

*Форма открытия Проекта*

**УТВЕРЖДАЮ**

**Директор Института**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_ г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ ПРОЕКТА  
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

**1. Общие сведения о проекте**

**1.1. Шифр темы**

03-2-1100-2010/2024

**1.2. Шифр проекта**

-

**1.2. Лаборатория**

Лаборатория ядерных проблем

**1.3. Научное направление**

КИП, Ядерная физика

**1.4. Наименование проекта**

БАЙКАЛ-ГВД

**1.5. Руководитель проекта**

Белолаптиков И.А.

**1.6. Заместители руководителя проекта**

**2. Научное обоснование и организационная структура**

**2.1. Аннотация**

Проект Байкал-ГВД – продолжение создания гигатонного нейтринного телескопа для исследований в области многоканальной астрономии, изучения фундаментальных свойств самых энергичных космических нейтрино, косвенного поиска галактической темной материи и прикладных исследований. Международная коллаборация проекта Байкал-ГВД строит

нейтринный телескоп на озере Байкал. Массивы светочувствительных элементов в оптических модулях регистрируют излучение Вавилова-Черенкова, создаваемое заряженными частицами в воде озера при движении со скоростями, превышающими скорость света в воде. Такие частицы могут возникать в результате взаимодействия нейтрино в воде или горной породе дна озера. Энергия и направление исходных нейтрино реконструируются по количеству фотонов Вавилова-Черенкова и времени их регистрации в отдельных светочувствительных элементах. Телескоп имеет возможность изучать космические нейтрино и определять их источники, осуществлять поиск нейтрино от аннигиляции частиц темной материи и других редких явлений. Научная программа проекта ориентирована на фундаментальные проблемы астрофизики и физики элементарных частиц: идентификация астрофизических источников нейтрино сверхвысоких энергий, механизмы формирования и эволюции галактик, определение иерархии масс нейтрино, нейтринная геофизика и др. Уникальный нейтринный телескоп Байкал-ГВД является одной из основных базовых установок ОИЯИ. В течение следующих 5 лет будет продолжено всестороннее развитие телескопа и его инфраструктуры, как в ОИЯИ, так и на озере Байкал.

## **2.2. Научное обоснование (цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски)**

Представленный проект Байкал-ГВД на озере Байкал является дальнейшим развитием усилий, предпринимавшихся в течение последних десятилетий коллаборацией БАЙКАЛ на предыдущих этапах эксперимента. Благодаря этим исследованиям в настоящее время оптические свойства воды в глубоких слоях озера хорошо изучены, а возможности обнаружения и определения параметров высокоэнергетических нейтрино успешно продемонстрированы. Это является важной основой для продолжения создания детектора гигатонного объема с передовыми характеристиками и предполагаемым эффективным размером на уровне кубического километра и более.

Настоящее время этап Байкал-ГВД, который находится в процессе создания, с новой исследовательской инфраструктурой, направлен, прежде всего, на изучение потоков астрофизических нейтрино, в частности, на картирование неба высокоэнергетических нейтрино в Южном полушарии, включая область галактического центра. Другие темы включают косвенный поиск темной материи путем обнаружения нейтрино, образующихся при аннигиляции WIMP на Солнце или в центре Земли. Байкал-ГВД также будет искать экзотические частицы, такие как магнитные монополи, суперсимметричные Q-болы или нуклеариты.

Конкретными научными целями проекта являются:

### ***Нейтрино от “точечных” локализованных астрофизических объектов***

Высокоэнергетические потоки нейтрино образуются в природе в результате физических процессов в астрофизических объектах, характеризующихся огромным энерговыделением от  $10^{39}$  до  $10^{52}$  эрг/с и выше. Ближайшие (по отношению к земному наблюдателю) астрофизические объекты, которые, как предполагается в настоящее время, способны излучать высокоинтенсивные потоки нейтрино, расположены в основном в окрестностях галактического центра и в плоскости Галактики. Остатки сверхновых, пульсары, окрестности черной дыры в центре Галактики, бинарные системы, содержащие черную дыру или нейтронную звезду, и скопления молекулярных облаков, которые являются мишенями для протонов и ядер космических лучей, являются наиболее перспективными галактическими источниками с точки зрения обнаружения

их нейтринного излучения. Энергетический спектр нейтрино от галактических источников находится в диапазоне энергий  $10^3 \div 10^6$  ГэВ.

Внегалактические объекты, такие как активные ядра галактик (AGN), гамма-всплески (GRB), галактики со вспышкой звездообразования и скопления галактик – относятся к другому классу источников нейтрино, чье излучение также может быть зарегистрировано наземными установками. Этот класс источников характеризуется гораздо большим энерговыделением и генерирует нейтрино в диапазоне энергий  $10^4 \div 10^8$  ГэВ и выше. Поиск нейтринного сигнала от конкретного выделенного источников накладывает жесткие требования на необходимое разрешение нейтринных телескопов, как с точки зрения измерения как энергии, так и определение направления зарегистрированного нейтрино.

### ***Диффузный нейтринный поток***

Другим направлением исследований астрофизических нейтрино является изучение энергетического спектра, глобальной анизотропии, и состава диффузного потока нейтрино от неопознанных источников при энергиях выше  $10^4$  ГэВ, при которых фон от атмосферных нейтрино сравним с ожидаемым потоком или ниже его. Диффузный поток нейтрино высоких энергий вблизи Земли является результатом, создающимся различными нейтринными источниками за период от отдаленных космологических эпох до наших дней. Основной вклад в этот поток вносят внегалактические источники. Нейтрино, образующиеся при взаимодействии космических лучей с межзвездной материей и, в случае космических лучей сверхвысоких энергий, с электромагнитным излучением широкого энергетического диапазона, включая космический микроволновый фон, также вносят свой вклад в диффузный поток. Следует отметить, что нейтрино от распада сверхмассивных частиц, возникающих например в GUT, могут составлять определенную долю диффузного потока.

### ***Темная материя***

Одной из задач современного естествознания является поиск частиц темной материи (ТМ). Данные наблюдений в области астрономии и космологии свидетельствуют о том, что в галактиках, скоплениях галактик и во Вселенной в целом, помимо обычной материи, присутствует материя нового типа - ТМ. Более того, в целом количество ТМ во Вселенной превышает количество обычной материи в 5-6 раз.

ТМ состоит из пока неизвестных частиц с массами, заметно превышающими массу самой тяжелой из известных стабильных элементарных частиц – протона. Эти новые частицы должны иметь время жизни, сравнимое или превышающее возраст Вселенной. Несомненно, такое большое время жизни связано с новыми законами сохранения в фундаментальной физике. Можно с большой уверенностью сказать, что за частицами ТМ стоит целый пласт новых явлений в физике частиц, происходящих при сверхвысоких энергиях и недоступных для исследования на существующих ускорителях.

Частицы ТМ могут (это не противоречит наблюдениям) очень слабо взаимодействовать с обычной материей. Поэтому их прямое обнаружение, если оно вообще возможно, является чрезвычайно сложной проблемой экспериментальной физики. Весьма перспективен и косвенный подход к обнаружению частиц ТМ, связанный с поиском продуктов их аннигиляции в центре Земли, Солнца или Галактики. Среди этих продуктов должны быть нейтрино достаточно высоких энергий, которые, в свою очередь, очень слабо взаимодействуют с веществом и проходят через Землю или Солнце практически без поглощения. Нейтрино таких энергий успешно регистрируются на крупных внеземных установках и нейтринных телескопах, размещенных в естественных средах.

Методы поиска частиц темной материи с помощью подземных детекторов и нейтринных телескопов в естественных средах заключаются в регистрации избытка потока мюонов в направлении от центра Земли или Солнца или от галактического центра над фоном от атмо-

сферных нейтрино. Ограничения на дополнительный поток мюонов в направлении от центра Земли и Солнца были получены на подземных установках Baksan, Super-Kamiokande и MACRO, а также на подводных и подледных нейтринных телескопах NT200 (озеро Байкал), ANTARES (Средиземное море), AMANDA и IceCube (Антарктида). Подземные нейтринные детекторы имеют более низкий энергетический порог для мюонов ( $\sim 1\div 3$  ГэВ), чем глубоководные (подледные) установки. Поэтому эти два класса детекторов дополняют друг друга. Первые эффективны при поиске частиц с массой менее 80 ГэВ (пороговая энергия рождения  $W$ -бозона), а вторые - при исследовании частиц с массой около 100 ГэВ и выше.

