НЕЙТРИННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ НЕЙТРИНО И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДЛЕДНИКОВЫХ ОЗЁР АНТАРКТИДЫ

А. А. Захаров



НЕЙТРИННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ НЕЙТРИНО И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДЛЕДНИКОВЫХ ОЗЁР АНТАРКТИДЫ

А. А. Захаров

Гатчина
2026

УДК 539.123; 536.24; 622.24; 574; 579
ББК 22.3

Захаров А. А. Нейтринные детекторы нового поколения для изучения астрофизических нейтрино и новые возможности для исследования подледниковых озёр Антарктиды. – Гатчина. Издательство НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2026. – 239 с.; 130 ил.

В книге представлена концепция нейтринного телескопа Vostok, предназначенного для регистрации нейтрино высоких и сверхвысоких энергий в уникальных низкофоновых условиях Центральной Антарктиды. Реализация проекта основана на разработанной экологически чистой технологии скоростного теплового бурения льда и проникновения в подледниковое озеро. Нейтринный телескоп включает оптический детектор геометрическим объёмом 21 км³, размещённый в подледниковом озере Восток, и акустический детектор объёмом порядка 100 км³, расположенный в леднике над озером. Экранирование многокилометровой толщей льда, современные высокочувствительные сенсоры, большой объём детекторов и сочетание двух типов детекторов обеспечат новые экспериментальные возможности для изучения нейтрино высоких и сверхвысоких энергий. Создание телескопа одновременно позволит получить и новые возможности для проведения исследований по поиску жизни в экстремальных условиях подледниковых озёр Антарктиды. Нейтринный телескоп на базе внутриконтинентальной станции «Восток» сделает её ведущим научным центром в области экспериментальной физики высоких энергий.

Научный редактор – доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН *А. П. Серебров*

ISBN 978-5-86763-506-0
© А. А. Захаров, 2026
© НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2026

Содержание

Введение 6

Часть I. Нейтрино высоких и сверхвысоких энергий 15
Глава 1. Нейтрино 15
Роль нейтрино в исследованиях Вселенной 15
Источники нейтрино сверхвысоких энергий 26
Взаимодействие нейтрино с веществом 28

Часть II. Нейтринный детектор с оптическим методом детектирования в подледниковом озере Восток 33
Глава 1. Концепция нейтринного детектора в озере Восток 33
Глава 2. Нейтринные телескопы с детекторами большого объёма 37
Нейтринный детектор KM3NeT ORCA 38
Нейтринный детектор KM3NeT ARCA 41
Нейтринный детектор Baikal-GVD 43
Нейтринные детекторы телескопа IceCube 47
Нейтринный детектор P-ONE 52
Нейтринный детектор TRIDENT 55
Нейтринные детекторы NEON и HUNT 57
Оптические свойства среды нейтринных детекторов 58
Глава 3. Нейтринный детектор в озере Восток 62
Подледниковое озеро Восток 62
Преимущества размещения нейтринного детектора в подледниковом озере 66
Оптическая решётка нейтринного детектора 71
Скважины для нейтринного детектора 75
Размещение нейтринного детектора в подледниковом озере 79
Фотоэлектронные и кремниевые фотоумножители 82
Новые возможности оптического метода детектирования нейтрино при использовании кремниевых фотоумножителей 90
Изучение места размещения нейтринного детектора 96

Часть III. Нейтринный детектор с акустическим методом детектирования внутри ледника над озером Восток 99
Глава 1. Концепция нейтринного детектора внутри ледника ... 99
Глава 2. Экспериментальные акустические установки для детектирования высокоэнергетических нейтрино 105
Акустические установки для эксперимента SADCO 105
Акустическая установка эксперимента ACoRNE 106
Акустическая установка в озере Байкал 108
Акустическая установка эксперимента SAUND 111
Акустическая установка эксперимента AMADEUS 113
Акустическая система детектора KM3NeT 115
Акустическая установка SPATS 117
Глава 3. Нейтринный детектор внутри ледника 122
Акустический импульс в воде 122
Акустический импульс в леднике 125
Принципиальная схема акустического детектора 128
Пьезоэлектрические датчики 129
Волоконно-оптические датчики 132
Изучение места размещения акустического детектора 134
Установка акустических датчиков 136
Глава 4. Нейтринный телескоп Vostok 137

Часть IV. Технология скоростного бурения и экологически чистого проникновения в подледниковые озёра 139
Глава 1. Способы бурения ледников в Антарктиде 139
Бурение льда колонковым буровым снарядом 141
Сплошное бурение льда электромеханическим снарядом ... 146
Бурение льда роторной буровой установкой 149
Бурение льда горячей водой 151
Бурение льда с помощью гидравлических двигателей 158
Способы бурения применительно к озеру Восток 163
Глава 2. Бурение горячей силиконовой жидкостью 166
Глава 3. Новая технология скоростного экологически чистого бурения 170

Часть V. Поиск жизни в экстремальных условиях подледниковых озёр 184
Глава 1. Изучение подледниковых озёр Антарктиды 184
Биологические исследования озера Восток 184
Отбор проб из подледникового озера 188
Подледниковые озёра Антарктиды 193
Вопросы экологии 195
Глава 2. Палеоклиматические исследования 198
Заключение 203
Список сокращений 209
Перечень иллюстраций 210
Перечень таблиц 216
Литература 217

Введение

Отличительной особенностью поведения нейтрино от других частиц во Вселенной является то, что они, покинув свой источник, движутся прямолинейно, практически не поглощаются и не рассеиваются материей на своём пути, не отклоняются электромагнитными и гравитационными полями. Сложность изучения астрофизических нейтрино высоких и сверхвысоких энергий заключается в очень низких потоках этих частиц и крайне редких взаимодействиях с барионной материей. С целью регистрации событий взаимодействия в статистически достаточном для исследований количестве необходимо иметь нейтринный детектор очень большого объёма с высокой плотностью регистрирующих сенсоров. Для повышения доли нейтринных событий среди других регистрируемых в детекторе событий место расположения детектора должно характеризоваться низким потоком заряженных частиц и низким фоном для регистрируемого сигнала. В случае использования оптического метода детектирования необходима высокая прозрачность среды детектора. Для использования акустического метода положительной характеристикой является слабое затухание акустического сигнала в среде детектора.

В монографии предложены и рассмотрены концептуально новые подходы к созданию детекторов астрофизических нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, использующих оптический и акустический методы детектирования. Детектор, использующий оптический метод детектирования, предлагается разместить в подледниковом озере Восток в Антарктиде, а детектор, использующий акустический метод детектирования, – в леднике толщиной около 4 км, расположенном над озером. Нейтринный телескоп, оснащённый двумя типами детекторов, которые располагаются друг над другом, будет иметь новые, улучшенные возможности для экспериментального изучения астрофизических нейтрино по сравнению с возможностями существующих нейтринных телескопов.

Основное внимание уделяется устройству детекторов, и не затрагиваются вопросы, относящиеся к измерительным системам, методикам обработки сигналов и определению параметров нейтрино по результатам экспериментальных наблюдений.

Для размещения сенсоров оптического нейтринного детектора в озёрной воде разработана технология скоростного бурения и экологически чистого проникновения в подледниковое озеро. Эта технология будет использоваться также для размещения сенсоров акустического детектора в леднике. Новая технология бурения позволит также решить важную научную задачу, связанную с поиском возможных форм жизни в экстремальных условиях изолированного реликтового озера.

В Части I рассмотрена роль нейтрино высоких и сверхвысоких энергий в изучении высокоэнергетических процессов, происходящих во Вселенной. В частности, неисследованным остаётся процесс ускорения заряженных космических частиц до энергий, превышающих ЭэВ. Остаются неизученными такие фундаментальные вопросы, как симметрии Стандартной модели, стабильность нейтрино, тёмная материя, взаимодействие нейтрино с космическим фоном, соотношение ароматов нейтрино, нейтрино-нуклонное сечение и многие другие вопросы. Изучение свойств нейтрино сверхвысоких энергий может привести к фундаментальным открытиям в области физики частиц высоких энергий и приоткрыть дверь в «новую физику» за пределами Стандартной модели.

Одна из задач астрофизики, на которую ориентированы нейтринные детекторы сверхбольших объёмов, – это поиск источников частиц сверхвысоких энергий во Вселенной. Для решения этой задачи необходимо с большой точностью уметь определять направление движения нейтрино. Вторая важнейшая задача – это изучение осцилляций нейтрино сверхвысоких энергий. Для этого необходимо иметь экспериментальную возможность определять аромат этих нейтрино.

При взаимодействии нейтрино со средой возникают акустический импульс, радиоволны и черенковское излучение. Оптический метод детектирования нейтрино, заключающийся в регистрации черенковского излучения, позволяет идентифицировать три аромата нейтрино: электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино. В зависимости от лептонного аромата нейтрино при взаимодействии с нуклонами среды образуются электрон, мюон или тау-лептон, которые движутся в среде, генерируя отличающееся по форме черенковское излучение.

Большое практическое значение имеет существующий опыт создания нейтринных детекторов большого объёма. Рассмотрены особенности и характеристики действующих и проектируемых нейтринных детекторов большого объёма, использующих оптический метод регистрации черенковского излучения в прозрачной среде. К ним относятся нейтринные детекторы KM3Net ORCA, KM3Net ARCA, Baikal-GVD, IceCube, P-ONE, TRIDENT, NEON и HUNT.

В Части II представлена концепция создания нейтринного детектора, использующего оптический метод детектирования в подледниковом озере Восток. Концепция включает три инновационных подхода, которые заключаются в использовании локации с экстремально низким световым фоном и фоном от потока заряженных частиц, применении современных сенсоров для оптического детектирования, использовании новой технологии скоростного бурения льда и экологически чистого проникновения в подледниковое озеро. В совокупности эти три подхода позволят создать нейтринный детектор с превосходными параметрами за счёт сверхбольшого объёма, высокой прозрачности среды, низкого светового фона, надёжного экранирования от потоков атмосферных и солнечных заряженных частиц, использования эффективных оптических сенсоров. Детектор позволит регистрировать лептонный аромат высокоэнергетических нейтрино, включая тау-нейтрино, более точно определять энергию и направление движения нейтрино.

Озеро Восток имеет водный бассейн, достаточный для размещения в нём нейтринного детектора объёмом в десятки кубических километров. В озере отсутствуют течения, которые могут влиять на положение оптических модулей в воде. Слой расположенного над озером льда толщиной около 4 км выполняет роль экрана. Положительным моментом в создании детектора является недавно построенный зимовочный комплекс полярной станции «Восток», который может стать базой для нейтринного телескопа нового поколения.

Сравнение локаций существующих и проектируемых нейтринных детекторов большого объёма с локацией нейтринного детектора в подледниковом озере Восток демонстрирует

преимущества такого размещения детектора. Отрицательный момент, связанный с необходимостью бурения двух глубоких скважин в леднике для монтажа детектора в озере, компенсируется использованием специально разработанной для этой цели технологии скоростного экологически чистого бурения льда.

Взамен используемым в оптических нейтринных детекторах фотоэлектронным умножителям (ФЭУ) с максимальной квантовой эффективностью 35 % предлагается применить современные кремниевые матрицы с квантовой эффективностью выше 70 %. Выпускаемые промышленностью видеокамеры, оснащённые матричными кремниевыми фотоумножителями с высокой квантовой эффективностью и временным разрешением ~ 300 пс, после доработки могут быть применены в оптических модулях подледникового детектора. Оптическая решётка нейтринного детектора объёмом 21 км^3 будет состоять по предварительным оценкам из 469 гирлянд с 3 752 оптическими модулями. Гирлянды с оптическими модулями и поплавками в верхней части крепятся к позиционирующим якорям, установленным на дне озера в определённом порядке.

Оптические модули, оснащённые двумя видеомодулями, способны выполнять мониторинг пространства, ограниченного прозрачностью воды для черенковского света. Использование видеомодулей с матрицами, обладающими высокой квантовой эффективностью регистрации отдельных фотонов, открывает новые возможности для регистрации взаимодействия нейтрино со средой. Один оптический модуль может наблюдать единичный объём, равный ~ 520 000 м^3, если принять эффективную длину затухания света в воде равной 50 м. Новые оптические модули позволят с высокой точностью определять энергию нейтрино, направление движения и лептонный аромат нейтрино высоких и сверхвысоких энергий по характерной форме черенковского света.

Для монтажа и обслуживания нейтринного детектора в озере потребуется бурение в леднике минимум двух скважин, которые заполняются экологически чистой незамерзающей силиконовой жидкостью. Одна скважина используется для транспортных операций по перемещению оборудования, а вторая – необходима для прокладки электрических и информационных кабелей.

Перед началом проектирования нейтринного детектора проводится изучение места его размещения в озере через скважину, полученную методом скоростного экологически чистого бурения. Использование бурового оборудования для проведения исследовательских работ внутри озера позволит не заполнять экспериментальную скважину незамерзающей заливочной жидкостью.

В список исходных данных, необходимых для проектных работ, входят: длина затухания света в результате его поглощения и рассеяния в воде в диапазоне спектра черенковского излучения; температурное поле внутри озера; толщина водного слоя в месте расположения оптических модулей; химический состав воды; скорость и направление течения воды на разных горизонтах; рельеф дна и нижней поверхности ледника; геотермальный тепловой поток; состав и физические свойства озёрного дна.

Сравнительный анализ существующих и проектируемых нейтринных детекторов большого объёма указывает на преимущества размещения нейтринного детектора в подледниковом озере по большинству параметров. Однако численные характеристики детектора могут быть получены только после проведения исследовательских и опытно-конструкторских проектных работ.

В Части III представлена концепция создания внутри ледника над озером Восток нейтринного детектора, использующего акустический метод детектирования. Концепция детектора предполагает размещение акустических сенсоров в леднике толщиной около 4 км. В качестве сенсоров предлагается использовать оптическое волокно. Работа волоконно-оптических сенсоров основана на измерении деформации волокна под воздействием акустической волны методом когерентной рефлектометрии. Распределённые волоконно-оптические сенсоры обеспечат высокую разрешающую способность детектора, которая даст возможность с повышенной точностью реконструировать энергию и направление движения нейтрино сверхвысоких энергий.

Большая дистанция распространения акустического сигнала внутри льда позволит создать эффективный объём детектора порядка 100 км^3 при относительно небольшом количестве скважин для акустической решётки с большим шагом размещения сенсоров. Бурение скважин производится комбинированным тепловым

буровым снарядом, который расплавляет лёд и поддерживает воду в скважине в жидком состоянии. После извлечения теплового бурового снаряда в скважину опускаются акустические сенсоры. После замерзания воды они остаются внутри ледяного массива.

Акустический метод детектирования позволит изучить эффект Грайзена – Зацепина – Кузьмина (ГЗК) и выполнить поиск источников излучения частиц сверхвысоких энергий. С целью изучения существующего опыта создания акустических нейтринных детекторов рассмотрены экспериментальные акустические установки для детектирования высокоэнергетических нейтрино, включая детектор внутри ледника на Южном полюсе. Установлено, что существует большая неопределённость в количественном значении длины затухания акустического сигнала внутри льда. Этот параметр в значительной степени определяет величину шага акустической решётки детектора и, как следствие, количество скважин, необходимых для размещения сенсоров в леднике. Для нейтрино различных энергий выполнены предварительные расчёты величины акустического импульса внутри льда на различном удалении от места взаимодействия нейтрино со средой. В список исходных данных, необходимых для проектирования акустического детектора, входят: длина затухания акустического сигнала для различной частоты; уровень акустического фона внутри ледника; скорость звука внутри льда на разных глубинах; эпюра скорости движения льда по глубине ледника; толщина фирна и льда в границах площади детектора; температурное поле внутри ледника. Все эти параметры подлежат измерению непосредственно в месте предполагаемого размещения акусти-ческого детектора.

Сочетание акустического детектора в леднике с оптическим внутри озера позволит лучше реконструировать события взаимодействия нейтрино сверхвысоких энергий с веществом.

В Части IV представлена технология скоростного бурения и экологически чистого проникновения в подледниковое озеро. Новая технология бурения глубоких скважин в леднике (глубиной до 4 км) является ключевым элементом в создании нейтринных детекторов и исследованиях, связанных с поиском жизни в экстремальных условиях озера Восток.

Представлен обзор существующих способов бурения ледников, которые уже использовались в Антарктиде, и проанализирована возможность их применения для создания скважин к озеру Восток. К этим способам относятся: бурение льда колонковым буровым снарядом; сплошное бурение электромеханическим снарядом; бурение роторной буровой установкой; бурение горячей водой и бурение с использованием гидравлических двигателей. Рассмотренные технологии имеют свои положительные и отрицательные стороны, но все они не отвечают поставленным задачам и экологическим требованиям проникновения в подледниковое озеро.

В связи с этим обстоятельством для бурения ледника была предложена технология скоростного бурения горячей силиконовой жидкостью. Выполненные расчёты показали возможность пробурить глубокую скважину за несколько суток, но для вскрытия озера потребуется другой буровой снаряд, чтобы исключить попадание буровой жидкости в реликтовое озеро.

Чтобы обеспечить экологическую безопасность, была разработана новая технология скоростного экологически чистого бурения и проникновения в подледниковое озеро с помощью комбинированного теплового бурового снаряда. Буровой снаряд состоит из тепловой буровой коронки с электрическим нагревателем и герметичного гибкого трубопровода типа «труба в трубе», в котором по замкнутому контуру циркулирует нагретый теплоноситель. Выполненные расчёты показали, что эта технология позволяет пробурить в леднике скважину глубиной около 4 км за несколько суток с водой из расплавленного льда в скважине, выполняющей роль заливочной жидкости, которая предотвращает смыкание стенок скважины под воздействием давления со стороны ледника. Буровой снаряд с циркулирующим в нём нагретым теплоносителем не даёт воде замёрзнуть в скважине с холодными стенками и позволяет выполнить работы по сбору данных, необходимых для размещения в озере нейтринного детектора, а также провести научные исследования, направленные на поиск форм жизни в экстремальных условиях подледникового озера.

Для поддержания транспортных возможностей ледовой скважины при проведении монтажа и для последующей длительной эксплуатации нейтринного детектора скважина заполняется экологически чистой незамерзающей силиконовой жидкостью.

Часть V посвящена вопросам проведения биологических исследований в экстремальных условиях подледниковых озёр и в первую очередь поиску жизни в озере Восток, доступ к которому остаётся пока закрытым. Приведены результаты биологических исследований кернов льда, извлечённых из скважины над озером в результате многолетнего бурения льда.

Большой научный интерес представляет собой система из сотен подледниковых антарктических озёр, некоторые из которых образуют взаимосвязанные цепи. Относительно недавно осуществлено успешное проникновение в озёра Уилланс и Мерсер в Западной Антарктиде, а предпринятая попытка проникновения в озеро Элсуэрт закончилась неудачей, и проект был закрыт.

Исследования антарктических озёр сталкиваются с проблемами бурения льда и экологическими требованиями. Технические возможности и география проведения этих исследований могут быть существенно расширены за счёт предложенной экологически чистой технологии бурения льда и вскрытия подледниковых озёр. Рассмотрена проблема пробоотбора из озера Восток, которая в первую очередь связана с протяжённостью скважины небольшого диаметра, сохранением экологии озера, высоким давлением на глубине и жёсткими требованиями к процессам отбора проб. Предложена технология отбора воды и осадочных пород из озера.

Особое внимание уделено соблюдению экологических рекомендаций международного Научного комитета по антарктическим исследованиям и вопросам деконтаминации оборудования и научных приборов перед погружением в озеро. Рассмотрены наиболее опасные с экологической точки зрения ситуации, которые могут возникнуть в процессе изучения подледниковых озёр, и меры по их предотвращению.

Новая технология бурения открывает и новые возможности в области палеоклиматических исследований, направленных на поиск древнейшего льда в Антарктиде. Для изучения палеоклимата

Земли используются керны льда, извлечённые из глубинных слоёв ледника. При этом важнейшим требованием для воссоздания непрерывной летописи климата является сохранность стратиграфии слоёв льда. Обнаружение льда возрастом 1,2 млн лет в нижней части ледника над озером Восток подтверждает наличие древнего льда в Антарктиде. На Куполе А, в районе полярной станции «Куньлунь», и на Куполе Б, недалеко от станции «Восток», может залегать лёд с ненарушенной климатической последовательностью возрастом до 1,5 млн лет. Поиск такого льда является важнейшей задачей гляциологов. Необходим метод, который позволит за относительно короткое время определить возраст льда и провести анализ сохранности климатической последовательности слоёв льда до начала извлечения кернов льда, на которое потребуется несколько лет. Достаточно быстро и без использования буровой жидкости в скважине эта задача решается путём установки лазерного спектрометра в нижней части комбинированного теплового бурового снаряда, который позволит совершить проходку всей толщи ледника за несколько суток. Лазерный спектрометр предоставляет необходимую информацию о леднике непосредственно в процессе бурения. Учитывая мобильность буровой установки, за летний сезон может быть сделано несколько поисковых скважин. Это позволит существенно ускорить поиски древнейшего льда с последующим бурением ледника электромеханическим колонковым буровым снарядом.

Обоснованием принципиальной возможности реализации концепции нейтринных детекторов для изучения астрофизических нейтрино служит имеющийся мировой опыт, который содержится в приведённых литературных источниках, а также результаты выполненных предварительных расчётов. С целью наглядного изложения концепции создания нейтринного телескопа нового поколения и новых возможностей для исследования подледниковых озёр текст монографии снабжён 130 иллюстрациями.

Часть I
НЕЙТРИНО ВЫСОКИХ И СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Глава 1. Нейтрино

Роль нейтрино в исследовании Вселенной

Стандартная модель помимо других элементарных частиц включает 6 ароматов лептонов: e^-, μ^-, τ^-, ν_e, ν_μ, ν_τ. Лептоны образуют две группы и три поколения, состоящие из заряженного лептона и нейтрино. В первую группу с зарядом –1 входят электрон, мюон и тау-частица. Ко второй группе с нейтральным зарядом относят электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино (Рис. 1). Заряженные лептоны участвуют в электромагнитном и слабом взаимодействии. Нейтрино участвуют только в слабом взаимодействии. Заряженные лептоны имеют античастицы: позитрон (e^+), положительно заряженный мюон (μ^+) и положительно заряженный тау-лептон (τ^+).

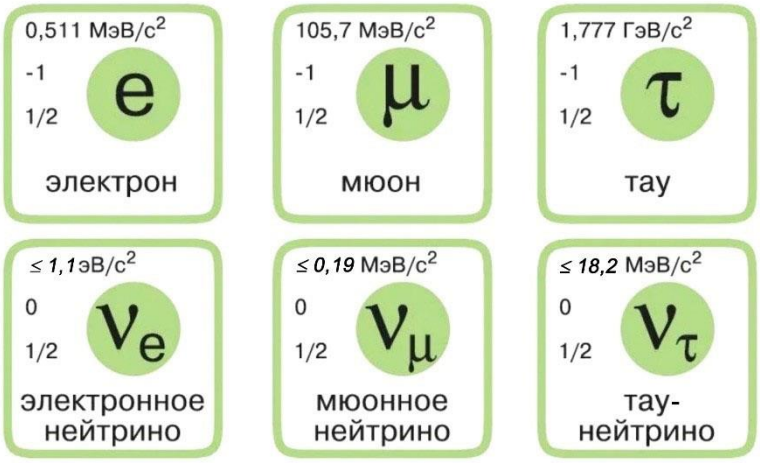


Рис. 1. Лептоны

Нейтрино (ν_e, ν_μ, ν_τ) обладают спином ½ и относятся к левосторонним фермионам с отрицательной спиральностью –1. Антинейтрино ($\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$, $\bar{\nu}_\tau$) обладают спином ½ и являются правосторонними фермионами с положительной спиральностью +1. Текущие верхние пределы масс нейтрино составляют: $m_\nu \leq 1{,}1$ эВ для ν_e, $\bar{\nu}_e$; $m_\nu \leq 0{,}19$ МэВ для ν_μ, $\bar{\nu}_\mu$; $m_\nu \leq 18{,}2$ МэВ для ν_τ, $\bar{\nu}_\tau$ [1]. Основные характеристики лептонов представлены в Табл. 1, 2.

Таблица 1

Основные характеристики заряженных лептонов

Параметр	Электрон	Мюон	Тау-лептон
Масса (МэВ/c^2)	0,511	105,66	1 777
Спин J ($\hbar$)	1/2	1/2	1/2
Электрический заряд (e)	–1	–1	–1
Магнитный момент ($e\hbar/(2mc)$)	1,001	1,001	$1 \pm 0{,}05$
Лептонное число:			
электронное L_e	+1	0	0
мюонное L_μ	0	+1	0
таонное L_τ	0	0	+1
Время жизни	$> 5 \cdot 10^{26}$ лет	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$ с	$2{,}9 \cdot 10^{-13}$ с

Таблица 2

Основные характеристики нейтрино

Параметр	Электронное нейтрино	Мюонное нейтрино	Тау-нейтрино
Масса (МэВ/c^2)	$\leq 1{,}1 \cdot 10^{-6}$	$\leq 0{,}19$	$\leq 18{,}2$
Спин J ($\hbar$)	1/2	1/2	1/2
Электрический заряд (e)	0	0	0
Магнитный момент ($e\hbar/(2mc)$)	$< 10^{-10}$	$< 7 \cdot 10^{-10}$	$< 4 \cdot 10^{-7}$
Лептонное число:			
электронное L_e	+1	0	0
мюонное L_μ	0	+1	0
таонное L_τ	0	0	+1

Ниже показаны реакции, которые приводят к появлению нейтрино:

$$n^\circ \to p^+ + e^- + \bar{\nu}_e,$$
$$p^+ \to n^\circ + e^+ + \nu_e,$$
$$p^+ + e^- \to n^\circ + \nu_e,$$
$$\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu,$$
$$\mu^- \to e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e,$$
$$\mu^+ \to e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e,$$
$$\tau^- \to \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau,$$
$$\tau^+ \to \mu^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_\tau.$$

Поскольку астрофизические нейтрино преодолевают огромные расстояния, они чувствительны даже к мельчайшим эффектам, которые, хотя и не обнаруживаются по отдельности, могут суммироваться и накапливаться до обнаруживаемых уровней во время длительного путешествия к Земле. Состав ароматов высокоэнергетических астрофизических нейтрино, то есть их доля в потоке, – это особенно важный материал для изучения физики нейтрино за пределами Стандартной модели.

Свободное нейтрино, распространяющееся в пространстве, существует в виде суперпозиции собственных состояний фундаментальных масс ν_1, ν_2, ν_3, смешивание которых приводит к появлению трёх ароматов нейтрино: ν_e, ν_μ, ν_τ. Ароматы нейтрино фактически являются проявлениями слабых ядерных состояний.

Предполагается, что нейтрино генерируются в источниках с приблизительным соотношением ароматов $(\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau)_s = (1 : 2 : 0)_s$. На пути астрофизических и космогенных нейтрино к Земле это соотношение меняется $(\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau)_\oplus = (1 : 1 : 1)_\oplus$, однако в действительности соотношение ароматов сильно зависит от энергии нейтрино. Нарушение Лоренц-инвариантности и взаимодействие с тёмной материей могут привести к значительным отклонениям в соотношении ароматов [2, 3]. Астрофизические и космогенные нейтрино служат ключевым объектом изучения процессов изменения аромата вплоть до самых высоких энергий [4–12].

Стандартная модель основана на двух фундаментальных симметриях: симметрии Лоренца и *CPT*-симметрии. Согласно теореме *CPT* любая Лоренц-инвариантная локальная квантовая теория поля с эрмитовым гамильтонианом, подобная Стандартной модели, должна соблюдать *CPT*-симметрию. До сих пор все попытки найти экспериментальные доказательства нарушения Лоренц-инвариантности потерпели неудачу. Однако, поскольку Стандартная

модель считается эффективной теорией поля, симметрия Лоренца, на которой она основывается, может быть не совсем фундаментальной, а может нарушаться при высоких энергиях. Существуют теоретические расширения Стандартной модели, которые содержат дополнительные взаимодействия, нарушающие закон Лоренца. Расширение Стандартной модели является наиболее разработанной эффективной теорией поля такого рода, которая используется для проверки Лоренц-инвариантности. Для нейтрино наличие нарушения Лоренц-инвариантности, возможно, значительно изменяет вероятности перехода ароматов. Для нейтрино высоких энергий это может проявляться в виде отклонений в ароматическом составе потока нейтрино, достигающего Земли.

В стандартном случае, то есть если симметрия Лоренца сохраняется, гамильтониан, управляющий переходами ароматов в вакууме, имеет вид

$$H_{\text{std}} = \frac{1}{2E_\nu} U \text{diag}(0, \Delta m_{21}^2, \Delta m_{31}^2) U^\dagger,$$

где E_ν – энергия нейтрино, $\Delta m_{21}^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$ и $\Delta m_{31}^2 \equiv m_3^2 - m_1^2$ – разности квадратов масс между собственными массовыми состояниями нейтрино, U – матрица смешивания Маки – Накагавы – Сакаты [13]. Матрица параметризуется четырьмя параметрами смешивания: тремя углами смешивания, θ_{12}, θ_{23} и θ_{13}, и одной фазой *CP*-нарушения, значения которых известны из экспериментов по осцилляциям. Стандартная средняя вероятность изменения аромата не зависит от энергии и зависит только от параметров смешивания. Из-за ограниченной точности определения расстояния от источника и измерения энергии нейтрино на практике существующие нейтринные телескопы чувствительны только к средней вероятности перехода аромата.

Операторы LIV в SME вводят дополнительные члены в гамильтониан:

$$H_{\text{LIV}} = \sum_n \left(\frac{E_\nu}{\Lambda_n}\right)^n \tilde{\text{U}}_n \text{diag}\left(O_{n,1}, O_{n,2}, O_{n,3}\right) \tilde{\text{U}}_n^\dagger ,$$

где $O_{n,i}$ – собственные состояния n-мерного SME-оператора с нарушением Лоренц-инвариантности, $\tilde{\text{U}}_n$ – матрица смешивания с новыми параметрами смешения, Λ_n – характеристика энергетичес-

кого масштаба n-мерного оператора. Уравнение раскрывает преимущество использования высокоэнергетических нейтрино для поиска LIV, поскольку $H_{\mathrm{LIV}} \propto E_{\nu}^{n}$, и при $n \geq 0$ его относительная значимость по сравнению с H_{std} растёт с ростом энергии. Поэтому, даже если значения параметров LIV малы, эффекты LIV могут проявиться при высоких энергиях.

Полный гамильтониан $H_{\mathrm{tot}} = H_{\mathrm{std}} + H_{\mathrm{LIV}}$. Поскольку значения параметров LIV неизвестны, то их вариации могут приводить к значительным отклонениям от стандартного ароматического состава. Таким образом, обнаружение большого отклонения от стандарта $f_{e\oplus}, f_{\mu\oplus}, f_{\tau\oplus} = 1/3; 1/3; 1/3$ может быть интерпретировано как нарушение Лоренц-инвариантности.

Другой возможной проверкой фундаментальных симметрий может стать дополнение Стандартной модели новой калибровочной симметрией [14–16]. Такое расширение приводит к появлению калибровочного бозона Z', ответственного за взаимодействие между нейтрино и другими элементарными массивными частицами.

В сверхлёгком диапазоне массы Z' результирующее взаимодействие носит дальнодействующий характер, что могло бы повлиять на распространение астрофизических нейтрино высокой энергии. Если Z' существует, то нейтрино будут дополнительно взаимодействовать с частицами материи при распространении через Вселенную, тем самым изменяя стандартный ароматный состав $f_{\oplus}$ на Земле [17]. Нейтринный телескоп, обладающий чувствительностью к астрофизическим нейтрино с энергиями > ТэВ, сможет выполнить проверку на наличие отклонений $f_{\oplus}$.

Поперечное сечение взаимодействия высокоэнергетических нейтрино недостаточно изучено из-за неопределённости результатов проведённых измерений. Поперечное сечение взаимодействия нейтрино с протонами и нейтронами увеличивается с увеличением энергии нейтрино. Это заметно при прохождении нейтрино через Землю, которая становится значительно менее прозрачной для нейтрино с энергией выше 50 ТэВ. Менее 20 % нейтрино с энергией 100 ТэВ и всего 5 % нейтрино с энергией 1 ПэВ могут пересечь Землю под вертикальным зенитным углом $\cos(\theta) = -0{,}8$

[18–20]. Эта особенность может быть использована для исследования поперечного сечения нейтрино в диапазоне высоких энергий.

Неупругость – это мера доли энергии нейтрино, передаваемой мишени при глубоком неупругом рассеянии. Поперечное сечение и неупругость являются взаимодополняющими исследованиями «новой физики», поскольку новое взаимодействие должно иметь распределение неупругости, отличное от ожидаемого при обычном неупругом рассеянии [21].

Поскольку нейтрино обладают массой, они распадаются. В Стандартной модели они могут распадаться, например, $\nu_J \rightarrow \nu_i + \gamma$, где ν_J и ν_i – разные собственные состояния нейтрино по массе [22]. Однако связанное с этим время жизни больше, чем возраст Вселенной. Тем не менее если нейтрино соединятся с безмассовым посредником, то скорость распада может быть увеличена. Измерение диффузного фона нейтрино от сверхновой поможет в исследовании распада нейтрино [23, 24].

Изучение нейтрино высоких (10^{12}–10^{17} эВ) и сверхвысоких ($> 10^{17}$ эВ) энергий позволит получить знания в области «новой физики» за пределами Стандартной модели. Ожидается, что благодаря новым экспериментам, повышающим чувствительность и энергетический охват, появится возможность сделать открытия в области физики частиц высоких энергий, астрофизики и космологии. Нейтрино сверхвысоких энергий являются единственным средством прямого изучения процессов, происходящих в отдалённой Вселенной.

Наблюдения нейтрино с разной энергией из разных источников уже привели к фундаментальным физическим выводам о том, что нейтрино обладают массой и различными ароматами. Впереди предстоят исследования природы нейтрино, времени жизни и переменной массы. В области изучения тёмной материи находятся будущие исследования возникновения потока астрофизических нейтрино в процессе распада или аннигиляции тёмной материи, а также взаимодействия между нейтрино и тёмной материей (энергией). В области фундаментальной физики лежат исследования квантовой декогеренции при преобразовании чистых состояний в смешанные посредством эффектов квантовой гравитации,

нестандартных взаимодействий астрофизических нейтрино с фоном реликтовых нейтрино, с фотонами и электронами на протяжённых космических расстояниях, с нуклонами при движении нейтрино через Землю.

Спектры нейтрино различного происхождения представлены на Рис. 2 [25]. Локализованными источниками высокоэнергетических нейтрино могут быть активные галактические ядра со струями (блазары), слияния нейтронных звёзд или чёрных дыр, вспышки сверхновых, двойные звёзды. К нелокализованным источникам нейтрино относится образование ГЗК-нейтрино от взаимодействия релятивистских заряженных частиц с фотонами реликтового фонового излучения, *Z*-вспышки от взаимодействия нейтрино высоких энергий с реликтовыми нейтрино, распад или аннигиляция частиц тёмной материи.

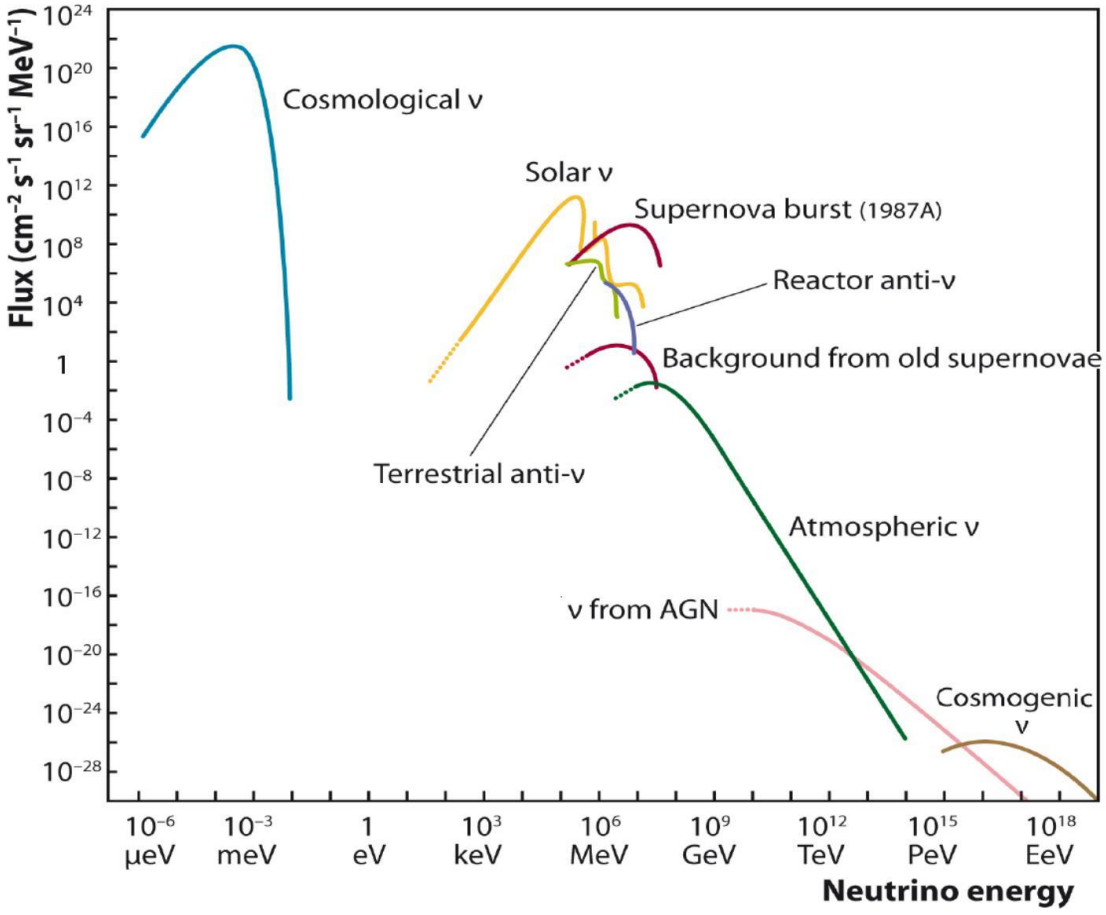


Рис. 2. Спектры нейтрино различного происхождения

Кратко рассмотрим механизмы образования нейтрино с энергиями > ТэВ в атмосфере Земли, в активных ядрах галактик и в

результате взаимодействия космических лучей сверхвысоких энергий с космическими фоновыми фотонами.

Атмосферные нейтрино образуются, когда протоны первичных космических лучей и более тяжёлые ядра взаимодействуют с атомами атмосферы Земли, что приводит к атмосферным ливням частиц [26, 27]. Эти ливни содержат большое количество заряженных пионов и каонов, а также более тяжёлых мезонов, которые при распаде производят нейтрино [28]. Поток обычных атмосферных нейтрино наблюдается в диапазоне энергий от ниже ГэВ до 100 ТэВ [29], выше которого космические нейтрино начинают доминировать в потоке [30]. Источники атмосферных нейтрино высоких энергий приведены в Табл. 3.

При энергии выше нескольких десятков ГэВ нейтринные обсерватории ANTARES и IceCube зарегистрировали мюонную и электронную составляющие атмосферных нейтрино [31]. Тау-нейтрино не образуются в атмосфере, а появляются в результате осцилляций атмосферных мюонных нейтрино. Обсерватория IceCube зарегистрировала сотни тысяч мюонно-нейтринных событий [32] с долей космических нейтрино не более 1 %.

Таблица 3

Источники атмосферных нейтрино высоких энергий

Частица	Время жизни	Мода распада	Критическая энергия
$K_S^0 : K_{Se3}^0$ $K_{S\mu 3}^0$	$0{,}9 \cdot 10^{-10}$ с	$\pi^{\pm} + e^{\mp} + \overline{\nu_e}(\nu_e)$ $\pi^{\pm} + \mu^{\mp} + \overline{\nu_\mu}(\nu_\mu)$	120 ТэВ

Нейтрино являются электрически нейтральными частицами, они не отклоняются в межзвёздном пространстве магнитными полями, а их линейная траектория однозначно указывает на источник происхождения. Нейтрино участвуют лишь в слабых взаимодействиях и практически не поглощаются и не передают свою энергию космической среде, что позволяет им донести до нас неискажённую информацию об источнике. Нейтрино несут информацию о физических условиях в местах своего происхождения при самых высоких энергиях мощных космических ускорителей на краю наблюдаемой Вселенной. Широкий диапазон энергий нейтрино и

пройденных расстояний позволяет исследовать свойства нейтрино, их взаимодействия и фундаментальные симметрии в широком диапазоне параметров (Рис. 3) [33].

Физика нейтрино высоких и сверхвысоких энергий затрагивает такие фундаментальные вопросы, как симметрии Стандартной модели, стабильность нейтрино, тёмная материя, взаимодействия нейтрино с космическим фоном, энергетический спектр нейтрино, анизотропия нейтринного спектра, время прибытия, соотношение ароматов, существование стерильных нейтрино, нейтрино-нуклонное сечение.

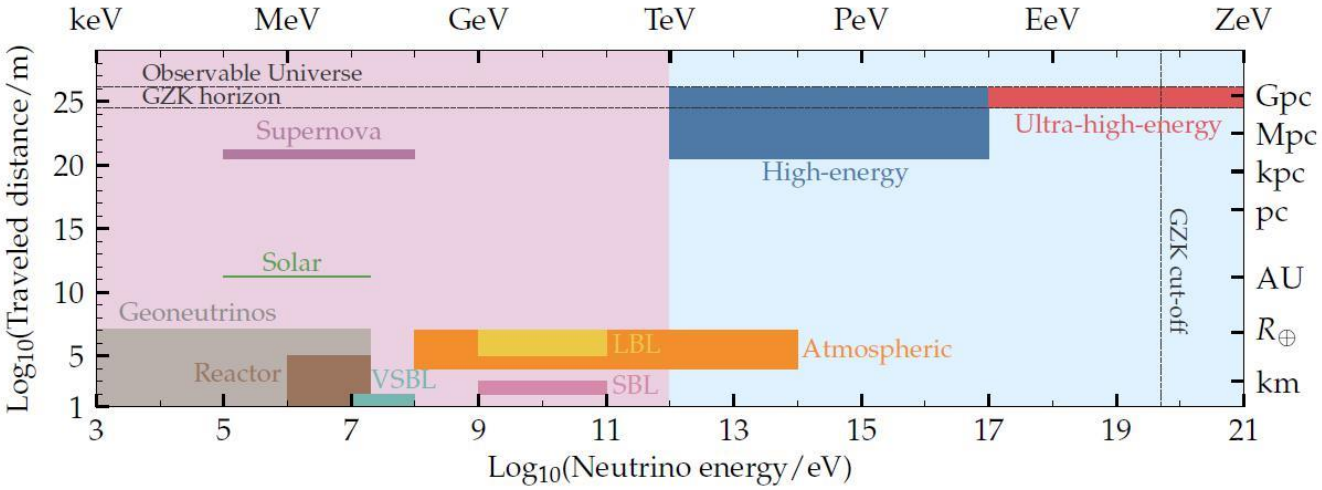


Рис. 3. Распространение нейтрино во Вселенной

За пределами шкалы ТэВ фундаментальные симметрии Стандартной модели могут нарушиться или могут появиться новые. Ожидается, что эффекты нарушения закона сохранения лептонного числа, или *CPT*- и Лоренц-инвариантности, краеугольных камней Стандартной модели, будут возрастать с увеличением энергии нейтрино и затронут множество свойств наблюдаемых нейтрино. Кроме того, обнаружение нейтрино с энергиями ЗэВ позволило бы проверить теории Великого объединения.

Нейтрино стабильны в Стандартной модели, но физика за пределами Стандартной модели может предоставить каналы для распада более тяжёлых нейтрино на более лёгкие с более коротким временем жизни. Распад нейтрино может оставить отпечаток на энергетическом спектре и соотношении ароматов.

С помощью космических нейтрино можно исследовать природу тёмной материи. Тёмная материя может распадаться или

самоаннигилировать, превращаясь в нейтрино, оставляя отпечатки в энергетическом спектре нейтрино, например линии. Эти особенности могут приводить к серьёзным ограничениям на тёмную материю в Млечном Пути и близлежащих галактиках. Астрофизические нейтрино высокой энергии помогут исследовать сверхтяжёлую тёмную материю с массами ПэВ и лёгкую тёмную материю. Анизотропия нейтринного неба по направлению к центру Галактики может свидетельствовать о распаде тёмной материи или взаимодействии с нейтрино.

Стандартным ожиданием для энергетического спектра нейтрино является степенной закон. Однако эффекты «новой физики» могут привносить уникальные спектральные особенности, в частности из-за взаимодействия между нейтрино высоких энергий и реликтовым фоном нейтрино низких энергий, взаимодействия между нейтрино и тёмной материей или лептокварками, влияющие на нейтрино-нуклонные взаимодействия.

Если источники астрофизических нейтрино многочисленны и тусклы, то направления прихода нейтрино на Землю должны быть изотропными. Анизотропия в нейтринном небе может свидетельствовать о появлении новых источников или указывать на взаимодействие нейтрино с обычной материей или с тёмной материей.

Кратковременные астрофизические события (вспышки блазаров, гамма-всплески и др.) порождают нейтрино высоких энергий, которые должны поступать на Землю одновременно с электромагнитными сигналами от этих событий, за исключением небольших различий во времени их возникновения. Однако нарушение Лоренц-инвариантности или взаимодействия между нейтрино высоких энергий и реликтовым нейтринным фоном могут привести к значительным задержкам во времени прибытия между нейтрино и фотонами, а также между нейтрино разных энергий.

В работе [34] предложена классификация моделей «новой физики» нейтрино (Рис. 4) в соответствии с тем, на какой стадии они действуют (производство, распространение, обнаружение) и на какие наблюдаемые характеристики они влияют (энергетический спектр, направления прихода, время прихода, ароматный состав).

До настоящего времени было зарегистрировано всего несколько событий с энергиями выше 10^{20} эВ. Поток протонов и

других заряженных частиц должен сопровождаться потоком нейтрино столь же высоких энергий. Для нейтрино высоких и сверхвысоких энергий возможна регистрация не только отдельных космических ускорителей частиц, но и диффузного потока, поскольку фон атмосферных нейтрино при таких энергиях значительно уменьшается.

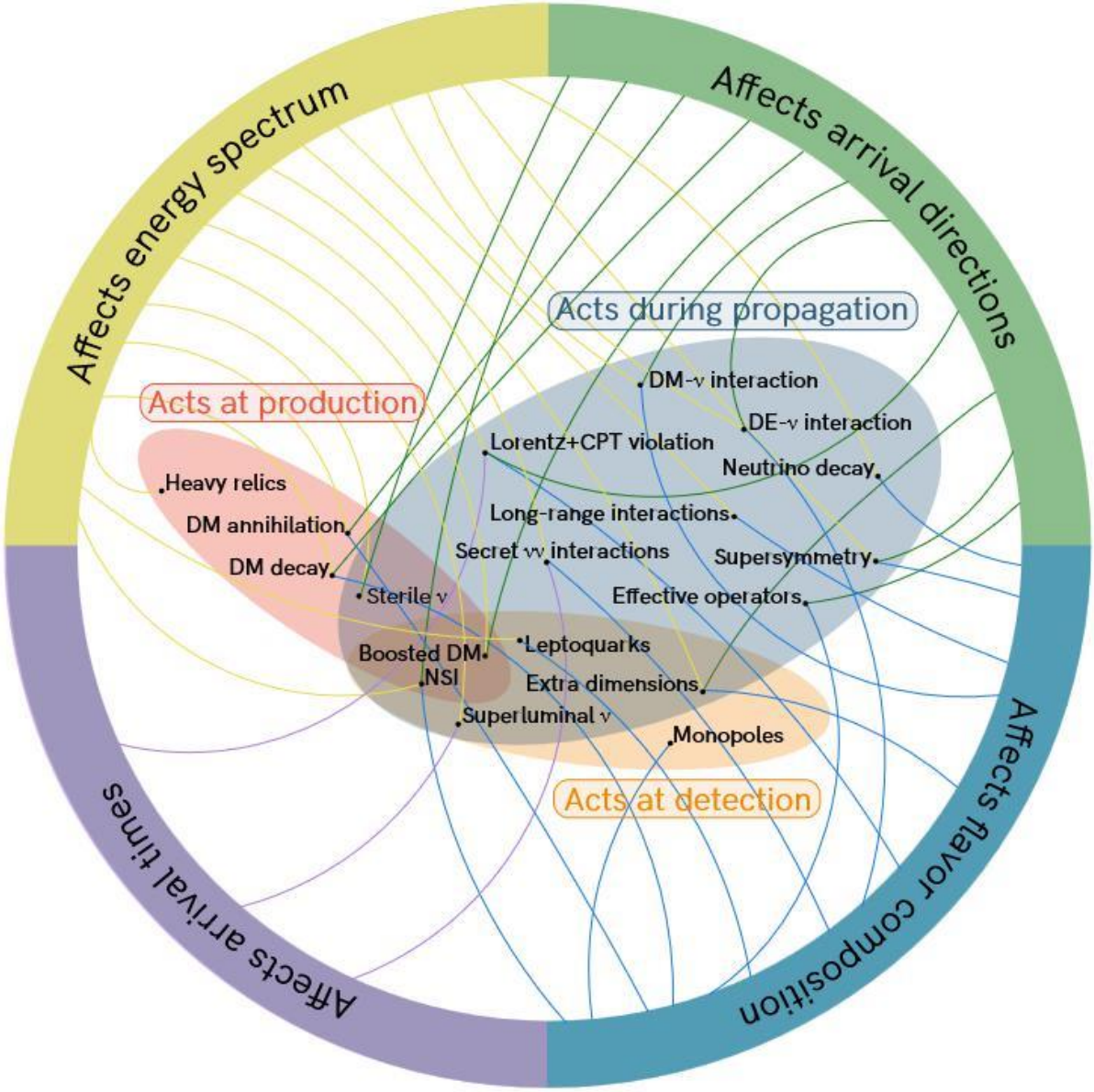


Рис. 4. Классификация моделей «новой физики» нейтрино

Источники нейтрино сверхвысоких энергий

В физике существуют два нерешённых вопроса, связанных с космическими лучами сверхвысоких энергий. Первый вопрос касается существования ГЗК-предела [35, 36], второй – источников космических лучей сверхвысоких энергий [37, 38]. Оба вопроса тесно связаны с нейтрино сверхвысоких энергий.

Космогенные нейтрино образуются, когда космические лучи сверхвысокой энергии взаимодействуют с космическим реликтовым микроволновым фоном фотонов, производя пионы и нуклоны, которые распадаются на нейтрино. Это происходит через возбуждение резонанса Δ^+:

$$p + \gamma_{\text{СМВ}} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow n + \pi^+,$$
$$n \rightarrow p + e^- + \overline{\nu_e},$$
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$
$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \overline{\nu_\mu}.$$

Эта реакция была впервые постулирована Грайзеном и независимо Зацепиным и Кузьминым. Предсказания потока ГЗК-нейтрино должны удовлетворять ограничениям на фон рассеянного гамма-излучения, обусловленным процессом $\Delta^+ \rightarrow n + \pi^0$, где $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, который конкурирует с процессом $\Delta^+ \rightarrow n + \pi^+$.

Помимо рождения нейтрино это взаимодействие, как предполагается, подавляет поток космических лучей с энергией выше $5 \cdot 10^{19}$ эВ – эффект, известный как предел ГЗК [39, 40]. Механизм ГЗК-эффекта является предсказанием базовой физики элементарных частиц и астрофизики и поэтому является важным процессом физики астрочастиц [41, 42]. Отсутствие обрезания потока лучей сверхвысокой энергии будет указывать на что-то новое либо в физике, либо в астрофизике процесса.

Механизм возникновения и ускорения космических частиц с энергиями, превышающими ЭэВ, остаётся фундаментальным нерешённым вопросом в физике астрофизических частиц. Теории нейтрино сверхвысокой энергии и заряженных космических лучей в основном делятся на две категории. Модели «снизу вверх» предполагают ускорение адронов астрофизическими процессами, такими как гамма-всплески и активные ядра галактик. Ускоренные адроны порождают потоки космических лучей, нейтрино и

фотонов. Модели «сверху вниз» вместо этого предполагают распад тяжёлых экзотических частиц, в котором снова рождаются заряженные космические лучи, нейтрино и фотоны. Энергия в этих моделях исходит из массы покоя экзотических частиц, а не из астрофизических ускорителей.

Модель рождения высокоэнергетических нейтрино в струе активного галактического ядра показана на Рис. 5 [25]. Поскольку заряженные частицы удерживаются сильными магнитными полями, покинуть область ускорения могут только нейтральные частицы. Помимо гамма-лучей и нейтрино это могут быть также нейтроны, которые впоследствии распадаются, образуя протоны космических лучей.

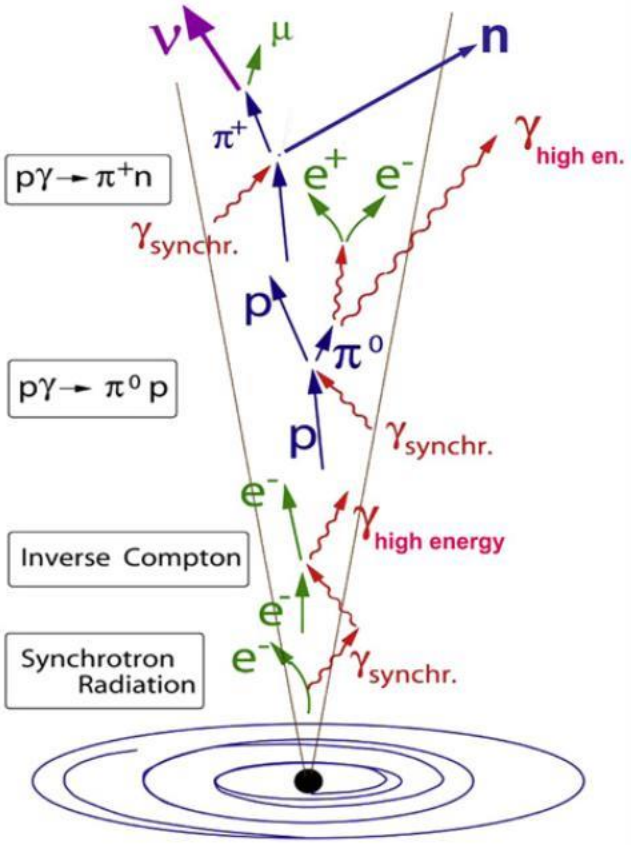


Рис. 5. Образование гамма-лучей и нейтрино в струе активного ядра Галактики

Более спекулятивный прогноз существования потоков нейтрино сверхвысоких энергий даёт так называемая модель *Z*-вспышки, где предполагается, что внегалактические заряженные космические лучи сверхвысоких энергий образуются при резонансном взаимодействии нейтрино более высоких энергий с окружающим космическим нейтринным фоном, предсказываемым

стандартной космологической эволюцией [43]. Нейтрино могут взаимодействовать с другими нейтрино, образуя реальные Z^0-бозоны с резонансной энергией, зависящей от масс нейтрино и Z^0-бозона:

$$\nu + \bar{\nu} \longrightarrow Z^0 \ , \ E_{\text{res}} = \frac{m_{Z^0}^2}{2m_\nu} \ .$$

Взаимодействие нейтрино с веществом

Как было отмечено выше, нейтрино участвуют в слабом взаимодействии. Взаимодействие нейтрино с материей рассматривается в работе [44]. В зависимости от лептонного аромата нейтрино (ν_e, ν_μ, ν_τ) при его взаимодействии с нуклонами среды образуется соответствующий лептон (e, μ, τ), который распространяется в среде в направлении движения нейтрино. Нейтрино взаимодействуют с нуклонами среды либо путём обмена заряженным векторным бозоном ($W+$), то есть взаимодействия с заряженным током (CC), либо путём обмена нейтральным векторным бозоном (Z^0), то есть взаимодействия с глубоким неупругим рассеянием нейтрального тока (NC) [45]. Часть энергии падающего нейтрино переносит адронный каскад, а оставшуюся часть – рассеянный лептон. Соотношение сечений CC- и NC-взаимодействий составляет приблизительно 2 : 1. CC-взаимодействия приводят к образованию заряженных вторичных рассеянных лептонов, а NC-взаимодействия – к образованию нейтрино. При CC-взаимодействиях лептон уносит в среднем от 50 % (для $E\nu \sim 10$ ГэВ) до 80 % (при более высоких энергиях) энергии нейтрино.

Предполагается, что ароматы нейтрино однородно смешаны, когда они достигают Земли в результате нейтринных осцилляций. В CC-взаимодействиях электроны, μ- и τ-лептоны будут рождаться в равных пропорциях. μ- и τ-лептоны ведут себя аналогично минимально ионизирующим частицам, что почти справедливо также и для электронов, для которых процесс тормозного излучения подавляется эффектом Ландау – Померанчука – Мигдала (ЛПМ). Следовательно, заряженные рассеянные лептоны вносят небольшой вклад в энергию, создающую акустический сигнал. Нейтрино высоких и сверхвысоких энергий взаимодействуют с

нуклонами ядер посредством глубоко неупругого рассеяния *NC* [46]. Следует отметить, что μ-лептон может генерировать тормозные фотоны на больших расстояниях от точки взаимодействия, а τ-лептон распадается на адроны, вызывая повторный каскад.

Для определения акустического сигнала, вызванного каскадом частиц, необходимо знать пространственное распределение тепловой энергии, выделяемой каскадом в плотной (твёрдой или жидкой) среде. Пространственное распределение энергии так же важно, как и общая выделенная энергия, поскольку оно определяет частотный спектр акустического сигнала и его направленность.

Электромагнитные ливни значительно удлиняются из-за эффекта ЛПМ, что приводит к уменьшению плотности поглощённой энергии и, следовательно, амплитуды акустического импульса. Эффект ЛПМ заключается в том, что взаимодействия со сверхвысокими энергиями связаны с небольшой поперечной передачей импульса, происходящей в течение длительного времени. Время взаимодействия достаточно велико, для того чтобы произошло многократное рассеяние. Это уменьшает сечение как тормозного излучения, так и взаимодействий с рождением пар, эффективно удлиняя потоки частиц [47]. Эффект велик для электромагнитных ливней, но не столь большой для адронных каскадов. Продольный профиль адронных каскадов имеет масштабируемое поведение, характерное для каскадов, на которые не влияет эффект ЛПМ, в то время как электромагнитные ливни сильно искажены и удлинены из-за эффекта ЛПМ [48]. Каскады с высокой энергией более продолжительны, чем каскады с низкой энергией.

Длина свободного пробега частиц с очень высокими энергиями, во время которого образуются пары и происходит процесс тормозного излучения, значительно больше длины отдельных субкаскадов с относительно небольшим вкладом энергии. Для моделирования реального развития отдельного каскада следует использовать метод Монте-Карло [49].

В результате взаимодействия нейтрино со средой (Рис. 6) возникают акустический импульс, радиоволны и черенковское излучение. Акустический импульс порождён термоакустическим эффектом, который был предсказан Г. А. Аскарьяном в 1957 году и описан в 1979 году [50, 51]. Так как скорость звука в среде намного

меньше, чем скорость распространения каскада, энерговыделение в веществе приводит к почти мгновенному расширению объёма, в результате чего возникает биполярный акустический импульс, который распространяется в плоскости, перпендикулярной оси каскада с расхождением ~ 5°.

Эффект испускания электромагнитными каскадами когерентного излучения в радиочастотном диапазоне был предсказан Г. А. Аскарьяном в 1962 году [52]. Если длина электромагнитной волны превосходит диаметр каскада, то возникает когерентность, в результате чего сигнал увеличивается пропорционально E_ν^2.

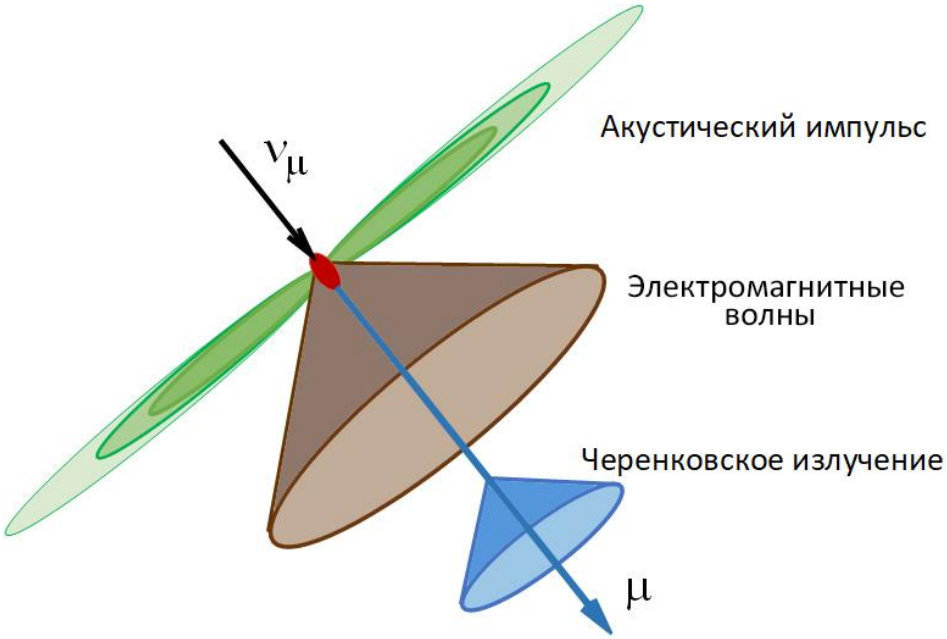


Рис. 6. Взаимодействие ν_μ со средой

При взаимодействии *электронного нейтрино* (ν_e) со средой образуется первичный электрон с последующим возникновением адронного и электромагнитного каскадов, которые включают тормозное излучение фотонов и электронно-позитронные пары. Энергия вторичных электронов, позитронов и фотонов уменьшается экспоненциально, что приводит к относительно короткой длине каскада с высокой выделяемой энергией на единицу длины и связанной с этим высокой плотностью испускаемых черенковских фотонов. Поток черенковских фотонов, испускаемых электронами и позитронами в каскаде, расширяется по отношению к направлению движения первичного электрона [53]. Форма распределения

практически не зависит от энергии электронов и почти идентична для электронов, движущихся в воде и внутри льда.

При взаимодействии *мюонного нейтрино* (ν_μ) с нуклонами среды рождается мюон, который пролетает значительное расстояние до распада, генерируя в среде протяжённое черенковское излучение вдоль своего трека. Взаимодействия мюонных нейтрино с нейтронами и протонами атома представлено реакциями

$$\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-, \qquad E\mu^- \approx 1/2\ E\nu_\mu,$$
$$\nu_\mu + p \rightarrow n + \mu^+, \qquad E\mu^+ \approx 3/4\ E\nu_\mu.$$

Мюоны с энергией до нескольких сотен ГэВ являются минимально ионизирующими частицами, которые движутся в среде прямолинейно на большие расстояния, измеряемые километрами. Черенковские фотоны испускаются вдоль трека с почти равномерной плотностью излучения. Потери энергии на единицу длины трека практически не зависят от энергии мюона. Однако при энергиях выше ТэВ в потерях энергии мюонов начинают преобладать стохастические потери энергии, такие как тормозное излучение, образование пар и фотоядерные взаимодействия. Образующиеся фотоны и электрон-позитронные пары тормозного излучения индуцируют электромагнитный каскад. Как следствие, при энергиях выше ТэВ потери энергии на единицу длины пропорциональны энергии мюона.

Тау-нейтрино (ν_τ) с высокой энергией вызывает образование в среде каскад частиц. Поскольку образовавшийся τ-лептон распадается на некотором расстоянии от точки нейтринного взаимодействия, то наблюдаются два последовательных каскада: от взаимодействия нейтрино с нуклоном и от распада τ-лептона. Оба события сопровождаются черенковским излучением и соединены коротким участком черенковского света в результате движения τ-лептона со скоростью, превышающей скорость света в среде. На сегодняшний день экспериментально такие события надёжно не зафиксированы. В конце пробега τ-лептон распадается либо на заряженный лептон плюс нейтрино, либо на кварк плюс нейтрино, таким образом приводя к появлению либо электромагнитного потока в случае электрона, либо мюонного трека в случае мюона, либо адронного потока в случае кварков. При энергиях τ-нейтрино

≤ 100 ТэВ и относительно небольшой длине пробега τ-лептона сигнатура ν_τ в нейтринном детекторе смешивается с сигнатурами ν_e и ν_μ.

Используя нейронные сети, обученные на изображениях, полученных в результате моделирования событий, с помощью нейтринного телескопа IceCube были обнаружены семь потенциальных событий, связанных с тау-нейтрино с энергиями в диапазоне от ~ 20 ТэВ до 1 ПэВ и средней ожидаемой исходной энергией ν_τ около 200 ТэВ [54].

Часть II
Нейтринный детектор с оптическим методом детектирования в подледниковом озере Восток

Глава 1. Концепция нейтринного детектора в озере Восток

В основу концепции создания нейтринного детектора нового поколения положены три инновационных подхода:

– размещение детектора в условиях экстремально низкого светового фона и фона, создаваемого потоком заряженных частиц;

– использование современных сенсоров для оптического детектирования взаимодействия нейтрино с веществом;

– применение новой технологии скоростного бурения льда и экологически чистого проникновения в подледниковое озеро.

Первый подход реализуется путём размещения детектора в подледниковом озере. Слой льда над озером толщиной несколько километров экранирует нейтринный детектор от потоков частиц солнечного и атмосферного излучения. Практически полное отсутствие радиоактивных изотопов в пресной воде и биолюминесценции в изолированном реликтовом озере наряду с высокой прозрачностью воды способствует оптическому детектированию черенковского излучения как результата взаимодействия нейтрино с нуклонами среды.

Второй подход реализуется за счёт использования современных кремниевых SiPM-матриц, квантовая эффективность которых превышает более чем в два раза эффективность используемых в оптических нейтринных детекторах ФЭУ, а временно́е разрешение лучше на порядок величины.

Третий подход является ключевым, поскольку позволяет осуществить доступ в подледниковое озеро за относительно короткое время с соблюдением экологических требований и рекомендаций Научного комитета по антарктическим исследованиям при проникновении в подледниковые озёра Антарктиды. Новая экологически чистая технология скоростного бурения льда создаёт возможность размещения в озере детектора астрофизических нейтрино высоких энергий.

Нейтринный детектор нового поколения качественно отличается от существующих и проектируемых аналогичных детекторов следующим:

– большим объёмом;

– высокой прозрачностью среды;

– предельно низким световым фоном;

– эффективным экранированием ледником от потоков атмосферных и солнечных заряженных частиц;

– возможностью определения лептонного аромата, включая τ-нейтрино;

– более точным определением энергии нейтрино и направления их движения;

– технологией реализации проекта с относительно небольшими затратами.

Концепция нейтринного детектора не касается систем нейтринного телескопа, связанных с передачей, сбором и обработкой информации, полученной с помощью детектора. Концепция по определению не рассматривает технические вопросы. Выбор и обоснование технических решений для реализации проекта выполняется на стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и эскизного проектирования.

При движении заряженной частицы в прозрачной среде со скоростью, превышающей скорость распространения света в этой среде, возникает излучение Вавилова – Черенкова. Излучение имеет 100%-ную линейную поляризацию. Максимальная интенсивность находится в синей области светового спектра и приходится на длину волны ~ 450 нм. Чем больше энергия движущейся заряженной частицы, тем выше частота и короче длина волны черенковского излучения.

Световой фронт (Рис. 7) формируется за счёт интерференции света, испущенного возбуждёнными атомами среды. Из каждой точки траектории частицы излучение распространяется сферически симметрично. В результате возникает волновой фронт, образованный когерентным излучением черенковских фотонов, который идёт под углом θ к направлению движения частицы с заря-

дом q в среде с показателем преломления света n. Угол конуса раскрытия зависит от скорости движения частицы v.

$$\cos\theta = \frac{\frac{c}{n}t}{vt} = \frac{c}{nv} = \frac{1}{\beta n}.$$

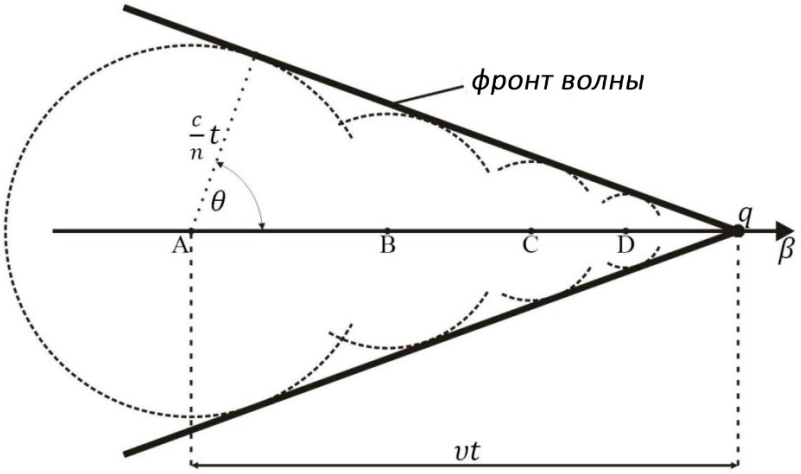
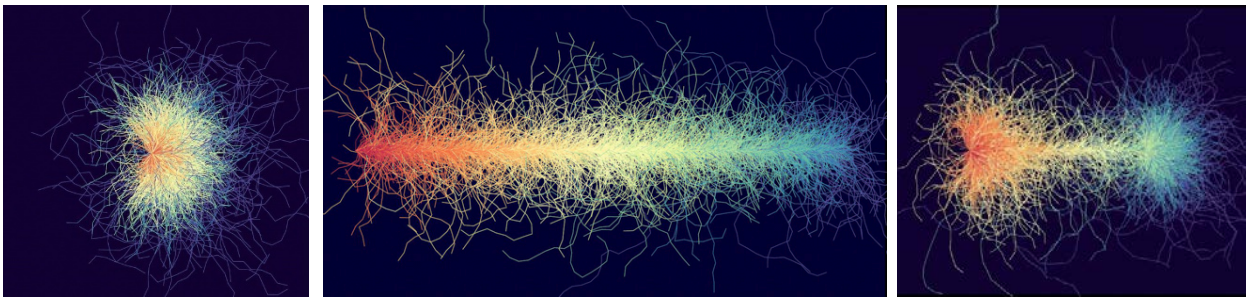


Рис. 7. Фронт волны черенковского излучения

На Рисунке 8 представлены результаты моделирования распространения черенковского света внутри антарктического льда в результате взаимодействия нейтрино со средой [55]. У льда длина рассеяния черенковского света короче по сравнению с водой.



Электронное нейтрино Мюонное нейтрино Тау-нейтрино

Рис. 8. Моделирование черенковского света
при взаимодействии нейтрино со средой

В каскаде, образовавшемся после взаимодействия электронного нейтрино со средой, излучается 90 % всего черенковского света. Протяжённость каскада составляет ~ 4 м для потока с энергией 10 ГэВ и 7 м для потока с энергией 1 ТэВ. Так как каскад немного вытянут в направлении движения первичного электрона, существует возможность определить направление движения

падающего нейтрино. Однако поскольку решётки нейтринных детекторов имеют шаг, примерно на порядок превышающий длину каскада, а регистрация черенковского света выполняется отдельными ФЭУ, то это снижает точность определения направления прилёта нейтрино. В связи с тем что событие локализовано, а энергия каскада почти линейно связана со световым потоком, то возможна реконструкция энергии нейтрино.

Длина мюонного трека в воде достигает 1 км при энергии мюона 350 ГэВ и доходит до 10 км при энергиях в масштабе ПэВ. Мюон, движущийся в среде со скоростью, близкой к скорости света в вакууме, эмитирует ~ 400 фотонов с длиной волны от 300 до 700 нм на каждый сантиметр пройденного пути [56]. Мюоны распространяются намного дальше, чем характерный размер нейтринного детектора, и поэтому могут увеличить эффективный объём детектора за счёт наблюдения мюонов, приходящих в детектор снизу.

В случае τ-нейтрино с высокой энергией каскады от взаимодействия нейтрино в воде с нуклонами ядер кислорода и водорода и от распада τ-частицы наблюдаются раздельно. Для определения длины трека ультрарелятивистского τ-лептона в среде до его распада необходимо учесть Лоренцево замедление времени. Время распада связано с энергией частицы и её массой по формуле $t = t_0 \cdot (E/m)$, где t_0 – время распада для покоящейся частицы. Длина трека τ-лептона с высокой энергией может составить несколько десятков метров. Так, для энергии 1 ПэВ она достигает ~ 50 м. По длине трека τ-лептона можно судить об энергии нейтрино. Развитие каскада и трек τ-лептона сопровождаются черенковским излучением. Если энергия τ-нейтрино составляет ≤ 100 ТэВ, будет наблюдаться единичная вспышка черенковского света, подобно вспышке, которая возникает при взаимодействии электронного нейтрино со средой [55].

Глава 2. Нейтринные телескопы с детекторами большого объёма

Нейтрино могут быть использованы для поиска экстремально мощных ускорителей частиц в космосе, которые являются источниками космических лучей сверхвысоких энергий. На своём пути к Земле нейтрино практически не взаимодействуют со средой, не отклоняются магнитными полями и гравитацией, что даёт возможность определить направление к их источнику. Изучение нейтрино сверхвысоких энергий позволит ответить на множество вопросов фундаментальной физики и астрофизики. Для этого необходимо иметь возможность проводить измерения энергии нейтрино, направления движения, лептонного аромата, распределения во времени. Практическое решение вопроса лежит в создании нейтринных детекторов с хорошим пространственным и временным разрешением.

Поток космических нейтрино с увеличением энергии уменьшается, однако возрастает нейтрино-нуклонное сечение, что оставляет практическую возможность наблюдать редкие события взаимодействия нейтрино высоких и сверхвысоких энергий с веществом. Нейтринные телескопы, ориентированные на регистрацию высокоэнергетических нейтрино, имеют большие по объёму детекторы. Детектор нейтринного телескопа представляет собой огромный объём прозрачной среды (это может быть морская вода, озёрная вода, антарктический лёд), в котором установлены оптические модули для регистрации черенковского излучения, возникающего как следствие взаимодействия нейтрино с нуклонами среды.

В настоящее время создана и развивается глобальная нейтринная сеть [57], которая объединяет телескопы KM3NeT ORCA [58, 59], KM3NeT ARCA [60], Baikal-GVD [61], IceCube [62]. Нейтринный телескоп ANTARES [63] был выведен из эксплуатации в феврале 2022 года. У берегов Канады создаётся нейтринный телескоп P-ONE [64], а в Китайском море – телескоп TRIDENT [65]. Существуют также предложения по строительству нейтринных телескопов NEON [66] и HUNT [67]. Увеличение размера детекторов у действующих нейтринных телескопов и появление

новых проектов указывает на возросший интерес физиков к области частиц сверхвысоких энергий.

Телескоп IceCube зарегистрировал астрофизический поток нейтрино в диапазоне энергий от нескольких ТэВ до нескольких ПэВ. По данным за 9 лет было обнаружено два нейтринных события в диапазоне от 1 до 10 ПэВ. Источник нейтрино установить не удалось [68].

13 февраля 2023 года детектор KM3NeT ARCA зафиксировал уникальное событие: за 2 мкс на почти 12 000 фотоумножителях детектора было зарегистрировано черенковское излучение такой интенсивности, что более 25 % фотоумножителей достигли уровня насыщения. Трек мюона пересёк весь объём детектора. Детальные исследования позволили оценить энергию мюона в рекордные 120 ПэВ, что в 10^{14} раз превышает энергию фотонов видимого света. Это означает, что первичное нейтрино, породившее мюон, обладало ещё более высокой энергией, оцениваемой на уровне 220 ПэВ, что значительно выше, чем у любого нейтрино, когда-либо обнаруженного ранее [69].

