

*В. А. Бедняков, Г. В. Домогацкий, В. А. Матвеев, В. А. Рубаков*

## Первый кластер глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD вступил в строй

В первых числах апреля 2015 г. учеными Института ядерных исследований РАН (Троицк) и Объединенного института ядерных исследований, а также ряда российских научных организаций, входящих в коллаборацию «Байкал», был развернут и введен в эксплуатацию уникальный экспериментальный комплекс — глубоководный нейтринный телескоп мультимегатонного масштаба «Дубна» на озере Байкал. Он является первым кластером создаваемого нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD (Gigaton Volume Detector). Детектор предназначен для исследования природного потока нейтрино высоких энергий.

Нейтрино, пройдя сквозь толщу Земли, может с некоторой вероятностью провзаимодействовать в воде озера Байкал и породить каскад заряженных частиц. Черенковский свет от заряженных частиц распространяется в воде озера и регистрируется оптическими мо-

дулями установки. Кластер «Дубна» содержит в своем составе 192 оптических модуля, размещенных на восьми вертикальных гирляндах длиной 345 м каждая и погруженных на глубину до 1300 м. Это один из двух наиболее мощных детекторов нейтрино высоких энергий в Северном полушарии и один из трех наиболее крупных детекторов нейтрино в мире. Следующим этапом развития проекта является последовательное увеличение объема телескопа за счет развертывания новых кластеров. К 2020 г. планируется создание установки, состоящей из 10–12 кластеров общим объемом порядка  $0,5 \text{ км}^3$ , сопоставимым с чувствительным объемом мирового лидера — телескопа IceCube для регистрации нейтрино высоких энергий астрофизической природы. Ожидается, что вторая очередь телескопа будет содержать 27 кластеров общим объемом порядка  $1,5 \text{ км}^3$ .

*V.A. Bednyakov, G.V. Domogatsky, V.A. Matveev, V.A. Rubakov*

## The First Cluster of the Deep Underwater Neutrino Telescope Baikal-GVD Has Been Launched

In early April 2015, scientists of the Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences (Troitsk) and the Joint Institute for Nuclear Research, together with Russian scientific organizations — members of the Baikal collaboration, deployed and put into operation a unique experimental complex — the deep underwater neutrino telescope of multi-megaton scale “Dubna” in Lake Baikal. It is the first cluster of the cubic kilometer scale neutrino telescope Baikal-GVD (Gigaton Volume Detector). The detector is designed for research of the natural neutrino flux of high energy.

Having passed through earth, the neutrino can, with some probability, interact in the water of Lake Baikal and generate a cascade of charged particles. Cherenkov radiation from charged particles spreads in the water of the lake and is detected with optical modules of the setup. The cluster “Dubna” contains 192 optical modules positioned on eight vertical bunches, each 345 m long deep down to

1300 m. The cluster is one of the two most powerful high-energy neutrino detectors in the Northern hemisphere and of the three largest neutrino detectors in the world. The next stage of the project development is the gradual extension of the telescope volume by deploying new clusters. It is planned to develop by 2020 a facility consisting of 10–12 clusters with the total volume of about  $0.5 \text{ km}^3$  that will be comparable to the sensitive volume of the world leader — the experiment IceCube to detect astrophysical neutrinos. It is expected that the second line of the telescope will contain 27 clusters with the total volume of about  $1.5 \text{ km}^3$ .

In the ensemble of elementary particles for today the neutrino occupies the position of one of its lightest members and for recent decades has firmly secured the reputation of an “extreme intriguer”. The unique character of this particle as a messenger carrying information about processes that take place in the Universe is determined by its superweak interaction with matter. The studies of this flux

