

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 539.123

КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ НЕЙТРИННОГО  
ТЕЛЕСКОПА VAİKAL-GVD

© 2020 г. А. В. Аврорин<sup>a</sup>, А. Д. Аврорин<sup>a</sup>, В. М. Айнутдинов<sup>a</sup>, R. Bannasch<sup>i</sup>, Z. Bardáčová<sup>g</sup>,  
И. А. Белолаптиков<sup>b</sup>, В. Б. Бруданин<sup>b</sup>, Н. М. Буднев<sup>c</sup>, А. Р. Гафаров<sup>c</sup>, К. В. Голубков<sup>a</sup>,  
Н. С. Горшков<sup>b</sup>, Т. И. Гресь<sup>c</sup>, R. Dvornický<sup>b, g</sup>, Г. В. Домогацкий<sup>a</sup>, А. А. Дорошенко<sup>a</sup>,  
Ж.-А. М. Джилкибаев<sup>a</sup>, В. Я. Дик<sup>b</sup>, А. Н. Диячок<sup>c</sup>, Е. Eškerová<sup>g</sup>, Д. Н. Заборов<sup>a</sup>, Р. А. Иванов<sup>b</sup>,  
М. С. Катулин<sup>b</sup>, К. Г. Кебкал<sup>i</sup>, О. Г. Кебкал<sup>i</sup>, В. А. Кожин<sup>d</sup>, М. М. Колбин<sup>b</sup>, К. В. Конищев<sup>b</sup>,  
А. В. Коробченко<sup>b</sup>, А. П. Кошечкин<sup>a</sup>, М. В. Круглов<sup>b</sup>, М. К. Крюков<sup>a</sup>, В. Ф. Кулепов<sup>e</sup>,  
М. В. Миленин<sup>a</sup>, Р. А. Миргазов<sup>c</sup>, V. Nazari<sup>b</sup>, Д. В. Наумов<sup>b</sup>, А. И. Панфилов<sup>a</sup>, Д. П. Петухов<sup>a</sup>,  
Е. Н. Плисковский<sup>b</sup>, М. И. Розанов<sup>f</sup>, В. Д. Рушай<sup>b</sup>, Е. В. Рябов<sup>c</sup>, Г. Б. Сафронов<sup>a</sup>, F. Šimkovič<sup>b, g, h</sup>,  
А. В. Скурихин<sup>d</sup>, А. Г. Соловьев<sup>b</sup>, М. Н. Сороковиков<sup>b</sup>, I. Štekl<sup>h</sup>, О. В. Суворова<sup>a</sup>, Е. О. Сушенок<sup>b</sup>,  
В. А. Таболенко<sup>c</sup>, Б. А. Таращанский<sup>c</sup>, L. Fajtl<sup>h</sup>, С. В. Фиалковский<sup>e</sup>, Е. В. Храмов<sup>b</sup>,  
Б. А. Шайбонов<sup>b</sup>, М. Д. Шелепов<sup>a, \*</sup>, С. А. Яковлев<sup>i</sup>

<sup>a</sup> Институт ядерных исследований РАН

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

<sup>b</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>c</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>d</sup> Институт ядерной физики им. Скобелыцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>e</sup> Нижегородский государственный технический университет, Нижний Новгород, Россия

<sup>f</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>g</sup> Comenius University, Mlynská dolina F1, SK-842 48 Братислава, Словакия

<sup>h</sup> Czech Technical University in Prague, 12800 Прага, Чешская Республика

<sup>i</sup> EvoLogics GmbH, Берлин, Германия

\*e-mail: shelepov-1992@mail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.

После доработки 27.02.2020 г.

Принята к публикации 28.02.2020 г.

Проект Vaikal-GVD направлен на создание глубоководного нейтринного телескопа масштаба кубического километра в озере Байкал. Установка находится на этапе развертывания, и в настоящее время ее эффективный объем в задаче регистрации ливней от нейтрино высоких энергий астрофизической природы достиг  $0.25 \text{ км}^3$ . Набор экспериментальных данных на телескопе осуществляется с 2015 г. в режиме постоянной экспозиции одновременно с наращиванием детектора. Данная статья посвящена вопросу калибровки измерительной системы нейтринного телескопа. В ней представлена аппаратура калибровочной системы, описана методика калибровки и обсуждаются вопросы точности, надежности и эффективности разработанных калибровочных процедур.

DOI: 10.31857/S0032816220040102

ВВЕДЕНИЕ

Целью проекта Vaikal-GVD является исследование источников и механизмов генерации частиц высоких и сверхвысоких энергий, а также форм существования и процессов эволюции вещества во Вселенной на основании экспериментальных данных, полученных на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе [1]. Телескоп расположен в оз. Байкал на глубинах от 750 до 1275 м. Набор экспериментальных данных на телескопе осуществ-

лялся в режиме постоянной экспозиции одновременно с наращиванием детектора.

В настоящее время в оз. Байкал успешно функционирует установка, состоящая из 1440 фотодетекторов (оптических модулей), которая является крупнейшим глубоководным телескопом Северного полушария. Эффективный объем телескопа Vaikal-GVD достиг  $0.25 \text{ км}^3$  в задаче регистрации ливней от нейтрино высоких энергий астрофизической природы, что составляет около

0.6 от эффективного объема антарктического детектора IceCube [2, 3].

Принцип работы нейтринного телескопа основан на регистрации оптическими сенсорами, размещенными в водной среде, черенковского излучения продуктов взаимодействия нейтрино высокой энергии с водой. Широкий диапазон энергий регистрируемых событий ( $10^{11}$ – $10^{17}$  эВ) и требуемая высокая точность восстановления направления движения нейтрино (лучше  $1^\circ$ ) накладывают жесткие требования на характеристики и калибровку измерительной системы детектора.

Динамический диапазон измерения и калибровки каналов установки должен составлять от 1 до  $10^5$  фотонов, регистрируемых фотоэлектронными умножителями, а точность измерения времени их регистрации должна быть порядка единиц наносекунд.

Кроме того, учитывая планируемый продолжительный период эксплуатации детектора (десять и более лет), в течение которого возможны существенные изменения характеристик измерительных каналов, калибровка должна осуществляться на постоянной основе в условиях работающей установки.

Данная статья посвящена вопросам калибровки нейтринного телескопа Baikal-GVD. В статье рассматриваются аппаратура и методы амплитудной и временной калибровки каналов в широком динамическом диапазоне, описан набор программных инструментов, обеспечивающих автоматизированное проведение калибровочных сеансов и обработку полученных данных, обсуждаются результаты калибровки и вопросы точности, надежности и эффективности разработанных калибровочных процедур.

