

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.123

ЛАЗЕРНАЯ КАЛИБРОВОЧНАЯ СИСТЕМА
НЕЙТРИННОГО ТЕЛЕСКОПА ВАКАЛ-GVD

©2024 г. А. В. Аврорин^а, А. Д. Аврорин^а, В. М. Айнутдинов^{а,*},
В. А. Аллахвердян^б, З. Бардачова^{с,д}, И. А. Белолоптиков^б, Е. А. Бондарев^а,
И. В. Борина^б, Н. М. Буднев^е, А. Р. Гафаров^е, К. В. Голубков^а,
Н. С. Горшков^б, Т. И. Гресь^е, Р. Дворниcki^с, Ж.-А. М. Джилкибаев^а,
В. Я. Дик^{б,ф}, Г. В. Домогацкий^а, А. А. Дорошенко^а, А. Н. Дячок^е,
Т. В. Елжов^б, Д. Н. Заборов^а, С. И. Завьялов^б, Д. Ю. Звездов^б, В. К. Кебкал^к,
К. Г. Кебкал^к, В. А. Кожин^г, М. М. Колбин^б, С. О. Колигаев^л,
К. В. Конищев^б, А. В. Коробченко^б, А. П. Кошечкин^а, М. В. Круглов^б,
В. Ф. Кулепов^н, Ю. Е. Лемешев^е, А. И. Мошкунов^м, М. Б. Миленин^а,
Р. Р. Миргазов^е, Д. В. Наумов^б, А. С. Николаев^г, Д. П. Петухов^а,
Е. Н. Плисковский^б, М. И. Розанов^и, Е. В. Рябов^е, Г. Б. Сафронов^а,
Д. Сеитова^{б,ф}, А. Э. Сиренко^б, А. В. Скурихин^г, А. Г. Соловьев^б,
М. Н. Сороковиков^б, А. П. Стромаков^а, О. В. Суворова^а, В. А. Таболенко^е,
Б. Б. Ульзутуев^б, Л. Файт^д, В. Н. Фомин, И. В. Харук^а, Е. В. Храмов^б,
В. А. Чадымов, А. С. Чепурнов^г, Б. А. Шайбонов^б, А. А. Шестаков^а,
С. Д. Шилкин^а, Ф. Шимковиц^{с,д}, Ю. А. Шипилов^н, Е. В. Широков^г, И.
Штекл^д, Э. Эцкерова^{с,д}, Ю. В. Яблокова^б

^а Институт ядерных исследований Российской академии наук,
Россия, 117312, Москва, 117312, пр. 60-летия Октября, 7а

^б Объединенный институт ядерных исследований,
Россия, 141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

^с Университет им. Я. А. Коменского в Братиславе
Словакия, 81499, Братислава-1, Шафарикова площадь, 6

- ^d Чешский технический университет в Праге,
Чешская Республика, 16000, Прага 6 - Дейвице, ул. Югославских партизан, 1580/3
- ^e Иркутский государственный университет,
Россия, 664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1
- ^f Институт ядерной физики,
Казахстан, 050032, г. Алматы, ул. Ибрагимова, 1
- ^g Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1
- ^h Нижегородский государственный технический университет,
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
- ⁱ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
Россия, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская улица, 3
- ^k Лаборатория гидроакустической телеметрии и навигации (ЛАТЕНА)
Россия, 199106, Санкт-Петербург, ул. Детская, 5
- ^l Лаборатория прикладных информационных технологий “Инфрад”
Россия, 141983, Дубна, Московская обл., ул. Программистов, 4
- ^m Научно-производственный центр “ЭЛС-94”,
Россия, 123001, Москва, Трехпрудный пер., 11/13, с. 2
- ⁿ ООО “Алекс Лаб СТ”,
Россия, 121087, Москва, Филевский парк, Береговой пр., 2, с.3
- *e-mail: aynutdin@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.02.2024 г.

После доработки 05.04.2024 г.

Принята к публикации 09.05.2024 г.

Нейтринный телескоп Baikal-GVD находится в озере Байкал в стадии развертывания. Принцип его работы — регистрация черенковского излучения от продуктов взаимодействия нейтрино в водной среде озера трехмерным массивом фотодетекторов. Для калибровки и измерения характеристик регистрирующей системы телескопа используются лазерные источники света, специально разработанные для байкальского проекта. В статье описывается конструкция калибровочных лазерных источников, а также особенности функционирования таких источников, представлены результаты их эксплуатации в составе установки, обсуждаются вопросы дальнейшего развития лазерной калибровочной системы Baikal-GVD.

~~Ключевые слова:~~ нейтрино, нейтринные телескопы, лазерная система калибровки, Байкал.

1. ВВЕДЕНИЕ

Глубоководные нейтринные телескопы предназначены для исследований высокоэнергичных процессов в астрофизических объектах при помощи нейтрино высоких энергий. Принцип работы нейтринных телескопов основан на регистрации черенковского излучения вторичных мюонов и каскадных ливней, которые образуются в нейтринных взаимодействиях при использовании пространственной решетки фотодетекторов (оптических модулей). Мишень для нейтрино — прозрачная природная среда (вода или лед), что позволяет создавать детекторы масштаба нескольких кубических километров. В глубоководном нейтринном телескопе Baikal-GVD, развертывание которого осуществляется в южной части озера Байкал с 2016 года [1], используется именно эта методика регистрации нейтрино высоких энергий. В конфигурации 2023 года телескоп состоит из 3456 оптических модулей [2]. Оптические модули размещаются на гирляндах, которые крепятся к якорям на дне озера. Гирлянды сгруппированы в 12 кластеров. Кластер включает в себя восемь гирлянд: одна находится в центре (центральная гирлянда), остальные семь равномерно распределены по окружности радиусом 60 метров. На каждой гирлянде 36 оптических модулей, они размещены на глубинах от 750 до 1275 метров с шагом 15 метров. Расстояние между кластерами, установленными до 2022 года, составляет 300 метров. В 2022 году это расстояние было уменьшено до 250 м.

Калибровка установки в условиях значительных расстояний между фотодетекторами требует использования мощных источников света, распределенных в рабочем объеме телескопа. Данная статья посвящена калибровочной системе телескопа Baikal-GVD, созданной на основе лазерных источников, – лазерной калибровочной системе (ЛКС). В работе представлены технические аспекты создания специализированного лазерного источника света, методика оптимизации такого источника для решения задач калибровки, методика измерения характеристик фотодетекторов и водной среды озера, а также особенности подключения ЛКС к системе сбора данных телескопа и результаты исследований работы ЛКС в составе установки.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЛКС

Требования, предъявляемые к ЛКС, определяются и задачами, на решение которых ориентирована система, и конфигурацией регистрирующей системы телескопа, и свойствами водной среды озера. Основной задачей ЛКС является временная калибровка установки, целью которой является измерение временных сдвижек между каналами. Система временной калибровки Baikal-GVD базируется на двух типах калибровочных источников света: светодиодных и лазерных. Светодиодные источники обеспечивают временную калибровку

каналов, расположенных на расстояниях менее 90 м от источников света [3], т.е. в пределах одного кластера. Для относительной временной калибровки каналов разных кластеров (межкластерной калибровки) необходимы источники существенно большей мощности. В качестве таких источников используются лазеры. Они монтируются на несущих кабель-тросах, закрепленных на дне озера при помощи якорей. Лазерные станции представляют собой сложные дорогостоящие инженерные сооружения, что требует минимизации их количества в составе детектора. С этой точки зрения, оптимальное место размещения лазерной станции – геометрический центр трех кластеров (см. рис. 1): расстояние от лазера до ближайших гирлянд соседних кластеров составляет около 110 м (для расстояния между кластерами 300 м). Таким образом, для решения задачи временной калибровки кластеров лазерный источник должен засвечивать оптические модули, находящиеся от него на расстоянии 110–120 м.

Рис. 1. Лазерная станция, расположенная в геометрическом центре трех кластеров.