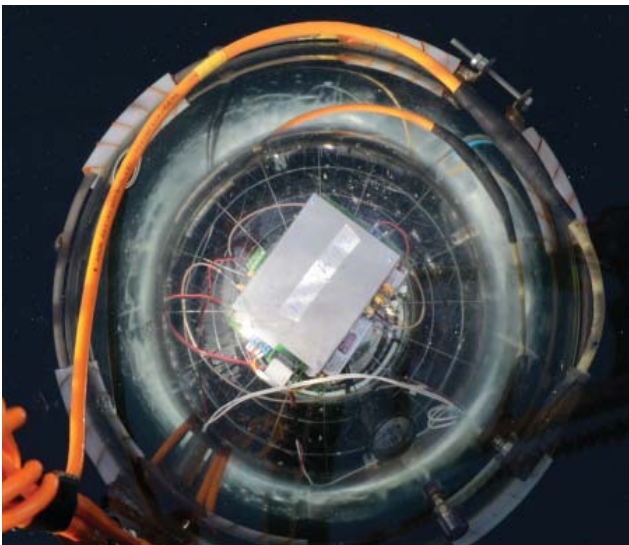


Группа участников работ по вводу в эксплуатацию глубоководного нейтринного телескопа мультимегатонного масштаба «Дубна» на озере Байкал

A team of participants to launch the deep underwater neutrino telescope of the multi-megaton scale “Dubna” at Lake Baikal

В ансамбле известных на сегодня элементарных частиц нейтрино занимает позиции одного из легчайших его участников и прочно закрепило за собой в последние десятилетия статус величайшей «интриганки». Уникальность этой частицы, как носителя информации о процессах, протекающих во Вселенной, обусловлена ее сверхслабым взаимодействием с веществом.

Исследование природного потока нейтрино в различных энергетических диапазонах способно дать ключ к пониманию ранних стадий эволюции Вселенной, процессов формирования химических элементов, механизма эволюции массивных звезд и взрывов сверхновых, пролить свет на проблему темной (невидимой) материи, на состав и внутреннее строение Солнца сегодня и в доста-



Оптический модуль кластера нейтринного телескопа Baikal-GVD

An optical module of the Baikal-GVD neutrino telescope cluster

structure of one of the objects that are most difficult to be studied — the Planet Earth.

The detection of neutrino at Lake Baikal will allow scientists to understand high-energy processes that occur in far astrophysical sources, determine the origin of space particles of the highest detected energy, discover new properties of elementary particles, and learn more about the structure and evolution of the Universe on the whole.

The idea to register elementary particles at large-scale Cherenkov detectors in natural transparent media was expressed for the first time in the early 1960s by the outstanding Soviet scientist M. Markov. At the suggestion of A. Chudakov the method of deep-underwater detection was started to be developed, with Lake Baikal considered as a testing range and a site for future large-scale neutrino telescopes. The choice of Lake Baikal was determined by high transparency of deep fresh water, the depth of the lake, the ice cover that allowed the work to install deep underwater equipment during two winter months.

in various energy ranges can give us clues to understanding of early stages of the Universe evolution, processes of chemical elements' formation, the evolution mechanism of massive stars and Supernova explosions, shed light on the problem of dark (invisible) matter, the composition and inner structure of the Sun today and in the distant Past, and even advance in our understanding of the problem of inner

1 October 1980, when a laboratory of high-energy neutrino astrophysics headed by G. Domogatsky was established at the Institute for Nuclear Research, AS USSR (now INR RAS), can be regarded the start of the Baikal neutrino

точно удаленном прошлом и даже продвинуться в понимании проблемы внутреннего строения одного из наиболее трудных для изучения объектов — планеты Земля.

Регистрация нейтрино на Байкале позволит понять высокоэнергичные процессы, протекающие в далеких астрофизических источниках, установить происхождение космических частиц самых высоких когда-либо зарегистрированных энергий, открыть новые свойства элементарных частиц и узнать много нового об устройстве и эволюции Вселенной в целом.

Идея регистрации элементарных частиц на крупномасштабных черенковских детекторах в естественных прозрачных средах была впервые высказана в начале 60-х годов прошлого века выдающимся советским ученым М. А. Марковым. По предложению А. Е. Чудакова в СССР началась разработка метода глубоководного детектирования, ориентирующаяся на озеро Байкал как на полигон для испытаний и место развертывания будущих крупномасштабных нейтринных телескопов. Выбор Байкала был обусловлен высокой прозрачностью пресных глубинных вод, глубиной озера, наличием ледового покрова, позволяющего в течение двух зимних месяцев вести монтаж глубоководной аппаратуры.

