

НТ1000

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ
ГЛУБОКОВОДНОГО НЕЙТРИННОГО ТЕЛЕСКОПА
КУБОКИЛОМЕТРОВОГО МАСШТАБА НА ОЗ. БАЙКАЛ

Москва - 2010 г.

Учреждение Российской Академии Наук, Институт Ядерных Исследований, 117312, Москва, пр. 60-летия Октября 7а

НИИ Прикладной Физики Иркутского Государственного Университете, 664003, Иркутск, б. Гагарина 20.

Объединенный Институт Ядерных Исследований, 141980, Московская обл., Дубна, ул. Жолио Кюри д. 6.

НИИ Ядерной Физики им. Д.В.Скобельцына, Московского Государственного Университета, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д.1 ст. 2.

Нижегородский Государственный Технический Университет, 03950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.

Государственный Морской Технический Университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 09-02-12295-офи_м)

Оглавление

1	Введение	6
1.1	Природные потоки нейтрино. Мотивация исследований	6
1.1.1	Нейтрино от локальных астрофизических объектов - источников космических лучей	6
1.1.2	Диффузный поток нейтрино	7
1.1.3	Темная материя	7
1.1.4	Атмосферные нейтрино, нейтрино прямой генерации	8
1.1.5	Магнитные монополи и другие гипотетические частицы	9
1.2	Нейтринные взаимодействия с мишенью и конечные продукты реакций	11
1.3	Среда - радиатор черенковского излучения	12
1.4	Нейтринные телескопы	12
1.5	История и современное состояние исследований на нейтринных телескопах	13
2	Байкальский нейтринный эксперимент	18
2.1	История реализации проекта НТ200	18
2.2	Характеристика места расположения телескопа	22
2.3	Оптические свойства глубинных вод оз. Байкал	22
2.4	Байкальский глубоководный нейтринный телескоп	23
2.4.1	Телескоп НТ200	23
2.4.2	Телескоп НТ200+	25
2.5	Краткий обзор результатов полученных в экспериментах на нейтринном телескопе НТ200	29
3	Конфигурация нейтринного телескопа НТ1000	31
3.1	Концепция НТ1000	31
3.2	Оптимизация конфигурации телескопа НТ1000	32
3.2.1	Мюоны	33
3.2.2	Ливни	34
3.3	Базовая конфигурация	37
4	Базовые элементы и электронные схемы НТ1000	39
4.1	Оптический модуль	39
4.1.1	Фотоэлектронный умножитель	39
4.1.2	Контроллер оптического модуля	40
4.1.3	Конструкция оптического модуля	42
4.1.4	Угловые характеристики оптических модулей	43
4.2	Секция	43
4.3	Гирлянда	45

4.3.1	Калибровка каналов гирлянды	46
4.4	Кластер	48
4.5	Системы передачи данных и формирования триггера	49
4.5.1	Система передачи данных	50
4.5.2	Триггерная система	51
4.6	Натурные испытания гирлянды	52
4.7	Береговой центр сбора данных и управления	56
4.7.1	Общие принципы, закладываемые в береговой центр сбора данных и управления	56
4.7.2	Основная Программа системы сбора данных	58
5	Акустическая система позиционирования	60
5.1	Основные результаты измерений пространственных координат фотодетекторов действующих байкальских нейтринных телескопов НТ200 и НТ200+	60
5.2	Система позиционирования нейтринного телескопа НТ1000 (ГАСИК - НТ1000)	64
6	Мониторинг оптических свойств среды	70
6.1	Измерение первичных гидрооптических характеристик	70
6.2	Поглощение света в байкальской воде	71
6.3	Рассеяние света в байкальской воде	71
6.4	Индикатриса рассеяния	73
6.5	Прибор нового поколения ВАКАЛ-4D	73
7	Развертывание	82
7.1	Несущие системы и кабельные глубоководные линии НТ1000	82
7.1.1	Основные типы притопленных буйковых станций (ПБС)	82
7.1.2	Основные элементы ПБС	85
7.1.3	Долговременная надежность ПБС и КЛД	90
7.1.4	Описание операций при развертывании и демонтаже несущих систем. Монтажное оборудование	90
7.1.5	Организация ледовых работ	92
8	Физические характеристики	94
8.1	Мюоны высоких энергий	94
8.1.1	Краткое описание программы моделирования мюонных событий	95
8.1.2	Атмосферные мюоны	97
8.1.3	Атмосферные нейтрино	98
8.1.4	Подавление случайных срабатываний и выделение фотодетекторов, сработавших от физических событий	99
8.1.5	Процедура восстановления параметров мюонов	102
8.2	Ливни высоких энергий	105
8.2.1	Распространение черенковского излучения ливней высоких энергий в воде и моделирование отклика оптического модуля на это излучение	108
8.2.2	Восстановление параметров ливней высоких энергий по данным нейтринного телескопа	110
8.2.3	Энергетическое и угловое разрешение НТ1000 относительно регистрации ливней высоких энергий	111
8.3	Эффективность регистрации нейтринных потоков	113