В то же время существует ряд задач, которые требуют источника света большей мощности: измерение чувствительности фотодетекторов, мониторинг характеристик водной среды озера, эмуляция квазиточечных источников света (каскадных ливней) для исследования точности восстановления положения и энергии источника. В случае использования ЛКС для измерения чувствительности фотодетекторов лазерный источник должен засвечивать все оптические модули окружающих его кластеров на расстоянии до примерно 350 м. Аналогичная мощность необходима и для измерения длины ослабления света в байкальской воде. Для решения этой задачи лазерные источники должны быть оснащены системой управляемых аттенуаторов с диапазоном ослабления около 10^3 , что связано с ограниченным диапазоном линейности каналов установки ($\sim 10^2$ фотоэлектронов). Наличие аттенуаторов позволяет также калибровать измерительные каналы в области их нелинейной амплитудной характеристики.

Длина волны калибровочного источника должна быть максимально приближена к длине волны, на которую приходится максимум излучения, генерируемого заряженными частицами в воде, с учетом окна прозрачности воды озера. С точки зрения угловых характеристик, лазерный источник должен излучать в широком диапазоне зенитных углов (для засветки всех оптических модулей ближайших к источнику гирлянд кластера) и иметь высокий уровень азимутальной однородности.

3. ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК СВЕТА

Основным элементом ЛКС являются лазерные источники света, специально разработанные для Байкальского нейтринного телескопа. Источники света представляют собой импульсные твердотельные лазеры $YAG:Nd^{3+}$ с пассивной модуляцией добротности и

нелинейным преобразованием выходного излучения во вторую гармонику. Состав и взаимосвязь основных узлов лазера представлены на рис. 2.

Рис. 2. Блок-схема лазерного источника света

В качестве источника накачки лазера используется линейка лазерных диодов с оптоволоконным выводом. Мощность излучения составляет 90 Вт при длине волны 808 нм. Диаметр оптического волокна, по которому передается излучение, составляет 400 мкм. Для фокусировки излучения накачки используется асферическая линза с эффективным фокусным расстоянием 6.24 мм. Лазер состоит из неюстируемого глухого зеркала, через которое осуществляется накачка, цилиндрического активного элемента YAG:Nd^{3+} размером $5 \times 8 \text{ мм}^2$, брюстеровской пластины и пассивного затвора. Диаметр активного элемента был выбран значительно большим, чем диаметр моды резонатора, для уменьшения неоднородности распределения тепловых потоков внутри активного элемента. Непосредственно за активным элементом установлена брюстеровская пластина и пассивный затвор YAG:Cr^{4+} с начальным пропусканием 12%. Для уменьшения длины резонатора (20 мм) отражающий слой с коэффициентом отражения 25% был нанесен непосредственно на затвор. Пассивный затвор, являющийся также и выходным зеркалом, закрепляется на металлической оправе с помощью прижимной гайки, которая при сборке притирается к корпусу лазера и в дальнейшем не юстируется.

Генерируемый лазером субнаносекундный импульс излучения с длиной волны 1064 нм преобразуется в нелинейном кристалле КТР (калий-титанил-фосфат) в видимое излучение с длиной волны 532 нм. Эффективность преобразования излучения во вторую гармонику может меняться из-за зависимости показателя преломления нелинейного кристалла от температуры. Для предотвращения этого кристалл КТР устанавливается на термостате. Эффективность преобразования во вторую гармонику составляет 65%, что обеспечивает выходную энергию импульса на длине волны 532 нм на уровне 400–700 мкДж.

За кристаллом КТР располагается отводная пластина, которая отражает незначительную часть излучения на фотоприемник (датчик излучения). Фотоприемник используется для измерения энергии выходного импульса и мониторинга стабильности работы лазерного источника света. Кроме того, фотоприемник используется для ограничения сигнала накачки после высвечивания импульса лазера, что снижает тепловую нагрузку на кристалл и повышает стабильность его работы. После двух поворотных зеркал, предназначенных для юстировки лазерного пучка в двух плоскостях, пучок излучения расширяется двухлинзовым телескопом до размера около 8 мм. Основная часть излучения проходит через фазовую пластину, придающую излучению круговую поляризацию, далее – через управляемый аттенуатор, где ослабляется до требуемой энергии импульса, после этого – через рассеивающую линзу и световод.

Аттенюатор представляет собой вращающийся диск с шестью отверстиями, в которые вклеены нейтральные светофильтры с различной оптической плотностью (первое отверстие не имеет светофильтра). Диск закреплен на валу шагового двигателя. Энергия лазерного излучения изменяется путем поворота диска и совмещения оси излучения с отверстиями, оснащенными различными светофильтрами. Значения коэффициентов пропускания: 35%, 12%, 5%, 1% и 0.1% для пяти светофильтров соответственно. Элементы, управляющие работой аттенюатора, процессом накачки лазера и температурой термостата кристалла КТР, размещаются на отдельной плате электроники. В ее функции также входит сбор данных с датчиков, встроенных в лазерный источник света: датчиков давления, температуры, влажности и пространственной ориентации (компаса и акселерометра). Внешнее управление лазером осуществляется через двухпроводный интерфейс RS-485. Основные технические характеристики лазера представлены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики лазерного источника излучения

Длина волны лазерного излучения	532 нм
Энергия импульса лазерного излучения	≥ 370 мкДж
Длительность импульса лазерного излучения (0,5 мощности)	≤ 1 нс
Размер пучка лазерного излучения на торце световода	20 ± 3 мм
Число уровней ослабления	5
Градация ослабления от уровня к уровню, %	35, 12, 5, 1, 0.1
Интерфейс внешнего управления	RS-485
Входное напряжение	9 ... 36 В
Потребляемая мощность, пиковое значение	30 Вт

Программное обеспечение лазера позволяет устанавливать определенные режимы работы (количество импульсов, коэффициент ослабления мощности излучения) и контролировать рабочие параметры (мощность пучка, температуру, давление и влажность внутри глубоководного корпуса). Конструкция лазера представлена на рис. 3. Она была разработана с учетом требований минимизации размеров лазерного источника в целях уменьшения габаритов и массы глубоководного корпуса, жесткой фиксации его оптической системы, устойчивости к вибрациям во время транспортировки, а также удобства юстировки лазерного пучка.

Рис. 3. Конструкция лазерного источника света

Все компоненты лазера размещаются на металлической плите (шасси), к которой крепятся элементы оптической системы, передний глубоководный фланец со световодом и электрическим разъемом, световод и задний внутренний фланец. Блок электропитания и плата

управления размещаются на вертикальном шасси. Поскольку транспортировка лазера осуществляется без глубоководного корпуса, все системы лазера размещаются внутри защитного кожуха.

4. ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОВОГО ПОЛЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для решения задач калибровки пространственно-распределенных фотодетекторов нейтринного телескопа пучок излучения лазерного источника должен быть преобразован таким образом, чтобы свет от него попадал на максимальное количество оптических модулей ближайших к нему кластеров телескопа. Основными требованиями к излучателю светового потока являются минимальное ослабление светового импульса лазерного источника, максимальный охват рабочего объема телескопа и однородность распределения интенсивности по азимутальному углу. Азимутальная симметрия потока лазерного излучения позволяет избежать влияния поворотов лазера вокруг буйрепа (троса, которым буй соединен с якорем) на результаты калибровки каналов телескопа. Кроме того, требуется высокая временная стабильность характеристик излучателя света, предполагающая долговечность используемых материалов, неизменность их оптических свойств в водной среде и отсутствие деградации в условиях световой нагрузки. Также важным фактором является неизменность оптических свойств излучателя в условиях постепенного накопления непрозрачных осадков, образующихся в глубинных слоях озера Байкал на поверхностях с малым углом наклона по отношению к вертикали.