Датой начала байкальского нейтринного эксперимента можно считать 1 октября 1980 г., ког-

да в Институте ядерных исследований АН СССР (ныне ИЯИ РАН) была создана Лаборатория нейтринной астрофизики высоких энергий под руководством Г. В. Домогацкого, ставшая впоследствии ядром байкальской коллаборации, в состав которой на разных этапах входили Объединенный институт ядерных исследований (Дубна), Иркутский государственный университет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, исследовательский центр DESY-Zeuthen (Германия), Нижегородский государственный технический университет, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет и ряд других научно-исследовательских организаций России, Венгрии, Германии, Чехии, Словакии. В настоящее время на стадии обсуждения участие краковского Института ядерной физики (Польша).

В период с 1993 по 1998 г. на Байкале был развернут первый в мире глубоководный нейтринный телескоп HT200, содержащий 192 фотодетектора, сгруппированных в восемь вертикальных гирлянд, размещенных на глубине 1100–1200 м и охватывающих 100 000 м<sup>3</sup> пресной воды. Уже из набора экспериментальных данных 1994 г. были выделены первые в мировой практике глубоководных и подледных экс-

periment. Later it became the core of the Baikal collaboration that included in different periods the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna), Irkutsk State University, Moscow State University after M. Lomonosov, the research centre DESY-Zeuthen (Germany), the Nizhni Novgorod State Technical University, the St. Petersburg State Marine Technical University, and other scientific research organizations of Russia, Hungary, Germany, the Czech Republic, and Slovakia. Today the participation of the Cracow Institute for Nuclear Physics (Poland) is under discussion.

During 1993–1998 the world's first deep underwater neutrino telescope HT200 was constructed; it contained 192 photodetectors grouped into eight vertical bunches placed at the depth of 1100–1200 m overlapping 100 000 m<sup>3</sup> of fresh water. The experimental data of 1994 already showed neutrino events that were the first in the international practice of deep underwater and subglacial experiments. A wide programme of scientific research was implemented and the most significant results at that time were obtained in neutrino search from local sources, the diffuse neutrino flux. Restrictions were obtained for the value of magnetic monopole flux and muon flux from the dark matter particles' decay in the centre of the Earth and the Sun.

The successful operation of the HT200 neutrino telescope for over a decade and the data obtained have shown the effectiveness of the deep underwater neutrino detection method in fresh water of Lake Baikal. The next stage is the work-out of the project for a telescope of a new generation — Baikal-GVD — with a volume of water mass about 1 km<sup>3</sup>. During 2006–2010 samples of all basic elements and the Baikal-GVD telescope system were designed, manufactured, and tested. The telescope will have a module structure that is formed from functionally independent setups — clusters of vertical strings of optical modules. The module structure of the telescope will allow data acquisition at early stages of the facility construction and provide prospects of practically unlimited increase of its volume. The choice of the telescope structure will also allow adjustment of its configuration due to various changes of scientific priorities at different periods.

The idea of deep underwater detection in its ice modification, when instead of a natural reservoir the photodetectors are placed into transparent Antarctic ice, led to the development of a neutrino telescope IceCube at the South Pole, of 1 km<sup>3</sup> (leading participants are the USA, Germany, and Sweden), that detected in 2010–2013 for the first time

периментов события от нейтрино. Была реализована широкая программа научных исследований, и получены одни из наиболее значимых для своего времени результатов в задачах поиска нейтрино от локальных источников, диффузного потока нейтрино, получены ограничения на величину потока магнитных монополей и потока мюонов от распада частиц темной материи в центре Земли и Солнца.