Дальнейшее существенное повышение чувствительности экспериментов к потоку мюонов от аннигиляции частиц темной материи может быть достигнуто только за счет увеличения их эффективной площади. В случае нейтринных телескопов эта проблема сводится к созданию кубокилометровых установок. В случае подземных установок такое увеличение эффективной площади подразумевает увеличение характерных размеров детекторов до ста и более метров. Создание такого огромного подземного объекта в настоящее время представляется крайне затратным и труднореализуемым.

### *Атмосферные нейтрино*

Космические лучи генерируют самый интенсивный поток нейтрино, наблюдаемый в наземных экспериментах в диапазоне энергий от сотен МэВ до сотен ТэВ. При взаимодействии космических лучей с атмосферой образуется большое количество пионов и каонов. Реакции распада пионов, каонов и мюонов:

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu + \nu_{\mu}; \quad K^{\pm} \rightarrow \mu + \nu_{\mu}; \quad \mu \rightarrow e + \nu_{\mu} + \bar{\nu}_e$$

производят нейтрино, которые называются обычными атмосферными нейтрино. В диапазоне энергий 100 ГэВ  $\div$  100 ТэВ спектр обычных атмосферных нейтрино описывается выражением:

$$\frac{d^2 N}{dE_{\nu} d\Omega}(E_{\nu}, \theta) = A_{\nu}(E_{\nu}/\text{ГэВ})^{-\gamma} \left[ \frac{1}{1 + 6E_{\nu}/E_{\pi}(\theta)} + \frac{0.213}{1 + 1.44E_{\nu}/E_K(\theta)} \right],$$

где  $A_{\nu} = 0,0285 \text{ ГэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стерадиан}^{-1}$ ,  $\gamma = 2,69$ ,  $E_{\pi}$  и  $E_K$  критические энергии пионов и каонов (энергии, при которых вероятность распада равна вероятности провзаимодействовать в атмосфере), зависящие от зенитного угла  $\theta$ .

Первичное космическое излучение распределено изотропно вблизи Земли, но развитие каскадов, индуцированных первичным излучением в атмосфере, нарушает изотропию потоков вторичных частиц. Пионы и каоны, порожденные первичной частицей под большими зенитными углами, проводят большую часть времени в разреженной атмосфере, где вероятность распада выше вероятности взаимодействия. Поэтому горизонтальный поток нейтрино превышает вертикальный. С ростом энергии время жизни пионов и каонов увеличивается, и, соответственно, вероятность распада уменьшается по сравнению с вероятностью взаимодействия. Поэтому энергетический спектр нейтрино, порожденных пионами и каонами, с ростом энергии падает быстрее (степенной коэффициент  $\gamma$  увеличивается на единицу), чем спектр первичных космических лучей. Неопределенность в предсказаниях потоков нейтрино от пионов и каонов связана с неопределенностью в спектре потока и энергии космических лучей, а также с неопределенностью в доле каонов и пионов, произведенных в ядерном взаимодействии при высоких энергиях. Разница в спектрах атмосферных нейтрино от пионов и каонов, рассчитанных разными авторами, составляет около 25%.

При энергиях выше 100 ТэВ возможен другой механизм образования нейтрино. Мгновенные нейтрино могут возникать в распадах очарованных мезонов и барионов со временем жизни порядка или менее  $10^{-12}$  с. Спектр таких нейтрино в основном повторяет спектр космических лучей и более плоский, чем у обычных нейтрино. До сих пор эти нейтрино экспериментально не обнаружены. Согласно расчетам, энергия, при которой потоки таких нейтрино становятся равными, а затем превышают потоки обычных нейтрино, зависит от модели взаимодействия первичных космических лучей с ядрами воздуха и от зенитного угла. Для потока вертикальных нейтрино эта энергия лежит в диапазоне 100-1000 ТэВ и увеличивается с зенитным углом.

С точки зрения экспериментов на нейтринных телескопах, атмосферные нейтрино являются источником естественного фона, который существенно затрудняет обнаружение астрофизических нейтрино. С другой стороны, поскольку уровень теоретического предсказания интенсивности и характеристик потока атмосферных нейтрино достаточно высок, этот поток может эффективно использоваться в качестве калибровочного нейтринного потока. Кроме того, поиск быстрых нейтрино является важной научной задачей.

### **Магнитные монополи**

Понятие магнитного монополя было введено в современную физическую теорию в 1931 году Дираком. Он показал, что любой магнитный заряд должен быть кратен минимально возможному заряду  $g$ , однозначно связанному с минимальным электрическим зарядом:

$$g = (\hbar c/2e) \approx (137/2e).$$

Таким образом, минимальный магнитный заряд примерно в 68,5 раз больше минимального электрического заряда. В частности, это означает, что потери энергии на ионизацию для релятивистских монополей в среде намного больше, чем для релятивистских мюонов. Это открывает возможности для обнаружения быстрых монополей в экспериментах с нейтринными телескопами. Теория излучения Вавилова-Черенкова от магнитных монополей была впервые рассмотрена И.М. Франком [Излучение Вавилова-Черенков. Москва. Изд. Наука, 1988, с. 192]. Линейная плотность излучения Вавилова-Черенкова с длиной волны  $\lambda$  (в предположении, что проницаемость среды  $\mu \sim 1$ ) описывается выражением:

$$\frac{d^2 n_c}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} \left(\frac{ng}{e}\right)^2 \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right),$$

где  $g$  - магнитный заряд монополя,  $e$  - заряд электрона,  $n$  - показатель преломления среды (для воды  $n = 1,33$ ),  $\beta = v/c$  - скорость монополя, выраженная в единицах скорости света в вакууме, и  $\alpha$  - постоянная тонкой структуры.

Излучение от релятивистского монополя в воде в  $(ng/e)^2 \approx 8300$  раз интенсивнее, чем от релятивистского мюона. Таким образом, магнитный монополь со скоростью  $\beta \sim 1$  является ярким источником света, соответствующим по интенсивности мюону с энергией  $\sim 1,4 \times 10^4$  ТэВ.

В результате ускорения в галактических магнитных полях кинетическая энергия тяжелого монополя может достигать  $\sim 10^{11}$  ГэВ. С другой стороны, при прохождении через Землю потери энергии квазирелятивистских монополей с  $\beta > \beta_c$  ( $\beta_c = 0,75$  - пороговая скорость монополя относительно генерации излучения Вавилова-Черенкова) составляют  $\sim 10^{11}$  ГэВ. Отсюда следует, что монополи с массой менее  $10^{11}$  ГэВ, проходящие через Землю, остаются квазирелятивистскими и могут быть обнаружены по их излучению с помощью нейтринных телескопов.

В 1981 году В. Рубаков [JETP Lett. 33 (1981), p. 644.] опубликовал работу, в которой пришел к выводу, что процессы с несохранением числа барионов не подавляются при существовании монополя, предсказываемого GUT. Сечение для реакции монополярного катализа распада барионов было оценено как:

$$\sigma_{\text{cat}} = \sigma_0 \beta_{\text{mon}}^{-1},$$

где  $a_0$  принималось равным по порядку величины характерным значениям сильных взаимодействий:  $a_0 \sim 10^{-28} \text{ см}^2$ . При учете электромагнитного взаимодействия между монополюсом и ядром, включающим нуклон, в выражении для сечения катализа появляются коэффициенты  $F(\beta_{\text{mon}}) = 2.4 \cdot 10^7 \beta_{\text{mon}}^{3.1}$  для нуклонов, составляющих ядро  $^{16}\text{O}$ , и  $F(\beta_{\text{mon}}) = 0.17 \cdot \beta_{\text{mon}}^{-1}$  для свободных протонов. Монополюс, движущийся в воде со скоростью меньше или порядка  $10^{-3}$  скорости света, должен инициировать в основном распад ядер водорода с сечением:

$$\sigma_{\text{cat}}^p = 0.17 \sigma_0 \beta_{\text{mon}}^{-2}.$$

Энергия, высвобождаемая при одном событии катализа ( $m_p c^2 = 938 \text{ МэВ}$ ) распределяется между продуктами распада протона. При движении в воде последние становятся источниками излучения Вавилова-Черенкова, которое также генерируется и дочерними частицами,  $\delta$ -электронами,  $e^+e^-$  парами и т.д. В результате, после распада каждого протона в диапазоне длин волн  $300 < \lambda < 600 \text{ нм}$  испускается до  $N_\gamma = 1.1 \cdot 10^5$  фотонов. Таким образом, траектория должна выглядеть как цепочка вспышек излучения Вавилова-Черенкова.