Нейтринный детектор KM3NeT ORCA

Нейтринный детектор KM3NeT ORCA ориентирован на изучение осцилляции атмосферных нейтрино. Глубоководная локация детектора расположена в 40 км от Тулона и имеет глубину 2 450 м. Свойства воды в глубине Средиземного моря позволяют достичь точности определения направления движения мюонных нейтрино $\sigma(\Omega) \approx 0{,}7°/\sqrt{E}$, где E [ТэВ] и $\sigma(\Omega) \approx 1{,}1°$ для каскадных событий с энергией $E > 10$ ТэВ [70]. Атмосферные нейтрино являются ключом к решению фундаментального вопроса физики частиц об относительном упорядочении масс нейтрино [71, 72]. Было высказано предположение, что иерархию масс нейтрино можно определить с помощью нейтринного детектора, имеющего массу воды или льда в несколько мегатонн, путём измерения потока атмосферных нейтрино, прошедших через Землю. Из-за влияния материи на осцилляции нейтрино при прохождении через Землю ожидаемая степень взаимодействия нейтрино в энергетическом диапазоне 1–20 ГэВ различается между нормальной и инвертированной иерархиями.

Традиционно решение для обнаружения черенковского света заключалось в использовании стеклянной сферы с одним ФЭУ большой площади диаметром от 8 до 10 дюймов [73]. В детекторах KM3NeT для измерения черенковского излучения, индуцированного в воде вторичными заряженными частицами от взаимодействия нейтрино с энергиями в диапазоне от ГэВ до ПэВ, используются специально разработанные оптические модули, внешний вид которых представлен на Рис. 9, а их подробное описание приводится в статье [74]. Каждый модуль выполнен в виде прочной сферы диаметром 44 см и содержит 31 ФЭУ Hamamatsu [75], калибровочные приборы и электронику. Модули имеют наносекундную точность синхронизации и динамический диапазон, позволяющий измерять от одного фотона до каскада из тысяч фотонов. Сегментация площади обеспечивает каждому оптическому модулю чувствительность к входящему направлению обнаруженных фотонов и в сочетании с высокой точностью синхронизации является эффективным подходом для уменьшения влияния фона от света, вызванного распадом ^{40}K и биолюминесценцией в морской воде. Пространственная решётка детектора, состоящая из оптических модулей для регистрации черенковского излучения в воде, имеет плотность, которая обеспечивает угловое и энергетическое разрешение, необходимое для детектирования атмосферных нейтрино.



Рис. 9. Оптический модуль детектора KM3NeT

После завершения строительства детектор ORCA будет иметь объём 0,0067 км^3. В этом объёме размещаются гирлянды

в количестве 115 шт. на расстоянии 20 м друг от друга внутри окружности радиусом 106 м (Рис. 10). Каждая гирлянда имеет высоту 150 м, вдоль которой с дистанцией 9 м располагаются оптические модули (Рис. 11). Пространственный массив детектора будет содержать 2 070 оптических модулей. Научные результаты, полученные с помощью нейтринного телескопа ORCA, представлены в работах [76, 77]. Для реконструкции событий, оценки энергии, направления движения и расположения точки взаимодействия падающих нейтрино предполагается использовать нейронные сети [78].

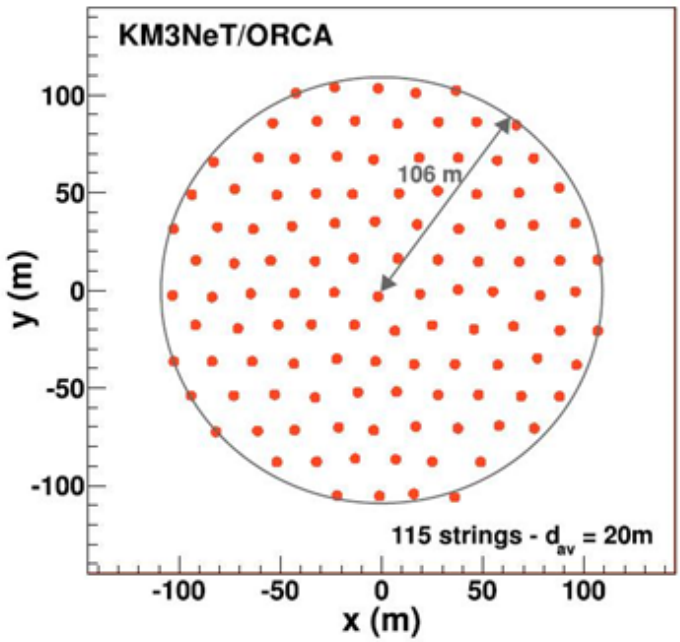


Рис. 10. Блок гирлянд детектора ORCA



Рис. 11. Гирлянда с оптическими модулями

Нейтринный детектор KM3NeT ARCA

Нейтринный детектор KM3NeT ARCA предназначен для регистрации нейтрино высоких энергий от дальних астрофизических источников, таких как сверхновые, сталкивающиеся звезды или гамма-всплески [79, 80]. Локация детектора находится в Средиземном море примерно в 100 км от Сицилии на глубине около 3 500 м. Толщина слоя экранирующей морской воды над детектором составляет 2 800 м.

В завершающей фазе проекта предполагается иметь два блока детекторов высотой ~ 700 м по 115 гирлянд в каждом блоке (Рис. 12). Расстояние между соседними гирляндами ~ 90 м. Гирлянда содержит 18 оптических модулей, установленных на расстоянии 36 м друг от друга. Полный объём нейтринного детектора из двух расположенных рядом блоков равен ~ 1 км^3. В объёме детектора содержится 4 140 сферических оптических модулей. Длина затухания черенковского света в месте локации детектора равна ~ 35 м для длины волны 450 нм.

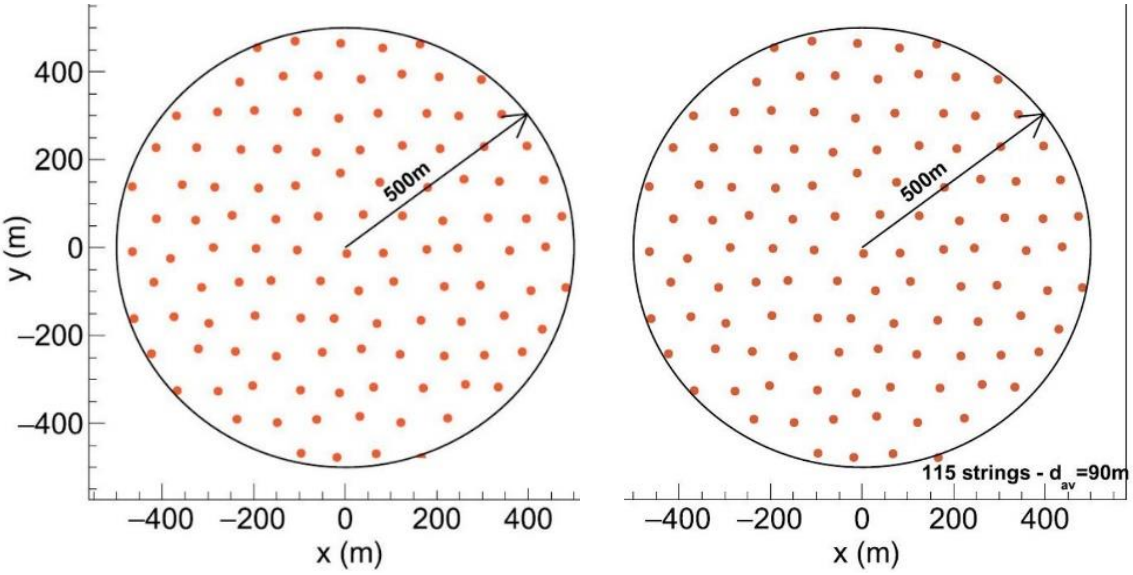


Рис. 12. Два соседних блока детекторов нейтринного телескопа ARCA

Некоторые ограничения на окончательную компоновку накладываются техническими соображениям, в частности, на максимальную длину гирлянд. Горизонтальное расстояние между гирляндами может быть увеличено или уменьшено в относительно широком диапазоне. Открытие в нейтринной обсерватории IceCube потока нейтрино с энергией выше 100 ТэВ [81] ставит

вопрос об оптимальном горизонтальном расстоянии. Ожидается, что большее расстояние будет более оптимальным при нацеливании на высокоэнергетические нейтрино. Пространственная сеть оптических модулей телескопа ARCA постепенно расширяется и уже даёт первые научные результаты [82, 83]. Совершенствуются также методы и подходы к обработке экспериментальных данных [84, 85].

Для достижения наилучшей производительности при реконструкции событий должно быть известно точное местоположение оптических модулей в текущее время, подверженных влиянию морского течения. Необходимо постоянно контролировать свойства окружающей среды, в которой установлены оптические модули, такие как температура и солёность воды, поскольку они влияют на расчёт времени и позиционирования. Калибровочные инструменты оптического модуля включают лазерный маяк для калибровки времени, акустический излучатель и гидрофон для точного позиционирования [86].

Для установки гирлянд KM3NeT был разработан метод быстрого развёртывания. Несмотря на протяжённость в несколько сотен метров, конструкция гирлянды позволяет упаковать её в небольшую сферу-контейнер многоразового использования. После опускания на морское дно якоря с контейнером гирлянда разворачивается вверх на всю длину с помощью поплавка [87].

Оптические модули KM3NeT соединены оптоволоконной системой с береговой станцией, в которой находится вся необходимая энергетическая, вычислительная и техническая инфраструктура. Полоса пропускания на модуль составляет 1 Гбит/с, что является избытком для типичной используемой полосы пропускания ~ 20 Мбит/с, которая в основном создаётся световым излучением распада радиоактивного калия (индуцирующего частоты 5–8 кГц на ФЭУ). Синхронизация такова, что временные сдвиги между любой парой модулей стабильны в пределах 1 нс.

Цифровые данные с ФЭУ отправляются на берег, где они обрабатываются на вычислительном кластере в режиме реального времени. Физические события отфильтровываются от фона с помощью набора определённых алгоритмов фильтрации, реализованных в программном обеспечении. К данным можно

одновременно применять разные фильтры. Параллельно с оптическими данными обрабатываются данные системы акустического позиционирования модуля с точностью до 10 см, что позволяет отслеживать положение каждого модуля оптической решётки KM3NeT.

Оптические модули подключаются к распределительным модулям, расположенным на морском дне. Подводное соединение с распределительными модулями осуществляется с помощью соединительных кабелей, проложенных по морскому дну. Основной электрооптический кабель соединяет подводный детектор с береговой станцией. Кабель обеспечивает подачу электропитания, по нему на берег передаются данные и посылаются управляющие сигналы. Волоконно-оптическая сеть KM3NeT использует плотное мультиплексирование с разделением по длине волны. Этот метод делает возможным передавать сигналы с множеством различных несущих частот по одному волокну. В KM3NeT оптические модули передают свои данные на своей уникальной несущей частоте. В нижней части гирлянды 18 частот «загружаются» в одно волокно. Далее в сети эти «нагруженные» волокна собираются вместе и затем концентрируются в одно волокно, несущее 72 частоты. Оптоволокно проходит 100 км до берега, где частоты снова разделяются. Таким образом, каждый оптический модуль имеет свой уникальный путь передачи данных [88, 89].

Нейтринный детектор Baikal-GVD

Сооружение детектора Baikal-GVD началось в 2016 году. Гигатонный детектор нейтринного телескопа расположен в южной части озера Байкал, в 4 км от берега. Глубина озера в этом месте составляет 1 366–1 367 м. Детектор Baikal-GVD предназначен для регистрации астрофизических нейтрино в диапазоне энергий ТэВ – ПэВ [90, 91]. Эффективный объём детектора позволяет регистрировать каскады частиц с энергией выше 100 ТэВ с угловым разрешением ~ 4°. В настоящее время строительство крупномасштабного нейтринного телескопа Baikal-GVD продолжается. В ближайшие годы планируется увеличить количество кластеров, что позволит получить общий объём детектора ~ 0,7 км^3. В планах увеличение объёма детектора до 1,5 км^3 [92].

Телескоп по состоянию на 2023 год состоит из 12 глубоководных кластеров, расположенных друг от друга на удалении 250 м (Рис. 13). Каждый кластер объединяет 8 вертикальных гирлянд, одна находится в центре, остальные семь распределены по окружности радиусом 60 м [93]. Каждая гирлянда крепится ко дну озера при помощи якоря и имеет в верхней части поплавок, который поддерживает её в вертикальном положении. Гирлянда включает 36 оптических модулей, установленных на расстоянии 15 м между собой, а также гидроакустические и электронные модули. Детектор имеет 3 456 оптических модулей. Слой воды над детектором равен 750 м. Из-за небольшой глубины расположения оптических модулей присутствует фон атмосферных мюонов, который мешает регистрации нейтрино высоких энергий.

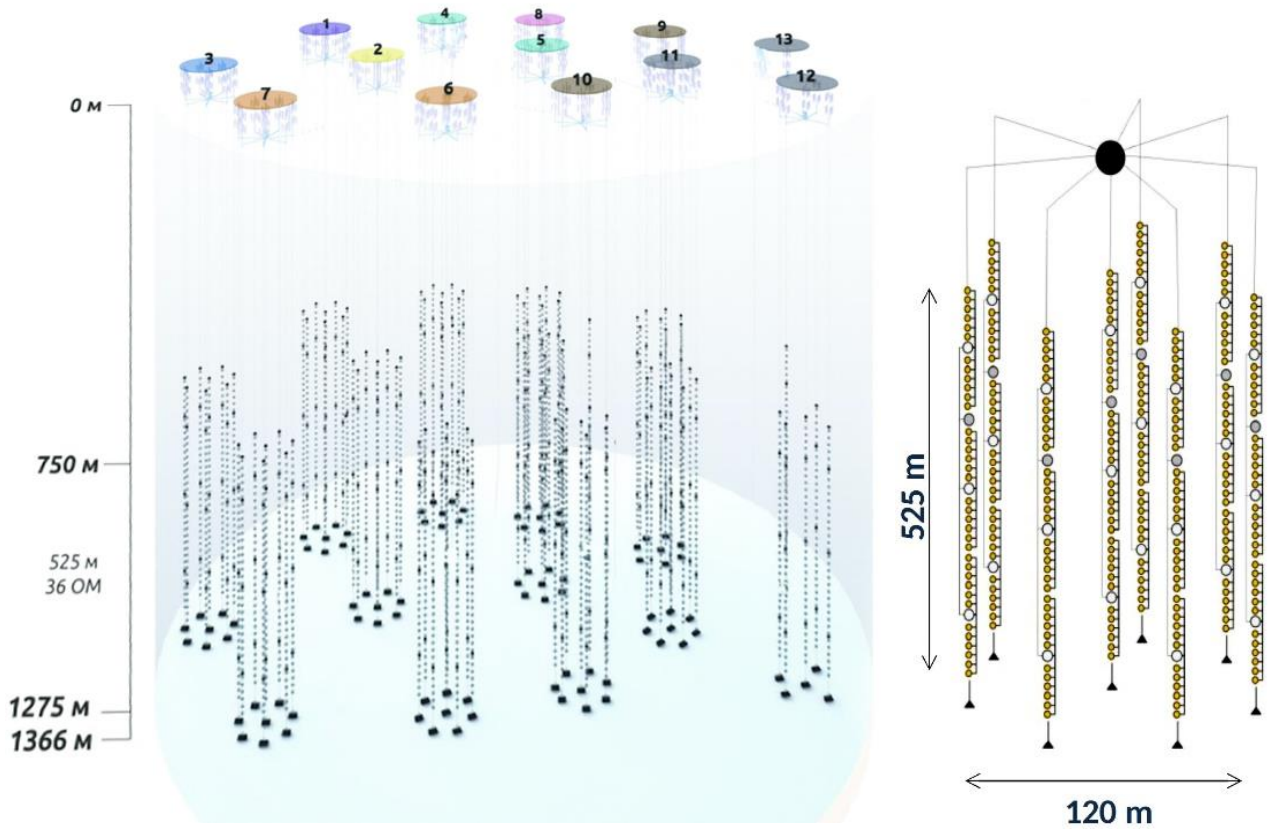


Рис. 13. Схема детектора Baikal-GVD

Монтаж и обслуживание подводных частей детектора производится с ледового покрытия, которое сохраняется на озере зимой в течение 6–8 недель. Течения и сезонные штормы смещают гирлянды с оптическими модулями. Смещение может достигать

десятков метров в зависимости от глубины. Для позиционирования оптических модулей во время измерений используется гидроакустическая система, которая представляет собой набор акустических модемов, установленных вдоль гирлянд [94]. Система позволяет определять положение оптических модулей с точностью 13 ± 3 см. В течение кратковременного периода очень высокой гидродинамической активности точность позиционирования падает до 20 ± 10 см [95]. Некоторые проблемы возникают также из-за хозяйственной деятельности на озере.

В озёрной воде, в отличие от морской, отсутствует изотоп ^{40}K, следовательно, нет светового фона от его распада, однако на глубине проявляется люминесценция, которая создаёт помехи для работы оптических модулей. На глубинах более 500 м солнечных фотонов меньше, чем от люминесценции, ниже 800 м поток солнечного света составляет менее 1 фотон/(см^2 · с). Люминесценция также уменьшается с глубиной, и на глубине 1 000 м плотность светового потока составляет несколько сотен фотонов/(см^2 · с). Люминесценция в первую очередь связана с процессами окисления активных органических радикалов, растворённых в воде или содержащихся во взвешенных веществах, размер частиц которых не превышает нескольких микрон. Вещества, способные излучать свет, образуются в верхней части озера и переносятся вниз за счёт погружения взвешенного вещества и турбулентных потоков воды [96].

Длина затухания света в озере Байкал в месте расположения детектора равна ~ 16 м для длины волны 460 нм и имеет сезонную зависимость. Результаты годичного мониторинга длин поглощения и рассеяния света с длиной волны 375–532 нм в пределах объёма глубоководного нейтринного телескопа представлены в работах [97, 98].

Оптический модуль (Рис. 14) включает 10-дюймовый ФЭУ Hamamatsu R7081-100 с высокой квантовой эффективностью, высоковольтный блок и интерфейсную электронику, которые размещены в прочной стеклянной сфере диаметром 42 см. Оптический модуль также оснащён калибровочными светодиодами и различными цифровыми датчиками, включая акселерометр, компас, датчик давления, датчик влажности и два датчика температуры [99].

Для калибровки оптических сигналов используются световые импульсы от калибровочных светодиодов, которые регистрируются одновременно несколькими секциями. Результаты измерений точности синхронизации двух кластеров, выполненных двумя независимыми системами, согласуются друг с другом и дают точность синхронизации событий на уровне 4 нс [100–102].

Для соединения гирлянд с оборудованием на берегу используется комбинированный Ethernet/оптоволоконный кабель. В будущем предполагается создать систему сбора данных на волоконно-оптической основе, что позволит увеличить пропускную способность передачи данных [103].



Рис. 14. Устройство оптического модуля нейтринного телескопа Baikal-GVD:
1 – стеклянная полусфера; *2* – герметичное уплотнение; *3* – клетка из пермаллоя;
4 – фотоэлектронный умножитель R7081-100; *5* – оптический гель;
6 – стеклянная полусфера

Нейтринные детекторы телескопа IceCube

Нейтринный телескоп IceCube расположен на полярной станции Amundsen-Scott на Южном полюсе и является многоцелевым научным центром, который занимается исследованиями в области нейтринной астрономии, физики космических лучей, нейтринной физики, тёмной материи и гляциологии. Создание детектора объёмом 1 км^3 было завершено в декабре 2010 года после 7 лет строительства. Научная коллаборация IceCube объединяет 58 университетов из Австралии, Бельгии, Великобритании, Германии, Дании, Италии, Канады, Новой Зеландии, Соединённых Штатов Америки, Тайваня, Швеции, Швейцарии, Южной Кореи и Японии.

Обнаружение детектором IceCube высокоэнергетического астрофизического потока нейтрино подтвердило, что космические нейтрино открывают беспрепятственный обзор Вселенной, где она непрозрачна для света. IceCube представляет собой огромный мюонный детектор, регистрирующий более 100 млрд мюонов в год, образующихся при взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли. С помощью детектора IceCube можно производить измерения потока нейтрино в диапазоне от 100 ТэВ до уровня ниже 10 ГэВ, когда наблюдаются осцилляции атмосферных нейтрино. Детектор позволяет выполнять непрямой поиск тёмной материи по нейтринным сигнатурам аннигиляции тёмной материи в галактическом гало, скоплениях галактик и в центре Земли.

Размещение нейтринного детектора IceCube внутри ледника связано с необходимостью бурения большого количества глубоких скважин для размещения гирлянд с оптическими модулями. На станции Amundsen-Scott в течение 6 лет (2004–2010) горячей водой в леднике было пробурено 86 скважин глубиной 2 500 м и диаметром 60 см. На создание одной скважины требовалось порядка 30 ч и 21 000 л топлива. В скважины были опущены гирлянды с оптическими модулями, после чего они вмёрзли в лёд. Отклонение гирлянд от вертикали составляет менее 1 м.

Нейтринный телескоп IceCube (см. Рис. 15) имеет 3 детектора: *IceTop*, *IceCube* и *DeepCore* (см. Рис. 15). Описание инструментального оснащения нейтринной обсерватории приводится в работе [104]. Пространственное разрешение IceCube составляет 1°

для трековых событий (ν_μ) и 10–15° для каскадных событий (ν_e, ν_τ), что оставляет большие неопределённости нахождения места источника высокоэнергетических нейтрино.

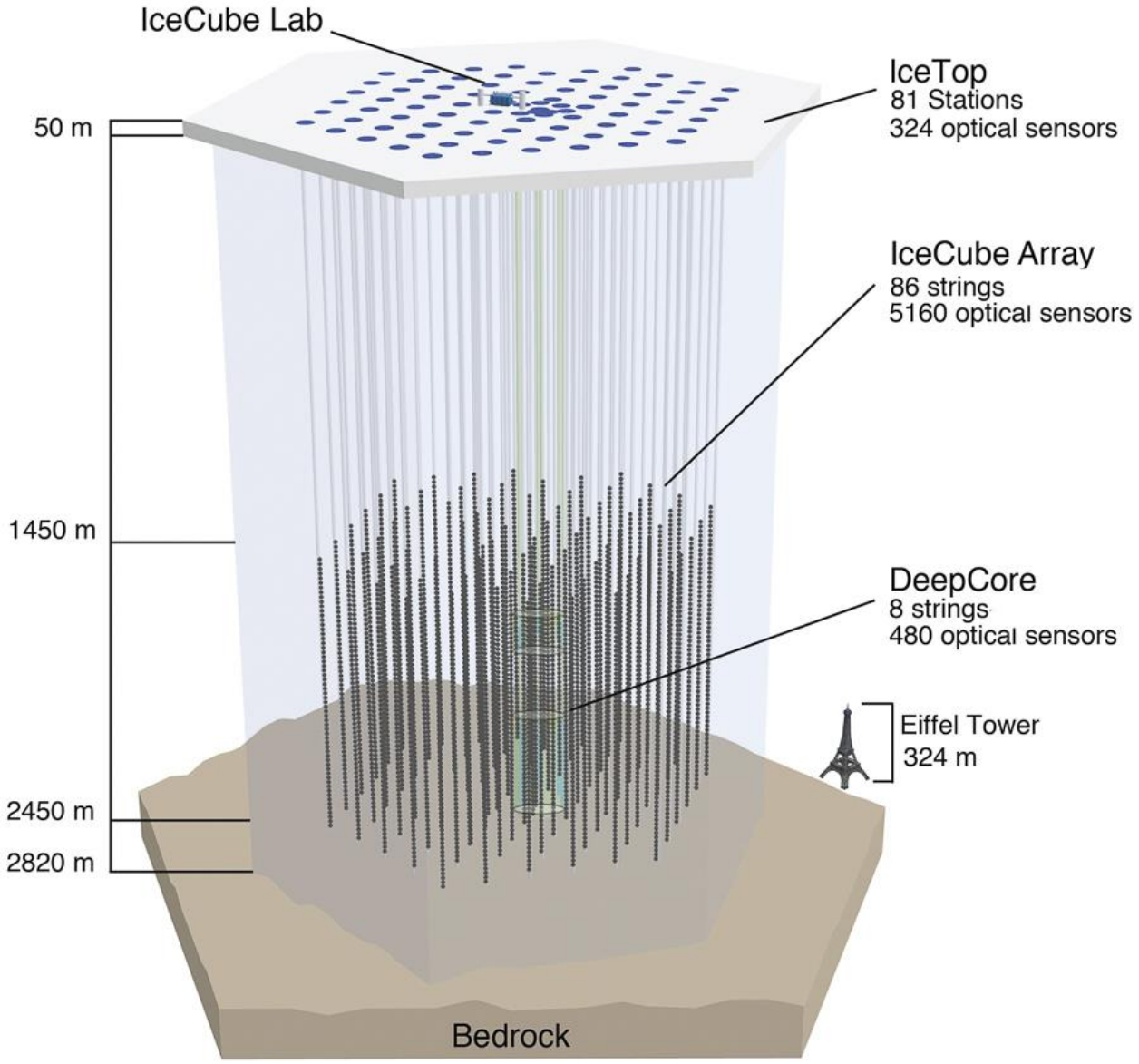


Рис. 15. Детекторы IceTop, IceCube Array, DeepCore

Гирлянды детектора *IceCube* располагаются на глубине от 1 450 до 2 450 м по гексагональной решётке в скважинах с шагом 125 м между ними. Каждая гирлянда состоит из 60 оптических модулей для регистрации черенковского излучения. Детектор нейтринного телескопа IceCube содержит 5 160 оптических модулей. Расположение оптических модулей внутри ледника исключает колебания пространственной решётки детектора, которое наблюдается в случае морской локации нейтринных детекторов.

Восемь гирлянд в центре массива расположены более компактно на расстоянии 70 м друг от друга, а оптические детекторы установлены по вертикали с дистанцией 7 м. Такая более плотная конфигурация образует поддетектор *DeepCore*, который снижает энергетический порог регистрации нейтрино примерно до 10 ГэВ, создавая возможность для изучения осцилляций нейтрино.

Дополнительные 324 модуля образуют поверхностный детектор *IceTop* площадью 1 км^2. Детектор состоит из 81 станции, каждая из которых оборудована 4 оптическими модулями, ориентированными вниз. Станции располагаются на поверхности над основными гирляндами. IceTop, созданный в качестве вето-детектора и калибровочного детектора для IceCube, также обнаруживает воздушные ливни от первичных космических лучей в диапазоне энергий от 300 ТэВ до 1 ЭэВ. Поверхностный массив измеряет поток и состав космических лучей, а также направления прихода космических лучей в Южном полушарии.

В настоящее время началось осуществление проекта IceCube-Gen2, в котором планируется увеличить объём детектора до 7,9 км^3. Детектор будет отличаться увеличенным расстоянием между гирляндами. Основное научное внимание будет сосредоточено на обнаружении и характеристике астрофизических источников нейтрино на энергетической шкале ПэВ.

План размещения гирлянд с детекторами показан на Рис. 16 [105]. *Слева* представлено расположение дополнительных 120 гирлянд, которые находятся на расстоянии 240 м друг от друга. Гирлянды оснащены 80 оптическими модулями каждая и имеют протяжённость по вертикали 1 250 м. В центре показан существующий массив IceCube, где над каждой гирляндой расположены оптические модули IceTop, которые совместно работают как крупномасштабный детектор ливней космических лучей и выполняют детектирование атмосферных мюонов для массива, расположенного во льду. *Справа* изображён план массива DeepCore с дополнительно установленными 7 гирляндами с оптическими модулями. Проект IceCube-Gen2 позволит повысить чувствительность к нейтринным источникам в 5 раз по отношению к существующей и улучшить угловое разрешение. Рассматривается вариант оптических модулей, подобных модулям KM3NeT.

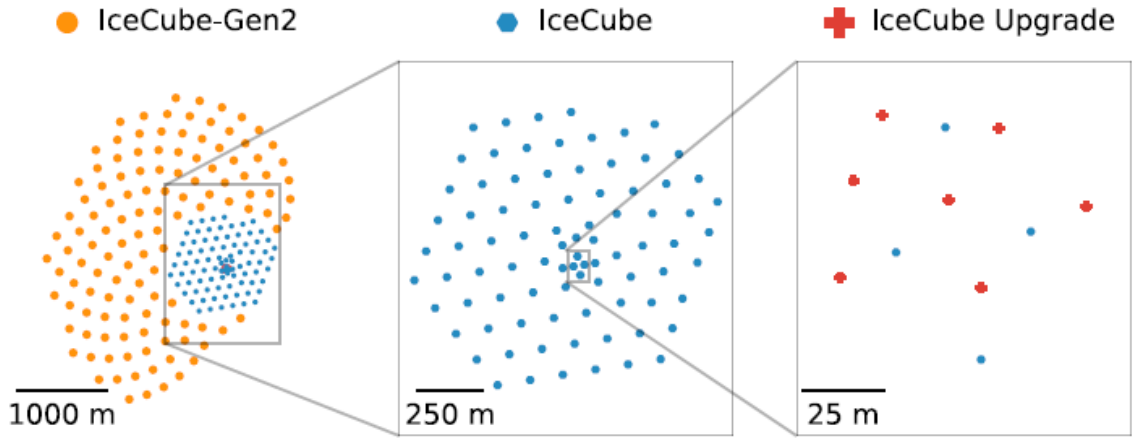


Рис. 16. Проект IceCube-Gen2

Одной из целей проекта является улучшение калибровки позиционирования оптических модулей для повышения углового разрешения при реконструкции направления прихода нейтрино. Внутри детекторного объёма будут установлены 10 акустических модулей, способных передавать и принимать акустические сигналы с частотами от 5 до 30 кГц. Кроме того, компактные акустические датчики внутри 15 оптических модулей дополнят систему акустической калибровки. Эта система позволит откалибровать геометрию расположения оптических модулей с точностью лучше 10 см посредством трилатерации времён распространения акустических сигналов [106, 107].

Над детектором IceCube-Gen2 планируется разместить радиодетекторную станцию, которая сочетает в себе неглубокие антенны с глубокими антеннами. Неглубокие антенны дают лучшее усиление сигнала, чувствительность к частоте и поляризации, а также накладывают вето на атмосферные явления для улучшения идентификации космических нейтрино в оптическом массиве. Глубокие антенны с триггерной цепью и фазированной антенной решёткой дают более эффективный объём и лучший охват неба. Радиорешётка будет охватывать ~ 500 км^2. В концептуальном проекте предполагается 200 станций, что обеспечит высокую чувствительность при энергиях выше 10 ПэВ.

Оптический модуль детектора IceCube, представленный на Рис. 17 [104], имеет один ФЭУ Hamamatsu R7081-02 диаметром 10”, который работает в диапазоне длин волн 300–650 нм с

пиковой квантовой эффективностью 25 % вблизи 390 нм и регистрирует черенковское излучение, возникающее при взаимодействии со льдом нейтрино с энергиями от 10 ГэВ до 10 ПэВ. Оптический модуль заключён в прозрачную сферу с внешним размером до 35,6 см, которая способна выдержать давление 690 атм. Фотоэлектронный умножитель ориентирован вниз. Сигнал передаётся по витой паре на поверхность в лабораторию нейтринного телескопа. Благодаря строгому протоколу проверки 98,4 % оптических модулей внутри льда работают и собирают данные. За счёт стабильности программного обеспечения детектор IceCube предоставляет 99 % времени безотказной работы.



Рис. 17. Оптический модуль IceCube с фотоэлектронным умножителем Hamamatsu R7081



Рис. 18. Оптический модуль IceCube-Gen2

Оптический модуль для проекта IceCube-Gen2 отличается от оптического модуля IceCube. Его конструкция показана на Рис. 18. Несколько ФЭУ, направленных в разные стороны, позволят регистрировать характерные для ν_τ две последовательные вспышки на небольшом расстоянии друг от друга и время, прошедшее между ними.

Нейтринный детектор P-ONE

Реализация проекта началась в 2018 году с измерений свойств воды в месте предполагаемой локации детектора. Нейтринный детектор P-ONE располагается у западного побережья Канады, в 380 км от Ванкувера, на глубине 2 660 м. Детектор будет содержать 1 400 оптических модулей (Рис. 19) и включать 7 кластеров по 10 гирлянд длиной 1 000 м (Рис. 20). Объём одного кластера детектора составляет ~ 0,125 км^3. Гирлянда состоит из 20 оптических модулей. В месте локации круглогодичная температура воды на глубине находится на уровне 2 °C, скорость течения равна 0,1 м/с.

Длина затухания света составляет ~ 28 м для длины волны 450 нм. Показатель активности распада изотопа ^{40}K в океанической воде [108]:

$$Bq = 8{,}6 \pm 4{,}7 \frac{\text{распад}}{\text{мс м}^3}.$$

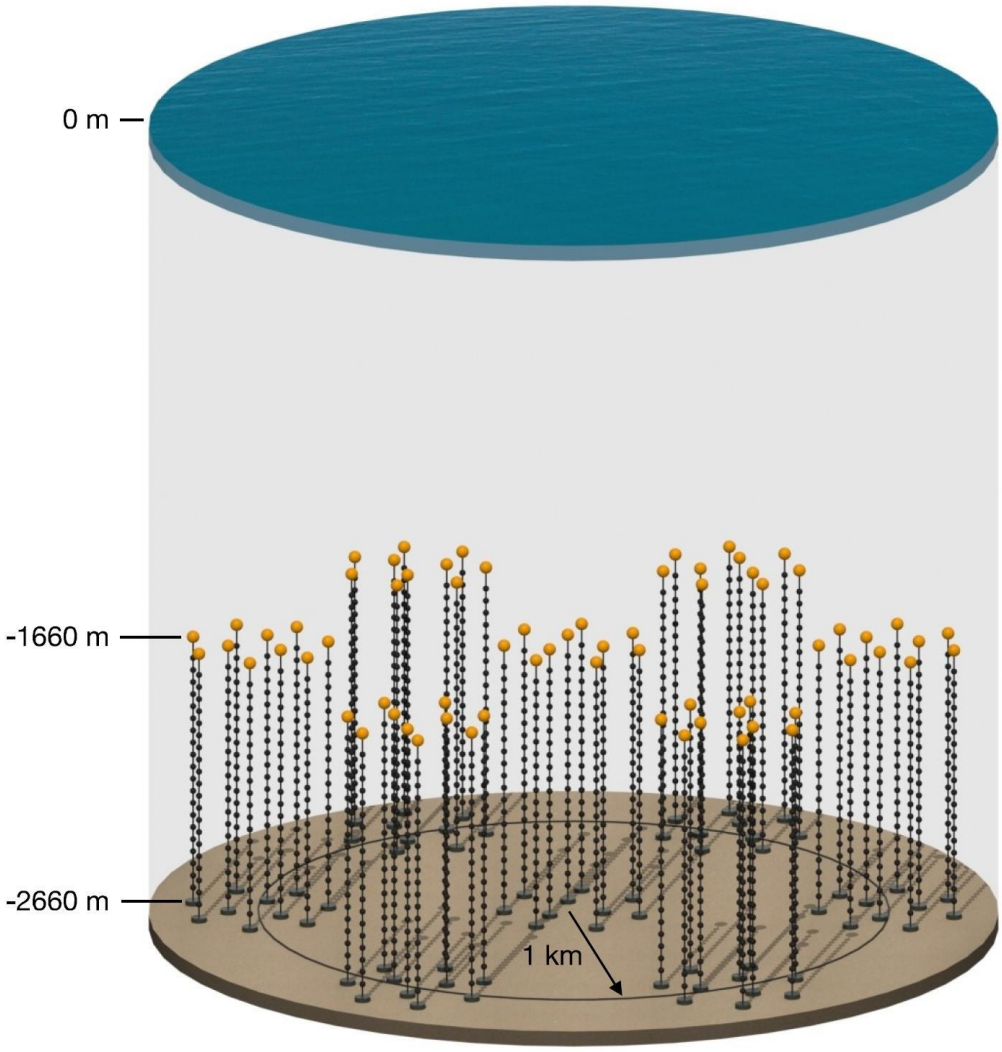


Рис. 19. Нейтринный детектор P-ONE

Нейтринный детектор P-ONE оптимизирован для определения ароматов частиц, что делает его хорошим инструментом для изучения нейтринной физики высоких энергий. Заявлено, что детектор позволит регистрировать треки, каскады и двойные события.

Оптический модуль P-ONE будет иметь конфигурацию с несколькими ФЭУ для достижения наилучших возможных характеристик в условиях высокого светового фона океана (Рис. 21). Фотоны от медленных биологических процессов не коррелируют в наносекундном масштабе времени, что позволяет существенно

подавить этот фон, требуя совпадений в наносекундном масштабе попаданий фотонов в два или более ФЭУ. Это совпадение ожидается для вспышек черенковского света, вызванных нейтрино, что позволит чётко отделить сигнал от фоновых событий [109].

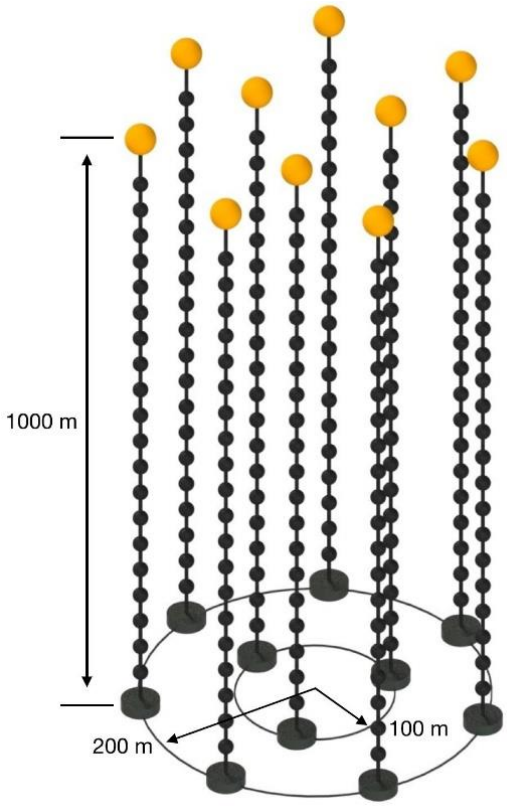


Рис. 20. Кластер детектора, состоящий из 10 гирлянд



Рис. 21. Оптический модуль нейтринного детектора P-ONE

Нейтринный детектор TRIDENT

Осуществление проекта началось в 2019 году. Нейтринный детектор TRIDENT предполагается разместить в Южно-Китайском море, в 540 км к югу от Гонконга, на глубине 3 500 м. Объём детектора высотой 700 м будет равен ~ 8 км^3. Детектор состоит из 1 200 гирлянд, каждая из которых имеет 20 оптических модулей. Гирлянды расположены неравномерно по схеме укладки плитки Пенроуза с расстояниями между гирляндами 70 м и 110 м (Рис. 22). Такое расположение исключает наличие прямых коридоров [110]. Над детектором находится слой воды толщиной 2 800 м. На глубинах более 2 800 м вода имеет постоянную температуру ~ 2 С° и скорость течения менее 0,1 м/с [65].

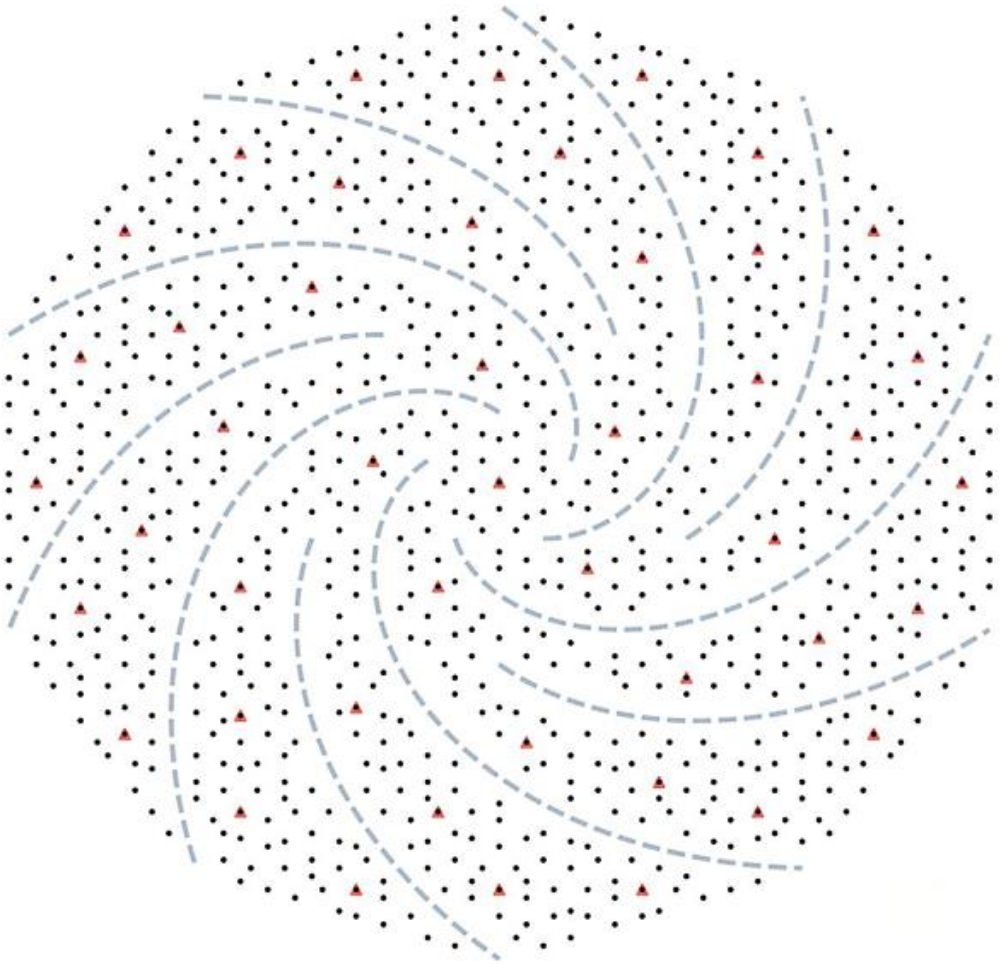


Рис. 22. План расположения гирлянд нейтринного детектора TRIDENT. *Точками* показано расположение гирлянд с оптическими модулями; *треугольниками* – место установки соединительных боксов; *пунктирными линиями* обозначены пути для дистанционно управляемых подводных мобильных средств обслуживания

Показатель активности распада изотопа ^{40}K в воде:

$$Bq = 11\,101 \pm 119\ \frac{\text{распад}}{\text{с} \cdot \text{м}^3}.$$

Результаты измерения затухания света приведены в Табл. 4. В измерениях были использованы ФЭУ и видеокамера [110, 111].

Таблица 4

Результаты измерения длины затухания света в зависимости от длины волны в месте размещения детектора TRIDENT

Регистратор	Длина волны			
	405 нм	450 нм	460 нм	525 нм
ФЭУ	15,3 ± 1,2 м	25,2 ± 3,7 м	–	19,0 ± 1,8 м
Видеокамера	$19{,}5^{+3{,}3}_{-2{,}6}$ м	–	26,8 ± 2,8 м	18,7 ± 1,3 м

Нейтринный детектор будет работать в энергетическом диапазоне ТэВ – ЭэВ. Угловое разрешение для треков: ~ 0,1° для энергии больше 100 ТэВ. Угловое разрешение для каскадов: ~ 1,5° для энергии 100 ТэВ и ~ 1,8° для энергии 1 ПэВ.

Оптический модуль нейтринного детектора TRIDENT показан на Рис. 23. С целью улучшения временного разрешения в оптическом модуле установлены 31 ФЭУ производства HZC Photonics, модель XP72B20 [112], с квантовой эффективностью 24,9 % для длины волны черенковского света 420 нм и 24 кремниевых фотоумножителя производства KETEK, модель PA3325-WB-0808, с квантовой эффективностью 43 % для длины волны 430 нм [113, 114]. Для улучшения обзора и регистрации τ-нейтрино по двум характерным последовательным вспышкам черенковского света умножители установлены в сферическом корпусе и направлены в разные стороны.



Рис. 23. Оптический модуль нейтринного детектора TRIDENT

Нейтринные детекторы NEON и HUNT

Рассматривается создание в Южно-Китайском море нейтринного телескопа NEON объёмом 10 км^3 с радиусом 1,79 км [66]. В детекторе будет установлено 1 200 гирлянд. Расстояние между оптическими модулями будет определяться оптическими свойствами воды. Конструкция оптического модуля будет подобна модулю детектора KM3NeT. Поскольку длина затухания света в море на большой глубине составляет ~ 30–50 м для длины волны 400–500 нм, то расстояние между гирляндами предполагается иметь порядка 100 м, а оптические модули установить на расстоянии 40 м друг от друга по вертикали. Детектор сможет обнаруживать нейтрино высоких энергий с чувствительностью $E^2\Phi \sim 2 \cdot 10^{-10}$ ГэВ см$^{-2}$ с$^{-1}$ в диапазоне энергий от 10 ТэВ до 10 ПэВ с угловым разрешением 0,1° для 100 ТэВ.

Предлагается также создание нейтринного телескопа HUNT для поиска источников нейтрино с энергией выше 100 ТэВ [67]. Детектор телескопа будет состоять из 2 304 гирлянд со средним расстоянием между ними ~ 130 м. Каждая гирлянда имеет высоту 860 м и включает 24 оптических модуля, установленных на расстоянии 36 м друг от друга. Геометрический объём детектора будет достигать 30 км^3. В качестве места размещения детектора нейтринного телескопа HUNT кроме Южно-Китайского моря рассматривается озеро Байкал.

Каждый оптический модуль с ФЭУ диаметром 20” (Рис. 24) интегрирован со светодиодными калибровочными источниками света, высоковольтными и низковольтными модулями питания, электронными системами считывания, датчиками температуры и влажности, манометрами и другим оборудованием.

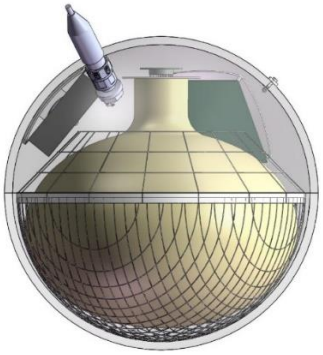


Рис. 24. Оптический модуль нейтринного детектора HUNT

Оптические свойства среды нейтринных детекторов

Распространению черенковского света в среде препятствуют процессы поглощения и рассеяния света. В процессе поглощения в результате взаимодействия фотонов с атомами среды энергия фотона конвертируется в нагрев атома, что приводит к уменьшению количества фотонов. Рассеяние вызывает изменение направления распространения фотонов. В результате этого происходит растяжка времени прибытия фотонов на регистрирующий фотоэлемент, что снижает угловое разрешение нейтринного детектора.

Поглощение и рассеяние света в среде приводит к уменьшению его интенсивности с увеличением проходимого расстояния по экспоненциальному закону:

$$I(L) = I_0\, e^{-L/\lambda_{\text{att}}},$$

где I_0 – начальная интенсивность света, L – расстояние, λ_{att} – длина затухания. Длина затухания − это расстояние, на котором интенсивность света падает до $1/e$, то есть около 63 % фотонов остановлены или рассеяны.

Рассеяние света можно качественно разделить на две области в зависимости от относительного размера препятствий и длины волны: рэлеевское рассеяние и рассеяние Ми. Диаграммы рассеяния света представлены на Рис. 25. Рэлеевское рассеяние относится к рассеянию от небольших препятствий радиусом $r << \lambda$, где λ – длина волны фотона. Рассеяние Ми описывает рассеяние от препятствий радиусом $r \geq \lambda$, которые присутствуют в природной воде в основном в виде органики.

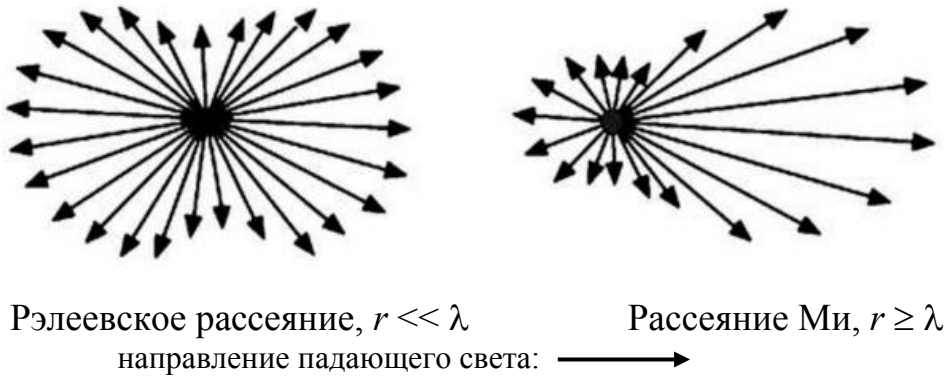


Рис. 25. Диаграммы рассеяния света

Длина затухания определяется формулой

$$\frac{1}{\lambda_{att}} = \frac{1}{\lambda_{abs}} + \frac{1}{\lambda_{Ray}} + \frac{1}{\lambda_{Mie}},$$

где λ_{abs} – длина поглощения,

λ_{Ray} – рэлеевская длина рассеяния,

λ_{Mie} –длина рассеяния Ми.

Рассеивание света морской водой состоит на 17 % из рассеяния Рэлея и на 83 % из рассеяния Ми со средним прямым отношением 0,93 [115].

Для эффективной регистрации черенковского света оптическими модулями важным фактором является оптическая прозрачность среды. Результаты измерения длины затухания света в воде в зависимости от длины волны для различных локаций нейтринных детекторов приведены на Рис. 26 [110].

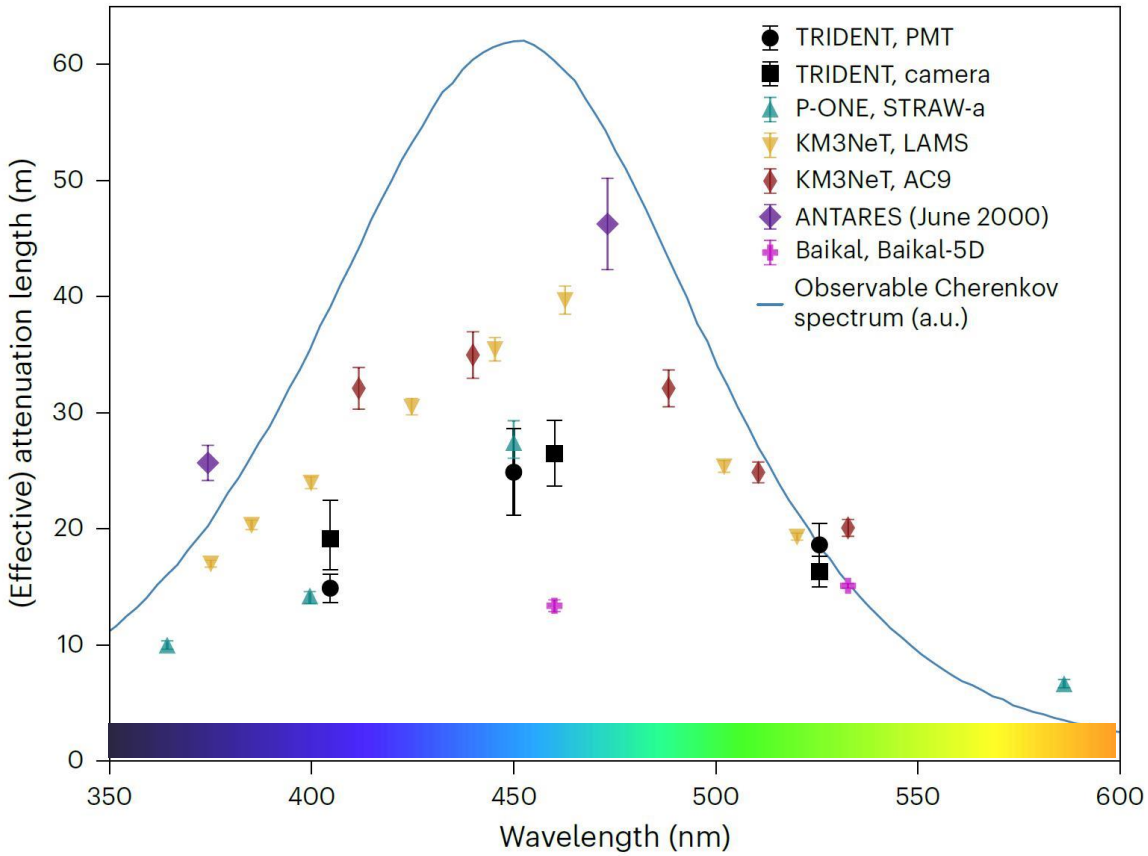
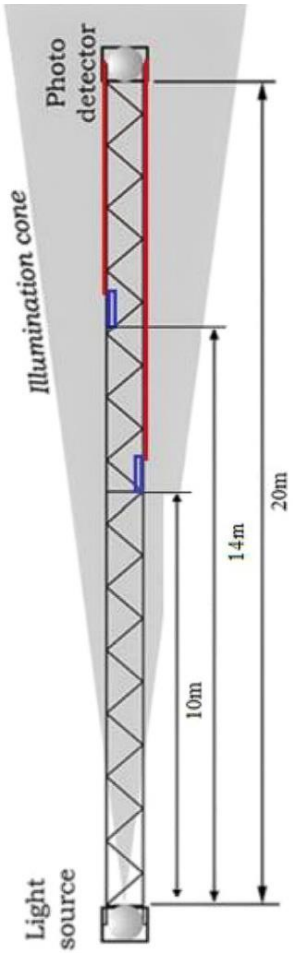
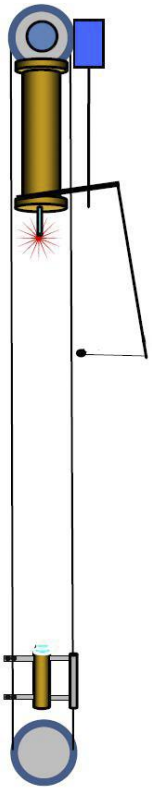


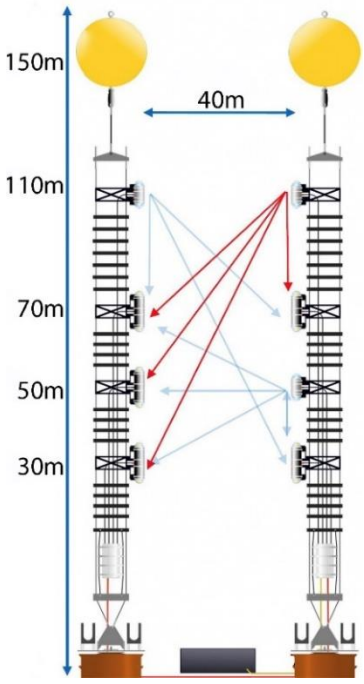
Рис. 26. Результаты измерения длины затухания света в воде в зависимости от длины волны для различных локаций нейтринных детекторов

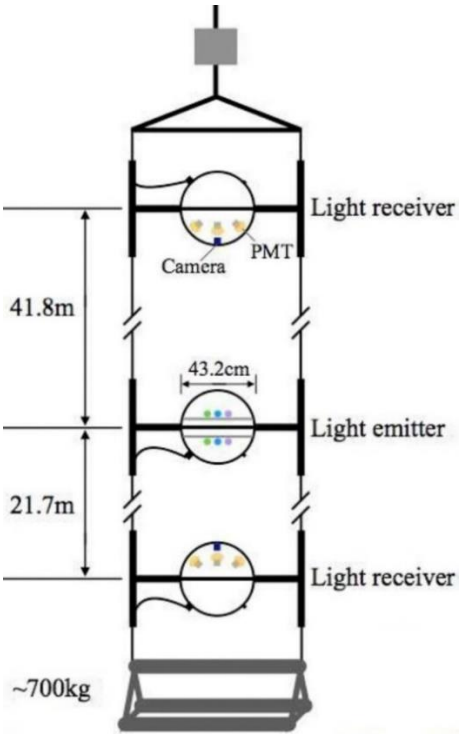
Измерения оптических свойств среды в диапазоне длин волн черенковского света производились с помощью специальных систем, схемы которых показаны на Рис. 27.





KM3NeT. Система LAMS [116] Baikal-GVD. Система BAIKAL-5D [97]





P-ONE. Система STRAW [117] TRIDENT. Система T-REX [110]

Рис. 27. Схемы систем для измерения оптических свойств воды

Одним из недостатков оптического метода регистрации нейтрино является необходимость установки в детекторе большого количества оптических модулей из-за относительно короткой длины затухания черенковского света в сравнении с размерами детектора.

В месте расположения детектора IceCube в антарктическом леднике проводились измерения оптических свойств льда, используя как источники света, установленные на измерительных модулях IceCube, так и специальный скважинный лазерный зонд, называемый «пылерегистратор». В верхних слоях лёд содержит пузырьки воздуха, которые в нижних слоях превращаются в каверны, что приводит к снижению прозрачности льда. В процессе изучения распространения света в леднике было выявлено, что слои льда имеют наклон в объёме детектора и присутствует эффект преимущественного распространения света в направлении движения ледника. На глубинах 1 980–2 100 м был обнаружен слой льда с пылевыми частицами. Ледник на Южном полюсе движется со скоростью ~ 10 м в год. После бурения скважин горячей водой вновь образовавшийся лёд состоит из внешнего слоя и центрального ядра диаметром ~ 16 см, которое имеет гораздо меньшую длину рассеяния света, чем у сплошного льда, окружающего скважину.

Глубокий антарктический лёд имеет большую длину поглощения, но более короткую длину рассеяния в сравнении с водой. Рассеяние света льдом представляет собой в основном рассеяние Ми со средним прямым отношением 0,94 [118]. Оптические свойства льда Южного полюса в диапазоне длин волн 300–600 нм на глубинах 800–2 700 м приведены в работе [119].

Поскольку длина волны черенковского света короче размера кристалла, то оптические свойства кристаллов включают не только их структурную ориентацию, но также средний размер кристаллов и форму как функцию глубины. Оценка оптических свойств кристаллов льда в эксперименте на месте приводится в работе [120]. Поглощение и рассеяние света с длиной волны 405 нм на различной глубине показаны на Рис. 28.

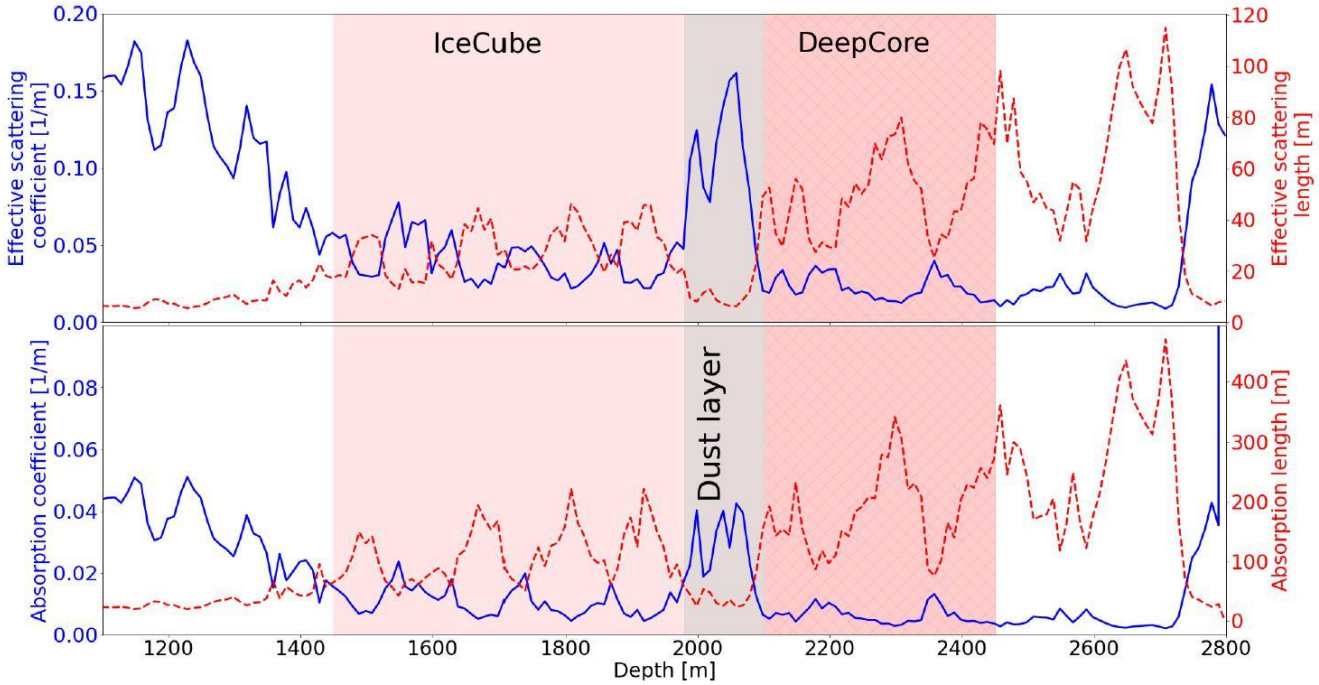


Рис. 28. Поглощение и рассеяние света в леднике

Глава 3. Нейтринный детектор в озере Восток

Подледниковое озеро Восток

Представление о толщине ледника над антарктическим континентом дает Рис. 29. Подледниковое озеро Восток расположено в центральной части Антарктического континента, имеет вытянутую с юга на север, слегка изогнутую форму, его размеры превышают 275 км в длину и 50 км в ширину. Максимальная измеренная глубина водного слоя составляет 1 200 м. Объём воды в озере равен ~ 6 343 км^3. Над южной оконечностью озера располагается одноименная полярная станция «Восток».

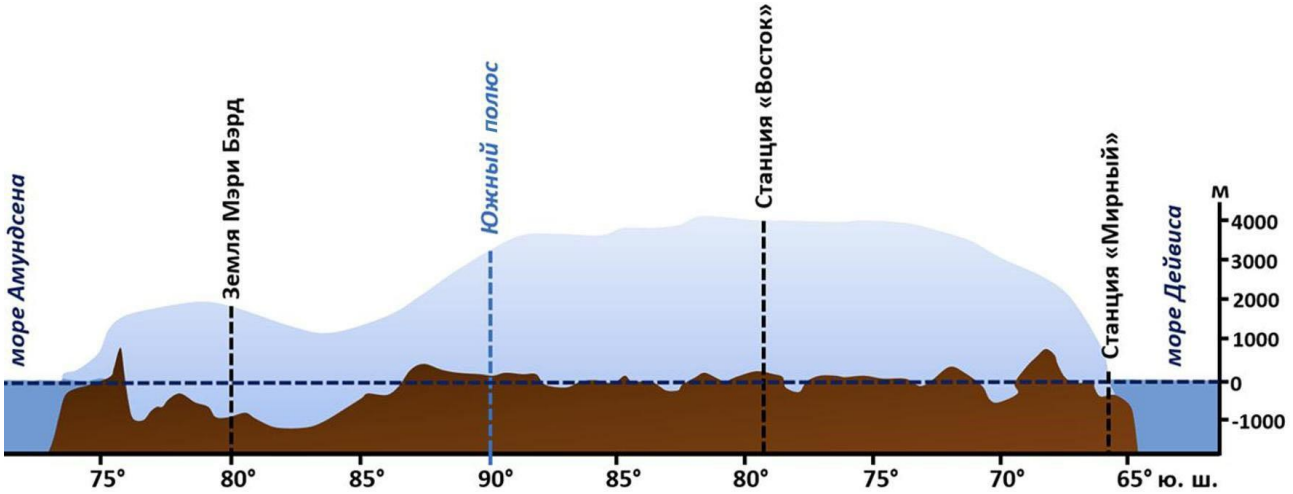


Рис. 29. Разрез антарктического континента

В районе полярной станции глубина водного слоя равна 680 м, а слой осадочных пород достигает 330 м. Сверху озеро закрыто ледником. Максимальное значение толщины ледника достигает 4 350 м. В районе станции ледник имеет толщину 3 758 м. Форма озера Восток без ледникового покрова показана на Рис. 30.



Рис. 30. Озеро Восток без ледникового покрова

Геофизические разрезы озера Восток показаны на Рис. 31 [121] и Рис. 32 [122]. Результаты радиолокационного зондирования озера представлены в работах [123, 124].

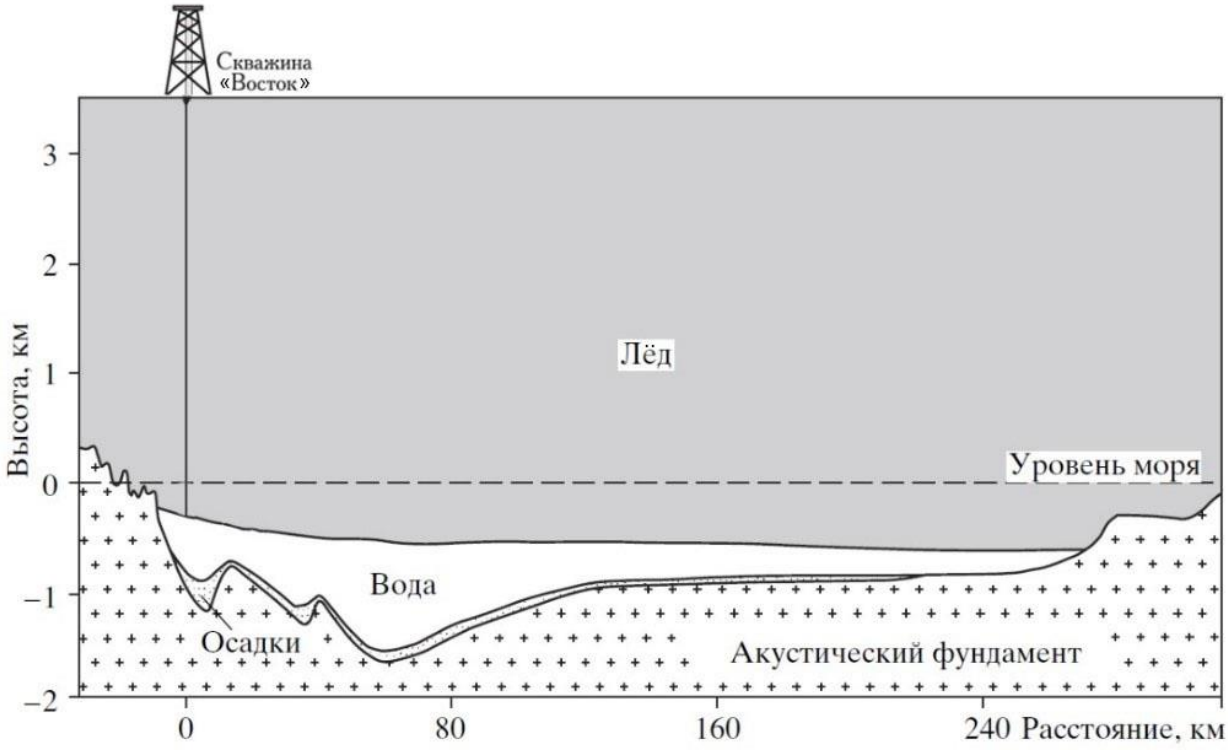


Рис. 31. Геофизический разрез вдоль озера Восток

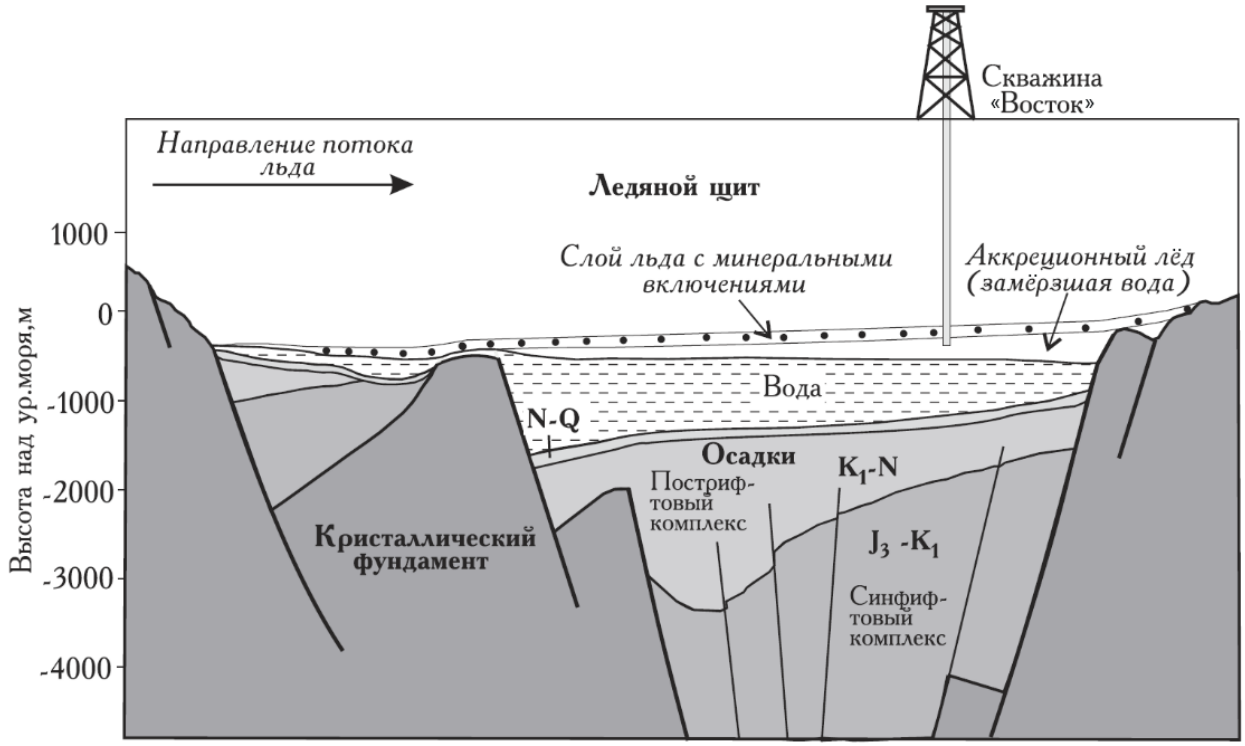


Рис. 32. Геофизический разрез поперёк озера Восток по линии тока ледника в месте расположения скважины 5Г

Глубокое бурение ледника с целью проведения гляциологических исследований было начато в 1970 году. Самую глубокую скважину 5Г начали бурить в 1990 году. Изучение ледяных кернов, извлечённых из скважины 5Г над озером, показало, что слой аккреционного льда достигает толщины 230 м. В озере присутствует циркуляция воды, обусловленная геотермальным потоком, который оценивается в 46 мВт/м^2. В северной части озера происходит плавление нижней поверхности льда, а в его южной части наблюдается приращение льда со скоростью 4,5 мм/год. По результатам химического анализа аккреционного льда солёность воды в озере составляет от ~ 0,02 до 0,06 ‰ [125].

Полярная станция «Восток» была основана 16 декабря 1957 года. Это круглогодично действующая внутриконтинентальная российская антарктическая станция с экстремально тяжелыми климатическими условиями. Она находится на высоте 3 488 м над уровнем моря. Среднегодовое атмосферное давление здесь составляет 624 гПа (468 мм рт. ст.). Средняя годовая относительная влажность воздуха равна 71 %. 21 июля 1983 года здесь была зафиксирована самая низкая температура на планете: –89,2 °С.

В 2025 году начал работу новый зимовочный комплекс станции «Восток» (Рис. 33), который состоит из пяти модулей: два служебно-жилых помещения, служебное здание с дизель-генераторными установками и системой очистки и хранения воды, склад с резервным дизель-генератором и гараж. Длина комплекса составляет 140 м, ширина – 13,5 м, максимальная высота – 17,5 м, общая площадь помещений равна 1 911 м². Толщина утепления стен – 80 см. Станция стоит на 36 опорах высотой 3 м, что позволит ей оставаться незанесённой снегом [126].



Рис. 33. Новый зимовочный комплекс станции «Восток»

На станции установлены 4 дизель-генератора мощностью 200 кВт и два резервных, расположенных отдельно от модулей станции. В конструкции станции применены технологии энергосбережения. Система вентиляции включает в себя рекуператор, который подогревает поступающий воздух. С помощью системы утилизации тепла отработанных газов дизелей прогревается воздух для отопления помещений. Для внутреннего и наружного освещения используются светодиодные светильники. Система водоснабжения производит очистку технической воды для повторного использования. Все системы имеют двойное или тройное резервирование. Новый зимовочный комплекс обеспечен двухлетним запасом топлива и продуктов. Доставка грузов производится со станции «Прогресс» санно-гусеничными походами в летний период по маршруту протяжённостью 1 350 км. Около станции расположена взлетно-посадочная полоса для самолётов.

В новом зимовочном комплексе могут находиться 15 человек во время зимовки и 35 человек в летний сезон. Для полярников

предусмотрены все необходимые условия для работы и проживания [127]. На станции проводятся наблюдения за магнитосферой и ионосферой, метеорологические наблюдения и медико-биологические исследования. В летний сезон в районе станции проводятся гляциологические работы.

В случае размещения в новом зимовочном комплексе оборудования для сбора и обработки данных, поступающих с нейтринного детектора, финансовые, временные и материальные затраты на создание нейтринного телескопа значительно снижаются. Положительными моментами являются действующая логистическая схема доставки грузов и наличие телекоммуникационного обеспечения. Использование инфраструктуры нового зимовочного комплекса представляется логичным и критически важным подходом в реализации уникального нейтринного проекта.

Преимущества размещения нейтринного детектора в подледниковом озере

При выборе места для размещения детектора высокоэнергетических нейтрино определённые требования предъявляются к среде, в которой располагаются оптические модули, и к экранированию от поступающих со стороны атмосферы потоков заряженных частиц.

Нейтринный детектор должен иметь большой объём среды с высокой прозрачностью и низким световым фоном для эффективной регистрации черенковского излучения, возникающего в результате редких событий взаимодействия высокоэнергетических нейтрино со средой детектора. В качестве среды, доступной в больших объёмах, используются антарктический лёд, морская или озёрная вода. Основными источниками светового фона в воде является биолюминесценция, хемилюминесценция и распад радиоактивных элементов. На точность измерений оказывают влияние течения, которые смещают оптические модули в решётке детектора. Рассмотрим и сравним локации нейтринных детекторов больших объёмов.

Детектор KM3NeT ARCA (Рис. 34), расположенный в Средиземном море, находится на глубине около 3 500 м и имеет объём воды, равный ~ 1 км^3 с длиной затухания черенковского света

35 м для длины волны 450 нм. Толщина слоя экранирующей морской воды над детектором составляет 2 800 м.

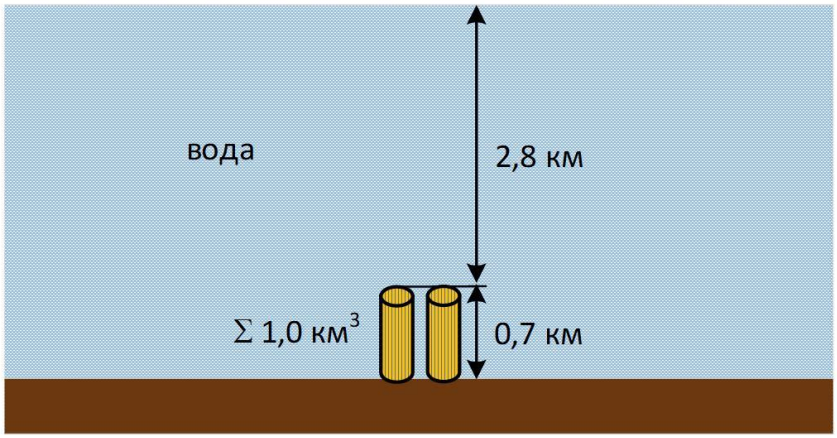


Рис. 34. Локация детектора KM3NeT ARCA в Средиземном море

Нейтринный детектор P-ONE (Рис. 35), расположенный в Тихом океане, находится на глубине 2 660 м, имеет высоту 1 км и объём воды ~ 0,9 км^3. Длина затухания света в месте расположения детектора равна ~ 28 м для длины волны 450 нм. Слой воды над детектором равен 1 660 м.