Глава 1

Введение

Нейтринные телескопы, размещаемые на больших глубинах в естественных прозрачных средах в различных географических районах Земли, являются экспериментальными измерительными комплексами, нацеленными на исследования широкого спектра научных проблем, и, в первую очередь, на исследование природных потоков нейтрино. Метод глубоководного детектирования, являющийся основой экспериментов по регистрации нейтрино высоких и сверхвысоких энергий астрофизической природы с помощью нейтринных телескопов, был впервые предложен М.А. Марковым [1] в 1960 году и заключается в регистрации черенковского излучения вторичных мюонов и/или ливней высоких энергий, образующихся при взаимодействии нейтрино с веществом в прозрачных природных средах. По аналогии с экспериментами на наземных ускорителях в экспериментах на глубоководных телескопах используется нейтринный поток природного происхождения, который облучает мишень (вода или лед, а также грунт под установкой - в случае мюонных нейтрино). Носителями информации о нейтрино являются конечные продукты нейтринных взаимодействий - мюоны и ливни высоких энергий, черенковское излучение которых регистрируется фотодетекторами нейтринного телескопа.

1.1 Природные потоки нейтрино. Мотивация исследований

Исследования потоков нейтрино астрофизической природы с помощью нейтринных телескопов ведутся по двум направлениям (см., например, [2, 3, 4]). Первое направление исследований касается поиска нейтринного сигнала от известных астрофизических объектов, либо обнаружения не идентифицированных локальных источников из наблюдений превышения сигнала над уровнем фона по всей небесной сфере.

1.1.1 Нейтрино от локальных астрофизических объектов - источников космических лучей

Природные потоки нейтрино высоких энергий формируются в результате физических процессов, протекающих в астрофизических объектах, характеризующихся гигантским энерговыделением с интенсивностью от 10^{39} до 10^{52} эрг/с и выше. Наиболее близкие по отношению к земному наблюдателю астрофизические объекты, способные, как предполагается в настоящее время, излучать высокоинтенсивные потоки нейтрино, расположены в основном в окрестности центра нашей Галактики и в галактической плоскости. Наиболее перспективными галактическими источниками по отношению к регистрации их нейтринного излучения являются остатки от взрывов сверхно-

вых, пульсары, окрестность черной дыры Sgr A* в центре нашей Галактики, двойные звездные системы, содержащие черную дыру или нейтронную звезду, скопления молекулярных облаков, являющиеся мишенью для протонов и ядер космических лучей. Энергетический спектр нейтрино от галактических источников заполняет область энергий 10^3 – 10^6 ГэВ.

К другому классу нейтринных источников, излучение которых может быть зарегистрировано наземными установками, относятся внегалактические объекты - активные ядра галактик, гамма-всплески, скопления галактик. Этот класс источников характеризуется существенно большим энерговыделением и генерирует нейтрино в диапазоне энергий 10^4 – 10^8 ГэВ и выше. В настоящее время число идентифицированных с помощью оптических, рентгеновских и гамма-телескопов галактических и внегалактических объектов, способных излучать нейтрино, приближается к сотне. Поиск нейтринного сигнала от идентифицированных источников накладывает высокие требования к разрешающей способности нейтринных телескопов как с точки зрения измерения энергии, так и измерения направления движения нейтрино.