## СТРУКТУРА ДЕТЕКТОРА

Телескоп Baikal-GVD имеет модульную структуру, формируемую из функционально законченных установок – кластеров вертикальных гирлянд оптических модулей (о.м.). Расстояние между центрами кластеров составляет 300 м.

Каждый кластер Baikal-GVD представляет собой детектор черенковского излучения, состоящий из 288 оптических модулей. Оптические модули содержат фотоэлектронные умножители (ф.э.у.) Hamamatsu R7081-100 с полусферическим фотокатодом диаметром 10 дюймов и квантовой эффективностью  $\sim 35\%$ . Кластер является функционально законченной установкой, оснащенной независимой системой сбора данных и соединенной с береговым центром управления отдельной электрооптической линией электропитания и связи.

Каждый кластер телескопа содержит 8 гирлянд о.м.: одну центральную и семь периферийных, размещенных равномерно по окружности радиу-

сом 60 м. Длина гирлянды 525 м. Вдоль нее через каждые 15 м размещены о.м. Каждая гирлянда установки содержит три секции о.м. (12 о.м. в секции) и 4 акустических модема гидроакустической системы позиционирования. Последняя обеспечивает определение пространственных координат о.м. с точностью  $\sim 10$  см [4].

В центральном модуле каждой секции осуществляется непрерывное сканирование аналоговых выходов двенадцати оптических модулей 12-битными аналого-цифровыми преобразователями (а.ц.п.) с частотой дискретизации 200 МГц. При реализации триггерных условий формируются временные кадры каналов – преобразованные в цифровой код последовательные наборы амплитуд входных сигналов. Каждый кадр содержит информацию о сигналах, поступивших с канала в интервале времени 5 мкс. Использование методики сканирования при помощи быстрых а.ц.п. существенно увеличивает информативность физических событий [5].

С апреля 2019 г. конфигурация установки Baikal-GVD включает в себя пять кластеров (рис. 1). При этом эффективный объем детектора соответствует  $0.25 \text{ км}^3$  для регистрации каскадных событий от нейтрино с энергией выше 100 ТэВ.

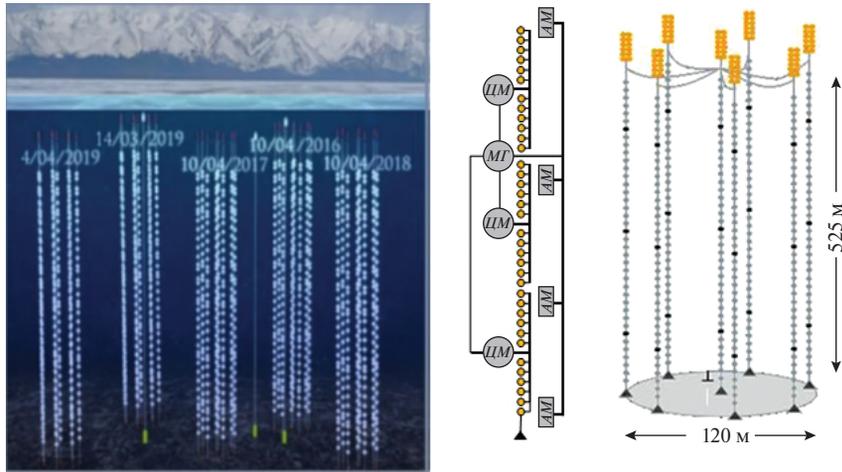
## АППАРАТУРА И МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ

Методика калибровки нейтринного телескопа в натуральных условиях основана на использовании светодиодных калибровочных источников света, расположенных в области рабочего объема установки. Для комплексной проверки работы систем калибровки используются лазерные калибровочные источники, световые импульсы которых регистрируются несколькими кластерами детектора.

При выполнении калибровочных процедур используются результаты измерения формы импульсов, регистрируемых на каналах. Это позволяет выбирать уровень порога для определения времени регистрации и использовать методику регистрации нескольких импульсов от различных источников одним каналом для измерения его временных параметров.

### *Светодиодная система калибровки*

Для амплитудной калибровки каналов и определения их относительных временных задержек используются светодиодные калибровочные источники, размещенные как непосредственно внутри оптических модулей, так и в отдельных глубоководных корпусах на гирляндах. Калибровочная светодиодная система реализована на основе светодиодных источников Kingbright L7113 PVC-A с длиной волны 470 нм в максимуме спектрального распределения излучаемых фотонов, угол излуче-



**Рис. 1.** Слева – схема расположения пяти кластеров установки Baikal-GVD (указаны даты введения кластера в эксплуатацию); справа – схема гирлянды из оптических модулей и кластера: *МГ* – модуль гирлянды, *ЦМ* – центральный модуль, *АМ* – акустический модем.

ния  $\sim 15^\circ$ . Управление работой светодиодов осуществляется через специализированный контроллер (продукция компаний ООО “СНИИП-АУНИС” и “ИПК ЛИК”) и светодиодные драйверы, принцип работы которых основан на подходе, предложенном в работе [6].

Контроллер позволяет управлять работой двух светодиодных источников. Помимо регулировки интенсивности, частоты повторения и скважности световых вспышек каждого из светодиодов, предусмотрена возможность регулировки задержки между их импульсами в диапазоне от 0 до 1000 нс с шагом  $\sim 100$  нс. Длительность фронта светового импульса составляет в среднем величину менее 3 нс, а длительность импульса на половине высоты – 5–7 нс. Количество фотонов во вспышке может регулироваться в пределах от 1 до  $\sim 10^8$ . При максимальной интенсивности вспышки сигнал от светодиода может быть зарегистрирован в байкальской воде оптическим модулем, находящимся на расстоянии  $\sim 100$  м от источника.

Возможность прецизионной регулировки интенсивности излучения светодиодов позволяет проводить амплитудную калибровку (измерять однофотонные спектры ф.э.у.) и определять градуировочные кривые каналов (зависимость заряда сигнала на выходе спектрометрического канала от количества фотоэлектронов (ф.э.), выбитых из фотокатода ф.э.у.) как в лабораторных условиях, так и непосредственно при штатном функционировании установки в натуральных условиях.