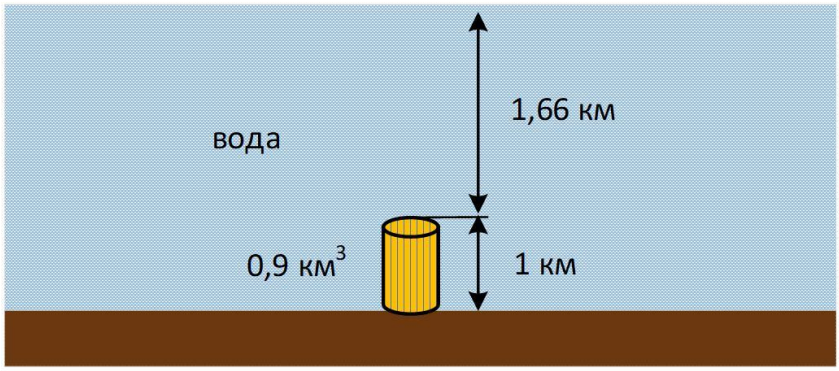


Рис. 35. Локация нейтринного детектора P-ONE в Тихом океане

Нейтринный детектор Baikal-GVD (Рис. 36) расположен в озере Байкал под слоем воды толщиной 750 м. Детектор высотой 525 м состоит из 12 кластеров с общим объёмом около 0,7 км^3. Длина затухания света равна ~ 16 м для длины волны 460 нм и находится в сезонной зависимости.

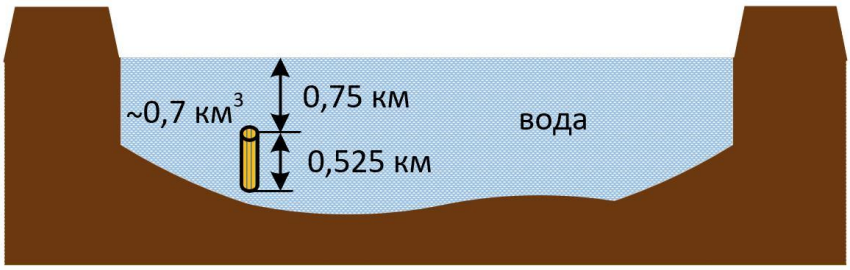


Рис. 36. Локация нейтринного детектора Baikal-GVD в озере Байкал

Нейтринный детектор TRIDENT (Рис. 37) будет размещён в Южно-Китайском море на глубине 3 500 м. Объём детектора высотой 700 м равен 8 км^3. Длина затухания света в месте расположения детектора равна 25 м для длины волны 450 нм. Над детектором находится слой воды толщиной 2 800 м.

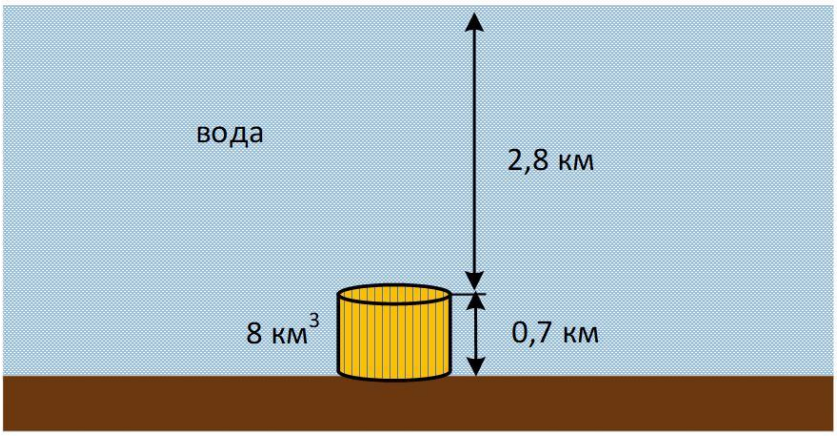


Рис. 37. Локация нейтринного детектора TRIDENT в Южно-Китайском море

Нейтринный детектор IceCube (Рис. 38) высотой 1 000 м расположен на Южном полюсе Земли внутри ледника. Объём детектора предполагается увеличить с существующего 1 км^3 до 7,9 км^3. Толщина слоя льда над детектором равна 1 500 м.

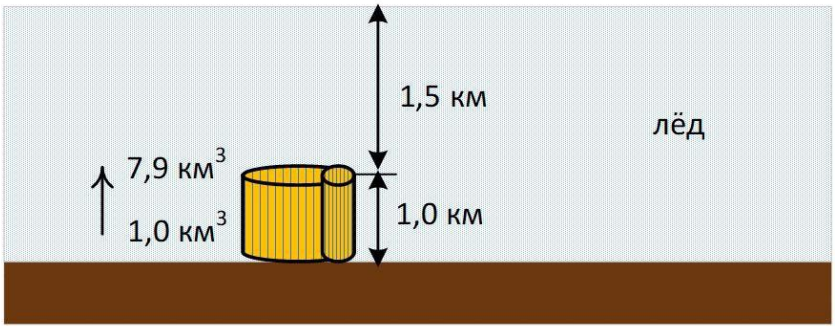


Рис. 38. Локация нейтринного детектора IceCube на Южном полюсе

Нейтринный оптический детектор объёмом более 20 км^3 предлагается разместить в подледниковом озере Восток (Рис. 39). Исходя из изолированных условий и слабых течений воды в озере ожидается, что длина затухания света в озёрной воде превысит 50 м для длины волны 450 нм. Над озером расположен ледник толщиной ~ 3 800 м, который будет экранировать нейтринный детектор от потоков солнечного и атмосферного излучения.

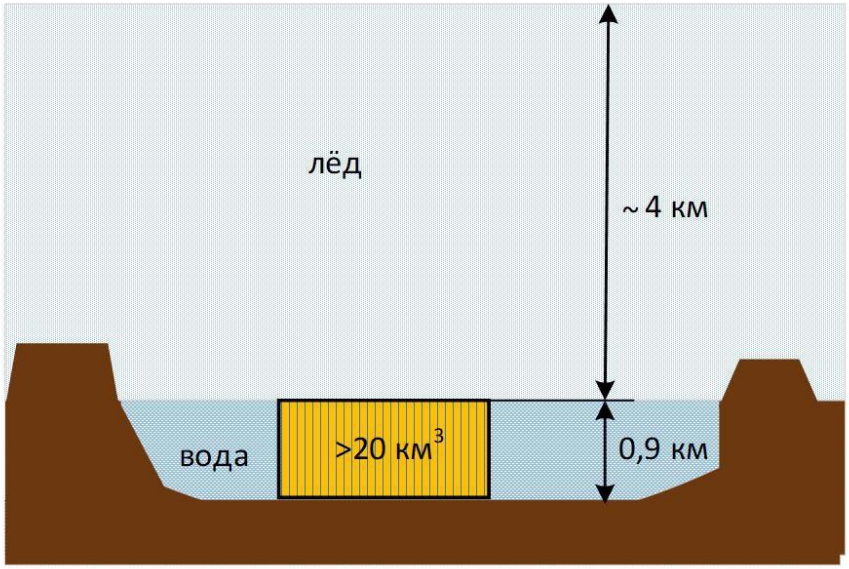


Рис. 39. Локация нейтринного детектора в подледниковом озере Восток

Рассмотрим особенности нейтринных детекторов, обусловленные различными локациями: в море, пресноводном озере, подледниковом озере.

В морской воде присутствует световой фон из-за распада содержащихся в ней радиоактивных изотопов. Наибольшее влияние на световой фон оказывает ^{40}K, который имеет два основных канала распада:

$$^{40}\mathrm{K} \rightarrow {}^{40}\mathrm{Ca} + e^- + \overline{\nu_e} \qquad (89{,}3\ \%);$$
$$^{40}\mathrm{K} + e^- \rightarrow {}^{40}\mathrm{Ar} + \nu_e + \gamma \quad (10{,}7\ \%).$$

Первый канал соответствует бета-распаду и порождает электроны с энергией до 1,3 МэВ. Этой энергии достаточно для получения до 150 черенковских фотонов. Второй канал соответствует захвату электронов, когда фотон, испускаемый возбуждённым ядром аргона, может генерировать электроны посредством комптоновского рассеяния, производя черенковские фотоны с энергией 1,46 МэВ [108, 128].

В морях и открытых озёрах существует световой фон, обусловленный биолюминесценцией. Биолюминесценция – это излучение света живыми организмами, вызываемое механической, электрической или оптической стимуляцией. В морской среде это широко распространённый механизм, который используется множеством видов живых организмов, от бактерий до крупных рыб, для поиска пищи, привлечения партнёров и спасения от хищников [129]. Исследования показали, что почти 75 % всех организмов размером более 1 см, обитающих на глубине до 4 000 м, способны к биолюминесценции [130]. Спектр излучения биолюминесценции сильно варьируется у разных видов, при этом основная часть излучения приходится на синюю область спектра в диапазоне 440–500 нм. Точная характеристика этого явления необходима для количественной оценки его влияния на фоновые уровни в нейтринном детекторе с оптическим методом регистрации событий.

Негативное влияние на точность измерений детектора, расположенного в море и открытом озере, оказывают течения, способные изменять положение измерительных модулей в оптической решётке детектора. Также отрицательно сказывается хозяйственная деятельность человека, такая как рыбный промысел, транспортные маршруты крупных судов. В детекторе, размещённом в озёрной воде, происходят сезонные изменения прозрачности воды, оказывающие влияние на регистрацию черенковского излучения.

В случае локации детектора внутри ледника наблюдается неравномерность распространения света внутри льда. Большую сложность вызывает необходимость бурения большого количества глубоких скважин большого диаметра (более двухсот в случае детектора на Южном полюсе) для размещения гирлянд с оптическими модулями.

Перечислим основные положительные особенности размещения оптического нейтринного детектора в подледниковом озере Восток. К ним относятся:

– эффективное экранирование нейтринного детектора от потоков солнечного и атмосферного излучения, а также от атмосферных мюонов [131, 132] слоем льда толщиной ~ 4 км;

– возможность применения одновременно нескольких методов регистрации нейтрино: оптического, акустического и

электромагнитного, что расширяет экспериментальные возможности нейтринного телескопа;

– отсутствие течений, способных смещать оптические модули в решётке детектора;

– более высокая прозрачность воды, которая способствует регистрации черенковского излучения;

– отсутствие светового фона от распада изотопа ^{40}K, который не содержится в озёрной воде;

– ожидаемое отсутствие биолюминесценции из-за крайне малого содержания микроорганизмов или их полного отсутствия в озере;

– отсутствие в подледниковом озере какой-либо активности, которая может повлиять на работу нейтринного детектора;

– необходимость бурения в леднике всего двух скважин для размещения оптических модулей нейтринного детектора в озере;

– использование скоростного метода бурения ледника, что позволит пробурить скважины к озеру в течение одного полярного сезона;

– наличие нового зимовочного комплекса полярной станции «Восток», в котором может быть размещено оборудование нейтринного телескопа;

– отработанная логистическая схема, которая позволит осуществить доставку на полярную станцию бурового оборудования и приборной базы нейтринного телескопа.

К отрицательным моментам размещения детектора в подледниковом озере можно отнести: необходимость бурения глубоких скважин в леднике; высокие экологические требования к работе в озере; необходимость использования автономного глубоководного дрона для монтажа гирлянд с оптическими модулями; географическую удалённость и суровые климатические условия Центральной Антарктиды.

Оптическая решётка нейтринного детектора

Нейтринный детектор может быть размещён приблизительно в 30 км к северо-западу от полярной станции «Восток» (Рис. 40). В этом месте толщина водного слоя достигает 900 м [133], что обеспечит достаточную высоту детектора.

Предварительный план оптической решётки нейтринного детектора в форме шестигранника показан на Рис. 41. Гирлянды располагаются с шагом 250 м друг от друга. Решётка детектора состоит из 469 гирлянд, каждая из которых содержит 8 оптических модулей с расстоянием 100 м между ними по вертикали. Общее количество оптических модулей составит 3 752 шт. Длина большой диагонали шестиугольника – 6 км. Площадь нейтринного детектора составляет 23,4 км^2, объём равен 21 км^3.

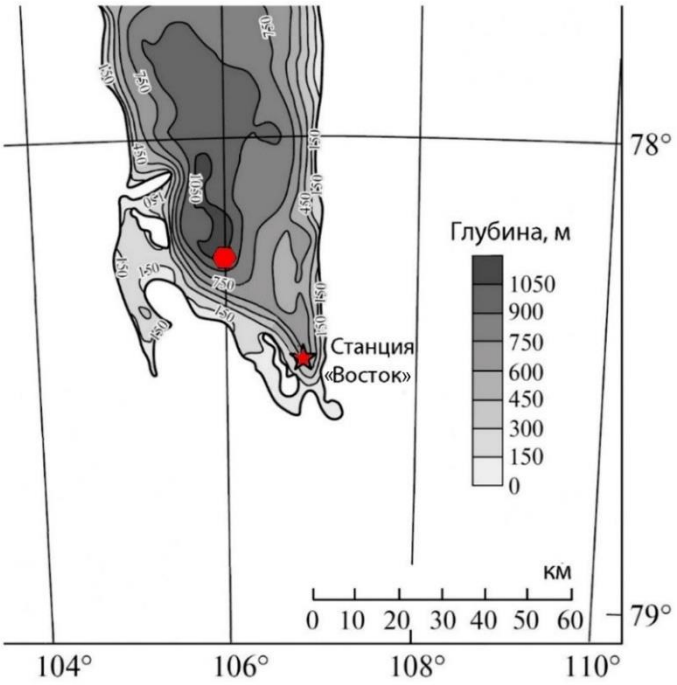


Рис. 40. Место расположения нейтринного детектора относительно станции «Восток»

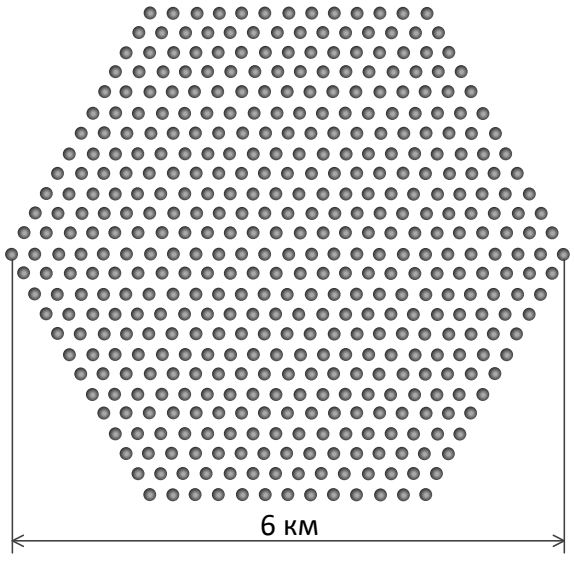
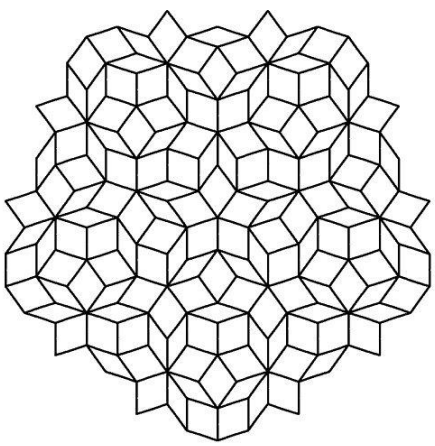
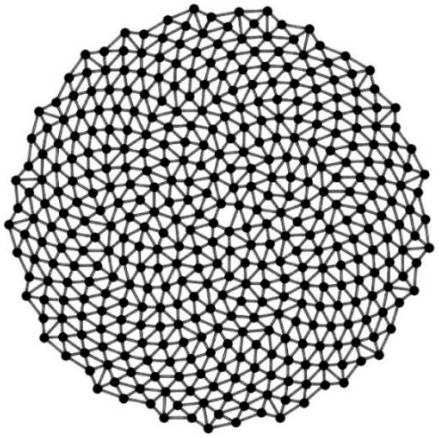


Рис. 41. Предварительный план расположения гирлянд в оптической решётке нейтринного детектора в озере Восток

С целью исключения прямых коридоров и повышения точности определения направления траектории нейтрино следует рассмотреть альтернативные варианты расположения гирлянд оптической решётки детектора, которые представлены на Рис. 42.



Плитка Пенроуза



Фрактал Фибоначчи

Рис. 42. Возможные планы расположения гирлянд нейтринного детектора

В Таблице 5 приведены проектные параметры нейтринных детекторов, а на Рис. 43 – планы оптических решёток.

Таблица 5

Проектные параметры нейтринных детекторов сверхбольших объёмов

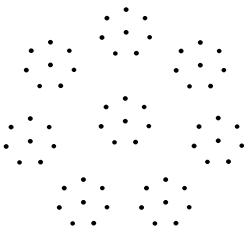
Детектор	Количество гирлянд, шт.	Расстояние между гирляндами, м	Расстояние между модулями, м	Количество оптических модулей, шт.	Объём нейтринного детектора, км^3
KM3Net ORCA	115	20	9	2 070	0,0067
KM3Net ARCA	230*	90	36	4 140	1
Baikal-GVD	64**	60	15	2 304	0,4
IceCube	86	125	17	5 160	1
IceCube-Gen2	120	240	16	9 600	7,9
P-ONE	70***	100–180	50	1 400	0,125
TRIDENT	1 200	70–110	35	24 000	8
Vostok	469	250	100	3 752	21

Примечание:

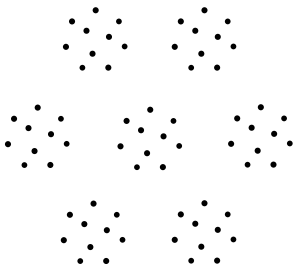
* – 2 кластера по 115 гирлянд.

** – 8 кластеров по 8 гирлянд.

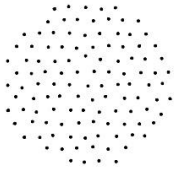
*** – 7 кластеров по 10 гирлянд.



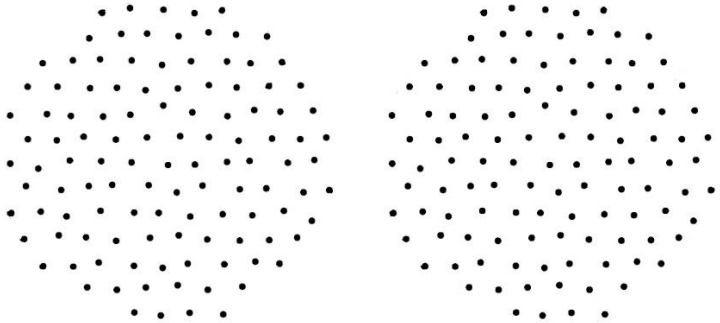
Baikal-GVD



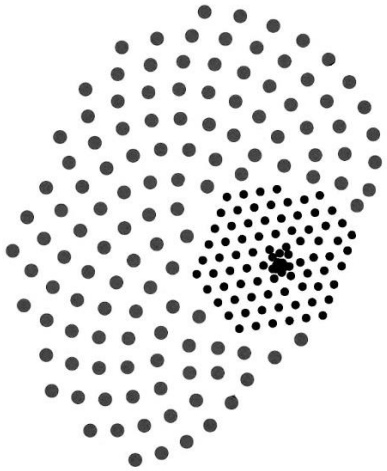
P-ONE



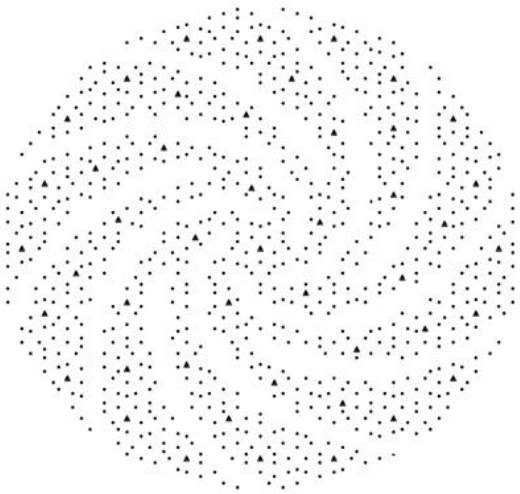
KM3Net ORCA



KM3Net ARCA



IceCube-Gen2



TRIDENT

Рис. 43. Планы расположения гирлянд нейтринных детекторов (не в масштабе)

Для точного определения формы пространственной решётки детектора и расстояния между оптическими модулями по вертикали и горизонтали необходимо будет выполнить оптимизационные расчёты с учётом оптических свойств воды в озере Восток и наблюдаемого энергетического диапазона нейтрино.

Скважины для нейтринного детектора

Для монтажа в озере гирлянд с оптическими модулями и обеспечения работы нейтринного детектора необходимо иметь две скважины, которые располагаются недалеко друг от друга. С целью длительного использования скважин они заполняются силиконовой незамерзающей жидкостью. Промышленные силиконовые жидкости выпускаются с широким диапазоном плотностей. Это позволит подобрать плотность заливочной силиконовой жидкости таким образом, чтобы при равновесной температуре с окружающим льдом нижний гидростатический уровень жидкости находился примерно на 10 м выше уровня озёрной воды.

После вскрытия озера комбинированным тепловым буровым снарядом (см. Главу 3 Части IV) уровень воды в скважине опускается ниже уровня поверхности. Заполнение скважины заливочной жидкостью производится сразу после вскрытия озера. Возможны два варианта заполнения.

В *первом варианте* буровой снаряд извлекается, и в нижнюю часть скважины опускается уровнемер (Рис. 44*а*), после чего производится заполнение скважины заливочной жидкостью с контролем положения нижнего уровня (Рис. 44*б*). Контроль осуществляется на протяжении всего времени, пока не наступит тепловое равновесие заливочной жидкости с окружающим льдом. Это делается, для того чтобы гарантировать, что при поддержании положения верхнего уровня заливочной жидкости на уровне поверхности её нижний уровень в скважине не опустился ниже допустимого значения в случае увеличения плотности жидкости в результате охлаждения. После извлечения уровнемера скважина готова к использованию. Положение верхнего уровня заливочной жидкости соответствует уровню устья скважины (Рис. 44*в*).

Заполнение скважины большим количеством силиконовой жидкости (> 70 м^3) может потребовать длительного времени, в течение которого будут происходить намерзание воды на стенках скважины и уменьшение её диаметра. Чтобы избежать этого явления, возможен *второй вариант*, при котором скважина заполняется заливочной силиконовой жидкостью без извлечения теплового бурового снаряда с поддержанием циркуляции нагретой

жидкости. После вскрытия озера гидростатический уровень воды опускается до отметки ~ 300 м ниже поверхности (Рис. 45*а*), после чего производится заполнение скважины заливочной жидкостью (Рис. 45*б*).

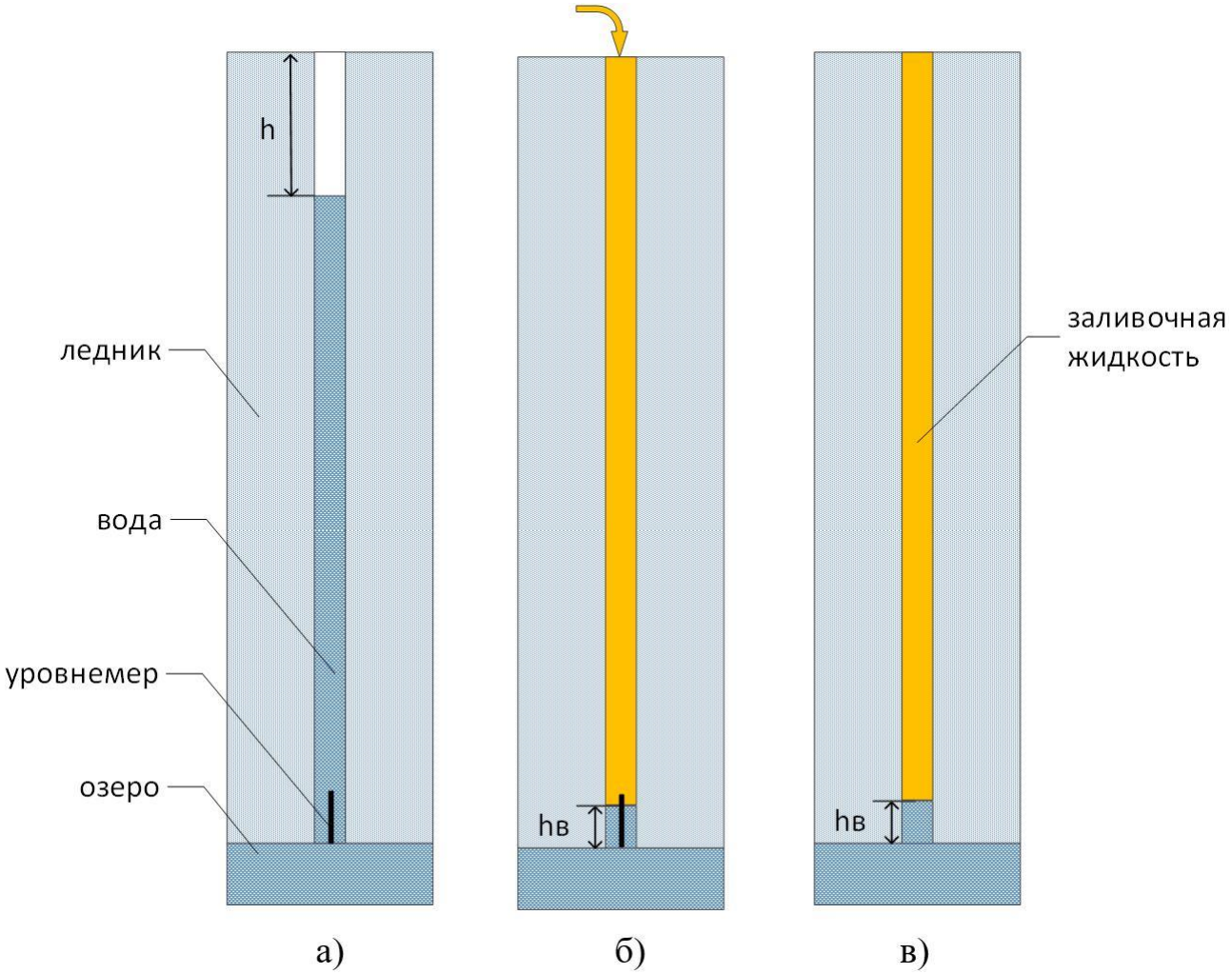


Рис. 44. Последовательность заполнения скважины заливочной жидкостью. Первый вариант

Контроль положения нижнего уровня производится с помощью уровнемера, расположенного в нижней части бурового снаряда. После заполнения скважины заливочной жидкостью циркуляция жидкости в буровом снаряде прекращается, и он вместе с заливочной жидкостью постепенно приходит в тепловое равновесие с окружающим льдом при постоянном контроле положения нижнего уровня заливочной жидкости. После этого буровой снаряд извлекается с одновременным заполнением освободившегося объёма заливочной жидкостью (Рис. 45*в*). Для проверки

положения нижнего уровня и его корректировки в нижнюю часть скважины опускается уровнемер.

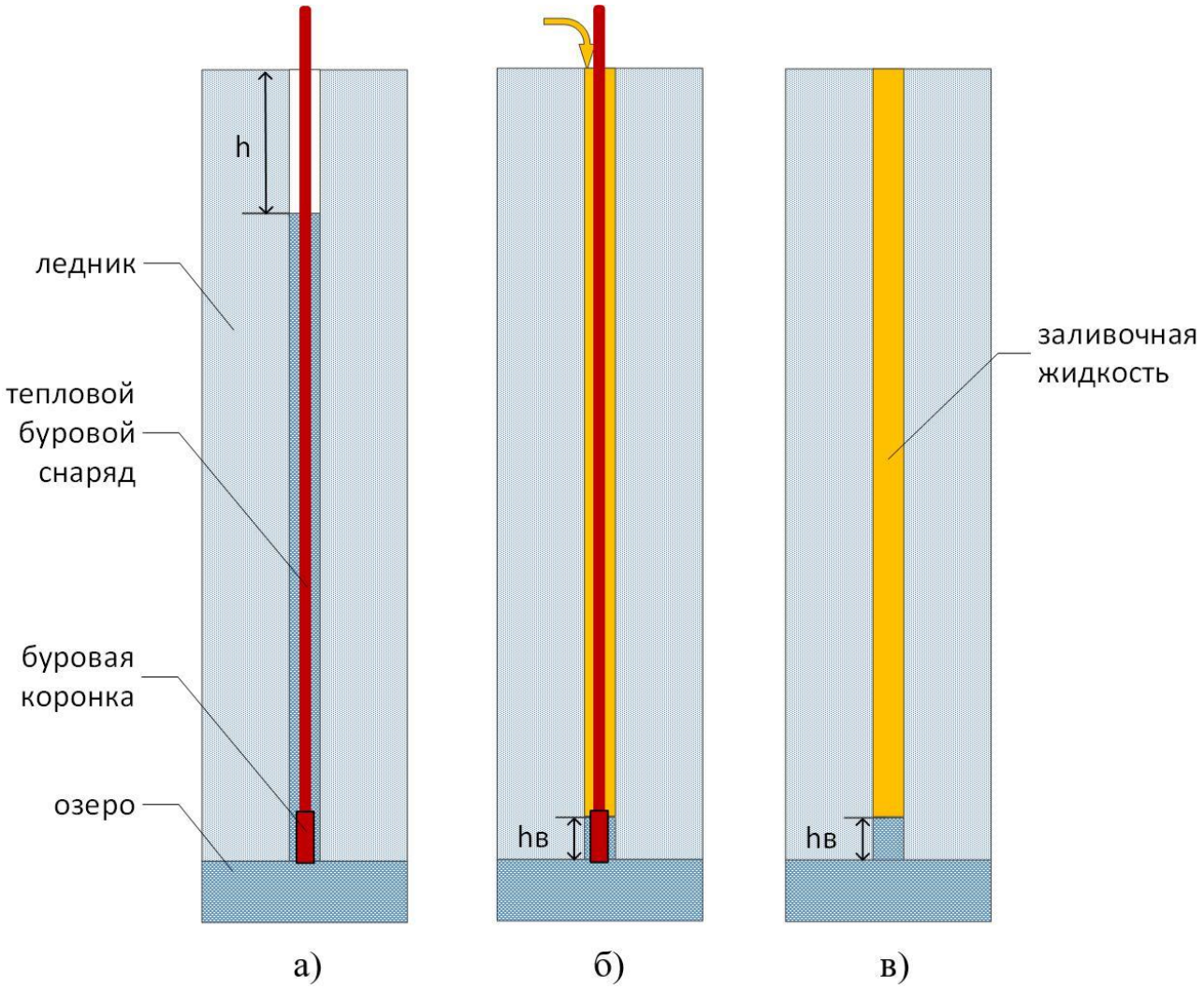


Рис. 45. Последовательность заполнения скважины заливочной жидкостью. Второй вариант

Устье скважины соединяется с расположенной рядом буферной ёмкостью для заливочной жидкости (Рис. 46). При погружении научного оборудования жидкость вытесняется из скважины в буферную ёмкость. При подъёме оборудования с целью предотвращения роста уровня воды в нижней части скважины жидкость с помощью насоса возвращается обратно в скважину.

Вода в нижней части скважины выполняет две функции. Первая функция заключается в том, что столб воды в пределах своей номинальной высоты допускает изменение положения нижнего уровня заливочной жидкости. Вторая функция состоит в том, что при опускании оборудования через слой воды с его поверхности

смывается плёнка гидрофобной силиконовой жидкости, которая поднимается вверх и остаётся в скважине.

Как было отмечено выше, для монтажа и эксплуатации нейтринного детектора потребуются две скважины. Одна скважина предназначена для проведения транспортных операций, а вторая – используется для прокладки кабеля от гирлянд с оптическими модулями и кабеля док-станции глубоководного дрона.

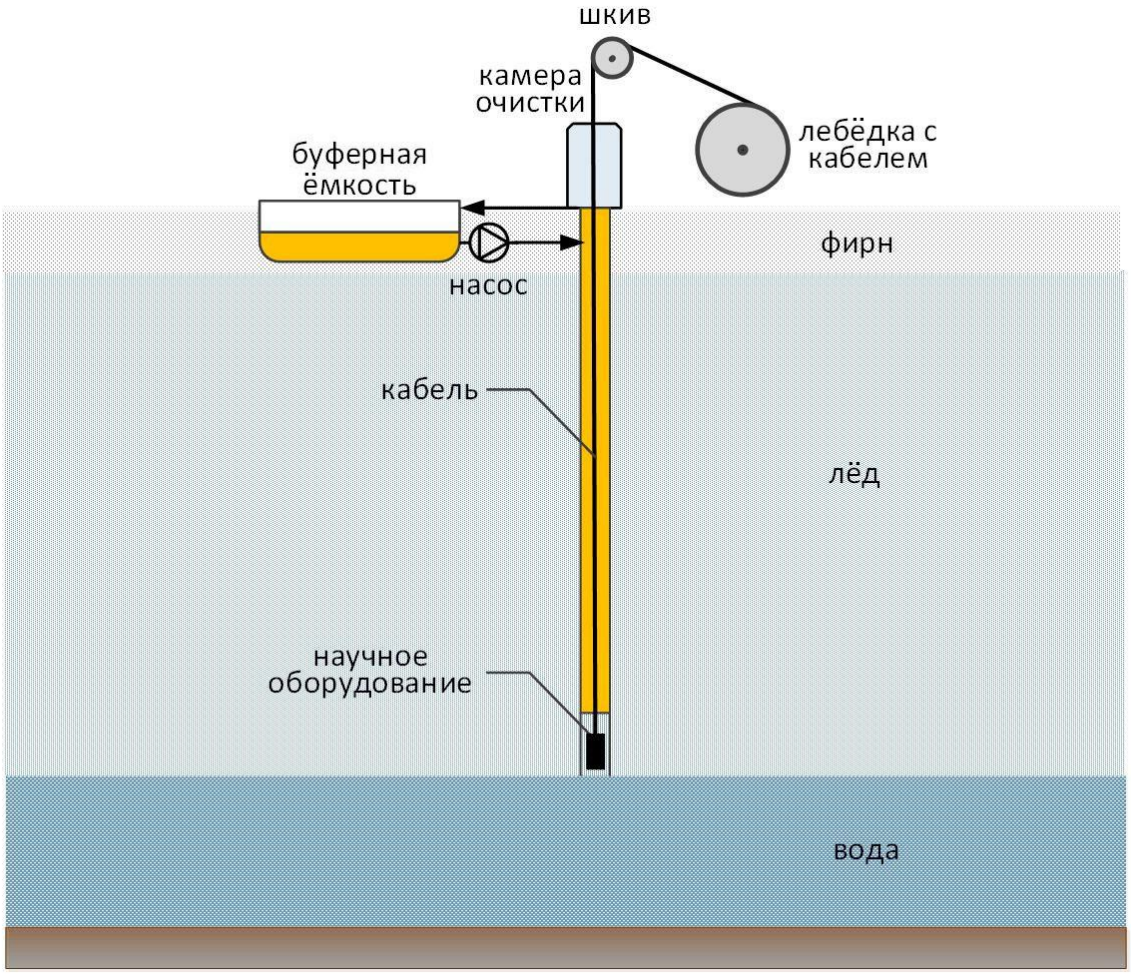


Рис. 46. Принципиальная транспортная схема скважины

Установка док-станции для дрона на дне озера позволит производить его подзарядку и загрузку оперативных заданий. Извлекать дрон из озера потребуется только для проведения планового технического обслуживания. Глубоководный автономный дрон помимо выполнения монтажных работ может перемещать по заданному маршруту видеокамеру, гидроакустический зонд и другие приборы, которые поочерёдно крепятся к его корпусу для исследования водного бассейна.

Для транспортировки научно-технического оборудования через скважину на поверхности устанавливается специальная лебёдка с кабелем. На конце кабеля закреплён универсальный стыковочный узел, к которому для доставки в озеро с целью последующего монтажа могут присоединяться позиционирующие якоря, гирлянды с оптическими модулями и научное оборудование. Всё спускаемое в озеро оборудование проходит обработку в камере очистки, установленной над устьем скважины. Лебёдка используется также для опускания электрического нагревателя с целью периодического прогрева нижней части скважины, заполненной водой, чтобы предотвратить уменьшение её диаметра ниже допустимых значений.

Размещение нейтринного детектора в подледниковом озере

Схема размещения нейтринного детектора в озере приведена на Рис. 47. Расстояние по вертикали между оптическими модулями в гирлянде определяется прозрачностью воды в озере.

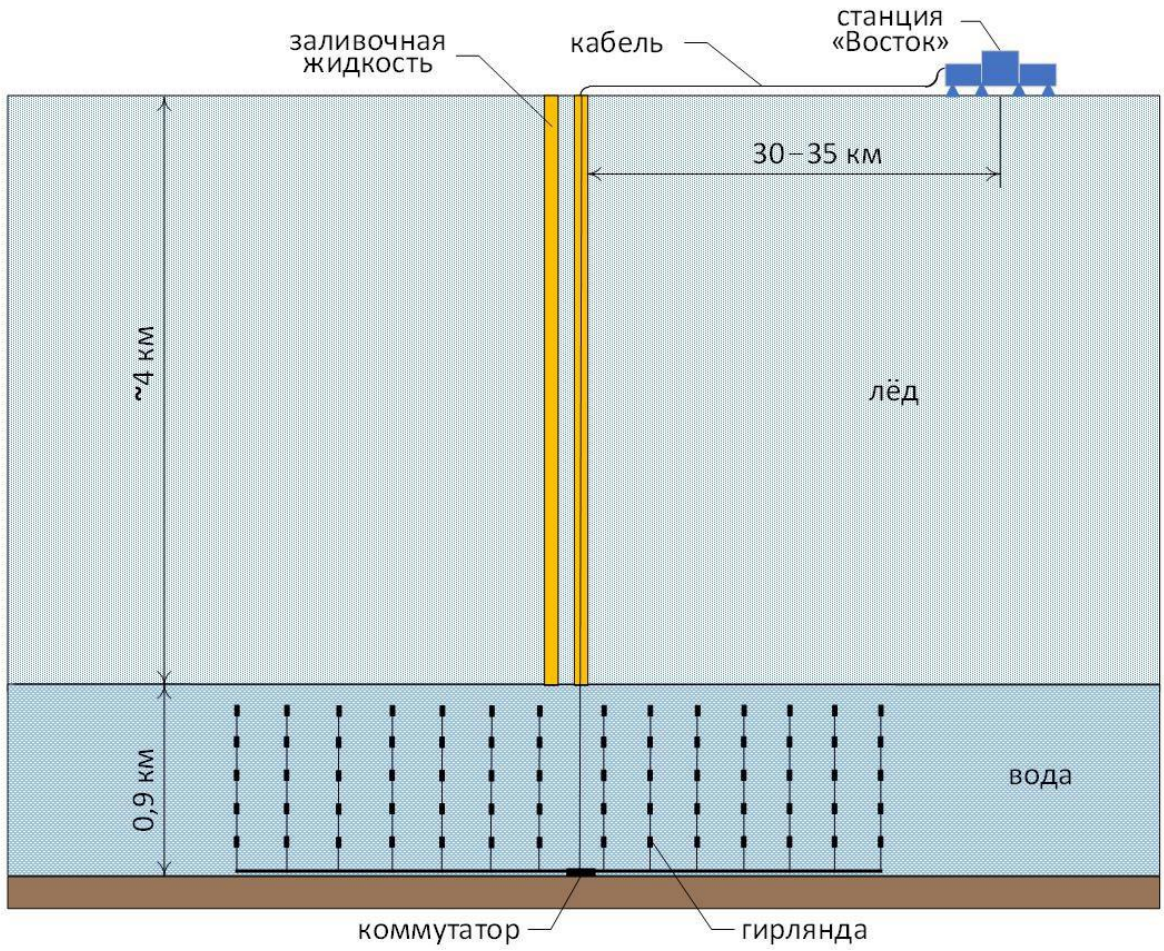


Рис. 47. Схема размещения нейтринного детектора в подледниковом озере

Для снижения необходимого диаметра скважины используются оптические модули цилиндрической формы, в которые устанавливаются два направленных в противоположные стороны ФЭУ или два видеомодуля с кремниевыми фотоумножителями.

Схема установки в озере гирлянд с оптическими модулями показана на Рис. 48. В нижней части гирлянды располагается якорь. К якорю гирлянды закреплены два троса, которые присоединены диаметрально к оптическим модулям и поплавку. Поплавок обеспечивает вертикальное положение гирлянды. Плавучесть гирлянды рассчитывается с учётом плавучести оптических моделей и поплавка.

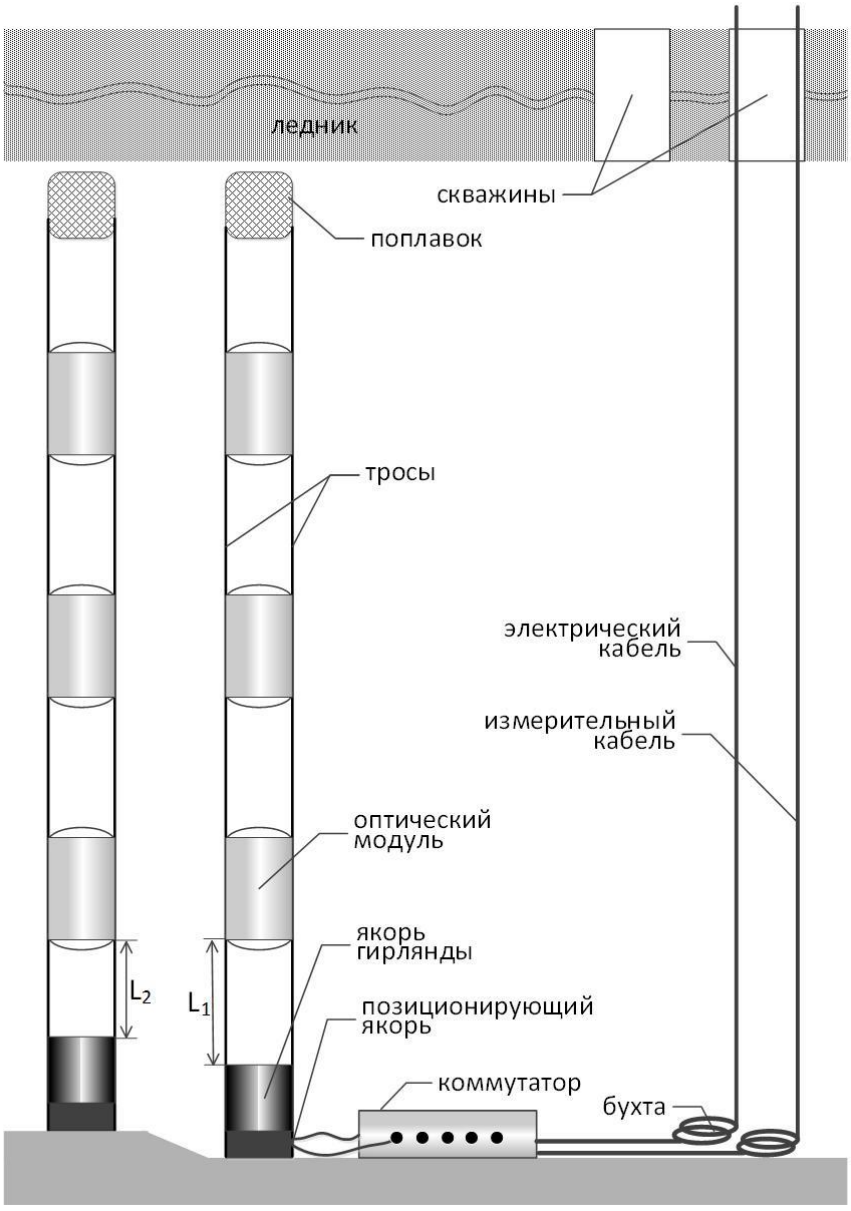


Рис. 48. Схема расположения гирлянд в подледниковом озере

При толщине водного слоя 900 м гирлянда будет иметь 8 оптических модулей. Расстояние между оптическими модулями и их количество будет корректироваться после измерения длины затухания черенковского света в озёрной воде.

Перед погружением гирлянд в заданных координатах оптической решётки детектора на дне озера устанавливаются позиционирующие якоря (Рис. 49) с ориентацией в одном направлении. Для размещения оптических модулей на одном уровне в горизонтальной плоскости якоря устанавливаются на дно с последующим измерением вертикальной координаты *Z*, которая зависит от рельефа дна. Это позволит определить длину троса *L* до нижнего оптического модуля. Установка якорей производится с помощью автономного дрона таким образом, чтобы не поднимать лёгкие частицы осадочных пород со дна озера, что может сказаться на прозрачности воды.

После погружения гирлянды в озеро через технологическую скважину якорь гирлянды устанавливается на позиционирующем якоре в однозначном положении. Такая установка обеспечивает одинаковую ориентацию оптических модулей в пространстве, что имеет значение при использовании в оптических модулях кремниевых фотоумножителей в виде мегапиксельных матриц.

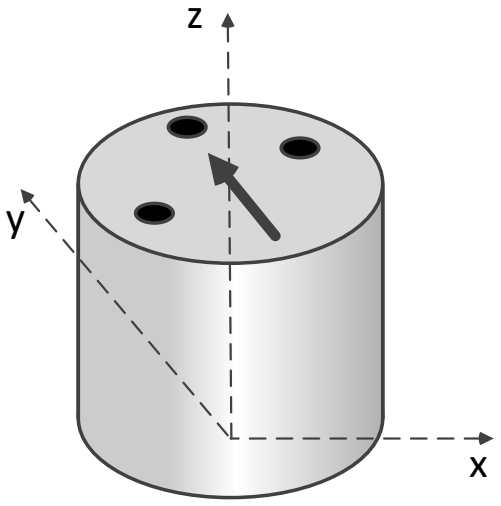


Рис. 49. Схема позиционирующего якоря

Цилиндрические оптические модули в гирлянде крепятся к двум диаметрально расположенным несущим тросам, функцию которых могут выполнять электрические и информационные кабели. Модули снабжены разъёмами для присоединения кабелей.

Кабели гирлянд соединяются с коммутатором, который имеет герметичные разъёмы и располагается горизонтально на дне озера. Гирлянды могут объединяться в кластеры, каждый из которых имеет свой коммутатор. От коммутаторов общие кабели выводятся на поверхность через предназначенную для них скважину.

Ледник движется над озером с запада на восток практически перпендикулярно продольной оси озера со скоростью 2,0 ± 0,01 м/год [134]. Для компенсации смещения кабельной скважины относительно коммутатора запас кабеля укладывается в бухту на дне озера. Аналогичная по функции дополнительная бухта с кабелем может располагаться и на поверхности, откуда кабель при необходимости через скважину опускается в озеро.

Фотоэлектронные и кремниевые фотоумножители

В качестве чувствительных сенсоров для регистрации черенковского излучения в нейтринных детекторах используются ФЭУ. Реконструкция энергии нейтрино основана на количестве фотонов, зарегистрированных с помощью ФЭУ. Это число корректируется с учётом прозрачности воды, запаздывания света в результате рассеяния и отражения, светового фона, тёмного шума ФЭУ и других параметров.

Параметры ФЭУ Hamamatsu, используемых в нейтринных детекторах, приведены в Табл. 6. Квантовая эффективность ФЭУ Hamamatsu в зависимости от длины волны света в качестве примера представлена на Рис. 50 [135].

Таблица 6

Параметры фотоэлектронных умножителей

Детектор	Модель	Напряжение, В	Диаметр фотокатода, мм	Квантовая эффективность
KM3NeT	Hamamatsu R12199-02	1 300	72	26,9 % @ 404 нм 21,6 % @ 470 нм
Baikal-GVD	Hamamatsu R7081-100	1 500	220	35 % @ 390 нм
IceCube	Hamamatsu R7081-02	1 500	220	25 % @ 390 нм

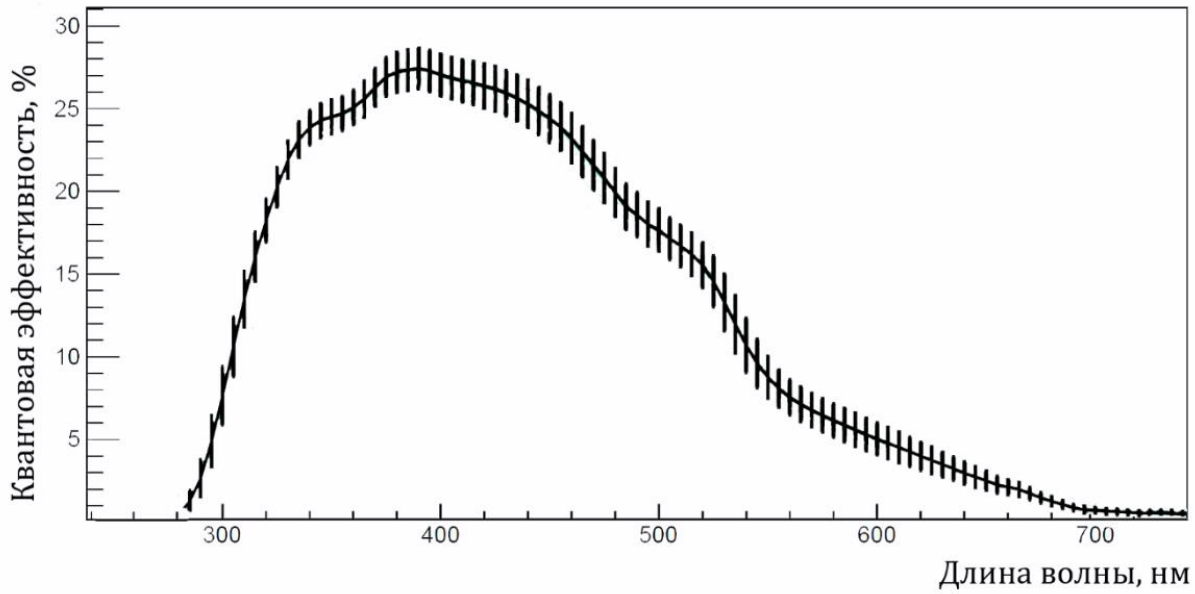


Рис. 50. Квантовая эффективность фотоэлектронного умножителя Hamamatsu R12199-02 в зависимости от длины волны света

В нейтринном детекторе IceCube используются ФЭУ Hamamatsu R7081, работающие в диапазоне длин волн от 300 до 650 нм. Внешний диаметр трубки равен 253 мм (Рис. 51). В детекторе IceCube DeepCore установлены ФЭУ Hamamatsu R7081 с повышенной до 35 % квантовой эффективностью при длине волны 405 нм [136].

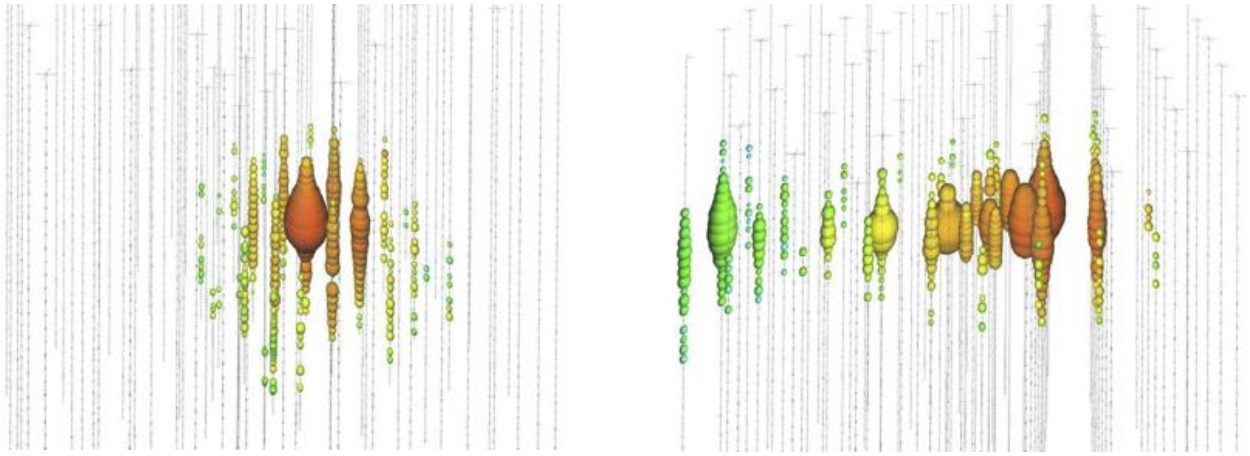


Рис. 51. Фотоэлектронный умножитель Hamamatsu R7081

Основным недостатком использования оптического метода регистрации нейтрино является то, что для создания большого объёма детектора требуется очень большое количество модулей с ФЭУ из-за малой, < 50 м, длины затухания света. Объём детектора,

равный 1 км^3, накладывает ограничение 10^{14} эВ на энергию нейтрино, которые могут быть зарегистрированы. Потоки нейтрино более высоких энергий слишком малы, чтобы дать достаточную статистику регистрации частиц даже за многолетний период работы детектора объёмом 1 км^3 [137].

В нейтринном детекторе регистрируется черенковское излучение от каскада заряженных частиц, образовавшихся в результате взаимодействия ν_e или ν_τ со средой детектора или от мюонного трека. Регистрации этих событий [138] оптическими модулями нейтринного детектора показаны на Рис. 52.



каскад мюонный трек

Рис. 52. Регистрация событий в нейтринном детекторе IceCube

В результате взаимодействия τ-нейтрино с нуклонами воды образуется каскад частиц и τ-лептон, пробег которого в воде до распада может составлять несколько метров. Распад лептона сопровождается второй вспышкой света. По времени между двумя вспышками черенковского излучения можно идентифицировать τ-нейтрино. Проблема регистрации двух последовательных вспышек заключается в том, что оптические модули находятся друг от друга на расстоянии, существенно превышающем дистанцию пробега τ-лептона (Рис. 53). Всего на детекторе IceCube было зарегистрировано 7 кандидатов на τ-нейтрино [139].

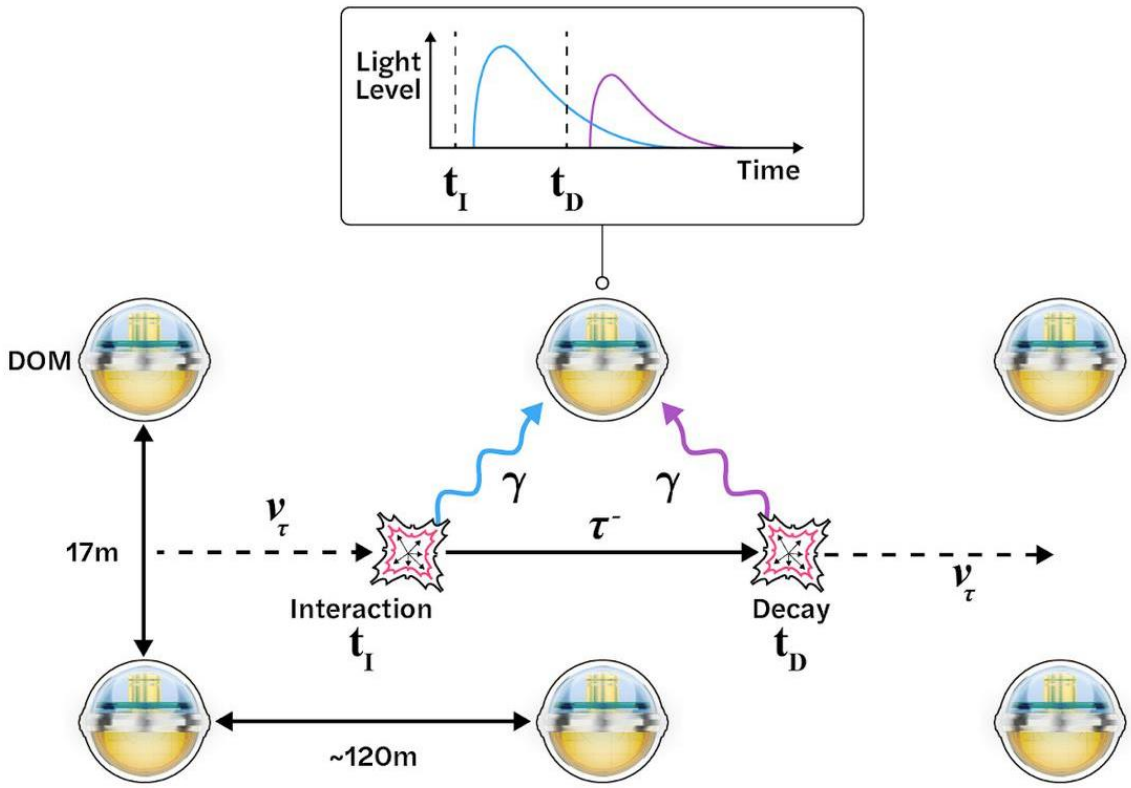


Рис. 53. Принцип регистрации τ-нейтрино

Чтобы решить проблему определения аромата нейтрино, создаются нейтринные детекторы с более плотной компоновкой оптических модулей, в которых размещено несколько ФЭУ, направленных в разные стороны. Примером может служить нейтринный детектор KM3NeT ORCA, который обеспечивает возможность регистрации двух последовательных вспышек черенковского света: от взаимодействия τ-нейтрино с веществом и от распада τ-лептона (Рис. 54).

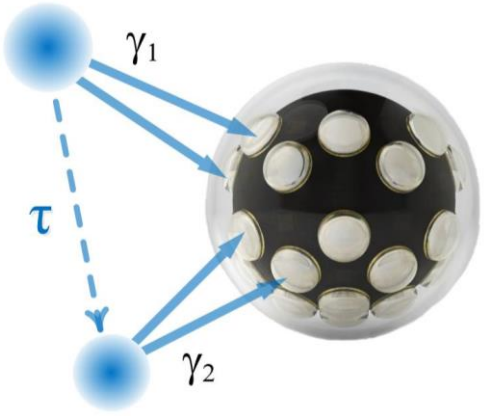


Рис. 54. Регистрация двух последовательных вспышек черенковского света несколькими фотоэлектронными умножителями одного оптического модуля

Установка нескольких ФЭУ приводит к увеличению диаметра оптического модуля и усложняет его конструкцию. Использование такой конструкции модуля в подледниковом озере потребует бурения в леднике скважины очень большого диаметра, что сопряжено с большими технологическими трудностями, временными и финансовыми затратами.

В качестве основных недостатков использования оптических модулей с ФЭУ можно выделить следующие:

– низкая квантовая эффективность;

– сложность регистрации τ-нейтрино;

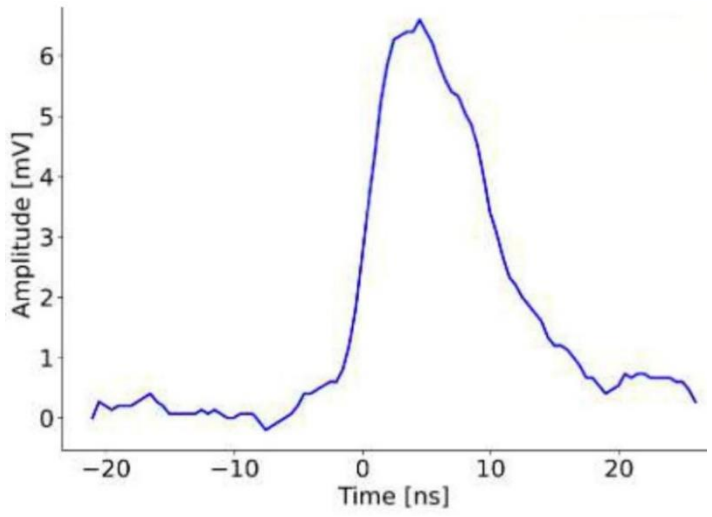
– большие размеры оптического модуля;

– высокое напряжение, необходимое для работы ФЭУ.

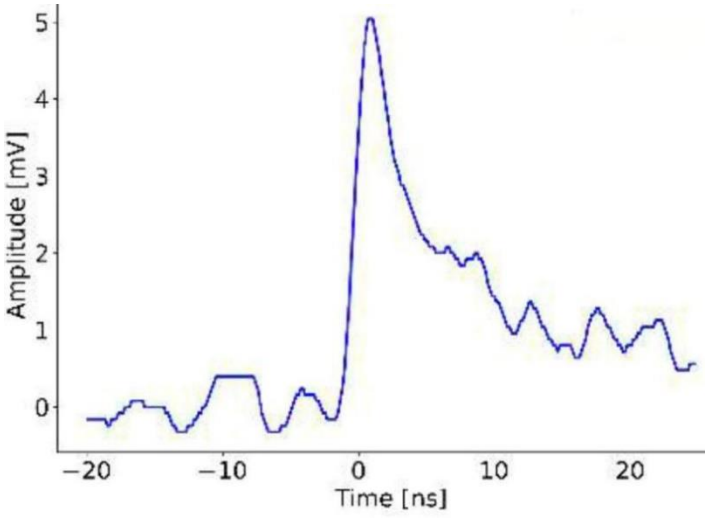
В последние годы быстрое развитие получили кремниевые фотоумножители, что открывает возможность замены традиционных ФЭУ. Эффективность работы фотоумножителя в нейтринном детекторе оценивается его квантовой эффективностью в диапазоне длин волн черенковского излучения, площадью фотоэлемента и временным разрешением.

В отличие от фотоэлектронных, у кремниевых умножителей порог насыщения находится выше, то есть они имеют более широкий динамический диапазон, что важно при регистрации событий от взаимодействия высокоэнергетических нейтрино со средой вблизи оптического модуля.

В качестве примера использования кремниевых фотоумножителей можно привести нейтринный детектор TRIDENT, в котором оптические модули предполагается оснастить ФЭУ и кремниевыми фотоумножителями (SiPM). Применение кремниевых фотоумножителей позволяет улучшить временное разрешение с ~ 2 нс до 300 пс (Рис. 55) [140].



а)



б)

Рис. 55. Временно́е разрешение сигнала:
фотоэлектронный умножитель (*а*); кремниевый фотоумножитель (*б*)

Относительно недавно электронная промышленность начала выпускать мегапиксельные матрицы, которые регистрируют каждый фотон, достигший пикселя (ячейки матрицы) (Рис. 56). Образовавшийся электрон умножается в лавине, позволяя выделить один фотон в виде одного электрического сигнала.

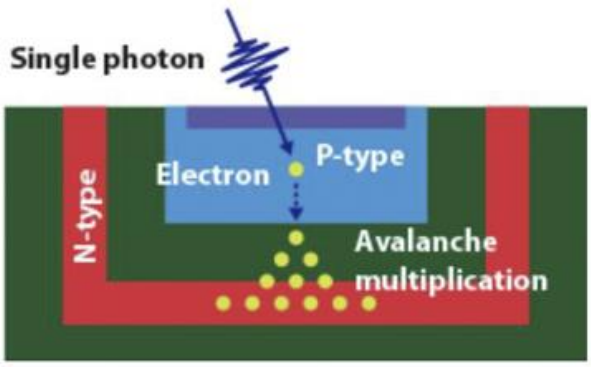


Рис. 56. Ячейка мегапиксельной матрицы с высокой квантовой эффективностью

Фирма Canon разработала SPAD-матрицу (Single-Photon Avalanche Diode) с высокой квантовой эффективностью [141–143]. Матрица имеет $3{,}2 \cdot 10^6$ пикселей при размере 13,2 × 9,9 мм. Квантовая эффективность этой матрицы в зависимости от длины волны света приведена на Рис. 57. Наибольшая квантовая эффективность, 69,4 %, достигается при длине волны 500 нм. Для волны 450 нм, которая соответствует максимуму черенковского спектра, эффективность детектирования фотонов равна 65 %. Временное разрешение составляет 100 пс (за это время свет проходит в воде 22,5 мм). Такое разрешение позволит проводить видеорегистрацию распространения черенковского света в среде. Квантовая эффективность ФЭУ при длине волны 450 нм равна ~ 25 %, а временное разрешение измеряется наносекундами.

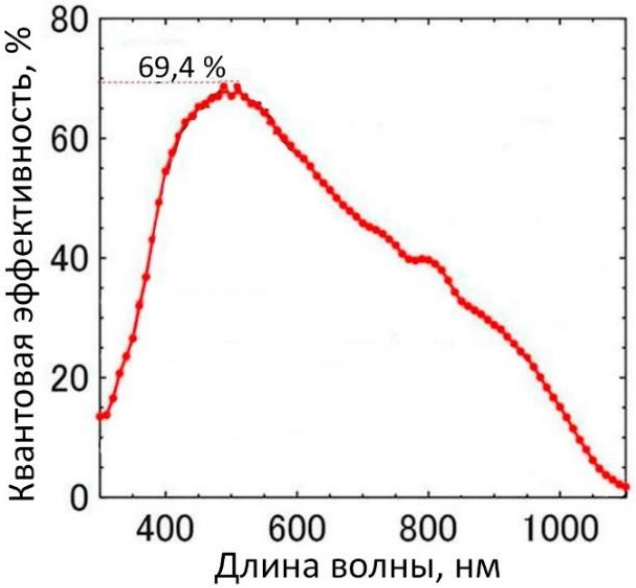


Рис. 57. Квантовая эффективность SPAD-матрицы фирмы Canon в зависимости от длины волны

Фирма Canon установила SPAD-матрицу в камеру MS-500 [144]. Камера имеет размеры 128 ×128 ×152 мм, вес 2,2 кг. Питание осуществляется постоянным током с напряжением 12–30 В. Диапазон рабочих температур от –30 до +60 °C.

Каждый пиксель SPAD-матрицы позволяет регистрировать единичные фотоны, что в совокупности с использованием объектива и высокой скоростью считывания сигнала даёт возможность получать непрерывный пространственно-временной видеосигнал.

Фирма Hamamatsu выпускает камеру C15550-22UP с аналогичной матрицей [145, 146]. Матрица имеет размер 4 096 × 2 304 пикселей (18,8 × 10,6 мм). Квантовая эффективность равна 85 % для длины волны 460 нм (Рис. 58). Среднеквадратичный уровень шума при считывании показаний составляет 0,3 электрона. Камера имеет размеры 110 × 110 × 184 мм, вес 3,8 кг. Источник питания 110–240 В переменного тока. Диапазон рабочих температур от 0 до +60 °C.

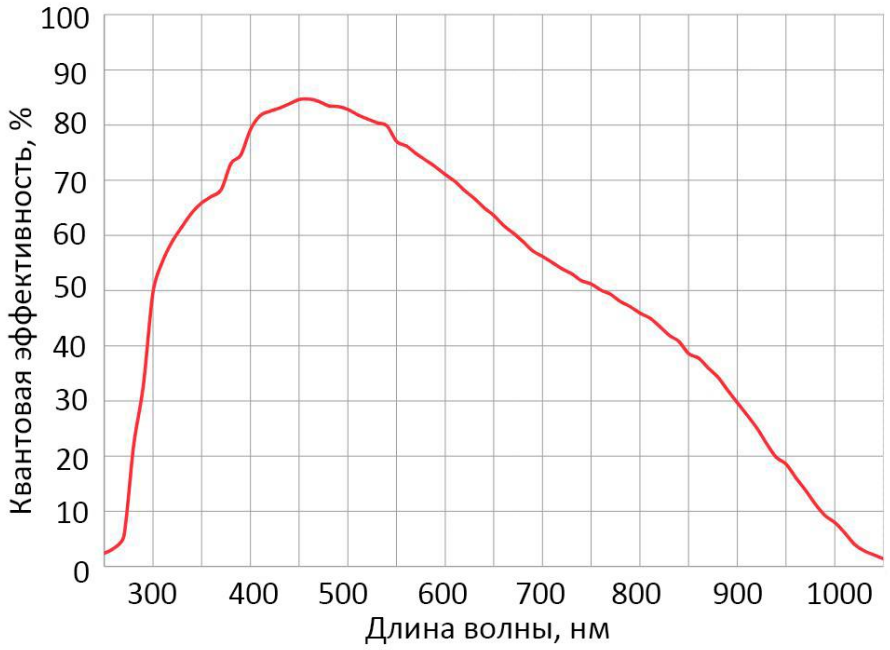


Рис. 58. Квантовая эффективность матрицы фирмы Hamamatsu в зависимости от длины волны

Выпускается также квадратная матрица 2 304 × 2 304 пикселей с пиковой квантовой эффективностью 95 %. Среднеквадратичный уровень шума равен 0,7 электрона. На кремниевых матрицах полностью отсутствует шум усиления сигнала.

Проведём сравнение эффективности использования в оптическом модуле нейтринного детектора ФЭУ, кремниевого фотоумножителя (SiPM) и мегапиксельной кремниевой матрицы (Мп SiPM). Для сравнения используем ФЭУ и SiPM, установленные в оптическом модуле нейтринного детектора TRIDENT, и мегапиксельную кремниевую матрицу размером 19 × 19 мм (аналог матрицы фирмы Hamamatsu). Из Таблицы 7 видно, что ФЭУ и SiPM имеют в несколько раз большую эффективность регистрации черенковского света в сравнении с

мегапиксельной кремниевой матрицей. Использование в нейтринном детекторе существующих мегапиксельных кремниевых матриц небольшой площади снижает эффективность регистрации нейтрино. Техническое решение повышения эффективности заключается в увеличении площади матрицы.

Таблица 7

Сравнение фотоэлектронного умножителя, кремниевого фотоумножителя и мегапиксельной кремниевой матрицы

Тип	Размер фотодиода, мм	Площадь фотодиода, $см^2$	Квантовая эффективность, %	Относительная эффективность
ФЭУ	∅ 72	40	25	4,2
SiPM	57 × 57	33	43	5,8
Мп SiPM	19 × 19	3	85	1

Новые возможности оптического метода детектирования нейтрино при использовании кремниевых фотоумножителей

Применение кремниевых фотоумножителей создаёт новые возможности для изучения нейтрино сверхвысоких энергий: улучшается точность определения аромата нейтрино, энергии и направления движения нейтрино.

Предлагаемый способ регистрации черенковского света в воде заключается в использовании мегапиксельной кремниевой матрицы с высокой квантовой эффективностью и высоким временным разрешением, которая устанавливается в видеомодуль, оснащённый светосильным объективом с углом обзора 180° [147]. Световой сигнал, поступивший на внешнюю линзу объектива, фокусируется на мегапиксельную матрицу (Рис. 59). Изначально оптическая система объектива рассчитывается на гиперфокальное расстояние. При фокусировке объектива на это расстояние все события на расстоянии от половины гиперфокального расстояния до горизонта событий будут отображаться на мегапиксельной матрице без потери резкости. Для объектива с фокусным расстоянием 5 мм, числом диафрагмы 1,0 и кружком нерезкости матрицы 0,015 мм половина гиперфокального расстояния будет равна ~ 0,84 м.



Рис. 59. Пример объектива с углом обзора 180° и мегапиксельной матрицы с высокой квантовой эффективностью

Объективы с углом обзора 180° имеют виньетирование и значительные дисторсии (Рис. 60), которые могут быть исправлены различными методами постобработки [148]. Это позволяет получить неискажённую проекцию черенковского света от треков и каскадов частиц на плоскость матрицы.

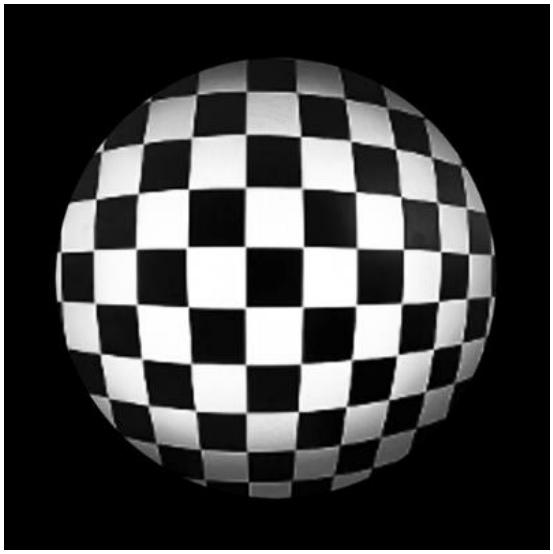


Рис. 60. Пример оптических дисторсий объектива с углом обзора 180°

Видеомодуль регистрирует световые события в полусфере, ограниченной горизонтом событий, радиус которого зависит от величины затухания черенковского света в воде, оптической эффективности объектива и эффективности сенсора (Рис. 61).

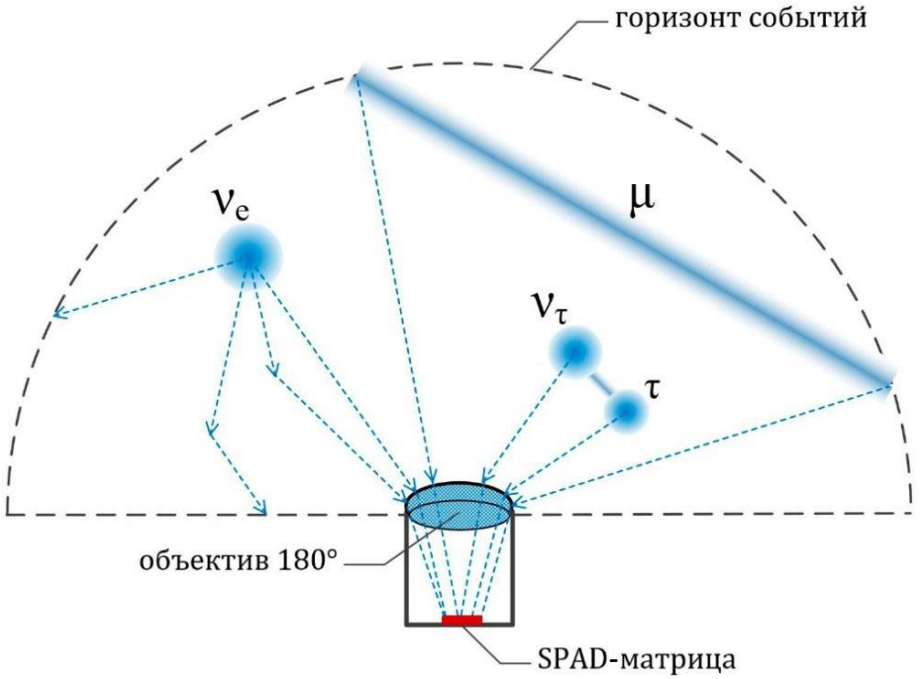


Рис. 61. Схема регистрации световых сигналов с помощью видеомодуля

Следует учитывать, что оптический детектор в озере Восток ориентирован на регистрацию астрофизических нейтрино высоких и сверхвысоких энергий. Для меньших энергий нейтрино, приводящих к слабой интенсивности черенковского излучения, следует рассматривать соответствующий радиус энергетического горизонта событий, за пределами которого свет не регистрируется видеомодулем (Рис. 62).