Для лазера, размещенного в вертикальном положении на уровне половины высоты гирлянды оптических модулей, для полного охвата рабочего объема ближайшего кластера излучатель должен формировать поток света в диапазоне зенитных углов от 20° до 160° (зенитный угол отсчитывается от оси, направленной по лазерному пучку). Были проведены исследования двух типов излучателей: сферического и конусного (см. рис. 4). Сферический излучатель (радиус сферы 33 мм) был изготовлен из монолитного поликарбоната с примесью рассеивающего агента – микрошариков из поликарбоната с увеличенным коэффициентом преломления. На верхнюю полусферу излучателя устанавливалось конусное зеркало из полированной нержавеющей стали диаметром 60 мм, которое крепилось винтом в резьбовое отверстие на полюсе. Излучатель устанавливался на кварцевый стержень (световод) с помощью разрезной муфты из полиоксиметилена (ПОМ) черного цвета, которая изолировала выход света из цилиндрической части лампы. Конусный излучатель представлял собой конструкцию цилиндрической формы с диффузным конусным отражателем из фторопласта, размещенным в торце цилиндра. Цилиндр был выполнен из поликарбоната с примесью рассеивающего агента. В качестве варьируемых параметров, позволяющих влиять на угловую

характеристику излучателя, в данной конструкции можно рассматривать не только концентрацию примеси рассеивающего агента, но и длину цилиндра, угол раствора конуса отражателя и оптические свойства его поверхности.

Рис. 4. Схема стенда для исследования угловых характеристик излучателей

Для исследования характеристик излучателей они размещались в водном баке с прозрачной стенкой на регулируемом кронштейне, связанном с шаговым электроприводом. Электропривод обеспечивал вращение излучателя вокруг вертикальной оси (см. рис. 4). Оптический импульс лазерного источника света вводился в излучатель через гибкий полимерный световод длиной около 10 метров (диаметр оптоволоконного кабеля 1 мм), кварцевый стержень и коллиматор из черного ПОМ для формирования светового пучка. Угловые характеристики излучателя измерялись при помощи фотоэлектронного умножителя Hamamatsu R-7081, который был установлен в трех метрах от излучателя.

Примеры угловых характеристик (зависимости заряда Q сигнала фотоэлектронного умножителя, инициированного лазерной вспышкой, от угла поворота излучателя), измеренных для сферического и конусного излучателей, представлены на рис. 5. В диапазоне углов от 20° до 160° световой поток, формируемый коническим излучателем, превышает поток от сферического излучателя примерно в пять раз. При очевидном преимуществе конического излучателя перед сферическим в величине светового потока первый не лишен некоторых недостатков. Основным из них является необходимость прецизионной юстировки положения светового пятна от лазерного источника по отношению к вершине отражающего конуса для обеспечения азимутальной симметрии потока излучения.

Рис. 5. Угловые характеристики сферического (кружки) и конусного (треугольники) излучателей

Для юстировки лазерного пучка был изготовлен специализированный стенд (см. рис. 6). Юстировка проводилась в двух ортогональных плоскостях при помощи двух регулируемых зеркал, входящих в состав лазерного источника света. Для визуализации формы и профиля пучка лазерного излучения использовалась камера "Gentec-EO Beamage-4M". Камера не только показывает форму пучка лазерного излучения, но и позволяет измерять его параметры (эллиптичность и диаметр) по заданному уровню энергии лазерного излучения. Схема оптических элементов, обеспечивающих перенос изображения со световода лазера на приемную матрицу камеры, показана в левой части рис. 6. В правой части рисунка приведены примеры изображения пучка на срезе световода до и после юстировки.

Рис. 6. Схема стенда для юстировки лазера

5. КОНФИГУРАЦИЯ ЛКС УСТАНОВКИ ВАИКАЛ-GVD

Начало развертывания ЛКС установки Baikal-GVD относится к 2017 году, к моменту ввода в эксплуатацию второго кластера. Сейчас в состав ЛКС входит 7 лазерных станций (ЛС), обеспечивающих калибровку всех двенадцати кластеров телескопа. Размещение ЛС относительно кластеров показано на рис. 7. Состав и основные характеристики ЛС представлены в табл. 2.

Таблица 2. Состав и характеристики лазерных станций

Номер станции	ЛС ₁	ЛС ₂	ЛС ₃	ЛС ₄	ЛС ₅	ЛС ₆	ЛС ₇
К-во лазеров	1	2	2	3	1	1	1
Номер кластера	3	4	7	10	9	11	12
К-во оптических модулей	0	0	0	0	36	36	36
Тип излучателя*	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>K</i>	<i>K</i>	<i>K</i>	<i>K</i>
Тип канала управления	Eth	Eth	Eth	Eth	Eth	RS-485	RS-485
Напряжение электропитания	300 В	300 В	300 В	300 В	24 В	24 В	24 В

* *C* – сферический излучатель, *K* – конический излучатель.

Рис 7. Лазерные станции (звездочки) в составе Baikal-GVD, установленные гирлянды (кружки) в конфигурации 2023 года (слева). Фотография лазерного источника в глубоководном корпусе перед погружением (справа)

Оборудование ЛС размещается на буйрепе, который крепится к якорю, установленному на дне озера. Вертикальная ориентация буйрепа обеспечивается буйами, расположенными в его верхней части. Буйрепы с размещенным на них оборудованием формируют гирлянды телескопа. Из-за течений озера гирлянды могут значительно отклоняться от вертикали. Для определения положения гирлянды в режиме реального времени используется система позиционирования на основе акустических модемов (АМ), размещенных на гирлянде [4]. Минимальная версия ЛС включает в свой состав лазерный калибровочный источник, не менее двух АМ, и глубоководный модуль, управляющий работой лазера и АМ. Лазерный источник расположен в глубоководном корпусе (см. рис. 7). Лазер, оснащенный излучателем (диффузным рассеивателем), ориентирован в направлении дна озера. С учетом неизотропной угловой характеристики чувствительности оптических модулей, установленных в телескопе фотокатодами вниз, это позволяет частично уравнивать световой поток, регистрируемый оптическими модулями, расположенных ниже и выше горизонта установки лазера. Модуль управления ЛС подключен к системе сбора данных одного из ближайших кластеров (номера соответствующих кластеров для каждой ЛС представлены в табл. 2). Электропитание ЛС (300 В) обеспечивает коммутатор, размещенный в центре управления кластером. Именно такую конфигурацию имеют первые три ЛС, которые от остальных отличаются только количеством

лазеров. В этих ЛС обмен данными между модулем управления, который расположен в непосредственной близости от лазерного источника, и самим лазером осуществлялся по каналу Ethernet (см. табл. 2).

В 2022 году конфигурация Vaikal-GVD была модернизирована: было принято решение устанавливать на ЛС оптические модули. ЛС, оснащенная оптическими модулями, получила название межкластерной гирлянды [5]. Такой подход позволил существенно увеличить эффективность работы телескопа в режиме регистрации каскадов, сгенерированных в нейтринных взаимодействиях. Конфигурация регистрирующей системы межкластерной гирлянды в основном идентична базовым гирляндам кластера. Гирлянда состоит из трех секций (см. рис. 8). В состав каждой секции входит 12 оптических модулей и центральный модуль (ЦМ) управления секцией. Оптические модули подключаются к ЦМ глубоководными кабелями. Управление работой секций, формирование триггера гирлянды и обмен информацией обеспечивает отдельный глубоководный электронный блок – модуль гирлянды (МГ). Межкластерная гирлянда подключается к центру управления кластера аналогично остальным восьми гирляндам. Данные от гирлянды передаются в центр кластера через удлинители Ethernet IEX-402-shDSL и затем транслируются на береговую станцию по оптоволоконной линии связи. В состав межкластерной гирлянды входят также 4 АМ, которые обеспечивают точность позиционирования оптических модулей около 0.3 м. АМ₁ и АМ₂ подключаются к ЦМ₁, АМ₃ и АМ₄ к ЦМ₃.