В случае оценки градуировочных кривых в лабораторных условиях проводятся серии измерений, в которых регистрируются поочередно заряды сигналов, инициированных первым светодиодом оптического модуля, вторым светодиодом и двумя светодиодами одновременно, после чего

применяется итерационный процесс, в котором величины зарядов вспышек первого и второго светодиодов подбираются равными заряду от одновременной вспышки двух светодиодов. Последовательное удвоение интенсивности световых вспышек позволяет экстраполировать результаты измерения градуировочного коэффициента канала из линейной области (до  $\sim 10^2$  ф.э.) в нелинейную область измерений.

Точность измерения градуировочной кривой о.м. составляет около 20% в области до  $10^4$  ф.э. и определяется количеством итераций, точностью подбора требуемых величин зарядов выходных импульсов светодиодов и взаимным влиянием каналов друг на друга (перекрестными наводками). Для оценки величины перекрестных наводок светодиодных каналов служит параметр  $r$ , определяемый как:

$$r = \frac{Q(u_1, u_2 = 0) - Q(u_1, u_2 = u_1)}{Q(u_1, u_2 = 0)},$$

где  $Q(u_1, u_2)$  – средний заряд сигналов с ф.э.у., инициированных двумя светодиодами с управляющими напряжениями  $u_1$  и  $u_2$ , при условии, что второй светодиод оптически изолирован от фотокатода ф.э.у.

На рис. 2 представлено измеренное значение параметра  $r$  для одного из светодиодных источников как функция количества излучаемых фотонов. Согласно рисунку, величина перекрестных наводок между каналами светодиодов существенно меньше 1%.

В каждом оптическом модуле установлены два светодиода, ориентированные вверх и позволяющие измерять временные сдвиги каналов в пределах одной гирлянды.

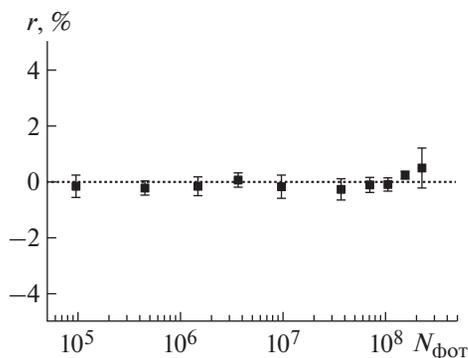


Рис. 2. Величина перекрестных наводок между каналами двух светодиодов в зависимости от интенсивности их свечения.

Для относительной временной калибровки каналов, расположенных на разных гирляндах, используются светодиодные калибровочные источники, размещенные в отдельных глубоководных корпусах (матрицы светодиодов). Каждая матрица содержит 12 светодиодов. Шесть светодиодов ориентированы в вертикальном направлении, обеспечивая засветку о.м., расположенных на гирлянде, на которой размещается матрица. Остальные шесть светодиодов ориентированы в горизонтальном направлении (азимутальный угол между соседними светодиодами  $60^\circ$ ), засвечивая о.м. соседних гирлянд.

Для управления работой матриц светодиодов используются контроллеры, полностью аналогичные контроллерам о.м. К первому каналу контроллеров подключаются параллельно шесть драйверов вертикально ориентированных светодиодов, ко второму каналу — шесть горизонтально ориентированных источников света.

### Лазерный калибровочный источник

Лазерный калибровочный источник света был разработан для байкальского эксперимента фирмой ООО НПЦ «ЭЛС-94» в 2016 г. В 2017 г. первый калибровочный лазерный источник света был введен в состав экспериментального комплекса Baikal-GVD на оз. Байкал.

Лазерный источник излучает на длине волны 532 нм. Энергия в импульсе достигает 0.37 мДж ( $\sim 10^{15}$  фотонов) при длительности вспышки  $\sim 1$  нс.

С использованием лазерного источника света осуществляются оценка эффективности и комплексная проверка временной и амплитудной калибровки каналов, точности позиционирования о.м. и корректности синхронизации кластеров. В состав лазерного источника входит система излучения света, система контроля стабильности интенсивности излучения, управляемый аттенуатор и диффузор, обеспечивающий формирование изотропного потока излучения.

Аттенуатор имеет 36 уровней ослабления сигнала с шагом 3 дБ. Внешний вид лазерного источника показан на рис. 3. На этом же рисунке (справа) показаны области, в которых сигнал от лазера, регистрируемый фотодетекторами телескопа, составляет 1 ф.э. и 10 ф.э.

### АМПЛИТУДНАЯ КАЛИБРОВКА КАНАЛОВ

Амплитудная калибровка каналов основана на измерении однофотозлектронных спектров ф.э.у. — амплитудных распределений, полученных в режиме регистрации единичных фотоэлектронов. Аппроксимация однофотозлектронного пика распределением Гаусса позволяет определить средний заряд одного фотоэлектрона  $Q_{1e}$ , выраженный в отсчетах а.ц.п.

Параметры  $Q_{1e}$  представляют собой амплитудные калибровочные коэффициенты, которые ис-

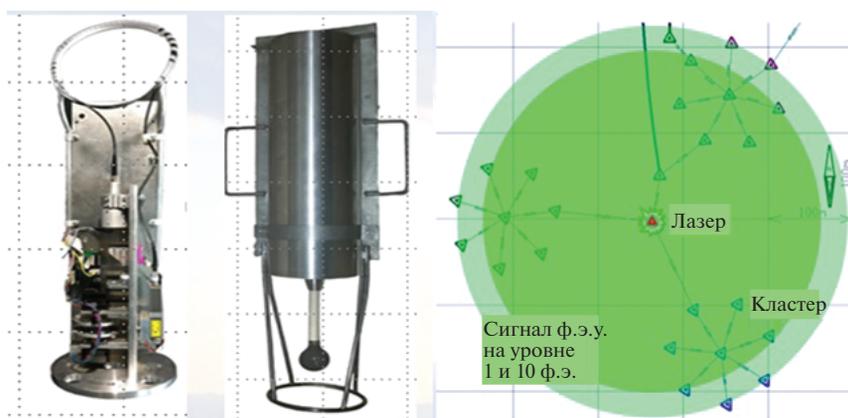
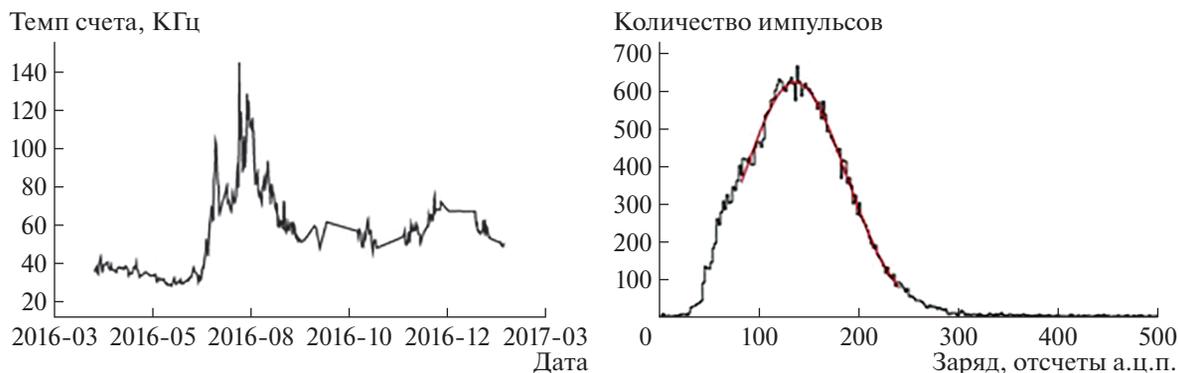