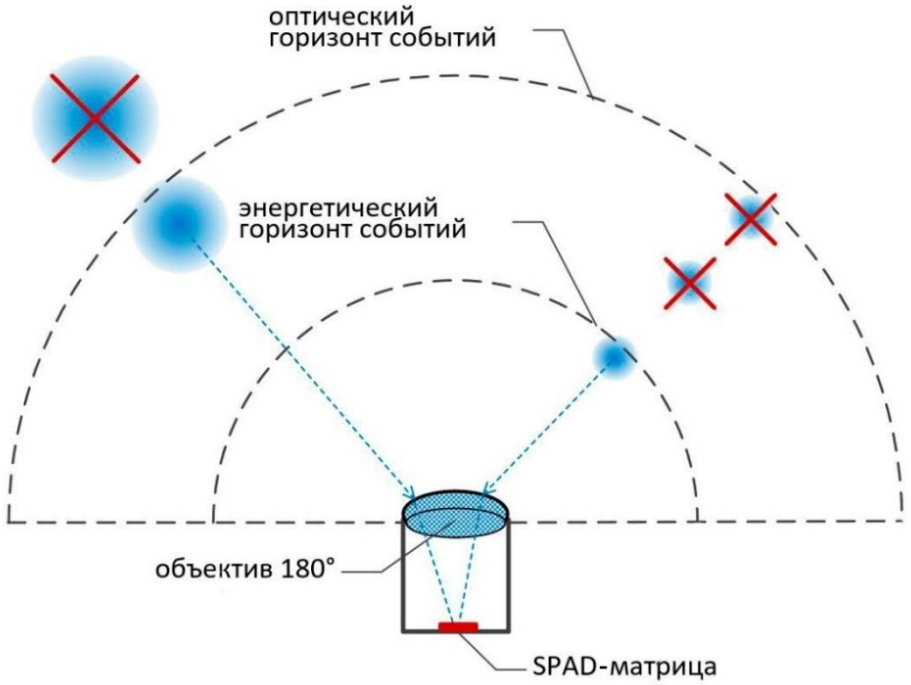


Рис. 62. Оптический и энергетический горизонты событий

Оптический модуль с двумя видеомодулями (Рис. 63), направленными в противоположные стороны, позволит наблюдать единичный объём детектора с радиусом горизонта событий. Если в первом приближении без учёта потерь света в объективе и эффективности матрицы принять радиус горизонта событий равным эффективной длине затухания света в воде, например 50 м, то единичный объём детектора будет равен 523 600 м^3. При общем количестве оптических модулей, равном 3 752 шт., суммарный объём, наблюдаемый модулями, составит 1,96 км^3.

При эффективной длине затухания света 100 м, что можно ожидать в условиях подледникового изолированного озера, количество оптических модулей в гирлянде может быть снижено до 5 шт. В этом случае общее количество оптических модулей уменьшится до 2 345 шт. при сохранении полного объёма детектора 21 км^3, а сумма единичных объёмов достигнет 9,82 км^3. Точное количество и расположение оптических модулей в детекторе может быть определено только по результатам измерений оптических свойств воды в подледниковом озере.

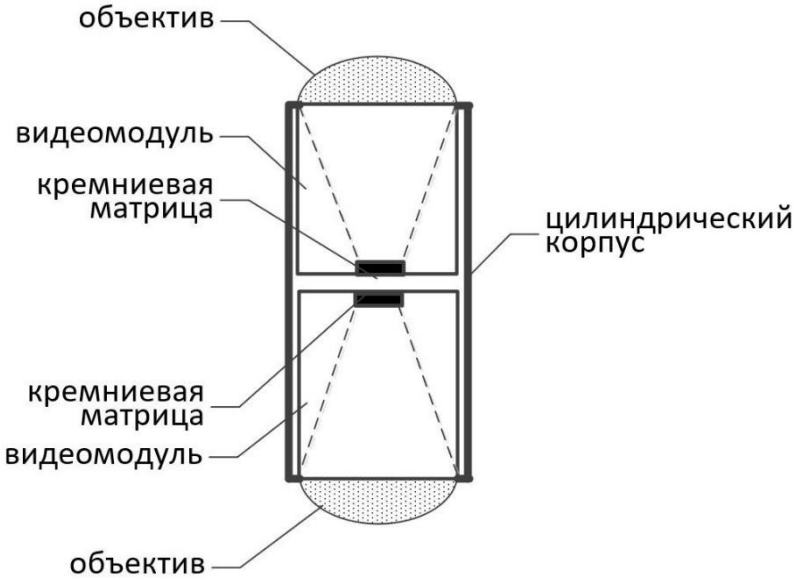
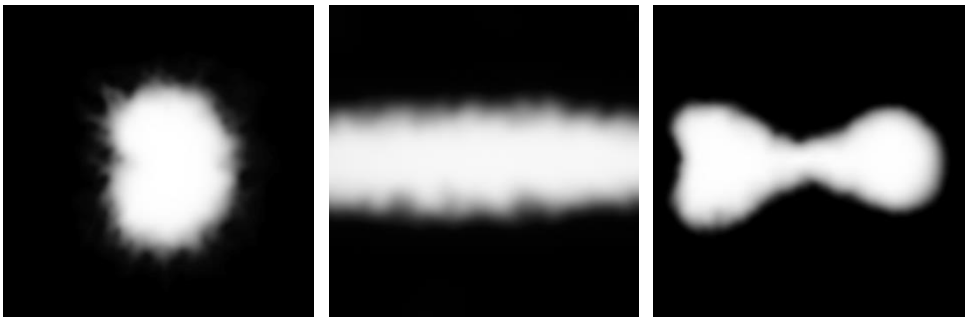


Рис. 63. Схема оптического модуля

Световая сигнатура черенковского излучения, которая может быть зафиксирована видеомодулями, как результат взаимодействия нейтрино различных ароматов, в случае когда направление движения частиц перпендикулярно оптической оси видеомодуля, показана на Рис. 64. Такие изображения могут быть получены при

относительно длительном времени экспозиции. Для регистрации нейтрино, которые пришли в детектор снизу, пройдя через Землю, следует рассмотреть поворот оптических модулей, показанных на Рис. 48, на 90° после их погружения в озеро.



ν_e μ ν_τ

Рис. 64. Предполагаемые изображения черенковского света в результате взаимодействия со средой нейтрино различных ароматов

С помощью видеомодуля можно записать пространственно-временную проекцию мюонного трека. Последовательное наблюдение трека в нескольких единичных объёмах в соседних гирляндах даст возможность получить траекторию мюонного трека внутри всего объёма нейтринного детектора, что увеличит точность определения направления движения мюона. На Рисунке 65 показана схема регистрации мюонного трека в единичных объёмах детектора. На схеме проекции показаны с исправленными дисторсиями объектива.

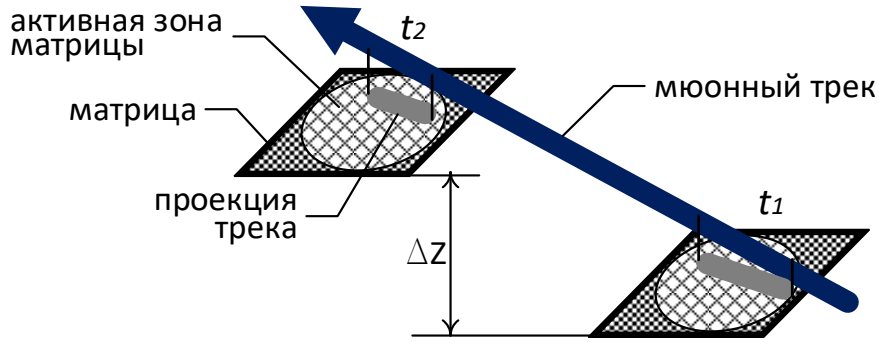


Рис. 65. Схема регистрации мюонного трека в единичных объёмах вокруг оптических модулей, расположенных в соседних гирляндах

Импульсный источник света, установленный на известном расстоянии от оптического модуля в районе горизонта событий,

позволит создать шкалу времени между световыми импульсами для определения времени прохождения светового сигнала события до оптического модуля и, следовательно, рассчитать расстояние от места события до оптического модуля (Рис. 66). Положение изображения на матрице позволит определить угловое направление. Таким образом, появляется возможность воссоздать пространственно-временную картину события в единичном объёме детектора.

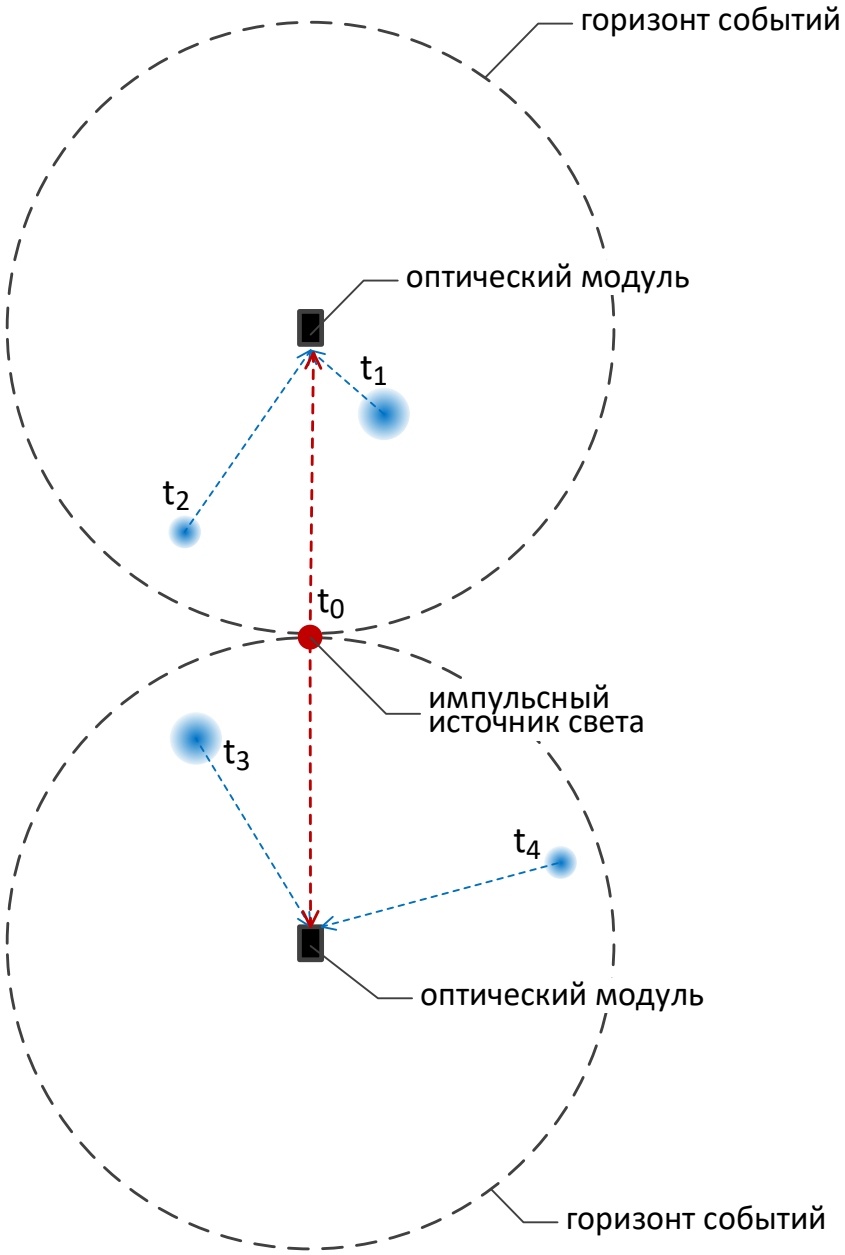


Рис. 66. Время прохождения t_i светового сигнала до оптического модуля

В полном объёме детектора, равном 21 км^3, будет использоваться «точечный» способ регистрации событий оптическими модулями, применяемый в известных нейтринных детекторах

сверхбольшого объёма (см. Рис. 52). Эффективность регистрации черенковского света будет ограничиваться относительно небольшой площадью мегапиксельной матрицы (см. Табл. 7), что допустимо, учитывая целевую направленность нейтринного детектора на регистрацию нейтрино высоких и сверхвысоких энергий.

В настоящее время за рубежом проводится разработка пленоптических систем со SPAD-сенсорами для 3*D*-отслеживания частиц в сцинтилляторах относительно небольшого объёма [149, 150]. Плеоптические камеры (камеры светового поля) отличаются тем, что регистрируют интенсивность света, одновременно получая информацию о глубине. Это становится возможным благодаря массиву микролинз, расположенному между стандартным объективом и датчиком изображения: каждая линза в массиве действует как крошечная камера, которая участвует в реконструкции светового поля, предназначенного для создания карты интенсивности света в заданном пространственном положении и направлении. Плеоптические камеры обладают большим потенциалом для получения изображений и, в сочетании с датчиками на основе матриц однофотонных лавинных диодов (SPAD), могут обеспечить высокоточное 3*D*-отслеживание элементарных частиц даже в условиях дефицита фотонов. Тем не менее возможность использования камер светового поля для отслеживания частиц до сих пор остаётся неизученной.

Изучение места размещения нейтринного детектора

Работа над проектом нейтринного детектора внутри озера требует детального изучения места и среды, в которых будут находиться оптические модули и связывающие их коммуникации. Приступить к изучению озёрной среды через пробуренную к озеру Восток скважину 5Г невозможно из-за высокой степени её загрязнения в ходе многолетнего бурения [151].

Ниже приводится предварительный список исследований, которые необходимо выполнить перед началом проектных работ по созданию нейтринного детектора:

– измерение величины затухания света в воде в зависимости от длины волны;

– измерение скорости и направления течения воды на разных глубинах;

– измерение вертикального температурного профиля в воде;

– измерение геотермального теплового потока;

– изучение рельефа дна в месте размещения детектора;

– радиоакустические исследования дна;

– изучение структуры донных отложений;

– исследование нижней поверхности льда.

Первым практическим шагом будет проникновение в озеро с использованием метода скоростного экологически чистого бурения без заполнения скважины незамерзающей заливочной жидкостью. Оборудование, необходимое для проведения измерений в озере, может крепиться к стыковочному узлу на конце гибкого трубопровода «труба в трубе» и опускаться вниз. Циркуляция нагретого теплоносителя предотвратит замерзание воды в скважине. Последовательное погружение измерительного оборудования позволит за короткое время собрать исходные данные, необходимые для проектирования, и провести ряд других научных исследований.

Одним из основных параметров среды детектора является длина затухания света в результате его поглощения и рассеяния в диапазоне спектра черенковского излучения. Измерение величины затухания света проводится с помощью специальной установки для измерения оптических свойств воды, которая погружается в озеро через скважину с последующим извлечением. Полученные в результате измерений данные позволят рассчитать оптимальные геометрические параметры оптической решётки, включая расстояние между оптическими модулями. Это в свою очередь позволит определить точное количество оптических модулей нейтринного детектора.

Другим важным параметром, который следует учитывать при распространении света в воде, является температурное поле внутри озера. Температура среды влияет на показатель преломления света. Измерение температуры воды проводится по всей глубине озера.

Для определения высоты гирлянд следует выполнить измерение толщины водного слоя в месте размещения детектора, исследовать рельеф дна и нижней поверхности ледника. Эта работа может быть выполнена с использованием гидроакустического оборудования и автономного глубоководного дрона.

При проектировании детектора необходимо оценить возможность влияния течений воды на положение оптических модулей в решётке детектора. С этой целью проводится измерение интенсивности и направления течений в озере на разных горизонтах.

Изучению подлежит структура донной поверхности, на которую будут устанавливаться позиционирующие якоря гирлянд и коммутаторы с кабелями. В случае поверхности дна, состоящей из мелких частиц, выполнение монтажных работ приведёт к подъёму мельчайших частиц со дна и образованию взвеси. Наличие взвеси частиц в воде может оказать заметное влияние на прозрачность среды на длительное время, что негативно скажется на работе нейтринного детектора. Для изучения состава и структуры донных отложений производится отбор пробы осадочных пород с помощью специального пробоотборника с одновременной видеофиксацией процесса пробоотбора.

Геотермальный тепловой поток, исходящий со дна озера, также подлежит измерению. Для этого используется термический зонд, который погружается в осадочные отложения на дне озера. Тепловой поток определяется путём измерения температурного градиента и теплопроводности осадочных отложений и рассчитывается по формуле

$$Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n},$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\partial T/\partial n$ – температурный градиент по нормали к поверхности.

Кроме отбора пробы осадочных отложений с помощью специально разработанного пробоотборника выполняется отбор проб озёрной воды с разных горизонтов. Проводится исследование наличия примесей, химического состава и физических свойств извлечённых проб. Извлечённые пробы грунта и воды используются в том числе для проведения научных исследований, направленных на поиск жизни в экстремальных условиях.

Часть III
Нейтринный детектор с акустическим методом детектирования внутри ледника над озером Восток

Глава 1. Концепция нейтринного детектора внутри ледника

В основу концепции создания детектора с акустическим методом детектирования высокоэнергетических нейтрино положены следующие подходы:

– размещение детектора внутри ледника толщиной ~ 4 км;

– расположение акустического нейтринного детектора над оптическим детектором в озере Восток;

– использование волоконно-оптических акустических сенсоров;

– применение новой технологии скоростного бурения льда.

Использование в качестве места для размещения нейтринного детектора огромного массива ледника с большой толщиной позволит создать акустический детектор с эффективным объёмом порядка 100 км^3.

Расположение акустического нейтринного детектора над оптическим детектором создаст возможность с большей точностью регистрировать мюонные нейтрино.

Применение распределённых волоконно-оптических акустических сенсоров повысит разрешающую способность детектора, что позволит точнее определять направление движения и энергию нейтрино.

Технология скоростного бурения ледяных скважин для акустических сенсоров обеспечит относительно быстрое поэтапное увеличение объёма детектора до проектной величины за счёт размещения и подключения сенсоров во вновь пробуренных скважинах.

Акустический нейтринный детектор нового поколения с возможностью детектирования нейтрино сверхвысоких энергий позволит заглянуть в область физики за пределами Стандартной модели. С увеличением энергии нейтрино может нарушаться закон сохранения лептонного числа, *CPT*- и Лоренц-инвариантности, что затронет ряд свойств нейтрино. С помощью нейтрино сверхвысоких энергий можно исследовать природу тёмной материи, которая, распадаясь или самоаннигилируя, превращается в

нейтрино, оставляя отпечатки в их энергетическом спектре. Фундаментальным нерешённым вопросом в физике частиц остаётся механизм возникновения и ускорения космических частиц с энергиями, превышающими ЭэВ. Измерение энергии нейтрино с помощью детектора позволит подтвердить существование ГЗК-предела или опровергнуть его, что укажет на что-то новое в физике или астрофизике процесса. Акустический метод детектирования позволит изучить спектр нейтрино от взаимодействия с энергиями выше 10^{18} эВ [152, 153] и выполнить поиск источников излучения сверхвысоких энергий.

Концепция нейтринного детектора с акустическим методом детектирования не затрагивает вопросов, касающихся систем нейтринного телескопа, связанных с передачей, сбором и обработкой информации, и не рассматривает технические вопросы. Выбор и обоснование технических решений выполняется на стадии эскизного проектирования.

В результате взаимодействия с нуклонами ядер кислорода и водорода энергия нейтрино распределяется между образовавшимся лептоном и адронным каскадом. Нейтрино с энергией E_ν генерирует адронный каскад с энергией $E_{\text{had}} = yE_\nu$, где $y = 0{,}2$. Лептон уносит в среднем 80 % энергии. Адронный каскад имеет цилиндрическую симметрию, а его направление совпадает с направлением движения первичного нейтрино. Структура адронного каскада не зависит от аромата нейтрино. Энергия адронного каскада нагревает материал среды, что приводит к почти мгновенному расширению объёма, которое сопровождается генерацией биполярного акустического импульса. Теоретически и экспериментально установлено, что амплитуда акустического импульса прямо пропорциональна энергии нейтрино [154–157]. При энергии нейтрино $E_\nu \sim 10^{20}$ эВ 99 % энергии каскада выделяется в объёме цилиндрической формы с радиусом около 20 см и длиной, достигающей 20 м.

Для проведения астрофизических наблюдений с использованием нейтрино сверхвысоких энергий необходимо восстановить характеристики каскадов, их энергию и ориентацию по акустическому сигналу. Из-за мгновенного развития каскада акустическое излучение испускается в такой фазе, что отдельные импульсы

интерферируют. Это аналогично линии когерентных источников, расположенных вдоль оси ливня. На удалении от этих источников звуковая волна в результате когерентности распространяется в плоскости, перпендикулярной оси каскада с углом раскрытия θ около 5°, Рис. 67 [158].

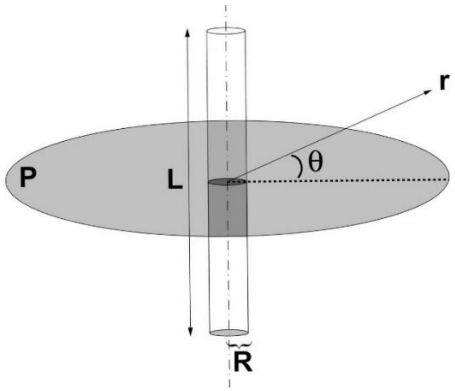


Рис. 67. Геометрия каскада и акустического излучения

Величина акустического импульса очень быстро спадает при удалении от плоскости распространения. Такая геометрия распространения звуковой волны даёт возможность определить направление оси каскада и, следовательно, движения нейтрино. Для этого необходимо, чтобы минимум 3 акустических детектора попали в зону звуковой волны. При распространении акустической волны в среде происходит затухание сигнала. Низкие частоты затухают в меньшей степени, чем высокие, и спектр сигнала по мере распространения звука будет смещаться в область более низких частот. Затухание акустического сигнала характеризуется длиной затухания, которая зависит от частоты звука и свойств среды, в которой он распространяется.

Скорость распространения продольных акустических волн описывается с помощью потенциала скорости Ф в виде

$$V = \nabla \Phi.$$

Волновое уравнение для потенциала скорости:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - c_s^2 \Delta \Phi = 0,$$

где c_s – скорость звука в среде.

При распространении звуковой волны в среде происходит смещение частиц с колебательной скоростью V и возникает переменное звуковое давление p:

$$p = -\rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t},$$

где ρ_0 – плотность среды.

Волновое уравнение в декартовой системе координат:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - c_s^2 \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) = 0.$$

В цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - c_s^2 \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \right) = 0.$$

В случае независимости от угловых координат и осевой координаты (θ, z) волновое уравнение запишется:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - c_s^2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0.$$

Частное решение в цилиндрической системе координат:

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{r}} g(r - c_s t),$$

где g – произвольная функция.

Затухание акустического давления в направлении r описывается экспоненциальным законом:

$$p = p_0 e^{-\alpha r},$$

где α – коэффициент затухания.

Коэффициент затухания учитывает поглощение и рассеяние звука в среде и может быть представлен в виде длины затухания звуковой волны. Длина затухания звуковой волны λ – это расстояние, на котором акустическое давление падает до $1/e$. Тогда выражение для определения акустического давления на расстоянии r можно записать:

$$P_r = P_0 e^{-\frac{r}{\lambda}}.$$

Длина затухания зависит от частоты звука, свойств среды и, как правило, определяется экспериментально.

Амплитуда термоакустического импульса связана с энергией нейтрино зависимостью

$$P_{\max} \approx E_\nu \frac{1}{4} \gamma,$$

где γ – коэффициент Грюнайзена:

$$\gamma = c_s^2 \frac{\beta}{c_p},$$

где c_s – скорость звука, c_p – теплоёмкость среды, β – коэффициент объёмного температурного расширения.

Расчёт акустического импульса в воде от адронного каскада с энергией 10^{20} эВ на удалении 1 км представлен на Рис. 68 [159].

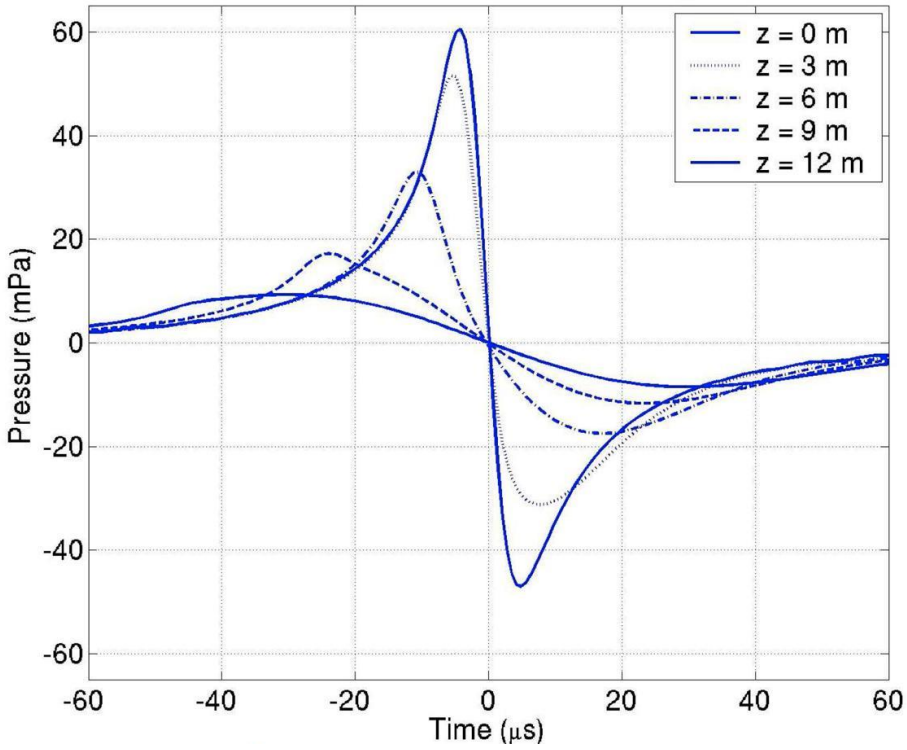


Рис. 68. Расчёт акустического импульса в воде от адронного каскада с энергией 10^{20} эВ на удалении 1 км для различного расстояния от плоскости распространения акустической волны

Вопрос определения аромата высокоэнергетических нейтрино акустическим методом требует дополнительного внимательного рассмотрения. Геометрия адронных каскадов различается в зависимости от аромата нейтрино. При взаимодействии электронного нейтрино со средой образуется электрон, инициирующий возникновение адронного каскада и электромагнитного ливня. Энергия вторичных электронов, позитронов и фотонов уменьшается экспоненциально, что выражается в короткой длине каскада с высокой выделяемой энергией на единицу длины. При взаимодействии мюонного нейтрино с нуклонами среды образуется мюон и возникает каскад частиц, длина которого зависит от энергии нейтрино. Взаимодействие высокоэнергетического τ-нейтрино со средой

вызывает образование τ-лептона и каскада частиц. Лептон уносит порядка 80 % энергии нейтрино и впоследствии распадается.

Акустическая волна распространяется в среде в форме диска. Характерный фронт акустической волны может быть зафиксирован с помощью массива акустических датчиков. Возможность экспериментального определения аромата нейтрино будет зависеть от пространственной и временной разрешающей способности акустического детектора, его чувствительности, а также уровня акустического фона.

Важными преимуществами акустического метода детектирования нейтрино перед оптическим методом являются большая дистанция распространения сигнала в среде и возможность создания детектора сверхбольшого объёма при относительно небольшом количестве акустических сенсоров. В отличие от оптического метода, в котором длина затухания черенковского света составляет несколько десятков метров, длина затухания акустического сигнала внутри льда достигает нескольких сотен метров. Это позволяет задействовать огромный объём, оснащённый акустическими датчиками, гирлянды которых могут располагаться на большем расстоянии друг от друга, чем гирлянды с оптическими модулями. Увеличение объёма детектора приведёт к росту количества регистрируемых событий. Ещё одним преимуществом акустического метода является более компактная конструкция датчиков и более простая электроника для проведения измерений.

Глава 2. Экспериментальные акустические установки для детектирования высокоэнергетических нейтрино

Примерами для изучения возможности детектирования высокоэнергетических нейтрино акустическим методом могут служить проекты SADCO, ACoRNE, SAUND, Baikal-GVD, AMADEUS, KM3NeT, SPATS. В первых экспериментах (SADCO, ACoRNE, SAUND) предполагалось использовать существующие массивы гидрофонов, предназначенные для поиска подводных лодок. Проведённые эксперименты позволили определить ограничения на поток нейтрино сверхвысоких энергий, Рис. 69 [160].

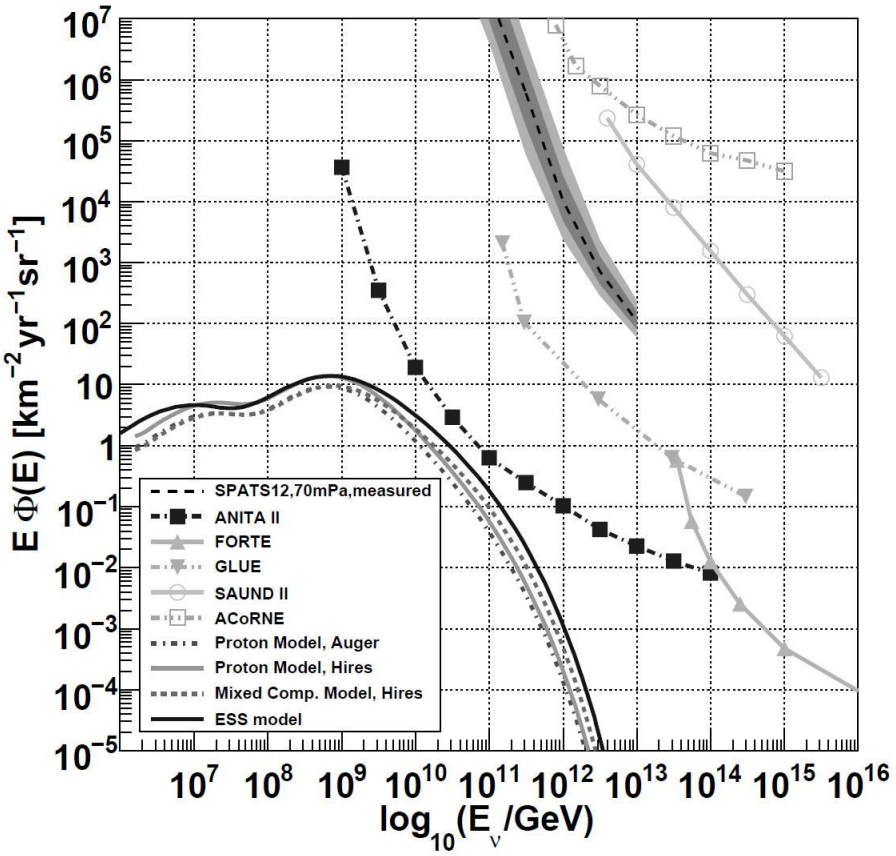


Рис. 69. Ограничения на поток нейтрино сверхвысоких энергий

Акустические установки для эксперимента SADCO

В работе [161] и презентации [162] обсуждался перспективный метод исследования потоков космических нейтрино сверхвысоких энергий с помощью акустических установок, используемых для военных целей. В качестве вариантов для проекта SADCO рассматривались идеи использования гидроакустической антенны AGAM около Камчатки (Рис. 70) и портативной акустической

антенны MG-10 для подводной лодки (Рис. 71). По разным причинам проект SADCO не был реализован.

Антенна AGAM имела длину 102 м и высоту 17 м и была оборудована 2 400 гидрофонами с рабочей частотой < 2 кГц.

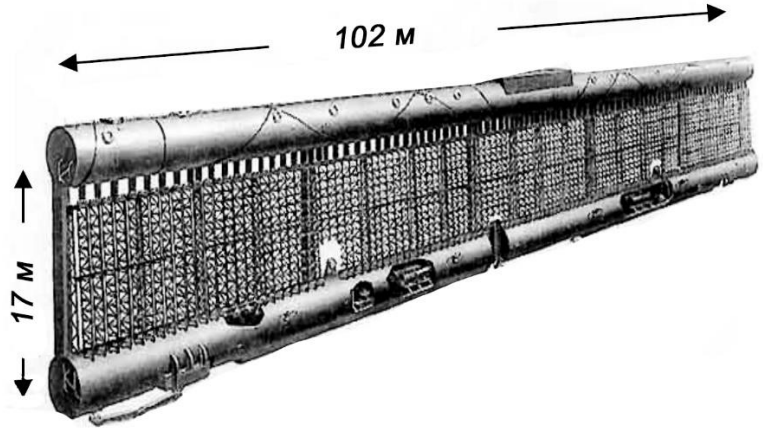


Рис. 70. Акустическая антенна AGAM

Антенна MG-10 диаметром 1,6 м и высотой 1,0 м оборудована 132 гидрофонами с частотой восприятия сигнала до 25 кГц и чувствительностью ~ 0,17 мВ/Па при 3,5 кГц.

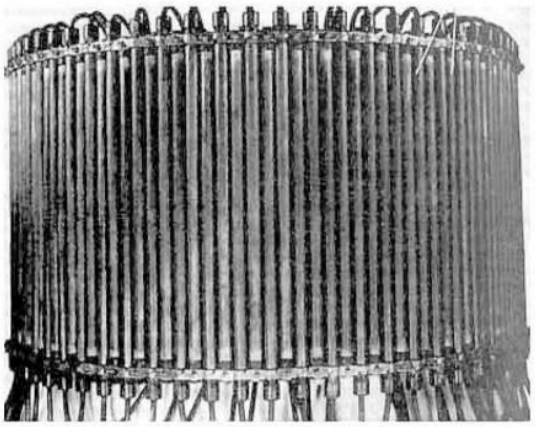


Рис. 71. Акустическая антенна MG-10 для подводной лодки

Акустическая установка эксперимента ACoRNE

ACoRNE – проект учёных из Великобритании. Эксперимент проводился на массиве гидрофонов в Шотландии, который предназначался для слежения за подводными лодками. В месте расположения массива глубина моря составляет ~ 230 м. В эксперименте использовались 8 гидрофонов. Шесть из них находились примерно в средней глубине, один − на дне и один − на высоте около 30 м

над дном. Инструментальная часть массива имела протяжённость ~ 1,5 км. Схема закрепления гидрофонов показана на Рис. 72.

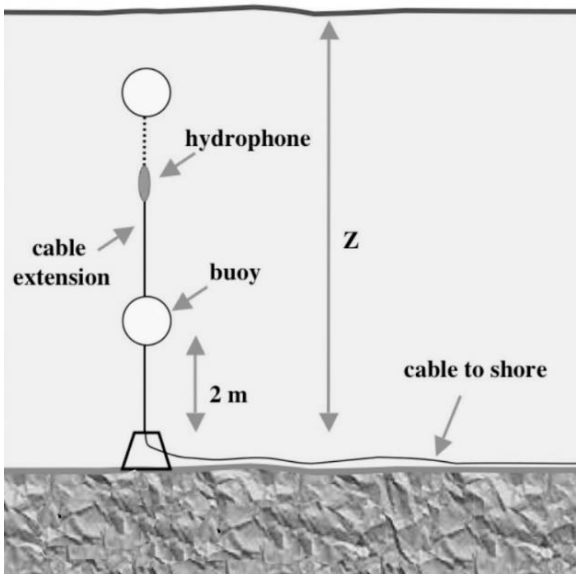


Рис. 72. Схема закрепления гидрофонов в эксперименте ACoRNE

В работах [163, 164] представлен ряд подходов по обработке акустических сигналов, записанных в ходе эксперимента. Хорошее приближение к согласованной фильтрации было достигнуто путём пропускания второй производной данных через фильтр с импульсной характеристикой, которая представляет собой обращённую во времени вторую производную ожидаемого импульса.

Для точечного источника при прохождении импульса через воду максимальная амплитуда должна уменьшаться как $1/r$, а энергия должна уменьшаться как $1/r^2$. Обнаруженные импульсы имели очень низкое отношение сигнал/шум, и использование энергии, а не амплитуды является более надёжным методом проверки потерь энергии. Эффективность детектора определяется его чувствительностью к нейтринному потоку.

Эксперимент показал, что акустический детектор в морской воде является очень хорошим инструментом для регистрации нейтрино сверхвысоких энергий, однако лёд может быть более подходящей средой для этой цели по сравнению с водой.

Акустическая установка в озере Байкал

Регистрация акустического сигнала взаимодействия нейтрино сверхвысоких энергий во многом зависит от возможности отделения сигнала, создаваемого каскадом частиц, от шума других источников звука. Для изучения окружающего шума и разработки соответствующих методов обнаружения акустических импульсов был создан прототип установки, который располагался на глубине 150 м на площадке Байкальского нейтринного телескопа. Схема акустической установки в озере Байкал показана на Рис. 73.

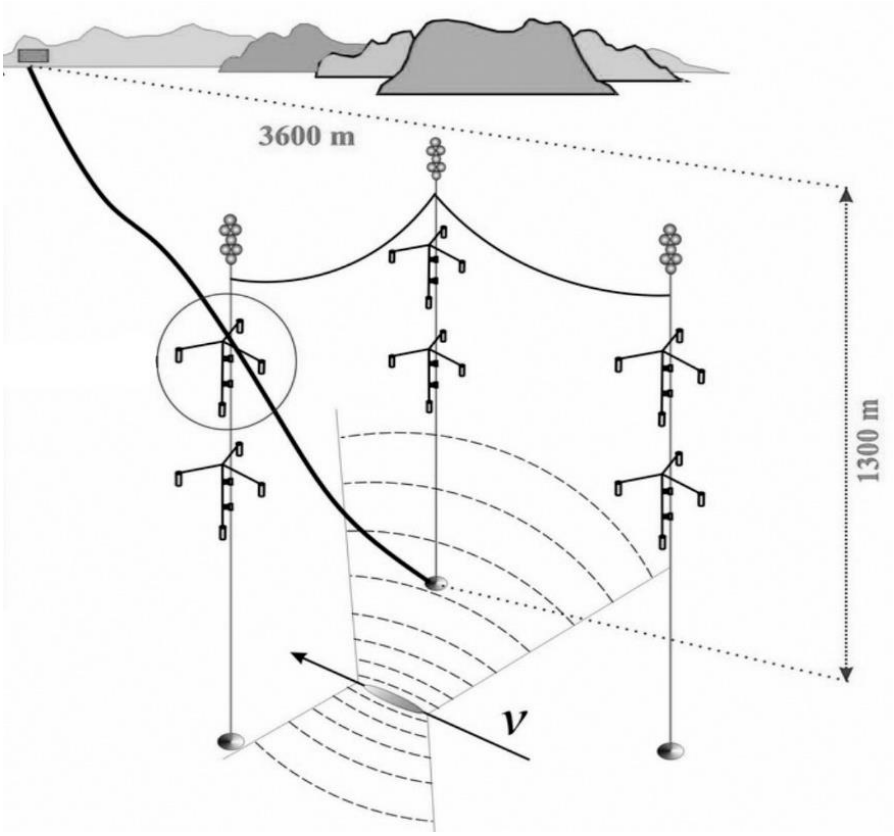


Рис. 73. Схема акустической установки в озере Байкал

Результаты эксперимента, проведённого с помощью прототипа, продемонстрировали возможность использования разработанного метода регистрации акустических импульсов для поиска сигналов каскадных ливней. Хотя температура воды Байкала близка к температуре её максимальной плотности, отсутствие мощных источников акустического шума в глубоководной зоне озера и крайне низкое поглощение звука в пресной воде могут обеспечить регистрацию нейтрино в Байкале с порогом энергии 10^{18}–10^{19} эВ.

На Рисунке 74 представлены примеры зарегистрированных биполярных импульсов. На Рисунке 75 показано распределение зенитных углов биполярных импульсов. Большинство импульсов расположено вблизи горизонтальной плоскости. Источники импульсов, приходящих из-под горизонта, вероятно, также находятся в приповерхностной зоне. По-видимому, они исходят из-под горизонта из-за рефракции, вызванной ростом скорости звука с глубиной. В области ±45° вокруг противоположного зенита не наблюдалось ни одного события с биполярной формой импульса [165].

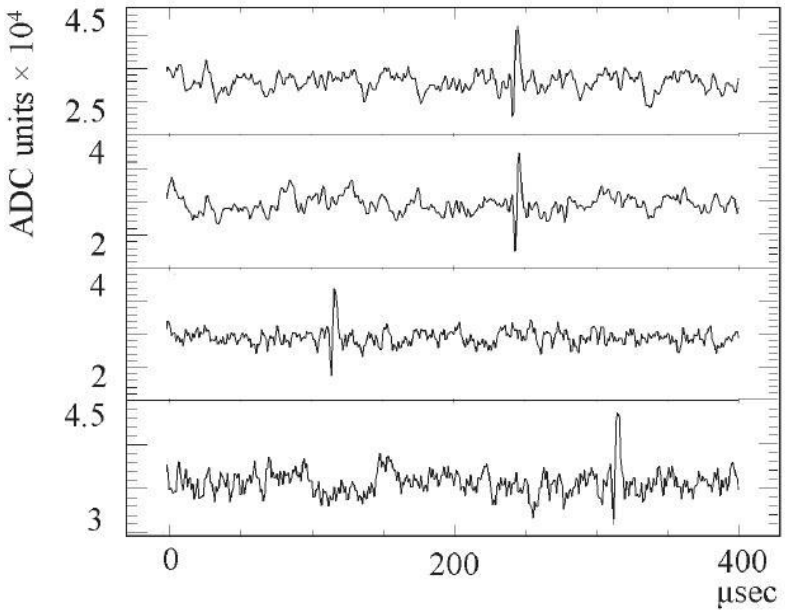


Рис. 74. Примеры регистрации биполярных импульсов

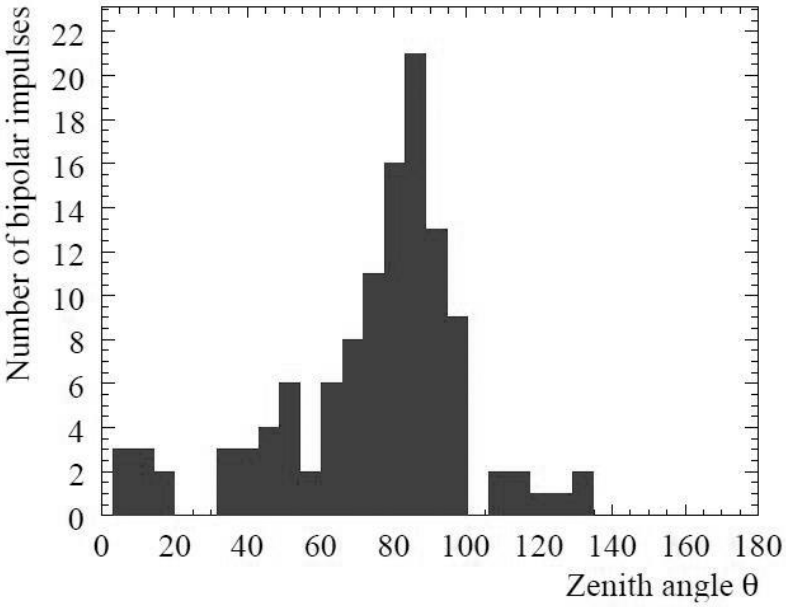


Рис. 75. Распределение биполярных импульсов в зависимости от зенитного угла

На Рисунке 76 представлена выборка данных акустического шума в диапазоне 15–40 кГц, зарегистрированная 4-канальным прибором в период ледового покрова и критического таяния льда. Периоды нестационарных условий проявляются в высоком вкладе шума. Для открытой воды при стационарных метеорологических условиях интегральный шум составляет ~ 1 мПа. Учитывая, что уровень высокочастотного шума в озере Байкал может быть равен 1 мПа, возможна регистрация акустического сигнала от каскада с энергией выше 10^{18} эВ на расстоянии 100 м и выше 10^{19} эВ на расстоянии 1 000 м [166].

В ходе моделирования эффективного объёма детектора из 10^6 моделируемых событий 52 были зарегистрированы в цилиндре радиусом 10 км и высотой 1,3 км. По результатам моделирования был сделан вывод, что для одного гидрофона эффективный объём при регистрации нейтрино с энергией 10^{21} эВ составляет ~ 0,02 км³. На Рисунке 77 показаны временной профиль и частотный спектр акустического импульса на расстоянии 1 км от каскада, вызванного нейтрино с энергией 10^{20} эВ на глубине 1 км в воде озера Байкал [167].

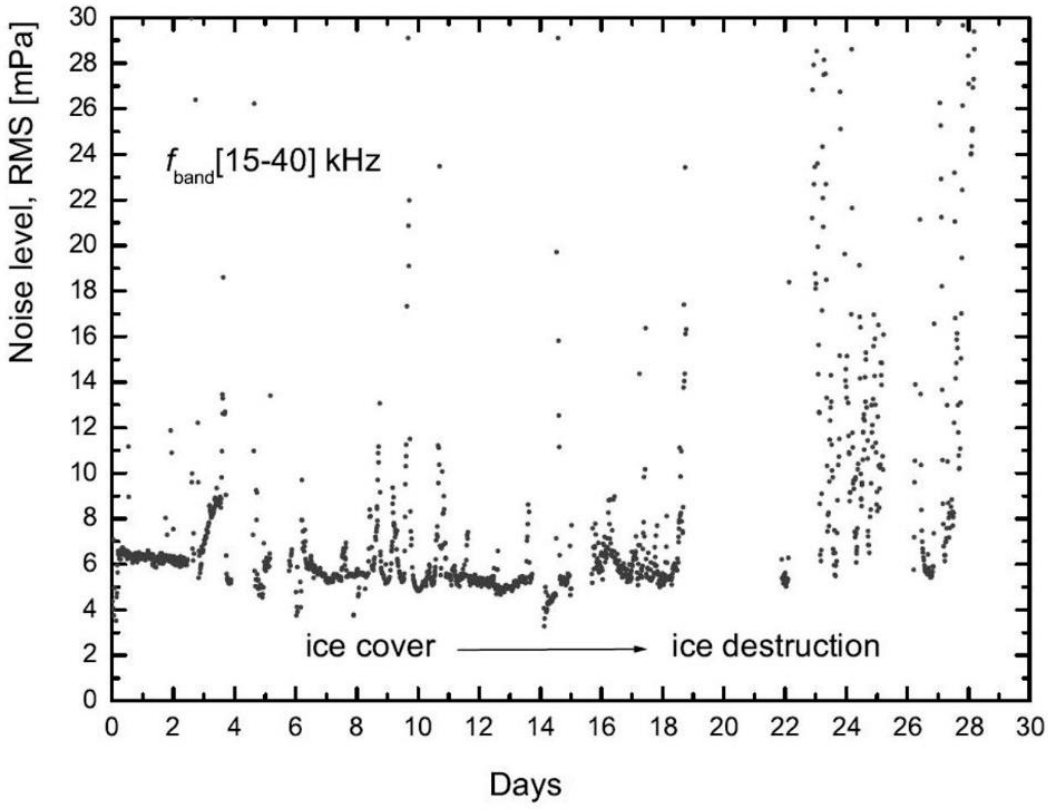


Рис. 76. Уровень акустического шума на глубине 150 м

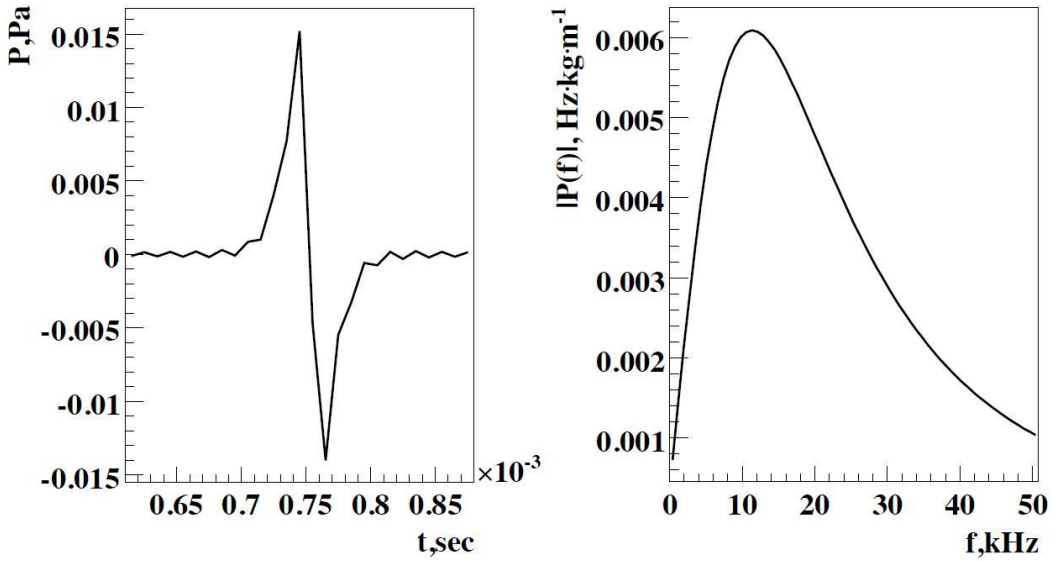


Рис. 77. Временной профиль и спектр акустического импульса

Акустическая установка эксперимента SAUND

В эксперименте SAUND исследовалась возможность акустического детектирования нейтрино сверхвысоких энергий. Для этого применялась система гидрофонов в центре подводных испытаний ВМС США в Атлантическом океане [159]. Для исследований из большого массива использовали 7 гидрофонов, расположенных в шестиугольной форме, как показано на Рис. 78.

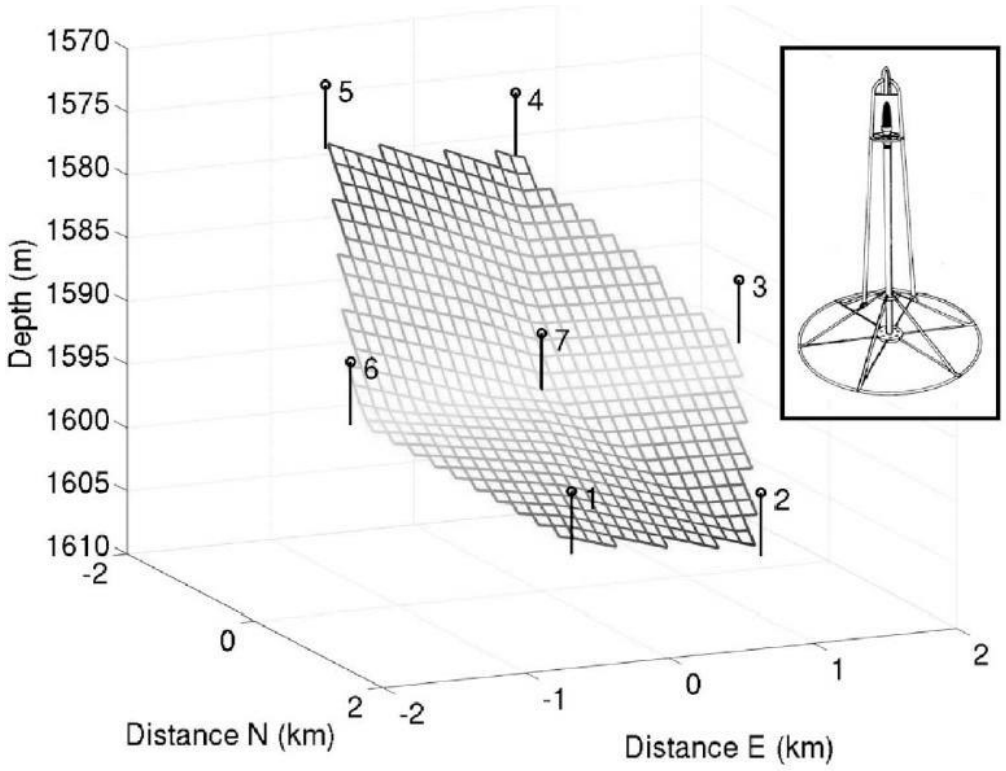


Рис. 78. Схема акустической установки SAUND

Гидрофоны были установлены на 4,5-метровых штангах, вертикально стоящих на дне океана. Расстояние по горизонтали между центральным и периферийным гидрофонами составляло от 1 500 до 1 570 м. Дно океана имело ровную поверхность с глубиной от 1 570 до 1 600 м.

Рефракция акустической волны делает участки океана невидимыми для антенной решётки и искривляет акустический диск в форму, которая часто имела лишь незначительное перекрытие с плоской решёткой гидрофонов. На Рисунке 79 показано влияние рефракции на огибающую диска акустического излучения. Поперечное сечение диаграммы акустического излучения нейтрино с энергией $3 \cdot 10^{21}$ эВ показано с учётом и без учёта рефракции. Проекции положений семи гидрофонов на сечения показаны для справки. Детектор наклонён из-за небольшого наклона океанического дна.

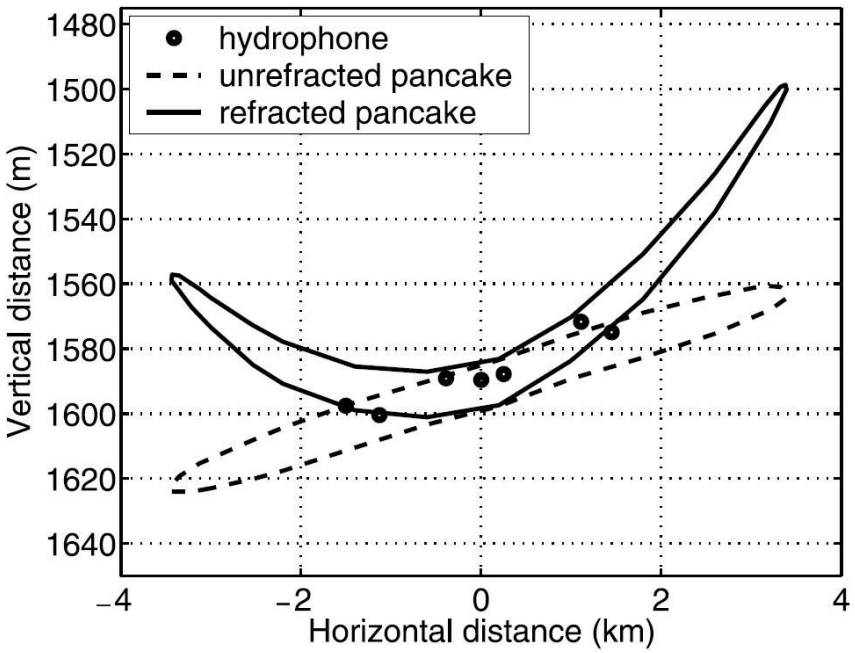


Рис. 79. Влияние рефракции на огибающую диска акустического излучения

Плоская геометрия массива гидрофонов SAUND не оптимизирована для обеспечения хорошего разрешения в направлении, перпендикулярном плоскости акустического диска. Вертикальное разрешение оценивается на уровне всего 400 м для источников, расположенных глубже 1 400 м, и составляет 10 м для источников, расположенных близко к поверхности. Однако разрешение в

горизонтальной плоскости в большей части объёма превышает 10 м. Трёхмерная решётка гидрофонов смогла бы обеспечить значительно более высокое разрешение и идентификацию акустической волны в форме диска.

Хотя большая длина затухания звука в воде допускает большие (от нескольких сотен метров до нескольких километров) горизонтальные расстояния между гидрофонами, для регистрации плоскостности акустического излучения необходима решётка с плотным (~ 10 м) вертикальным интервалом между гидрофонами. Идеальная акустическая решётка должна состоять не из отдельных гидрофонов, а из гирлянд, чувствительных к акустическим сигналам равномерно по всей длине.

Акустическая установка эксперимента AMADEUS

Целью эксперимента AMADEUS было изучение возможности акустического обнаружения нейтрино и использования акустики для уточнения текущего положения оптических модулей нейтринного детектора в морской среде. Установку интегрировали в нейтринный телескоп ANTARES в Средиземном море [168]. Гидрофоны в количестве 36 шт. объединены в 6 модулей и установлены на глубинах от 2 050 до 2 300 м (Рис. 80). В одной гирлянде акустические модули с гидрофонами (Рис. 81) расположены на высоте 180, 195 и 305 м от дна моря. Во второй гирлянде модули находятся на высотах 380, 395 и 410 м от дна моря. На высоте 380 м располагаются сферические акустические модули. Расстояние между гирляндами около 240 м. Максимальное расстояние между двумя акустическими модулями составляет 340 м (Рис. 81).

Принципиальная схема гидрофона с пьезоэлементом и предусилителем показана на Рис. 82. Элементы гидрофона заключены в полиуретановое покрытие [169]. Все гидрофоны настроены на чувствительность в диапазоне частот от 1 до 50 кГц.

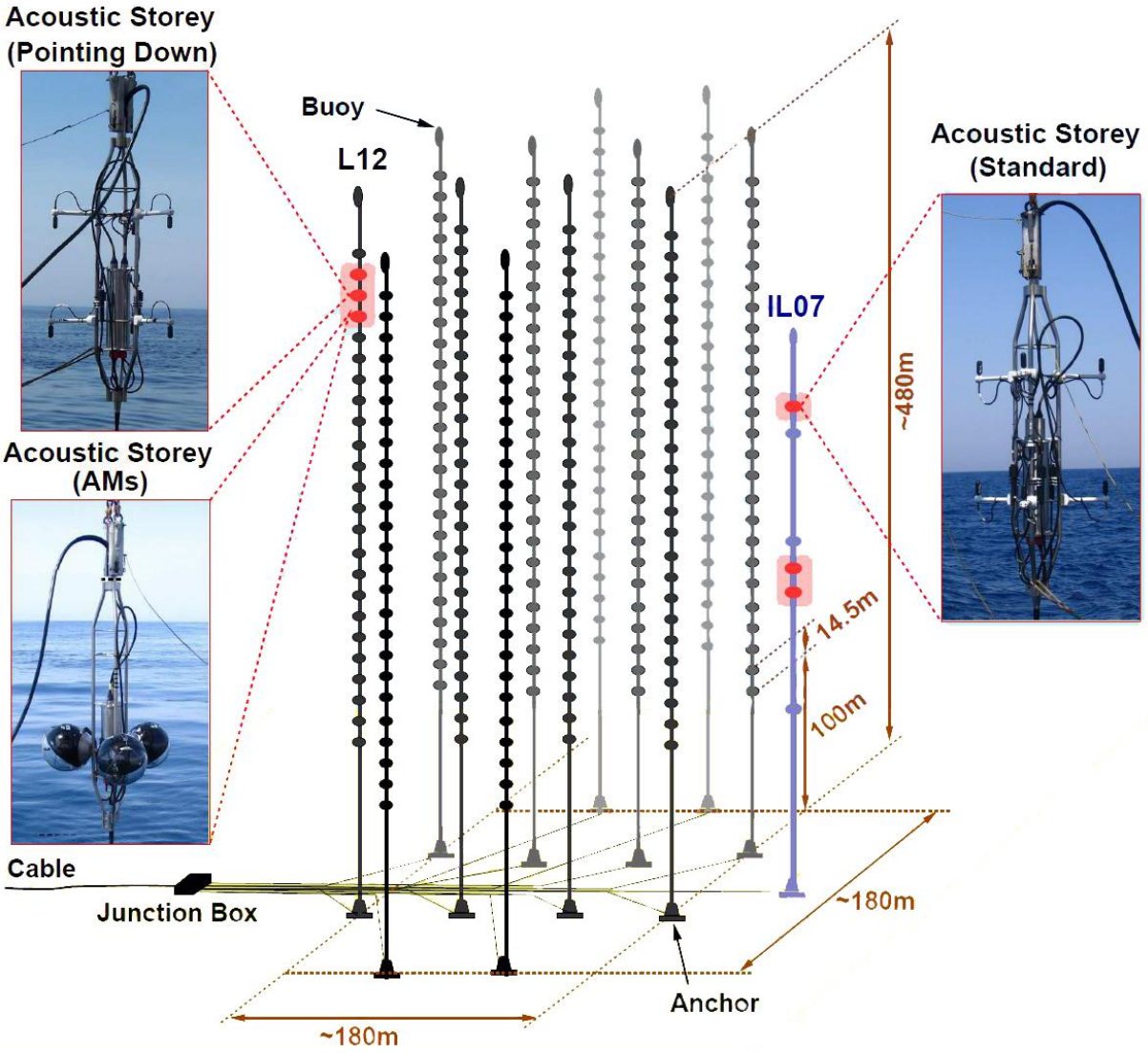


Рис. 80. Схема установки AMADEUS, расположенной в кластере ANTARES

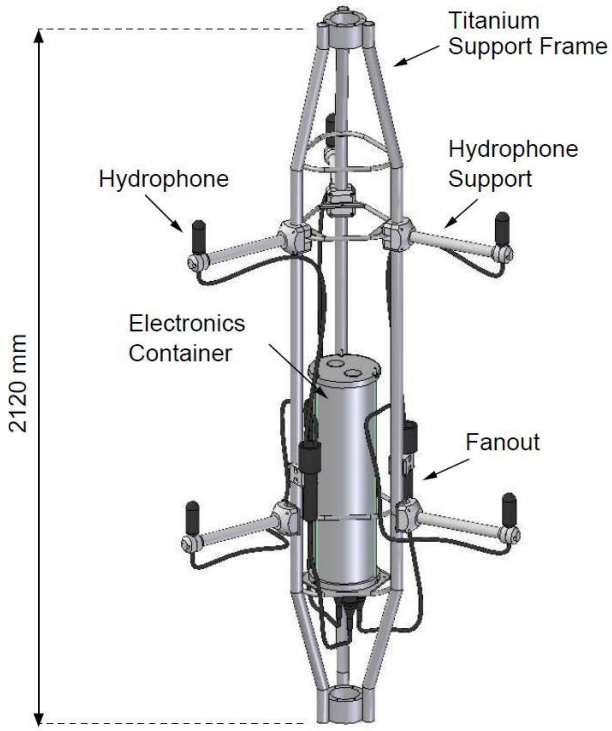


Рис. 81. Акустический модуль с шестью гидрофонами

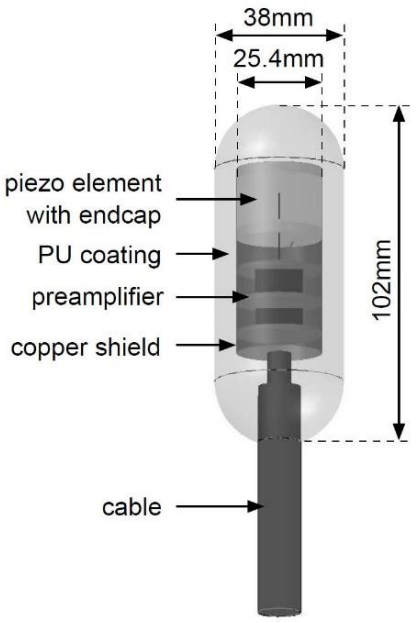


Рис. 82. Схема гидрофона

Установка AMADEUS подтвердила возможность создания в будущем крупномасштабного акустического нейтринного детектора в морских глубинах. Эта система стала отправной точкой для оснащения оптических модулей нейтринного детектора KM3NeT акустическими датчиками для калибровки их местоположения. В течение длительного времени проведения измерений, с 2008 по 2010 год, акустический фон составил ~ 20 мПа. Установлено, что корреляция между скоростью ветра и акустическим фоном составляет около 80 %.

Акустическая система детектора KM3NeT

Конструкция акустической системы KM3NeT основана на опыте работы с системой AMADEUS. Сеть акустических датчиков, установленных в оптических модулях детектора KM3NeT, используется для определения местоположения модулей, для акустического мониторинга шума окружающей среды и для регистрации событий взаимодействия высокоэнергетических нейтрино со средой [170, 171]. Чтобы правильно восстановить направление приходящего нейтрино, необходимо определить положение оптических модулей детектора, которые не являются статичными из-за

морских течений. Их положение должно быть известно с точностью ~ 10 см. Система позиционирования имеет стационарные акустические излучатели на морском дне, а каждый оптический модуль оснащён пьезокерамическим датчиком (Рис. 83). Однако геометрия детектора KM3NeT не оптимизирована для использования акустического метода детектирования нейтрино.

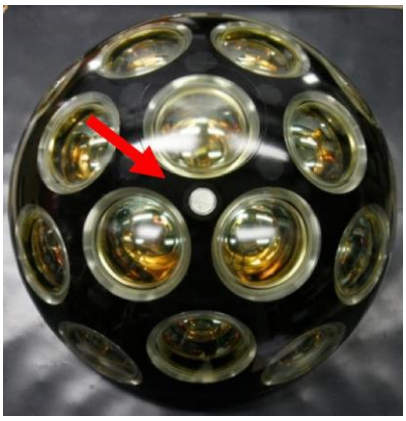


Рис. 83. Оптический модуль детектора KM3NeT с пьезокерамическим датчиком

Акустические датчики регистрируют также биоакустические сигналы дельфинов и кашалотов, которые по своим параметрам приближены к акустическим сигналам нейтринных событий и должны быть исключены на этапе обработки данных. Сложность регистрации сигнала, вызванного взаимодействием нейтрино, заключается в широкой частотной составляющей, что затрудняет его идентификацию, в узкой направленности и в короткой длительности (расстояние между пиками биполярного сигнала оценивается в ~ 10 мкс), что требует систему с высокой частотной дискретизацией, способной фиксировать форму импульса.

Исследование обнаружения сигнала за пределами фона было проведено путём моделирования биполярного импульса, аналогичного при взаимодействии нейтрино с энергией 10^{20} эВ на расстоянии 1 км от детектора при падении под углом 0°, с добавлением экспериментальных реальных акустических данных, полученных в море. Для анализа сигналов, регистрируемых акустическими приёмниками, было предложено использовать спектрограмму. Спектрограмма представляет в трёх измерениях распределение энергии сигнала по времени, частоте и амплитуде. Это позволяет идентифицировать акустический сигнал от события взаимодействия нейтрино со средой [172].

Акустическая установка SPATS

Четыре вертикальные гирлянды акустической установки SPATS [173–175], установленные в 2009 году, размещены в верхних 500 м ледника над Южным полюсом в массиве гирлянд нейтринной обсерватории IceCube (Рис. 84). Расстояния между гирляндами приведены в Табл. 8.

Каждая гирлянда состоит из 7 ступеней, оснащённых одним передатчиком и одним сенсорным модулем. Звук детектируется или генерируется пьезоэлектрическими керамическими элементами внутри модулей (Рис. 85).

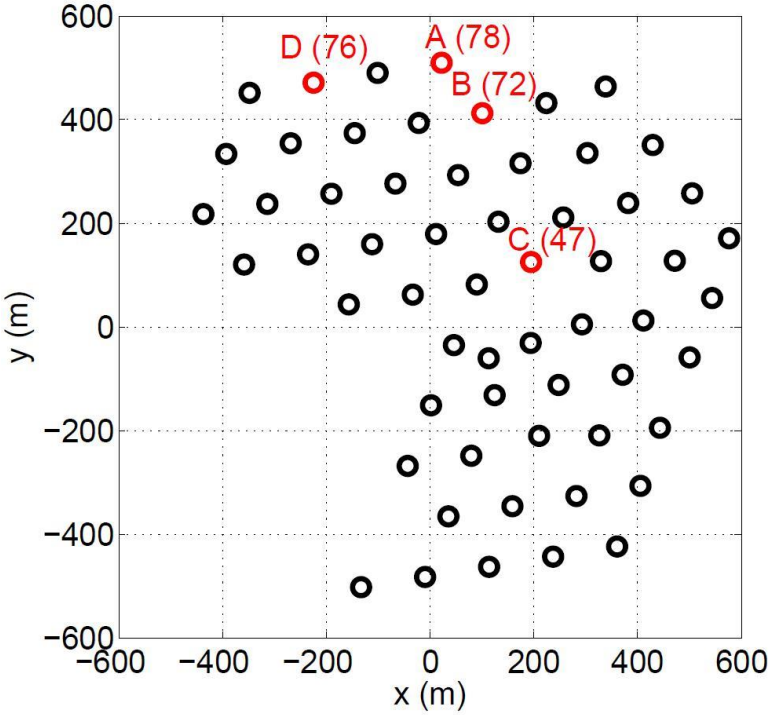


Рис. 84. Четыре гирлянды SPATS в массиве гирлянд IceCube

Таблица 8

Горизонтальное расстояние между гирляндами

Гирлянда	Расстояние, м
AB	124,8
AC	421,1
AD	249,2
BC	302,2
BD	330,3
CD	543,0

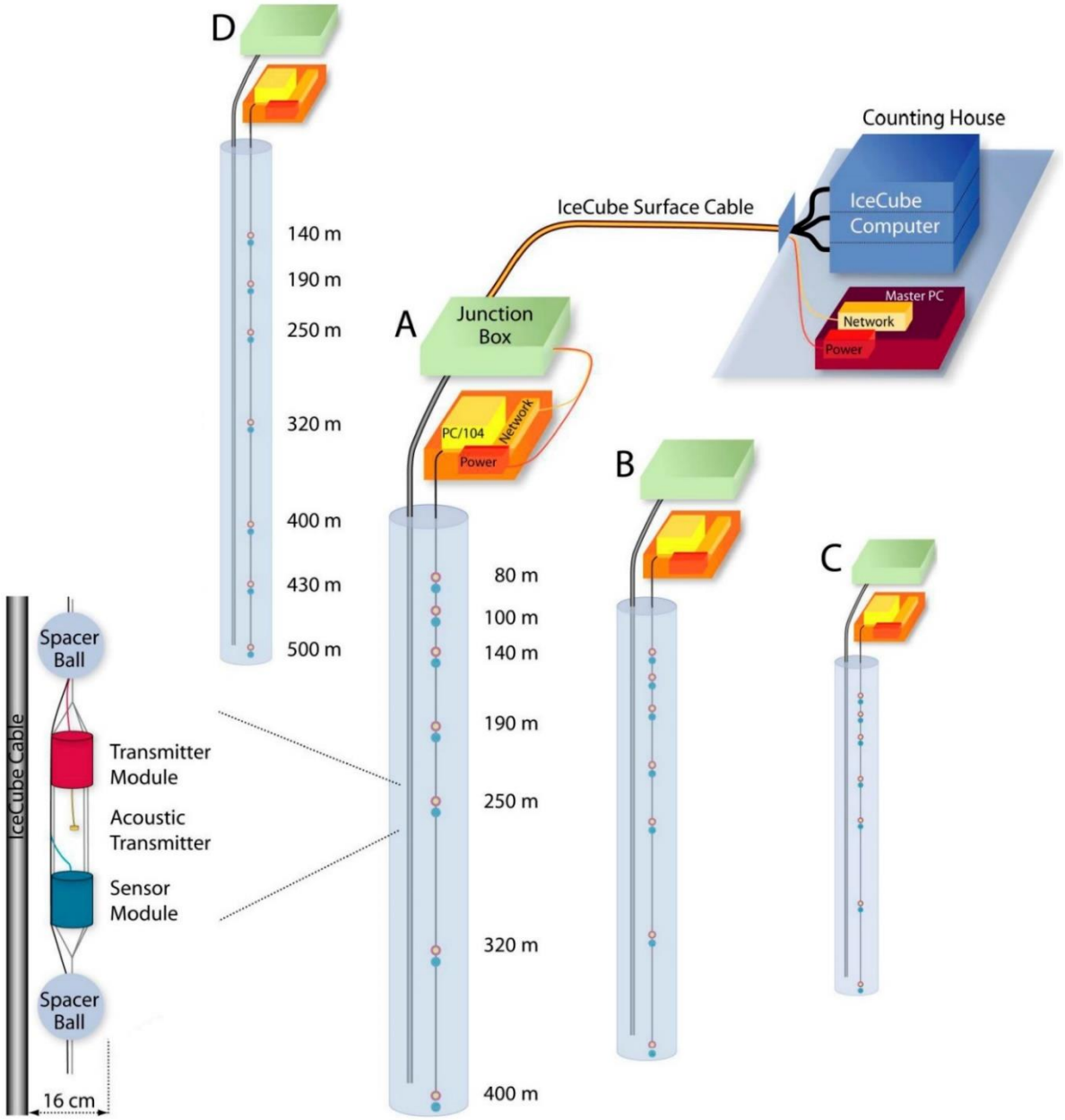


Рис. 85. Схематическое устройство установки SPATS

Установка SPATS включает в себя 28 генерирующих модулей (по 7 в каждой гирлянде), вмороженных в лёд на глубине от 80 до 500 м. Каждый модуль состоит из кольцевого пьезоэлектрического керамического излучателя и модуля высоковольтного импульсного генератора. Излучатель висит непосредственно под высоковольтным модулем. Каждый сенсорный модуль состоит из цилиндрического стального корпуса, в котором размещены 3 дисковых пьезоэлектрических керамических преобразователя. Акустические сигналы попадают на внешнюю поверхность модуля и распространяются по нему.

Конструкция сенсоров в гирлянде D была усовершенствована и включала один пьезоэлектрический преобразователь (вместо трёх независимых преобразователей), который обеспечил более ровную частотную характеристику и более низкий уровень шума. В передатчиках и сенсорах использовалась пьезокерамика, работающая на частоте ~ 5–25 кГц. В дополнение к передающим модулям, установленным в гирляндах SPATS, использовался извлекаемый пингер, который работал в шести заполненных водой скважинах IceCube перед установкой в них гирлянд с оптическими модулями. На установке были проведены измерения акустических характеристик льда, таких как длина затухания акустического сигнала, акустический фон в леднике и скорость звука внутри льда.

Длина затухания акустического сигнала. Затухание сигнала определяется величиной поглощения и рассеяния акустической волны. Измеренная экспериментально с помощью специальной установки длина затухания составила 316 ± 105 м. Эта величина на порядок меньше теоретического ожидания. Здесь возможны несколько причин. В диапазоне частот 10–50 кГц, соответствующих акустическим волнам, создаваемым нейтрино сверхвысокой энергии, происходит рэлеевское рассеяние на границах зёрен льда с четвёртой степенью зависимости от частоты и третьей степенью зависимости от размера зёрен. Вероятно, произошла недооценка вклада этого рассеяния в затухание сигнала. Несколько меньший вклад в величину затухания вносят электрически заряженные линейные дислокации в кристаллах льда, которые поглощают энергию акустических волн пропорционально концентрации дислокаций и квадрату частоты волны. Некоторое влияние могут оказывать колебания плотности ледяных слоёв, толщина которых составляет 1–10 см, а величина колебаний плотности составляет 0,1 %. Звуковые волны, распространяющиеся горизонтально на сотни метров, могут пересекать много слоёв из-за их волнистости. Волны, распространяющиеся под углом к горизонтали, пересекают ещё большее количество слоёв. Несмотря на то что вклад каждого пересечения слоёв небольшой, накопление эффекта за сотни пересечений может быть значительным.

Акустический фон. По сравнению с океанической водой амплитуда сигнала во льду больше, а фоновый шум гораздо более

слабый и стабильный. Фирн хорошо защищает от поверхностного шума. Абсолютный уровень шума в диапазоне частот от 10 до 50 кГц уменьшается с увеличением глубины и на глубине более 200 м становится < 10 мПа [176]. Чувствительность и эквивалентный собственный шум датчиков SPATS были измерены в лабораторных условиях перед установкой в лёд. Эквивалентный собственный шум в той же полосе частот, усреднённый по всем датчикам SPATS, составляет 7 мПа. Калибровка датчиков на месте не производилась. Измеренный фоновый шум внутри ледника имеет гауссовское распределение и стабилен во временных масштабах от одной секунды до двух лет. Принимая акустическую длину затухания 300 м, амплитуда акустического сигнала, генерируемого нейтрино с энергией 10^{20} эВ на расстоянии около 1 000 м, будет равна 14 мПа [177].