Рис. 8. Монтажная схема межкластерной гирлянды (лазерной станции)

Лазерный калибровочный источник света размещается на глубине около 270 м от якоря и подключается к ЦМ₂. Смещение лазера от центра гирлянды в направлении дна озера обусловлено тем, что фотокатоды фотоэлектронных умножителей оптических модулей ориентированы в нижнем направлении. Чтобы унифицировать системы управления лазером и АМ, была модернизирована плата управления и электропитания лазера. В частности, интерфейс канала управления лазером Ethernet был заменен на RS-485. Это позволило использовать в ЦМ₂ системы электропитания (24 В) и управления лазером (COM Server с интерфейсом RS-485), полностью идентичные ЦМ₁ и ЦМ₃. ЛС₆ и ЛС₇ собраны в соответствии с представленной схемой и содержат по одному лазеру. В то же время в представленной конфигурации предусмотрена возможность установки на гирлянде до двух лазерных источников света, подключенных к ЦМ₂. Использование интерфейса RS-485, рассчитанного на передачу данных на расстояния более километра, и источника питания лазера с широким диапазоном входных напряжений (от 9 до 36 В) снимают ограничение на выбор месторасположения лазерного источника на гирлянде.

6. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛКС

Первые экспериментальные исследования с использованием лазерного источника света, разработанного и изготовленного в Германии для телескопа HT-200 еще в прошлом веке, были проведены на телескопе Baikal-GVD в 2014 году. Максимальная интенсивность излучения источника составляла около 10^{14} фотонов во вспышке. Использование этого источника для имитации каскадов высокой энергии позволило оптимизировать методику реконструкции каскадных событий в нейтринном телескопе и оценить точность восстановления их пространственных координат и энергии [6]. Успешное применение лазера в этом эксперименте явилось одним из весомых аргументов для создания полномасштабной ЛКС установки Baikal-GVD.

Развитие современной версии ЛКС началось в 2016 году на базе лазерных источников российского производства (ООО “Алекс Лаб СТ”). Более чем семилетний опыт эксплуатации ЛКС показал достаточно высокую эффективность и надежность ее функционирования. Серии лазерных измерений проводились периодически — один-два раза в месяц — на протяжении всего времени работы ЛКС. Значительный временной интервал между лазерными калибровочными сеансами определялся тем, что во время их проведения затруднена регистрация физических событий. Каждый лазерный калибровочный сеанс представляет собой набор автоматизированных измерений, последовательно проводимых на всех лазерах ЛКС. Программное обеспечение ЛКС дает возможность последовательного включения лазерных источников и задает режимы их работы: количество вспышек для каждого лазера, их период и уровень ослабления. В процессе проведения серии записывается информация о мощности каждой лазерной вспышки. В настоящее время для всех лазеров ЛКС проводится от 500 до 2000 измерений для каждого из 6 уровней ослабления с частотой 15 Гц. Продолжительность лазерной серии составляет около 2.5 часов. На рис. 9 проиллюстрирована процедура проведения серии измерений для лазера ЛС₆, подключенного к системе сбора данных кластера 11. Контроль работы лазера осуществляется на основании анализа суммарного заряда, зарегистрированного всеми каналами кластера. Суммарный заряд, измеренный для шести различных уровней мощности лазерных сигналов, показан на рис. 9. Лазерные вспышки хорошо выделяются из фоновых событий, обусловленных свечением воды и атмосферными мюонами.

Рис. 9. Зависимость суммарного заряда сигналов в фотоэлектронах, регистрируемого всеми каналами кластера 11

На основании данных серий лазерных измерений производится временная межкластерная калибровка всех кластеров телескопа. Для определения калибровочных параметров измеренное время регистрации сигналов оптических модулей, инициированных

лазерными вспышками, сопоставляется с ожидаемым. Ожидаемое время регистрации вычисляется на основании информации, получаемой от системы позиционирования телескопа. С учетом неопределенностей, связанных с измерениями положения лазеров и оптических модулей, точность межкластерной калибровки составляет величину около 2 нс. Данные межкластерной калибровки используются для реконструкции событий, регистрация которых осуществляется одновременно несколькими кластерами.

Помимо межкластерной временной калибровки, функцией ЛКС является контроль точности временной синхронизации кластеров [7]. В качестве параметра, характеризующего точность синхронизации, используется величина dt —среднеквадратичный разброс (RMS) разницы времен срабатываний каналов, расположенных на разных кластерах. Примеры распределений событий по величине dt , измеренных при проведении серий лазерных измерений на ЛС5, представлены для кластеров 5, 8 и 9 на рис. 10. Точность временной синхронизации составила 2.1 нс. Эта величина определяется дискретностью времени фиксации триггерных сигналов (5 нс) и хорошо совпадает с ожидаемым значением.

Рис. 10. Распределение событий по разнице времен регистрации сигналов dt каналами кластеров

Задача контроля характеристик измерительных каналов нейтринного телескопа требует от ЛКС необходимости засветки всех фотодетекторов установки. На рис. 11 представлен пример события, инициированного лазером, входящим в состав ЛС₆ на кластере 9. Лазер расположен на расстоянии 270 м от якоря гирлянды. Сработавшие каналы кластера выделены кружками, площадь которых пропорциональна логарифму заряда зарегистрированного сигнала. Градации серого характеризуют время регистрации сигналов.

Лазерная вспышка надежно регистрируется всеми восемью гирляндами кластера. Один лазерный источник обеспечивает засветку более чем 80% каналов ближайших к нему гирлянд кластера и около половины каналов наиболее удаленных от лазера гирлянд (удаление от лазера примерно 145 м и 265 м соответственно). Два лазера, размещенные на разных горизонтах, при таком уровне мощности источника позволят засвечивать практически все каналы кластеров, прилегающих к ЛС.

Рис. 11. Пример события, зарегистрированного кластером 9, при максимальной интенсивности лазерной вспышки.

ЛКС, обеспечивающая засветку всех каналов телескопа, позволяет сформировать комплексную систему контроля измерительной аппаратуры и условий регистрации физических событий в установке Baikal-GVD, включая калибровочные характеристики каналов, чувствительность фотодетекторов, уровень поглощения и рассеяния света в воде. В настоящее время разрабатываются методы измерения указанных выше параметров

аппаратуры и водной среды. В частности, в 2022 году при помощи лазерных источников были проведены предварительные измерения длины ослабления света в воде. Полученные результаты согласуются в пределах 10% с измерениями, выполненными при помощи прибора ВАИКАЛ-5D [8]. Однако различие полученных разными методами результатов превышает ожидаемую статистическую погрешность, что требует проведения дополнительных модельных расчетов и натурных исследований.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках программы развертывания нейтринного телескопа Baikal-GVD была разработана новая система калибровки глубоководной аппаратуры на основе лазерных источников света. В настоящее время в состав лазерных калибровочных станций входит 7 станций, на которых размещены 11 лазерных источников. Лазеры излучают на длине волны 532 нм и оснащены системой управляемых аттенуаторов с шестью уровнями градации ослабления света. Высокая мощность источников (до 10^{15} фотонов на вспышку) и использование специально разработанных рассеивателей света позволяют при помощи двух лазеров, размещенных на одной лазерной станции, засвечивать все фотодетекторы ближайших к ним кластеров. Это обеспечивает возможность измерения ключевых характеристик нейтринного телескопа, таких как чувствительность фотодетекторов и уровень поглощения и рассеяния света в воде. На протяжении семи лет эксплуатации ЛКС показывала высокую надежность работы и обеспечивала выполнение своей основной функции – взаимной временной калибровки кластеров телескопа с наносекундной точностью.