### Нейтринные взаимодействия

Нейтрино высоких энергий взаимодействуют с материалом мишеней нейтринных телескопов в основном через реакции на нуклонах по каналам заряженных (CC) и нейтральных (NC) токов:

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- \rightarrow \text{anything}, \quad (3.3)$$

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \xrightarrow{\text{CC}} l^-(l^+) + \text{hadrons}, \quad (3.1)$$

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \xrightarrow{\text{NC}} \nu_l(\bar{\nu}_l) + \text{hadrons}, \quad (3.2)$$

где  $l = e, n, \tau$ . Взаимодействие нейтрино с электронами практически не дает вклада в общее число регистрируемых событий, за исключением резонансного рассеяния электронных анти-нейтрино в области W-резонанса, с энергией при резонансе  $E_0 = M_W^2/2m_e = 6.3 \times 10^6 \text{ GeV}$  и сечением  $5,02 \times 10^{-31} \text{ см}^2$ . Конечные продукты реакций (3.1)-(3.3) – лептоны и высокоэнергетические каскады несут информацию об энергии, направлении и, в принципе, типе нейтрино.

В экспериментах на глубоководных подводных и подледных детекторах эффективный необходимый размер мишени определяется энергией и типом нейтрино. В случае мюонных нейтрино мишенью для нейтрино является как прозрачная среда вокруг телескопа, так и донная порода, поскольку вторичные мюоны обладают высокой проникающей способностью. В первом случае энергия мюонного нейтрино может быть определена путем реконструкции энергий мюона и ливня, генерируемого в вершине взаимодействия нейтрино. Во время взаимодействия мюонных нейтрино в породе энергия нейтрино в каждом отдельном событии не может быть восстановлена точно из-за потерь энергии мюона при его распространении от вершины взаимодействия к установке. Однако, когда статистика зарегистрированных событий достаточно велика, энергетический спектр потока мюонных нейтрино может быть получен путем реконструкции энергии мюона. Астрофизические потоки  $\nu_e$  и  $\nu_\tau$ , составляющие две трети общего потока, могут быть исследованы в экспериментах на нейтринных телескопах только путем регистрации вторичных ливней, генерируемых в водной мишени. Адронные ливни образуются при взаимодействии нейтрино всех типов с ядрами по каналам заряженных и нейтральных токов. Кроме того, при CC-взаимодействии электрона и  $\tau$ -нейтрино энергия электрона преобразуется в энергию электромагнитного ливня, а значительная часть энергии  $\tau$ -лептона передается адронному или электромагнитному ливню в результате его распада. Таким образом, достижение высокой точности реконструкции энергии и направления ливней является необходимым требованием для эффективного обнаружения нейтрино всех типов.

## Методы и подходы:

Основной детектор является вода озера Байкал на большой глубине, это тело детектора оснащается оптическими датчиками, которые регистрируют излучение Вавилова-Черенкова от вторичных частиц, образующихся при взаимодействии высокоэнергетических нейтрино внутри или вблизи измеряемого объема. В основе концепции Байкал-ГВД лежит ряд очевидных требований к конструкции и архитектуре регистрирующей системы массива оптических датчиков: максимальное использование преимуществ разворачивания детектирующей системы с льда озера Байкал; масштабируемость установки и обеспечение ее эффективной работы, что было успешно продемонстрировано на уже выполненных этапах; возможность реализации различных вариантов расположения и пространственного распределения оптических модулей в рамках одной измерительной системы.

Установка Байкал-ГВД расположена в южном бассейне озера Байкал. Место было выбрано из уникального сочетания гидрологических, гидрофизических и ландшафтных факторов, оптимальных для разворачивания и эксплуатации нейтринного телескопа. Глубина озера здесь составляет около 1360 м на расстояниях от трех километров от берега. Ровное дно озера на протяжении нескольких десятков километров от берега позволяет использовать практически неограниченный объем воды для глубоководного детектора. Прочный ледяной покров толщиной до 1 метра с февраля до середины апреля позволяет создавать телескоп (рис. 3), а также проводить техническое обслуживание и исследовательские работы непосредственно с поверхности льда, используя его как прочную и неподвижную монтажную платформу.

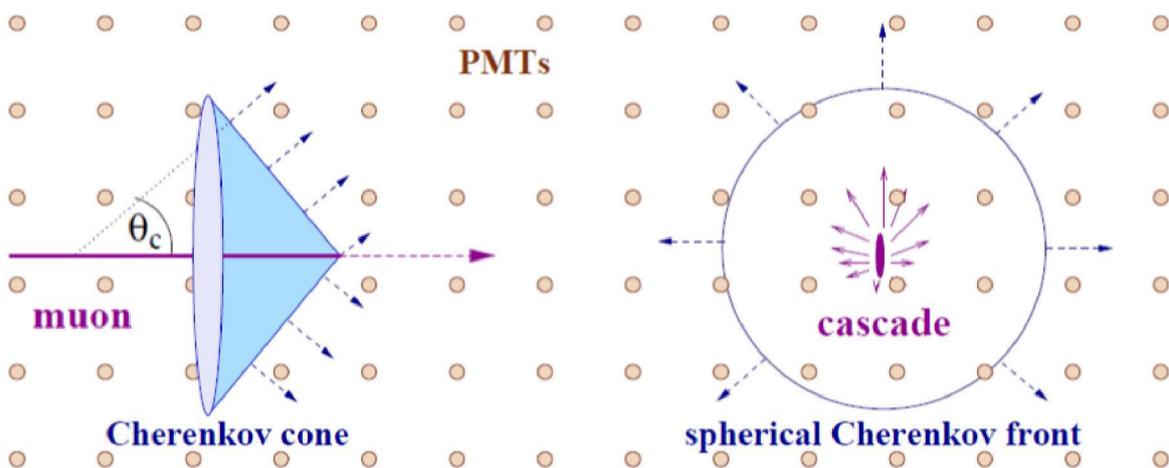


Рис. 1: Принципы обнаружения мюонных треков (слева) и каскадов (справа) в подводных детекторах.

Потоки астрофизических нейтрино исследуются с помощью нейтринных телескопов в двух основных направлениях.

Первое направление исследований связано с поиском нейтринного сигнала от известных астрофизических объектов или обнаружением неопознанных локальных источников по наблюдениям превышения сигнала над фоновым уровнем на всей небесной сфере. На рисунке 1 показаны два основных режима поиска событий подводными нейтринными телескопами. Взаимодействие мюонного нейтрино (заряженный ток) приводит к образованию мюонного трека (слева), тогда как другие типы нейтринных реакций вызывают адронные и/или электромагнитные каскады (справа). Это, в частности, справедливо для NC реакций (адронный каскад) или CC реакций с электронными нейтрино (перекрывающиеся адронный и электромагнитный каскады). CC тау-нейтринные взаимодействия могут иметь любую сигнатуру, в зависимости от  $\tau$ -распада.



*Рис. 2: Схема ОМ и линия сборки ОМ в ОИЯИ.*

Байкал-ГВД представляет собой трехмерную решетку из фотоэлектронных умножителей, каждый из которых заключен в прозрачную сферу: оптический модуль (ОМ), рис. 2. ОМ расположены на вертикальных несущих тросах, образуя струны, рис. 4. Конфигурация телескопа состоит из кластеров струн – функционально независимых субмассивов, которые соединены с берегом отдельными электрооптическими кабелями.