Скорость звука. Скорость звука внутри льда может варьироваться в зависимости от концентрации пузырьков, давления, температуры и ориентации зёрен. Если ориентация зёрен случайна, скорость звука однородна и изотропна в макроскопических масштабах. Если структура неслучайна, скорость звука может быть неоднородной или анизотропной. По оценкам, пиковая частота составляет ~ 30 кГц на расстоянии 1 км от каскада частиц в плоскости распространения акустической волны. Лёд, будучи твёрдым телом, может поддерживать распространение продольных и поперечных акустических волн. Поперечные волны распространяются примерно в два раза быстрее продольных волн во многих твёрдых средах, включая лёд. В работе [178] говорится, что образование поперечных волн термоакустическим механизмом подавляется, но исследований по поперечным волнам, генерируемым термоакустическим механизмом, было проведено мало. Если нейтрино создают поперечные волны в дополнение к продольным волнам, то акустический датчик, регистрирующий оба импульса, мог бы определить расстояние до места взаимодействия, а также энергию каскада частиц. Вероятно, что поперечные волны будут иметь небольшую амплитуду и, возможно, будут скрыты в шуме. Измеренная с помощью установки SPATS с точностью 1 % скорость звука продольной волны составила 3 878 ± 12 м/с, поперечной волны – 1 975,8 ± 8,0 м/с на глубинах между 200 и 500 м [179]. Было

установлено, что градиент скорости звука в глубине ледника над Южным полюсом равен нулю (Рис. 86), следовательно, преломление акустических волн там отсутствует. В то же время поверхностный акустический шум преломляется обратно к поверхности, поэтому фирн экранирует глубинные датчики от поверхностного шума.

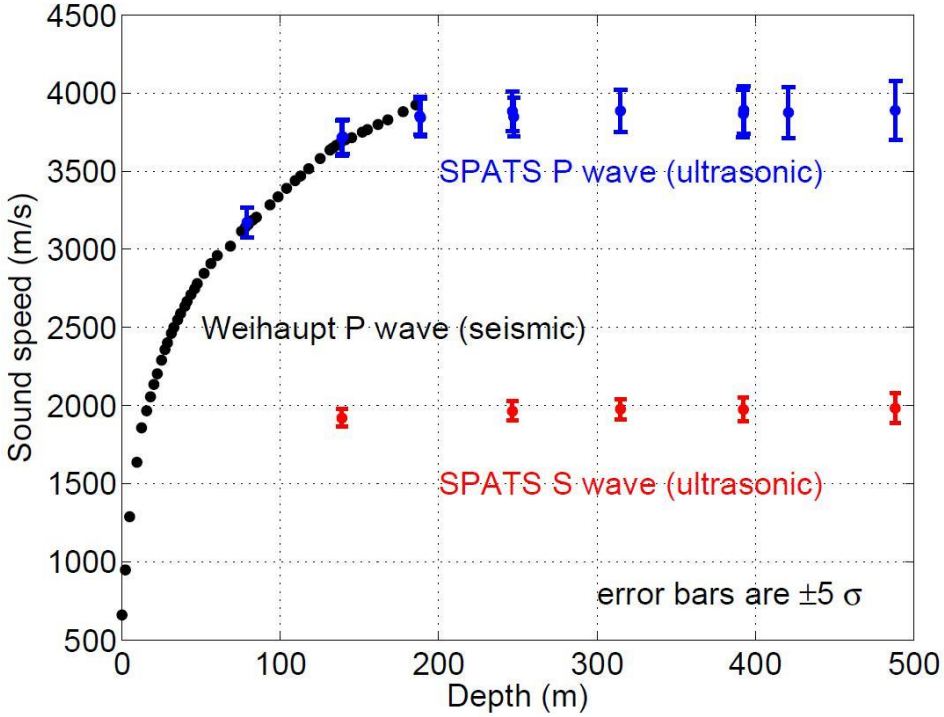


Рис. 86. Измерения скорости звука для продольных и поперечных волн на разных глубинах на частотах 5–25 кГц. Для сравнения показано измерение, выполненное на сейсмических частотах (Гц)

Эффективный объём детектора определяется формулой

$$V_{\text{eff}} = \frac{N_r}{N_t} V_d \ ,$$

где N_r – количество реконструированных событий, N_t – общее количество событий, V_d – физический объём детектора.

Эффективный объём акустического детектора SPATS внутри льда показан на Рис. 87. *Тёмно-серая полоса* (пороговое значение от 50 до 100 МПа) вокруг эффективного объёма учитывает неопределённости в абсолютном шуме [177].

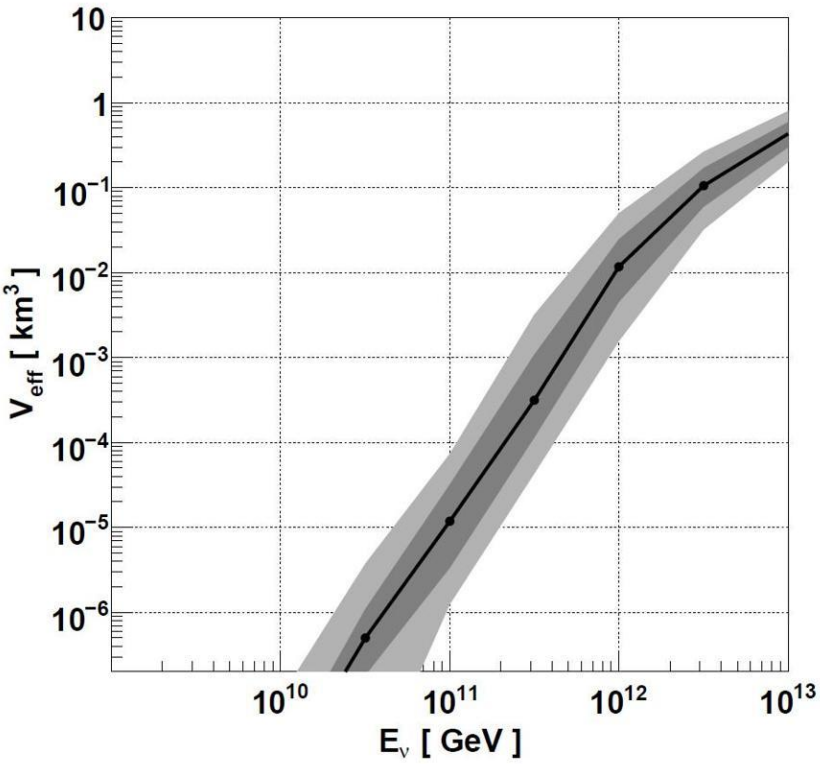


Рис. 87. Эффективный объём акустического детектора

Глава 3. Нейтринный детектор внутри ледника

Акустический импульс в воде

В докладе [180] представлены результаты расчётов акустических сигналов в морской воде от адронных и электронно-фотонных каскадов при энергиях 10^{20}–10^{21} эВ. Из-за ЛПМ-эффекта продольные размеры электронно-фотонных каскадов в десятки раз больше продольных размеров адронных каскадов. Величины параметров акустического сигнала от адронного каскада при энергии нейтрино 10^{20} эВ и акустического сигнала от электронно-фотонного каскада при энергии нейтрино 10^{21} эВ позволяют детектировать нейтрино сверхвысоких энергий акустическим методом.

Поскольку акустический источник когерентен и простирается от десятков до сотен метров вдоль каскада, акустические условия ближнего поля могут поддерживаться на километровых расстояниях, и амплитуда акустической волны, которая распространяется в плоскости, перпендикулярной оси каскада, спадает как $1/\sqrt{R}$ [181].

Для сравнения рассмотрим сначала вариант размещения нейтринного акустического детектора в воде озера Восток.

Температура воды на границе со льдом равна –2,7 °С, а на дне озера следует ожидать температуру около 3 °С. Примерно такое значение температуры имеет вода около дна океанов в местах, где отсутствует геотермальная активность. В озере Байкал после образования ледяного покрова в поверхностном слое воды устанавливается температура 0,2–0,5 °С, а около дна, на глубинах 1 000–1 500 м, температура равна 2,9–3,3 °С.

В расчёте термоакустического импульса в озере Восток рассматривалась вода с температурой 0 °С при давлении 40 МПа. При этих значениях скорость звука в воде c_s = 1 468,5 м/с, теплоёмкость воды C_p = 4 057 Дж/кг К. В условиях высокого давления в озере объёмное расширение воды (dV/dT) носит положительный характер. Коэффициент объёмного температурного расширения воды $\beta = 7{,}13 \cdot 10^{-5}$. Для условий в озере Восток коэффициент Грюнайзена $\gamma = 0{,}038$.

По результатам измерений в эксперименте AMADEUS акустический фон в море равняется ~ 20 мПа. По данным измерений, проведённых в озере Байкал при стационарных метеорологических условиях, уровень высокочастотного интегрального акустического фона составляет ~ 1 мПа. В период ледового покрова уровень акустического фона увеличивается до ~ 6 мПа [166]. В качестве первого приближения этот уровень может быть принят для озера Восток.

Максимальная амплитуда акустического сигнала в зависимости от энергии нейтрино представлена на Рис. 88. При энергии нейтрино $E_\nu = 10^{20}$ эВ амплитуда акустического импульса $P_{\max} = 152$ мПа. Значение акустического фона отмечено *пунктирной линией* на уровне 6 мПа.

Результаты расчёта амплитуды акустического импульса в пресной воде в зависимости от пройденного волной расстояния без учёта затухания сигнала приведены для различных энергий нейтрино на Рис. 89.

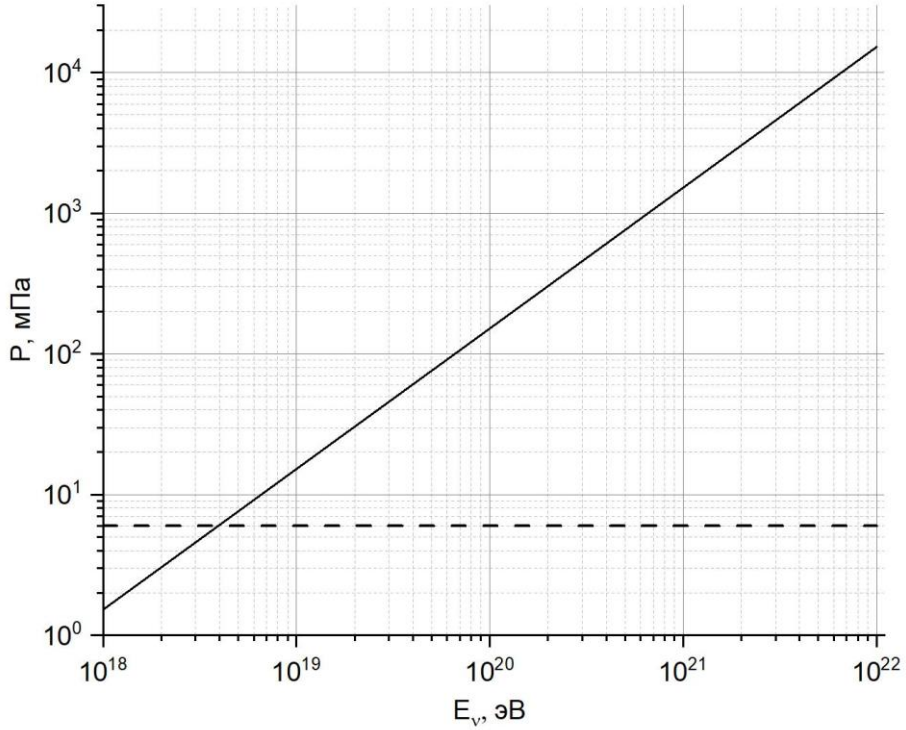


Рис. 88. Максимальная амплитуда акустического импульса в воде озера Восток в зависимости от энергии нейтрино

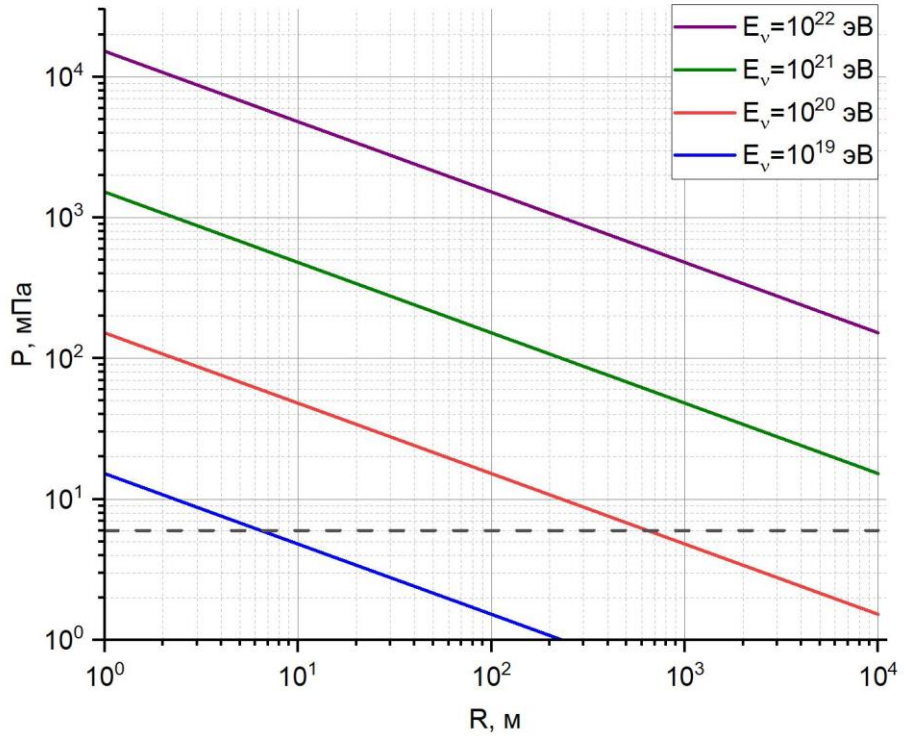


Рис. 89. Зависимость амплитуды акустического импульса от пройденной волной дистанции в пресной воде без учёта затухания сигнала

Акустический импульс в леднике

Расчёт амплитуды акустического импульса внутри льда, создаваемого нейтрино с разными энергиями, был выполнен с учётом результатов эксперимента SPATS со следующими значениями параметров: средняя температура льда равна –20 °C, скорость звука внутри льда c_s = 3 878 м/с [179], теплоёмкость льда C_p = 1 943 Дж/кг К [182], коэффициент объёмного температурного расширения $\beta = 1{,}58 \cdot 10^{-4}$. Коэффициент Грюнайзена для приведённых параметров $\gamma = 1{,}22$.

Значение коэффициента Грюнайзена для льда в 32 раза превышает значение коэффициента для воды в озере Восток, что указывает на предпочтительное размещение акустического детектора нейтрино в леднике. Максимальная амплитуда акустического импульса в леднике в зависимости от энергии нейтрино показана на Рис. 90. При энергии нейтрино $E_\nu = 10^{20}$ эВ амплитуда импульса внутри льда P_{max} = 4,88 Па.

Согласно измерениям в эксперименте SPATS абсолютный уровень акустического фона в диапазоне частот от 10 до 50 кГц на глубинах более 200 м составляет < 10 мПа [176]. Слой фирна над ледником служит хорошей защитой от поверхностного шума.

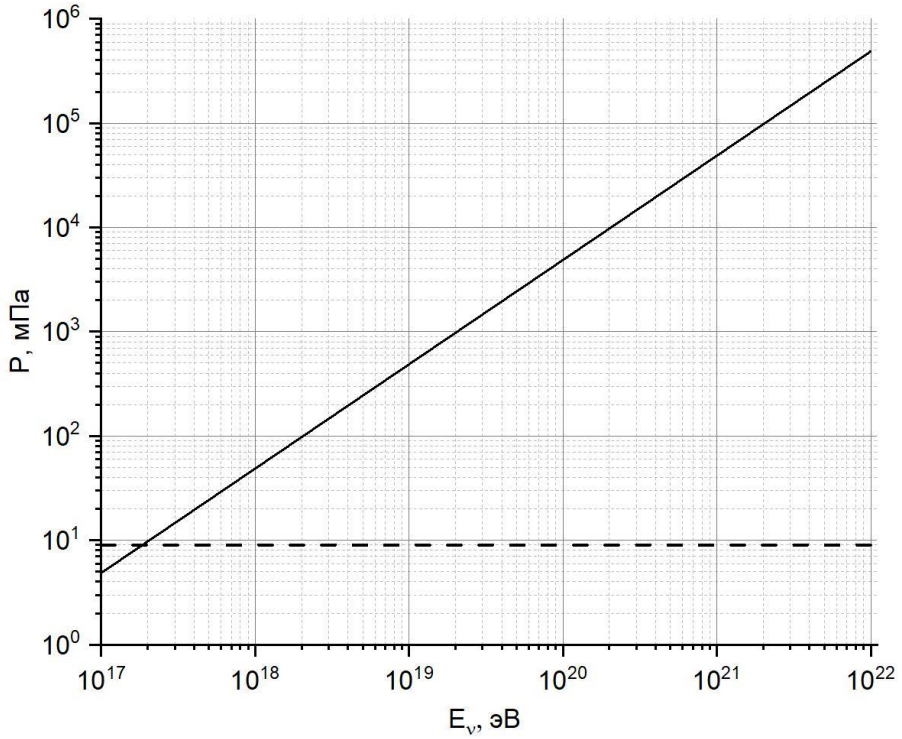


Рис. 90. Максимальная амплитуда акустического импульса в леднике в зависимости от энергии нейтрино и ожидаемый уровень акустического фона

Длина затухания в диапазоне частот 10–50 кГц, по результатам измерений в эксперименте SPATS, равна 316 ± 105 м, что на порядок меньше теоретического ожидания и в значительной степени определяется структурой льда. Структура слоёв льда в районе озера Восток приведена в работе [183].

Поглощение и рассеяние акустической волны в среде приводит к уменьшению её интенсивности с увеличением расстояния распространения по экспоненциальному закону:

$$P_R = P_н e^{-\frac{R}{\lambda}},$$

где $P_н$ – начальная амплитуда, R – расстояние. Длина затухания акустической волны λ – это расстояние, на котором амплитуда акустического сигнала падает до $1/e$. Длина затухания зависит от частоты звука.

Результаты расчёта зависимости амплитуды акустического сигнала от пройденного волной расстояния внутри ледника с учётом длины затухания сигнала λ = 300 м для нейтрино разных энергий показаны на Рис. 91. Уровень акустического фона принят равным 9 мПа. Результаты расчёта амплитуды акустического сигнала для длины затухания сигнала λ = 900 м показаны на Рис. 92.

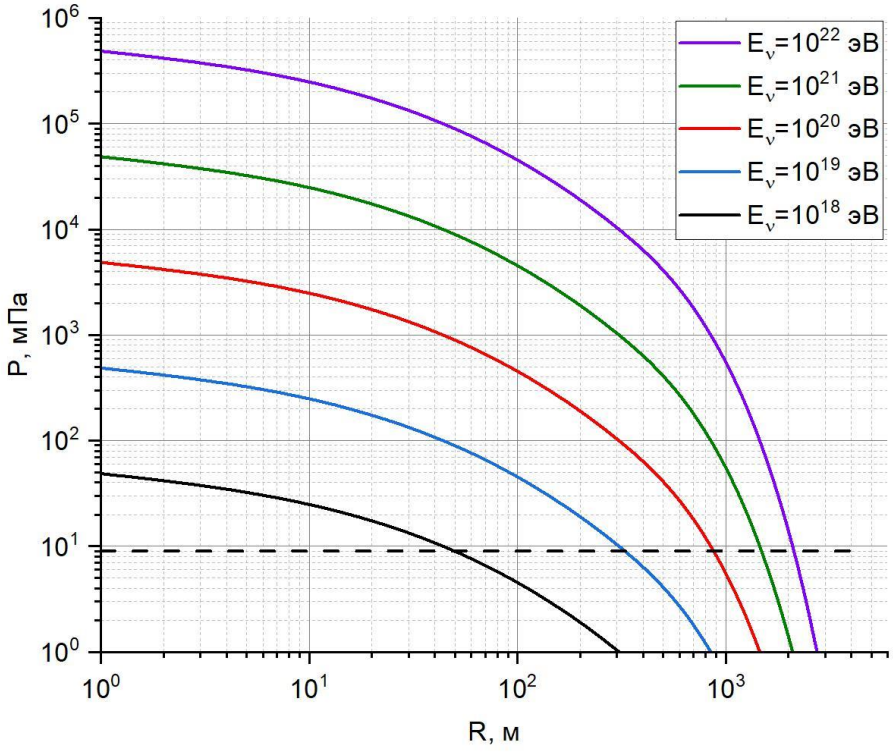


Рис. 91. Зависимость амплитуды акустического импульса от расстояния с учётом длины затухания λ = 300 м для нейтрино разных энергий

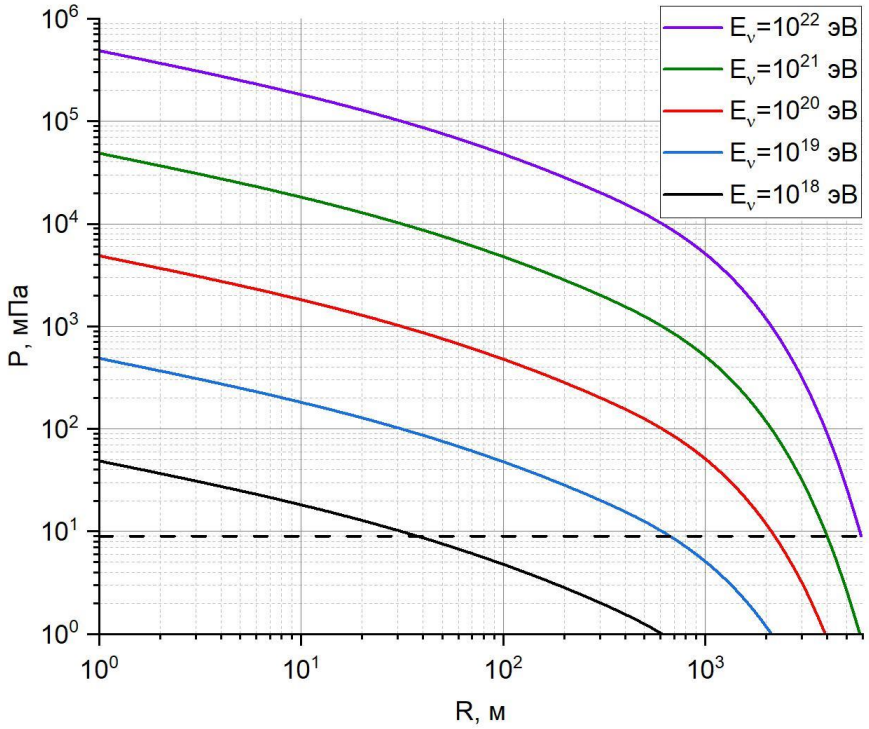


Рис. 92. Зависимость амплитуды акустического импульса от расстояния с учётом длины затухания λ = 900 м для нейтрино разных энергий

В работе [184] приводятся результаты расчёта акустического поля внутри льда с порогом 9 мПа (Рис. 93). Диаграммы направленности излучения рассчитаны для нейтрино разных энергий и различных длин акустического затухания при одном пороговом значении. Нейтрино взаимодействует в точке с боковой координатой равной нулю, и продольной координатой +9 м (смещение от нуля, для того чтобы максимум каскада частиц и акустическая диаграмма излучения были центрированы вблизи продольной нулевой координаты).

Контуры могут быть изменены для определения диаграммы направленности излучения при других пороговых значениях. Например, контур нейтрино с энергией 10^{18} эВ и порогом 10 мПа эквивалентен контуру нейтрино с энергией 10^{19} эВ и порогом 100 мПа. Это следует из линейной зависимости амплитуды акустического давления от энергии адронного потока.

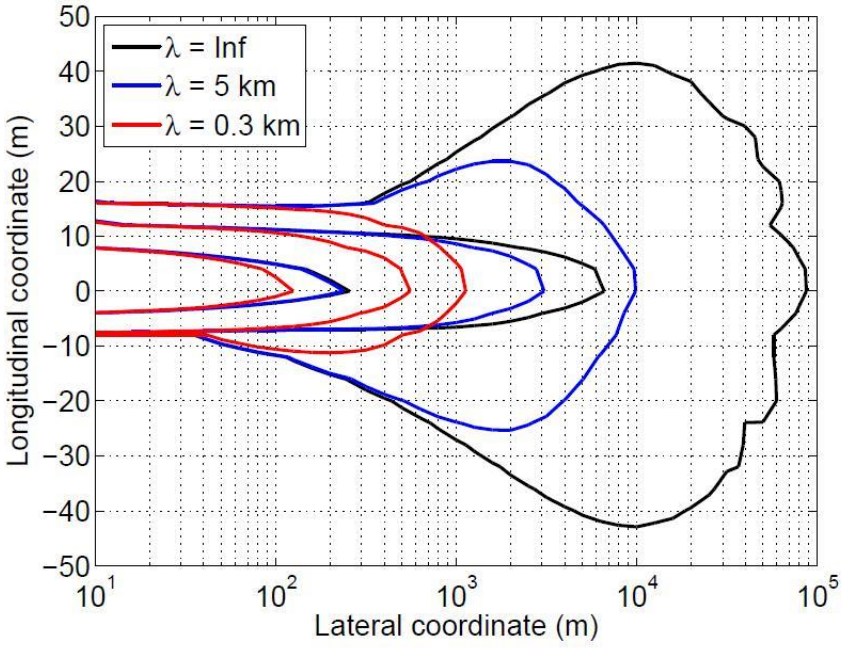


Рис. 93. Контуры акустического поля внутри льда с порогом 9 мПа для нейтрино с энергиями 10^{18}, 10^{19} и 10^{20} эВ при различных длинах акустического затухания (λ)

Принципиальная схема акустического детектора

Для детектирования потока нейтрино сверхвысоких энергий предлагается создать внутри ледника в условиях низкого акустического фона детектор с эффективным объёмом порядка 100 км^3. Детектор будет представлять собой массив льда, в котором располагаются гирлянды с акустическими сенсорами. Теоретически достаточно зарегистрировать три акустических сигнала для определения направления прилёта нейтрино, положения вершины и энергии каскада. Плоскость, проходящая через датчики, является плоскостью распространения акустической волны. Нормаль к установленной плоскости может позволить определить направление прихода нейтрино. Принципиальная схема расположения гирлянд с акустическими датчиками в леднике над озером Восток показана на Рис. 94.

План расположения гирлянд создаётся на основе данных о длине затухания акустического сигнала в леднике, величине акустического фона и скорости звука внутри льда. Эти и другие необходимые для проектирования детектора данные должны быть получены в процессе изучения будущего места размещения акустических сенсоров. Без этих данных невозможно рассчитать оптимальное расстояние между гирляндами и их количество.

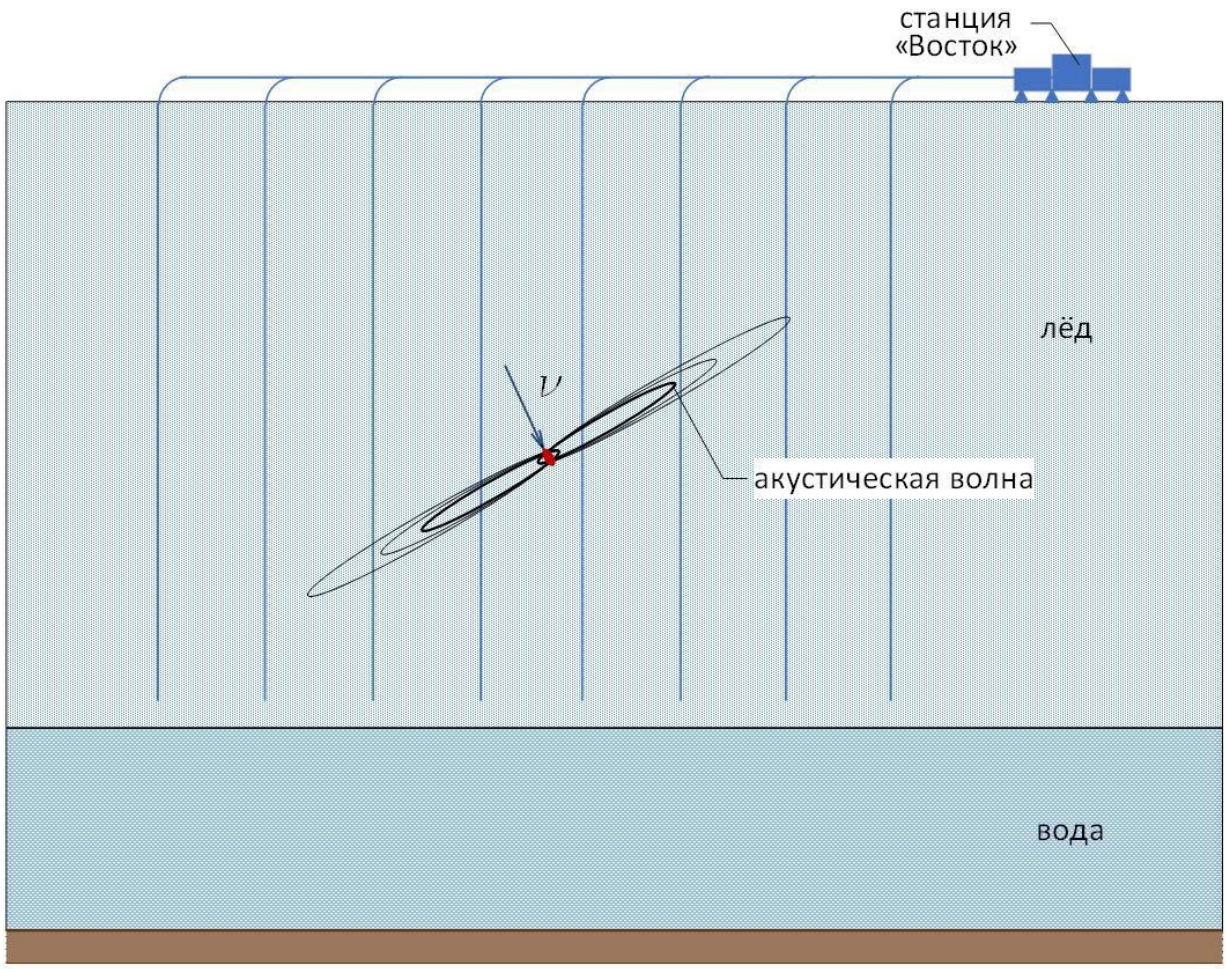


Рис. 94. Принципиальная схема расположения гирлянд акустического детектора в леднике (вертикальный разрез)

Пьезоэлектрические датчики

В экспериментальных акустических установках для детектирования высокоэнергетических нейтрино использовались гидрофоны с пьезоэлектрическими датчиками. В качестве примера рассмотрим характеристики датчика AM (Рис. 95), приведённые в работе [185]. Датчик настроен на чувствительность –145 дБ re 1 В/мкПа (включая предусилитель) в диапазоне частот от 10 до 50 кГц. Чувствительность датчика в зависимости от частоты, полярного угла и азимутального угла была измерена с использованием калиброванного излучателя.

На Рисунке 96 показана чувствительность датчика AM как функция частоты для различных углов относительно продольной оси датчика. Систематическая погрешность ниже 50 кГц составляет 2–3 дБ.

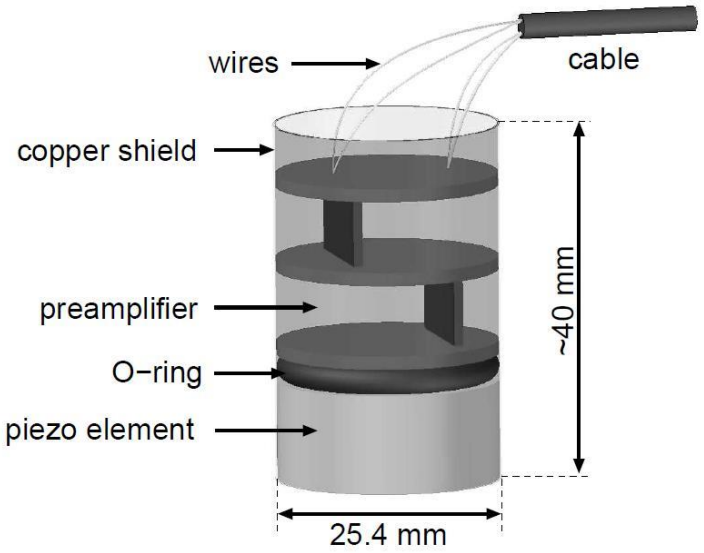


Рис. 95. Схематическое устройство датчика АМ

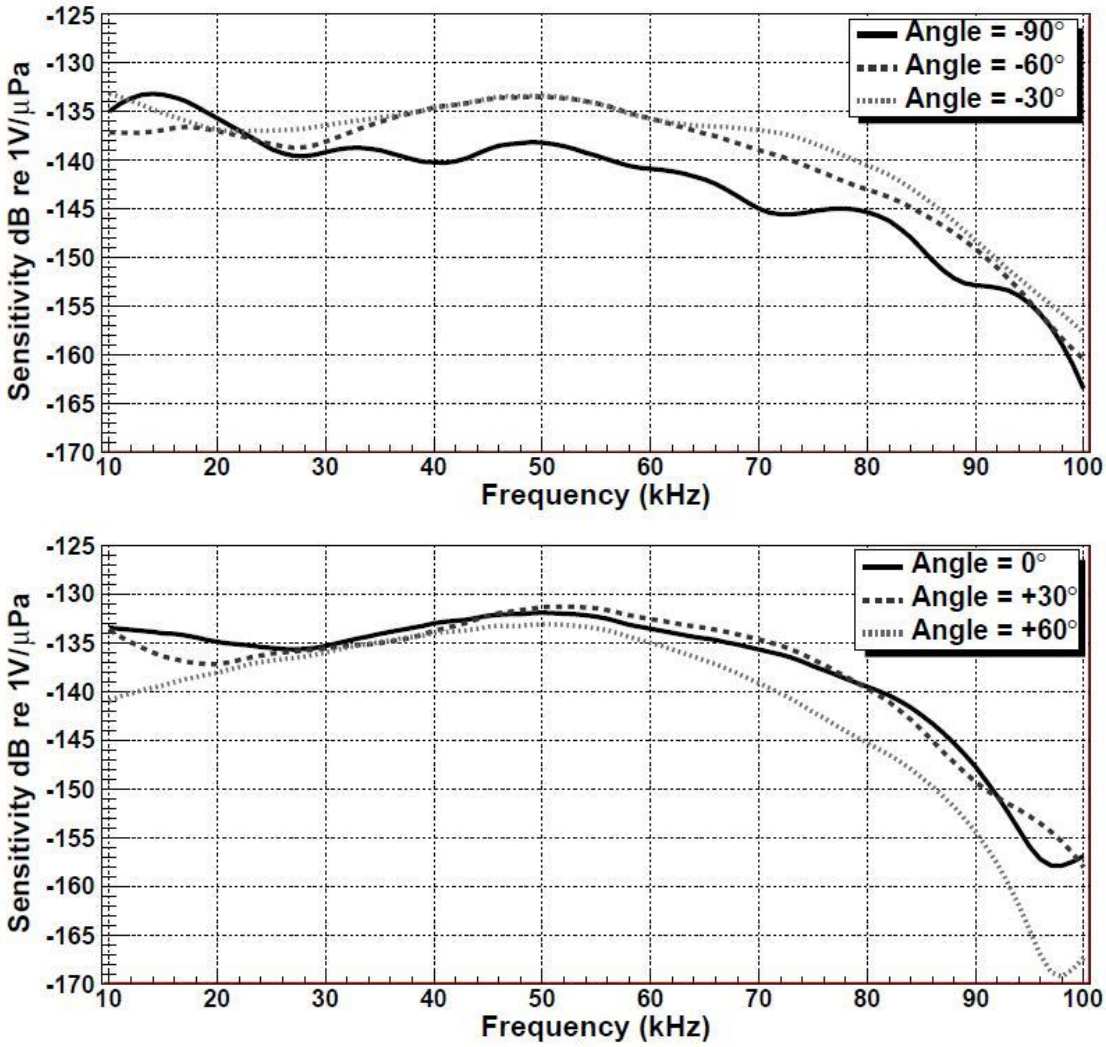


Рис. 96. Чувствительность датчика АМ в зависимости от частоты для различных углов относительно продольной оси датчика

На Рисунке 97 приведено сравнение отклика различных типов акустических датчиков на биполярный импульс. Временной сдвиг между излучаемым и принятым импульсами на рисунке является произвольным.

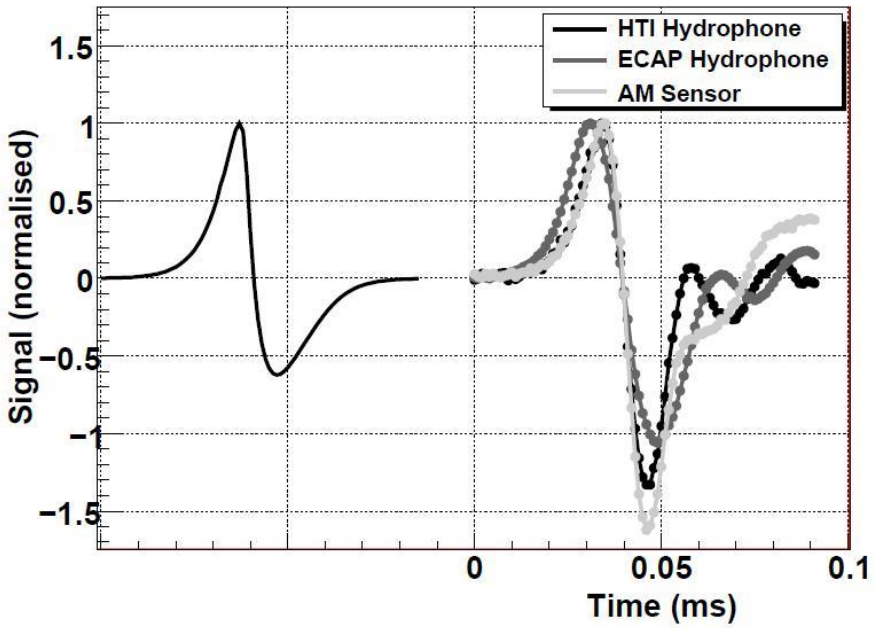


Рис. 97. Сравнение отклика различных типов акустических датчиков на биполярный импульс. Излучённый сигнал показан *слева*, отклик показан *справа*

Описание одного из акустических датчиков, предназначенных для установки SPATS внутри ледника на Южном полюсе, приводится в статье [186]. Датчик оснащён одним пьезоэлектрическим элементом, залит эпоксидной смолой и находится в непосредственном контакте со льдом. Датчик (Рис. 98) имеет внешний диаметр 24 мм и длину 15 мм. Эпоксидный материал был выбран с акустическим импедансом, промежуточным между льдом и пьезоэлектриком для улучшения соединения и уменьшения резонанса. Материал был испытан на пригодность к эксплуатации при температурах до −85 °C.



Рис. 98. Датчик с пьезокерамическим элементом и двухступенчатым усилителем

Волоконно-оптические датчики

В качестве альтернативы пьезоэлектрическим датчикам следует рассмотреть возможность установки внутри льда распределённых волоконно-оптических датчиков, использующих для измерений метод когерентной рефлектометрии. В оптическое волокно периодически подаются оптические импульсы, часть света рассеивается на неоднородностях волокна и распространяется в обратном направлении. При микродеформациях волокна, вызванных внешними акустическими воздействиями, параметры рассеянного отражённого сигнала изменяются. Анализируя изменения в интерференционной картине сигнала обратного рассеяния, можно определить место воздействия акустической волны на волокно. В когерентном рефлектометре используется специализированный узкополосный источник излучения. За счёт этого отражённые сигналы складываются когерентно: амплитуды сигналов, отражённых от разных неоднородностей и дефектов волокна, суммируются с учётом фазовых задержек. Малейшие смещения неоднородностей волокна друг относительно друга (порядка 100 нм) вызывают изменения в когерентной рефлектограмме для данного участка волокна. При этом для прочих участков волокна вид рефлектограммы не меняется. Такие микроскопические смещения могут возникать при микровибрациях волокна, вызванных внешним акустическим воздействием. Длина волоконно-оптического кабеля может достигать нескольких десятков километров. Схема когерентного рефлектометра показана на Рис. 99. Как пример: технология используется в распределённой системе обнаружения акустических событий «Дунай», разработанной компанией «Т8 Сенсор» для различных задач [187].

Для обнаружения акустического воздействия на волокно необходимо снять ряд последовательных рефлектограмм. Анализируя происходящие в них изменения, можно локализовать место воздействия, изучить спектр воздействующего сигнала, оценить частоту и интенсивность воздействия, его продолжительность и характер изменения во времени.

Метод когерентной рефлектометрии может применяться также для измерения напряжения, возникающего в волоконно-

оптическом датчике при воздействии на него акустической волны. Эта технология использует датчики, интегрированные в оптическое волокно и преобразующие акустическое давление в напряжение в оптоволокне [188–190].

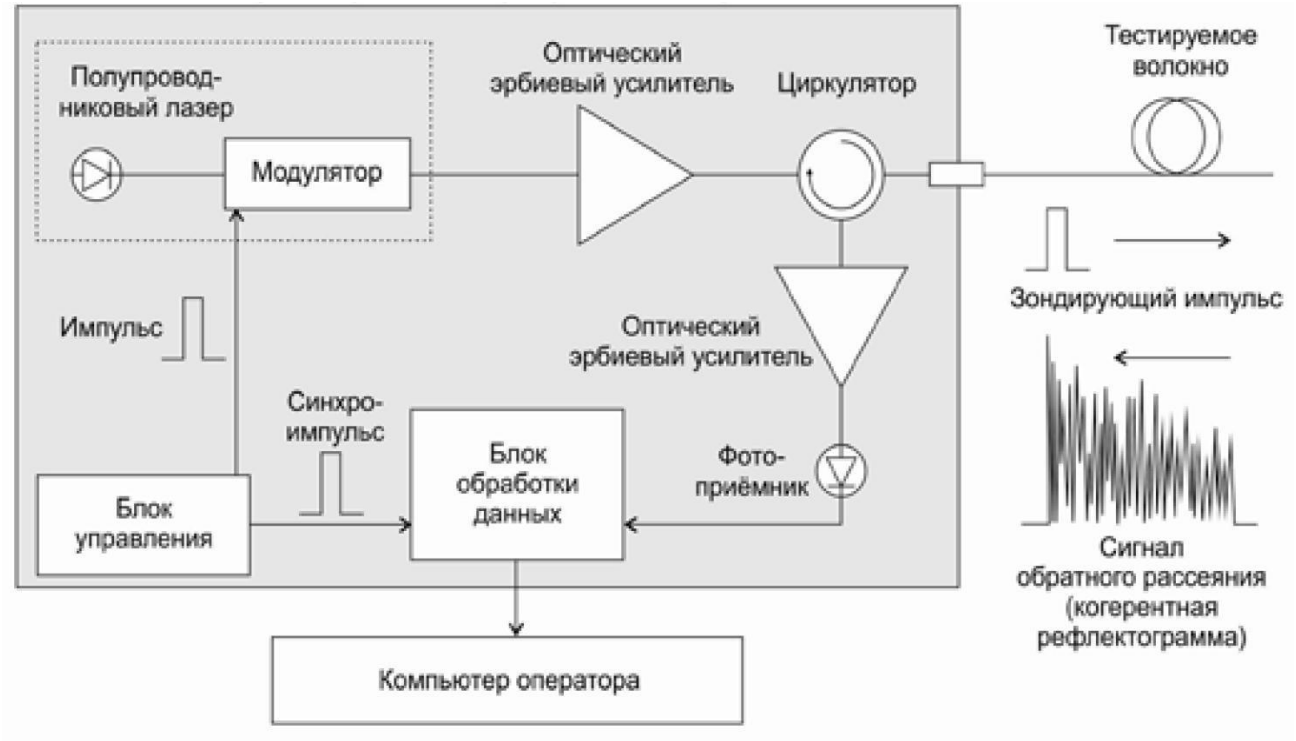


Рис. 99. Схема когерентного рефлектометра

Пример датчика для акустического детектирования нейтрино в воде показан на Рис. 100 [191]. Чувствительность технологии зависит как от способности датчика эффективно преобразовывать давление в напряжение в оптическом волокне, так и от способности волокна преобразовывать это напряжение в сдвиг длины волны. Этот сдвиг затем измеряется с помощью интерферометра, который является ключевым компонентом системы считывания сигнала. Конструкция основана на использовании одной (или двух) мембран, размещённых на корпусе цилиндрической формы. Оптическое волокно пропускается через центр мембран и затем приклеивается. Размеры мембраны (толщина – 250 мкм и радиус – 5 мм) определяют механический отклик датчика.

Механизм компенсации гидростатического давления реализован в виде отверстия в корпусе, поскольку датчик должен работать на большой глубине и, следовательно, выдерживать высокое давление окружающей среды. Отверстие позволяет уравновесить

давление воды или масла внутри датчика с высоким давлением окружающей среды. Следует заметить, что датчик с такой компенсацией гидростатического давления, как ожидается, будет менее чувствительным, а датчик, заполненный незамерзающей жидкостью и находящийся внутри льда, будет ещё менее чувствительным к акустической волне.

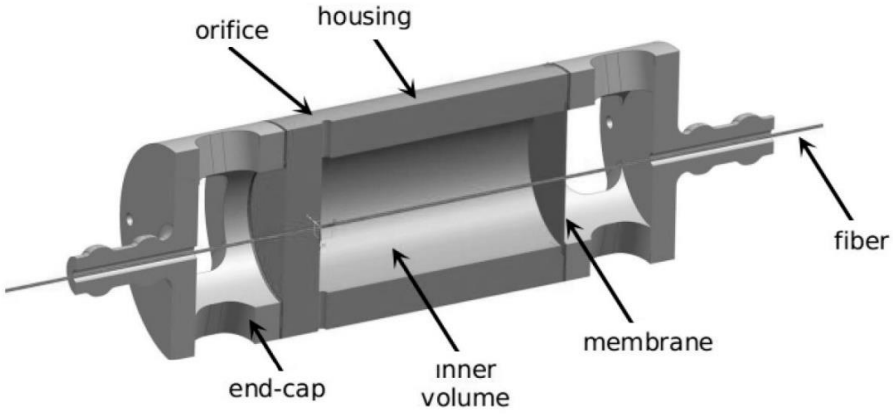


Рис. 100. Конструкция датчика с мембраной

Следует изучить возможность измерения деформации тонкого оптоволокна, расположенного внутри льда, под воздействием акустической волны с характеристиками термоакустического импульса, сгенерированного каскадом. В случае успеха получится акустический датчик, распределённый по всей длине оптоволокна. Гирлянды распределённых акустических датчиков значительно повысят пространственную разрешающую способность детектора нейтрино. Вопрос выбора типа акустических датчиков (пьезоэлектрические или волоконно-оптические) для нейтринного детектора, размещённого в леднике, подлежит детальному рассмотрению.

Изучение места размещения акустического детектора

С целью получения исходных данных для проектирования акустического детектора необходимо изучить место его размещения в леднике. В список исследуемых параметров входят:

– длина затухания акустического сигнала различной частоты;
– уровень акустического фона внутри ледника;
– скорость звука;
– вертикальная эпюра скорости движения ледника;
– толщина фирна и льда в границах площади детектора;
– температурное поле внутри ледника.

Длина затухания в диапазоне частот термоакустического импульса 10–50 кГц является критически важной величиной при проектировании детектора, поскольку влияет на расстояние между гирляндами. Это расстояние в свою очередь будет определять необходимое количество буровых скважин в леднике для установки гирлянд с целью создания акустической решётки нейтринного детектора заданного объёма. Длина затухания в значительной степени зависит от структуры льда в месте размещения акустического детектора.

Уровень акустического фона в частотном диапазоне термоакустического сигнала определяет нижнюю границу сигнала, который может быть зарегистрирован детектором, и максимальное расстояние, на котором акустический сигнал может быть измерен для нейтрино с разными энергиями, что видно из расчётов, представленных на Рис. 91, 92 для различных значений длин затухания сигнала. От поверхностного шума детектор экранируется слоем пористого фирна. Можно предположить, что основной источник акустического шума находится в месте контакта ледника с горными породами на берегах озера, по которым он скользит, но нельзя исключать и процессы, протекающие в самом леднике. Для измерения акустического фона может использоваться та же система, что и для измерения длины затухания сигнала.

Скорость звука c_s значительно влияет на амплитуду термоакустического импульса, что видно из формулы

$$P_{\max} \approx E_{\nu} \frac{1}{4} c_s^2 \frac{\beta}{C_p} .$$

Скорость распространения акустического импульса в горизонтальной и наклонных плоскостях может различаться из-за слоистой структуры ледника, что необходимо будет учитывать при реконструкции события взаимодействия нейтрино со средой. Время прихода сигнала на акустические датчики определяется расстоянием между ними и скоростью звука. Из сказанного следует, что скорость звука в леднике необходимо измерить по всей его толщине в плоскостях с углами наклона в диапазоне от 0 до 90°. Также нужно провести исследования отражения звука на границе «лёд – вода». Измерения скорости звука в леднике могут проводиться с

помощью системы, используемой для измерения длины затухания и акустического фона.

Вертикальная эпюра скоростей движения ледника важна для оценки деформации гирлянд в леднике с целью определения продолжительности работы до возможного разрыва. Особое значение это имеет в случае использования тонкого оптоволокна для регистрации акустических сигналов методом когерентной рефлектометрии. Измерения могут быть произведены с помощью оптоволокна, вмороженного в ледник по всей его толщине и соединённого с рефлектометром.

Толщина фирна и льда в границах площади детектора важна для определения длины акустических гирлянд, глубины бурения скважин и технических параметров бурового оборудования. Измерения могут быть выполнены методом радиолокационного зондирования.

Установка акустических датчиков

Бурение скважин для размещения гирлянд с акустическими датчиками в леднике выполняется с использованием новой технологии скоростного экологически чистого бурения, описанной в Главе 3. Проходка скважин осуществляется по всей толщине ледника без проникновения в озеро. Бурение проводится тепловым способом и после извлечения бурового снаряда скважина остаётся заполненной водой. Пока вода не замёрзла, в скважину опускается оптоволокно или гирлянда с акустическими датчиками, которые впоследствии оказываются вмороженными в лёд.

Гирлянды соединяются оптоволоконным кабелем с измерительным оборудованием, расположенным в помещениях полярной станции «Восток». Объём нейтринного детектора может наращиваться постепенно по мере бурения скважин в леднике и установки в них акустических датчиков.

Глава 4. Нейтринный телескоп Vostok

Лучший в настоящее время нейтринный телескоп IceCube может обнаружить одно событие ГЗК-эффекта в год, тогда как для изучения временного, углового и спектрального распределения необходимо регистрировать более 10 событий. Обнаружение ~ 100 событий ГЗК-эффекта могло бы помочь решить вопрос о сверхвысоком ускорении космических лучей и позволить измерить полное нейтрино-нуклонное сечение при энергиях > 10^{18} эВ. Для увеличения числа регистрируемых событий необходим детектор с эффективным объёмом ~ 100 км^3. Измерения в области сверхвысоких энергий может обеспечить нейтринный телескоп Vostok, оснащённый акустическим и оптическим детекторами (Рис. 101).

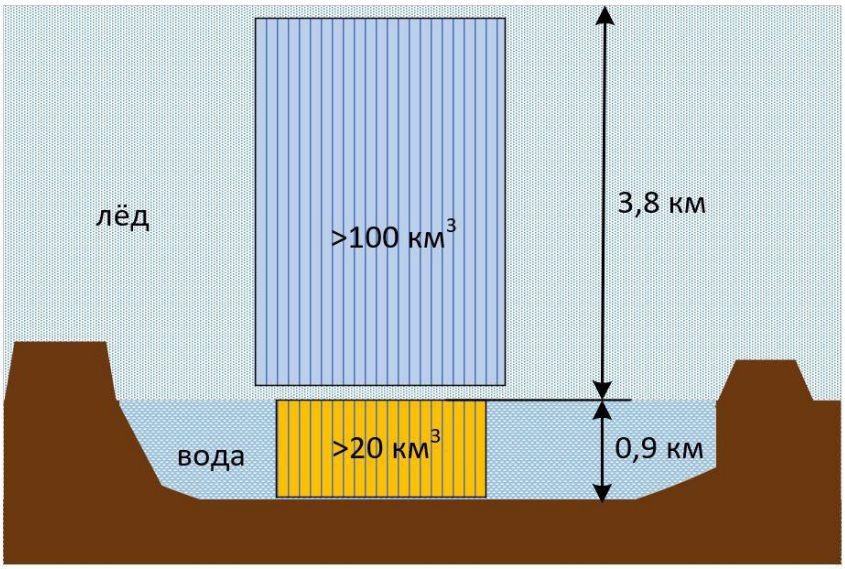


Рис. 101. Акустический и оптический детекторы нейтринного телескопа Vostok

Сочетание акустического метода детектирования нейтрино сверхвысоких энергий с оптическим методом позволит с большей точностью определять энергию и источник нейтрино. Фактором, подтверждающим детектирование нисходящего высокоэнергетического мюонного нейтрино, будет являться совпадающая по времени регистрация сигналов одновременно в объёмах двух детекторов (Рис. 102). Диаметр *кружков* на рисунке иллюстрирует интенсивность сигналов на акустических и оптических датчиках.

Пересечение траектории движения мюона с плоскостью акустической волны соответствует координатам каскада.

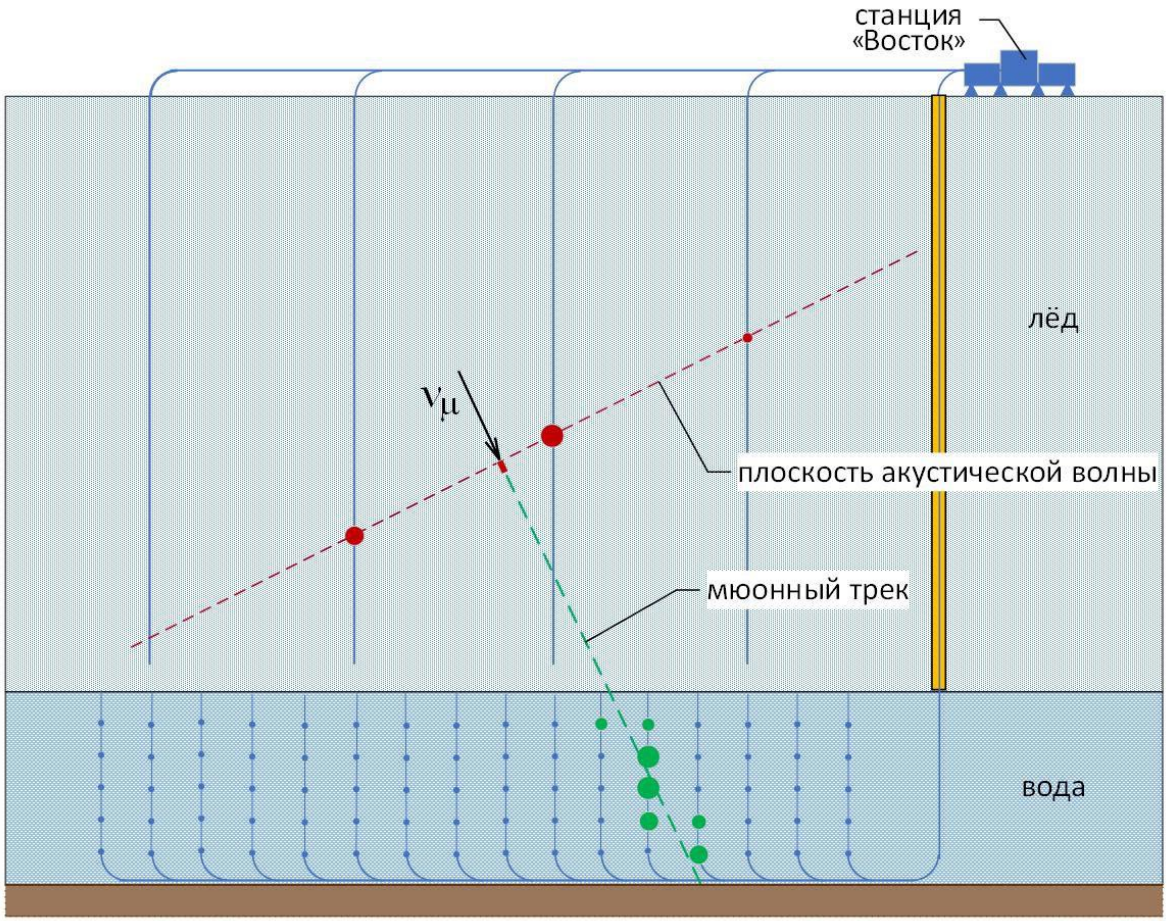


Рис. 102. Проекция акустических и оптических сигналов
на вертикальную плоскость

В будущем возможно также дальнейшее развитие нейтринного телескопа Vostok. К оптическому и акустическому детекторам может быть добавлен радиоволновый детектор с энергетическим пределом 10^{25} эВ, расположенный на поверхности [192, 193]. Использование одновременно нескольких методов детектирования (оптического, акустического, радиоволнового) позволит лучше идентифицировать и реконструировать события взаимодействия нейтрино сверхвысоких энергий с материей.

Часть IV
Технология скоростного бурения и экологически чистого проникновения в подледниковые озёра

Глава 1. Способы бурения ледников в Антарктиде

Можно выделить пять основных научных направлений, требующих бурения антарктических ледников, которые достигают толщины в несколько километров.

1. *Создание нейтринных детекторов с целью изучения свойств нейтрино, строения Земли и проведения астрофизических исследований.* Создание нейтринных детекторов связано с бурением скважин в леднике на большую глубину с целью размещения оптических и акустических датчиков для регистрации потоков нейтрино.

2. *Исследование подледниковых озёр с целью поиска и изучения реликтовых форм жизни.* Для исследования подледниковых озёр крайне важно не допустить загрязнение водной среды извне и обеспечить достаточное время поддержания скважины в рабочем состоянии, позволяющем произвести погружение научного оборудования и пробоотборников в изучаемое озеро.

3. *Гляциологические исследования, связанные с изучением истории атмосферы и палеоклимата Земли.* Для гляциологических исследований основной задачей бурения является извлечение ледяных кернов по всей толщине ледника, поэтому процесс бурения состоит из многократных погружений и подъёмов бурового снаряда в скважине и характеризуется продолжительным временем бурения.

4. *Исследование изотопного состава льда и содержащегося в нём газа* in-situ *с помощью зондов с целью поиска наиболее древнего льда.* Для поиска места залегания льда с сохранившимся порядком стратиграфии выполняется скоростное бурение с одновременным измерением изотопного состава льда. На найденном месте впоследствии производится бурение с извлечением кернов льда.

5. *Исследование подледниковых коренных пород и отложений с целью изучения геологической структуры антарктического континента.* Для изучения геологической структуры используется

буровой снаряд, который способен извлекать из-подо льда керны твёрдой горной породы.

Каждое из перечисленных направлений предъявляет свои специфические требования к скважине, её диаметру и буровому оборудованию. Общей особенностью бурения ледников на глубину более 500 м является необходимость заполнения скважины заливочной жидкостью, гидростатическое давление которой противостоит горному давлению и предотвращает смыкание стенок скважины. Заливочная жидкость должна оставаться в скважине в жидком состоянии на время проведения исследовательских работ.

Скважина, через которую было произведено вскрытие озера Восток в феврале 2012 года и повторно в январе 2015 года, не соответствует правилам Научного комитета по антарктическим исследованиям и не может быть использована для проникновения в озеро по причине сильной загрязнённости заливочной жидкости механическими частицами, клатратными гидратами, различными химическими соединениями и органическими включениями.

Основные требования к скважине для проникновения в озеро Восток можно сформулировать следующим образом:

– диаметр скважины для погружения в озеро научного оборудования должен быть не менее 150 мм;

– длительность бурения скважины должна быть не более одного летнего сезона;

– технология вскрытия озера должна исключать возможность поступления заливочной жидкости в озеро;

– незамерзающая заливочная жидкость должна компенсировать горное давление и обеспечить возможность длительного многолетнего использования пробуренной скважины;

– заливочная жидкость не должна содержать механических, химических и биологических включений;

– работа бурового оборудования не должна приводить к загрязнению скважины и заливочной жидкости;

– конструктив опускаемого в скважину бурового оборудования должен позволять проводить его деконтаминацию для исключения возможности попадания внешней биоты в скважину;

– должны быть предусмотрена инспекция состояния скважины и возможность периодической калибровки её диаметра;

– после завершения исследовательских работ, направленных на изучение озера, должна быть проведена консервация скважины с удалением из неё заливочной жидкости;

– все работы, проводимые в скважине, должны соответствовать Протоколу по охране окружающей среды Антарктики к Договору об Антарктике.

Бурение льда колонковым буровым снарядом

В качестве примера бурения глубоких скважин в леднике с использованием электромеханического колонкового бурового снаряда можно привести скважину 5Г к озеру Восток [194]. Скважина имеет керновую глубину 3 769,3 м. Бурение скважины с глубины 2 755 м производилось электромеханическим буровым снарядом. До этой глубины использовались термобуры, от которых пришлось отказаться вследствие заклинивания и отрыва грузонесущего кабеля. Пройденные участки скважины периодически расширялись, в результате чего она получила ступенчатую форму. В нижней части скважина имеет диаметр 137 мм.

При бурении скважины из неё извлекались ледяные керны, которые позволили определить химический состав льда, содержание в нём изотопов различных газов и включений (земная и космическая пыль, вулканический пепел, бактерии, споры растений и др.). Всё это дало возможность изучить палеоклимат и историю земной атмосферы. Бурение колонковыми буровыми снарядами на грузонесущем кабеле требует больших затрат времени на проведение многократных спускоподъёмных операций, результатом которых явилось значительное загрязнение скважины, избежать которого практически невозможно.

В верхней части скважины 5Г располагается обсадная колонна из пластиковых труб для изоляции от фирна, который проницаем для заливочной жидкости. Длина обсадной колонны составляет 120 м, внутренний диаметр равен 165 мм. На нижнем конце колонны расположен нагреваемый алюминиевый башмак, который позволил при установке обсадной колонны вморозить её конец в лёд и изолировать скважину от фирна.

Схема бурового комплекса на станции «Восток» показана на Рис. 103, а схема электромеханического колонкового бурового

снаряда – на Рис. 104 [194]. Буровой снаряд, закреплённый на грузонесущем кабеле диаметром 16 мм, с помощью лебёдки опускается в скважину, которая заполнена заливочной жидкостью из смеси авиационного топлива ТС-1 и фреона F-141b. Общий объём заливочной жидкости в скважине составляет порядка 60 м^3. Уровень жидкости находится на глубине 40 м. Отделённый буровым снарядом ледяной керн диаметром 106 мм извлекался на поверхность, и снаряд повторно опускался в скважину. За один цикл опускания бурового снаряда в скважину проходка составляла 3 м в верхнем слое льда, а затем снизилась до 1 м и менее в нижнем слое. Скорость спуска-подъёма снаряда в скважине равнялась 0,7 м/с. На большой глубине скважины длительность одного цикла увеличивалась до 4–5 ч. Мощность двигателя буровой лебёдки составляет 20 кВт.

Следует отметить недостатки использованной в скважине 5Г незамерзающей заливочной жидкости. К авиационному керосину ТС-1 с плотностью 0,78 г/см^3 для утяжеления жидкости добавлялся фреон F-141b с плотностью 1,25 г/см^3. Органические примеси, содержащиеся в керосине, равно как и компоненты самого керосина, стали источником загрязнения скважины. По данным работ [195, 196], органическими примесями в ТС-1 являются алифатические углеводороды (до 22 %), а также соединения фенольного типа. Все эти примеси были найдены в замёрзшей воде, поступившей в скважину после первого вскрытия озера. При соприкосновении буровой жидкости с водой, во время вскрытия озера, образовались клатратные гидраты фреона [197–199], что и произошло в 2012 и 2015 годах.

Процесс образования клатратных соединений протекает особенно интенсивно при перемешивании буровым снарядом границы раздела между водой и заливочной жидкостью и приводит к появлению в скважине клатратной пробки, исключающей возможность погружения в озёрную воду научного оборудования. Процесс образования клатратных гидратов изучен в работе [200].

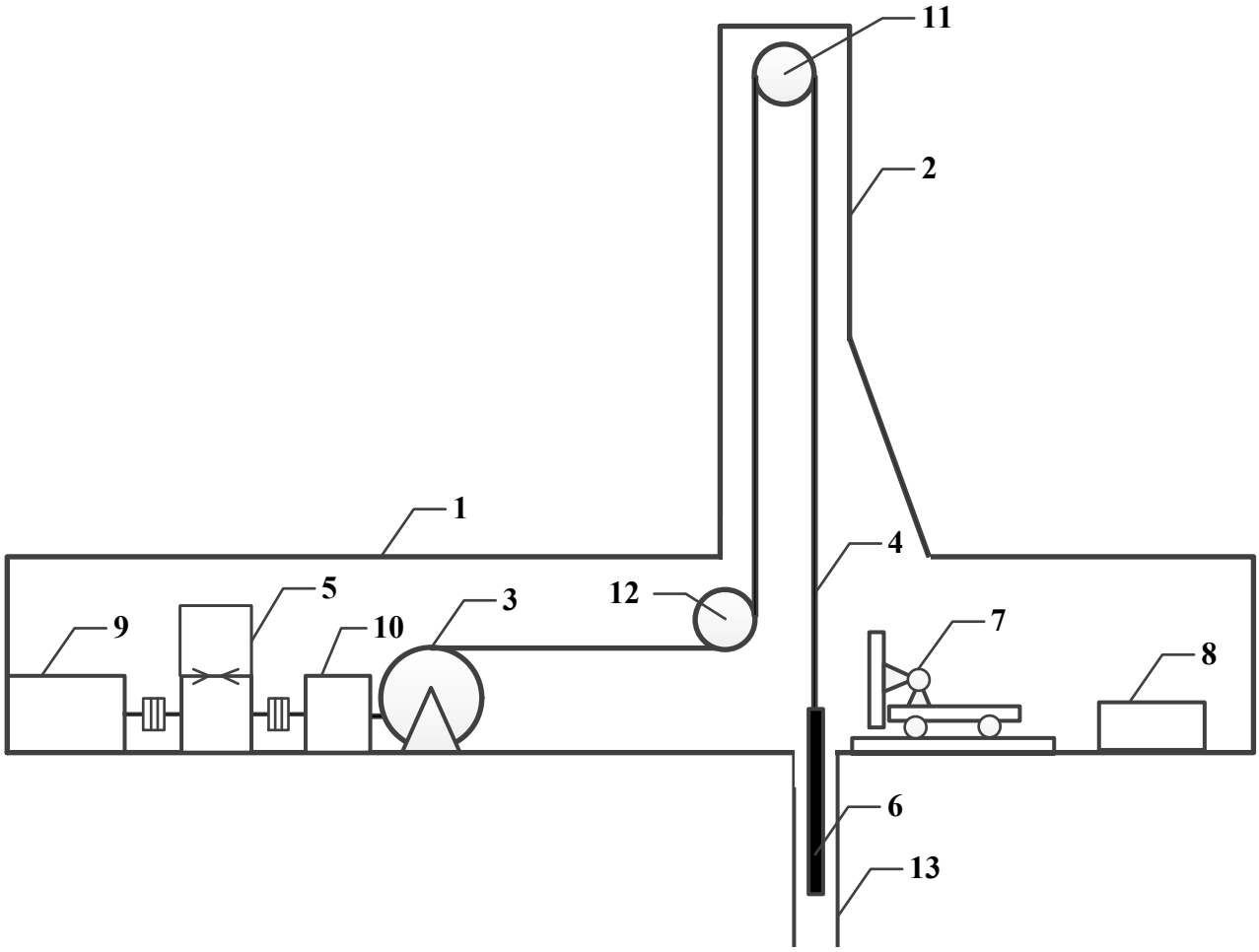


Рис. 103. Схема бурового комплекса скважины 5Г на станции «Восток»: *1* – здание буровой; *2* – вышка; *3* – буровая лебёдка; *4* – грузонесущий кабель; *5* – пульт управления; *6* – буровой электромеханический колонковый снаряд; *7* – поворотное устройство; *8* – генератор постоянного тока; *9* – основной двигатель; *10* – редуктор; *11* – верхний ролик; *12* – отклоняющий ролик; *13* – скважина

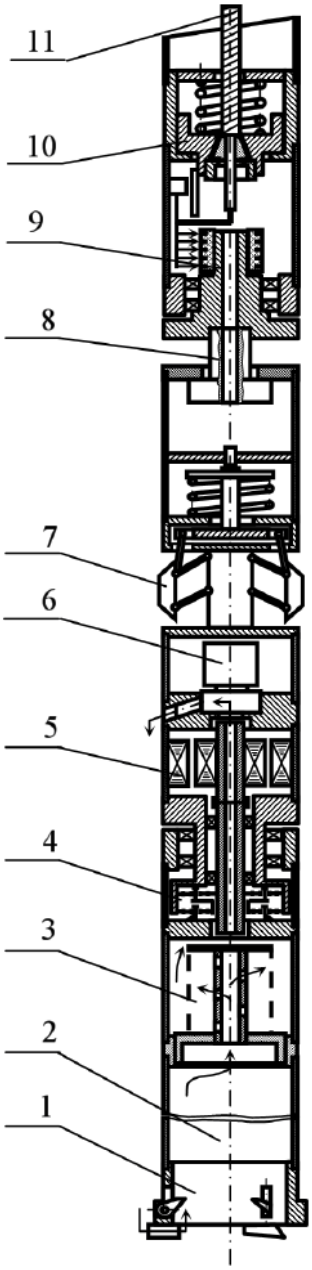


Рис. 104. Схема электромеханического колонкового бурового снаряда:
1 – коронка; *2* – колонковая труба; *3* – шламосборник; *4* – редуктор; *5* – электродвигатель; *6* – насос; *7* – распорное устройство; *8* – ударное устройство; *9* – электроотсек; *10* – кабельный замок; *11*– грузонесущий кабель

Ещё одним примером использования электромеханического колонкового бурового снаряда может служить бурение ледника в Западной Антарктиде. Сконструированная и изготовленная в США буровая установка DISC позволяет доставать керны льда диаметром 122 мм с глубин до 4 000 м [201, 202]. Буровая лебёдка оснащена спускоподъёмным двигателем мощностью 112 кВт и двигателем мощностью 2,2 кВт, буровой снаряд имеет двигатель мощностью 1,8 кВт для получения керна и двигатель мощностью

2,5 кВт для насоса [203]. Снаряд опускается на кабеле диаметром 15,2 мм, который имеет многослойную прочную конструкцию, включающую оптические волокна, стальные и медные жилы, полиэтиленовую изоляцию. В качестве заливочной жидкости использовалась двухкомпонентная смесь с плотностью 0,935 г/см^3 при –31 °C, состоящая из изопарафиновой углеводородной жидкости Isopar K и фреона F-141b в качестве утяжелителя. За пять последовательных сезонов в декабре 2011 года на буровой DISC была достигнута финальная глубина бурения ледниковой скважины, равная 3 405 м.

К положительным сторонам использования электромеханического бурового снаряда, предназначенного для извлечения кернов, можно отнести:

– относительно небольшое энергопотребление;

– возможность калибровки диаметра скважины;

– возможность использования для вскрытия подледникового озера.

К недостаткам бурения глубоких скважин в леднике электромеханическим колонковым буровым снарядом относятся:

– очень медленная скорость проходки из-за большого количества спускоподъёмных операций, необходимых для извлечения керна и шлама;

– длительное многолетнее бурение глубокой скважины (5–6 лет);

– попадание наружной биоты в скважину во время многочисленных погружений и извлечений бурового снаряда;

– механический износ бурового оборудования, который приводит к загрязнению скважины и заливочной жидкости механическими частицами;

– после окончания буровых работ ледниковая скважина остаётся заполненной заливочной жидкостью, что нарушает экологию окружающей среды.

Перечисленные выше недостатки колонкового электромеханического бурения ставят под сомнение возможность соблюдения экологических требований к чистоте скважины в случае глубокого бурения с целью последующего вскрытия подледникового озера. Тем не менее следует подчеркнуть, что электромеханический

буровой снаряд в сочетании с экологически чистой заливочной жидкостью может применяться для этапа вскрытия озера и для периодической калибровки диаметра скважины после проходки толщи ледника с помощью других, более экологически чистых способов бурения.

Сплошное бурение льда электромеханическим снарядом

Примером сплошного бурения льда с использованием электромеханического бурового снаряда может служить французский проект SUBGLACIOR [204]. Задачей проекта является скоростное бурение антарктического ледника с целью поиска древнего льда возрастом более 1,5 млн лет с хорошо сохранившейся стратиграфией слоёв. Поиск производится с помощью специального зонда с лазерным спектрометром. Зонд позволяет во время бурения *in situ* выполнять измерения изотопного состава расплавленного льда и содержащихся в нём газов. После определения места залегания древнего льда потребуется многолетнее бурение с извлечением кернов по всей толщине ледника для изучения атмосферной истории и палеоклимата Земли.

Для быстрого бурения льда был разработан комбинированный буровой снаряд, схема которого показана на Рис. 105. В нижней части снаряда располагается нагреватель небольшого диаметра, который расплавляет лёд, а выше находится электромеханический бур, задача которого состоит в увеличении диаметра скважины. Электромеханический бур проходит 97 % площади сечения скважины, остальная площадь плавится тепловым нагревателем, который обеспечивает непрерывную подачу к зонду расплавленного льда с содержащимися в нём газами. Диаметр буровой скважины равен 120 мм, диаметр зонда равен 50 мм. В верхней части бурового снаряда располагается устройство для компенсации вращающего момента электромеханического бура. Буровой комбинированный снаряд производит ледяную крошку и небольшое количество воды, которые удаляются из забоя скважины потоком буровой жидкости.

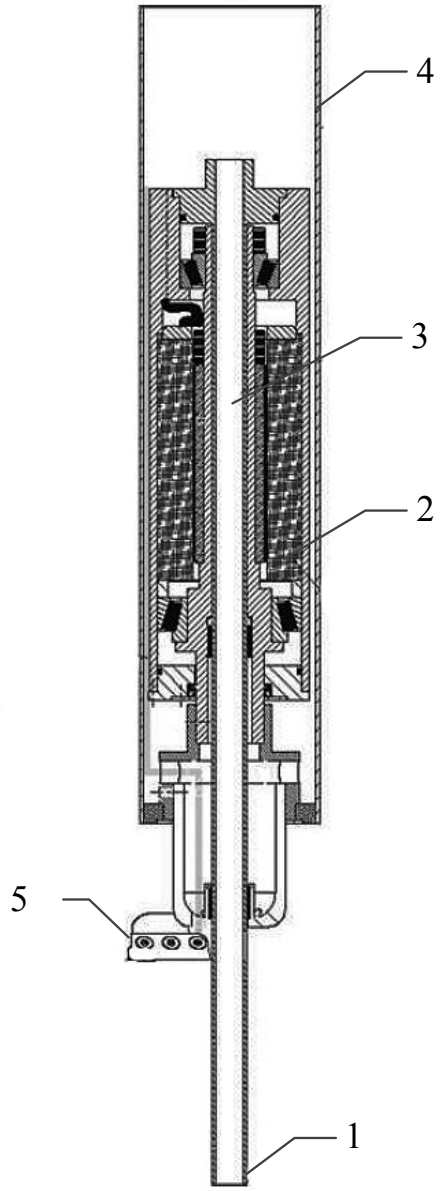


Рис. 105. Схема комбинированного бурового снаряда:
1 – нагревательный элемент; *2* – электродвигатель; *3* – трубка для воды;
4 – наружная труба; *5* – режущая кромка бура

В качестве буровой жидкости выбрана незамерзающая силиконовая жидкость с кинематической вязкостью 3 сСт при 25 °С, которая отвечает требованиям Протокола по охране окружающей среды Антарктики к Договору об Антарктике. Жидкость обеспечивает гидростатическое давление в скважине, предотвращающее уменьшение её диаметра под воздействием окружающего льда. Проведённые эксперименты показали, что крошки льда в силиконовой жидкости не образуют кластеров и легко удаляются потоком на поверхность для последующего отделения от жидкости,

при этом скорость переноса ледяной крошки практически равна скорости течения жидкости.