1.1.2 Диффузный поток нейтрино

Другим направлением изучения природного потока нейтрино является исследование энергетического спектра, глобальной анизотропии и распределения по типам нейтрино природного диффузного потока от не идентифицированных источников в области энергий выше 10^4 ГэВ, в которой фон от атмосферных нейтрино сравним или меньше величины ожидаемого потока. Диффузный поток нейтрино высоких энергий в окрестности Земли формируется нейтринным излучением от всей совокупности источников за время, начиная с отдаленных космологических эпох и до наших дней. Основной вклад в этот поток вносят внегалактические объекты. Вклад в диффузный поток вносят также нейтрино, образующиеся в результате взаимодействия космических лучей с межзвездным веществом, а в случае космических лучей ультравысоких энергий - с электромагнитным излучением из широкого диапазона энергий, включая реликтовое излучение. Следует отметить, что определенную часть диффузного потока могли бы составлять нейтрино от распада сверхмассивных частиц, ассоциируемых, в частности, с теориями великого объединения GUT (top-down сценарий).

Стандартный подход, используемый широким кругом теоретических моделей, описывающих формирование нейтринных потоков в источниках космических лучей, предполагает рождение нейтрино, в основном, при распаде π -мезонов, образующихся в pp и $p\gamma$ взаимодействиях. В этом случае нейтринный поток, испускаемый источником, содержит нейтрино разного типа в пропорции $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \approx 1 : 2 : 0$. Вследствие эффекта нейтринных осцилляций это соотношение меняется в зависимости от расстояния до источника. Длина $\nu_\mu - \nu_\tau$ осцилляций при выборе параметров осцилляций $\delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3}$ эВ² и $\sin 2\theta = 1$, согласно данным эксперимента Super-Kamiokande [5], составляет $L_{osc} \sim 1.3 \times 10^{-4} (E_\nu / 1 \text{ ПэВ})$ парсек. Таким образом, длина осцилляций оказывается значительно меньше характерных расстояний до предполагаемых астрофизических источников нейтрино высоких энергий, и соотношение между различными типами нейтрино в детектируемом потоке приобретает вид $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \approx 1 : 1 : 1$.

1.1.3 Темная материя

Крупнейшей задачей современного естествознания является открытие частиц невидимой материи. Наблюдательные данные в области астрономии и космологии неопровержимо свидетельствуют о том, что в галактиках, скоплениях галактик и Вселенной в целом помимо обычного вещества имеется вещество нового типа - невидимая материя. Более того, в целом во Вселенной масса невидимой материи в 5-6 раз превышает массу обычного вещества, а вблизи Земли они находятся примерно в равном отношении.

Невидимая материя, по всей видимости, состоит из неизвестных пока частиц, масса каждой из которых заметно превышает массу наиболее тяжелой известной стабильной элементарной частицы - протона. Эти новые частицы должны иметь время жизни, сравнимое или превышающее возраст Вселенной. Несомненно, столь долгое время жизни связано с новыми законами сохранения в фундаментальной физике. С большой долей уверенности можно сказать, что за частицами невидимой материи стоит целый пласт новых явлений в физике микромира, происходящих при сверхвысоких энергиях, недоступных изучению на существующих ускорителях.

Частицы невидимой материи чрезвычайно слабо взаимодействуют с обычным веществом. В связи с этим их прямая регистрация, если она вообще возможна, представляет собой сложнейшую задачу экспериментальной физики. Весьма перспективным является другой путь к обнаружению частиц невидимой материи, связанный с поиском продуктов их аннигиляции в центре Земли, Солнца или центре Галактики. Среди этих продуктов должны быть нейтрино довольно высоких энергий (миллиарды - сотни миллиардов электрон-вольт), которые в свою очередь крайне слабо взаимодействуют с веществом и проходят сквозь Землю или Солнце практически без поглощения. Регистрация нейтрино таких энергий успешно осуществляется на крупных подземных установках и нейтринных телескопах, размещенных в естественных средах.