*Рис. 3: Сборка гирлянды кластера установки Байкал-ГВД.*

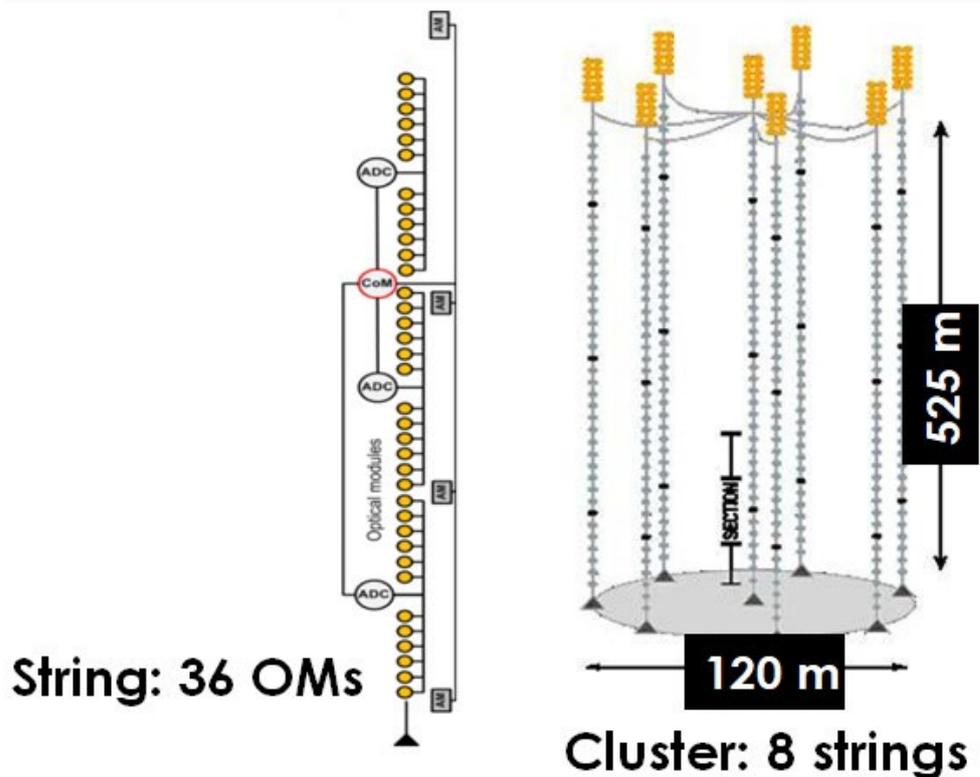


Рис. 4: Расположение массива ОМ в кластерах Байкал-ГВД.

Каждый кластер состоит из восьми струн оптических модулей – семь периферийных струн равномерно расположены на расстоянии 60 м вокруг центральной. Оптические модули расположены на расстоянии 15 м вдоль каждой струны и обращены вниз. ОМ на каждой струне объединены в секции – детектирующие блоки телескопа.

Каждый кластер представляет собой функционально законченный и независимый суб-массив, который может работать как в составе единой конфигурации, так и автономно. Это поз-

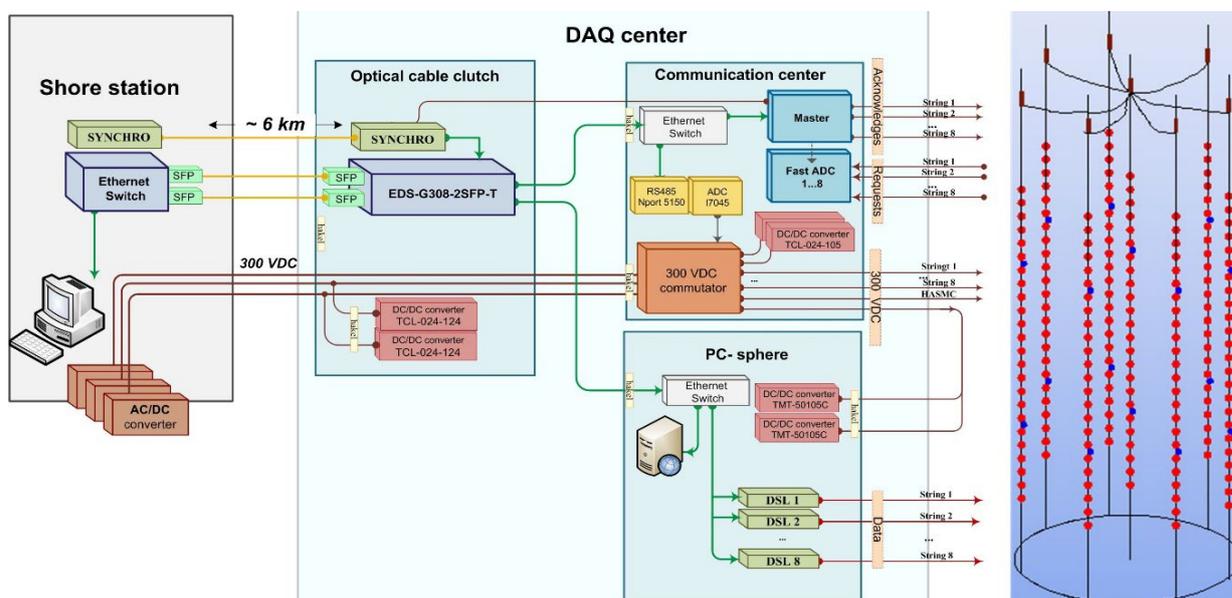


Рис. 5: Схема сбора-передачи данных кластера (слева) и кластера, состоящего из восьми струн (справа).

воляет легко модернизировать конфигурацию, а также вводить в эксплуатацию отдельные его части поэтапно. Базовая конфигурация кластера состоит из восьми струн, центра сбора данных (DAQ-центра) и электрооптического кабеля, который соединяет кластер с береговой станцией (рис. 5). DAQ-центр кластера состоит из трех отдельных подводных модулей, расположенных на небольшой глубине около 30 м.

Отдельные струны с ОМ соединены с DAQ-центром кластера кабелями длиной 1,2 км, которые служат для передачи данных, питания и синхронизации работы секций. DAQ-центр кластера соединен с берегом электрооптическим кабелем длиной около 6 км. Этот кабель служит для питания кластера и передачи цифровых данных по гигабитной оптоволоконной линии связи.

Современный этап создания Байкал-ГВД в озере Байкал является результатом обширной исследовательской работы, проведенной коллаборацией на предыдущих этапах проекта. В рамках Семилетней программы развития ОИЯИ на 2017-2023 гг. уже введены в эксплуатацию 12 кластеров Байкал-ГВД (рис. 6), а к 2025 году будет завершён первый этап создания детектора с эффективным рабочим объемом более  $0,5 \text{ км}^3$ .

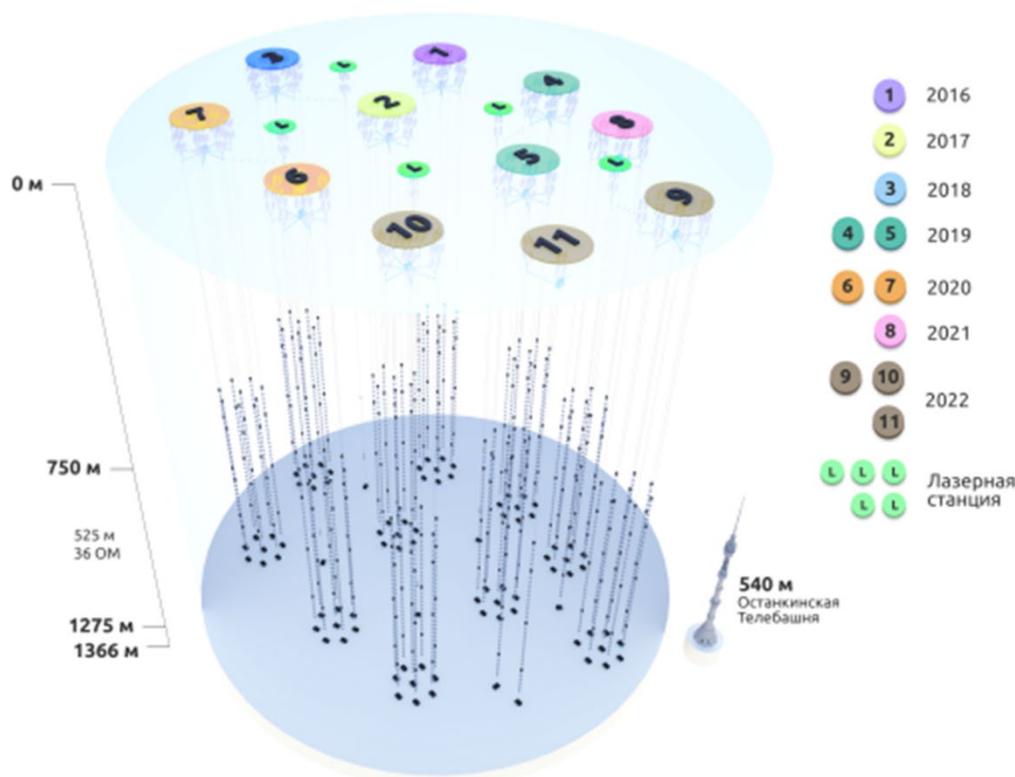


Рис. 6: Статус развертывания телескопа по состоянию на конец 2022 года. Установка содержит 2916 оптических модулей и семь лазерных калибровочных источников света на пяти станциях.