Технологическая схема циркуляции силиконовой жидкости приведена на Рис. 106. В верхней части скважины устанавливается обсадная колонна (*2*) из полиэтиленовых труб, которая предотвращает утечку жидкости в фирн (*13*) [205]. С помощью главного циркуляционного насоса (*9*) силиконовая жидкость по трубе подаётся в гибкий трубопровод (*3*), который с помощью лебёдки (*4*) вместе с буровым снарядом (*1*) постепенно опускается в лёд. Силиконовая жидкость поступает к режущим кромкам электромеханического бура, расположенного выше нагревателя. Ледяная крошка и замёрзшая вода удаляются потоком силиконовой жидкости на поверхность и насосом (*6*) подаются в сепаратор (*12*), где лёд отделяется от силиконовой жидкости. Ледяная крошка собирается в ёмкости (*7*), а силиконовая жидкость поступает в ёмкость (*8*), откуда направляется на рециркуляцию.

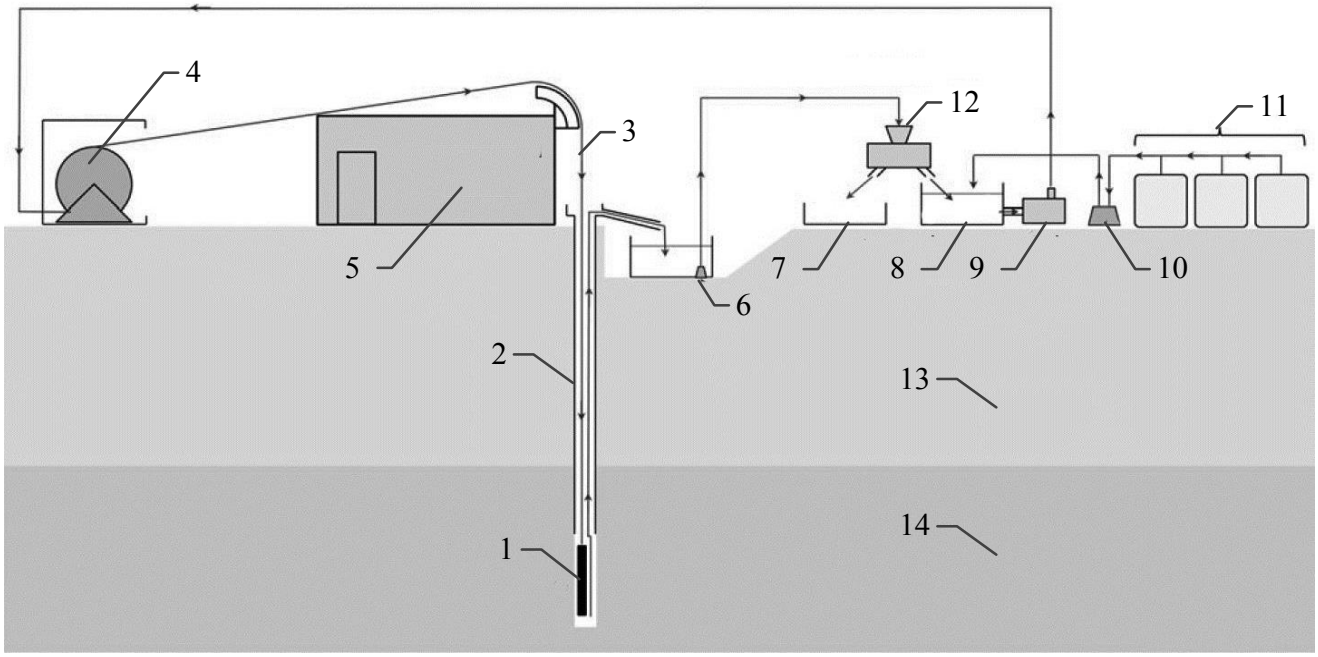


Рис. 106. Технологическая схема циркуляции силиконовой жидкости:
1 – буровой снаряд; *2* – обсадная колонна; *3* – гибкий трубопровод; *4* – лебёдка; *5* – контейнер; *6* – насос; *7* – ёмкость для ледяной крошки; *8* – ёмкость для силиконовой жидкости; *9* – главный циркуляционный насос; *10* – подающий насос; *11* – цистерны с силиконовой жидкостью; *12* – сепаратор; *13* – фирн; *14* – лёд

Буровой снаряд с электромеханическим буром и нагревателем, компенсатором вращающего момента и другим оборудованием

подвешен на прочном грузонесущем кабеле, по которому передаётся мощность, равная ~ 1 кВт (на Рис. 106 грузонесущий кабель не показан). Гибкий трубопровод закрепляется на кабеле через каждые 20 м. Основной насос мощностью 7 кВт обеспечивает подачу 30 л/мин силиконовой жидкости под давлением 2,5 МПа. Бурение ледника на глубину до 3 500 м возможно выполнить в течение одного сезона.

Оборудование проекта SUBGLACIOR, включая петлю циркуляции силиконовой жидкости и зонд, прошло испытание на протяжении нескольких часов непрерывной работы в Антарктиде на полярной станции Concordia в сезон 2016/2017 года.

К положительным сторонам электромеханического сплошного бурения льда за один проход с использованием силиконовой жидкости можно отнести:

– высокую скорость проходки скважины, что позволяет выполнить бурение глубокой скважины за один летний сезон;

– умеренное энергопотребление в процессе бурения;

– использование экологически чистой буровой жидкости.

К недостаткам относятся:

– невозможность использования для вскрытия озера, поскольку при бурении сплошным забоем необходима циркуляция буровой жидкости в скважине, что недопустимо в момент вскрытия, так как буровая жидкость попадёт в озеро;

– невозможность использования для калибровки диаметра скважины, так как буровой снаряд сплошного бурения не имеет насоса и фильтров для сбора ледяной крошки;

– после окончания работ ледниковая скважина остаётся заполненной заливочной жидкостью, что нарушает экологию окружающей среды и не позволяет повторно использовать силиконовую жидкость.

Бурение льда роторной буровой установкой

Для извлечения и последующего изучения кернов льда и подледниковых пород в США на основе промышленной установки Boart Longyear LF230 [206] была разработана буровая установка RAID. Буровая установка имеет возможность наклона телескопической мачты, оснащена двигателем мощностью 205 кВт и имеет

массу 13,6 т. Бурение производится механическим способом посредством вращения труб, на нижнем конце которых находится режущая коронка.

Буровая установка RAID позволяет проводить бурение скважины глубиной 3 300 м и диаметром 10 см за ~ 10 сут с извлечением кернов льда. Удаление ледяной крошки из забоя скважины производится незамерзающей буровой жидкостью, для циркуляции которой используется замкнутая система с сепаратором крошки. Схема циркуляции буровой жидкости показана на Рис. 107 [207]. В качестве жидкости используется ESTISOL 140, который предотвращает смыкание стенок скважины горным давлением и не замерзает в скважине. Буровая установка может работать на высоте 4 000 м при температурах выше –40 °C.

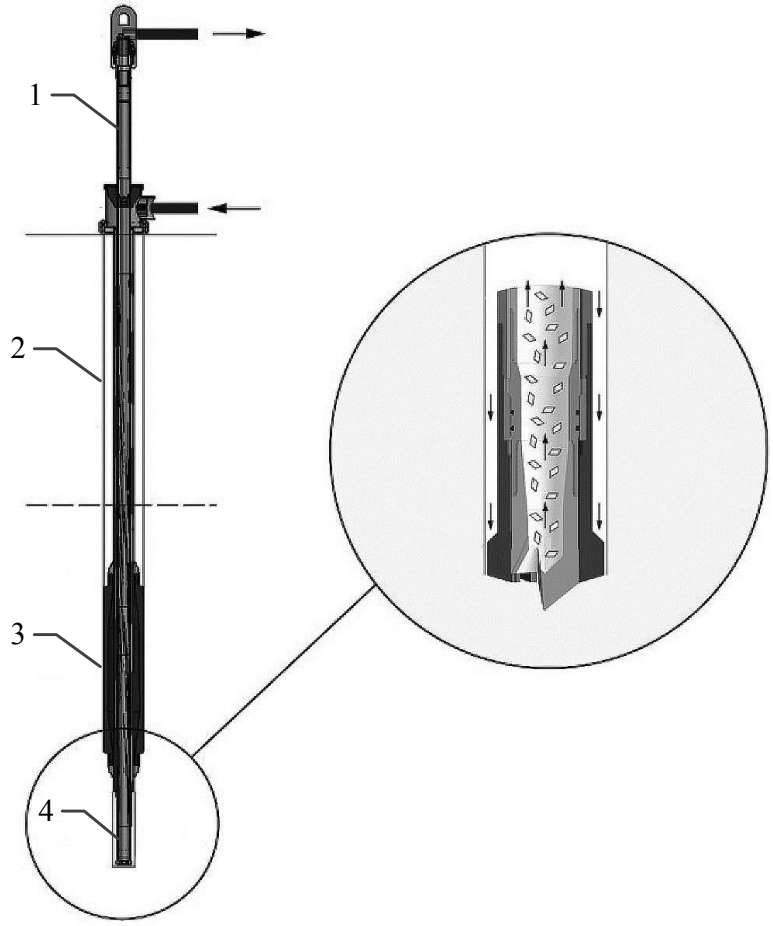


Рис. 107. Схема циркуляции буровой жидкости при бурении льда:
1 – буровая труба; *2* – обсадная колонна; *3* – пакер; *4* – бур

Пусконаладочные испытания буровой установки RAID и пакера для герметизации нижнего конца обсадной колонны внутри

льда начались в сезон 2016/2017 года около американской антарктической станции McMurdo. В сезон 2019/2020 года было успешно произведено бурение ледника и извлечены керны подледниковой горной породы [208].

К положительным сторонам роторного бурения можно отнести:

– относительно высокую скорость проходки скважины, позволяющую бурение нескольких глубоких скважин в течение одного сезона;

– большой крутящий момент, передаваемый на бур;

– возможность извлечения кернов подледниковых пород.

К недостаткам способа роторного бурения можно отнести:

– значительный вес буровой установки и большое количество буровых труб, что усложняет транспортировку к месту бурения;

– высокое энергопотребление и необходимость доставки значительного количества топлива для бурения;

– механический износ бурового оборудования, который приводит к загрязнению скважины;

– необходимость использования средств защиты персонала от воздействия токсичной буровой жидкости ESTISOL 140;

– после окончания работ скважина остаётся заполненной заливочной жидкостью.

Бурение льда горячей водой

В летние сезоны, начиная с 2004/2005 по 2010/2011 год, на полярной станции «Амундсен – Скотт», расположенной на Южном полюсе, в леднике было пробурено горячей водой 86 скважин глубиной 2 500 м и диаметром 60 см, расположенных по гексагональной решётке с расстоянием между скважинами 125 м. В каждую скважину с водой погрузили гирлянду с 60 оптическими модулями, предназначенными для регистрации черенковского излучения, которое возникает в результате редкого взаимодействия нейтрино со льдом. После замерзания воды оптические модули остались вмороженными в лёд. Модули располагаются на глубине от 1 450 до 2 450 м. Таким образом, была создана крупнейшая в мире нейтринная обсерватория IceCube [209]. Объём нейтринного

детектора равен 1 км^3. В проекте IceCube-Gen2 объём предполагается увеличить до 7,9 км^3 [210].

Бурение скважин горячей водой на Южном полюсе описано в статье [211]. Принципиальная технологическая схема установки представлена на Рис. 108. Вода из резервуара, расположенного на поверхности, подавалась насосами высокого давления в нагреватели, а затем поступала в гибкий трубопровод, намотанный на барабан. Горячая вода по гибкому трубопроводу через сопло бурового снаряда под давлением поступала в забой скважины и производила плавление льда. По стволу шахты вода поднималась наверх и удалялась погружным насосом в резервуары для последующего повторного нагрева и подачи в скважину.

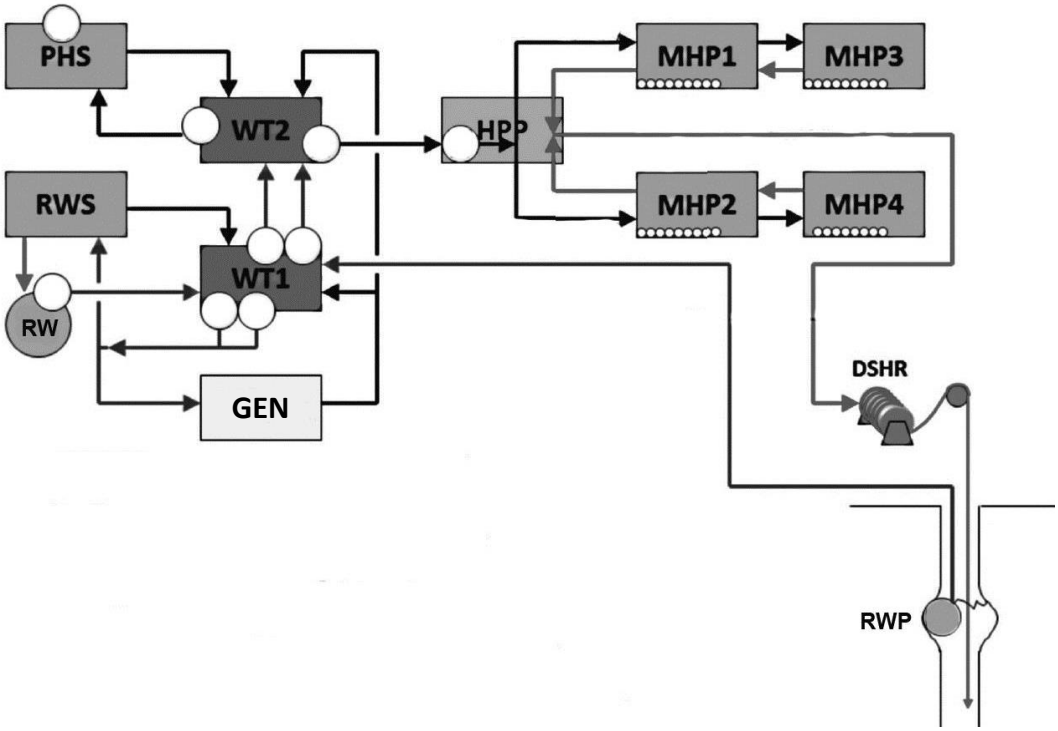


Рис. 108. Принципиальная технологическая схема бурения горячей водой: DSHR – лебёдка с гибким трубопроводом; HPP – насос высокого давления; MHP – основная система нагрева; PHS – система предварительного нагрева; RW – насос Rodwell; RWP – насос возврата воды; RWS – система Rodwell; WT – танк с водой; GEN – генератор

Схема буровой установки показана на Рис. 109. Опускание и подъём бурового снаряда производились с помощью лебёдки с грузонесущим кабелем. Для гибкого трубопровода подачи горячей воды к соплу бурового снаряда имелась собственная лебёдка с

барабаном. Лебёдка кабеля поддержки гибкого трубопровода возврата воды на Рис. 109 не показана.

Диаметр скважины 60 см формировался в процессе погружения и извлечения бурового снаряда с соплом, через которое непрерывно подавалась горячая вода [212]. В течение 24 ч диаметр скважины должен был оставаться не менее 45 см для установки оптических модулей нейтринного детектора. Тепловая мощность, расходуемая на нагрев воды, составляла 4,7 МВт. Нагрев воды производился до температуры 88 °C за счёт сгорания топлива в четырёх нагревателях с установленными в них печами. Циркуляция воды через скважину обеспечивалась четырьмя насосами с общим расходом 760 л/мин. Давление на выходе насосов равнялось 7,6 МПа. На создание одной скважины в среднем требовалось порядка 30 ч и 21 000 л топлива.

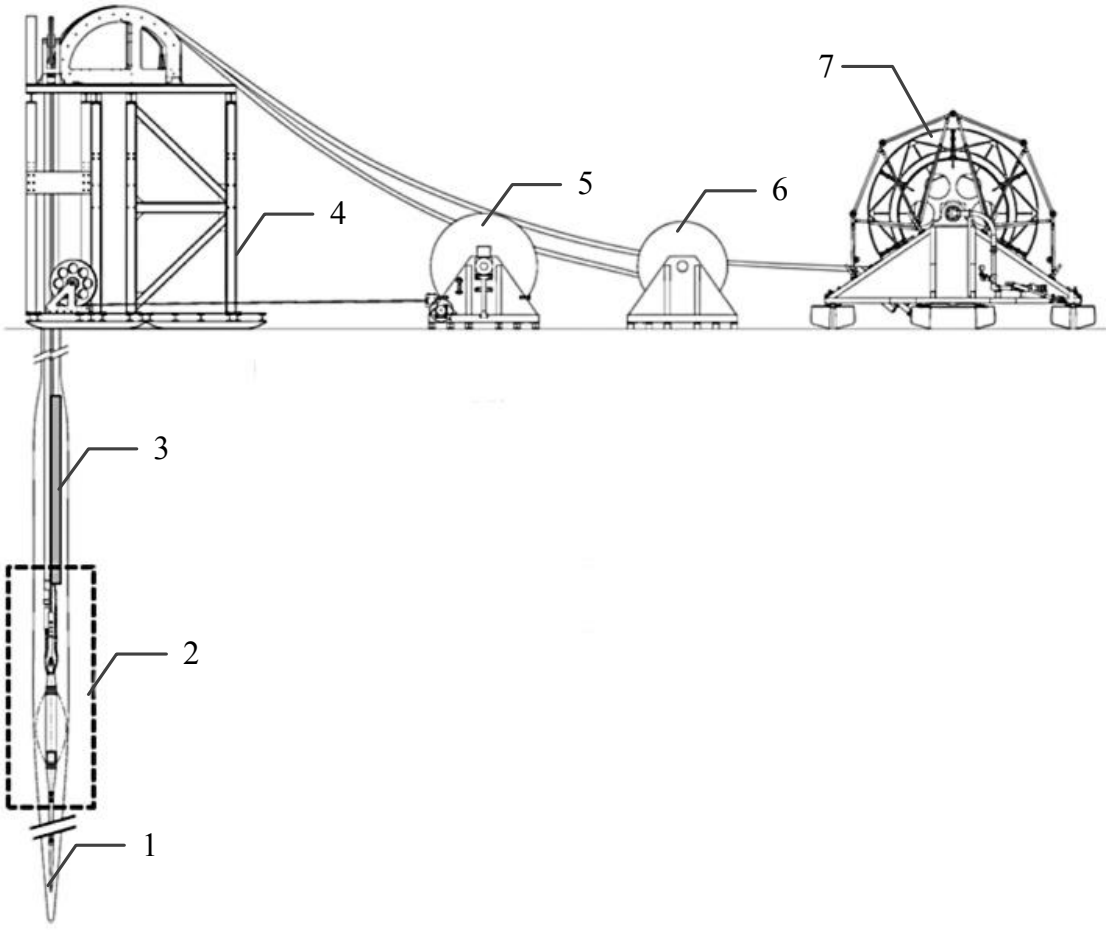


Рис. 109. Схема буровой установки на Южном полюсе:
1 – сопло бурового снаряда; *2* – буровой снаряд; *3* – погружной насос для воды; *4* – буровая вышка; *5* – лебёдка бурового кабеля; *6* – лебёдка гибкого трубопровода возврата воды; *7* – лебёдка гибкого трубопровода подачи горячей воды

В полярный сезон 2012/2013 года исследователями из Великобритании была произведена попытка бурения горячей водой ледника толщиной 3 280 м для отбора проб воды и донных пород из подледникового озера Элсуэрт в Западной Антарктиде [213]. Озеро имеет длину 14,7 км при ширине до 3,1 км. Глубины озера меняются вдоль его длинной оси от 52 до 156 м, а площадь равна 28,9 км^2. Принципиальная схема бурового комплекса, учитывающая особенности применения для вскрытия подледникового озера, приведена на Рис. 110.

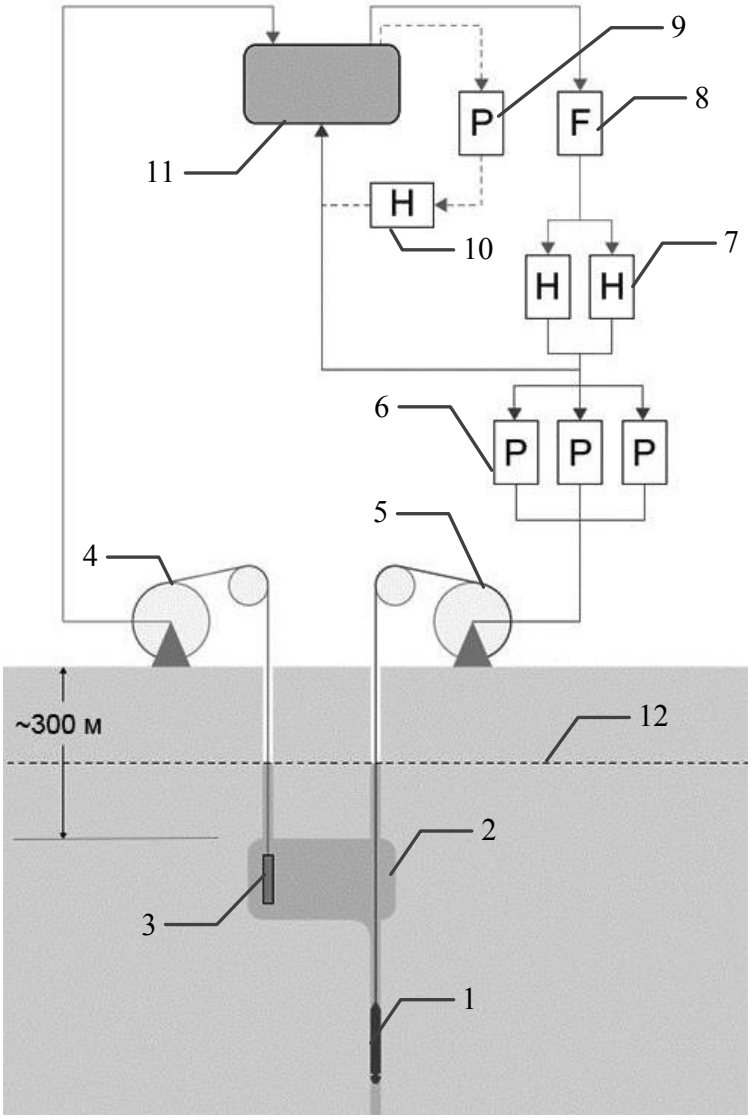


Рис. 110. Принципиальная схема бурового комплекса на озере Элсуэрт:
1 – буровой снаряд с соплом; *2* – полость внутри льда; *3* – погружной насос; *4* – лебёдка гибкого трубопровода погружного насоса; *5* – лебёдка гибкого трубопровода бурового снаряда; *6* – водяные насосы высокого давления; 7 – нагреватели; *8* – фильтр и система УФ-облучения; *9* – насос; *10* – пусковая система; *11* – танк для хранения воды; *12* – гидростатический уровень воды в скважине

Вода из танка (*11*), расположенного на поверхности, пройдя ультрафиолетовое (УФ) облучение и фильтр (*8*), поступает в нагреватели (*7*), а затем насосами высокого давления (*6*) подаётся в гибкий трубопровод, намотанный на катушку лебёдки (*5*), с которой он опускается в скважину. Горячая вода по трубопроводу через сопло буровой головки (*1*) подаётся в забой скважины, что приводит к нагреву и плавлению льда. По стволу шахты вода поднимается и поступает в ледовую полость большого объёма (*2*), откуда погружным насосом (*3*) подаётся обратно в танк (*11*) для повторной циркуляции.

Чтобы исключить поступление воды, используемой для бурения, в озеро, уровень воды в скважине во время вскрытия озера должен находиться ниже гидростатического уровня подледникового озера. Для поддержания низкого уровня воды в скважине и промежуточного накопления воды внутри льда проплавляется большая полость, соединённая со стволом скважины. Затраты энергии на создание этой полости соизмеримы с затратами на бурение самой скважины к озеру. Из-за технических неполадок и перерасхода топлива на создание полости внутри ледника завершить бурение и вскрыть озеро не удалось. Буровое и научное оборудование было вывезено, а проект закрыт из-за отсутствия дальнейшего финансирования.

В январе 2013 года по проекту WISSARD способом бурения горячей водой было вскрыто подледниковое озеро Уилланс [214], расположенное в Западной Антарктиде. Толщина ледника над озером составляет 802 ± 10 м, а глубина озера достигает всего 1,5–2 м. Примерная площадь озера равна 60 км^2.

Для обеспечения чистого доступа в озеро буровая установка WISSARD включала систему фильтрации субмикронных частиц и высокоинтенсивной УФ-обработки буровой воды. Потенциальное загрязнение во время бурения контролировалось в режиме реального времени с помощью нескольких пробоотборных портов по всей системе. Это позволяло выявлять потенциальные источники загрязнения и гарантировало минимизацию прямого загрязнения подледниковой среды, а также подтверждало, что образцы, извлечённые на поверхность, не были подвержены загрязнению на поверхности.

Скорость бурения составляла ~ 1 м/мин. Расширение ствола скважины до диаметра ~ 40 см производилось при подъёме бурового снаряда. Длина бурового шланга равнялась 1 000 м. При бурении использовались две насадки на буровой головке: коническая для бурения фирна и прямоточная для ледовой части скважины. Бурение скважины с использованием прямоточной насадки затрудняло расширение диаметра скважины на границе льда и озёрной воды в зоне, критически важной для успешного извлечения научных инструментов. После того как прямоточная насадка вошла в озеро, тепловой КПД буровой головки снизился из-за притока воды из озера, что затруднило расширение нижней части скважины.

Непосредственно перед вскрытием озера уровень воды в скважине был понижен на ~ 110 м ниже поверхности льда, чтобы обеспечить давление столба воды в забое скважины ниже давления воды в озере. Это привело к тому, что после вскрытия озёрная вода поднялась в скважину диаметром 30 см на 28 м. Перед вскрытием озера расход горячей воды, подаваемой к буровому соплу, был снижен со 115 л/мин ~ до 1 л/мин. Во время подъёма бурового сопла с целью расширения диаметра скважины до 40 см расход горячей воды был увеличен до 135 л/мин. Скважина была осмотрена с помощью видеокамеры, после чего в неё опустили прибор для измерения электропроводимости, температуры и давления воды. После проведения измерений был произведён отбор проб воды. Для забора кернов осадочных пород диаметр скважины пришлось снова увеличивать горячей водой, что заняло ~ 24 ч.

После проведения измерений и отбора проб воды и донных отложений в скважину был опущен трос с сейсмометром и тремя геофонами, а также распределённый волоконно-оптический сенсор. Показания с вмороженных в лёд датчиков снимались в течение сезона 2013/2014 года.

В декабре 2018 года согласно проекту SALSA горячей водой была пробурена скважина к подледниковому озеру Мерсер [215], которое находится недалеко от озера Уилланс. Скважина диаметром ~ 40 см была пробурена в леднике толщиной 1 087 м и поддерживалась в рабочем состоянии в течение 10 дней, что позволило сделать отбор проб воды и донных отложений.

В проекте SALSA были использованы все протоколы чистого доступа к озеру Мерсер и сохранена та же схема, что и в ходе бурения скважины к озеру Уилланс. В проекте SALSA буровую установку WISSARD модернизировали, увеличив длину шланга, чтобы пробурить скважину сквозь более толстый лёд, и изменив подход к бурению и расширению скважины, чтобы гарантировать, что скважина останется прямой, вертикальной и одинакового диаметра сверху донизу.

Средняя скорость бурения по всему стволу скважины составила 0,23 ± 0,01 м/мин, что исключило необходимость дополнительного расширения ствола скважины в процессе подъёма бурового снаряда. Буровой шланг имел длину 1 400 м. Буровая установка использовала коническую насадку с углом 30°, что позволило вести непрерывное бурение от поверхности до подледникового озера и получить скважину большего диаметра. Конусное сопло с углом 30° на границе «лёд – вода» образует отверстие большего диаметра, что облегчает извлечение из озера пробоотборников и научного оборудования.

По сообщениям издания «Синьхуа» со ссылкой на министерство природных ресурсов Китая, в апреле 2026 года китайские учёные пробурили в леднике скважину глубиной 3 413 м, применив технологию бурения горячей водой [216].

К достоинствам способа бурения горячей водой относятся:

– высокая скорость проходки, которая может достигать 2 м/мин;

– использование воды в качестве недорогого и доступного теплоносителя;

– возможность бурения нескольких глубоких скважин в течение одного летнего сезона.

К недостаткам способа бурения горячей водой можно отнести:

– невозможность бурения скважин глубиной более 3 500 м;

– поступление горячей воды в озеро в момент вскрытия, что влияет на экологию озера;

– короткий период эксплуатации скважины;

– необходимость бурения избыточного диаметра скважины с целью увеличения времени её использования;

– большие энергетические затраты на нагрев и плавление льда;

– необходимость доставки большого количества топлива к месту бурения;

– потеря в фирне циркулирующей воды;

– невозможность временной остановки процесса бурения из-за возникших технических проблем.

Самым большим недостатком способа бурения горячей водой кроме высоких энергетических затрат является короткое время использования скважины, которое ограничивается временем замерзания воды и может исчисляться часами. Такое короткое время не позволяет выполнить полноценную научную программу по исследованию подледникового озера.

Бурение льда с помощью гидравлических двигателей

Для вращения режущего инструмента может использоваться гидравлический забойный двигатель гидростатического или гидродинамического типа [217]. Способ бурения скважин с использованием гидравлических двигателей по сравнению с электромеханическим или роторным бурением более эффективен, так как коэффициент передачи мощности от источника энергии к режущему инструменту значительно выше.

Примером использования гидростатического винтового двигателя для глубокого бурения антарктического ледника может служить швейцарский проект RADIX [218]. Этот проект, как и французский проект SUBGLACIOR, направлен на поиск древнего льда для изучения атмосферной истории и палеоклимата Земли. Проект RADIX нацелен на бурение глубоких скважин небольшого диаметра за короткое время. На бурение скважины диаметром 20 мм и глубиной 3 000 м потребуется 4 сут.

Схема винтового гидростатического двигателя приведена на Рис. 111. Энергия потока буровой жидкости с помощью винтового механизма преобразуется в механическую энергию вращательного движения вала с закреплённым на нём режущим инструментом. Статор и ротор двигателя диаметром 15 мм были изготовлены из металла. В качестве буровой жидкости используется силикон, который насосом под давлением 17,3 МПа в количестве 31,5 мл/с подаётся к двигателю по гибкому трубопроводу наружным диаметром 12,35 мм. В верхней части бурового снаряда находится

небольшое устройство для компенсации вращательного момента двигателя. С целью исключения утечки силиконовой жидкости в фирн устанавливается обсадная колонна. Для бурения скважины диаметром 20 мм потребуется электрическая мощность ~ 2 кВт. Небольшой вес бурового комплекса (~ 2 т) и высокая скорость бурения скважины делают его оптимальным для решения поставленной поисковой задачи.

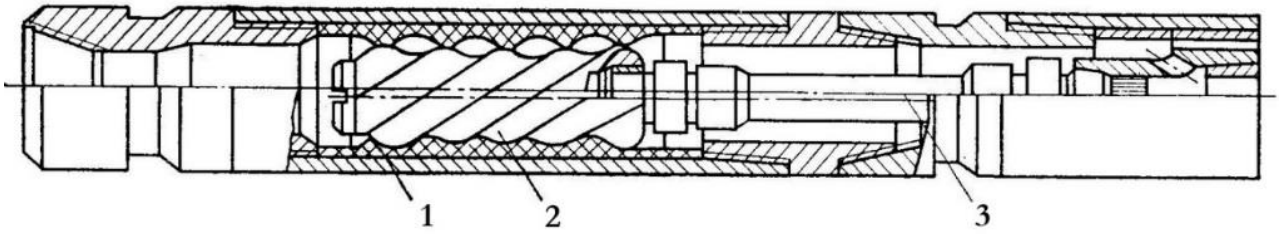


Рис. 111. Схема винтового гидростатического двигателя:
1 – статор; *2* – ротор; *3* – шарнирное соединение

Для бурения этим способом скважины большого диаметра к озеру Восток потребуется более мощный двигатель. Негативным моментом гидростатического винтового двигателя являются очень высокие требования к точности изготовления и сопряжения винтовой рабочей пары, несоблюдение которых приведёт к низкой производительности из-за увеличенных зазоров или истиранию пары и загрязнению буровой жидкости. В промышленных винтовых двигателях буровых установок для изготовления статора используются материалы, которые нельзя применять при низких температурах.

Для бурения глубоких нефтяных, разведывательных и газовых скважин применяется способ бурения гидродинамическим забойным двигателем (турбобуром), однако до настоящего времени он не применялся для бурения льда. Механический турбобур в сочетании с силиконовой жидкостью может быть использован для бурения глубоких скважин в леднике сплошным забоем. Силиконовая жидкость приводит в движение механический турбобур, удаляет из забоя ледовую крошку, предотвращает смыкание стенок скважины давлением окружающего льда и одновременно выполняет роль экологически чистого антифриза, заполняющего скважину и позволяющего производить погружение через него в озеро научных приборов и пробоотборников. Сочетание этих свойств

делает силиконовую жидкость лучшим кандидатом среди других немногочисленных альтернатив применительно к использованию в скважинах, предназначенных для изучения подледниковых озёр.

Принципиальная схема турбобура показана на Рис. 112. Источником энергии для его вращения является давление потока жидкости, которое создаётся насосами, расположенными на поверхности. Поток жидкости поступает в первую ступень турбобура через трубопровод. В направляющем аппарате турбины формируется направление потока жидкости, поступающей на лопатки ротора. На конце роторного вала крепится режущий инструмент (коронка). Турбобур может иметь несколько ступеней с ротором и статором, снабжёнными рабочими лопатками. Жидкость под действием давления проходит через все ступени турбобура, создавая вращающий момент на валу. Основными задачами при проектировании турбинного бурения являются расчёт турбинной ступени, подбор параметров насосов и выбор коронки для проходки льда. Для быстрой проходки скважины следует использовать коронку для сплошного бурения. Геометрия коронки для проходки холодного льда может отличаться от геометрии коронки для проходки «теплого» льда, залегающего ближе к поверхности озера.

Для подачи жидкости к турбобуру можно использовать гибкий трубопровод, намотанный на катушку, как в случае бурения горячей водой. На корпусе турбобура располагаются продольные полозья с упором в стенку скважины. Полозья предотвращают вращение корпуса, оставляя возможность вертикального перемещения турбобура в скважине.

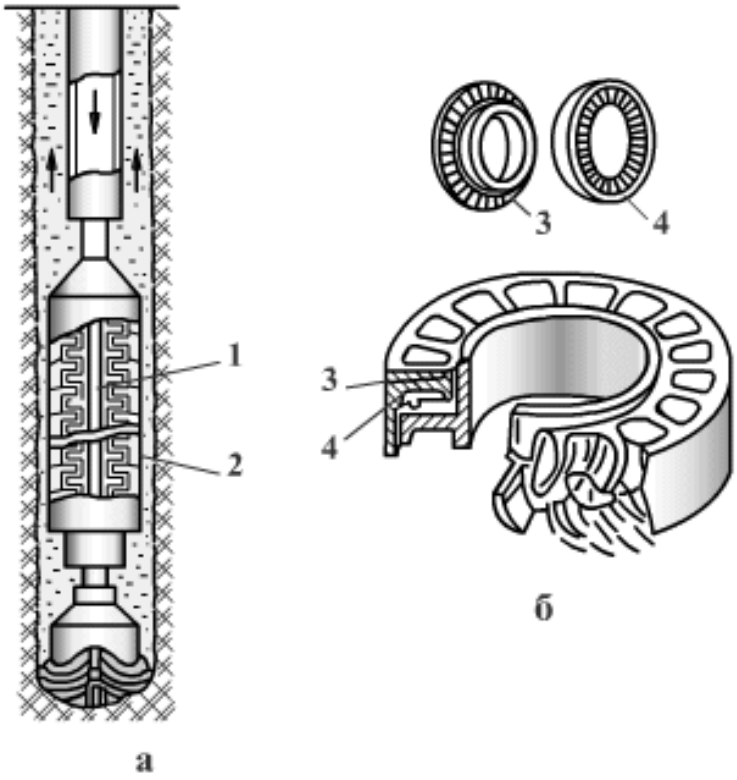


Рис. 112. Принципиальная схема турбобура: общий вид (*а*); ступень турбобура (*б*). *1* – вал турбины; *2* – корпус; *3* – ротор; *4* – направляющий аппарат турбины

Проходка льда может производиться турбобуром, а вскрытие озера после снижения уровня силиконовой жидкости в скважине следует выполнять тепловым или электромеханическим буровым снарядом, который удаляет последние метры льда над озером.

Принципиальная схема бурения с использованием турбобура показана на Рис. 113. Проходка скважины (*1*) производится турбобуром (*2*), который присоединён к гибкому трубопроводу (*4*), намотанному на катушку (*5*). Опускание гибкого трубопровода (*4*) производится через шкив (*3*). Силиконовая жидкость подаётся к турбобуру насосной станцией высокого давления (*6*). Для хранения силиконовой жидкости предусмотрен резервуар (*7*). Циркуляция жидкости осуществляется погружным насосом (*8*), который подает её на вход насосов высокого давления (*6*). Ледяная крошка, которая вынесена из забоя потоком силиконовой жидкости, удаляется с её поверхности шнеком (*9*) в ёмкость для сбора крошки (*10*).

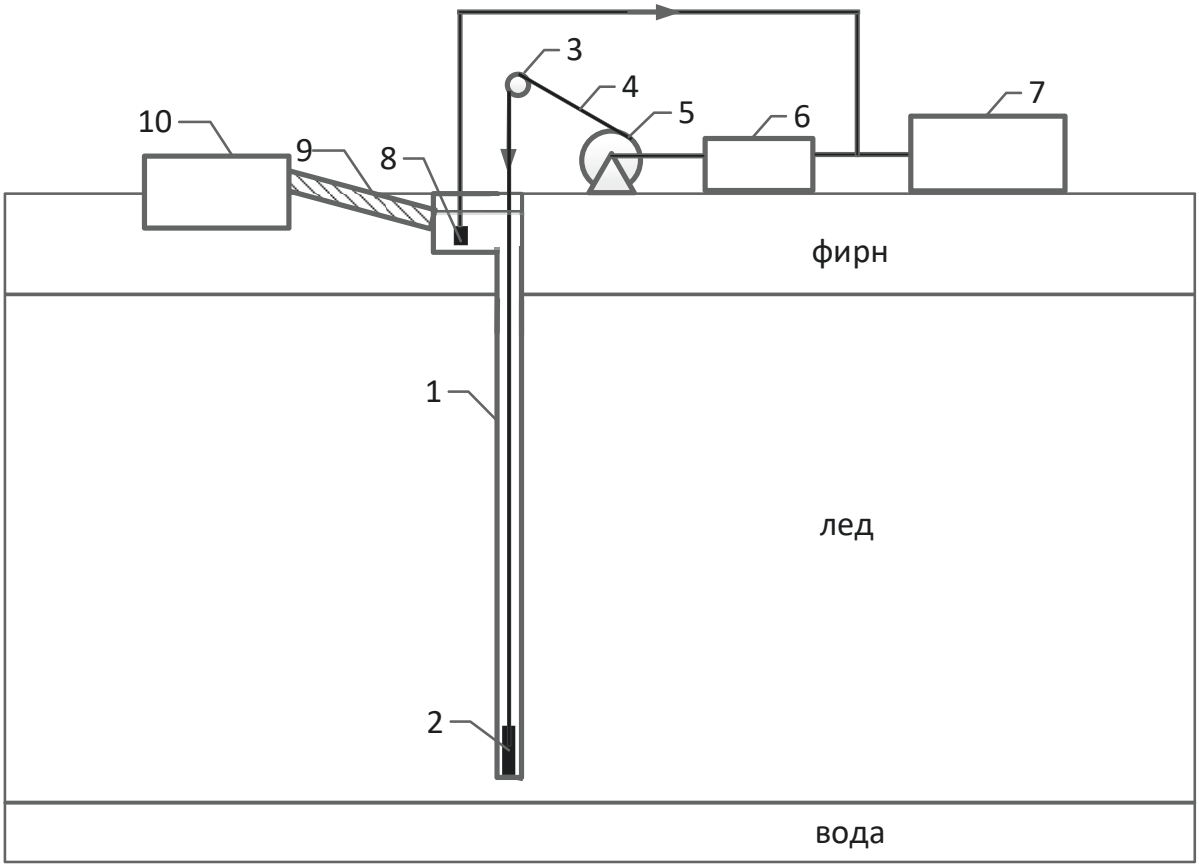


Рис. 113. Принципиальная схема бурения с использованием турбобура: *1* – скважина; *2* – турбобур; *3* – шкив; *4* – гибкий трубопровод; *5* – катушка с гибким трубопроводом; *6* – насосная станция высокого давления; *7* – резервуар для хранения силиконовой жидкости; *8* – погружной жидкостный насос; *9* – шнек; *10* – ёмкость для сбора ледяной крошки

Использование незамерзающей жидкости потребует определённой адаптации конструкции турбобуров, применяемых в горном деле и ориентированных на подачу в них воды. Также должна быть сконструирована коронка с оптимальными параметрами для сплошной проходки льда. Промышленные буровые насосы следует адаптировать к работе с буровой жидкостью при отрицательных температурах. Необходима также разработка устройства для удаления ледяной крошки, вынесенной на поверхность потоком циркулирующей буровой жидкости.

Использование турбобура для бурения сплошным забоем обеспечит проходку скважины в леднике в течение одного сезона с минимальными энергетическими затратами, а использование силиконовой жидкости позволит длительное время поддерживать скважину в рабочем состоянии и обеспечит экологически чистый доступ к озеру.

К положительным сторонам использования гидравлических двигателей для бурения скважин в леднике можно отнести:

– высокую скорость проходки скважины;

– возможность бурения скважин на глубину 4 000 м;

– возможность бурения нескольких скважин в течение одного летнего сезона;

– энергетическую эффективность за счёт высокого КПД гидравлического двигателя;

– возможность использования силиконовой жидкости в качестве буровой.

К основному недостатку применения гидравлических двигателей можно отнести очень высокие требования к точности сопряжения винтовой рабочей пары и её работу в условиях низких температур.

Способы бурения применительно к озеру Восток

Выше были рассмотрены пять способов бурения глубоких скважин в леднике. Четыре из них использовались для бурения льда в Антарктиде, тогда как способ бурения турбобуром с этой целью не применялся.

Способ бурения колонковым электромеханическим буровым снарядом не может быть рекомендован для бурения скважины к озеру Восток по двум основным причинам: большая длительность бурения (5–6 лет) и высокая вероятность загрязнения скважины из-за значительного количества циклов подъёма/спуска бурового механизма для извлечения кернов (более 3 000 циклов). Положительным моментом этого способа является отсутствие необходимости циркуляции буровой жидкости в скважине. Электромеханический буровой снаряд может быть применён для поддержания диаметра скважины в случае её длительной эксплуатации или для вскрытия озера при использовании других способов проходки скважины.

Способ сплошного бурения электромеханическим буровым снарядом с циркуляцией силиконовой жидкости в скважине для удаления ледяной крошки из забоя может обеспечить проходку скважины к озеру в течение одного сезона. После понижения уровня заливочной жидкости в пробуренной скважине

электромеханическим буровым снарядом может быть выполнено вскрытие озера со сбором ледяной крошки на фильтре за счёт принудительной локальной циркуляции жидкости в буровом снаряде.

Способ бурения льда роторной буровой установкой после адаптации промышленной установки к низким температурам и буровой жидкости был успешно использован в Антарктиде и теоретически может рассматриваться для создания скважины к озеру Восток.

Способ бурения горячей водой не может использоваться для озера Восток, поскольку имеет объективные ограничения для применения. Прежде всего это недостаточная глубина бурения, что связано с замерзанием воды при подъёме с большой глубины. Второй недостаток способа заключается в непродолжительном времени эксплуатации скважины, которое находится в пределах одних суток.

При использовании турбобура циркуляция буровой жидкости используется одновременно для работы турбобура и для удаления ледяной крошки из забоя. С энергетической точки зрения этот способ может оказаться наиболее эффективным. Применение этого способа также потребует использования теплового или электромеханического снаряда для вскрытия озера на заключительной стадии бурения.

Способ сплошного бурения электромеханическим буровым снарядом, способ бурения льда роторной буровой установкой и способ бурения турбобуром требуют наличия системы сепарации ледяной крошки от буровой жидкости.

В ряде публикаций обсуждаются вопросы выбора жидкости для бурения ледовых скважин [219–224]. Это связано прежде всего с тем, что часто используемый в качестве утяжелителя в двухкомпонентных незамерзающих жидкостях фреон HCFC-141b снимается с производства согласно принятому Монреальскому протоколу по защите озонового слоя.

На основании проведённого в литературе сравнительного анализа свойств различных типов жидкостей по совокупности характеристик в качестве буровой и одновременно заливочной жидкости, наиболее пригодной для новой скважины к озеру Восток, является силиконовая экологически чистая незамерзающая

гидрофобная жидкость. Определённые марки этой жидкости имеют значение величины плотности при температурах в скважине в диапазоне между плотностью льда и плотностью воды. Такая плотность жидкости позволяет компенсировать горное давление и способствует отделению ледяной крошки от силиконовой жидкости. Плотность ледяной крошки равна 0,92 г/см^3, что ниже плотности силиконовой жидкости. Плотность силиконовой жидкости увеличивается при понижении температуры. Например, если плотность жидкости равна 0,94 г/см^3 при 0 °С, то при температуре –40 °С она увеличивается до 0,98 г/см^3. Разность плотностей ледяной крошки и жидкости способствует удалению крошки из забоя скважины потоком силиконовой жидкости на поверхность, где крошка отделяется от циркулирующей жидкости в сепараторе. Силиконовая жидкость образует покрытие на поверхности каждой крошки, что предотвращает их агломерацию. Некоторое увеличение вязкости силиконовой жидкости при низких температурах приводит к росту гидравлического сопротивления тракта, которое может компенсироваться увеличением диаметра подающего трубопровода. Наиболее весомым недостатком силиконовой жидкости является её цена, которая на мировом рынке в зависимости от марки составляет от 6 до 10 USD/кг.

Альтернативные силиконовым жидкостям алифатические эфиры заметно дешевле (например, цена ESTISOL 140 равна 3,8 USD/кг). Однако эта жидкость обладает резким неприятным запахом, раздражает кожу и малопригодна для работы с большими количествами длительное время. Кроме этого, плотность ESTISOL 140 недостаточна для компенсации в течение длительного времени горного давления на стенки глубокой (более 2 000 м) скважины, а более тяжёлая двухкомпонентная смесь ESTISOL – COASOL значительно увеличивает вязкость при понижении температуры, что делает невозможным её циркуляцию насосами по протяжённому тракту.

Глава 2. Бурение горячей силиконовой жидкостью

В качестве альтернативного варианта создания скважины к озеру Восток может быть предложено бурение горячей силиконовой жидкостью [225] по аналогии с бурением горячей водой с последующим вскрытием озера тепловой буровой коронкой.

Силиконовая жидкость, используемая при бурении, одновременно выполняет три функции:

– инструмента бурения, обеспечивающего плавление льда и удаление образовавшейся воды из скважины;

– заливочной жидкости, предотвращающей смыкание стенок скважины под воздействием давления окружающего льда;

– экологически чистого антифриза, поддерживающего длительную эксплуатацию скважины после завершения бурения.

Бурение ледника горячей силиконовой жидкостью позволяет:

– осуществлять проходку скважины с высокой скоростью;

– производить бурение нескольких скважин за один летний сезон;

– поддерживать низкую вязкость силиконовой жидкости за счёт нагрева, что способствует принудительной циркуляции жидкости насосами;

– использовать скважину длительное время;

– прекращать бурение на любой срок и на любой глубине с последующим возобновлением проходки скважины;

– обеспечивать чистые условия бурения, поскольку гидрофобная силиконовая жидкость является экологически нейтральной и при необходимости может подвергаться дополнительной обработке, чтобы соответствовать требованиям, предъявляемым при проведении работ в подледниковом озере.

Принципиальная схема бурения горячей силиконовой жидкостью представлена на Рис. 114. Цистерна хранения силиконовой жидкости соединена с ёмкостью, из которой силиконовая жидкость насосом высокого давления № 1 подаётся в нагреватель. После нагревателя горячая силиконовая жидкость поступает в гибкий трубопровод, который намотан на катушку. На конце трубопровода закреплён буровой снаряд с соплом, выходящая из него струя горячей жидкости производит плавление льда в забое, формируя

скважину. Образовавшаяся вода выносится силиконовой жидкостью по скважине наверх, откуда смесь силиконовой жидкости с водой насосом № 2 подаётся в сепаратор, в котором вода отделяется и сливается в котлован для воды, а прошедшая через скважину и охлаждённая в ней силиконовая жидкость поступает в ёмкость для последующей рециркуляции. В пористый фирн устанавливается обсадная колонна, которая предотвращает утечку силиконовой жидкости. Нижний конец обсадной колонны герметизируется внутри льда.

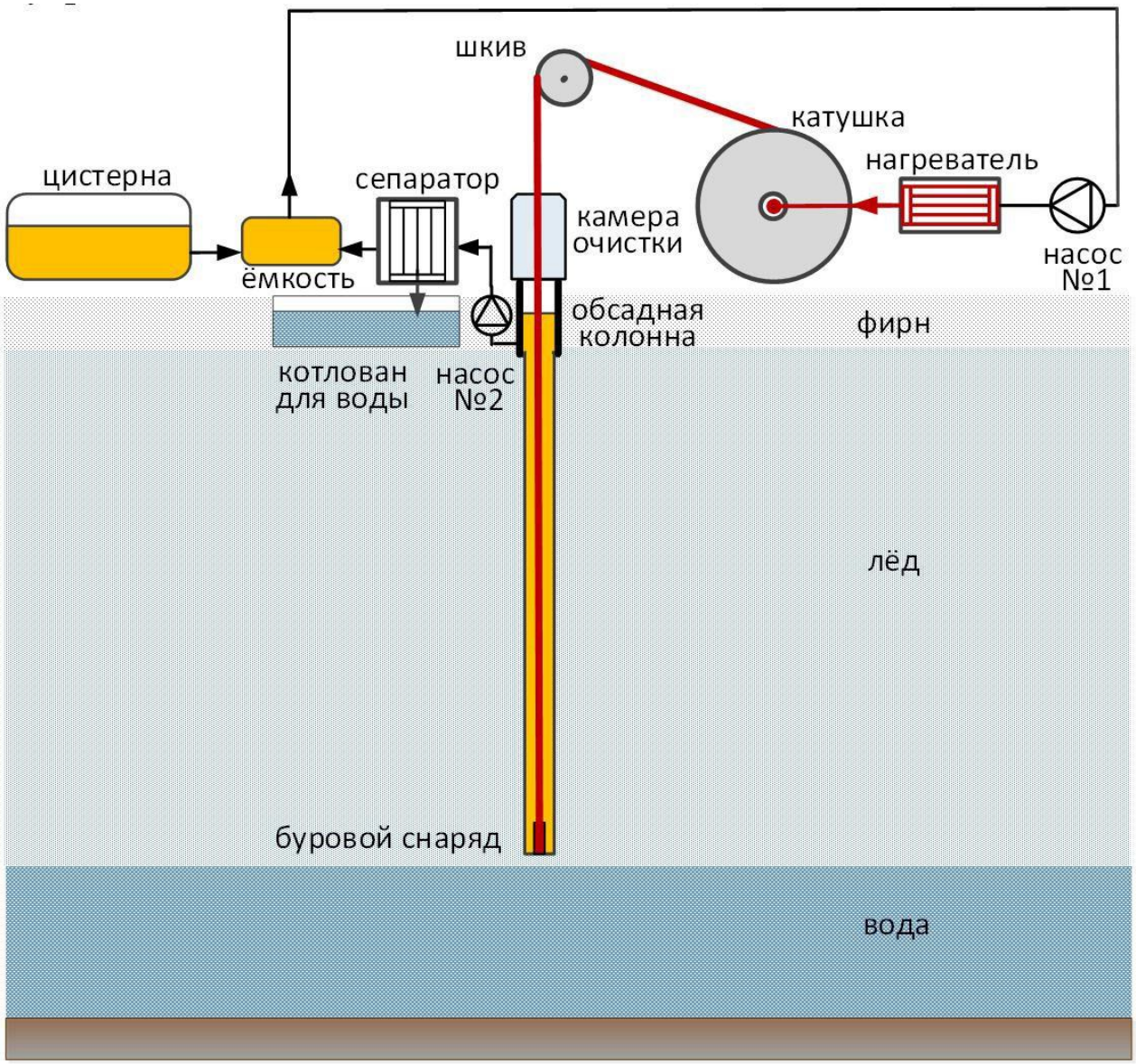


Рис. 114. Принципиальная схема бурения горячей силиконовой жидкостью

После прохождения буровым снарядом основной толщи ледника подача к нему горячей силиконовой жидкости прекращается,

снаряд извлекается из скважины. В скважину опускается погружной насос, с помощью которого производится понижение уровня силиконовой жидкости. Это обеспечивает во время вскрытия озера поступление некоторого количества озёрной воды в скважину, что предотвращает попадание силиконовой жидкости в озеро. Вскрытие выполняется тепловым или электромеханическим буровым снарядом.

Теплофизический расчёт процесса бурения льда нагретой силиконовой жидкостью приведён в работе [226]. Расчёт продемонстрировал возможность бурения ледника горячей силиконовой жидкостью на большую глубину и позволил определить основные параметры бурения скважины глубиной 3 758 м и диаметром 20 см.

Длина гибкого трубопровода в расчёте принята равной толщине ледника. Диаметр трубопровода и теплопроводность материала стенки соответствуют параметрам трубопровода, который использовался для бурения скважин горячей водой на Южном полюсе. Внешний диаметр трубопровода – 96 мм, внутренний диаметр – 64 мм. Коэффициент теплопроводности материала трубопровода равен 0,26 $Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$.

Время бурения горячей силиконовой жидкостью с температурой 98,0 °C и расходом 550 $л \cdot мин^{-1}$ составит 72 ч. Гидравлическое сопротивление гибкого трубопровода равно 5,52 МПа без учёта гидравлического сопротивления бурового сопла, нагревателя и участка трубопровода на поверхности. Для бурения скважины потребуется тепловая мощность 1 570 кВт и порядка 11, 5 $м^3$ топлива без учёта тепловых потерь на поверхности. Удельный расход топлива в расчёте был принят равным расходу при тепловом бурении скважин для нейтринного детектора IceCube.

Результаты расчёта температуры силиконовой жидкости в трубопроводе подачи и в скважине при подъёме жидкости на поверхность показаны на Рис. 115. Забой скважины находится на отметке 0 м. Диаметр скважины в зависимости от расстояния от забоя приведён на Рис. 116. Результаты расчёта параметров бурения скважины к озеру Восток приведены в Табл. 9.

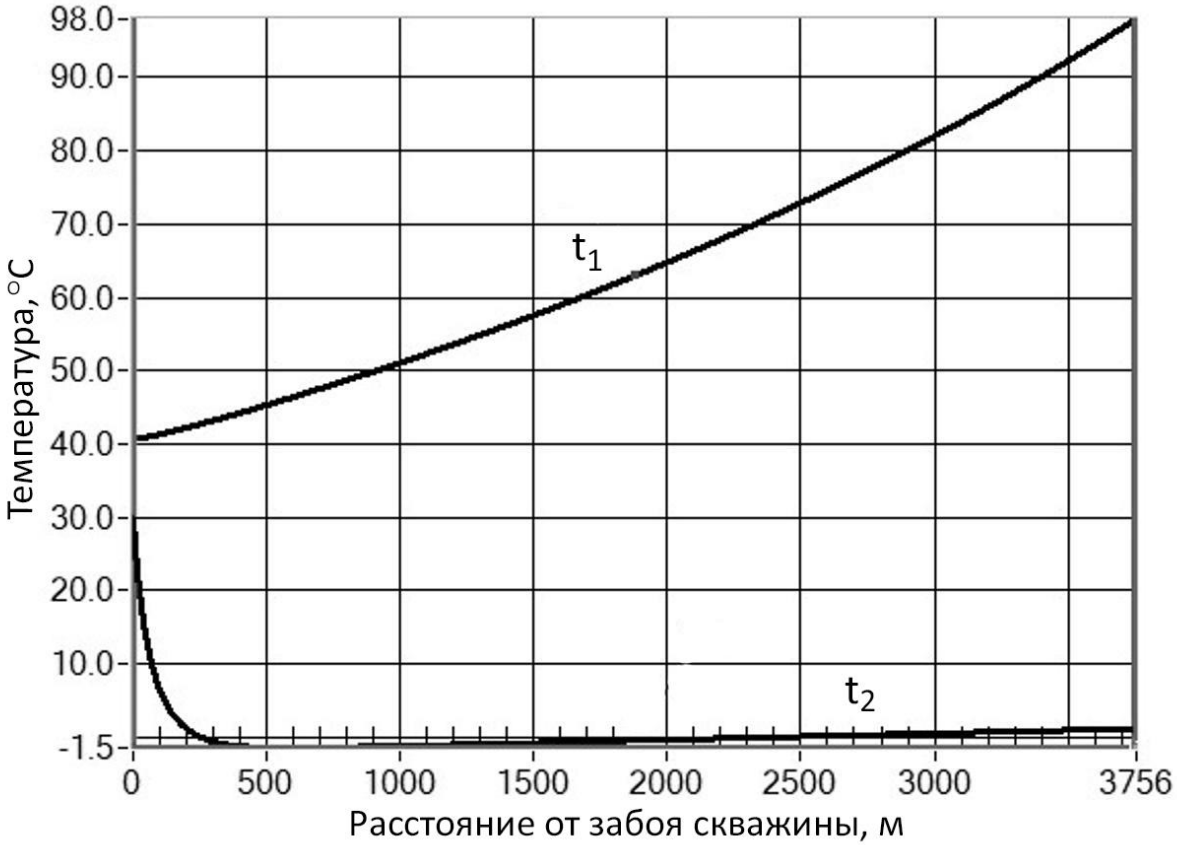


Рис. 115. Температура силиконовой жидкости:
t_1 – температура в трубопроводе; t_2 – температура в скважине

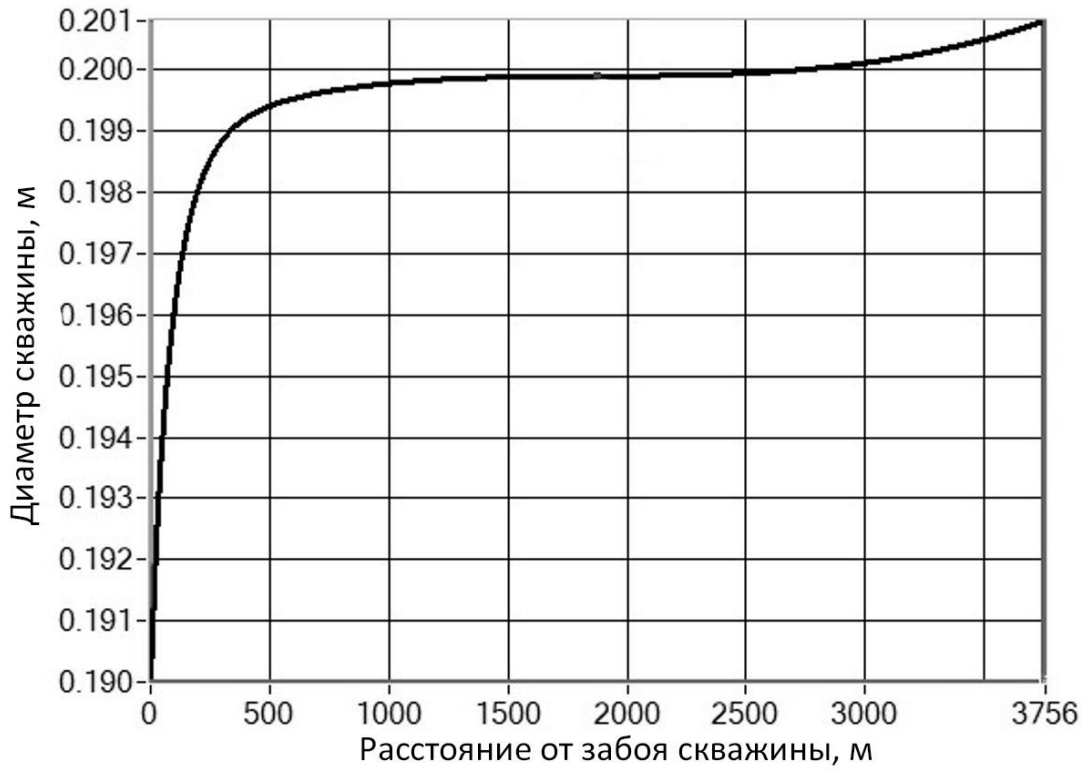


Рис. 116. Диаметр скважины в зависимости от расстояния от забоя

Таблица 9

Расчётные параметры бурения горячей силиконовой жидкостью

Параметр	Значение
Толщина ледника (глубина скважины), м	3 758
Диаметр скважины, м	0,190–0,201
Марка буровой силиконовой жидкости	ПМС-5
Расход буровой жидкости, л · мин$^{-1}$ (кг · с$^{-1}$)	550 (9,0)
Температура жидкости на входе в скважину, °С	98,0
Температура жидкости в забое скважины, °С	40,7
Температура потока на выходе из скважины, °С	1,1
Потребляемая тепловая мощность, кВт	1 570
Тепловой поток от трубопровода подачи жидкости, кВт	929
Тепловой поток, поступающий в ледник, кВт	703
Гидравлическое сопротивление трубопровода, МПа	5,52
Время бурения скважины, ч	72
Объём скважины, м^3	117,6
Скорость проходки, м · мин$^{-1}$	0,87
Содержание воды в восходящем потоке, %	21,0
Удельный расход топлива, л · кВт$^{-1}$ · ч$^{-1}$	0,104
Расход топлива на бурение скважины, м^3	11,5

Глава 3. Новая технология скоростного экологически чистого бурения

Предлагаемая технология бурения [227] отличается от известных тем, что бурение льда и вскрытие озера производятся комбинированным тепловым буровым снарядом, который состоит из тепловой буровой коронки с электрическим нагревательным элементом и герметичного гибкого трубопровода «труба в трубе», в котором циркулирует нагретый теплоноситель. Принципиальная схема комбинированного теплового бурового снаряда представлена на Рис. 117. Цилиндрическая часть тепловой буровой коронки с конусообразной нижней частью формирует зазор для отвода воды, образовавшейся при плавлении льда.

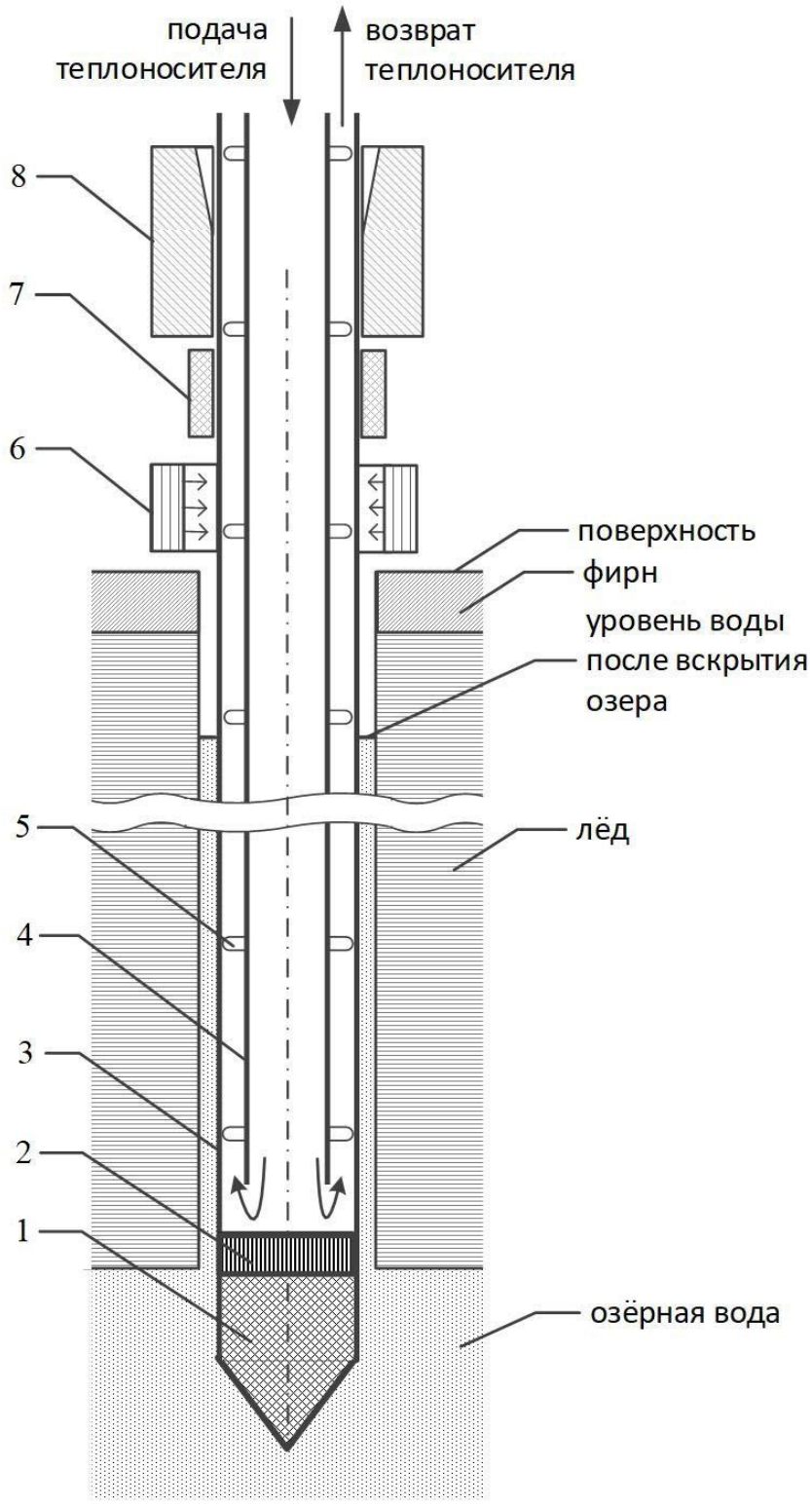


Рис. 117. Принципиальная схема комбинированного теплового бурового снаряда для экологически чистого бурения и вскрытия подледникового озера: *1* – тепловая буровая коронка с электрическим нагревательным элементом; *2* – стыковочный узел; *3* – наружный гибкий трубопровод; *4* – внутренний гибкий трубопровод; *5* – центрирующие упоры; *6* – УФ-излучатель; *7* – устройство для очистки внешней поверхности бурового снаряда; *8* – направляющее устройство

Перед погружением в скважину комбинированный тепловой буровой снаряд проходит механическую очистку в устройстве для очистки внешней поверхности и биологическую очистку с помощью УФ-излучателя. Внутри трубопровода циркулирует нагретый теплоноситель с целью поддержания образовавшейся талой воды в скважине в жидком состоянии в условиях окружающего льда с отрицательной температурой. Таким образом, в отличие от других способов бурения льда, буровая жидкость протекает в герметичном трубопроводе и не контактирует с водой и стенками скважины. Роль заливочной жидкости, удерживающей стенки скважины от смыкания под воздействием горного давления в условиях глубокого бурения, выполняет вода, образовавшаяся в результате плавления льда.

Расчёт процесса бурения скважины комбинированным тепловым снарядом к озеру Восток позволил определить необходимую тепловую мощность буровой установки и параметры бурения. Толщина ледника над озером в месте предполагаемого бурения скважины составляет 3 758 м. Слой фирна у поверхности в расчёте рассматривался как сплошной лёд. В качестве теплоносителя использовалась силиконовая жидкость ПМС-2 с вязкостью 2 $мм^2/с$ при 25 °C. Температура льда на различной глубине ледника, по данным температурных измерений в скважине над озером [228], приведена на Рис. 118. Температура плавления льда зависит от давления в глубине ледника. На границе раздела «лёд – вода» температура плавления составляет около –2,7 °C. В расчёте учитывалась зависимость теплофизических свойств льда и теплоносителя от температуры.

Длина трубопровода в расчёте принята равной толщине ледника. На поверхности трубопровод намотан на катушку диаметром 2,2 м. Диаметр внешнего гибкого трубопровода составляет 140 × 5 мм, диаметр внутреннего равен 70 × 5 мм. Коэффициент теплопроводности материала трубопровода принят равным 0,26 $Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$ [212].

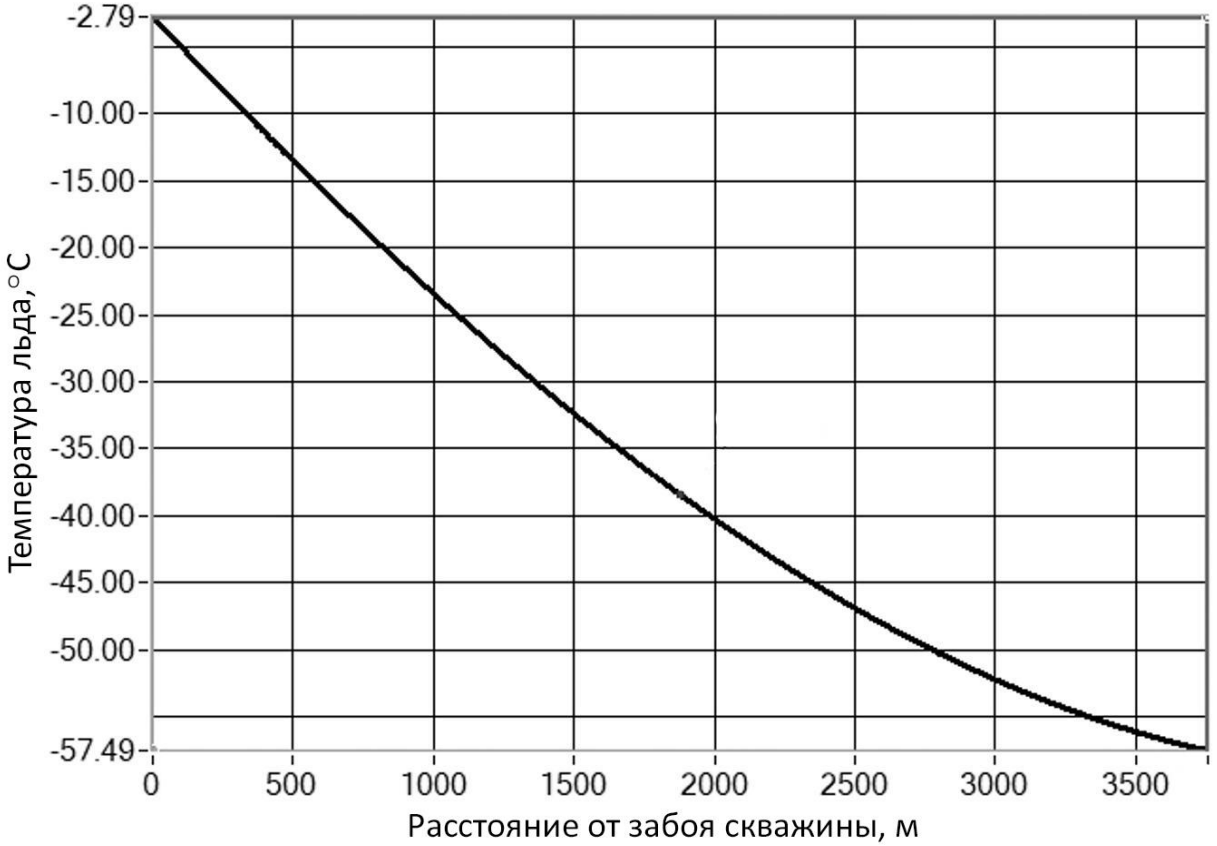


Рис. 118. Температура льда на различной глубине ледника над озером Восток

Результаты расчёта параметров бурения скважины к озеру Восток приведены в Табл. 10 [229]. Проходка скважины глубиной 3 758 м и диаметром 0,15 м при мощности буровой коронки 96 кВт занимает 72 ч. Теплоноситель с расходом 6,8 кг · $с^{-1}$ поступает во внутренний трубопровод с температурой 95 °C и постепенно охлаждается к забою до температуры 14,0 °C. На выходе из скважины теплоноситель имеет температуру 25,3 °C. Температура воды, которая отводится из скважины, равна 0,87 °C. Тепловой поток, вносимый теплоносителем, равен 900 кВт. Гидравлическое сопротивление гибкого трубопровода составляет ~ 8,57 МПа без учёта местного сопротивления центрирующих упоров, гидравлического сопротивления нагревателя и трубопроводов на поверхности. Удельный расход топлива принят равным расходу при бурении скважин на Южном полюсе. Расход топлива на бурение скважины оценивается в 7,47 $м^3$ без учёта потерь тепла на поверхности.

Таблица 10

Расчётные параметры бурения скважины комбинированным тепловым снарядом

Параметр	Значение
Толщина ледника (глубина скважины), м	3 758
Диаметр проходки, м	0,150
Марка теплоносителя	ПМС-2
Расход теплоносителя, кг · $с^{-1}$	6,80
Температура теплоносителя на входе в трубопровод, °С	95,0
Температура теплоносителя в забое, °С	14,0
Температура теплоносителя на выходе из трубопровода, °С	25,3
Температура воды на выходе из скважины, °С	0,87
Тепловой поток от нагревателя буровой коронки, кВт	96
Тепловой поток от теплоносителя, кВт	900
Тепловой поток в сторону льда, кВт	547
Полное гидр. сопротивление гибкого трубопровода, МПа	8,57
Гидр. сопротивление кольцевого канала воды, МПа	0,33
Время бурения скважины, ч	72
Диаметр скважины у поверхности, м	0,157
Объём скважины, $м^3$	72,7
Средняя скорость проходки, м · $мин^{-1}$	0,87
Удельный расход топлива, л · $кВт^{-1}$ · $ч^{-1}$	0,104
Расход топлива на скважину, $м^3$	7,47

Плотность теплового потока со стенок скважины в сторону ледника в зависимости от времени прогрева льда показана на Рис. 119. Время прогрева льда на каждом горизонте ледника, который характеризуется своим температурным перепадом между температурой стенки скважины и температурой ледового горизонта, определяется скоростью проходки скважины. Часть скважины, находящаяся у поверхности, имеет наибольшее время прогрева и наибольший температурный перепад вследствие более низкой температуры льда в верхней части скважины.

Распределение температуры теплоносителя по длине трубопровода показано на Рис. 120. Несмотря на то что основная задача циркуляции нагретого теплоносителя в трубопроводе заключается в том, чтобы не допустить замерзания образовавшейся при бурении воды, полностью исключить плавление льда на стенках скважины не удаётся. По этой причине диаметр скважины у поверхности на 7 мм больше, чем в забое (Рис. 121).