Результаты исследований были получены с использованием материально-технической базы Байкальской нейтринной обсерватории и экспериментальных данных, накопленных глубоководным нейтринным телескопом Baikal-GVD.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baikal-GVD Collaboration: Avrorin A.D. et al. // Nucl. Part. Phys. Proc. 2016. V. 273. P. 314. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.044>*
2. *Baikal-GVD Collaboration: Avrorin A.D. et al. // EPJ Web of Conf. 2016. V. 116. P. 01003. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201611601003>*
3. *Baikal-GVD Collaboration: Avrorin A.D. et al. // EPJ Web of Conf. 2016. V. 116. P. 5004. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201611605004>*

4. *Baikal-GVD Collaboration: Avrorin A.D. et al. // PoS ICRC2019. 2019. V. 358. P. 1012.*
<https://doi.org/10.22323/1.358.1012>.
5. *Baikal-GVD Collaboration: Bardáčová Z. et al. // PoS ICRC2023-987. 2023. V. 444. P. 987.*
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.17069>
6. *Avrorin A.V., Avrorin A.D., Aynutdinov V.M. et al. // Nucl. Part. Phys. Proc. 2016. V. 273. P. 314.* <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.044>
7. *Aynutdinov V., Allakhverdyan V.A., Avrorin A.D. et al. // PoS ICRC2021. 2021. V. 395. P. 1067.* <https://doi.org/10.22323/1.395.1067>
8. *Baikal-GVD Collaboration: Dvornický R. et al. // PoS ICRC2023. 2023. V 444. P. 977.*
<https://doi.org/10.22323/1.444.0977>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Лазерная станция, расположенная в геометрическом центре трех кластеров: в состав станции входит лазер и два акустических модема (АМ) системы позиционирования телескопа.
- Рис. 2.** Блок-схема лазерного источника света.
- Рис. 3.** Конструкция лазерного источника света: 1 – шасси, 2 – пластиковый защитный кожух, 3 – передний глубоководный фланец, 4 – световод, 5 – глубоководный разъем, 6 – вертикальное шасси с закрепленными блоком питания и платой управления, 7 – лазерный излучатель, 8 – поворотные зеркала, 9 – телескоп, 10 – отводная пластина фотоприемника, 11 – фазовая пластина, 12 – управляемый аттенюатор, 13 – рассеивающая линза, 14 – задний внутренний фланец, 15 – оптоволоконно линейки накачки лазерного излучателя.
- Рис. 4.** Схема стенда для исследования угловых характеристик излучателей (слева), фотографии конусного и сферического излучателей (справа).
- Рис. 5.** Угловые характеристики сферического (кружки) и конусного (треугольники) излучателей.
- Рис. 6.** Схема стенда для юстировки лазера (слева): 1 — отводная пластина, 2 — металлическое зеркало, 3 — собирающая линза, 4 — камера, 5 — вспомогательный держатель, 6 — плита из алюминиевого профиля, 7 — лазерный источник, 8 — световод. Примеры изображения пучка на срезе световода до и после юстировки (справа).
- Рис. 7.** Лазерные станции (звездочки) в составе Baikal-GVD, установленные гирлянды (кружки) в конфигурации 2023 года (слева). Фотография лазерного источника в глубоководном корпусе перед погружением (справа).
- Рис. 8.** Монтажная схема межкластерной гирлянды (лазерной станции).
- Рис. 9.** Зависимость суммарного заряда сигналов в фотоэлектронах, регистрируемого всеми каналами кластера 11, от номера события в режиме последовательного переключения каналов аттенюатора лазерного источника: от минимального до максимального уровня ослабления мощности излучения.
- Рис. 10.** Распределение событий по разнице времен регистрации сигналов dt каналами кластеров 5 и 9 (слева), 8 и 9 (справа).
- Рис. 11.** Пример события, зарегистрированного кластером 9, при максимальной интенсивности лазерной вспышки. Кружками выделены сработавшие каналы кластера.

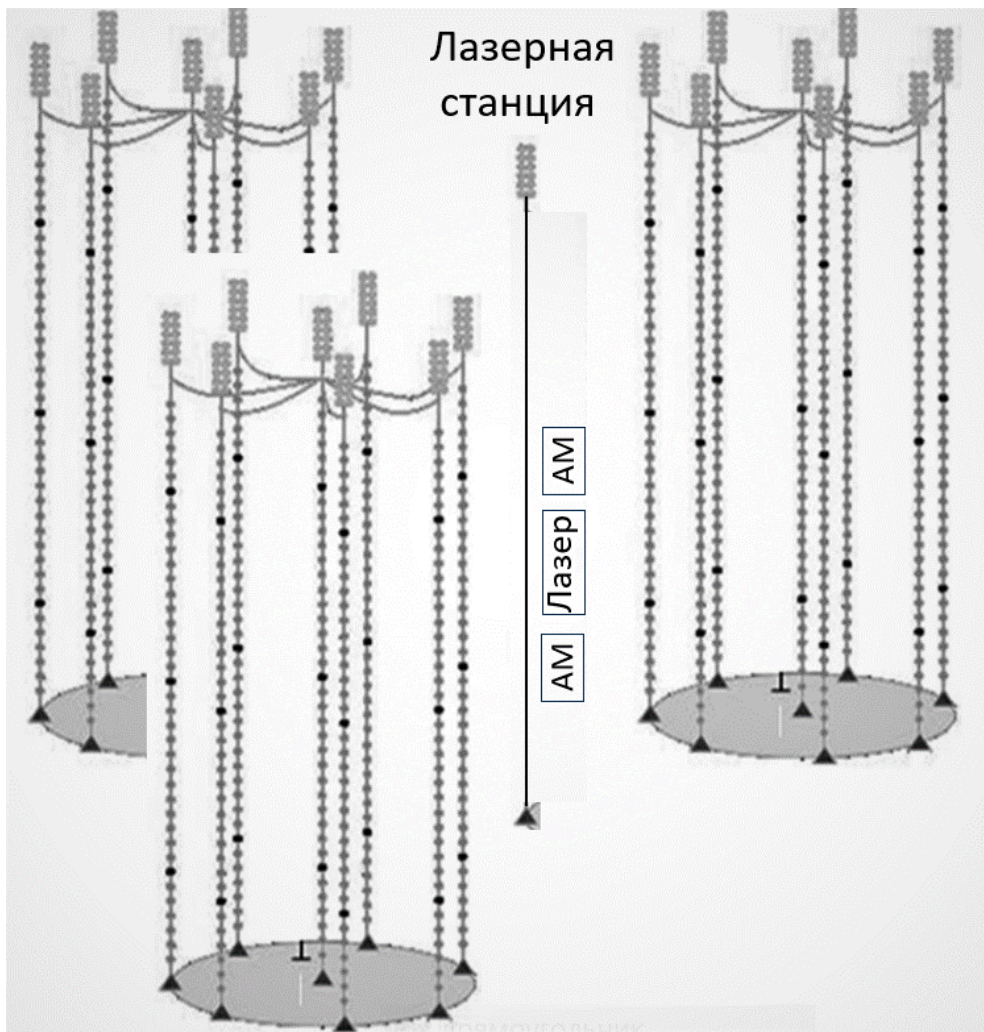


Рис. 1.

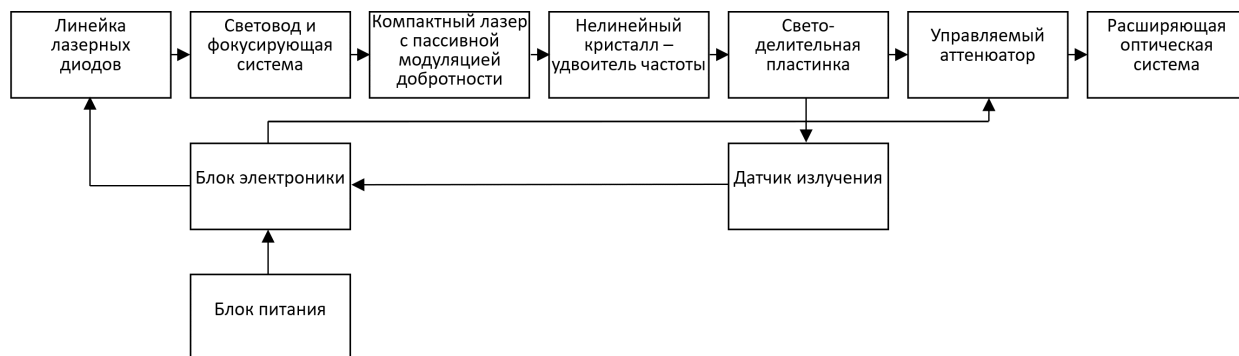


Рис. 2.