Рис. 3. Внешний вид лазерного калибровочного источника (слева) и ожидаемая величина сигналов, регистрируемых фотодетекторами кластеров Baikal-GVD (справа).



**Рис. 4.** Темп счета шумовых импульсов на одном о.м. в течение года (слева), однофотоэлектронный спектр для одного из каналов установки, полученный при измерении фонового свечения воды (справа).

пользуются для определения количества фотоэлектронов, сформировавших импульсы на каналах. Для вычисления потока черенковских фотонов, падающего на фотокатод ф.э.у., используется информация о его квантовой чувствительности. Измерение квантовой чувствительности фотокатодов осуществляется фирмой Hamamatsu – поставщиком ф.э.у.

Для прямого измерения однофотоэлектронных спектров каналов необходим источник, генерирующий такие потоки света, при регистрации которых ф.э.у. вероятность выбивания из фотокатода нескольких фотоэлектронов пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью выбивания единичных фотоэлектронов.

В качестве такого источника в лабораторных условиях используются импульсные светодиоды с регулируемой яркостью, установленные в о.м. Однако подбор интенсивности светодиодов, обеспечивающей одноэлектронный режим работы каналов, является достаточно длительной процедурой и применяется только на выборочных каналах установки для контроля амплитудной калибровки.

В условиях подводного эксперимента для постоянного мониторинга  $Q_{1e}$  всех каналов установки используется альтернативный подход, основанный на регистрации шумовых импульсов, обусловленных, главным образом, естественным свечением байкальской воды.

Для выделения шумовых импульсов используется область временного окна для регистрации событий, в которой доля многоэлектронных импульсов, обусловленных физическими событиями, пренебрежимо мала по сравнению с однофотоэлектронными импульсами.

При выполнении триггерного условия осуществляется запись временных дорожек а.п.п. всех каналов кластера во временном окне 5 мкс. Временные дорожки обрабатываются в режиме реального времени: из них выделяются импульсы с зарядом больше 0.5 ф.э. и передаются в центр

сбора данных кластера. Задержки триггерных сигналов подбираются таким образом, чтобы импульсы, сформировавшие триггер, находились в центре записываемой дорожки. Присутствие многофотоэлектронных сигналов в первой трети дорожки маловероятно, и эта область используется для оценки шумового темпа счета и амплитудных параметров одноэлектронных сигналов.

На рис. 4 (слева) в качестве примера приведена временная зависимость шумового темпа счета одного канала в течение года. Существуют периоды с повышенным темпом счета шумов, но отношения количества одноэлектронных и многоэлектронных импульсов при этом не изменяется [7]. Анализ формы зарядового распределения выделенных шумовых импульсов указывает на их одноэлектронный характер. На рис. 4 (справа) показан пример однофотоэлектронного спектра для одного из каналов, измеренного при помощи шумовых импульсов. Для аппроксимации однофотоэлектронного спектра аналитическим выражением используется распределение Гаусса. Порог отбора сигналов выбран на уровне половины однофотоэлектронной амплитуды.

Таким образом, используя шумовые импульсы, можно определить положение однофотоэлектронного пика для каждого канала установки. Следует отметить, что сопоставление результатов амплитудных калибровок, выполненных при помощи светодиодных источников света, а также с использованием шумовых импульсов, показали их полную идентичность.

Описанная процедура калибровки по шумовым импульсам позволяет определять амплитудные калибровочные коэффициенты в режиме штатного функционирования установки и проводить мониторинг их стабильности во времени [8]. На рис. 5 (слева) приведена зависимость калибровочных коэффициентов для двух выборочных каналов от номера сеанса набора данных (с апреля по июль 2019 г.). Значения коэффициентов

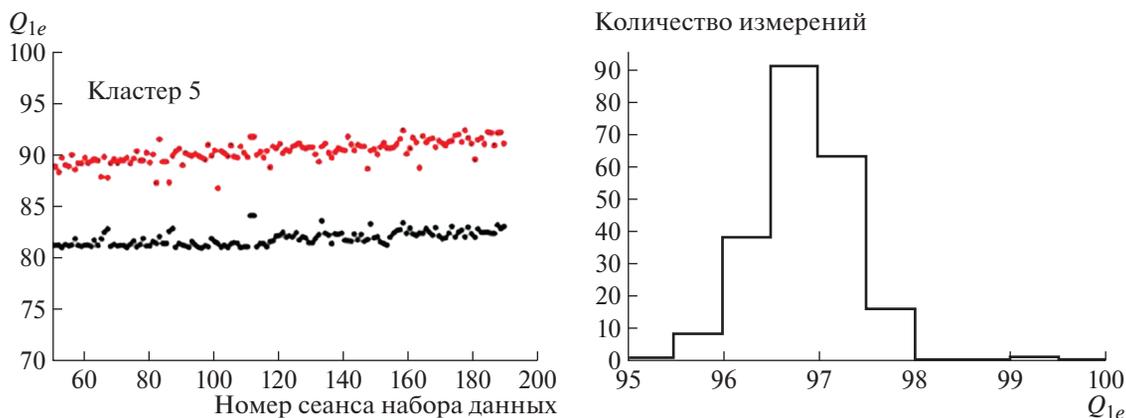


Рис. 5. Примеры временной зависимости амплитудных калибровочных коэффициентов (слева) и характерное амплитудное распределение  $Q_{1e}$  для одного канала (справа).

практически не меняются со временем. Среднеквадратичное отклонение за 109 сут экспозиции составило менее 1% (см. рис. 5, справа).