### Ожидаемые результаты:

На продолжающемся этапе своего развития (в течение семилетнего периода 2024-2030 гг.) нейтринный телескоп Байкал-ГВД будет являться новой исследовательской инфраструктурой ОИЯИ, с первоочередными задачами, направленными на изучение потоков астрофизических нейтрино. В качестве тела детектора будет использоваться байкальская вода, в которую помещаются оптические датчики, регистрирующие излучение Вавилова-Черенкова от вторичных частиц, возникающих при взаимодействии высокоэнергетических нейтрино внутри рабочего объема детектора или в непосредственной близости от него. В основе концепции установки Байкал-ГВД лежит ряд достаточно очевидных требований к конструкции и

архитектуре системы сбора информации с распределенного массива детектирующих кластеров. Это максимальное использование преимуществ размещения массива на ледяном покрове озера, расширяемость установки и обеспечение ее постоянной эффективной работы, а также возможность различных вариантов расположения светодатчиков в рамках одной измерительной системы.

В ближайшие годы будет интенсивно рассматриваться новая стратегия дальнейшего развития крупномасштабного исследовательского комплекса Байкал-ГВД. Второй этап создания нейтринного телескопа Байкал-ГВД, реализация этой новой стратегии, начнется на рубеже 2025 года и планируется к завершению в 2030 году, когда телескоп будет иметь более 20 кластеров (примерно 6000-7000 оптических модулей) с эффективным рабочим объемом около или более одного кубического километра.

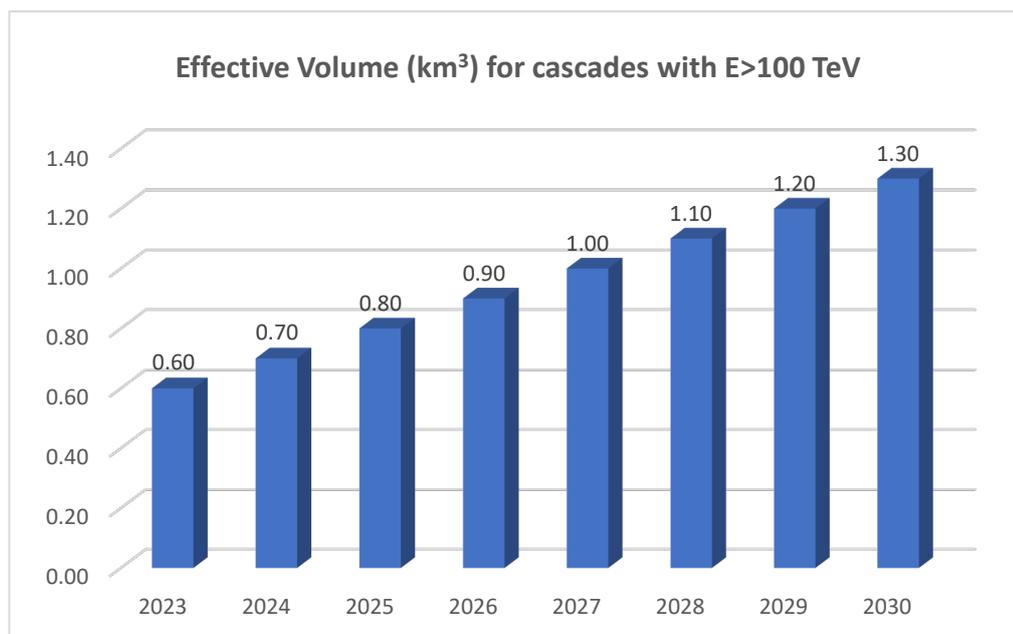


Рис. 6: Эксперимент Байкал-ГВД. План расширения детектора (по эффективному объему).

Скорость набора данных будет близка к скорости в телескопе IceCube. Это позволит нам изучать и, в определенном смысле, контролировать все космическое пространство на том же статистическом уровне. Учитывая преимущества Северного полушария для наблюдения за центром нашей Галактики, ожидается, что это позволит телескопу Байкал-ГВД опередить IceCube в получении важнейшей информации о том, о событиях, которые там происходят. Фактически это означает, что Байкал-ГВД станет не только полноценным, но и важнейшим звеном Глобальной нейтринной сети.

Объем детектора в 1 км<sup>3</sup> означает значительное увеличение числа кластеров, а их большое количество открывает возможность систематического изучения мультикластерных нейтринных событий, в частности, событий, вызванных сверхвысокоэнергетичными  $\tau$  нейтрино, поскольку топология таких событий характеризуется заметным увеличением ширины конуса продуктов взаимодействия  $\tau$  нейтрино с ядрами.

### Вклад группы ОИЯИ

Сотрудники ОИЯИ играют значительную роль во всех ключевых частях эксперимента:

- Сборка и проверка ОМ и стрингов ОМ;
- Участие в кампаниях по зимнему развертыванию/обслуживанию телескопа;
- Логистика;
- Архивация данных, первичная обработка и анализ;
- Калибровка детектора и обработка данных;

- Системы дистанционного управления и мониторинга детектора;
- Моделирование;
- On-line программное обеспечение;
- Разработка новых методов селекции и реконструкции событий;
- Анализ данных в отношении высокоэнергетических нейтрино и нейтрино от аннигиляции темной материи, получение физических результатов.

### **2.3. Предполагаемый срок выполнения**

Проект будет продолжен в течение ближайших 7 лет и, безусловно, в последующие годы.

### **2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ: ЛЯЦ, ЛИТ**

### 2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК

Вычислительные ресурсы	Распределение по годам				
	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Хранение данных (ТБ)					
- EOS	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
- Ленты	3000	3500	4000	4500	5000
Tier 1 (ядро-час)					
Tier 2 (ядро-час)	1М	1М	1,5М	1,5М	1,5М
СК «Говорун» (ядро-час)					
- CPU	1М	1М	1,5М	1,5М	1,5М
- GPU					
Облака (CPU ядер)	600	900	1200	1500	1800

### 2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
ФГБУН институт ядерных исследований Российской академии наук	Россия	Москва	26	Протокол
Университет имени Я. А. Коменского	Словакия	Братислава	4	Меморандум о сотрудничестве
Иркутский государственный университет	Россия	Иркутск	8	Меморандум о сотрудничестве
Институт ядерной физики Республики Казахстан	Казахстан	Алма-Ата	2	Меморандум о сотрудничестве
Чешский технический университет	Чехия	Прага	2	Меморандум о сотрудничестве
НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова	Россия	Москва	5	Меморандум о сотрудничестве
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева	Россия	Нижний Новгород	1	Меморандум о сотрудничестве
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет	Россия	Санкт-Петербург	1	Меморандум о сотрудничестве

**2.6. Организации-соисполнители** (те сотрудничающие организации/партнеры без финансового, инфраструктурного участия которых выполнение программы исследований невозможно. Пример — участие ОИЯИ в экспериментах LHC в CERN)

Институт ядерных исследований Российской академии наук

**3. Кадровое обеспечение**

**3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации**

<b>№№ п/п</b>	<b>Категория работника</b>	<b>Основной персонал, сумма FTE</b>	<b>Ассоциированный персонал, сумма FTE</b>
1.	научные работники	9,75	-
2.	инженеры	14,75	-
3.	специалисты	3,6	-
4.	рабочие	4,3	-
	<b>Итого:</b>	<b>32,4</b>	-

### 3.2. Доступные кадровые ресурсы

#### 3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

№№ п/п	Категория работников	ФИО	Подразделение	Должность	Сумма FTE
1.	научные работники	Белолаптиков Игорь Анатольевич	ЛЯП	начальник установки	1
		Дик Виктория		младший научный сотрудник	1
		Дорошенко Александр Александрович		научный сотрудник	0,5
		Конищев Константин Владимирович		научный сотрудник	1
		Плисковский Евгений Николаевич		научный сотрудник	1
		Розов Сергей Владимирович		заместитель начальника отдела	0,1
		Сандуковский Вячеслав Григорьевич		консультант при дирекции ЛЯП	0,25
		Сафронов Григорий Борисович		старший научный сотрудник	0,5
		Сеитова Диана		младший научный сотрудник	1
		Сороковиков Максим Николаевич		младший научный сотрудник	1
		Якушев Евгений Александрович		начальник отдела	0,3
2.	инженеры	Шайбонов Баир Александрович	ЛИТ	старший научный сотрудник	1
		Наумов Дмитрий Вадимович		зам. директора ЛЯП	0,3
		Соловьев Алексей Геннадьевич		старший научный сотрудник	0,8
		Аллахвердян Владимир Артурович		инженер	1
		Антонов Павел Иннокентьевич		инженер	0,5
		Борина Ирина Владимировна		старший инженер	1
		Доценко Иван Сергеевич		старший инженер	0,8
		Елжов Тимур Валерьевич		ведущий инженер	1
		Голубков Кирилл		старший	0,5