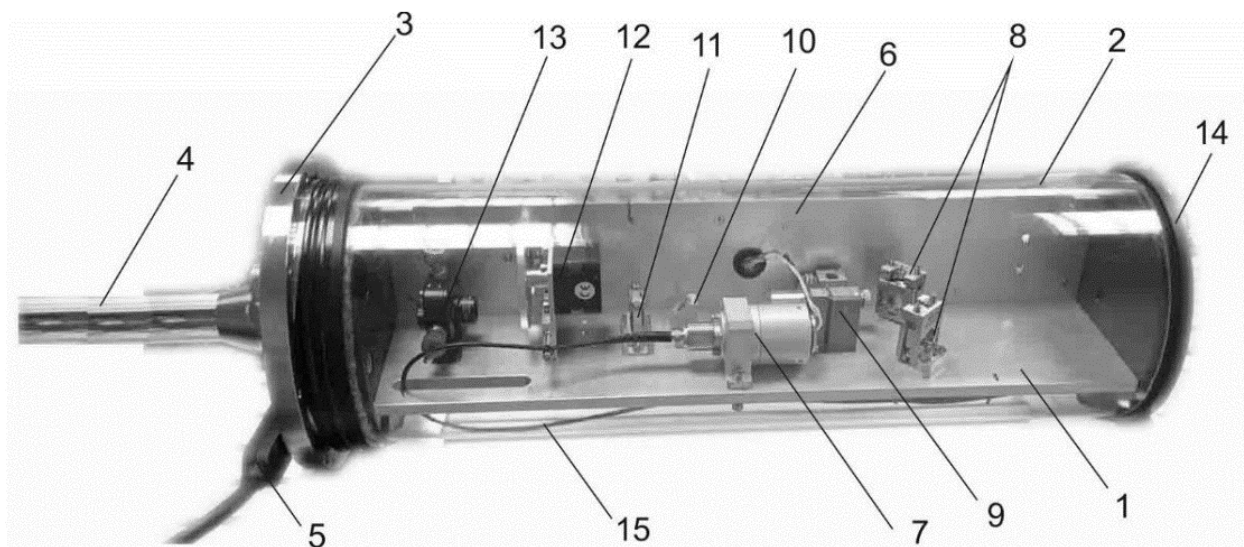


Рис. 3.

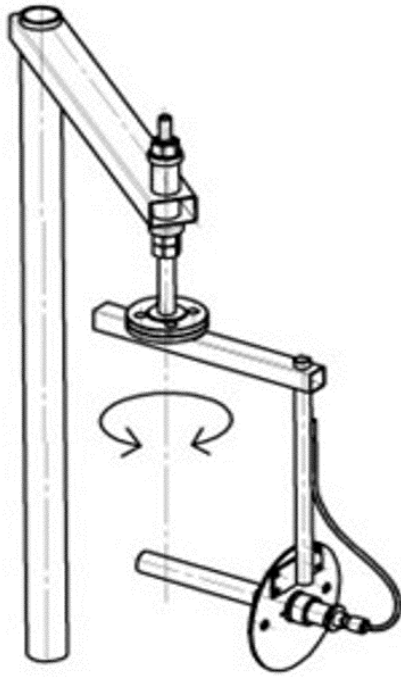


Рис. 4.

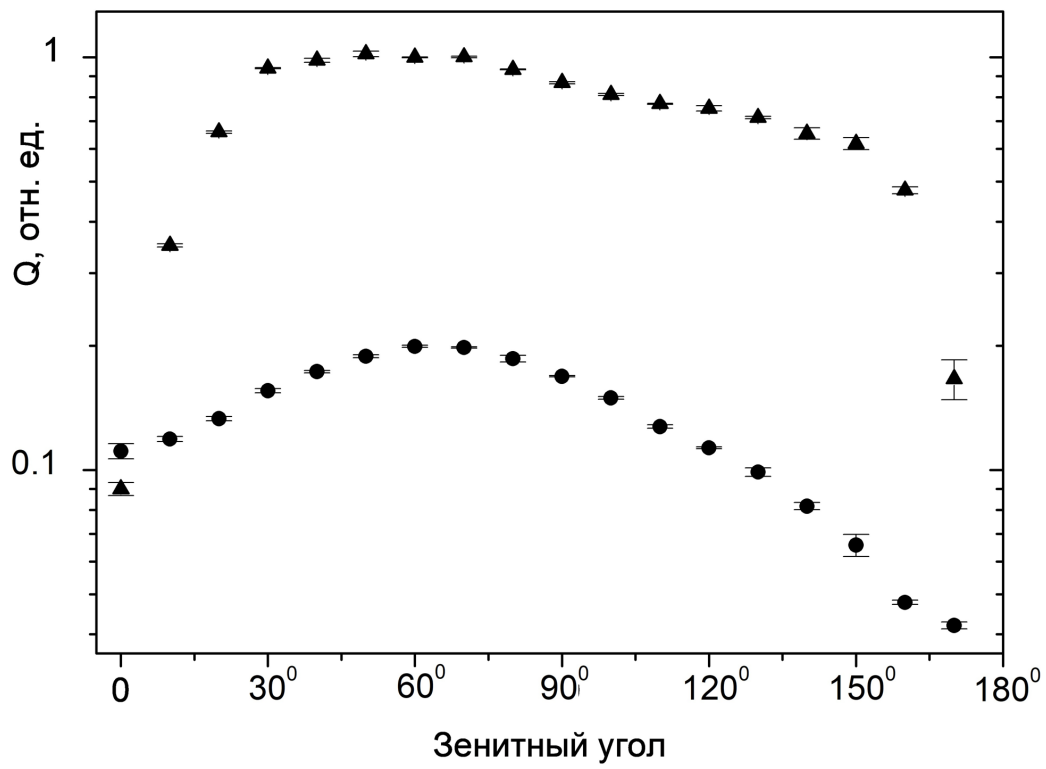


Рис. 5.

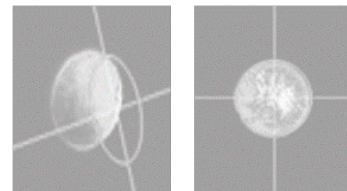
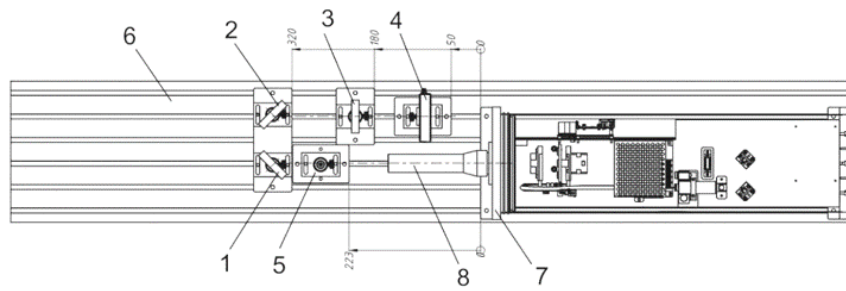


Рис. 6.

