

модулем № 16 калориметра. На рис. 10 показан спектр амплитуд в детекторе № 24 сцинтилляционной стенки. Этот спектр набран без мишени с триггером ВТ. Амплитуда сигнала в сцинтилляционном детекторе пропорциональна квадрату заряда попавшей в него частицы. Таким образом, положения пиков в распределении соответствуют фрагментам с  $Z$  от 1 до 6. Наличие пиков с зарядами от 1 до 5 в данном спектре обусловлено, вероятно, взаимодействием пучка углерода с материалом детекторов, расположенных на пути пучка. На рис. 10б показан реконструированный спектр в калориметре FHCAL, полученный при условии отбора событий в спектре энергий сцинтилляционной ячейки № 24 ScWall, соответствующих только ионам углерода. Предварительно все секции адронного калориметра были откалиброваны по энергии с использованием космических мюо-

нов. Для этого использовалась специальная методика с алгоритмом поиска треков в 3D-пространстве секций калориметра [7]. Полученное энергетическое разрешение адронного калориметра составило 11.5% для ионов углерода с импульсом 3.5 АГэВ/с.

### 3.3. Измерение отклика кварцевого пучкового годоскопа

Кварцевый пучковый годоскоп был установлен на входе пучкового отверстия адронного калориметра, и его отклик исследовался на этапе сканирования пучком детекторов SRC при изменении магнитного поля в анализирующем магните. Это позволило набрать данные для разного положения пучка по отношению к центру пучкового годоскопа. Как показала обработка эксперимен-



**Рис. 12.** Зарядовый спектр: **а** – в кварцевом годоскопе для сеанса с полем 1650 А; **б** – в 16-м детекторе кварцевого годоскопа. Пучок попадает в свинцовую мишень толщиной 9 мм, триггер ArmOg.

тальных данных, точное попадание в центр годоскопа могло быть достигнуто при расчетном поле 1050 А. Однако данные набирались при токах в магните 900 и 1200 А, и пучок был смещен немного вправо или влево (по направлению пучка) от центра годоскопа. Двумерные зависимости распределений зарядов от номера детектора в годоскопе при этих двух значениях токов в магните показаны сверху на рис. 11, ось пучка направлена на читателя. Здесь же внизу приведены зарядовые распределения в детекторах № 1 и № 16 кварцевого годоскопа для набора данных при тех же значениях токов в магните. Эти измерения проводились с триггером VT без мишени. Видно, что кроме зарядов, соответствующих ионам углерода, в спектре наблюдаются пики, соответствующие зарядам 2 и 5, появление которых обусловлено, скорее всего, взаимодействием ионов углерода с материалом детекторов и воздухом при прохождении пучка до пучкового годоскопа.

Отдельное измерение отклика кварцевого годоскопа было проведено для сдвинутого положения калориметра с годоскопом при токе в магните 1650 А с IT-триггером, который отбирал и события со взаимодействием пучка ионов углерода со свинцовой мишенью толщиной 9 мм. Двумерная зависимость распределения зарядов от номера детектора в годоскопе показана на рис. 12а.

На рис. 12б показано зарядовое распределение в детекторе № 16 кварцевого годоскопа для данного набора данных. Здесь в спектре, несмотря на малую доступную статистику, наблюдаются пики, соответствующие зарядам от 2 до 6, появление которых обусловлено взаимодействием ионов углерода как с мишенью, так и с материалом детек-

торов и воздухом при прохождении пучка до пучкового годоскопа.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено краткое описание ряда новых передних детекторов, созданных в рамках модернизации экспериментальной установки BM@N. Данные детекторы предназначены для измерения энергии и зарядов фрагментов-спектраторов, что позволит определять в эксперименте BM@N центральность и ориентацию плоскости реакции, а также исследовать зарядовые распределения фрагментов-спектраторов, образующихся в ядерных взаимодействиях. Получены первые результаты измерений отклика описанных передних детекторов в эксперименте SRC в реакции взаимодействия ионов углерода с импульсом 3.5 АГэВ/с с жидководородной мишенью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kapishin M.* Studies of baryonic matter in the BM@N and MPD experiments at Nuclotron/NICA. PoS(CORFU2018)188. 2019.
2. *Kapishin M.* BM@N First Results // The XVIII International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM 2019) / Eds. D. Elia, G.E. Bruno, P. Colangelo, L. Cosmai. Springer Proceedings in Physics. V. 250. Cham., Springer, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-53448-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-53448-6_3)
3. *Guber F., Borisenko D., Finogeev D., Golubeva M., Ivashkin A., Karpushkin N., Morozov S., Senger A.* // EPJ Web of Conferences. 2019. V. 204. 07007. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201920407007>

4. *Sissakian A., Sorin A.* // EPJ Web Conferences. 2010. V. 7. 02006. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20100702006>
5. *Senger P.* // Particles. 2020. V. 3 (2). P. 320. <https://doi.org/10.3390/particles3020024>
6. *Guber F., Selyuzhenkov I.* Technical Design Report for the CBM Projectile Spectator. <https://repository.gsi.de/record/109059>
7. *Izvestnyy A., Karpushkin N., Guber F., Morozov S., Petukhov O.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1690. P. 012060. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1690/1/012060>
8. URL <http://hvsys.ru> High voltage systems
9. URL <https://afi.jinr.ru/ADC64s2>
10. *Guber F., Finogeev D., Golubeva M., Ivashkin A., Izvestnyy A., Kapishin M., Karpushkin N., Morozov S., Petukhov O.* // JINST. 2020. V. 15. C05020. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/05/C05020>
11. TQDC AFI electronics. <https://afi.jinr.ru/TQDC-16>
12. *Баранов А.Г., Губер Ф.Ф., Ивашкин А.П., Известный А.В., Морозов С.В., Решетин А.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Полянский В.В., Салахутдинов Г.Х., Наумов П.Ю.* // ПТЭ. 2021. № 3. С. 15. <https://doi.org/10.31857/S0032816221020129>
13. *Guber F., Golubeva M., Ivashkin A., Kapishin M., Karpushkin N., Kugler A., Morozov S.* // Phys. Part. Nucl. 2022. V. 53. Iss. 2. P. 626. <https://doi.org/10.1134/S1063779622020332>
14. Kuraray Plastic Scintillating Fibres. <http://kuraray-psf.jp/psf/>
15. *Баранов А.Г., Басков В.А., Василенко В.К., Герасимов Д.П., Губер Ф.Ф., Дронов В.А., Ивашкин А.П., Известный А.В., Карпушкин Н.М., Львов А.И., Морозов С.В., Полянский В.В., Салахутдинов Г.Х.* // ПТЭ. 2022. № 1. С. 58. <https://doi.org/10.31857/S0032816222010025>