Методы поиска частиц невидимого вещества с помощью подземных детекторов и нейтринных телескопов в естественных средах заключаются в регистрации превышения мюонного потока в направлении от центра Земли или Солнца, либо от центра нашей Галактики над фоном от атмосферных нейтрино. Наиболее сильные ограничения на дополнительный поток мюонов в направлении от центра Земли и от Солнца получены на подземных установках Баксан, Супер-Камиоканде и MACRO, а также на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе НТ200 и на подледном нейтринном телескопе AMANDA. Эти ограничения близки по величине и составляют $(3 - 7) \times 10^{-15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$. Подземные нейтринные детекторы имеют более низкий порог регистрации мюонов (порядка 1-3 ГэВ) по сравнению с глубоководными (подледными) установками. Поэтому эти два класса детекторов взаимно дополняют друг друга. Первые из них эффективны для поиска частиц с массой менее 80 ГэВ (пороговая энергия рождения W -бозонов), а вторые - для исследования частиц с массой порядка сотни ГэВ и более.

Дальнейшее кардинальное увеличение чувствительности эксперимента к потоку мюонов от аннигиляции частиц невидимого вещества может быть достигнуто лишь за счет увеличения их эффективной площади в 5-10 раз. В случае нейтринных телескопов проблема сводится к созданию установок кубокилометрового масштаба. В случае подземных установок такое увеличение эффективной площади подразумевает увеличение характерных размеров детектора до сотни метров и более. Задача создания такой гигантской подземной установки представляется в настоящее время крайне нереалистичной.

1.1.4 Атмосферные нейтрино, нейтрино прямой генерации

Нейтрино атмосферного происхождения формируют наиболее интенсивный наблюдаемый в наземных экспериментах поток нейтрино в области энергий от сотен МэВ и до сотен ТэВ. При взаимодействии космических лучей с веществом атмосферы рождается большое количество пионов и каонов. В результате реакций распадов пионов, каонов и мюонов:

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

рождаются нейтрино, которые принято называть атмосферными. Вклад нейтрино от распада мюона существенен лишь до энергий порядка нескольких ГэВ, так как лоренцевское удлинение пробега мюона должно приводить к проникновению мюона в Землю до распада и, соответственно, к подавлению потоков электронных и мюонных нейтрино. В диапазоне энергий от 1 ГэВ

до 100 ТэВ основным источником атмосферных нейтрино являются пионы и каоны. В области энергий $10^2 - 5.4 \cdot 10^4$ ГэВ спектр атмосферных нейтрино описывается выражением:

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

где $A_\nu = 0.0285 \text{ ГэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$, $\gamma = 2.69$, E_π и E_K - критическая энергия пионов и каонов (энергия при которой вероятность распада равна вероятности взаимодействия), зависящая от зенитного угла θ . Первичные космические лучи распределены изотропно в окрестности Земли, однако, развитие каскадов, инициированных первичным излучением в атмосфере, нарушает изотропию потоков вторичных частиц. Пионы и каоны, рожденные первичной частицей под большими зенитными углами проводят большую часть времени в разреженной атмосфере, где вероятность распада, по сравнению с вероятностью взаимодействия, больше. Поэтому поток нейтрино в горизонтальном направлении превышает поток в вертикальном направлении. С ростом энергии время жизни пионов и каонов увеличивается и вероятность распада уменьшается по сравнению с вероятностью взаимодействия. Поэтому энергетический спектр нейтрино, рожденных от пионов и каонов, с ростом энергии становится круче (показатель степени γ увеличивается на единицу) первичного спектра космических лучей. Неопределенность в предсказаниях потоков нейтрино от пионов и каонов связана с неопределенностью потока и энергетического спектра космических лучей, а также неопределенностью в доле каонов и пионов, рождающихся в ядерном взаимодействии при высоких энергиях. Различие в рассчитанных разными авторами спектрах атмосферных нейтрино от пионов и каонов составляет около 15%.