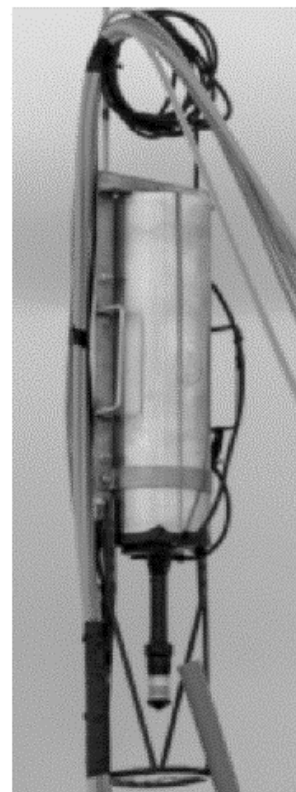
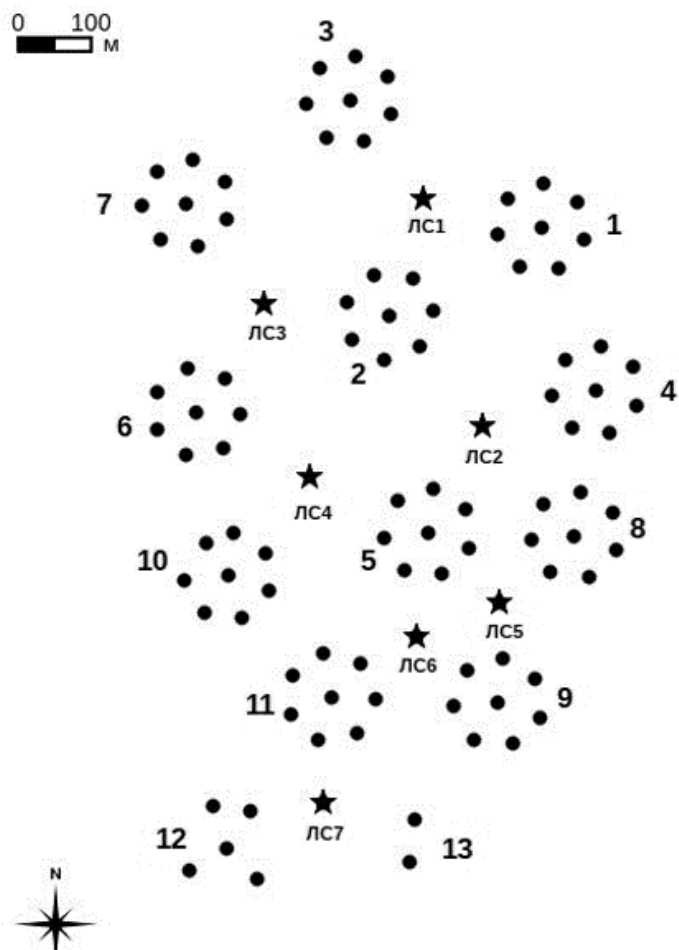


Рис. 7.

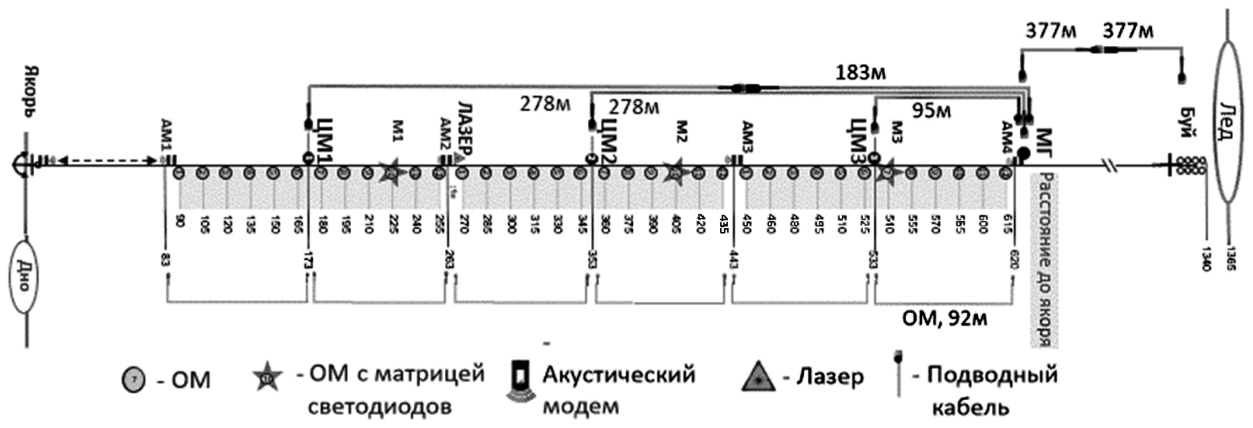


Рис. 8.

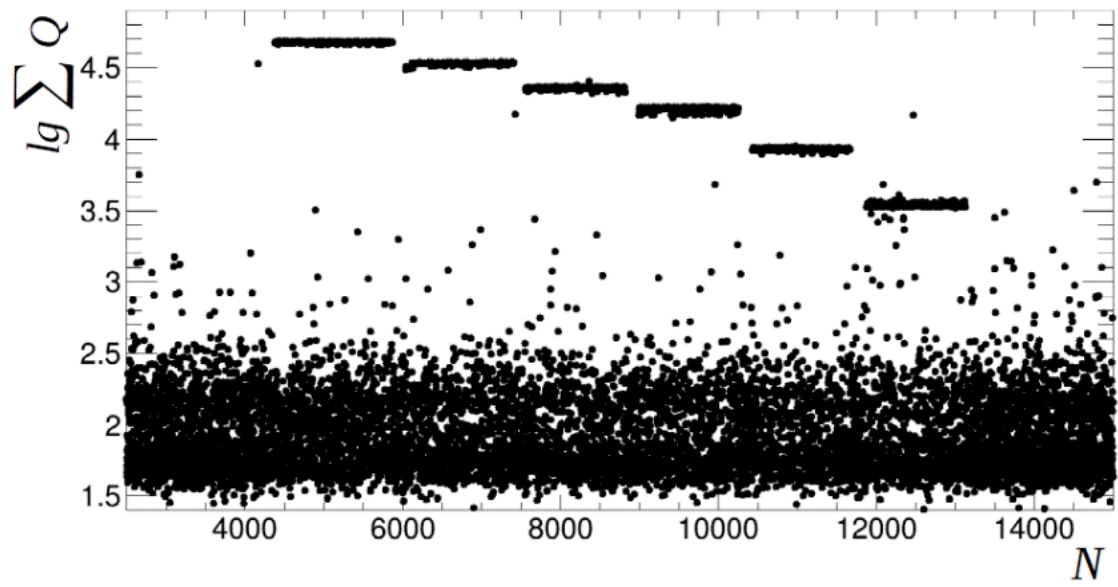


Рис. 9.

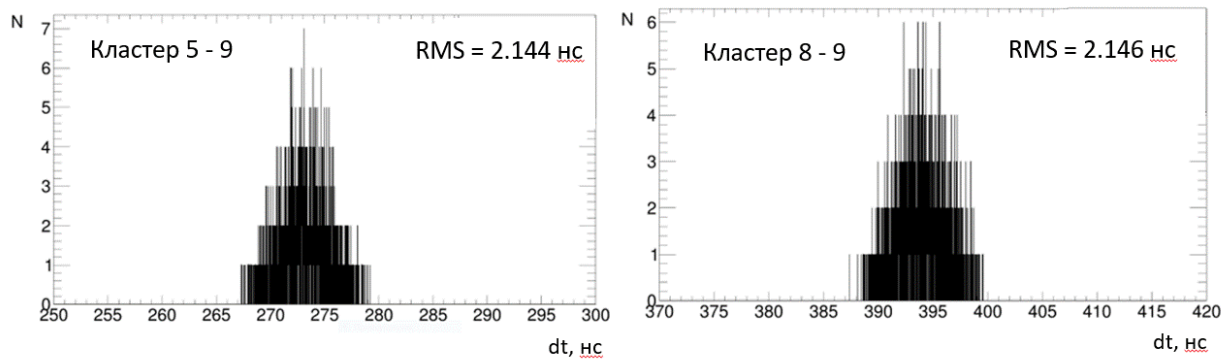


Рис. 10.