		Владимирович Горшков Никита Сергеевич Калинова Боряна Евтимова Камнев Илья Ильич Катулин Сергей Анатольевич Катулина Светлана Леонидовна Коробченко Андрей Владимирович Круглов Максим Викторович Минаев Михаил Львович Петухов Дмитрий Петрович Щербакова Ирина Сергеевна Шевченко Марина Юрьевна Сиренко Анна Эркиновна Стромаков Александр Петрович Вольных Владимир Петрович Яблокова Юлия Викторовна Звездов Денис Юрьевич		инженер инженер  инженер старший инженер старший инженер старший инженер старший инженер старший инженер инженер инженер инженер инженер старший инженер ведущий инженер инженер инженер инженер старший инженер инженер	1 0,3 0,2 0,7 0,3 1 1 1 0,5 0,1 0,1 1 0,5 0,25 1 1
3.	специалисты	Кулькова Елена Юрьевна  Ледницка Татьяна Морозова Татьяна Анатольевна Орлов Дмитрий Артемович Шевченко Семен Анатольевич Ульзугуев Батжаргал Баирович	ЛЯП	специалист по документообороту лаборант старший инспектор лаборант лаборант лаборант	0,7 0,1 0,3 1 1 0,5
4.	рабочие	Емельянов Андрей Николаевич Колбин Максим Михайлович  Шевченко Константин Иванович Сосунов Николай Иванович	ЛЯП	слесарь-ремонтник механик экспериментальных стендов и установок электрогазосварщик слесарь механосборочных работ	0,1 1 0,5 1

		Степкин Игорь Анатольевич		техник	1
		Заикин Андрей Анатольевич		механик эксперимента льных стендов и установок	0,7
	<b>Итого:</b>				<b>32,4</b>

#### 4. Финансовое обеспечение

##### 4.1. Полная сметная стоимость проекта

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП).

тыс.долл. 38550

Детализация приводится в отдельной форме.

##### 4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков — общий объем.

Руководитель проекта \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

Дата представления проекта в ДНОД \_\_\_\_\_

Дата решения НТС Лаборатории \_\_\_\_\_, номер документа \_\_\_\_\_

Год начала проекта \_\_\_\_\_

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления  
Проекта**

Наименования затрат. ресурсов. источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость. распределение по годам					
			1 год	2 год	3 год	4 год	5 год	
	Международное сотрудничество (МНТС)	750	150	150	150	150	150	
	Материалы	27 500	5700	5700	5700	5200	5200	
	Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	4 300	800	800	900	900	900	
	Пуско-наладочные работы	1000	200	200	200	200	200	
	Услуги научно- исследовательских организаций	500	100	100	100	100	100	
	Приобретение программного обеспечения							
	Проектирование/строительство	2 000	400	400	400	400	400	
	Сервисные расходы <i>(планируются в случае прямой принадлежности к проекту)</i>	2 500	400	450	500	550	600	
необходимые	Нормо-час	Ресурсы						
		– сумма FTE.	25 000	5000	5000	5000	5000	5000
		– ускорителя/установки.						
		– реактора.....						
Источники финансирования	Бюджетные средства	Бюджет ОИЯИ <i>(статьи бюджета)</i>	36 050	7250	7300	7450	7000	7050
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей  Средства по договорам с заказчиками  Другие источники финансирования	2 500	500	500	500	500	500

Руководитель проекта \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

Экономист Лаборатории \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

## ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА: Байкал-ГВД (Глубоководный подводный детектор мюонов и нейтрино на озере Байкал (Детектор гигатонного объема))

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА: Байкал-ГВД

ШИФР ПРОЕКТА

ШИФР ТЕМЫ: 03-2-1100-2010/2024

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА: Белолоптиков И.А.

СОГЛАСОВАНО			
ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА	_____	_____	_____
	ПОДПИСЬ	ФИО	ДАТА
ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ИНСТИТУТА	_____	_____	_____
	ПОДПИСЬ	ФИО	ДАТА
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР	_____	_____	_____
	ПОДПИСЬ	ФИО	ДАТА
ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ	_____	_____	_____
	ПОДПИСЬ	ФИО	ДАТА
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ	_____	_____	_____
	ПОДПИСЬ	ФИО	ДАТА
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ	_____	_____	_____
	ПОДПИСЬ	ФИО	ДАТА
РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ	_____	_____	_____
	ПОДПИСЬ	ФИО	ДАТА
РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА	_____	_____	_____
	ПОДПИСЬ	ФИО	ДАТА
ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ	_____	_____	_____
	ПОДПИСЬ	ФИО	ДАТА

# Научный отчет

## Аннотация

Нейтринный телескоп Байкал-ГВД изучает самые бурные процессы во Вселенной, которые разгоняют заряженные частицы до высочайших энергий, далеко за пределами досягаемости лабораторных экспериментов на Земле. Эти процессы должны сопровождаться испусканием нейтрино. Большой объем детектирования в сочетании с высоким угловым и энергетическим разрешением и умеренными фоновыми условиями в пресной озерной воде позволяют эффективно изучать диффузный поток нейтрино и нейтрино от отдельных астрофизических объектов, как излучающих постоянно, так и вспыхивающих. Наши результаты сопоставляются с результатами классических астрономических наблюдений, а также с наблюдениями рентгеновского и гамма-излучения. В ходе исследований, высокоэнергетический диффузный поток астрофизических нейтрино, который был обнаружен IceCube, с использованием трекоподобных и каскадных событий, был подтвержден данными Байкал-ГВД.

## Основные научные результаты

С вводом в эксплуатацию двух новых кластеров в апреле 2022 года рабочий объем Байкальского глубоководного нейтринного телескопа достиг значения  $\approx 0,4$  куб. км для задачи регистрации событий от высокоэнергетических нейтрино (свыше 100 ТэВ).

Детектор содержит 10 кластеров глубоководных гирлянд регистрирующей и управляющей аппаратуры (2916 оптических модулей) и является крупнейшим нейтринным телескопом в Северном полушарии. В феврале-марте 2023 года начнется развертывание еще двух кластеров. В 2022 году около 700 оптических модулей были собраны для установки в 2023 году. Коллаборация собирается установить еще два новых кластера при благоприятных внешних условиях (погода и лед). На рисунке 8 показана инфо-графика прогресса строительства детектора.

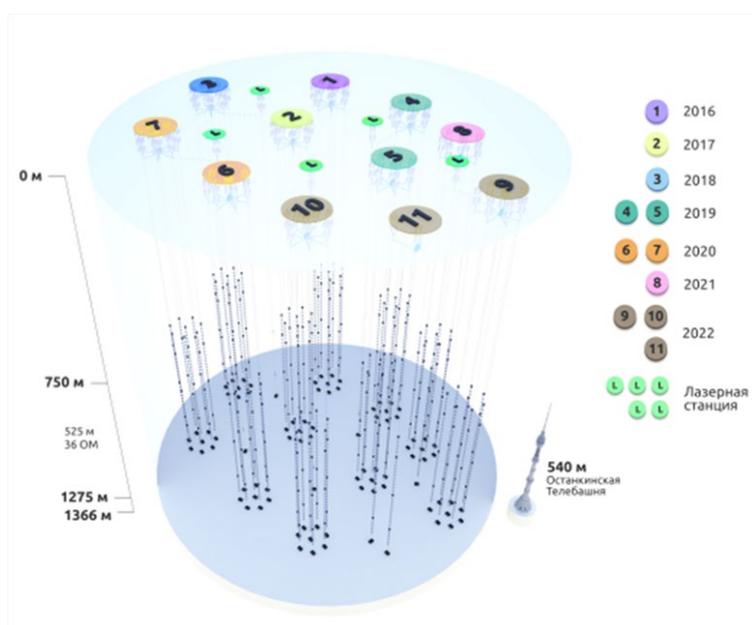


Рис. 7: Байкал-ГВД в 2022 г. Детектор состоит из массива 2916 оптических модулей.