При энергиях более 100 ТэВ возможен другой механизм рождения нейтрино. Так называемые нейтрино «быстрой генерации» или «прямые» нейтрино могут рождаться в процессах распада чармированных мезонов и барионов с временем жизни порядка 10^{-12} сек и меньше. Спектр прямых нейтрино практически повторяет спектр космических лучей и положе спектра нейтрино от пионов и каонов. Экспериментально прямые нейтрино пока не обнаружены. Согласно расчетам энергия, при которой потоки прямых нейтрино сравниваются, а затем и превышают потоки нейтрино от пионов и каонов, зависит от модели взаимодействия первичных космических лучей с ядрами атомов воздуха и от зенитного угла. Для вертикального потока нейтрино эта энергия находится в диапазоне 100–1000 ТэВ и увеличивается с ростом зенитного угла. Неопределенность ожидаемого потока атмосферных нейтрино в области 100 ТэВ обусловлена большими различиями в предсказаниях потока прямых нейтрино и достигает 100%.

С точки зрения экспериментов на нейтринных телескопах атмосферные нейтрино являются источником естественного неустраняемого фона, который существенно усложняет процедуры выделения полезного сигнала. С другой стороны, в силу достаточно высокого уровня теоретического предсказания интенсивности и характеристик потока атмосферных нейтрино, этот поток может быть эффективно использован в качестве калибровочного нейтринного потока. Кроме того, поиск прямых нейтрино является важной научной задачей.

1.1.5 Магнитные монополи и другие гипотетические частицы

В современную физическую теорию понятие магнитного монополя было введено в 1931 г. Дираком [6]. Им было показано, что любой магнитный заряд должен быть кратен минимальному возможному заряду g , однозначно связанному с минимальным электрическим зарядом:

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

Таким образом, минимальный магнитный заряд примерно в 68.5 раз больше минимального электрического заряда. Из этого, в частности, следует, что ионизационные потери энергии реляти-

вистских монополей в среде значительно больше чем у релятивистских мюонов, что открывает хорошие возможности для регистрации быстрых монополей в экспериментах на нейтринных телескопах. Теория черенковского излучения магнитных монополей была впервые исследована И.М. Франком [7]. Линейная плотность черенковского излучения с длиной волны λ (в предположении, что магнитная проницаемость среды $\mu = 1$) описывается выражением:

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

где g - магнитный заряд монополя, e - заряд электрона, n - показатель преломления света в среде (для воды $n = 1.33$), α - постоянная тонкой структуры. Интенсивность черенковского излучения релятивистского монополя в $(ng/e)^2 \approx 8300$ раз превышает интенсивность излучения релятивистского мюона. Таким образом, магнитный монополю со скоростью $\beta \simeq 1$ является ярким источником света, соответствующим по своей интенсивности мюону с энергией порядка $1.4 \cdot 10^4$ ТэВ. С середины 70 годов прошлого века ведутся интенсивные поиски магнитных монополей, стимулированные работами [8, 9]. В этих работах впервые было показано, что следствием теорий Великого объединения является возможность существования во Вселенной топологических дефектов в виде магнитных монополей. Массы таких частиц в зависимости от вариантов теории лежат в широком диапазоне от $\simeq 10^8$ ГэВ/ c^2 до $\simeq 10^{21}$ ГэВ/ c^2 . Наиболее надежными астрофизическими ограничениями на величину природного потока монополей являются: предел Чудакова-Паркера [10], полученный из условия сохранения наблюдаемой напряженности галактических магнитных полей:

$$F_{mon} < 10^{-15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1},$$

и «космологическое» ограничение, которое вытекает из очевидного условия

$$4\pi F_{mon} m_{mon} (c\beta)^{-1} < \rho_{cr} = 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{ см}^{-3},$$

из которого следует:

$$F_{mon} < 1.4 \cdot 10^{-12} \beta [(10^{16} \text{ ГэВ}/c^2)/m_{mon}] \text{ см}^{-2} \cdot \text{ с}^{-1} \cdot \text{ стер}^{-1}.$$