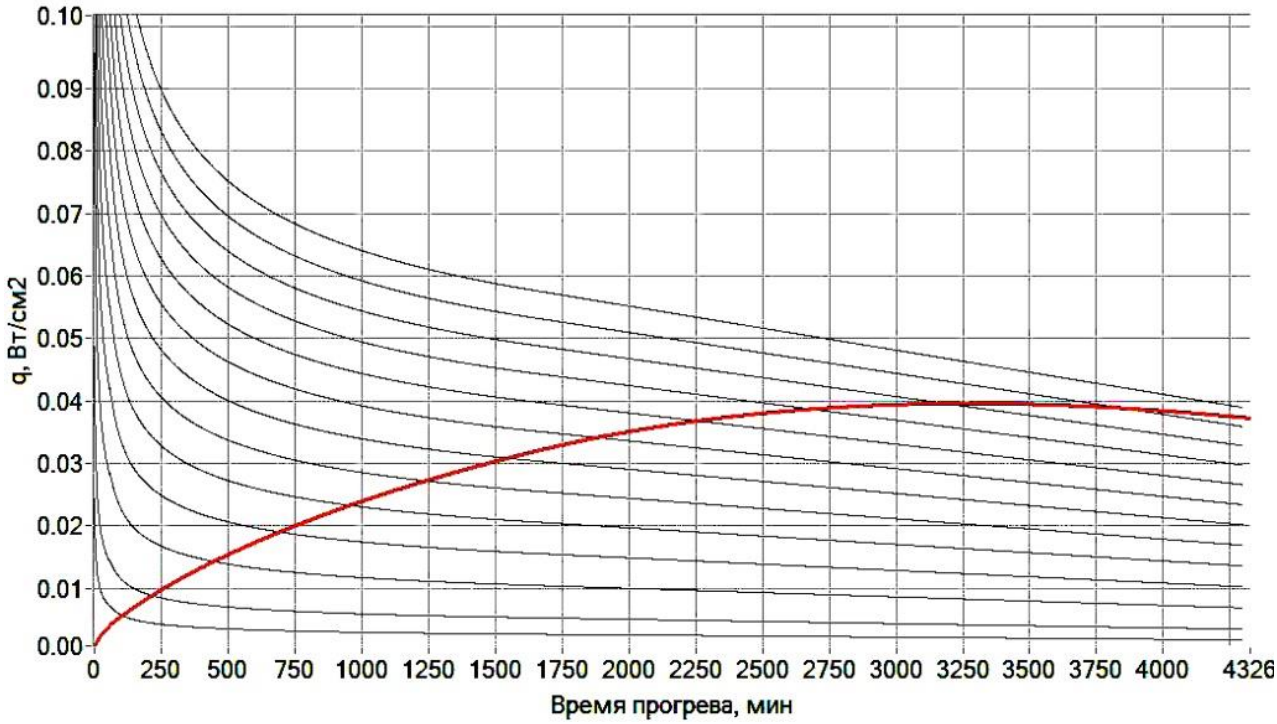


Рис. 119. Плотность теплового потока со стенок скважины в сторону ледника в зависимости от времени прогрева, время 0 мин соответствует границе с озером

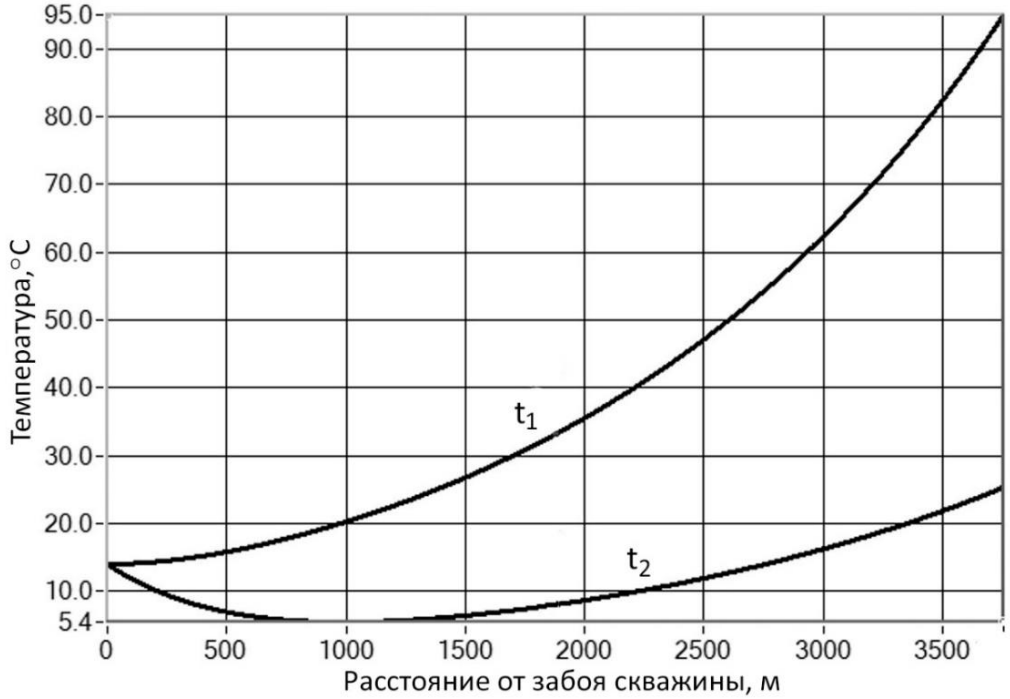


Рис. 120. Температура теплоносителя на опускном участке гибкого трубопровода (t_1) и на подъёмном участке (t_2)

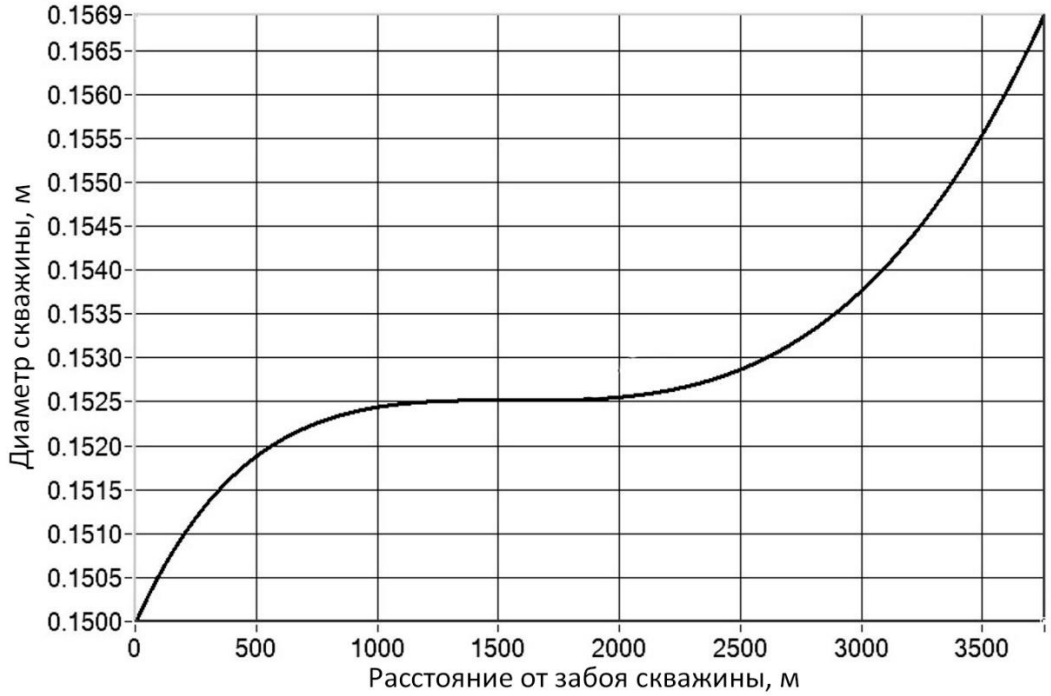


Рис. 121. Диаметр скважины в зависимости от расстояния от забоя

Отдельно был выполнен расчёт проходки слоя фирна толщиной 200 м. При проходке фирна комбинированным тепловым буровым снарядом с температурой теплоносителя на входе 95 °С образовавшаяся в скважине вода нагреется теплоносителем до 7 °С и будет проникать в фирн, что приведёт к формированию в нём

ледяной трубы с непроницаемыми стенками. Использование комбинированного теплового бурового снаряда не потребует установки в фирн обсадной колонны.

Дополнительно проведённые расчёты показали, что скважина к озеру Восток может быть пробурена комбинированным тепловым снарядом с бóльшим диаметром буровой коронки. При этом увеличивается время бурения и общий расход топлива. Так, например, для бурения скважины диаметром 250 мм расход топлива без учёта тепловых потерь на поверхности составит 17,2 м^3, а время бурения увеличится до ~ 7 сут при использовании буровой коронки мощностью 110 кВт. Тепловая мощность, вносимая теплоносителем, равна 838 кВт. Объём скважины составит 186 м^3. Другие параметры остаются близкими к тем, которые приведены в Табл. 10.

Объём топлива, необходимый для бурения скважины, оценивается в количестве от 10 до 20 м^3 в зависимости от диаметра скважины и потерь тепла на поверхности. Нужно отметить, что нагрев теплоносителя за счёт сжигания топлива в нагревателе имеет более высокий КПД, чем электрический нагрев от генераторов электроэнергии. С целью снижения экологического воздействия на окружающую среду можно рассмотреть использование водородного топлива для нагрева теплоносителя, циркулирующего в буровом снаряде.

Здесь интересно произвести сравнение параметров бурения скважины к озеру Восток с основными характеристиками тепловых установок для бурения ледников в Антарктиде. На станции «Амундсен – Скотт» горячей водой было пробурено 86 скважин глубиной 2 500 м и диаметром 60 см. Температура воды равнялась 88 °С, расход составлял 12,7 кг/с. Подача горячей воды в скважину производилась через гибкий трубопровод под давлением 7,6 МПа. Среднее время бурения одной скважины составило 30 ч. Установленная тепловая мощность нагревателей равнялась 4,7 МВт. Расход топлива на бурение одной скважины составил 21 м^3 [211, 212].

Установка для бурения скважины глубиной 3 280 м и диаметром 36 см к озеру Элсуэрт имела тепловую мощность 1,5 МВт. Горячая вода с расходом 3,5 кг/с и температурой 90 °С подавалась в скважину через гибкий трубопровод под давлением 13,6 МПа.

Расчётное время бурения оценивалось в 3 сут. Из-за технических неполадок и перерасхода топлива вскрыть озеро не удалось [213].

Результаты теплофизического расчёта бурения ледника комбинированным тепловым буровым снарядом показали возможность проходки скважины глубиной 3 758 м к озеру Восток за 3 сут. Экологически чистое вскрытие озера обеспечивается конструкцией бурового снаряда, которая исключает контакт теплоносителя с водой, и системой очистки поверхности снаряда. После проникновения тепловой буровой коронки в озеро уровень воды в скважине понизится, вода, образовавшаяся из аккреционного льда толщиной 230 м, поступит в озеро. При извлечении бурового снаряда его объём будет замещён в скважине водой, поступившей из озера.

Для проведения работ в озере буровой снаряд извлекается из скважины, и к стыковочному узлу гибкого трубопровода вместо тепловой буровой коронки могут присоединяться различные научные приборы, пробоотборники или глубоководный дрон. Циркулирующий в трубопроводе нагретый теплоноситель будет поддерживать воду в скважине в жидком состоянии, обеспечивая длительные по времени работы в озере.

Силиконовая жидкость, имеющая полидиметилсилоксановую структуру, $(CH_3)_3SiO–[–Si(CH_3)_2O–]_n–Si(CH_3)_3$, может применяться как теплоноситель в буровом снаряде, а также использоваться в качестве заливочной жидкости внутри скважины. Силиконовые жидкости выпускаются промышленным способом, имеют температуру замерзания ниже –60 °С, широкий диапазон плотностей и вязкостей [230]. Жидкости обладают высокой степенью гидрофобности и более низкой, чем у воды, плотностью.

Выбор силиконовой жидкости в качестве теплоносителя в буровом снаряде обусловлен рядом причин. Основным аргументом выбора этой жидкости является экологическая безопасность, в том числе в случае максимальной проектной аварии, в качестве которой может рассматриваться разгерметизация трубопровода внутри скважины. Поскольку силикон является экологически чистой гидрофобной жидкостью, а выбранная марка имеет плотность ниже плотности воды, то при аварии силиконовая жидкость будет

находиться в верхней части скважины, откуда она впоследствии может быть удалена.

Второй аргумент в пользу выбора силикона носит технологический характер. В связи с тем что температура замерзания силиконовой жидкости находится ниже температуры ледника в самой холодной его части, процесс бурения может быть приостановлен и впоследствии возобновлён в случае возникновения проблем технического характера.

Третий аргумент носит эксплуатационный характер и состоит в том, что поскольку научные работы, как правило, проводятся в летний период, то в остальное время года буровой снаряд может оставаться внутри скважины без циркуляции теплоносителя и прогрева. Для проведения сезонных работ достаточно возобновить циркуляцию горячего теплоносителя без необходимости повторного бурения скважины. Это существенно сократит время и расход топлива при подготовке к проведению следующего этапа работ в озере.

Силиконовая жидкость может быть также применена в качестве незамерзающей заливочной жидкости с целью длительного использования скважины после извлечения из неё бурового снаряда. Для компенсации горного давления и предотвращения смыкания стенок скважины должна быть подобрана необходимая плотность силиконовой жидкости. Существование множества марок силиконовых жидкостей с плотностью от 0,760 до 0,978 кг $\cdot$ м$^{-3}$ исключает необходимость подготовки заливочной жидкости из компонентов различного химического состава.

К негативным моментам использования силиконовой жидкости можно отнести её высокую стоимость (от 6 до 10 USD/кг) и необходимость доставки большого объёма жидкости (~ 80 м^3) к месту бурения.

В состав комплекса бурового оборудования входит гибкий трубопровод на катушке, буровая коронка, камера очистки, нагреватель, генератор электроэнергии, циркуляционный насос, пульт управления, цистерны с топливом, ёмкости с силиконовым теплоносителем и ёмкости с силиконовой заливочной жидкостью. Оборудование доставляется тягачами к месту бурения на санях. Буровой персонал размещается в теплых балка́х. Мобильность

оборудования и высокая скорость бурения позволяют проводить бурение нескольких скважин в разных местах за один летний сезон.

Принципиальная схема буровой установки приведена на Рис. 122. Циркуляция теплоносителя в герметичном контуре, который включает нагреватель и гибкий трубопровод типа «труба в трубе», осуществляется гидравлическим насосом. Гибкий трубопровод с тепловой буровой коронкой на конце по мере углубления скважины подаётся в неё через шкив с катушки, расположенной на поверхности. Перед погружением в скважину буровая коронка и гибкий трубопровод проходят через камеру очистки.

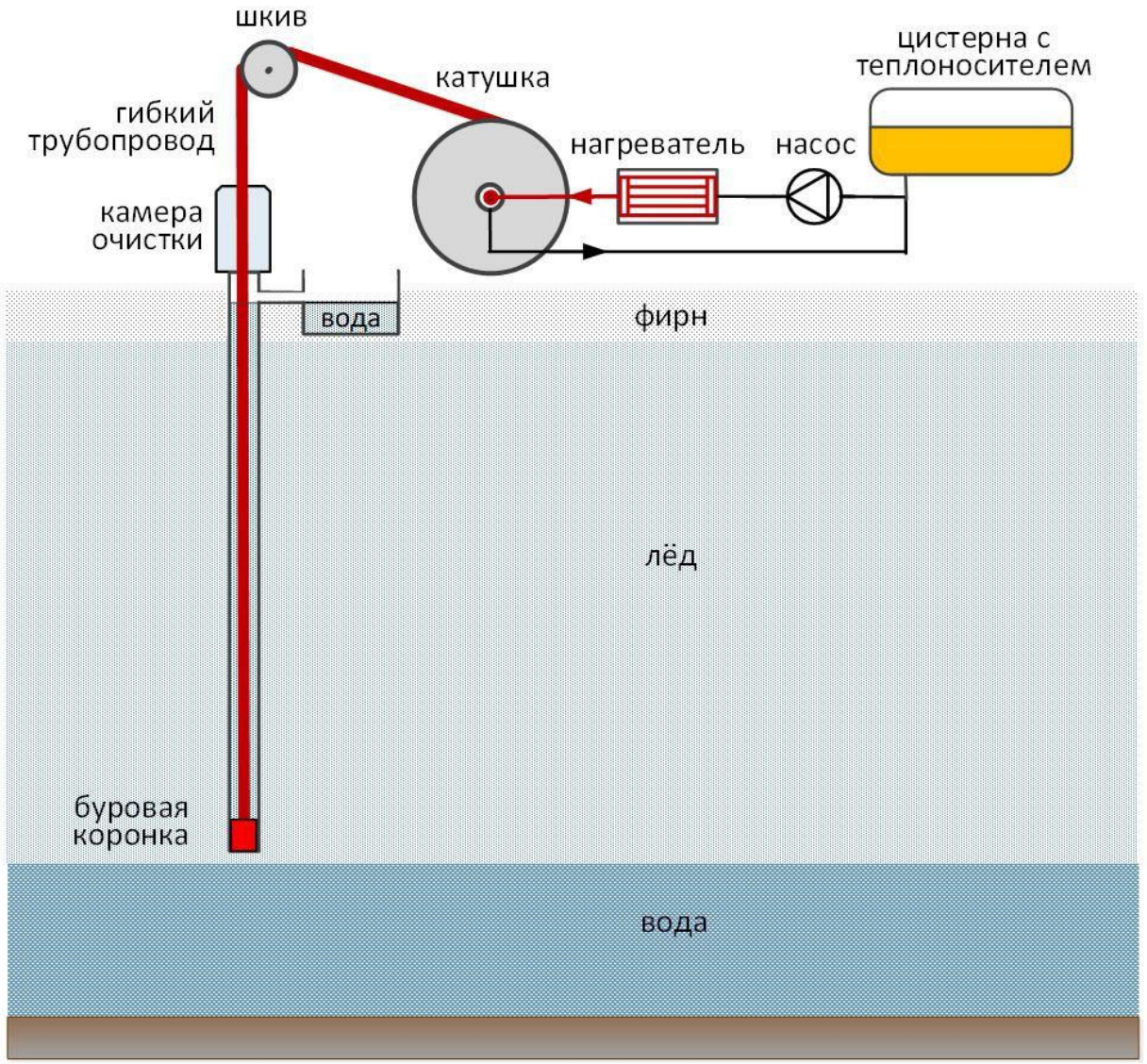


Рис. 122. Принципиальная схема буровой установки
с комбинированным тепловым буровым снарядом

Проходка скважины и вскрытие озера комбинированным тепловым буровым снарядом показаны на Рис. 123. Во время проходки скважины вода вытесняется буровым снарядом из скважины на поверхность (Рис. 123*а*). Для сбора воды предусматривается специально подготовленный котлован. При проникновении тепловой буровой коронки в озеро (Рис. 123*б*) при толщине ледника 3 758 м уровень воды в скважине самопроизвольно снижается до значения $h_в \approx 3\,457$ м. Столб воды такой высоты создаёт гидростатическое давление, которое равно давлению в озере на границе со льдом. Во время вскрытия озера вода, образовавшаяся при плавлении аккреционного льда, возвращается в озеро.

Первое бурение скважины на большую глубину позволит решить несколько важных задач:

– отработать технологию скоростного бурения и экологически чистого проникновения в подледниковое озеро;

– провести сбор данных, необходимых для начала проектирования нейтринного детектора внутри озера;

– провести исследования по поиску жизни в экстремальных условиях подледникового озера;

– провести испытания автономного дрона, необходимого для монтажа оборудования нейтринного детектора в озере;

– провести испытания акустических датчиков для нейтринного детектора внутри ледника.

Все перечисленные задачи выполняются с помощью комбинированного теплового бурового снаряда без заполнения скважины незамерзающей заливочной жидкостью после завершения бурения и могут быть проведены в течение одного летнего сезона.

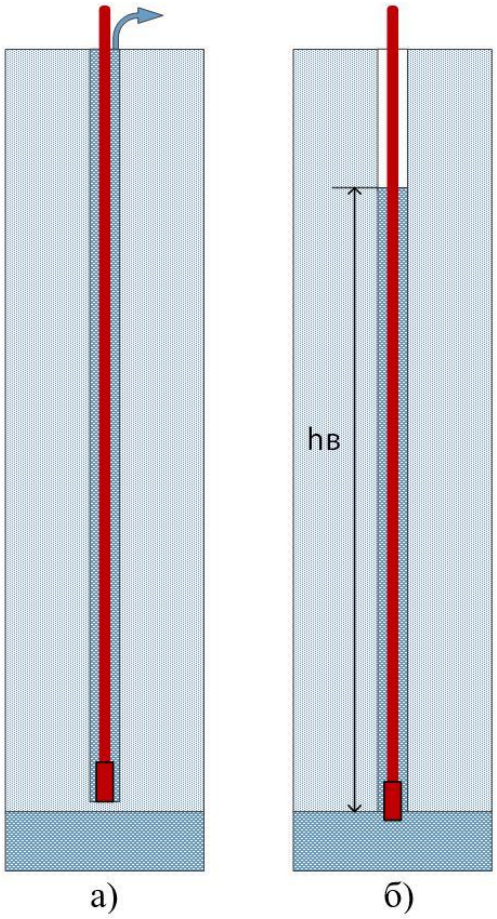


Рис. 123. Работа комбинированного теплового бурового снаряда: проходка скважины (*а*); вскрытие озера (*б*)

Первое бурение на большую глубину позволит проверить и скорректировать основные технологические параметры бурения комбинированным тепловым снарядом, такие как скорость проходки скважины, температура и расход циркулирующего теплоносителя, необходимые для поддержания воды в холодной скважине в жидком состоянии. Производится проверка технологии удаления воды из скважины, которая в количестве ~ 58 м^3 вытекает на поверхность и заполняет подготовленный в снегу котлован при температуре окружающей среды от –30 до –45 °С. Проверяется работа камеры очистки, в задачу которой входит удаление механических, химических и биологических загрязнений с поверхности оборудования, которое погружается в озеро (гибкий трубопровод, буровая коронка, научные приборы, глубоководный дрон).

Скважина в месте предполагаемого размещения нейтринного детектора позволит выполнить работы по сбору информации, необходимой для проектирования детектора. Сюда в первую очередь

относятся: измерение прозрачности воды и температурного поля внутри озера; определение толщины водного слоя; изучение структуры дна; определение геотермального теплового потока; изучение течений и других характеристик подледниковой среды.

Замена тепловой буровой коронки на пробоотборники воды и осадочных пород позволит выполнить исследования по поиску жизни в экстремальных условиях. В течение времени проведения работ в озере трубопровод с циркулирующим нагретым теплоносителем находится в скважине, предотвращая замерзание воды.

Впоследствии к стыковочному узлу трубопровода присоединяется автономный дрон с целью проведения его испытаний в глубоководных условиях подледникового озера. Во время испытаний дрона трубопровод с циркулирующим нагретым теплоносителем остаётся в скважине.

После завершения работ в озере трубопровод бурового снаряда извлекается из скважины, и в неё с целью проведения тестовых испытаний опускаются акустические датчики нейтринного детектора, которые после замерзания воды в скважине остаются внутри ледника.

Часть V
Поиск жизни в экстремальных условиях подледниковых озёр

Глава 1. Изучение подледниковых озёр Антарктиды

Биологические исследования озера Восток

Озеро Восток представляет собой уникальную экосистему, изолированную от поверхностной биоты более 15 млн лет [231]. Экстремальные условия, характеризующиеся высоким давлением, отсутствием солнечного света, специфическим газовым и химическим составом воды и продолжительной изолированностью озера, предполагают возможность наличия в нём форм жизни, отличающихся от известных современной науке. Существует вероятность найти в озере микроорганизмы, обладающие уникальными способностями к жизни в экстремальных условиях. ДНК этих микроорганизмов может использоваться в качестве материала для проведения генетических исследований. Такой генофонд будет ценным материалом для науки и может найти применение в медицине при создании лекарственных препаратов с уникальными свойствами. Исследование реликтовой ДНК может дать уникальную информацию для изучения вклада генетики в продолжительность жизни.

Подледниковое озеро Восток является также важным объектом изучения в области астробиологии [232–234]. Значительные размеры озера позволяют рассматривать его в качестве земного аналога океанов, которые существуют под мощными ледяными панцирями Европы (спутник Юпитера) и Энцелада (спутник Сатурна). Изучение неизвестных форм жизни, которая может быть обнаружена в экстремальных условиях подледникового озера, будет способствовать лучшему представлению об альтернативных формах инопланетной жизни. Озеро Восток представляет интерес и как полигон для отработки методов обнаружения и изучения жизни во внеземных условиях. Официальное определение жизни по NASA – «самоподдерживающаяся химическая система, способная к дарвиновской эволюции».

К экстремальным условиям подледникового озера Восток можно отнести: высокое давление, ~ 40 Мпа; низкую температуру воды, на уровне –3 °С на границе со льдом, и высокое содержание растворённого кислорода.

Атмосферный лёд насыщен воздухом, который изначально содержался в порах фирна. На глубине 1 300 м газовые пузырьки окончательно трансформируются в кристаллические включения гидрата воздуха. Концентрация воздуха в атмосферном льду достигает $7 \cdot 10^{-5}$ мольных долей. В северной части озера происходит таяние льда на границе с водой, в то время как в его южной части формируется аккреционный лёд. Концентрация воздуха в аккреционном льду составляет всего $\sim 8 \cdot 10^{-7}$ мольных долей. Таким образом, вода постепенно насыщается воздухом. По оценкам, сделанным в работе [235], концентрация растворённого в озере кислорода находится в диапазоне от $1{,}5 \cdot 10^{-5}$ до $0{,}75 \cdot 10^{-3}$ мольных долей. Эти оценки должны быть проверены прямыми измерениями содержания кислорода в озёрной воде.

До настоящего времени биологические исследования, направленные на поиск жизни в экстремальных условиях озера Восток, проводились только с использованием кернов, извлечённых из аккреционного слоя льда и кернов льда, образовавшегося из воды, поднявшейся в скважину после вскрытия озера. Отбор проб воды и осадочных пород из озера не проводился в связи с сильной загрязнённостью существующей буровой скважины [236, 237].

На Рисунке 124 [238] показан вертикальный разрез ледника вдоль линии движения льда над озером Восток, где высота поверхности приведена из работы [239], а подошва ледника соответствует данным радиолокационного зондирования [240]. Измерения длины ледяных кернов, извлечённых из скважины, позволили определить глубины раздела между атмосферным и аккреционным льдом (3 539 м), между аккреционным льдом типа I и типа II (3 618 м), а также между льдом и водой (3 769 м). Толщина слоёв аккреционного льда типа I и типа II рассчитывалась с использованием смоделированной скорости нарастания льда и информации, полученной по результатам исследования кернов. В отличие от глубокого аккреционного льда типа II, внутри аккреционного льда типа I содержится относительно

большое количество газовых и химических примесей, а также минеральные включения, захваченные из донных отложений и, возможно, с небольшого острова, расположенного выше по линии движения ледника [241, 242].

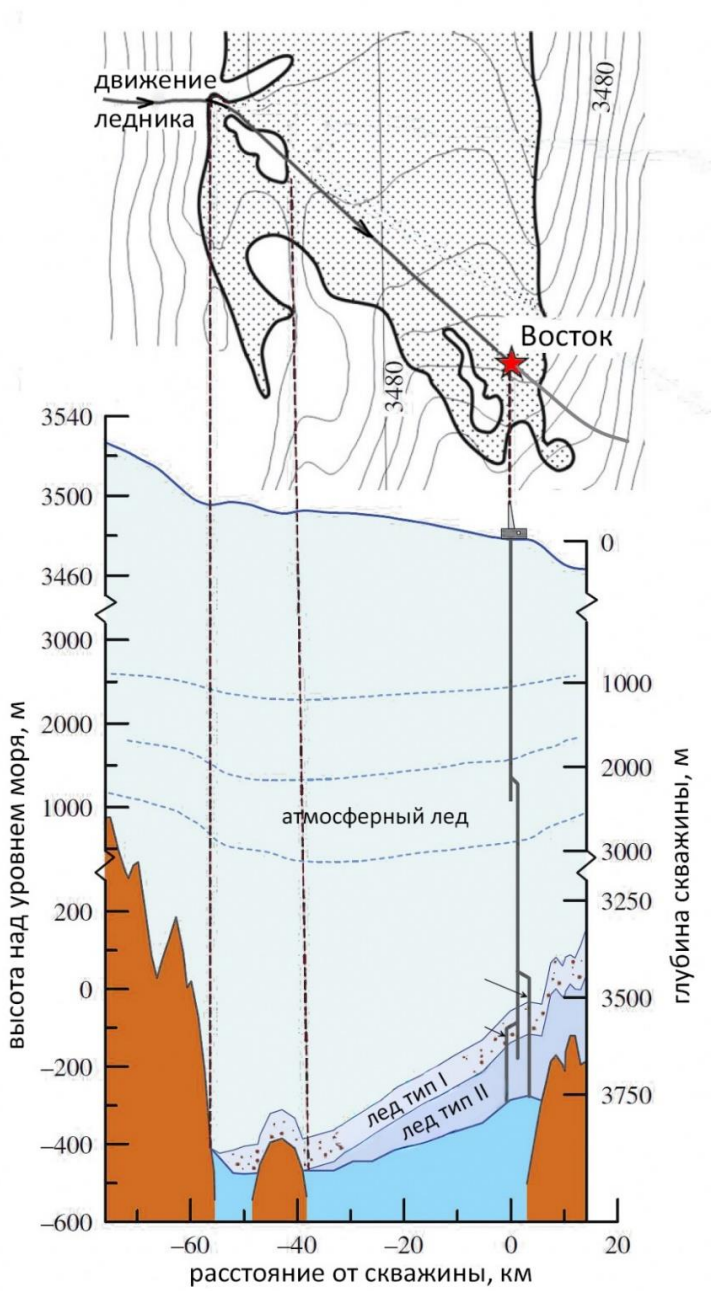


Рис. 124. Вертикальный разрез ледника вдоль линии движения льда над озером Восток

Циркуляция пресной воды в озере, которая влияет на расположение зоны аккреционного льда и формирование наклонной поверхности озера Восток, была рассчитана с помощью численного моделирования и показана на Рис. 125 [243]. Скорость течения воды равна ~ 0,3 мм/с. Циркуляция воды при наличии солёности

1,2–0,4 ‰ имеет несколько иное направление потоков, но также приводит к формированию аккреционного льда и наклонной поверхности озера.

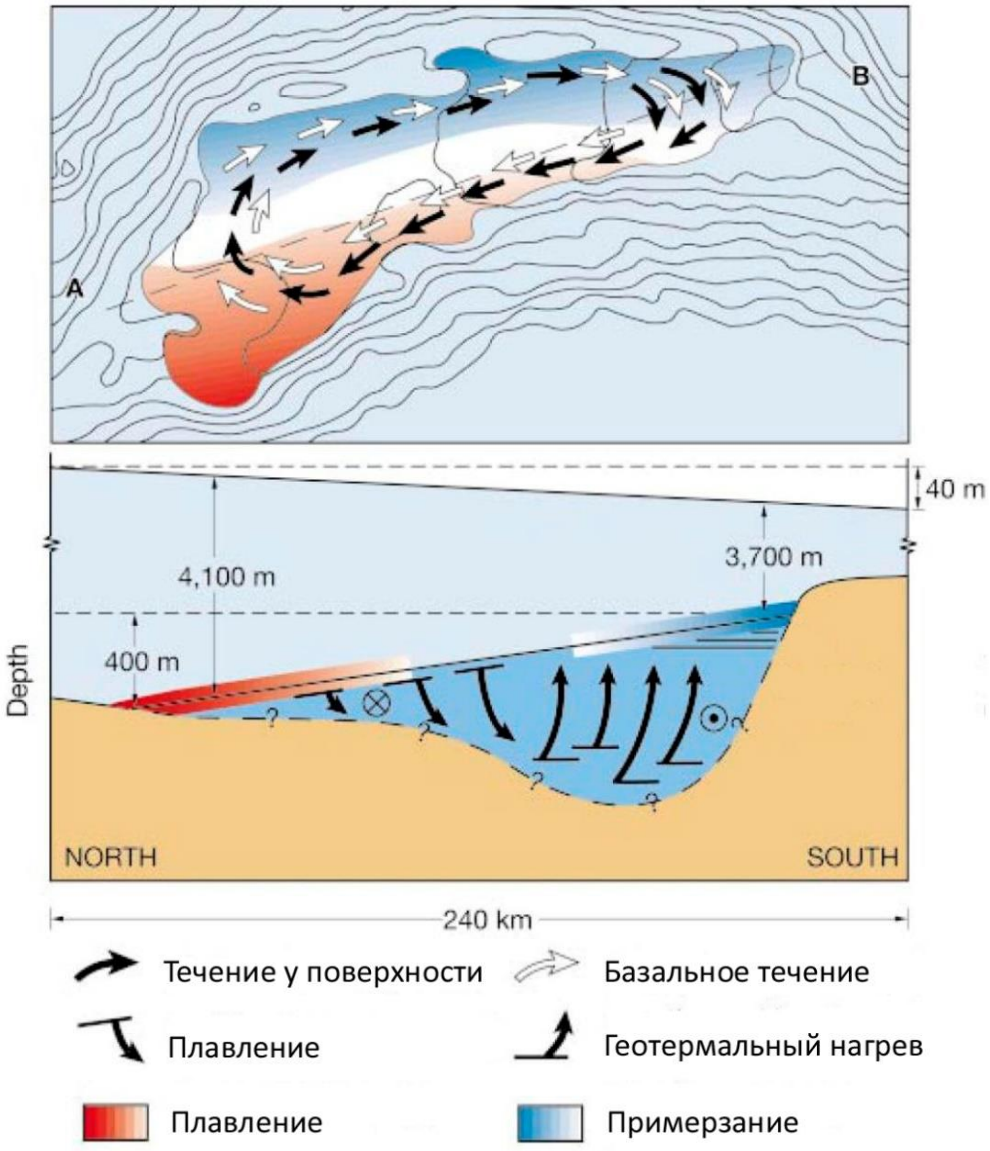


Рис. 125. Циркуляция пресной воды в озере Восток

В отсутствие фотосинтеза микроорганизмы в подледниковых озёрах должны использовать химическую энергию для обеспечения биологических процессов. В связи с этим становится важен кислород, содержащийся в газовых гидратах, поскольку он может использоваться микроорганизмами в качестве источника энергии посредством окисления органических веществ и сульфидов [244]. В то же время слишком большая концентрация кислорода в воде может накладывать ограничения на существование жизни в подледниковом озере.

Во время вскрытия озера Восток, которое произошло в феврале 2012 года на глубине скважины 3 769,3 м, вода из озера поднялась в скважине на высоту 592,6 м и впоследствии замерзла. В сезон 2012/2013 года из скважины удалось извлечь 32 м кернов замороженной озёрной воды. Результаты исследования кернов приводятся в работах [245, 246]. Второе вскрытие озера произошло в январе 2015 года. Вода поднялась в скважине до уровня 70 м. Через 4 дня из образовавшейся ледяной пробки извлекли около 12 м кернов озёрной воды. Однако микробиологические исследования кернов произведены не были из-за их загрязнения.

Внутри аккреционного льда типа I (Рис. 124), который содержит включения частиц, после тщательного контроля на возможные загрязнения удалось обнаружить несколько филотипов бактерий. Они включают хорошо известный хемолитоавтотрофный термофил *Hydrogenophilus thermoluteolus* (100%-ное сходство последовательностей), актинобактерию, родственную *Ilumatobacter fluminis* (95%-ное сходство), а также неидентифицированную и неклассифицированную бактерию AF532061 (92%-ное сходство с ближайшими родственниками) [247, 248]. Глубокий аккреционный лёд типа II (Рис. 124) содержал только загрязняющие следы. ДНК архей не была обнаружена ни в одном из типов аккреционного льда. Важным открытием стало обнаружение неидентифицированного бактериального филотипа w123-10, который вместе с другим филотипом (AF532061) может представлять собой местные популяции клеток в подледниковом озере Восток.

Отбор проб из подледникового озера

Биологические исследования, которые являются важнейшей частью комплексного изучения бассейна реликтового подледникового озера Восток, будут проводиться с использованием специально разработанных пробоотборных устройств и измерительных приборов с соблюдением экологических требований и привлечением к работе ведущих в этом направлении специалистов научно-исследовательских институтов.

Предварительный список задач, направленных на изучение озера, следующий:

– извлечение проб воды с разных глубин озера;

– исследование проб воды на предмет наличия микроорганизмов;

– изучение химического состава проб воды;

– изучение состава растворённых в воде газов;

– извлечение проб донных отложений;

– исследование донных отложений на предмет наличия в них микроорганизмов;

– изучение структуры и состава донных отложений;

– исследование клатратных соединений и их возможной роли в поддержании жизни в экстремальных условиях.

Биологические исследования могут быть проведены на первом этапе изучения озера, целью которого является получение исходных данных, необходимых для проектирования нейтринного детектора внутри озера. Для проведения биологических исследований необходимо произвести отбор проб воды с разных глубин и отбор проб донных отложений. Отбор целесообразно проводить с помощью бурового оборудования после завершения буровых работ. Это позволит не заполнять скважину незамерзающей заливочной (силиконовой) жидкостью. Трубопровод с циркулирующей в нём нагретой жидкостью может быть использован для погружения в озеро пробоотборников и модулей с измерительными приборами и одновременно предотвратит замерзание воды в скважине.

После входа тепловой буровой коронки в озёрную воду комбинированный тепловой буровой снаряд на непродолжительное время извлекается из скважины. К стыковочному узлу трубопровода вместо тепловой буровой коронки подсоединяется корпус лебёдки, к тросу которой закрепляется пробоотборник воды или осадочных пород, либо измерительный приборный модуль (Рис. 126). После этого трубопровод с циркулирующей в нём нагретой жидкостью снова погружается в скважину до поверхности озера, после чего пробоотборник опускается в озеро с помощью лебёдки. Трос лебёдки имеет длину, которая позволяет опустить пробоотборник до дна озера.

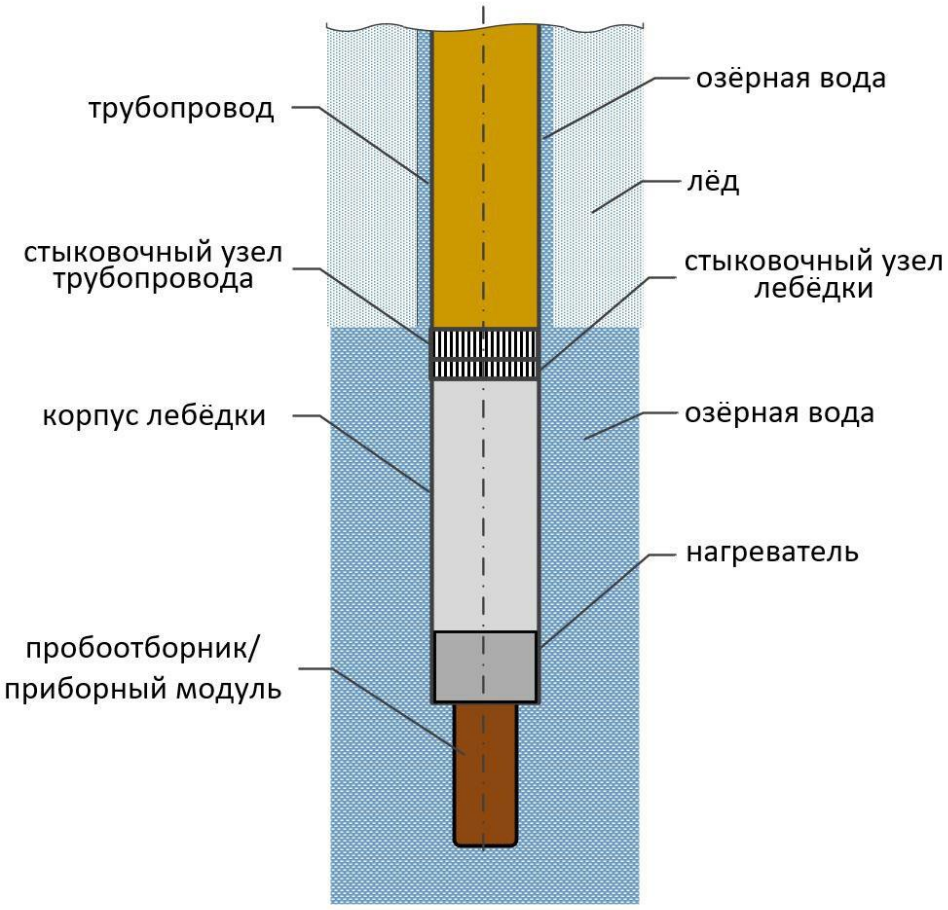


Рис. 126. Схема присоединения лебёдки с пробоотборником к трубопроводу

Для отбора проб или проведения измерений в стороне от скважины вместо лебёдки может быть использован автономный глубоководный дрон. Схема присоединения глубоководного дрона приведена на Рис. 127. К самому дрону пристыковывается пробоотборник или измерительный приборный модуль.

Конструкция стыковочного узла трубопровода должна обеспечивать не только присоединение и подачу напряжения на тепловую буровую коронку, но и пристыковку лебёдки и автономного глубоководного дрона. Глубоководный дрон должен обладать достаточной автономностью для доставки измерительных приборов на большие расстояния от скважины. Практический опыт, приобретённый во время эксплуатации дрона, может быть использован при проектировании дрона, предназначенного для монтажа оборудования нейтринного детектора в озере.

Для выполнения комплексных исследований необходимо будет выполнить разработку и изготовление глубоководных модулей с измерительными приборами, которые погружаются в озеро через

холодную скважину относительно небольшого диаметра. Для проведения исследований внутри озера потребуются модуль с видеокамерой, радиоакустический зонд, гидрофизический модуль, оборудованный датчиками для измерения температуры, давления, солёности воды, содержания растворённых в воде газов.

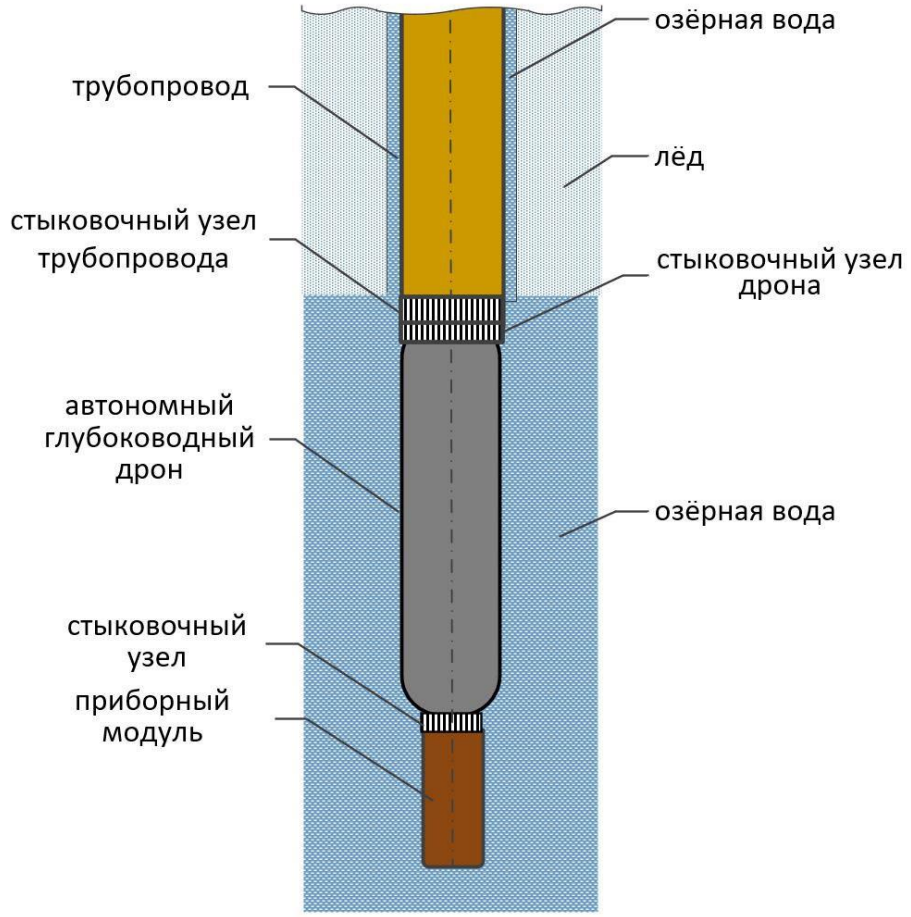


Рис. 127. Схема присоединения автономного глубоководного дрона

Условия пробоотбора в подледниковом озере Восток требуют применения специальных пробоотборных устройств. С этой целью был разработан и изготовлен пробоотборник [249] для отбора воды, поступающей в скважину после вскрытия озера. Устройство прошло испытание в забое существующей скважины к озеру, однако из-за загрязнённого состояния скважины вскрытие озера не проводилось и отбор пробы не состоялся. С учётом полученного в ходе испытаний опыта предложена усовершенствованная конструкция пробоотборника [250], который позволит извлекать с большой глубины не только воду, но и растворённый в ней при большом давлении газ. Внутренние полости пробоотборника

перед использованием обрабатываются озоном для очистки от внешней биоты.

Граница раздела «вода – осадок» является основным местом для обнаружения микроорганизмов и поэтому представляет особый интерес. С целью извлечения донных отложений со дна озёр разрабатываются различные устройства, в качестве примера можно привести пробоотборник для проведения исследований в озере Элсуэрт [251]. Для извлечения керна донных отложений из озера Восток предложено устройство, разработанное под условия пробоотбора из озера [252]. Устройство позволит осуществить отбор керна длиной до 50 см через ледовую скважину с минимальным диаметром 20 см с глубины, достигающей нескольких километров.

Работу с извлечёнными пробами следует проводить в соответствии с разработанными для этого процедурами в чистых помещениях с внедрением комплексных мер биологического контроля, который включает в себя идентификацию источников загрязнения путём создания локальной библиотеки загрязнителей.

Первая скважина, пробуренная с использованием комбинированного теплового снаряда, позволит отработать технологию скоростного бурения и экологически чистого проникновения в подледниковое озеро, а также выполнить исследования по поиску жизни в экстремальных условиях с отбором проб воды и осадочных пород из озера.

Подледниковые озёра Антарктиды

Помимо озера Восток [253] под ледниковым панцирем Антарктиды находится множество других озёр [254–259].

Исследования, проведённые с помощью спутника CryoSat-2, позволили обнаружить дополнительно к уже известным ещё 85 новых подледниковых озёр. Представление о количестве и расположении антарктических озёр даёт Рис. 128 [260].

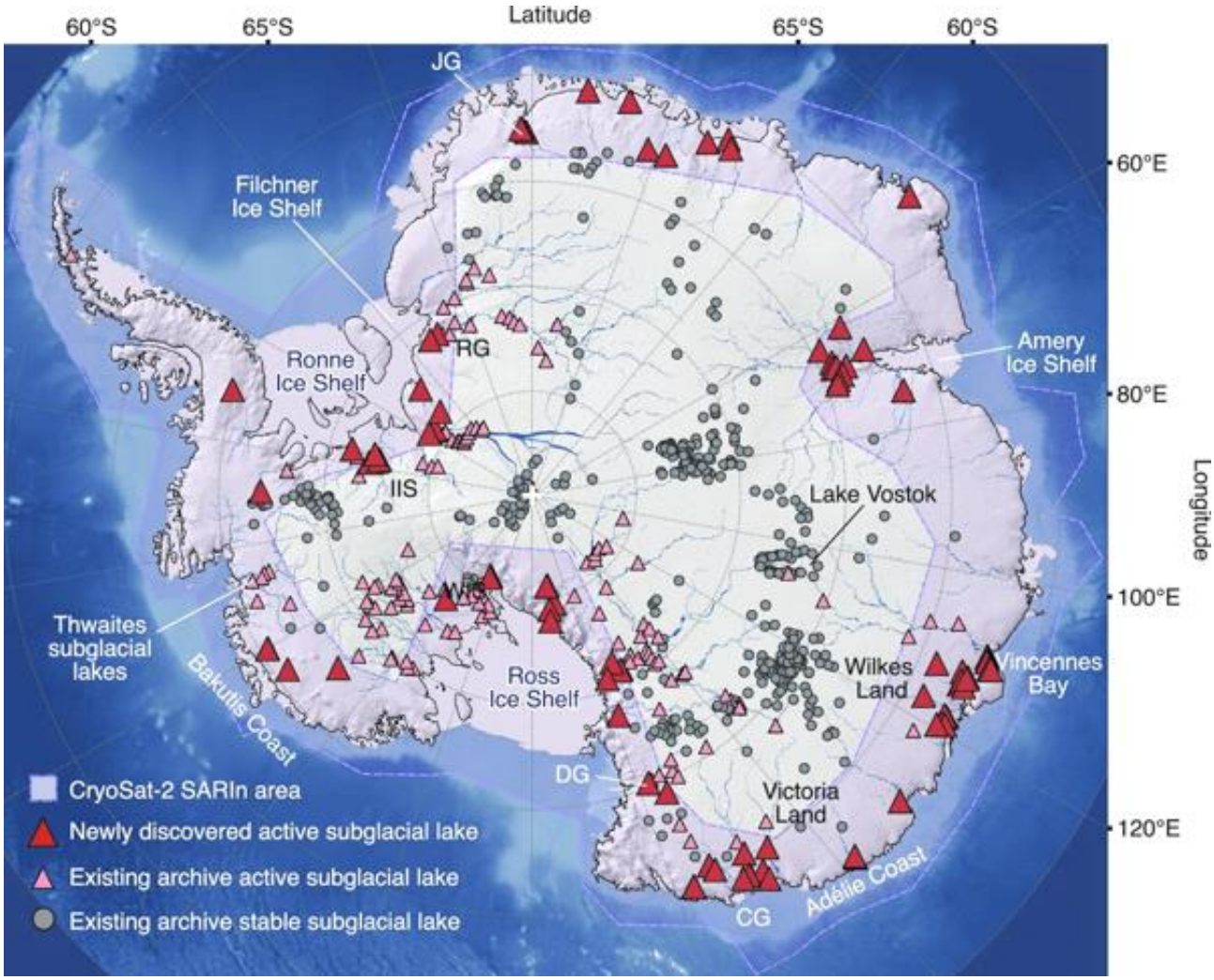


Рис. 128. Озёра Антарктиды

Наличие подледниковых озёр свидетельствует о том, что большие площади подошвы ледяного покрова подвержены таянию. Соседние подледниковые озёра могут соединяться между собой, обеспечивая подачу воды из одного озера в другое [261]. Напротив, группы озёр, удалённые друг от друга, будут полностью изолированы. Если биота подледниковых озёр берёт свое начало из надледникового льда, то вполне вероятно, что все озёра содержат

схожую биоту, которая подвергается адаптации к конкретным условиям в каждом озере. Однако если в базальных отложениях сохранилась биота доледникового периода, то существует вероятность, что эволюционные процессы приведут к образованию сообществ, уникальных для групп озёр.

Подледниковые озёра могут образовывать цепи, которые связаны с крупномасштабной динамикой ледникового покрова. Примером такой цепи может служить система озёр в Западной Антарктиде, в которую входят озёра Уилланс и Мерсер. Озёра сохраняют воду в течение месяцев или десятилетий, а затем эпизодически сбрасывают её вниз по течению [262].

В 2013 году было осуществлено проникновение в подледниковое озеро Уилланс. Озеро находится примерно под 800-метровым слоем антарктического льда, имеет глубину 1,5–2 м и изолировано от источников фотосинтезирующего органического вещества, необходимого для поддержания жизни. Таким образом, разнообразные микробные экосистемы в озере и отложениях зависят от сочетания реликтовых органических веществ морского происхождения и энергии, получаемой из минералов. Одновременное присутствие водорода и перекиси водорода, наряду с высокой концентрацией поверхностных радикалов в минералах, позволяет предположить, что расщепление воды на обработанных ледником минеральных поверхностях увеличивает концентрацию окислительно-восстановительных пар в результате реакций между горной породой и водой и может обеспечить механизм получения энергии, доступной микробным экосистемам. Шлифование подледниковых пород приводит к выделению биоутилизируемых газов, таких как H_2, CO_2 и CH_4. Проведённые исследования показали, что при измельчении и увлажнении мелкозернистых отложений подледниковых озёр образуется целый спектр газов, а также органических и неорганических растворённых веществ, которые легко усваиваются подледниковыми микроорганизмами [263].

Микроорганизмы, найденные в образцах, извлечённых из озера, обладали высоким морфологическим разнообразием. Образцы воды, окрашенные ДНК-связывающим красителем, выявили как длинные, так и короткие нити, тонкие и толстые палочки (шириной до 750–1 500 нм), спирали, вибрионы, кокки и

диплококки. Анализ последовательностей гена *16S rRNA*, надёжного филогенетического маркера, выявил разнообразное сообщество, состоящее из бактерий и архей, в котором доминируют таксоны, связанные с хемолитоавтотрофными видами [264].

В 2018 году было вскрыто и исследовано подледниковое озеро Мерсер, которое находится в ~ 60 км от озера Уилланс. Озеро имеет площадь 143 км^2. Глубина скважины к озеру составила 1 087 м, а глубина слоя воды в месте расположения скважины равнялась 15 м. Со дна озера было извлечено 206 см керна осадочного материала. Обнаружено, что сообщества бактерий и архей в поверхностных отложениях более многочисленны и разнообразны, а их состав значительно отличается от тех, что находятся глубже в толще отложений. Наиболее распространённые таксоны относятся к хемолитоавтотрофам, способным окислять восстановленные соединения азота, серы и железа кислородом. Концентрации растворённого метана и органического углерода, а также содержание воды в отложениях являются наиболее надёжными предикторами таксономического состава и состава сообщества. Детальное описание проведённых биологических исследований осадочного материала из подледникового озера Мерсер содержится в статье [265].

Вопросы экологии

При проникновении в подледниковое озеро необходимо следовать рекомендациям Научного комитета по антарктическим исследованиям по проведению разведки и научного исследования подледниковых водных сред [266]. Вопросам экологически чистого проникновения в подледниковые озёра уделяется большое внимание [267–269].

Вода может течь подо льдом, скапливаться в озёрах на водоразделах, и загрязнение одного участка может распространиться на подледниковые среды ниже по течению. При бурении до основания антарктических ледниковых щитов следует исходить из того, что базальный лёд залегает в жидкой воде (если нет доказательств обратного) и что эта вода является частью подледниковой дренажной сети, требующей высокого уровня защиты окружающей среды.

Большое внимание учёные уделяют возможности существования в подледниковых водах микробных сообществ, которые выживают в этих экстремальных условиях. Должны быть приняты меры предосторожности для предотвращения любых необратимых изменений биоты (включая внедрение чужеродных видов) или свойств среды обитания. Для защиты уникальных озёр и подледниковой водной среды необходимо свести к минимуму возможный ущерб и загрязнение подледниковой среды не только с точки зрения научной ценности, но и с точки зрения сохранения и защиты для будущих поколений.

С этой целью все планируемые виды деятельности должны пройти оценку воздействия на окружающую среду до начала реализации. Проекты, направленные на проникновение в подледниковую водную среду, потребуют первоначальной оценки воздействия на окружающую среду (Initial Environmental Evaluation) и последующей комплексной оценки воздействия (Comprehensive Environmental Evaluation), включая потенциальное воздействие на окружающую среду поверхностного лагеря.

Вся соответствующая информация должна быть доступна на международном уровне, а предложения представлены широкому кругу экспертов, чтобы использовались наилучшие доступные практики для реализации проекта.

Буровые жидкости и оборудование, которые попадут в подледниковую водную среду, следует очищать, насколько это практически осуществимо, и вести записи о тестах на стерильность (например, подсчёт бактерий методом флуоресцентной микроскопии на месте бурения). В качестве руководства по общей чистоте эти объекты не должны содержать больше микроорганизмов, чем их количество в эквивалентном объёме льда, который бурится для достижения подледниковой среды.

Для бурения ледников должны использоваться максимально чистые технологии бурения. Давление воды в озёрах следует оценивать до начала бурения, чтобы избежать загрязнения нисходящим потоком заливочной жидкости при вскрытии озера.

Планы и протоколы отбора проб должны быть оптимизированы, чтобы отбор проб предусматривал максимальное междисциплинарное использование образцов. Протоколы должны быть

разработаны таким образом, чтобы минимизировать нарушение химической и физической структуры и свойств подледниковой водной среды во время исследований и отбора проб воды и донных отложений.

Рассмотрим наиболее опасные с экологической точки зрения ситуации, которые могут возникнуть в процессе проникновения в озеро, и меры по их предотвращению.

Попадание биологических, химических и механических загрязнений из окружающей среды в воду подледникового озера.

Контакт с водой буровой жидкости, как потенциального носителя загрязнений, исключается использованием теплового бурового снаряда с герметичным замкнутым контуром циркуляции нагретой жидкости. Внесение в озеро внешних загрязнений буровым и научным оборудованием предотвращается проведением механической, химической и биологической очистки.

Для удаления загрязнений с внешних поверхностей бурового оборудования и научных модулей непосредственно перед погружением в скважину производится их очистка с использованием жидкостей, таких, например, как пентан. Биологическая обработка внешних поверхностей выполняется ультрафиолетом. Очистка внешней поверхности оборудования проводится в изолированном боксе, установленном над входом в скважину. Обработка внутренних полостей пробоотборников производится методом озонирования.

Корпуса пробоотборников и приборных модулей изготавливаются из нержавеющей стали или титана с повышенным классом чистоты поверхности. Конструкция научного оборудования должна обеспечивать надлежащую очистку поверхностей и исключать возможность переноса заливочной жидкости в «карманах».

Попадание патогенных микроорганизмов из озера в окружающую среду на поверхности.

С целью исключения контакта с окружающей средой потенциально опасных для современной биоты реликтовых микроорганизмов разрабатывается процедура обращения с отобранными из озера образцами воды и грунта. В качестве обеспечительной меры

следует рассматривать создание сертифицированной биологической лаборатории на полярной станции «Восток».

Попадание буровой жидкости в озёрную воду.

В процессе бурения нельзя полностью исключить потерю герметичности бурового снаряда. В этой ситуации принудительная циркуляция буровой жидкости в снаряде прекращается, и он извлекается на поверхность. Воздействие буровой жидкости минимизируется использованием в буровом снаряде экологически чистой незамерзающей силиконовой жидкости, которая впоследствии может быть удалена из скважины, поскольку является гидрофобной и располагается над водой по причине меньшей плотности.

В случае заполнения скважины силиконовой жидкостью для обеспечения её длительной эксплуатации плотность жидкости подбирается таким образом, чтобы при заполнении скважины до уровня поверхности она не могла полностью вытеснить воду из скважины в озеро и в скважине оставался столб воды порядка 10 м. Гидрофобные свойства силиконовой жидкости не позволяют ей проникать в воду и обеспечивают чёткую границу раздела жидкостей.

Опускаемое оборудование, прежде чем попасть в озеро, будет проходить через слой воды в нижней части скважины, где с его поверхности смывается плёнка силиконовой жидкости. Поскольку силиконовая жидкость имеет плотность меньше, чем у воды, она поднимается вверх к границе раздела жидкостей.

Глава 2. Палеоклиматические исследования

Кроме исследования подледниковых озёр большой научный интерес представляет изучение палеоклимата Земли [270, 271]. Ледовый керн, извлечённый из верхних 3 310 м ледника над озером Восток, позволил получить климатические данные за последние 420 000 лет. По данным работы [272] на Рис. 129 представлен график температуры (разница с современной приземной температурой), полученной на основе стабильного изотопного состава льда, и графики содержания парниковых газов CO_2 (ppmv) и CH_4 (ppbv) в захваченных пузырьках воздуха. Недавнее быстрое повышение

содержания CO_2 и CH_4 до нынешнего уровня отражает антропогенную деятельность, начавшуюся с 1850-х годов.

Изотопный состав осадков используется как косвенный показатель температуры воздуха. На графиках Рис. 129 видна явно выраженная корреляция между приземной температурой воздуха и концентрациями CO_2 и CH_4 в атмосфере. Исходя из среднего времени, отделяющего каждый тёплый период, на графиках можно наблюдать наличие циклов с периодичностью около 100 тыс. лет.

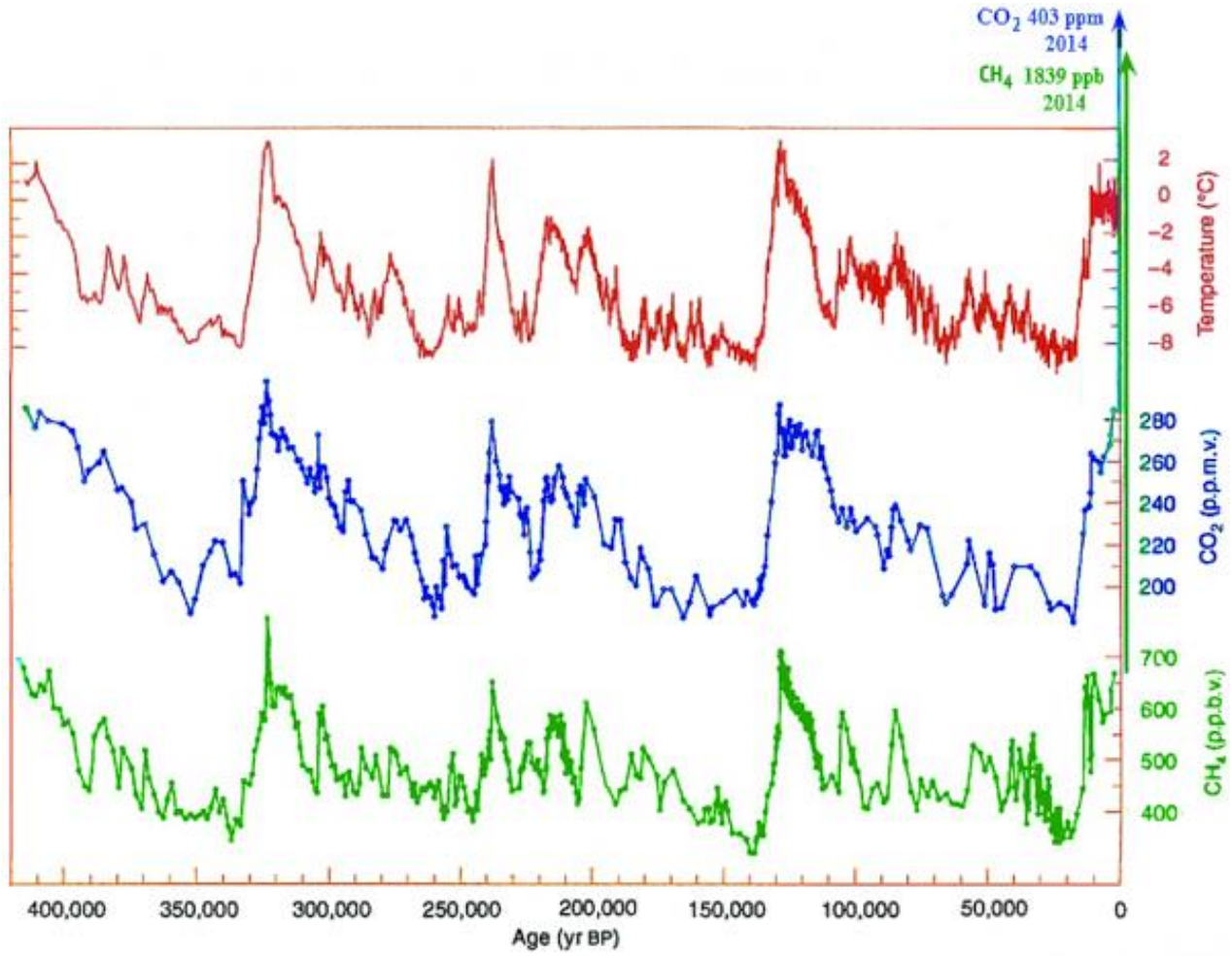


Рис. 129. Климатические данные за последние 420 000 лет

Приземная температура воздуха реконструируется по изотопному составу льда, образовавшегося из атмосферных осадков. Изотопный состав осадков формируется за счёт влагообмена воздушных масс с поверхностью в процессе фазовых переходов, во время которых происходит изотопное фракционирование. Соотношение изотопов в осадках зависит от температуры, при которой протекали процессы испарения, конденсации, таяния и замерзания.

Чтобы выразить изотопный состав образца относительно стандарта, используется формула

$$\delta = \frac{R_{\text{обр}} - R_{\text{ст}}}{R_{\text{ст}}},$$

где δ – δD, $\delta^{18}O$ или $\delta^{17}O$, $R_{\text{обр}}$ и $R_{\text{ст}}$ – абсолютная концентрация изотопа в образце и в стандарте [273].

Лёд, содержащий непрерывные климатические данные за последние 1,5 млн лет, находится в Центральной Антарктиде [274, 275]. Наиболее вероятные места залегания древнейшего льда находятся на Куполе А в районе станции «Куньлунь» и на Куполе Б недалеко от станции «Восток». Примерно 0,9–1,0 млн лет тому назад произошло изменение периода климатических колебаний с 40 на 100 тысяч лет, что может быть связано с изменением концентрации парниковых газов в атмосфере. Данные о газовом составе атмосферы в то время можно получить путём исследования ледяных кернов. Изменение периода цикличности климата на Земле представляет большой научный интерес.

Обнаружение льда возрастом 1,2 млн лет в нижней части керна над озером Восток на глубине 3 537 м [276] подтвердило, что такой лёд действительно сохранился до настоящего времени. В интервале 3 310–3 537 м (возраст 0,42–1,2 млн лет) керн показывает нарушенное залегание и перемешивание ледяных слоёв, что исказило климатический сигнал [277]. Факт сохранения древнего льда в основании Восточно-Антарктического ледникового щита позволяет предположить, что в районе Купола Б древние слои льда могут существовать в ненарушенном виде [278].

Купол Б расположен в 300 км к западу от станции «Восток», имеет высоту 3 807 м над уровнем моря и толщину льда ~ 2 500 м (Рис. 130). Линия тока льда от Купола Б проходит через скважину над озером Восток. *Тонкие линии* на рисунке показывают контуры высот, расположенные с шагом 50 м. Согласно расчётам возраст ледника на уровне 60 м над ледяной подошвой превосходит 1 млн лет, а температура подошвы ледника находится ниже точки плавления –1,8 °C при давлении 23 МПа. Для наиболее вероятного сценария, при котором скорость накопления осадков – 1,8 г · см$^{-2}$ · год$^{-1}$, эффективная температура поверхности льда

составляет –64 °C, геотермальный поток тепла равен 60 мВт · м$^{-2}$, возраст ледника достигает 1,4 млн лет, а температура основания ледника составляет около –13 °C. Благодаря относительно низкой температуре льда можно ожидать практически ненарушенную климатическую последовательность для древнего льда. У льда возрастом 1,4 млн лет на глубине 2 440 м в районе Купола Б временной интервал в 40 000 лет заключён в слое льда толщиной ~ 290 см. Максимальная оценка длины диффузии внутри льда составляет 5,2 см. Колебания с периодом < 1 500 лет будут полностью стёрты диффузией [279].

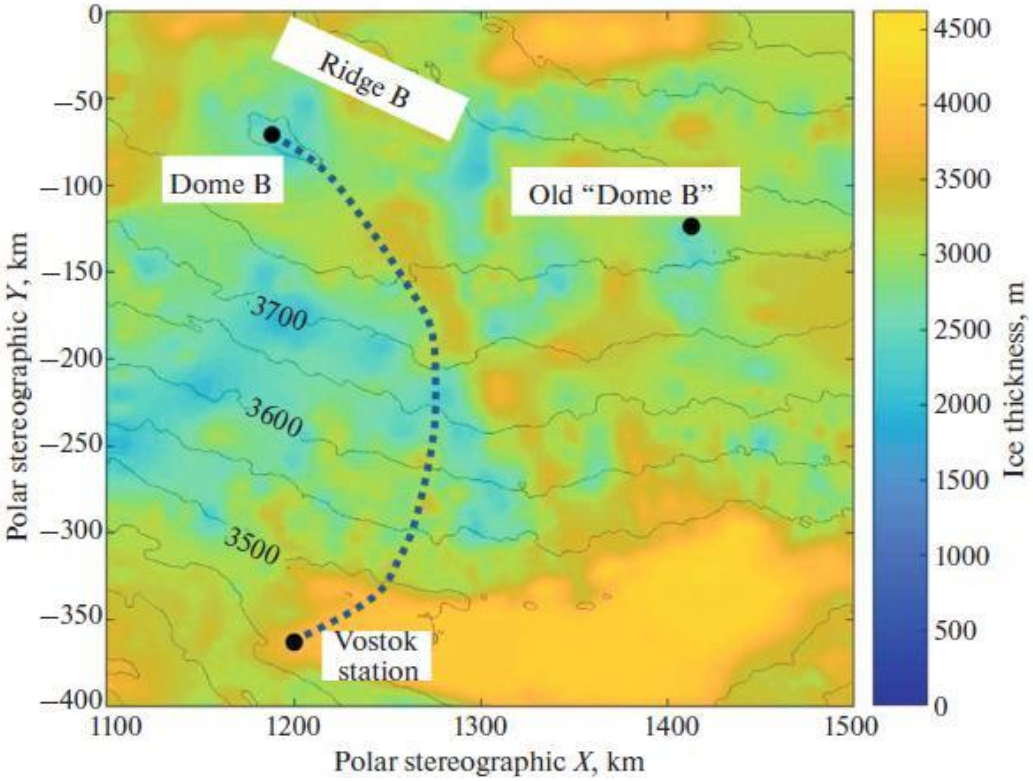


Рис. 130. Карта толщины льда между Куполом Б и озером Восток

В ходе выполнения проекта EPICA были извлечены керны льда на Куполе С (Восточная Антарктида), которые предоставили данные о климате и окружающей среде за последние 800 000 лет [280]. Поиску древнего льда в Антарктиде посвящён ряд научных публикаций [281–284].

На поиск льда возрастом более 1,5 млн лет с сохранившейся стратиграфией направлен проект SUBGLACIOR [285]. Проект предусматривает бурение одной скважины в течение летнего сезона. Глава 1 Части IV содержит описание электромеханического

бурового снаряда сплошного бурения, который дополнительно оснащается небольшим нагревателем для плавления льда и лазерным спектрометром для измерений в процессе бурения *in situ* изотопного состава воды и концентрации CH_4 в захваченном атмосферном газе. Значения δD служат базовым климатическим сигналом глубокого льда. Изменение этого параметра с глубиной залегания льда позволяет определить климатические циклы в прошлом и сравнить их с морскими эталонными данными. Содержание атмосферного CH_4 демонстрирует значительные изменения между ледниковым и межледниковым периодами. Поскольку CH_4 фиксируется в захваченных пузырьках и клатратах, а также из-за процессов фирнификации, изменение его содержания смещено с глубиной по сравнению с сопутствующими климатическими изменениями, зафиксированными в δD. Наблюдение этого сдвига является основным показателем того, что слои льда всё ещё находятся в хорошем стратиграфическом порядке. Таким образом, эти два сигнала позволят получить три важных фрагмента информации: возраст льда в зависимости от глубины; стратиграфическую целостность ледовой летописи и ключевые климатические и атмосферные сигналы, возможно, датируемые периодом в 1,5 млн лет.

Новые возможности для поиска древнего льда с целью изучения истории атмосферы и палеоклимата Земли открываются с использованием технологии скоростного экологически чистого бурения, которой посвящена Глава 3 Части IV. Лазерный спектрометр для измерения *in situ* δD и содержания CH_4 может быть размещён между тепловой буровой коронкой и гибким трубопроводом. Информация от него будет передаваться на поверхность в процессе бурения с точной привязкой к глубине залегания льда. Учитывая мобильность теплового бурового комплекса и высокую скорость бурения, поиск может быть проведён в течение одного летнего сезона в нескольких точках наиболее вероятного нахождения древнего льда с сохранённой стратиграфией. После обнаружения древнего льда можно будет выполнить бурение электромеханическим буровым снарядом с извлечением ледяных кернов с целью их последующего исследования. Бурение льда колонковым буровым снарядом может занять несколько лет и потребует заполнения скважины незамерзающей заливочной жидкостью.

Заключение

Физика нейтрино высоких и сверхвысоких энергий изучает такие фундаментальные вопросы, как симметрии Стандартной модели, стабильность нейтрино, природа тёмной материи, взаимодействие нейтрино с космическим фоном, энергетический спектр нейтрино, анизотропия нейтринного спектра, соотношение ароматов нейтрино, источники космических лучей сверхвысоких энергий, существование ГЗК-предела.

Умение регистрировать высокоэнергетические нейтрино открывает широкие возможности для исследований в области астрофизики, частиц сверхвысоких энергий, «новой физики», квантовой структуры Вселенной. На решение сложной задачи регистрации нейтрино сверхвысоких энергий ориентирована разработка концепции современного нейтринного телескопа Vostok с оптическим и акустическим детекторами, которые будут располагаться в озере Восток и леднике над ним. Размещение детекторов нового телескопа в низкофоновых оптических и акустических условиях, эффективное экранирование ледником, применение современных чувствительных сенсоров и увеличение объёма до десятков кубических километров в совокупности обеспечат характеристики, необходимые для изучения вопросов, связанных с нейтрино сверхвысоких энергий.

Для реализации концепции нейтринного телескопа в Антарктиде потребовалась разработка новой экологически чистой технологии скоростного глубокого бурения льда и проникновения в подледниковое озеро Восток. Разработанная технология может использоваться для размещения оптических модулей в озере Восток и акустических сенсоров внутри ледника. В отличие от используемой в Антарктиде технологии бурения льда горячей водой с ограниченной глубиной бурения, новая технология позволяет производить тепловое бурение скважин глубиной 4 км. С помощью экологически чистой технологии бурения станет возможно выполнить столь ожидаемые исследования, направленные на поиск жизни в экстремальных условиях реликтового подледникового озера Восток. Новая технология бурения открывает и новые возможности

для проведения исследований большого количества подледниковых озёр Антарктиды.

Концепция оптического нейтринного детектора предполагает размещение оптических модулей в подледниковом озере Восток в условиях экстремально низкого светового фона и фона от потока заряженных частиц, которые будут экранироваться многокилометровым ледником над озером. В отличие от оптического детектора IceCube внутри ледника на Южном полюсе, для которого потребовалось бурение большого количества глубоких скважин, размещение гирлянд с оптическими модулями в подледниковом озере потребует бурения всего двух скважин. Скважины заполняются незамерзающей экологически чистой силиконовой жидкостью с целью их использования в течение длительного времени.

В качестве оптических сенсоров предлагается рассмотреть использование современных матриц с кремниевыми фотоумножителями, квантовая эффективность которых в 2 раза превышает эффективность ФЭУ. Оптические модули с видеокамерами, оснащёнными мегапиксельными матрицами с высокой квантовой эффективностью, образуют внутри детектора единичные наблюдаемые объёмы, что позволит повысить точность определения энергии, лептонного аромата и направления к источнику нейтрино сверхвысоких энергий.

Единичный объём, наблюдаемый оптическим модулем, может достигать ~ 500 000 м^3, а полный геометрический объём оптического детектора в озере будет равен 21 км^3. Это позволит увеличить статистику регистрации высокоэнергетичных нейтрино по сравнению с существующими детекторами с объёмом 1 км^3 и строящимися детекторами с геометрическим объёмом ~ 8 км^3 (IceCube-Gen2, TRIDENT).

Одним из главных параметров, который определяет количество и расположение оптических модулей детектора в озере, является длина затухания черенковского света в воде. Для проектирования детектора потребуется провести измерения длины затухания черенковского света, вертикального температурного профиля воды, скорости и направления течений на разных глубинах, толщины водного слоя в месте размещения нейтринного детектора.

Необходимо выполнить исследования рельефа дна и нижней поверхности льда, изучить структуру дна озера.

Перспективным подходом для регистрации крайне редких событий взаимодействия космогенных нейтрино сверхвысоких энергий со средой является создание сверхбольшого детектора, использующего акустический метод. Пространственная решётка из акустических датчиков позволит регистрировать сигналы с последующим реконструированием энергии и направления движения нейтрино.