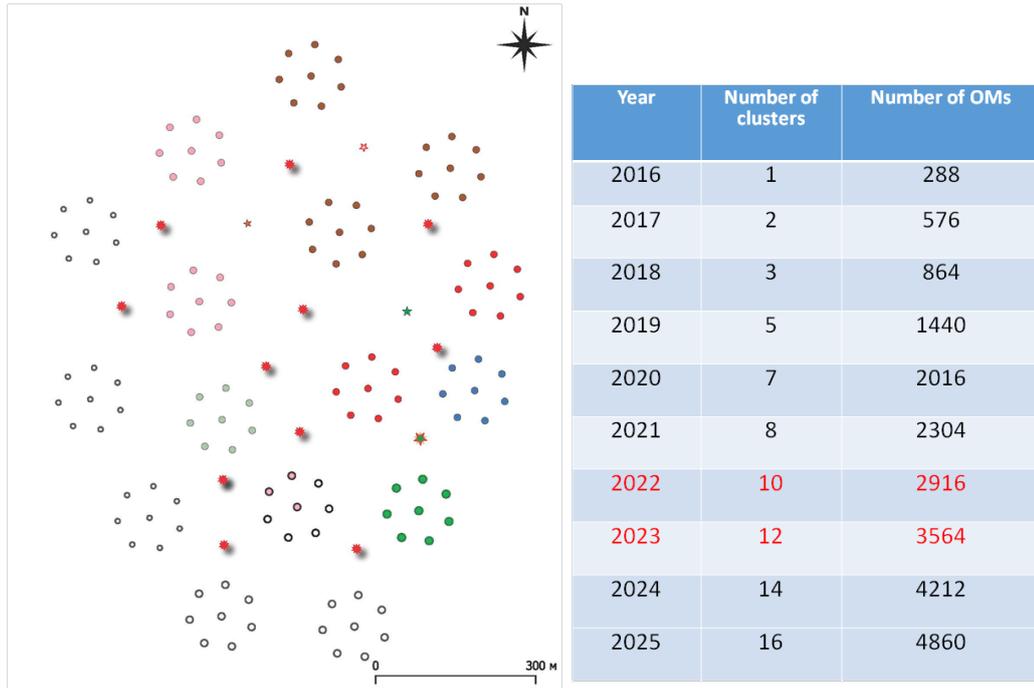


Рис. 8: Процесс создания Байкал-ГВД в 2016-2025 гг.

При анализе данных, полученных во время работы детектора в конфигурациях 2018 - 2021 годов, было выделено 11 каскадных событий с энергией более 15 ТэВ, пришедших из-под горизонта, инициированных нейтрино астрофизической природы, что на доверительном уровне  $3\sigma$  подтверждает результаты первого наблюдения потока высокоэнергетических астрофизических нейтрино на антарктическом детекторе IceCube.

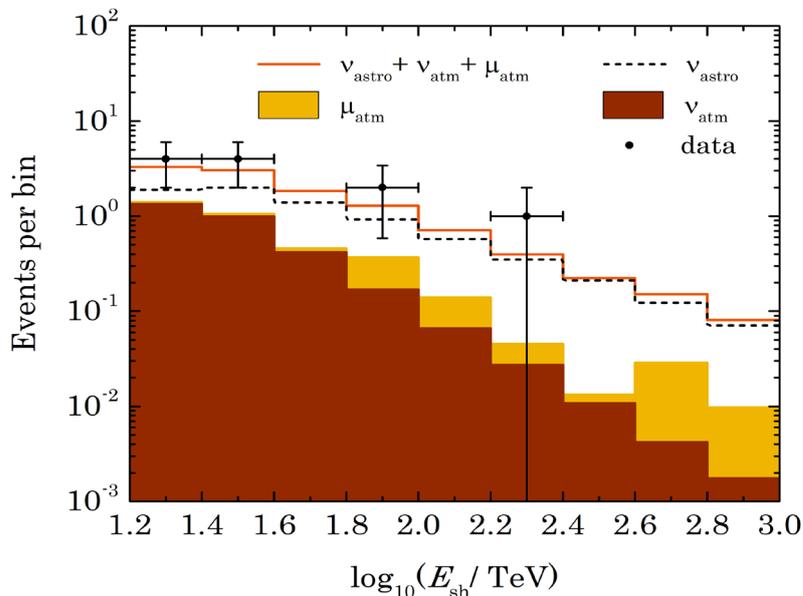


Рис. 9: Энергетические распределения экспериментальных и теоретически ожидаемых событий при анализе каскадных событий из-под горизонта: экспериментальные события - черные точки; распределение событий, ожидаемых от диффузного потока нейтрино астрофизической природы с параметрами, полученными из данных Байкал-ГВД за 2018-2021 годы - пунктирная гистограмма; фоновые события от атмосферных мюонов и атмосферных нейтрино - желтые и коричневые закрашенные области; общее число ожидаемых и фоновых событий - оранжевая гистограмма.

Результаты измерений потока диффузных нейтрино с помощью нейтринного телескопа Байкал-ГВД только что были опубликованы [*Physical Review D* 107.4, 2023].

## Участие ОИЯИ

Сотрудники ОИЯИ играют значительную роль во всех ключевых частях эксперимента:

- Сборка и проверка ОМ и стрингов ОМ;
- Участие в кампаниях по зимнему развертыванию/обслуживанию телескопа;
- Логистика;
- Архивация данных, первичная обработка и анализ;
- Калибровка детектора и обработка данных;
- Системы дистанционного управления и мониторинга детектора;
- Моделирование;
- On-line программное обеспечение;
- Разработка новых методов селекции и реконструкции событий;
- Анализ данных в отношении высокоэнергетических нейтрино и нейтрино от аннигиляции темной материи, получение физических результатов.

Один из основных объектов строительства Байкал-ГВД: линия для сборки ОМ была создана в ОИЯИ (рис. 10). Кроме того в ОИЯИ также недавно были подготовлены дополнительные установки для длительных испытаний компонентов детектора (стрингов).



Рис. 10: Линия по сборке оптических модулей.

В месте проведения эксперимента, на оз. Байкал, ОИЯИ играет важную роль в создании общей экспериментальной инфраструктуры, которая включает средства для развертывания и обслуживания детектора, набора данных, логистики и сетевого взаимодействия, выделения персонала для обслуживания, отладки и создания установки.

## Публикации (последние 5 лет)

- Allakhverdyan, V.A.. "Diffuse neutrino flux measurements with the Baikal-GVD neutrino telescope." *Physical Review D* 107.4, 2023, ISSN 2470-0010, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.107.042005>
- Avrorin, A.V.. "Deep-Underwater Cherenkov Detector in Lake Baikal." *Journal of Experimental and Theoretical Physics* 134.4, 2022, pp. 399-416., ISSN 1063-7761, <https://doi.org/10.1134/S1063776122040148>
- Safronov, G.. "Performance of the muon track reconstruction with the Baikal-GVD neutrino telescope." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Allakhverdyan, V.A.. "The Baikal-GVD neutrino telescope: search for high-energy cascades." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Allakhverdyan, V.A.. "Positioning system for Baikal-GVD." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Kopański, K.. "Method and device for tests of the laser optical calibration system for the Baikal-GVD underwater neutrino Cherenkov telescope." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Allakhverdyan, V.A.. "Data Quality Monitoring system of the Baikal-GVD experiment." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Allakhverdyan, V.A.. "Technique for suppression of background cascades produced by atmospheric muon bundles in the Baikal-GVD." *Journal of Instrumentation* 17.2, 2022, ISSN 1748-0221, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/02/C02013>
- Garre, S. Alves. "ANTARES offline study of three alerts after Baikal-GVD follow-up found coincident cascade neutrino events." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Allakhverdyan, V.A.. "Experimental string with fiber optic data acquisition for Baikal-GVD." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Allakhverdyan, V.A.. "Time synchronization of Baikal-GVD clusters." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Allakhverdyan, V.A.. "Methods for the suppression of background cascades produced along atmospheric muon tracks in the Baikal-GVD." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Allakhverdyan, V.A.. "The Baikal-GVD neutrino telescope as an instrument for studying Baikal water luminescence." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Allakhverdyan, V.A.. "An efficient hit finding algorithm for Baikal-GVD muon reconstruction." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Ryabov, E.. "Monitoring of optical properties of deep lake water." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Allakhverdyan, V.A.. "Automatic data processing for Baikal-GVD neutrino observatory." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Allakhverdyan, V.A.. "Development of the Double Cascade Reconstruction Techniques in the Baikal-GVD Neutrino Telescope." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Allakhverdyan, V.A.. "Observations of track-like neutrino events with Baikal-GVD." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Allakhverdyan, V.A.. "Multi-messenger and real-time astrophysics with the Baikal-GVD telescope." *Proceedings of Science* 395, 2022, ISSN 1824-8039
- Avrorin, A.D.. "High-Energy Neutrino Astronomy and the Baikal-GVD Neutrino Telescope." *Physics of Atomic Nuclei* 84.4, 2021, pp. 513-518., ISSN 1063-7788, <https://doi.org/10.1134/S1063778821040062>
- Allakhverdyan, V.A.. "Measuring muon tracks in Baikal-GVD using a fast reconstruction algorithm." *European Physical Journal C* 81.11, 2021, ISSN 1434-6044, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09825-y>
- Avrorin, A.V.. "High-Energy Neutrino Follow-up at the Baikal-GVD Neutrino Telescope." *Astronomy Letters* 47.2, 2021, pp. 94-104., ISSN 1063-7737, <https://doi.org/10.1134/S1063773721020018>
- Avrorin, A.D.. "The optical noise monitoring systems of the Lake Baikal environment for the Baikal-GVD telescope." *Proceedings of Science* 358, 2021, ISSN 1824-8039