Оба этих ограничения не исключают возможности локального превышения приведенных предельных значений интенсивности потоков монополей, например, в Солнечной системе. В результате ускорения в галактических магнитных полях кинетическая энергия тяжелого монополя может достигать значений порядка 10^{11} ГэВ. С другой стороны, при прохождении сквозь Землю энергетические потери квазирелятивистских монополей с $\beta \geq \beta_c$ ($\beta_c = 0.75$ - пороговая скорость монополя с точки зрения генерации черенковского излучения) составляют примерно 10^{11} ГэВ. Из этого следует, что монополи с массой меньше 10^{11} ГэВ, проходя сквозь Землю, остаются квазирелятивистскими и могут быть зарегистрированы по своему черенковскому излучению нейтринными телескопами.

В 1981 г. была опубликована работа Рубакова [11], содержащая вывод о том, что в присутствии монополя предсказываемого теориями Великого объединения процессы с несохранением барионного числа не подавлены. Аналогичный вывод был сделан в 1982 г. Калланом [12]. Сечение реакции катализа монополю барионного распада оценивалась как

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

где σ_0 принималось равным по порядку величины характерным значениям сильных взаимодействий: $\sigma_0 \sim 10^{-28} \text{ см}^2$. Учет электромагнитного взаимодействия монополя и ядра, в состав которого входит нуклон, приводит к появлению в выражении для сечения катализа фактора $F(\beta_{mon}) = 2.4 \cdot 10^7 \beta_{mon}^{3.1}$ для нуклонов, входящих в состав ядра ^{16}O и $F(\beta_{mon}) = 0.17 \cdot \beta_{mon}^{-1}$ для

свободных протонов. Монополь, двигаясь в воде со скоростью меньше или порядка 10^{-3} , должен инициировать, главным образом, распад ядер водорода с сечением

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

Энергия, выделяющаяся при единичном акте катализа ($m_p c^2 = 938$ МэВ), распределяется между продуктами распада протона. Последние, распространяясь в воде, становятся источниками черенковского излучения, которое генерируется также их дочерними частицами, δ -электронами, e^+e^- -парами и т.д. В результате каждого распада протона излучается до $N_\gamma = 1.1 \cdot 10^5$ черенковских фотонов в интервале длин волн $300 < \lambda < 600$ нм. Таким образом, траектория монополя, индуцирующего распады протонов при пересечении водного объема, должна выглядеть как цепочка вспышек с черенковским спектром. Если распады происходят достаточно часто, например $10 - 10^3$ на 1 см пути монополя, то скорость регистрации черенковских фотонов, излученных продуктами распада, может заметно превышать скорость счета импульсов ФЭУ, обусловленных темновым током и свечением водной среды. Метод поиска медленных монополей в экспериментах на нейтринных телескопах основан на выделении таких событий [13].

1.2 Нейтринные взаимодействия с мишенью и конечные продукты реакций

Нейтрино высоких энергий природного происхождения взаимодействуют с веществом мишени, в основном, посредством реакций на нуклонах, реализующихся по каналам заряженных (CC) и нейтральных (NC) токов:

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \xrightarrow{CC} l^-(l^+) + \text{адроны}, \quad (1.2.1)$$

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \xrightarrow{NC} \nu_l(\bar{\nu}_l) + \text{адроны}, \quad (1.2.2)$$

где $l = e, \mu$ или τ . Взаимодействие нейтрино с электронами мишени практически не вносит вклада в общее число регистрируемых нейтринных событий за исключением резонансного рассеяния электронных антинейтрино в области W-резонанса

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- \rightarrow \text{все}, \quad (1.2.3)$$

с энергией в резонансе $E_0 = M_W^2/2me = 6.3 \times 10^6$ ГэВ и сечением 5.02×10^{-31} см². Конечные продукты реакций (1.2.1 - 1.2.3) - лептоны и ливни высоких энергий несут информацию об энергии, направлении и, в принципе, о типе нейтрино.