Ключевыми параметрами системы сбора данных установки являются триггерные пороги каналов, которые определяют эффективность регистрации физических событий. Триггерным условием является срабатывание пары соседних каналов в пределах секции с “высоким”,  $\sim 4$  ф.э., и “низким”,  $\sim 2$  ф.э., порогами. При выполнении этого условия осуществляется считывание данных со всех каналов кластера. Величина порогов подбирается таким образом, чтобы темп счета триггерных сигналов одного кластера не превышал  $\sim 100$  Гц. Максимальная частота выработки триггера ограничивается возможностями глубоководной системы передачи данных кластера.

Для контроля величины порогов строятся зарядовые распределения сигналов на каналах, участвовавших в формировании триггера. Пример таких распределений приводится на рис. 6

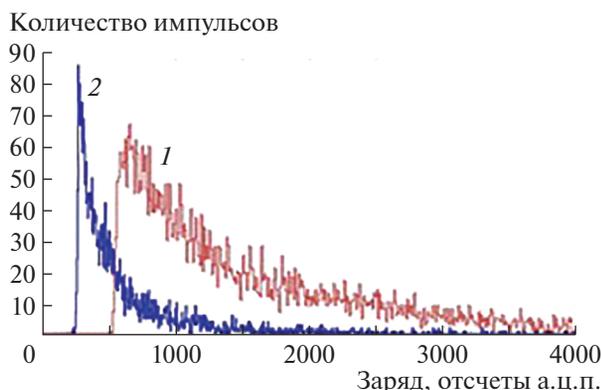


Рис. 6. Распределение импульсов, участвовавших в формировании триггера кластера, по заряду для “высокого” (1) и “низкого” (2) порогов регистрации.

для одного из каналов. Величина порога определяется по левой границе распределения. Точность оценки триггерных порогов составляет  $\sim 5\%$ .

Для контроля стабильности порогов была создана база данных, в которую входят значения высокого и низкого порогов для каждого канала и каждого сеанса набора данных. В левой части рис. 7 представлены для всех каналов одного кластера значения порогов  $Q_{tr}$  полученных по данным одного сеанса набора данных. В правой части рисунка показана зависимость порога от времени для одного измерительного канала.

Для восстановления энергии каскадных ливней высокой энергии требуется измерять заряды сигналов в диапазоне нелинейного отклика каналов  $10^2$ – $10^5$  ф.э. Для градуировки каналов в нелинейной области применяются два различных метода. Первый метод, основанный на использовании двух светодиодов для последовательного удвоения светового потока и регистрации соответствующего отклика о.м., применяется в лабораторных условиях и описан в данном параграфе выше.

Второй метод основан на сопоставлении сигналов калибруемого канала с сигналами на каналах, удаленных от источника света, для которых выполняется условие линейности. Для этого в условиях подводного эксперимента проводится специальный калибровочный сеанс. Во время сеанса на каждом о.м. светодиоды запускаются с различными интенсивностями излучения, засвечивая вышестоящие модули.

Таким образом формируется набор зарядов — откликов каналов в области нелинейности на близком к светодиоду модуле и соответствующий ему набор в области линейности на удаленных модулях. Информация о том, во сколько раз повысился заряд в области линейности, позволяет рассчитать коэффициент увеличения заряда в нелинейной области и сопоставить с регистрируе-

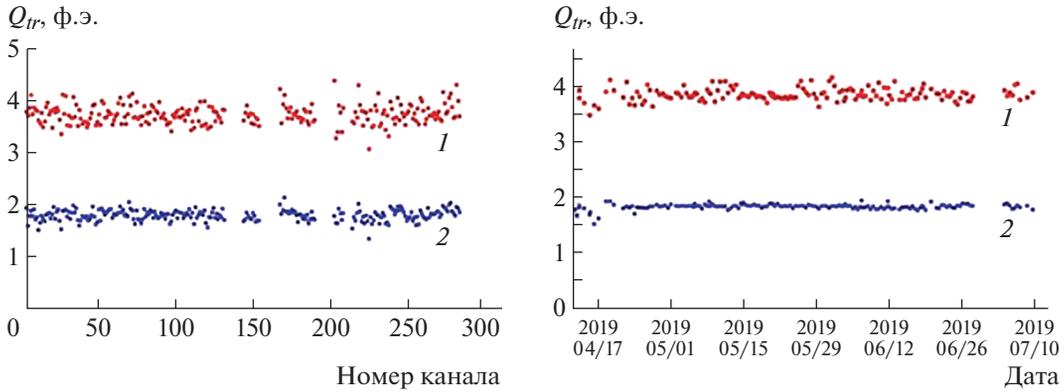


Рис. 7. Значения “высокого” (1) и “низкого” (2) триггерных порогов каналов одного кластера (слева) и пример зависимости порогов для одного канала от времени (справа).

мым сигналом. На рис. 8 представлены примеры градуировок выборочных каналов установки, полученных обоими методами.

### ВРЕМЕННАЯ КАЛИБРОВКА УСТАНОВКИ

Временная калибровка каналов заключается в измерении их относительных временных сдвигов. Величина сдвигов каналов обусловлена в основном двумя факторами: задержками сигналов в кабелях и задержкой импульсов в ф.э.у. Кабельные задержки измеряются в лаборатории и не меняются во времени. Задержки импульсов в ф.э.у. зависят от высоковольтного напряжения на его делителе, обеспечивающего оптимальную величину коэффициента усиления  $10^7$ , и требуют постоянного контроля в процессе работы установки. На рис. 9 приведена зависимость задержек каналов от напряжения на ф.э.у. Для одинаковых значений высоковольтного напряжения разброс временных задержек, как правило, не превышает 5 нс.

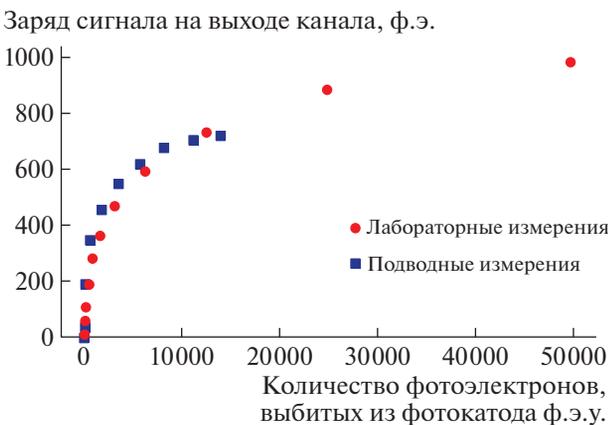


Рис. 8. Примеры зарядовых градуировочных кривых каналов, измеренных в лаборатории и под водой.