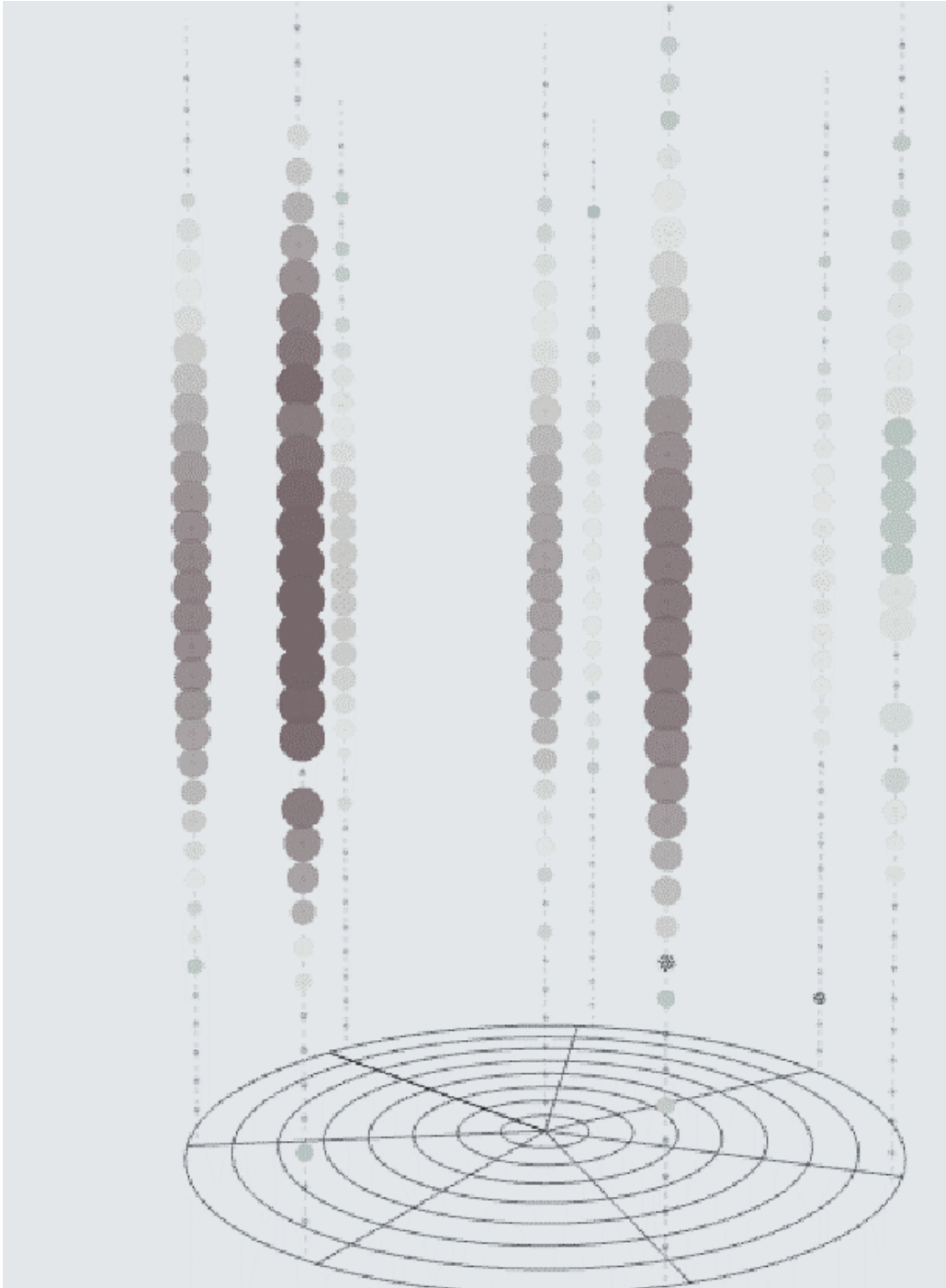


Рис. 11.

Для связи с авторами:

Айнутдинов Владимир Маратович

Телефон: +7(985)442-24-76 (моб.)

E-mail: aynutdin@yandex.ru

Для переводчика:

~~LASER CALIBRATION SYSTEM OF THE BAIKAL GVD NEUTRINO TELESCOPE~~

~~A. D. Avrorin¹⁾, A. V. Avrorin¹⁾, V. M. Aynutdinov^{1)*}, V. A. Allakhverdyan²⁾,
Z. Bardačová^{3),4)}, I. A. Belolaptikov²⁾, E. A. Bondarev¹⁾, I. V. Borina²⁾,
N. M. Budnev⁵⁾, V. A. Chadymov¹²⁾, A. S. Chepurinov⁶⁾, V. Y. Dik^{2),7)},
G. V. Domogatsky¹⁾, A. A. Doroshenko¹⁾, R. Dvornický³⁾, A. N. Dyachok⁵⁾,
Zh. A. M. Dzhilkibaev¹⁾, E. Eckerová^{3),4)}, T. V. Elzhov²⁾, L. Fajt⁴⁾, V. N. Fomin¹²⁾, A. R.
Gafarov⁵⁾, K. V. Golubkov¹⁾, N. S. Gorshkov²⁾, T. I. Gress⁵⁾, K. G. Kebkal⁸⁾, V. K. Kebkal⁸⁾, I.
V. Kharuk¹⁾, E. V. Khramov²⁾, M. M. Kolbin²⁾, S. O. Koligaev⁹⁾, K. V. Konischev²⁾, A. V.
Korobchenko²⁾, A. P. Koshechkin¹⁾, V. A. Kozhin⁶⁾,
M. V. Kruglov²⁾, V. F. Kulepov¹⁰⁾, Y. E. Lemeshev⁵⁾, A. Moshkunov¹³⁾,
R. R. Mirgazov⁵⁾, D. V. Naumov²⁾, A. S. Nikolaev⁶⁾, D. P. Petukhov¹⁾,
E. N. Pliskovsky²⁾, M. I. Rozanov¹¹⁾, E. V. Ryabov⁵⁾, G. B. Safronov¹⁾,
D. Scitova^{2),7)}, B. A. Shaybonov²⁾, A. Shestakov¹⁴⁾, S. D. Shilkin¹⁾, Yu. Shipilov¹⁴⁾, E. V.
Shirokov⁶⁾, F. Šimkovic^{3),4)}, A. E. Sirenko²⁾, A. V. Skurikhin⁶⁾,
A. G. Solovjev²⁾, M. N. Sorokovikov²⁾, I. Štekl⁴⁾, A. P. Stromakov¹⁾,
O. V. Suvorova¹⁾, V. A. Tabolenko⁵⁾, B. B. Ulzutuev²⁾, Y. V. Yablokova²⁾,
D. N. Zaborov¹⁾, S. I. Zavyalov²⁾, and D. Y. Zvezdov²⁾~~

~~¹⁾Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.~~

~~²⁾Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia.~~

~~³⁾Comenius University, Bratislava, Slovakia.~~

~~⁴⁾Czech Technical University in Prague, Institute of Experimental and Applied Physics, Czech Republic.~~

~~⁵⁾Irkutsk State University, Irkutsk, Russia.~~

~~⁶⁾Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia.~~

~~⁷⁾Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan.~~

~~⁸⁾LATENA, St. Petersburg, Russia.~~

~~⁹⁾INERAD, Dubna, Russia.~~

~~¹⁰⁾Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.~~

~~¹¹⁾St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia.~~

~~¹²⁾Moscow, independent researcher.~~

~~¹³⁾NPC ELS 94 LLC, Moscow, 123001, Russia~~

~~¹⁴⁾Alex Lab ST LLC, Moscow, 127083, Russia~~

~~Baikal GVD deep-sea Cherenkov detector, which deployment in Lake Baikal has been ongoing since 2016, currently represents the largest neutrino telescope in the Northern Hemisphere. The principle of the telescope operation is based on the registration of Cherenkov radiation produced by the products of neutrino interaction in the aquatic environment using the spatial structure of photodetectors. Laser light sources specially designed for the Baikal project are used to calibrate and measure the characteristics of the telescope's detecting system. The article describes the design and features of the functioning of calibration laser sources, presents the results of their operation as part of the telescope and discusses issues of further development of the laser calibration system.~~

~~**Keywords:** neutrinos, neutrino telescopes, laser calibration system, Baikal.~~