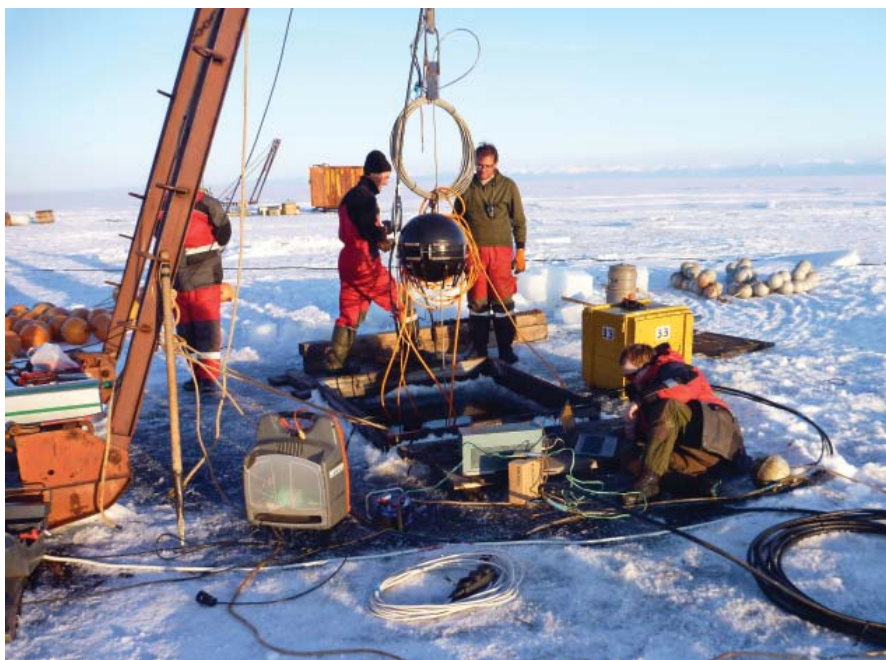
Успешная эксплуатация на протяжении более десяти лет нейтринного телескопа NT200 и результаты анализа полученных на нем данных доказали эффективность метода глубоководной регистрации нейтрино в пресной воде озера Байкал. Следующим шагом стала разработка проекта телескопа нового поколения Baikal-GVD с просматриваемым объемом водной массы порядка  $1 \text{ км}^3$ . В течение 2006–2010 гг. были разработаны, изготовлены и испытаны в естественных условиях образцы всех базовых элементов и систем телескопа Baikal-GVD. Телескоп будет иметь модульную структуру, формируемую из функционально независимых установок — кластеров вертикальных гирлянд оптических модулей. Модульная структура телескопа позволяет вести набор экспериментальных данных уже на ранних этапах развертывания установки и обеспечивает перспективу практически неограниченного наращивания его объема. Выбранная структура телескопа позволит также изменять его

конфигурацию по мере изменения со временем научных приоритетов.

Идея глубоководной регистрации в ледовой модификации, когда вместо естественного водоема фотодетекторы погружаются в прозрачный антарктический лед, привела к созданию на Южном полюсе нейтринного телескопа IceCube объемом  $1 \text{ км}^3$  (ведущие участники коллаборации — США, Германия, Швеция), на котором в 2010–2013 гг. были впервые зарегистрированы «астрофизические» нейтрино высоких энергий, т.е. нейтрино, родившиеся за пределами Солнечной системы. Регистрация этих нейтрино, ознаменовавшая рождение нейтринной астрономии, поставила на повестку дня необходимость создания нейтринных телескопов близкой мощности в Северном полушарии, с тем чтобы вести исследование источников нейтрино высоких энергий по всей небесной сфере.

ОИЯИ, уже имеющий многолетний опыт участия в байкальском нейтринном проекте, принял решение рассматривать работу по созданию крупномасштабного нейтринного телескопа Baikal-GVD в качестве одного из своих научных приоритетов. В 2011 г. начался заключительный этап комплексных *in situ* испытаний элементов и систем телескопа, завершившийся в 2015 г. созданием глубоководной установки «Дубна» — первого кластера нейтринного телескопа Baikal-GVD.

Монтаж гирлянды оптических модулей нейтринного телескопа Baikal-GVD



Assembling a string of optical modules of the Baikal-GVD neutrino telescope

“astrophysical” neutrinos of high energy, i.e., the neutrinos generated beyond the solar system. The registration of these neutrinos marked the birth of neutrino astronomy and brought about the necessity to develop high-capacity neutrino telescopes in the Northern hemisphere to conduct studies of high-energy neutrino sources over the whole celestial sphere.

JINR had many years’ experience of being a participant of the Baikal neutrino project, so a decision was taken at the Institute to regard activities for development of the large-scale neutrino telescope Baikal-GVD as one of its scientific priorities. In 2011 the final stage of complex *in-situ* testing started that finished in 2015 with the development of the deep underwater facility “Dubna” — the first cluster of the neutrino telescope Baikal-GVD.