Allakhverdyan, V.A.. "Deep-Water Neutrino Telescope in Lake Baikal." *Physics of Atomic Nuclei* 84.9, 2021, pp. 1600-1609., ISSN 1063-7788, <https://doi.org/10.1134/S1063778821090064>

Avrorin, A.D.. "Search for cascade events with Baikal-GVD." *Proceedings of Science* 358, 2021, ISSN 1824-8039

Avrorin, A.D.. "The Baikal-GVD detector calibrations." *Proceedings of Science* 358, 2021, ISSN 1824-8039

Dik, V.Y.. "Follow-up of the IceCube alerts with the Baikal-GVD telescope." *Journal of Instrumentation* 16.11, 2021, ISSN 1748-0221, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/11/C11008>

Allakhverdyan, V.A.. "Time synchronization system of Baikal-GVD." *Journal of Instrumentation* 16.9, 2021, ISSN 1748-0221, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/09/C09003>

Avrorin, A.D.. "Baikal-GVD: Status and first results." *Proceedings of Science* 390, 2021, ISSN 1824-8039

Avrorin, A.D.. "Neutrino Telescope in Lake Baikal: Present and Future." *Proceedings of Science* 358, 2021, ISSN 1824-8039

Avrorin, A.D.. "A positioning system for Baikal-GVD." *Proceedings of Science* 358, 2021, ISSN 1824-8039

Avrorin, A.D.. "The inter-cluster time synchronization systems within the Baikal-GVD detector." *Proceedings of Science* 358, 2021, ISSN 1824-8039

Avrorin, A.D.. "The Baikal-GVD neutrino telescope: First results of multi-messenger studies." *Proceedings of Science* 358, 2021, ISSN 1824-8039

Allakhverdyan, V.A.. "Method and portable bench for tests of the laser optical calibration system components for the Baikal-GVD underwater neutrino Cherenkov telescope." *Journal of Instrumentation* 16.12, 2021, ISSN 1748-0221, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/12/C12011>

Allakhverdyan, V.A.. "Luminescence of Baikal water as a dynamic background of the Baikal-GVD Neutrino Telescope." *Journal of Instrumentation* 16.11, 2021, ISSN 1748-0221, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/11/C11011>

Allakhverdyan, V.A.. "Proposal for fiber-optic data acquisition system for Baikal-GVD." *Journal of Instrumentation* 16.11, 2021, ISSN 1748-0221, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/11/C11006>

Avrorin, A.V.. "Calibrating the Measuring Channels of the Baikal-GVD Neutrino Telescope." *Instruments and Experimental Techniques* 63.4, 2020, pp. 551-560., ISSN 0020-4412, <https://doi.org/10.1134/S0020441220040107>

Sinegovsky, S.I.. "Prompt atmospheric neutrinos in the quark–gluon string model." *European Physical Journal C* 80.1, 2020, ISSN 1434-6044, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7547-0>

Avrorin, A.D.. "BAIKAL-GVD: The New-Generation Neutrino Telescope in Lake Baikal." *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 83.8, 2019, pp. 921-922., ISSN 1062-8738, <https://doi.org/10.3103/S1062873819080057>

Avrorin, A.D.. "Search for cascade events with Baikal-GVD." *Proceedings of Science* 358, 2019, ISSN 1824-8039

Avrorin, A.D.. "Data quality monitoring system in the baikal-gvd 2 experiment." *Proceedings of Science* 358, 2019, ISSN 1824-8039

Avrorin, A.D.. "Recent progress of the Baikal-GVD project." *Proceedings of Science* 364, 2019, ISSN 1824-8039

Avrorin, A.D.. "Data quality monitoring system in the Baikal-GVD experiment." *Proceedings of Science* 358, 2019, ISSN 1824-8039

Avrorin, A.D.. "The Baikal-GVD neutrino telescope: First results of multi-messenger studies." *Proceedings of Science* 358, 2019, ISSN 1824-8039

Avrorin, A.D.. "The optical noise monitoring systems of the Lake Baikal environment for the Baikal-GVD telescope." *Proceedings of Science* 358, 2019, ISSN 1824-8039

Avrorin, A.D.. "A positioning system for Baikal-GVD." *Proceedings of Science* 358, 2019, ISSN 1824-8039

Avrorin, A.D.. "The inter-cluster time synchronization systems within the Baikal-GVD detector." *Proceedings of Science* 358, 2019, ISSN 1824-8039

Avrorin, A.D.. "The Baikal-GVD detector calibrations." *Proceedings of Science* 358, 2019, ISSN 1824-8039

Avrorin, A.D.. "Neutrino telescope in Lake Baikal: Present and future." *Proceedings of Science* 358, 2019, ISSN 1824-8039

Sinegovsky, S.. "The atmospheric neutrino flux from decays of charmed particles." *Journal of Physics: Conference Series* 1181.1, 2019, ISSN 1742-6588, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1181/1/012055>

Avrorin, A.D.. "Baikal-GVD: Status and prospects." *EPJ Web of Conferences* 191, 2018, ISSN 2101-6275, <https://doi.org/10.1051/epjconf/201819101006>

Avrorin, A.D.. "Search for High-Energy Neutrinos from GW170817 with the Baikal-GVD Neutrino Telescope." *JETP Letters* 108.12, 2018, pp. 787-790., ISSN 0021-3640, <https://doi.org/10.1134/S0021364018240025>

### **Конференции (2021-2022) с участием сотрудников ОИЯИ:**

#### **2021:**

Very Large Volume Neutrino Telescope Workshop, <https://indico.ific.uv.es/event/3965/>

Б. Шайбонов, Ю. Яблокова, Т. Елжов, М. Сороковиков, Г. Сафронов, И. Белолаптиков

37th International Cosmic Ray Conference, <https://icrc2021.desy.de/>

Б. Шайбонов, М. Сороковиков, Г. Сафронов, И. Белолаптиков, Р. Дворниcki

#### **2022:**

14th International School on Neutrino Physics and Astrophysics, Sarov, June 18-23 2022, Д. Сеитова

37-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, 27 июня - 2 июля, 2022, М.

Сороковиков, В. Дик

The 27th European Cosmic Ray Symposium (ECRS 2022), Nijmegen, the Netherlands (online participation), 25-29 июля 2022, В. Дик.

The IV International Scientific Forum "Nuclear science and Technologies", Д. Сеитова

### **Гранты ОИЯИ.**

**Конкурс для молодых ученых и специалистов ОИЯИ (2021-2023):** суммарно 8 грантов за три года: Д. Сеитова, М. Сороковиков, М. Колбин (дважды), А. Сиренко, Н. Горшков, М. Круглов, С. Шевченко

#### **Руководитель темы**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2023 г.

#### **Руководитель проекта (шифр проекта)**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2023 г.