Применяются два метода временной калибровки каналов [9]. Первый метод основан на прямом измерении задержек ф.э.у. Для этого контроллер о.м. формирует специальный тестовый импульс, синхронизированный с запуском светодиода. Этот импульс подается на выход усилителя сигналов ф.э.у. Разница времен  $dT_{TST}$  между сигналом с ф.э.у., сгенерированным светодиодом, и тестовым импульсом позволяет определить задержку ф.э.у. Для того чтобы избежать наложения импульсов, сигнал запуска светодиода задержан на  $\sim 500$  нс относительно тестового импульса.

Для второго метода временной калибровки используются вспышки светодиодов о.м., регистрируемые двумя ф.э.у. каналов секции. При известном расстоянии между соседними о.м. на гирлянде 15 м и скорости света в воде 0.218 м/нс ожидаемая задержка между сигналами соседних каналов гирлянды составит  $dt_0 = 68.7$  нс. Относительный временной сдвиг пары каналов определяется как раз-

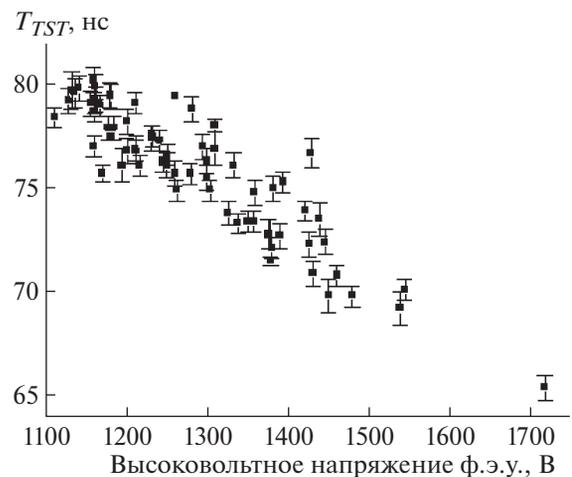
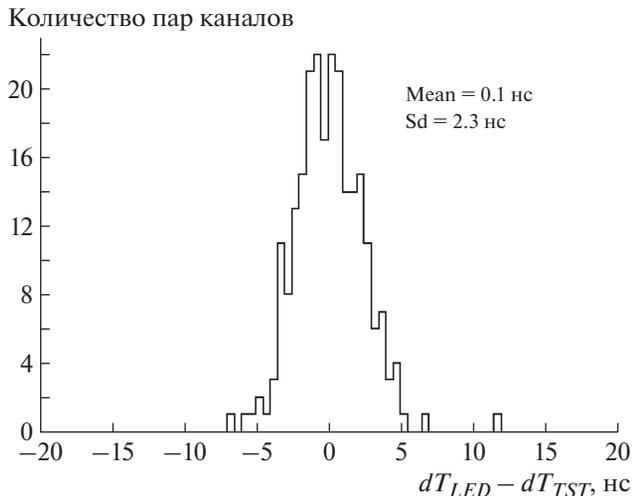


Рис. 9. Временные задержки каналов в зависимости от напряжения на делителе ф.э.у.



**Рис. 10.** Распределение по разности  $dT_{LED} - dT_{TST}$  между временными сдвигами каналов, полученными двумя альтернативными методами: при помощи светодиодной калибровки и с использованием тестового импульса.

ность между ожидаемой  $dt_0$  и измеренной  $dt$  временными задержками сигналов:  $dT_{LED} = dt - dt_0$ .

В байкальском эксперименте обработка и анализ данных осуществляются в единой программной среде BARS (Baikal Analysis and Reconstruction Software). В BARS реализованы современные математические и программные средства для обработки больших массивов экспериментальных данных для крупномасштабных физических установок [10]. Разработка приложений к системе BARS ведется с учетом максимально возможной автоматизации и ускорения процессов анализа и обработки данных нейтринного телескопа Baikal-GVD.

На основе описанных выше методов были разработаны и включены в среду BARS автоматизированные процедуры для калибровки о.м. в режиме их функционирования под водой. Процедуры включают в себя подавление шумовых импульсов, выделение тестовых сигналов и сигналов от светодиодов из временной дорожки а.ц.п., формирование и анализ распределений по разности между этими сигналами. На последнем этапе полученные распределения аппроксимируются распределениями Гаусса, положения максимумов которых определяют величины временных калибровочных коэффициентов каналов.

С 2019 г. описанный алгоритм применяется для проведения временной калибровки в автоматическом режиме, что позволяет значительно уменьшить длительность процесса калибровки.

Для оценки точности временной калибровки были сопоставлены результаты, полученные двумя альтернативными методами. На рис. 10 показано распределение пар каналов, принадлежащих

одной гирлянде, по разности  $dT_{LED} - dT_{TST}$ . Различие между временными сдвигами, измеренными альтернативными методами, составляет  $\sim 2$  нс. Это значение дает верхнюю оценку точности временной калибровки каналов.

Представленные методы временной калибровки реализуются при помощи светодиодных источников, размещенных внутри о.м. Светодиоды о.м. ориентированы в вертикальном направлении ( $\sim 15^\circ$ ) их излучения свет от них не регистрируется фотодетекторами соседних гирлянд. Поэтому для определения временных сдвигов между каналами секций, расположенных на разных гирляндах, использовались матрицы светодиодов, размещенные в отдельных глубоководных корпусах. Для определения координат светодиодной матрицы и о.м. используются данные, полученные при помощи акустической системы позиционирования. Относительные временные сдвиги секций определяются как разность между ожидаемыми  $dT_0$  и измеренными  $dT$  временными задержками между сигналами, зарегистрированными на каналах, расположенных в разных секциях.

Рис. 11 иллюстрирует методику определения временных сдвигов на примере верхних секций 2-й и 8-й гирлянд. Для калибровки использовался один канал 8-й гирлянды (№ 282) и 6 каналов 2-й гирлянды, регистрирующих прямой свет от матрицы светодиодов.

На рис. 11 (слева) представлены измеренные временные задержки между каналами  $T_i - T_{282}$  и рассчитанные на основании известного положения источника света и о.м.  $(T_i - T_{282})_0$ . На графике, расположенном в правой части рисунка, представлена разность между ожидаемыми и измеренными задержками каналов. Минимальное отклонение расчетных задержек от измеренных получается при временном сдвиге между гирляндами 379 нс (среднеквадратичное отклонение 1 нс). Для определения задержки использовались только сигналы с расположенных выше матрицы о.м. верхней половины секции (каналы 67–72).