Концепция акустического детектора нейтрино с энергиями $E_\nu \geq 10^{19}$ эВ предполагает размещение акустических сенсоров в леднике толщиной около 4 км над озером Восток в условиях относительно низкого акустического фона по сравнению с аналогичными нейтринными детекторами морского базирования. При этом амплитуда термоакустического импульса внутри льда превышает амплитуду импульса в воде в 32 раза при одинаковой энергии нейтрино.

Размещение сенсоров в леднике потребует бурения большого количества скважин с использованием разработанной скоростной экологически чистой технологии бурения льда. Сенсоры будут погружаться в образовавшуюся в результате плавления льда воду и замерзать внутри образовавшегося в скважине льда. Большая длина затухания акустического сигнала даёт возможность располагать скважины на большом расстоянии друг от друга, что позволит создать нейтринный детектор с эффективным объёмом порядка 100 км^3. Такой объём детектора значительно повышает вероятность регистрации редких событий взаимодействия крайне низкого потока нейтрино сверхвысоких энергий с веществом.

Идеальная акустическая решётка должна состоять не из отдельных гидрофонов, а из гирлянд, чувствительных к акустическим сигналам равномерно по всей длине. С этой целью в качестве акустических чувствительных элементов предлагается рассмотреть возможность применения распределённых волоконно-оптических датчиков, которые могут значительно повысить пространственную разрешающую способность нейтринного детектора.

Проектные характеристики нейтринного детектора могут быть определены после уточнения параметров акустических датчиков,

измерения длины затухания акустического сигнала различной частоты, уровня акустического фона, скорости звука внутри льда, температурного поля ледника и других параметров.

Нейтринный телескоп Vostok будет включать оптический детектор с геометрическим объёмом 21 км^3 в озере Восток и акустический детектор объёмом ~ 100 км^3 в леднике над озером. В будущем телескоп может быть дополнен радиоволновым детектором нейтрино, расположенным на поверхности.

Фактором, способствующим реализации проекта нейтринного телескопа в центральной части Антарктиды, является наличие нового зимовочного комплекса станции «Восток» недалеко от места размещения нейтринных детекторов. Внутриконтинентальная станция, в отличие от прибрежных полярных станций, требует привлечения значительных финансовых и материальных ресурсов для обеспечения круглогодичной работы. Эффективность использования этих ресурсов оценивается количеством и научной значимостью работ, проводимых на станции. Представляется логичным подходом использовать действующую логистическую схему доставки грузов, телекоммуникационное обеспечение и современную инфраструктуру зимовочного комплекса для размещения в нём оборудования нейтринного телескопа и обслуживающего персонала.

Созданию нейтринного детектора в озере предшествуют геофизические и биологические исследования. Проект нейтринного телескопа сопрягается с важным научным проектом, задача которого заключается в получении новых знаний о жизни микроорганизмов в экстремальных изолированных условиях. Поиск и изучение жизни является важным направлением биологических исследований в озере Восток. Существует вероятность обнаружения микроорганизмов в экстремальных условиях озера, находящегося более 15 млн лет под толщей ледника. ДНК микроорганизмов могут быть использованы в качестве генетического материала для создания лекарственных препаратов с новыми свойствами. Результаты исследований реликтовой ДНК могут дать уникальную информацию для продления жизни людей, которые, достигнув высокого профессионального и интеллектуального уровня

развития, стареют и уходят из жизни, теряя возможность внести полноценный вклад в развитие цивилизации.

Биологические исследования подледникового озера Восток дадут дополнительные знания в области астробиологии о возможных формах жизни на спутниках Европа и Энцелад, а также на других подобных космических объектах, которые содержат воду под многокилометровым слоем льда.

Условия отбора проб из озера Восток осложнены большой протяжённостью холодной ледяной скважины малого диаметра, большой глубиной водного бассейна и высоким давлением. Применительно к этим условиям разработаны специальные устройства для извлечения керна донных отложений и отбора проб воды.

Особое внимание уделяется экологически чистому проникновению в подледниковое озеро и проведению в нём научных исследований. Проводимые работы следует организовать таким образом, чтобы не допустить поступления биологических, химических и механических загрязнений из окружающей среды в озёрную воду, исключить попадание патогенных микроорганизмов из озера в окружающую среду на поверхности, предотвратить загрязнение воды буровой или заливочной жидкостью.

Большой научный интерес представляет изучение палеоклимата Земли с помощью кернов древнего льда. Задача поиска древнего льда с ненарушенной климатической последовательностью может быть решена использованием разработанной экологически чистой технологии скоростного глубокого бурения льда, Лёд возрастом порядка 1,4 млн лет предположительно находится в районе Купола Б, в 300 км к западу от станции «Восток». После обнаружения места залегания древнего льда будет проводиться извлечение ледяных кернов способом колонкового электромеханического бурения, на которое потребуется несколько лет.

Нейтринный проект влечёт за собой развитие целого спектра мультидисциплинарных научно-исследовательских работ в Антарктиде. Как видно из представленного в книге материала, создание нейтринных детекторов нового поколения для изучения астрофизических нейтрино оказывается органично связано с биологическими исследованиями в озере Восток, изучением других

подледниковых озёр Антарктиды, проведением работ, направленных на изучение палеоклимата Земли.

Нейтринный телескоп значительно повысит научную составляющую внутриконтинентальной полярной станции «Восток», превратит её в многоцелевой научно-исследовательский центр на передовых рубежах мировой науки.

Автор книги надеется, что она послужит импульсом к созданию новых инструментов для исследования строения Вселенной и изучения Антарктиды.

Список сокращений

ACoRNE – **A**coustic **Co**smic **R**ay **N**eutrino **E**xperiment
AMADEUS – **A**NTARES **M**odules for the **A**coustic **De**tection **U**nder the **S**ea
Baikal-GVD – **Baikal G**igaton **V**olume **D**etector
DISC – **D**eep **I**ce **S**heet **C**oring
EPICA – **E**uropean **P**roject for **I**ce **C**oring in **A**ntarctica
HUNT – **H**uge **U**nderwater high-energy **N**eutrino **T**elescope
KM3Net ARCA – **Km^3 Ne**utrino **T**elescope **A**stroparticle **R**esearch with **C**osmics in the **A**byss
KM3Net ORCA – **Km^3 Ne**utrino **T**elescope **O**scillation **R**esearch with **C**osmics in the **A**byss
LIV – **L**orentz **I**nvariance **V**iolation
NEON – **Ne**utrino **O**bservatory in the **N**anhai
P-ONE – **P**acific **O**cean **N**eutrino **E**xperiment
RADIX – **R**apid **A**ccess **D**rilling and **I**ce e**x**traction
RAID – **R**apid **A**ccess **I**ce **D**rill
SADCO – **S**ea **A**coustic **D**etector of **C**osmic **O**bjects
SALSA – **S**ubglacial **A**ntarctic **L**akes **S**cientific **A**ccess
SAUND – **S**tudy of **A**coustic **U**ltra–High Energy **N**eutrino **D**etection
SiPM – **Si**licon **P**hoto**M**ultiplier
SME – **S**tandard-**M**odel **E**xtension
SPAD – **S**ingle-**P**hoton **A**valanche **D**iode
SPATS – **S**outh **P**ole **A**coustic **T**est **S**etup
TRIDENT – **Tr**op**i**cal **De**ep-sea **N**eutrino **T**elescope
WISSARD – **W**hillans **I**ce **S**tream **S**ubglacial **A**ccess **R**esearch **D**rilling
ПМС – **п**олиди**м**етил**с**илоксановая (силиконовая) жидкость

Перечень иллюстраций

Рис. 1. Лептоны 15
Рис. 2. Спектры нейтрино различного происхождения 21
Рис. 3. Распространение нейтрино во Вселенной 23
Рис. 4. Классификация моделей «новой физики» нейтрино 25
Рис. 5. Образование гамма-лучей и нейтрино в струе активного ядра Галактики 27
Рис. 6. Взаимодействие ν_μ со средой 30
Рис. 7. Фронт волны черенковского излучения 35
Рис. 8. Моделирование черенковского света при взаимодействии нейтрино со средой 35
Рис. 9. Оптический модуль детектора KM3NeT 39
Рис. 10. Блок гирлянд детектора ORCA 40
Рис. 11. Гирлянда с оптическими модулями 40
Рис. 12. Два соседних блока детекторов нейтринного телескопа ARCA 41
Рис. 13. Схема детектора Baikal-GVD 44
Рис. 14. Устройство оптического модуля нейтринного телескопа Baikal-GVD 46
Рис. 15. Детекторы IceTop, IceCube Array, DeepCore 48
Рис. 16. Проект IceCube-Gen2 50
Рис. 17. Оптический модуль IceCube с фотоэлектронным умножителем Hamamatsu R7081 51
Рис. 18. Оптический модуль IceCube-Gen2 52
Рис. 19. Нейтринный детектор P-ONE 53
Рис. 20. Кластер детектора, состоящий из 10 гирлянд 54
Рис. 21. Оптический модуль нейтринного детектора P-ONE 54
Рис. 22. План расположения гирлянд нейтринного детектора TRIDENT 55
Рис. 23. Оптический модуль нейтринного детектора TRIDENT 56
Рис. 24. Оптический модуль нейтринного детектора HUNT 57
Рис. 25. Диаграммы рассеяния света 58
Рис. 26. Результаты измерения длины затухания света в воде в зависимости от длины волны для различных локаций нейтринных детекторов 59

Рис. 27. Схемы систем для измерения оптических свойств воды 60
Рис. 28. Поглощение и рассеяние света в леднике 62
Рис. 29. Разрез антарктического континента..... 62
Рис. 30. Озеро Восток без ледникового покрова 63
Рис. 31. Геофизический разрез вдоль озера Восток..... 63
Рис. 32. Геофизический разрез поперёк озера Восток по линии тока ледника в месте расположения скважины 5Г 64
Рис. 33. Новый зимовочный комплекс станции «Восток» 65
Рис. 34. Локация детектора KM3NeT ARCA в Средиземном море 67
Рис. 35. Локация нейтринного детектора P-ONE в Тихом океане .. 67
Рис. 36. Локация нейтринного детектора Baikal-GVD в озере Байкал 68
Рис. 37. Локация нейтринного детектора TRIDENT в Южно-Китайском море 68
Рис. 38. Локация нейтринного детектора IceCube на Южном полюсе 68
Рис. 39. Локация нейтринного детектора в подледниковом озере Восток 69
Рис. 40. Место расположения нейтринного детектора относительно станции «Восток» 72
Рис. 41. Предварительный план расположения гирлянд в оптической решётке нейтринного детектора в озере Восток 72
Рис. 42. Возможные планы расположения гирлянд нейтринного детектора 73
Рис. 43. Планы расположения гирлянд нейтринных детекторов. 74
Рис. 44. Последовательность заполнения скважины заливочной жидкостью. Первый вариант 76
Рис. 45. Последовательность заполнения скважины заливочной жидкостью. Второй вариант 77
Рис. 46. Принципиальная транспортная схема скважины..... 78
Рис. 47. Схема размещения нейтринного детектора в подледниковом озере 79
Рис. 48. Схема расположения гирлянд в подледниковом озере .. 80
Рис. 49. Схема позиционирующего якоря 81

Рис. 50. Квантовая эффективность фотоэлектронного умножителя Hamamatsu R12199-02 в зависимости от длины волны света 83
Рис. 51. Фотоэлектронный умножитель Hamamatsu R7081 83
Рис. 52. Регистрация событий в нейтринном детекторе IceCube 84
Рис. 53. Принцип регистрации τ-нейтрино..... 85
Рис. 54. Регистрации двух последовательных вспышек черенковского света несколькими фотоэлектронными умножителями одного оптического модуля..... 85
Рис. 55. Временно́е разрешение сигнала 87
Рис. 56. Ячейка мегапиксельной матрицы с высокой квантовой эффективностью 87
Рис. 57. Квантовая эффективность SPAD-матрицы фирмы Canon в зависимости от длины волны 88
Рис. 58. Квантовая эффективность матрицы фирмы Hamamatsu в зависимости от длины волны 89
Рис. 59. Пример объектива с углом обзора 180° и мегапиксельной матрицы с высокой квантовой эффективностью 91
Рис. 60. Пример оптических дисторсий объектива с углом обзора 180°..... 91
Рис. 61. Схема регистрации световых сигналов с помощью видеомодуля..... 92
Рис. 62. Оптический и энергетический горизонты событий..... 92
Рис. 63. Схема оптического модуля 93
Рис. 64. Предполагаемые изображения черенковского света в результате взаимодействия со средой нейтрино различных ароматов 94
Рис. 65. Схема регистрации мюонного трека в единичных объёмах вокруг оптических модулей, расположенных в соседних гирляндах 94
Рис. 66. Время прохождения t_i светового сигнала до оптического модуля 95
Рис. 67. Геометрия каскада и акустического излучения 101
Рис. 68. Расчёт акустического импульса в воде от адронного каскада с энергией 10^{20} эВ на удалении 1 км для различного расстояния от плоскости распространения акустической волны.... 103

Рис. 69. Ограничения на поток нейтрино
сверхвысоких энергий 105
Рис. 70. Акустическая антенна AGAM..... 106
Рис. 71. Акустическая антенна MG-10 для подводной лодки.... 106
Рис. 72. Схема закрепления гидрофонов в эксперименте
ACoRNE..... 107
Рис. 73. Схема акустической установки в озере Байкал..... 108
Рис. 74. Примеры регистрации биполярных импульсов 109
Рис. 75. Распределение биполярных импульсов в зависимости
от зенитного угла..... 109
Рис. 76. Уровень акустического шума на глубине 150 м 110
Рис. 77. Временной профиль и спектр акустического
импульса 111
Рис. 78. Схема акустической установки SAUND..... 111
Рис. 79. Влияние рефракции на огибающую диска
акустического излучения..... 112
Рис. 80. Схема установки AMADEUS, расположенной
в кластере ANTARES..... 114
Рис. 81. Акустический модуль с шестью гидрофонами 115
Рис. 82. Схема гидрофона..... 115
Рис. 83. Оптический модуль детектора KM3NeT
с пьезокерамическим датчиком..... 116
Рис. 84. Четыре гирлянды SPATS в массиве гилянд
IceCube 117
Рис. 85. Схематическое устройство установки SPATS 118
Рис. 86. Измерения скорости звука для продольных и поперечных
волн на разных глубинах на частотах 5–25 кГц..... 121
Рис. 87. Эффективный объём акустического детектора..... 122
Рис. 88. Максимальная амплитуда акустического импульса
в воде озера Восток в зависимости от энергии нейтрино 124
Рис. 89. Зависимость амплитуды акустического импульса
от пройденной волной дистанции в пресной воде без учёта
затухания сигнала..... 124
Рис. 90. Максимальная амплитуда акустического импульса
в леднике в зависимости от энергии нейтрино и ожидаемый
уровень акустического фона..... 125

Рис. 91. Зависимость амплитуды акустического импульса
от расстояния с учётом длины затухания λ = 300 м
для нейтрино разных энергий..... 126
Рис. 92. Зависимость амплитуды акустического импульса
от расстояния с учётом длины затухания λ = 900 м
для нейтрино разных энергий..... 127
Рис. 93. Контуры акустического поля внутри льда
с порогом 9 мПа для нейтрино с энергиями 10^{18}, 10^{19} и 10^{20} эВ
при различных длинах акустического затухания (λ) 128
Рис. 94. Принципиальная схема расположения гирлянд
акустического детектора в леднике 129
Рис. 95. Схематическое устройство датчика АМ..... 130
Рис. 96. Чувствительность датчика АМ в зависимости от частоты
для различных углов относительно продольной оси датчика ... 130
Рис. 97. Сравнение отклика различных типов акустических
датчиков на биполярный импульс 131
Рис. 98. Датчик с пьезокерамическим элементом
и двухступенчатым усилителем..... 131
Рис. 99. Схема когерентного рефлектометра 133
Рис. 100. Конструкция датчика с мембраной..... 134
Рис. 101. Акустический и оптический детекторы нейтринного
телескопа Vostok 137
Рис. 102. Проекция акустических и оптических сигналов
на вертикальную плоскость..... 138
Рис. 103. Схема бурового комплекса скважины 5Г на станции
«Восток»..... 143
Рис. 104. Схема электромеханического колонкового бурового
снаряда 144
Рис. 105. Схема комбинированного бурового снаряда..... 147
Рис. 106. Технологическая схема циркуляции силиконовой
жидкости 148
Рис. 107. Схема циркуляции буровой жидкости при бурении
льда..... 150
Рис. 108. Принципиальная технологическая схема бурения
горячей водой 152
Рис. 109. Схема буровой установки на Южном полюсе 153

Рис. 110. Принципиальная схема бурового комплекса на озере Элсуэрт 154
Рис. 111. Схема винтового гидростатического двигателя 159
Рис. 112. Принципиальная схема турбобура 161
Рис. 113. Принципиальная схема бурения с использованием турбобура 162
Рис. 114. Принципиальная схема бурения горячей силиконовой жидкостью 167
Рис. 115. Температура силиконовой жидкости 169
Рис. 116. Диаметр скважины в зависимости от расстояния от забоя 169
Рис. 117. Принципиальная схема комбинированного теплового бурового снаряда для экологически чистого бурения и вскрытия подледникового озера 171
Рис. 118. Температура льда на различной глубине ледника над озером Восток 173
Рис. 119. Плотность теплового потока со стенок скважины в сторону ледника в зависимости от времени прогрева 175
Рис. 120. Температура теплоносителя на опускном участке гибкого трубопровода (t_1) и на подъёмном участке (t_2) 176
Рис. 121. Диаметр скважины в зависимости от расстояния от забоя 176
Рис. 122. Принципиальная схема буровой установки с комбинированным тепловым буровым снарядом 180
Рис. 123. Работа комбинированного теплового бурового снаряда 182
Рис. 124. Вертикальный разрез ледника вдоль линии движения льда над озером Восток 186
Рис. 125. Циркуляция пресной воды в озере Восток 187
Рис. 126. Схема присоединения лебёдки с пробоотборником к трубопроводу 190
Рис. 127. Схема присоединения автономного глубоководного дрона 191
Рис. 128. Озёра Антарктиды 193
Рис. 129. Климатические данные за последние 420 000 лет 199
Рис. 130. Карта толщины льда между Куполом Б и озером Восток 201

Перечень таблиц

Табл. 1. Основные характеристики заряженных лептонов 16
Табл. 2. Основные характеристики нейтрино 16
Табл. 3. Источники атмосферных нейтрино высоких энергий 22
Табл. 4. Результаты измерения длины затухания света в зависимости от длины волны в месте размещения детектора TRIDENT 56
Табл. 5. Проектные параметры детекторов сверхбольших объёмов 74
Табл. 6. Параметры фотоэлектронных умножителей 83
Табл. 7. Сравнение фотоэлектронного умножителя, кремниевого фотоумножителя и мегапиксельной кремниевой матрицы 91
Табл. 8. Горизонтальное расстояние между гирляндами 120
Табл. 9. Расчётные параметры бурения горячей силиконовой жидкостью 172
Табл. 10. Расчётные параметры бурения скважины комбинированным тепловым снарядом 176

Литература

1. *Zyla P.A., Barnett R.M., Beringer J. et al.* Review of Particle Physics // Prog. Theor. Exp. Phys. 2020. V. 2020. Iss. 8. Art. No. 083C01.
2. *Xiao D., Dai Z.G.* TeV–PeV Neutrino Oscillation of Low-Luminosity Gamma-Ray Bursts // Astrophys. J. 2015. V. 805. Art. No. 137.
3. *Mena O., Mocioiu I., Razzaque S.* Oscillation Effects on High-Energy Neutrino Fluxes from Astrophysical Hidden Sources // Phys. Rev. D. 2007. V. 75. Art. No. 063003.
4. *Bustamante M., Beacom J.F., Winter W*. Theoretically Palatable Flavor Combinations of Astrophysical Neutrinos // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. Iss. 16. Art. No. 161302.
5. *Beacom J.F., Bell N.F., Hooper D. et al.* Measuring Flavor Ratios of High-Energy Astrophysical Neutrinos // Phys. Rev. D. 2003. V. 68. Art. No. 093005.
6. *Pakvasa S., Rodejohann W., Weiler T.J.* Flavor Ratios of Astrophysical Neutrinos: Implications for Precision Measurements // JHEP. 2008. V. 02. Art. No. 005.
7. *Bustamante M., Gago A., Garay C.P.* Energy-Independent New Physics in the Flavour Ratios of High-Energy Astrophysical Neutrinos // JHEP. 2010. V. 04. Art. No. 066.
8. *Mehta P., Winter W.* Interplay of Energy Dependent Astrophysical Neutrino Flavor Ratios and New Physics Effects // JCAP. 2011. V. 03. Art. No. 041.
9. *Argüelles C.A., Katori T., Salvado J.* New Physics in Astrophysical Neutrino Flavor // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. Art. No. 161303.
10. *Gonzalez-Garcia M., Maltoni M., Martinez-Soler I. et al.* Non-Standard Neutrino Interactions in the Earth and the Flavor of Astrophysical Neutrinos // Astropart. Phys. 2016. V. 84. P. 15–22.
11. *Rasmussen R.W., Lechner L., Ackermann M. et al.* Astrophysical Neutrinos Flavored with Beyond the Standard Model Physics // Phys. Rev. D. 2017. V. 96. Iss. 8. Art. No. 083018.
12. *Li S.W., Bustamante M., Beacom J.F.* Echo Technique to Distinguish Flavors of Astrophysical Neutrinos // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. Art. No. 151101.
13. *Maki Z., Nakagawa M., Sakata S.* Remarks on the Unified Model of Elementary Particles // Prog. Theor. Phys. 1962. V. 28. Iss. 5. P. 870–880.

14. *Foot R., He X.G., Lew H. et al.* Model for a Light Z-Prime Boson // Phys. Rev. D. 1994. V. 50. P. 4571–4580.
15. *He X.G., Joshi G.C., Lew H. et al.* Simplest *Z*-Prime Model // Phys. Rev. D. 1991. V. 44. P. 2118.
16. *Foot R.* New Physics from Electric Charge Quantization? // Mod. Phys. Lett. A. 1991. V. 6. P. 527–530.
17. *Bustamante M., Agarwalla S.K.* Universe's Worth of Electrons to Probe Long-Range Interactions of High-Energy Astrophysical Neutrinos // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. No. 6. Art. No. 061103.
18. *Agostini M., Böhmer M., Bosma J. et al.* The Pacific Ocean Neutrino Experiment // Nat. Astron. 2020. V. 4. P. 913–915.
19. *Aartsen M.G. et al.* Measurement of the Multi-TeV Neutrino Cross Section with IceCube Using Earth Absorption // Nature. 2017. V. 551. P. 596–600.
20. *Bustamante M., Connolly A.* Extracting the Energy-Dependent Neutrino-Nucleon Cross Section above 10 TeV Using IceCube Showers // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. No. 4. Art. No. 041101.
21. *Anchordoqui L.A., Garcia Canal C.A., Goldberg H. et al.* Probing Leptoquark Production at IceCube // Phys. Rev. D. 2006. V. 74. Iss. 12. Art. No. 125021.
22. *Петков С. Т.* Процессы $\mu \to e + \gamma$, $\mu \to e + e + \bar{e}$, $\nu' \to \nu + \gamma$ в модели Вайнберга – Салама со смешиванием нейтрино. ОИЯИ Р2-9595. Дубна, 1976. 13 с.
23. *Ando S.* Decaying Neutrinos and Implications from the Supernova Relic Neutrino Observation // Phys. Lett. B. 2003. V. 570. P. 11.
24. *Fogli G.L., Lisi E., Mirizzi A. et al.* Three Generation Flavor Transitions and Decays of Supernova Relic Neutrinos // Phys. Rev. D. 2004. V. 70. Art. No. 013001.
25. *Katz U.F., Spiering Ch.* High-Energy Neutrino Astrophysics: Status and Perspectives // Prog. Part. Nucl. Phys. 2012. V. 67. P. 651–704.
26. *Aguilar J.A., Al Samaraib I., Albertet A. al.* Measurement of the Atmospheric Muon Flux with a 4 GeV Threshold in the ANTARES Neutrino Telescope. arXiv:0910.4843v1 [astro-ph.HE] 26 Oct 2009.
27. *Kalaczynski P., KM3NeT Collab*. Comparison of the Measured Atmospheric Muon Rate with Monte Carlo Simulations and Sensitivity Study for Detection of Prompt Atmospheric Muons with KM3NeT. arXiv:2107.09347v1 [hep-ex] 20 Jul 2021.

28. *Gaisser T., Honda M.* Flux of Atmospheric Neutrinos // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 2002. V. 52. P. 153–199.
29. *ANTARES Collab*. Zenith Distribution and Flux of Atmospheric Muons Measured with the 5-Line ANTARES Detector // Astropart. Phys. 2010. V. 34. Iss. 3. P. 179–184.
30. *IceCube Collab*. Observation and Characterization of a Cosmic Muon Neutrino Flux from the Northern Hemisphere Using Six Years of IceCube Data // Astrophys. J. 2016. V. 833. Iss. 1. Art. No. 3.
31. *ANTARES Collab*. Measurement of the Atmospheric ν_e and ν_μ Energy Spectra with the ANTARES Neutrino Telescope // Phys. Lett. B. 2021. V. 816. Art. No. 136228.
32. *IceCube Collab.* Time-Integrated Neutrino Source Searches with 10 Years of IceCube Data // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124. Art. No. 051103.
33. *Ackermann M. et al.* Fundamental Physics with High-Energy Cosmic Neutrinos. arXiv:1903.04333v2 [astro-ph.HE] 30 Jun 2019.
34. *Arguelles C.A. et al.* Fundamental Physics with High-Energy Cosmic Neutrinos Today and in the Future. arXiv:1907.08690v1 [astro-ph.HE] 19 Jul 2019.
35. *Zatsepin G., Kuzmin V.* Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays // JETP Lett. 1966. V. 4. No. 3. P. 78–80.
36. *Greisen K.* End to the Cosmic Ray Spectrum? // Phys. Rev. Lett. 1966. V. 16. No. 17. P. 748–750.
37. *Ackerman M. et al.* High-Energy and Ultra-High-Energy Neutrinos: a Snowmass White Paper. arXiv:2203.08096v1 [hep-ph] 15 Mar 2022.
38. *Alves Batista R. et al.* Open Questions in Cosmic-Ray Research at Ultrahigh Energies // Front. Astron. Space Sci. 2019. V. 6. Art. No. 23.
39. *HiRes Collab*. First Observation of the Greisen–Zatsepin–Kuzmin Suppression // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. Art. No. 101101.
40. *Pierre Auger Collab.* Features of the Energy Spectrum of Cosmic Rays above $2.5 \cdot 10^{18}$ eV Using the Pierre Auger Observatory // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 125. No.12. Art. No. 121106.
41. *Berezinsky V., Zatsepin G.* Cosmic Rays at Ultrahigh-Energies (Neutrino?) // Phys. Lett. B. 1969. V. 28. P. 423–424.
42. *Engel R., Seckel D., Stanev T.* Neutrinos from Propagation of Ultrahigh-Energy Protons // Phys. Rev. D. 2001. V. 64. Art. No. 093010.

43. *McKellar B.H.J., Garbutt M., Stephenson G.J. et al.* Neutrino Clustering and the *Z*-Burst Model. arXiv:hep-ph/0106123v2 2 Jul 2001.
44. *Sajjad Athar M., Fatima A., Singh S.K.* Neutrinos and Their Interactions with Matter // Prog. Part. Nucl. Phys. 2023. V. 129. Art. No. 104019.
45. *Renton P.* Electroweak Interactions: an Introduction to the Physics of Quarks and Leptons. New York: Cambridge University Press, 1990. 596 p.
46. *Halzen F., Klein S.R.* IceCube: an Instrument for Neutrino Astronomy // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. Iss. 8. Art. No. 081101.
47. *Klein S.* Suppression of Bremsstrahlung and Pair Production Due to Environmental Factors // Rev. Mod. Phys. 1999. V. 71. Iss. 5. P. 1501–1538.
48. *Alvarez-Muniz J., Zas E.* The LPM Effect for EeV Hadronic Showers in Ice: Implications for Radio Detection of Neutrinos. arXiv:astro-ph/9806098v1.
49. *Dedenko L.G., Mironovich A.A., Zheleznykh I.M.* Hybrid Scheme of Simulation of Electron-Photon and Electron-Hadron Cascades in Dense Medium at Ultra-High Energies // Int. J. Mod. Phys. A. 2006. V. 21. Suppl. 1. P. 45–49.
50. *Аскарьян Г. А.* Гидродинамическое излучение от треков ионизирующих частиц в стабильных жидкостях // Атомная энергия. 1957. Т. 3. Вып. 8. С. 152–153.
51. *Askarijan G.A., Dolgoshein B.A., Kalinovsky A.N. et al.* Acoustic Detection of High Energy Particle Showers in Water // Nucl. Instrum. Meth. 1979. V. 164. No. 2. P. 267–278.
52. *Askar'yan G.A.* Excess Negative Charge of an Electron-Photon Shower and Its Coherent Radio Emission // Sov. Phys. JETP. 1962. V. 14. No. 2. P. 441.
53. *Radel L., Wiebusch C.* Calculation of the Cherenkov Light Yield from Electromagnetic Cascades in Ice with Geant4. arXiv:1210.5140v2 [astro-ph.IM] 20 Mar 2013.
54. *Abbasi R. et al. (IceCube Collab.)* Observation of Seven Astrophysical Tau Neutrino Candidates with IceCube // Phys. Rev. Lett. 2024. V. 132. No. 15. Art. No. 151001.
55. *Aartsen M.G. et al.* Neutrinos and Cosmic Rays Observed by IceCube. arXiv:1701.03731v1 [astro-ph.HE] 13 Jan 2017.

56. *Lew Classen et al.* The mDOM – A Multi-PMT Digital Optical Modulefor the IceCube-Gen2 Neutrino Telescope // Proc. of the 35th Int. Cosmic Ray Conf. 2017. https://pos.sissa.it/301/1047/pdf
57. https://www.globalneutrinonetwork.org/
58. *Adrián-Martínez S. et al. (KM3NeT Collab.)* Letter of Intent for KM3NeT 2.0 // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2016. V. 43. Art. No. 084001.
59. https://www.km3net.org/research/physics/particle-physics-with-orca/
60. https://www.km3net.org/research/physics/astronomy-with-arca/
61. https://baikalgvd.jinr.ru/
62. https://icecube.wisc.edu/science/icecube/
63. https://antares.in2p3.fr/
64. *Malecki P. (P-ONE Collab.)* Pacific Ocean Neutrino Experiment // Universe. 2024. V. 10. No. 2. Art. No. 53.
65. *Ye. Z.P. et al.* Proposal for a Neutrino Telescope in South China Sea. arXiv:2207.04519v1 [astro-ph.HE] 10 Jul 2022.
66. *Zhang H. et al.* A Proposed Deep Sea Neutrino Observatory in the Nanhai. arXiv:2408.05122v1 [astro-ph.HE] 9 Aug 2024.
67. *Tian-Qi Huang et al.* Proposal for the High Energy Neutrino Telescope // Proc. of the 38th Int. Cosmic Ray Conf. 2023. https://pos.sissa.it/444/1080/pdf
68. *Abbasi R. et al.* Probing the PeV Region in the Astrophysical Neutrino Spectrum Using ν_μ from the Southern Sky. arXiv:2502.19776v1 [astro-ph.HE] 27 Feb 2025.
69. *KM3NeT Collab.* Observation of an Ultra-High-Energy Cosmic Neutrino with KM3NeT // Nature. 2025. V. 638. P. 376–382.
70. *Adrián-Martínez S. et al.* Deep Sea Tests of a Prototype of the KM3NeT Digital Optical Module // Eur. Phys. J. C. 2014. V. 74. Art. No. 3056.
71. *Adrián-Martínez S., Ageron M. et al.* Intrinsic Limits on Resolutions in Muon- and Electron-Neutrino Charged-Current Events in the KM3NeT/ORCA Detector // J. High Energ. Phys. 2017. V. 2017. Art. No. 8.
72. *Aiello S. et al.* Determining the Neutrino Mass Ordering and Oscillation Parameters with KM3NeT/ORCA // Eur. Phys. J. C. 2022. V. 82. Iss. 1. Art. No. 26.
73. *ANTARES Collab.* ANTARES: the First Undersea Neutrino Telescope // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2011. V. 656. No. 1. P. 11–38.

74. *Aiello S. et al. (KM3NeT Collab.)* The KM3NeT Multi-PMT Optical Module // JINST. 2022. V. 17. Iss. 7. Art. No. P07038.
75. *Aiello S. et al. (KM3NeT Collab.)* Characterisation of the Hamamatsu Photomultipliers for the KM3NeT Neutrino Telescope // JINST. 2018. V. 13. Art. No. P05035.
76. *Nauta L. et al.* First Neutrino Oscillation Measurement in KM3NeT/ORCA // Proc. of the 37th Int. Cosmic Ray Conf. 2021. https://pos.sissa.it/395/1123/pdf
77. S*tavropoulos D. et. al.* Atmospheric Neutrinos with the First KM3NeT/ORCA Data and Prospects for Measuring the Atmospheric Neutrino Flux // Proc. of the 37th Int. Cosmic Ray Conf. 2021. https://pos.sissa.it/395/1125/pdf
78. *Aiello S. et al.* Event Reconstruction for KM3NeT/ORCA Using Convolutional Neural Networks // JINST. 2022. V. 15. Iss. 10. Art. No. P10005.
79. *Aiello S. et al.* Sensitivity of the KM3NeT/ARCA Neutrino Telescope to Point-Like Neutrino Sources // Astropart. Phys. 2019. V. 111. P. 100–110.
80. *Ibnsalih W.I. et al.* Expectations for the High-Energy Neutrino Detection From Starburst Galaxies with KM3NeT/ARCA // Proc. of the 37th Int. Cosmic Ray Conf. 2021. https://pos.sissa.it/395/1168/pdf
81. *Aartsen M.G. et al. (IceCube Collab.)* Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector // Science. 2013. V. 342. Art. No. 1242856.
82. *Aiello S. et al.* Implementation and First Results of the KM3NeT Real-Time Core-Collapse Supernova Neutrino Search // Eur. Phys. J. C. 2022. V. 82. Iss. 4. Art. No. 317.
83. *Aiello S. et al.* The KM3NeT Potential for the Next Core-Collapse Supernova Observation with Neutrinos // Eur. Phys. J. C. 2021. V. 81. Iss. 5. P. 445.
84. *Eeden T., Seneca J., Heijboer A.* High-Energy Reconstruction for Single and Doublecascades Using the KM3NeT Detector // Proc. of the 37th Int. Cosmic Ray Conf. 2021. https://pos.sissa.it/395/1089/pdf
85. *Gonzalez J.P. et al.* KM3NeT/ARCA Sensitivity to Transient Neutrino Sources // Proc. of the 37th Int. Cosmic Ray Conf. 2021. https://pos.sissa.it/395/1162/pdf

86. *Le Breton R. et al. (KM3NeT Collab.)* The Calibration Units of KM3NeT // Proc. of the 37th Int. Cosmic Ray Conf. 2021. https://pos.sissa.it/395/1096/pdf
87. *Aiello S. et al.* Deep-Sea Deployment of the KM3NeT Neutrino Telescope Detection Units by Self-Unrolling // JINST. 2022. V. 15. Iss. 11. Art. No. P11027.
88. *Aiello S. et al. (KM3NeT Collab.)* KM3NeT Broadcast Optical Data Transport System. arXiv:2210.13328v1 [astro-ph.IM].
89. *Aiello S. et al. (KM3NeT Collab.)* KM3NeT Front-End and Readout Electronics System: Hardware, Firmware and Software. arXiv:1907.06453v2 [astro-ph.IM].
90. *Belolaptikov I., Dzhilkibaev Zh.A.* Neutrino Telescope in Lake Baikal: Present and Nearest Future // Proc. of the 37th Int. Cosmic Ray Conf. 2021. https://pos.sissa.it/395/002/pdf
91. *Aynutdinov V.M. et al.* Improving the Efficiency of Cascade Detection by the Baikal-GVD Neutrino Telescope // Proc. of the 38th Int. Cosmic Ray Conf. 2023. https://pos.sissa.it/444/987/pdf
92. *Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M. et al.* Status of the Baikal-GVD Neutrino Telescope // EPJ Web of Conf. 2019. V. 207. Art. No. 01003. https://doi.org/10.1051/epjconf/201920701003
93. *Allakhverdyan V.A. et al.* Observations of Track-Like Neutrino Events with Baikal-GVD // Proc. of the 37th Int. Cosmic Ray Conf. 2021. https://pos.sissa.it/395/1177/pdf
94. *Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M. et al.* A Positioning System for Baikal-GVD // Proc. of the 36th Int. Cosmic Ray Conf. 2019. https://pos.sissa.it/358/1012/pdf
95. *Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M. et al.* Spatial Positioning of Underwater Components for Baikal-GVD // EPJ Web of Conf. 2019. V. 207. Art. No. 07004. https://doi.org/10.1051/epjconf/201920707004
96. *Avrorin A.D. et al.* Environmental studies in Lake Baikal: Basic Facts and Perspectives for Interdisciplinary Research // EPJ Web of Conf. 2019. V. 207. Art. No. 09001. https://doi.org/10.1051/epjconf/201920709001
97. *Ryabov E., Tarashansky B.* Monitoring of Optical Properties of Deep Lake Water // Proc. of the 37th Int. Cosmic Ray Conf. 2021. https://pos.sissa.it/395/1034/pdf

98. *Dvornický R. et al.* Monitoring of Optical Properties of Deep Waters of Lake Baikal in 2021–2022 // Proc. of the 38th Int. Cosmic Ray Conf. 2023. https://pos.sissa.it/444/977/pdf
99. *Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M. et al.* The Optical Module of Baikal-GVD // EPJ Web of Conf. 2016. V. 116. Art. No. 01003. https://doi.org/10.1051/epjconf/201611601003
100. *Allakhverdyan V.A. et al.* Time Synchronization of Baikal-GVD Clusters // Proc. of the 37th Int. Cosmic Ray Conf. 2021. https://pos.sissa.it/395/1067/pdf
101. *Kopański K., Noga W., Malecki P.* Method and Device for Tests of the Laser Optical Calibration System for the Baikal-GVD Underwater Neutrino Cherenkov Telescope // Proc. of the 37th Int. Cosmic Ray Conf. 2021. https://pos.sissa.it/395/1060/pdf
102. *Аврорин А. В., Аврорин А. Д., Айнутдинов В. М. и др.* Лазерная калибровочная система нейтринного телескопа BAIKAL-GVD // Приборы и техн. экспер. 2024. № 5. С. 48–58.
103. *Allakhverdyan V.A. et al.* Experimental String with Fiber Optic Data Acquisition for Baikal-GVD // Proc. of the 37th Int. Cosmic Ray Conf. 2021. https://pos.sissa.it/395/1066/pdf
104. *Aartsen M.G., Ackermann M., Adams J. et al. (IceCube Collab.)* The IceCube Neutrino Observatory: Instrumentation and Online Systems // JINST. 2017. V. 12. Iss. 03. Art. No. P03012.
105. *Aartsen M.G., Ackermann M., Adams J. et al.* Neutrino Astronomy with the Next Generation IceCube Neutrino Observatory. Preprint. arXiv:1911.02561v1 [astro-ph.HE] 6 Nov 2019.
106. *Borowka J., Günther C., Heinen D. et al. for the IceCube Collab.* The Acoustic Module for the IceCube Upgrade // Proc. of the 37th Int. Cosmic Ray Conf. 2021. https://pos.sissa.it/395/1059/pdf
107. *Benning C., Borowka J., Günther C. et al. for the IceCube Collab.* Performance Studies of the Acoustic Module for the IceCube Upgrade // Proc. of the 38th Int. Cosmic Ray Conf. 2023. https://pos.sissa.it/444/241/pdf
108. *Bailly N., Bedard J., Böhmer M. et al.* Two-Year Optical Site Characterization for the Pacific Ocean Neutrino Experiment (P-ONE) in the Cascadia Basin // Eur. Phys. J. C. 2021. V. 81. Art. No. 1071.

109. *Spannfellner C., Danninger M.* Pacific Ocean Neutrino Experiment (P-ONE): Prototype Line Development // Proc. of the 37th Int. Cosmic Ray Conf. 2021. https://pos.sissa.it/395/1197/pdf
110. *Ye Z.P. et al.* A Multi-Cubic-Kilometre Neutrino Telescope in the Western Pacific Ocean // Nat. Astron. 2023. V. 7. P. 1497–1505.
111. *Hu F. et al.* Simulation Study on the Optical Processes at Deep-Sea Neutrino Telescope Sites. arXiv:2302.05032v1 [astro-ph.IM] 10 Feb 2023.
112. *Chuanya Cao et al.* Mass Production and Characterization of 3-inch PMTs for the JUNO Experiment. arXiv:2102.11538v2 [physics.ins-det] 27 Feb 2021.
113. *Zhi W. et al.* Preliminary Design of the Hybrid Digital Optical Module for TRIDENT // Proc. of the 38th Int. Cosmic Ray Conf. 2023. https://pos.sissa.it/444/1213/pdf
114. https://old.cryotrade.ru/KETEK.html?ysclid=mlud82klma564917638
115. *Hu F., Li Z., Xu D.* Exploring a PMT+SiPM Hybrid Optical Module for Next Generation Neutrino Telescopes // Proc. of the 37th Int. Cosmic Ray Conf. 2021. https://pos.sissa.it/395/1043/pdf
116. *Anassontzis E.G. et al.* Light Transmission Measurements with LAMS in the Mediterranean Sea // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2011. V. 626–627. P. S120–S123.
117. *Boehmer M., Bosma J., Brussow D.* STRAW (STRings for Absorption Length in Water): Pathfinder for a Neutrino Telescope in the Deep Pacific Ocean // J. Instrum. 2019. V. 14. Art. No. P02013.
118. *Aartsen M.G. et al.* Measurement of South Pole Ice Transparency with the Icecube Led Calibration System // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2013. V. 711. P. 73–89.
119. *Ackermann M. et al.* Optical Properties of Deep Glacial Ice at the South Pole // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. Iss. D13. Art. No. D13203.
120. *Abbasi R. et al. In situ* Estimation of Ice Crystal Properties at the South Pole Using LED Calibration Data from the IceCube Neutrino Observatory // The Cryosphere. 2024. V. 18. P. 75–102.
121. *Масолов В. Н., Лукин В. В., Шереметьев А. Н. и др.* Геофизические исследования подледникового озера Восток // Докл. АН. 2001. Т. 379. № 5. С. 680–685.

122. *Лейченков Г. Л., Беляцкий Б. В., Попков А. М. и др.* Геологическая природа подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 81–91.
123. *Цыганова Е. А., Попов С. В., Саламатин А. Н. и др.* Результаты радиолокационного зондирования и моделирования течения ледникового покрова Восточной Антарктиды вдоль линии тока, проходящей через станцию Восток // Лёд и снег. 2010. Вып. 1 (109). С. 14–29.
124. *Filina I.Y. et al.* New 3*D* Bathymetry and Sediment Distribution in Lake Vostok: Implication for Pre-Glacial Origin and Numerical Modeling of the Internal Processes within the Lake // Earth Planet. Sci. Lett. 2008. V. 276. P. 106–114.
125. *Petit J., Alekhina I., Bulat S.* Exploring a Subglacial Lake and Searching for Life in an Extreme Environment. Lectures in Astrobiology. Berlin: Springer, 2005. P. 227–288.
126. *Стефанова О., Кудрявцева Е., Прилепина О.* Новый Восток. Антарктида. М.: Паулсен, 2025. 184 с.
127. https://www.aari.ru/projects/123
128. *Aguilar J.A. et al. (ANTARES Collab.)* Measurement of the Atmospheric Muon Flux with a 4 GeV Threshold in the ANTARES Neutrino Telescope // Astropart. Phys. 2010. V. 33. P. 86.
129. *Widder E.A.* Bioluminescence in the Ocean: Origins of Biological, Chemical, and Ecological Diversity // Science. 2010. V. 328. P. 704–708.
130*Martini S., Haddock S.H.D.* Quantification of Bioluminescence from the Surface to the Deep Sea Demonstrates Its Predominance as an Ecological Trait // Sci. Rep. 2017. V. 7. Art. No. 45750.
131. *Becherini Y., Margiotta A., Sioli M. et al.* A Parameterisation of Single and Multiple Muons in the Deep Water or Ice. http://arxiv.org/abs/hep-ph/0507228v1
132. *Biagi S. et al. (KM3NeT Collab.)* Dependence of the Atmospheric Muon Rate on the Sea Water Depth with First KM3NeT Data // Proc. of the 36th Int. Cosmic Ray Conf. 2019. https://pos.sissa.it/358/943/pdf
133. *Masolov V.N., Popov S.V., Lukin V.V. et al.* The Bottom Topography and Subglacial Lake Vostok Water Body, East Antarctica // Dokl. Akad. Nauk. 2010. V. 433. No. 2. P. 1092–1097.

134. *Tikku A.A. et al.* Ice Flow Field over Lake Vostok, East Antarctica Inferred by Structure Tracking // Earth Planet. Sci. Lett. 2004. V. 227. P. 249–261.
135. *Aiello S. et al.* Characterisation of the Hamamatsu Photomultipliers for the KM3NeT Neutrino Telescope // JINST. 2018. V. 13. Iss. 05. Art. No. P05035.
136. *Abbasi R. et al.* The Design and Performance of IceCube DeepCore // Astropart. Phys. 2012. V. 35. Iss. 10. P. 615–624.
137. *Bevan S. et al. (ACoRNE Collab.)* Simulation of Ultra High Energy Neutrino Interactions in Ice and Water // Astropart. Phys. 2007. V. 28. P. 366–379.
138. *IceCube Collab.* Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector // Science. 2013. V. 342. Art. No. 1242856.
139. https://icecube.wisc.edu/news/research/2024/03/icecube-observes-seven-astrophysical-tau-neutrino-candidates/
140. *Zhi W. et al.* Front-End Electronics Development of Large-Area SiPM Arrays for High-Precision Single-Photon Time Measurement. arXiv:2403.02948v2 [physics.ins-det] 7 Jun 2024.
141. https://global.canon/en/news/2021/20211215.html
142. https://petapixel.com/2023/08/01/canons-new-camera-can-see-subjects-from-miles-away-even-at-night/
143. https://global.canon/en/technology/spad-sensor-2023.html
144. https://www.canon-europe.com/video-cameras/ms-500/
145. https://camera.hamamatsu.com/jp/en/product/camera/C15550-22UP.html
146. https://camera.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/sys/SCAS0166E_C15550-22UP.pdf
147. Способ регистрации нейтрино высоких энергий: пат. РФ на изобретение № 2866086 / А. А. Захаров; дата приоритета 08.04.2026.
148. *Xu J. et al.* A Comprehensive Overview of Fish-Eye Camera Distortion Correction Methods. 2024. https://arxiv.org/abs/2401.00442
149. https://www.phys.ethz.ch/news-and-events/d-phys-news/2026/04/neutrinos-caught-on-camera.html

150. *Dieminger T., Alonso-Monsalve S., Alt C. et al.* An Ultrafast Plenoptic-Camera System for High-Resolution 3*D* Particle Tracking in Unsegmented Scintillators // Nat. Commun. 2026. V. 17. Art. No. 4204.
151. Отчёт НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ о научно-исследовательской работе на антарктической станции Восток в сезон 63-й РАЭ (2017–2018 гг.). № Т-4. 32 с.
152. *Zatsepin G.T., Kuzmin V.A.* Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays // JETP Lett. 1966. V. 4. Iss. 3. P. 78–80.
153. *Chakraborty S., Mehta P., Sarmah P.* A Relook at the GZK Neutrino – Photon Connection: Impact of Extra-Galactic Radio Background & UHECR Properties. arXiv:2307.15667v2 [astro-ph.HE] 11 Jan 2024.
154. *Аскарьян Г. А.* Гидродинамическое излучение от треков ионизирующих частиц в стабильных жидкостях // Атомная энергия. 1957. Т. 3. № 8. С. 152–153.
155. *Аскарьян Г. А., Долгошеин Б. А.* Акустическая регистрация нейтрино высоких энергий // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 25. № 5. С. 232–233.
156. *Askarijan G.A., Dolgoshein B.A., Kalinovsky A.N. et al.* Acoustic Detection of High Energy Particle Showers in Water // Nucl. Instrum. Meth. 1979. V. 164. No. 2. P. 267–278.
157. *Аскарьян Г. А., Долгошеин Б. А.* Акустическая регистрация нейтрино высоких энергий на больших глубинах. Академия наук СССР. Физический институт им. П. Н. Лебедева. Препринт № 160. М., 1976. 17 с.
158. *Perkin J.D.* The Acoustic Detection of Ultra High Energy Neutrinos. arXiv:0801.0991v1 [astro-ph] 7 Jan 2008.
159. *Vandenbroucke J., Gratta G., Lehtinen N.* Experimental Study of Acoustic Ultra-High-Energy Neutrino Detection // Astrophys. J. 2005. V. 621. P. 301–312.
160. *Lahmann R.* Acoustic Detection of Neutrinos: Review and Future Potential // Nucl. Part. Phys. Proc. 2016. V. 273–275. P. 406–413.
161. *Dedenko L.G. et al.* SADCO: Hydroacoustic Detection of Super-High Energy Cosmic Neutrinos. arXiv:astro-ph/9705189v1 23 May 1997.
162. *Zheleznykh I.* SADCO: Status of a Pilot Experiment in the Caspian Sea. High Energy Neutrino Astronomy Workshop. College de France, Paris, 2003.

163. *Danaher S.* First Data from ACoRNE and Signal Processing Techniques // J. Phys.: Conf. Ser. 2007. V. 81. P. 012011.
164. *Bevan S.* Data Analysis Techniques for UHE Acoustic Astronomy // J. Phys.: Conf. Ser. 2007. V. 81. Art. No. 012011; Nucl. Inst. Meth. A. 2009. V. 604. P. 143.
165. *Antipin K. et al.* A Prototype Device for Acoustic Neutrino Detection in Lake Baikal // Proc. of the 30th Int. Cosmic Ray Conf. 2007. https://indico.nucleares.unam.mx/event/4/session/40/contribution/639/material/paper/0.pdf
166. *Aynutdinov V.M. et al.* Acoustic Search for High-Energy Neutrinos in Lake Baikal: Status and Perspectives // Proc. of the 31th Int. Cosmic Ray Conf. 2009. arXiv:0910.0678v1 [astro-ph.HE] 5 Oct 2009.
167. *Aynutdinov V.M. et al.* Towards High Energy Neutrino Acoustic Detector in Lake Baikal: Current Status and Perspectives // AIP Conf. Proc. 2013. V. 1535. No. 1. P. 176–179.
168. *Graf K.* Studies of Acoustic Neutrino Detection Methods with ANTARES. arXiv:1005.3951v1 [astro-ph.IM] 21 May 2010.
169. *Lahmann R.* Deep-Sea Acoustic Neutrino Detection and the AMADEUS System as a Multi-Purpose Acoustic Array // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2009. V. 602. P. 255–261.
170. *Viola S.* KM3NeT Acoustic Positioning and Detection System // EPJ Web of Conf. 2019. V. 216. Art. No. 02006.
171. *Van Elewyck V.* The ANTARES and KM3NeT Neutrino Telescopes: Status and Outlook for Acoustic Studies // EPJ Web of Conf. 2019. V. 216. Art. No. 01004.
172. *Ardid M. et al.* Development of a Trigger for Acoustic Neutrino Candidates in KM3NeT // 9th Int. Workshop on Acoustic and Radio EeV Neutrino Detection Activities. 2022. arXiv:2211.10149v2 [astro-ph.IM] 17 Jan 2023.
173. *Abbasi R. et al.* Measurement of Acoustic Attenuation in South Pole Ice // Astropart. Phys. 2011. V. 34. P. 382–393.
174. *Karg T.* Status and Recent Results of the South Pole Acoustic Test Setup // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2012. V. 662. P. S36.
175. *Abdou Y. et al.* Design and Performance of the South Pole Acoustic Test Setup // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2012. V. 683. P. 78–90.

176. *Karg. T.* Acoustic Noise in Deep Ice and Environmental Conditions at the South Pole // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2009. V. 604. Suppl. 1–2. P. S171 –S174.
177. *Abbasi R. et al.* Background Studies for Acoustic Neutrino Detection at the South Pole. arXiv:1103.1216v2 [astro-ph.IM] 18 Oct 2011.
178. *Böser S.* Acoustic Detection of Ultra-High Energy Cascades in Ice. PhD in Physics. Berlin: Humboldt University, 2006. 171 p.
179. *Abbasi R. et al.* Measurement of Sound Speed vs. Depth in South Pole Ice for Neutrino Astronomy // Astropart. Phys. 2010. V. 33. P. 277–286.
180. *Миронович А. А.* Гидроакустическое детектирование нейтрино сверхвысоких энергий. ИЯИ РАН: Семинар отдела ФВЭ, 2013. https://www.inr.ru/rus/kud-sem/mironovich-11-03-13.pdf
181. *Niess V., Bertin V.* Underwater Acoustic Detection of Ultra High Energy Neutrinos. arXiv: astro-ph/0511617.
182. http://thermalinfo.ru/svojstva-materialov/materialy-raznye/plotnost-lda-i-snega-teploprovodnost-teploemkost-lda
183. *Siegert M.J., Kwok R.* Ice-Sheet Radar Layering and the Development of Preferred Crystal Orientation Fabrics Between Lake Vostok and Ridge B, Central East Antarctica // Earth Planet. Sci. Lett. 2000. V. 179. P. 227–235.
184. *Vandenbroucke J.* Acoustic Detection of Astrophysical Neutrinos in South Pole Ice. arXiv:1201.0072v1 [astro-ph.IM] 30 Dec 2011.
185. *Aguilar J.A. et al.* AMADEUS – The Acoustic Neutrino Detection Test System of the ANTARES Deep-Sea Neutrino Telescope. arXiv:1009.4179v3 [astro-ph.IM] 9 Oct 2012.
186. *Semburg B.* HADES–Hydrophone for Acoustic Detection at South Pole // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2008. V. 604. Suppl. 1. P. S215 – S218.
187. https://t8-sensor.ru/
188. *Buis E.J. et al.* Fiber Optic Hydrophones for Acoustic Neutrino Detection // EPJ Web of Conf. 2016. V. 116. Art. No. 03002.
189. *Foster S., Tikhomirov A., Milnes M. et al.* A Fiber Laser Hydrophone // Proc. of SPIE. 2005. V. 5855. P. 627–630.
190. *Goodman S., Tikhomirov A., Foster S.* Pressure Compensated Distributed Feedback Fiber Laser Hydrophone // Proc. of SPIE. 2008. V. 7004. Art. No. 700426.

191. *Buis E.J. et al.* Characterization of a Fiber Laser Hydrophone for Acoustic Neutrino Detection. arXiv:2501.12999v2 [astro-ph.IM] 4 Apr 2025.
192. *Kravchenko I. et al.* Limits on the Ultra-High Energy Electron Neutrino Flux from the RICE Experiment // Astropart. Phys. 2003. V. 20. P. 195–213.
193. *Gorham P. et al.* Experimental Limit on the Cosmic Diffuse Ultrahigh-Energy Neutrino Flux // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. Art. No. 041101.
194. *Васильев Н. И., Дмитриев А. Н., Блинов П. А.* Бурение глубокой скважины на российской антарктической станции Восток // Вестник ОНЗ РАН. 2012. Т. 4. NZ2001.
195. *Алехина И. А., Васильев Н. И., Екайкин А. А. и др.* Предварительные результаты исследований химического состава воды, замерзшей в буровой скважине после вскрытия озера Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 2 (100). С. 5–14.
196. *Alekhina et al.* Chemical Characteristics of the Ice Cores Obtained after the First Unsealing of Subglacial Lake Vostok // J. Geol. Soc. 2017. V. 461. P. 187–196.
197. *Lukin V.V., Bulat S.A.* Vostok Subglacier Lake: Details of Russian Plans/Activities for Drilling and Sampling // Antarct. Subglac. Aquat. Environ. Geophys. Monograph Ser. 2011. V. 192. P. 187–197.
198. *Mowlem M. et al.* Probe Technologies for Clean Sampling and Measurement of Subglacial Lakes // Phil. Trans. R. Soc. A. 2016. V. 374. Iss. 2059. Art. No. 20150267.
199. *Murshed M.M., Faria S.H., Kuhs W.S. et al.* The Role of Hydrochlorofluorocarbon Densifiers in the Formation of Clathrate Hydrates in Deep Boreholes and Subglacial Environments // Ann. Glaciol. 2007. V. 47. P. 109–114.
200. *Захаров А. А., Булат С. А., Ежов В. Ф. и др.* Образование клатратных гидратов в заливочной жидкости, используемой в скважине подледникового озера Восток. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ 2992. Гатчина, 2016. 22 с.
201. *Shturmakov A.J., Lebar D.A., Bentley C.R.* DISC Drill and Replicate Coring System: a New Era in Deep Ice Drilling Engineering // Ann. Glaciol. 2014. V. 55. Iss. 68. P. 189–198.

202. *Mason W.P., Shturmakov A.J., Johnson J.A. et al.* A New 122mm Electromechanical Drill for Deep Ice-Sheet Coring (DISC): 2. Mechanical Design // Ann. Glaciol. 2007. V. 47. P. 35–40.
203. *Mortensen N.B., Sendelbach P.J., Shturmakov A.J.* A New 122mm Electromechanical Drill for Deep Ice-Sheet Coring (DISC): 3. Control, Electrical and Electronics Design // Ann. Glaciol. 2007. V. 47. P. 41–50.
204. *Alemany O. et al.* The SUBGLACIOR Drilling Probe: Hydraulic Considerations // Ann. Glaciol. 2020. V. 62. P. 131–142.
205. *Duphil R., Possenti P., Piard L.* A New Leak-Tight Borehole Casing at Dome Concordia Station, Antarctica, for the SUBGLACIOR Project // Ann. Glaciol. 2014. V. 55. Iss. 68. P. 351–354.
206. https://www.boartlongyear.com/product/lf230/
207. *Goodge J.W., Severinghaus J.P.* Rapid Access Ice Drill: a New Tool for Exploration of the Deep Antarctic Ice Sheets and Subglacial Geology // J. Glaciol. 2016. V. 62. Iss. 236. P. 1049–1064.
208. https://www.rapidaccessicedrill.org/we-did-it/
209. *Aguilar J.A., Altmann D., Andeen K. et al.* The IceCube Neutrino Observatory: Instrumentation and Online Systems // JINST. 2016. V. 11. Art. No. C01022.
210. *Aartsen M.G., Ackermann M., Adams J. et al.* Neutrino Astronomy with the Next Generation IceCube Neutrino Observatory. Preprint. arXiv:1911.02561v1 [astro-ph.HE] 6 Nov 2019.
211. *Benson T., Cherwinka J., Duvernois M. et al.* IceCube Enhanced Hot Water Drill Functional Description // Ann. Glaciol. 2014. V. 55. Iss. 68. P. 105–114.
212. *Greenler L., Benson T., Cherwinka J. et al.* Modeling Hole Size, Lifetime and Fuel Consumption in Hot-Water Ice Drilling // Ann. Glaciol. 2014. V. 55. Iss. 68. P. 115–123.
213. *Siegert M. J., Makinson K., Blake D. et al.* An Assessment of Deep Hot-Water Drilling as a Means to Undertake Direct Measurement and Sampling of Antarctic Subglacial Lakes: Experience and Lessons Learned from the Lake Ellsworth Field Season 2012/13 // Ann. Glaciol. 2014. V. 55. Iss. 65. P. 59–73.
214. *Tulaczyk S., Mikucki J.A., Siegfried M.R. et al.* WISSARD at Subglacial Lake Whillans, West Antarctica: Scientific Operations and Initial Observations // Ann. Glaciol. 2014. V. 55. Iss. 65. P. 51–58.

215. *Priscu J.C. et al.* Scientific Access into Mercer Subglacial Lake: Scientific Objectives, Drilling Operations and Initial Observations // Ann. Glaciol. 2021. V. 62. Iss. 85–86. P. 340–352.
216. https://english.news.cn/20260408/df264e50bc334d919c60aed8fa920ebc/c.html
217. *Вадецкий Ю. В.* Справочник бурильщика: учеб. пособие. М.: Академия, 2008. 416 с.
218. *Schwander J., Marending S., Stocker T.S. et al.* RADIX: a Minimal-Resources Rapid-Access Drilling System //Ann. Glaciol. 2014. V. 55. Iss. 68. P. 34–38.
219. *Talalay P.G.* Dimethyl Siloxane Oils As an Alternative Borehole Fluid // Ann. Glaciol. 2007. V. 47. P. 82–87.
220. *Talalay P.G.* Perspectives for Development of Ice-Core Drilling Technology: a Discussion // Ann. Glaciol. 2014. V. 55. Iss. 68. P. 339–350.
221. *Sheldon S.G., Popp T.J., Hansen S.B. et al.* Promising New Borehole Liquids for Ice-Core Drilling on the East Antarctic High Plateau // Ann. Glaciol. V. 55. Iss. 68. P. 260–270.
222. *Xu H., Han L., Cao P. et al.* Low-Molecular-Weight, Fatty-Acid Esters as Potential Low-Temperature Drilling Fluids for Ice Coring // Ann. Glaciol. 2014. V. 55. Iss. 68. P. 39–43.
223. *Triest J., Alemany O.* Drill Fluid Selection for the SUBGLACIOR Probe: a Review of Silicone Oil as a Drill Fluid // Ann. Glaciol. 2014. V. 55. Iss. 68. P. 311–321.
224. Ice Drilling Design and Operations – Long Range Drilling Technology Plan. June 29, 2018.
225. Способ бурения ледниковых скважин: пат. РФ на изобретение № 2751030 / А. А. Захаров А. А.; дата приоритета 16.12.2020.
226. *Захаров А. А., Колхидашвили М. Р., Онегин М. С.* Теплофизический расчёт процесса бурения льда нагретой силиконовой жидкостью применительно к новой скважине подледникового озера Восток. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ 3066. Гатчина, 2022. 42 с.
227. Способ бурения и вскрытия подледниковых озёр: пат. РФ на изобретение № 2825375 / А. А. Захаров; дата приоритета 17.05.2023.
228. *Вострецов Р. Н.* Результаты измерений, полученные в период 45-й РАЭ. Отчёт РАЭ.

229. *Захаров А. А., Колхидашвили М. Р.* Экологически чистая технология бурения и проникновения в подледниковое озеро Восток для проведения фундаментальных научных исследований. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ 3075. Гатчина, 2023. 28 с.
230. Shin-Etsu. Silicone fluid KF-96: Performance Test Results. https://www.shinetsusilicone-global.com/catalog/pdf/kf96_e.pdf
231. *Арапов П. П., Липенков В. Я., Саватюгин Л. М.* Исследования подледникового озера Восток в Антарктиде // Вестник СПбГУ. 2005. Сер. 7. Вып. 2. С. 119–121.
232. *Bulat S.A., Alekhina I., Marie D. et al.* Searching for Life in Extreme Environments Relevant to Jovian's Europa: Lessons from Subglacial Ice Studies at Lake Vostok (East Antarctica) // Adv. Space Res. 2011. V. 48. No. 4. P. 697–701.
233. *Kargel J.S.* Europa's Crust and Ocean: Origin, Composition, and the Prospects for Life // Icarus. 2000. V. 148. P. 226–265.
234. *Marion G.M., Fritsen C.H., Eicken H. et al.* The Search for Life on Europa: Limiting Environmental Factors, Potential Habitats, and Earth Analogues // Astrobiol. 2003. V. 3. No. 4. P. 785–811.
235. *Lipenkov V.Ya., Istomin V.A.* On the Stability of Air Clathrate-hydrate Crystals in Subglacial Lake Vostok, Antarctica // Mater. Glyatsiol. Issled. 2001. V. 91. P. 129–133.
236. *Захаров А. А., Соловей В. А.* Проблемы изучения антарктического озера Восток через ледовую скважину // Вестник МАХ. 2018. № 4. С. 3–9.
237. *Захаров А. А., Четвериков Ю. О., Соловей В. А. и др.* Озеро Восток. В поисках прикосновения. Гатчина: Изд-во НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2020. 154 с.
238. *Lipenkov V.Y., Ekaykin A.A., Polyakova E.V. et al.* Characterization of Subglacial Lake Vostok as Seen from Physical and Isotope Properties of Accreted Ice // Phil. Trans. R. Soc. A. 2016. V. 374. Iss. 2059. P. 1–15. http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0303
239. *Ewert H., Popov S.V., Richter A. et al.* Precise Analysis of ICESat Altimetry Data and Assessment of the Hydrostatic Equilibrium for Subglacial Lake Vostok, East Antarctica // Geophys. J. Int. 2012. V. 191. P. 557–568.

240. *Salamatin A.N., Tsyganova E.A., Popov S.V. et al.* Ice Flow Line Modeling in Ice Core Data Interpretation: Vostok Station (East Antarctica). In book: Physics of Ice Core Records, 2009 / T. Hondoh, editor, 2nd ed. Sapporo: Hokkaido University Press, 2009. P. 167–194.
241. *Royston-Bishop G., Priscu J.C., Tranter et al.* Incorporation of Particulates into Accreted Ice Above Subglacial Vostok Lake, Antarctica // Ann. Glaciol. 2005. V. 40. P. 145–150.
242. *Ekaykin A.A., Veres A.N., Kozachek A.V.* The formation Conditions of Subglacial Lake Vostok's Accreted Ice Based on Its Stable Water Isotope Composition // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70. № 4. С. 444–459.
243. *Siegert M.J., Ellis-Evans J.C., Tranter M. et al.* Physical, Chemical and Biological Processes in Lake Vostok and Other Antarctic Subglacial Lakes // Nature. 2001. V. 414. P. 603–609.
244. *Rothschild L.J., Mancinelli R.L.* Life in Extreme Environments // Nature. 2001. V. 409. P. 1092–1101.
245. *Bulat S.* Microbiology of the Subglacial Lake Vostok: First Results of Borehole-Frozen Lake Water Analysis and Prospects for Searching for Lake Inhabitants // Phil. Trans. R. Soc. A. 2016. V. 374. Art. No. 20140292.
246. *Булат С. А.* Микробиология озера Восток в Антарктике: результаты исследований // Земля и Вселенная. 2017. № 2. С. 17–28.
247. *Bulat S., Alekhina I., Blot M. et al.* DNA Signature of Thermophilic Bacteria From the Aged Accretion Ice of Lake Vostok, Antarctica: Implications for Searching for Life in Extreme Icy Environments // Int. J. Astrobiol. 2004. V. 3. Iss. 1. P. 1–12.
248. *Lavire C., Normand Ph., Alekhina I. et al.* Presence of Hydrogenophilus Themoluteolus DNA in Accretion Ice in the Subglacial Lake Vostok, Antarctica, Assessed Using rrs, cbb and hox // Environ. Microbiol. 2006. V. 8. No. 12. P. 2106–2114.
249. Устройство для отбора пробы воды из подлёдных водоёмов: пат. РФ на изобретение № 2645539 / Захаров А. А.; опубл. 16.09.2016.
250. Устройство для отбора воды из подледных водоемов: пат. РФ на полезную модель № 215436 / Захаров А. А.; дата приоритета 30.05.2022.

251. *Keen P. et al.* A Mini-Corer for Precision Sampling of the Water-Sediment Interface in Subglacial Lakes and Other Remote Aqueous Environments // Limnol. Oceanogr.: Methods. 2018. V. 16. P. 856–867.
252. Пробоотборник донных отложений: пат. РФ на полезную модель № 211617 / А. А. Захаров; дата приоритета 15.03.2022.
253. *Зотиков И. А.* Антарктическое подледниковое озеро Восток. Гляциология, биология, планетология. М.: Науч. мир, 2010. 148 с.
254. *Siegert M.J., Priscu J.C., Alekhina I.A. et al.* Antarctic Subglacial Lake Exploration: First Results and Future Plans // Phil. Trans. R. Soc. A. 2016. V. 374. Art. No. 20140466. http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0466
255. *Siegert M.J, Ross N., Le Brocq A.M.* 2016 Recent Advances in Understanding Antarctic Subglacial Lakes and Hydrology // Phil. Trans. R. Soc. A. 2016. V. 374. Art. No. 20140306.
256. *Wright A., Siegert M.J.* A Fourth Inventory of Antarctic Subglacial Lakes // Antarct. Sci. 2012. V. 24. No. 6. P. 659–664.
257. *Siegert M.J. et al.* A Revised Inventory of Antarctic Subglacial Lakes // Antarct. Sci. 2005. V. 17. No. 3. P. 453–460.
258. *Fan Y. et al.* Monitoring the Hydrological Activities of Antarctic Subglacial Lakes Using CryoSat-2 and ICESat-2 Altimetry Data // Remote Sens. 2022. V. 14. No. 4. Iss. 898. P. 1–17. https://doi.org/10.3390/rs14040898
259. *Yan S.0., Blankenship D.D., Greenbaum J.S. et al.* Newly Discovered Subglacial Lake in East Antarctica Likely Hosts a Valuable Sedimentary Record of Ice and Climate Change // Geology. 2022. A. V. 50. No. 8. P. 949–953. https://doi.org/10.1130/G50009.1
260. *Wilson S.F., Hogg A.E., Rigby R. et al.* Detection of 85 New Active Subglacial Lakes in Antarctica from a Decade of CryoSat-2 Data // Nat. Commun. 2025. V. 16. Art. No. 8311. https://doi.org/10.1038/s41467-025-63773-9
261. *Arthur J.F., et al.* Evidence of Active Subglacial Lakes under a Slowly Moving Coastal Region of the Antarctic Ice Sheet // TC. 2025. V. 19. P. 375–392. https://doi.org/10.5194/tc-19-375-2025
262. *Siegfried M.R., Venturelli R.A., Patterson M.O. et al.* The Life and Death of a Subglacial Lake in West Antarctica // Geology. 2023. V. 51. No. 5. P. 434–438.

263. *Gill-Olivas B., Telling J., Tranter M. et al.* Subglacial Erosion Has the Potential to Sustain Microbial Processes in Subglacial Lake Whillans, Antarctica // Comms. Earth Environ. 2021. V. 2. Iss. 134. https://doi.org/10.1038/s43247-021-00202-x
264. *Mikucki J.A., Lee P.A., Ghosh D. et al.* Subglacial Lake Whillans Microbial Biogeochemistry: a Synthesis of Current Knowledge // Phil. Trans. R. Soc. A. 2016. V. 374. Art. No. 20140290. http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0290
265. *Davis C.L., Venturelli D.C., Michaud A.B. et al.* Biogeochemical and Historical Drivers of Microbial Community Composition and Structure in Sediments from Mercer Subglacial Lake, West Antarctica // ISME Commun. 2023. V. 3. Art. No. 8.
266. SCAR's Code of Conduct for the Exploration and Research of Subglacial Aquatic Environments. https://icedrill.org/library/scars-code-conduct-exploration-and-research-subglacial-aquatic-environments
267. *Michaud A.B., Vick-Majors T.J., Achberger A.M. et al.* Environmentally Clean Access to Antarctic Subglacial Aquatic Environments // Antarct. Sci. 2020. V. 32. Iss. 5. P. 329–340.
268. *Siegert M.J., Rachel J.C., Mowlem M. et al.* Clean Access, Measurements, and Sampling of Ellsworth Subglacial Lake: a Method for Exploring Deep Antarctic Subglacial Lake Environments // Rev. Geophys. 2012. V. 50. Art. No. RG1003.
269. *Priscu J.C., Amanda M.A., Cahoon J.E. et al.* A Microbiologically Clean Strategy for Access to the Whillans Ice Stream Subglacial Environment // Antarct. Sci. 2013. V. 25. No. 5. P. 637–642.
270. *Липенков В. Я., Райно Д.* Климатическая перестройка в середине плейстоцена и проблема исследования древнейшего антарктического льда со станции Восток // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 4. С. 95–106.
271. *Липенков В. Я., Екайкин А. А. и др.* Эволюция климата, оледенения и подледниковой среды Антарктиды по данным исследований ледяных кернов и проб воды озера Восток // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 78–94.
272. *Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D. et al.* Climate and Atmospheric History of the Past 420,000 Years from the Vostok Ice Core, Antarctica // Nature. 1999. V. 399. P. 429–436.

273. *Екайкин А. А.* Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии: методическое пособие. СПб.: Изд-во ААНИИ, 2016. 63 с.
274. *Fischer H., Eisen O., Frezzotti M. et al.* Where to Find 1.5 Million Year Old Ice for the IPICS "Oldest-Ice" Ice Core // Clim. Past. 2013. V. 9. P. 2489–2505.
275. *Липенков В. Я., Екайкин А. А.* В поисках древнейшего льда Антарктиды // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 2. С. 255–260.
276. *Lipenkov V.Ya., Parrenin F., Shakun A. et al.* New Ice Dating Tools Reveal 1.2 Mz Old Meteoric Ice Near the Base of the Vostok Ice Core // Geophys. Res. Abstr. 2019. V. 21. Art. No. EGU2019-8505.
277. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Veres A. N. et al.* On the Possibility to Restore the Climatic Signal in the Disturbed Record of Stable Water Isotope Content in the Old (0.4–1.2 Ma) Vostok Ice (Central Antarctica) // Led Sneg. 2019. V. 59. No. 4. P. 437– 451.
278. *Ekaykin A.A., Bolshunov A.V., Lipenkov V.Ya. et al.* First Glaciological Investigations at Ridge B, Central East Antarctica // Antarct. Sci. 2021. V. 33. No. 4. P. 418–427.
279. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Tchikhatchev K.B.* Preservation of the Climatic Signal in the Old Ice Layers at the Dome B Area (Antarctica) // Izv. Atmos. Oceanic Phys. 2023. V. 59. Suppl. 1. P. S1–S7.
280. *Barbante C., Fisher H., Masson-Delmotte V. et al.* Climate of the Last Million Years: New Insights from EPICA and Other Records // Quat. Sci. Rev. 2010. V. 29. P. 1–7.
281. *Jouzel J., Masson-Delmotte V.* Deep Ice Cores: the Need for Going Back in Time // Quat. Sci. Rev. 2010. V. 29. P. 3683–3689.
282. *Parrenin F. et al.* Is There 1.5-Million-Year-Old Ice Near Dome C, Antarctica? // TC. 2017. V. 11. P. 2427–2437.
283. *Passalacqua O., Cavitte M., Gagliardini O. et al.* Brief Communication: Candidate Sites of 1.5 Myr Old Ice 37 km Southwest of the Dome C Summit, East Antarctica // The Cryosphere. 2018. V. 12. P. 2167–2174.
284. *Karlsson N.B., Binger M., Eagles G. et al.* Glaciological Characteristics in the Dome Fuji Region and New Assessment for "Oldest Ice" // TC. 2018. V. 12. P. 2413–2424.
285. *Alemany O., Chappellaz J., Triest J. et. al.* The SUBGLACIOR Drilling Probe: Concept and Design // Ann. Glaciol. 2014. V. 55. Iss. 68. P. 233–242.

Научное издание

А. А. Захаров

НЕЙТРИННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ НЕЙТРИНО И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДЛЕДНИКОВЫХ ОЗЁР АНТАРКТИДЫ

Корректор *Оробец Е. Ю.*
Технический редактор *Парфеева Т. А.*
Компьютерная обработка *Веселовской Е. В.*

Отпечатано в типографии НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
188300, Гатчина Ленинградской обл., мкр. Орлова роща, д. 1.
Зак. 440, тир. 100, уч.-изд. л. 15; 04.09.2026.