Учитывая, что о.м. смотрят вниз, использование каналов, расположенных ниже матрицы, ведет к значительному снижению доли прямого света, увеличению дисперсии распределения времен регистрации и дополнительной задержке фотонов за счет рассеяния света в воде. Это в свою очередь приводит к систематическому смещению оценки среднего времени регистрации, нелинейно зависящему от расстояния до источника (см. рис. 11, справа).

Величина временного сдвига 379 нс согласуется с разницей в длинах кабелей, которые используются для подсоединения гирлянд к центру кластера. Следует также отметить, что при определении временных сдвигов между гирляндами использова-

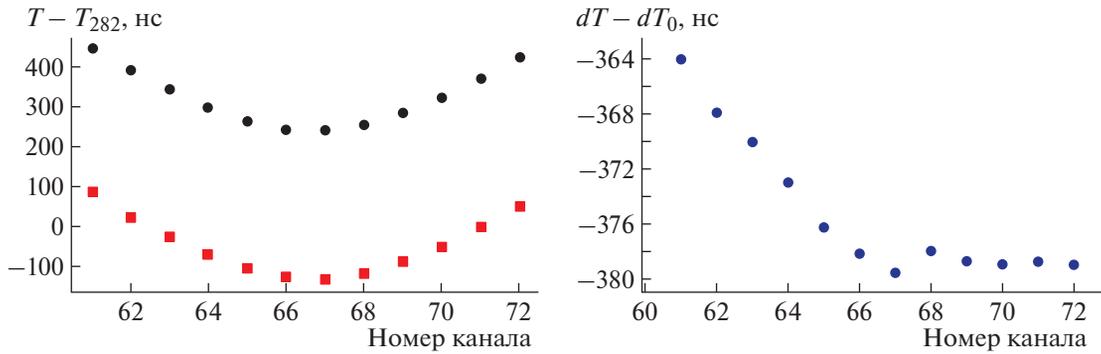


Рис. 11. Измеренные (точки) и рассчитанные (квадраты) временные задержки между каналами, расположенными на разных гирляндах (слева); величина временного сдвига между секциями, измеренная по разным парам каналов (справа).

лись результаты временной калибровки каналов в гирляндах. Таким образом, полученная оценка точности определения временных сдвигов включает в себя ошибки временной калибровки межканальных сдвигов гирлянд.

Важным фактором, влияющим на точность измерения времени регистрации каналов, является зависимость этого параметра от амплитуды сигнала. Эта зависимость обусловлена тем, что в “области насыщения” канала ( $\sim 100$  ф.э. и выше) меняются характеристики фронта сигнала, в то время как временная отметка вычисляется на половине высоты импульса. На поведение амплитудно-временных зависимостей оказывают также влияние характеристики кабеля, по которому передаются сигналы от о.м. на входы а.д.п. Это, в частности, определяет необходимость измерения данной характеристики не только в лаборатории, но и в составе реальной установки.

Для определения зависимости временных сдвигов каналов от амплитуды сигнала были измерены заряд и время регистрации сигнала от светодиода, который находится внутри о.м., при различных интенсивностях засветки. На рис. 12 представлены амплитудные зависимости временных сдвигов для двух каналов, измеренные в лаборатории и в натуральных условиях. Зависимости, измеренные под водой и в лаборатории, совпадают по форме, но могут отличаться по величине эффекта для разных каналов.

Величина амплитудного эффекта вычислялась как разность между максимальным и минимальным временными сдвигами каналов и составила  $\sim 4$  нс. После введения соответствующих поправок на основании данных измерения амплитудной зависимости временных сдвигов величина амплитудного эффекта была снижена до  $\sim 2$  нс. Следует отметить, что в области линейности каналов (менее 100 ф.э.), которая соответствует подавляющему числу регистрируемых сигналов, амплитудный эффект не превышает 1 нс и не оказывает су-

щественного влияния на точность восстановления траекторий частиц.

### КОМПЛЕКСНАЯ ПРОВЕРКА КАЛИБРОВОЧНЫХ СИСТЕМ

Для комплексной проверки установки во всех режимах ее функционирования использовались два лазерных калибровочных источника света. Они позволили проверить корректность калибровочных процедур, работу гидроакустической системы позиционирования, методику реконструкции событий, регистрируемых нейтринным телескопом. Лазерные источники света были установлены на отдельных буйковых станциях на глубине расположения центральных модулей нижних секций гирлянд и снабжены изотропными рассеивателями света.

Лазерная вспышка надежно регистрировалась всеми каналами нижних и средних секций гирлянд соответствующих кластеров. Это позволило использовать лазер как альтернативный калибровочный источник и проводить калибровку как внутри секций, так и между гирляндами. Разность временных сдвигов, полученных при помо-

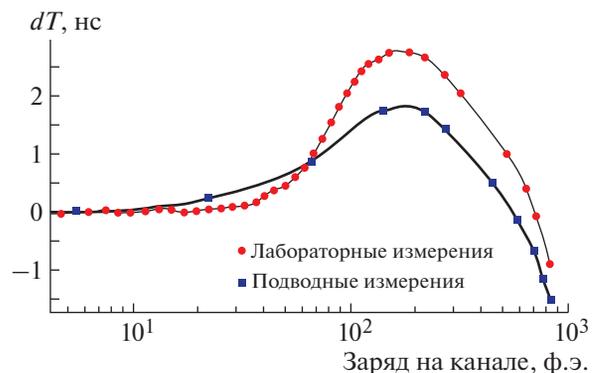
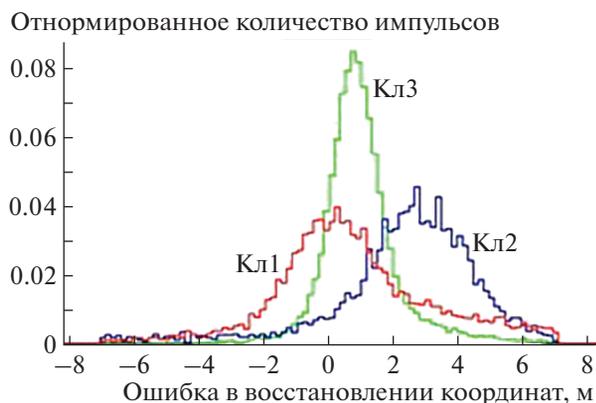


Рис. 12. Примеры амплитудных зависимостей временных сдвигов для двух каналов, измеренных в лаборатории и под водой.



**Рис. 13.** Распределение расстояний между положениями лазерного источника, восстановленными по данным гидроакустической системы позиционирования и по временам регистрации света от источника, по данным с трех разных кластеров.

щи лазерного источника и при помощи светодиодов, составила в среднем 2 нс.

Лазерный источник является квазиточечным, импульсным источником света, близким по своим характеристикам к ливням высоких энергий, регистрируемым нейтринным телескопом. Процедура восстановления координат ливней высоких энергий, используемая при анализе данных Baikal-GVD, основана на анализе временной информации о.м., регистрирующих черенковское излучение ливней.

Применяя аналогичную процедуру для восстановления положения лазерного источника и проводя сравнение с данными акустической системы позиционирования, можно оценить эффективность временной калибровки измерительных систем кластеров телескопа. Восстановление координат лазера проводилось независимо на каждом кластере.

На рис. 13 представлены распределения относительного смещения координат лазерного источника, полученные по данным нейтринного телескопа и акустической системы позиционирования. Ошибка в определении координат (по медианному значению) не превышает 3 м. Такая точность достаточна для задачи восстановления координат ливней высоких энергий, что позволяет использовать полученные результаты калибровок для анализа данных телескопа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проект Baikal-GVD направлен на создание глубоководного нейтринного телескопа масштаба кубического километра в озере Байкал. Набор экспериментальных данных на телескопе осуществляется с 2015 г. в режиме постоянной экспозиции одновременно с наращиванием детектора.

Одной из ключевых задач обработки и анализа данных является калибровка измерительных каналов установки. В рамках решения этой задачи были разработаны методы калибровки в режиме штатного функционирования измерительных каналов установки.

Были разработаны и включены в процесс автоматической обработки данных программные алгоритмы измерения амплитудных и временных калибровочных коэффициентов, калибровки триггерных порогов и мониторинга шумовых характеристик каналов. С учетом коррекции амплитудного эффекта точность временной калибровки составила  $\sim 2$  нс в диапазоне зарядов сигналов от 1 до  $10^3$  ф.э., что обеспечивает точность реконструкции направления треков лучше  $1^\circ$ . Разработанная методика амплитудной калибровки каналов обеспечивает возможность измерения энерговыделения в рабочем объеме детектора в диапазоне энергий регистрируемых частиц  $10^{11}$ – $10^{17}$  эВ. Анализ калибровочных данных, накопленных более чем за четыре года экспозиции телескопа, позволяет контролировать стабильность работы ф.э.у. и спектрометрических каналов детектора в целом.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 20-02-00400, грант 19-29-11029) и при поддержке гранта для молодых ученых ОИЯИ (20-202-09).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. BAIKAL collaboration. Baikal-GVD: Gigaton Volume Detector in Lake Baikal (Scientific-Technical Report). М.: ИЯИ, 2011. <https://baikalgvd.jinr.ru>
2. Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Bannash R., Belolapnikov I.A., Brudanin V.B., Budnev N.M., Doroshenko A.A., Domogatsky G.V., Dvornickiy R., Dyachok A.N., Dzhiilkibaev Zh.-A.M., Fajt L., Fialkovsky S.V., Gafarov A.R. et al. // EPJ Web of Conferences. 2019. V. 207. P. 01003. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201920701003>
3. Аврорин А.В., Аврорин А.Д., Айнутдинов В.М., Баннаш Р., Белолапников И.А., Бруданин В.Б., Буднев Н.М., Гафаров А.Р., Голубков К.В., Гресь Т.И., Джиликибаев Ж.-А.М., Домогацкий Г.В., Дорошенко А.А., Дьячок А.Н., Дворницкий Р. и др. // Вестник РАН. Физика. 2019. Т. 83. № 8. С. 1016. <https://doi.org/10.1134/S0367676519080052>
4. Аврорин А.В., Айнутдинов В.М., Баннаш Р., Белолапников И.А., Богородский Д.Ю., Бруданин В.Б., Буднев Н.М., Гапоненко О.Н., Гафаров А.Р., Голубков К.В., Гресь Т.И., Данильченко И.А., Джиликибаев Ж.-А.М., Добрынин В.И., Домогацкий Г.В. и др. // ПТЭ. 2013. № 4. С. 87. <https://doi.org/10.7868/S0032816213040034>
5. Аврорин А.В., Аврорин А.Д., Аврорин А.Д., Айнутдинов В.М., Bannasch R., Белолапников И.А., Богород-

- ский Д.Ю., Бруданин В.Б., Буднев Н.М., Гафаров А.Р., Гапоненко О.Н., Голубков К.В., Гресс Т.И., Данильченко И.А., Джилкибаев Ж.А.М. и др. // ПТЭ. 2014. № 3. С. 28.  
<https://doi.org/10.7868/S0032816214030045>
6. Kapustinsky S.J., DeVries M.R., DiGiacomo J.N., Sondheim W.E., Sunier J.W., Coombes H. // Nucl. Instrum. and Methods. A. 1985. Т. 241. P. 612.  
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(85\)90622-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(85)90622-9)
  7. Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Bannash R., Belolapnikov I.A., Brudanin V.B., Budnev N.M., Doroshenko A.A., Domogatsky G.V., Dvornický R., Dyachok A.N., Dzhilkibaev Zh.-A.M., Fajt L., Fialkovsky S.V., Gafarov A.R. et al. // EPJ Web of Conferences 2019. V. 207. P. 09002.  
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201920901015>
  8. Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Bannash R., Belolapnikov I.A., Brudanin V.B., Budnev N.M., Doroshenko A.A., Domogatsky G.V., Dvornický R., Dyachok A.N., Dzhilkibaev Zh.-A.M., Fajt L., Fialkovsky S.V., Gafarov A.R. et al. // Proceedings of Science PoS(ICRC2019)877.  
<https://doi.org/10.22323/1.358.0874>
  9. Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Bannash R., Belolapnikov I.A., Brudanin V.B., Budnev N.M., Doroshenko A.A., Domogatsky G.V., Dvornický R., Dyachok A.N., Dzhilkibaev Zh.-A.M., Fajt L., Fialkovsky S.V., Gafarov A.R. et al. // EPJ Web of Conferences 2019. V. 207. P. 07003.  
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201920707003>
  10. Shaybonov B.A., Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Bannash R., Belolapnikov I.A., Brudanin V.B., Budnev N.M., Danilchenko I.A., Domogatsky G.V., Doroshenko A.A., Dvornický R., Dyachok A.N., Dzhilkibaev Zh.-A.M., Fajt L. et al. // Proceedings of Science PoS(ICRC2017)1046.  
<https://pos.sissa.it/301/1046/pdf>