В экспериментах на глубоководных и подледных черенковских детекторах эффективный размер мишени зависит от энергии нейтрино, а также от типа нейтрино. В случае мюонных нейтрино в силу высокой проникающей способности вторичных мюонов нейтринной мишенью является как прозрачная среда в окрестности телескопа, так и грунт под установкой. В первом случае энергия мюонного нейтрино может быть определена по результатам восстановления энергий мюона и ливня, генерируемого в вершине нейтринного взаимодействия. При взаимодействии мюонного нейтрино в грунте вследствие энергетических потерь мюона при его распространении от вершины взаимодействия до установки энергия нейтрино в каждом индивидуальном событии не может быть восстановлена точно. Однако, при достаточно большой статистике зарегистрированных событий энергетический спектр потока мюонных нейтрино может быть восстановлен по результатам реконструкции энергии мюонов. Исследование природных потоков электронных

и τ -нейтрино, составляющих две трети от полного потока, в экспериментах на нейтринных телескопах возможно лишь посредством регистрации вторичных ливней, генерируемых в водной мишени. Адронные ливни образуются во взаимодействиях всех типов нейтрино с ядрами по каналам заряженных (CC) и нейтральных (NC) токов. Кроме того, в случае CC-взаимодействия электронных и τ -нейтрино энергия электрона переходит в энергию электромагнитного ливня, а существенная доля энергии τ -лептона в результате его распада, передается в адронный либо электромагнитный ливень. Таким образом, достижение высокой точности восстановления энергии и направления ливней является неременным условием эффективной регистрации природных потоков нейтрино всех типов.

1.3 Среда - радиатор черенковского излучения

Прозрачная среда является не только мишенью, но также средой генерации и распространения черенковского излучения мюонов и ливней высоких энергий от источника до фотодетекторов нейтринного телескопа. Исследование природных потоков нейтрино с помощью нейтринных телескопов предъявляет жесткие требования к оптическим свойствам и фоновым условиям естественной среды: среда должна обладать высокой прозрачностью, временное и угловое распределение черенковских фотонов мюонов и ливней на больших расстояниях от источников не должно существенно искажаться из-за процесса рассеяния света в среде, фоновое свечение среды должно быть на уровне, позволяющем надежное выделение и идентификацию нейтринных событий. Таким образом, с точки зрения оптических свойств среды, наиболее адекватной по отношению к эффективности регистрации, является среда с большой длиной поглощения и рассеяния света и острой индикатрисой рассеяния. В этом случае совокупность временной и амплитудной информации измерительных каналов телескопа позволяет с высокой степенью точности определить координаты, энергию и направление оси ливня, либо восстановить траекторию и энергию мюона. Кроме того, важным фактором является степень агрессивности среды по отношению к конструкционным материалам. Глубинные пресные воды оз. Байкал, глубинный лед Антарктиды и глубинные морские воды Средиземного моря являются местом расположения действующих и планируемых в настоящее время нейтринных телескопов. Эти среды характеризуются уникальными свойствами, однако, каждая из них обладает определенными преимуществами и недостатками по сравнению с остальными двумя, и в этом смысле взаимно дополняют друг друга.

1.4 Нейтринные телескопы

Базовыми элементами нейтринных телескопов являются фотодетекторы, заполняющие геометрический объем порядка $10^5 - 10^7$ м³ в случае телескопов первого поколения (NT200/NT200+ [14, 15], AMANDA [16], ANTARES [17]), и объем порядка кубического километра в случае телескопов следующего поколения (IceCube [18], NT1000, KM3NeT [19]). Амплитудно-временной отклик фотодетекторов, а также топология отклика телескопа на черенковское излучение мюонов и ливней высоких энергий являются той информацией, которая позволяет выделить нейтринные события и определить параметры регистрируемых нейтрино. Исследования природных потоков нейтрино с помощью регистрации мюонов, либо с помощью регистрации ливней обладают своими преимуществами и взаимно дополняют друг друга. Мюоны являются длиннопробежными частицами, способными преодолевать расстояния до нескольких километров в плотной среде в зависимости от их энергии. При прохождении через чувствительный объем нейтринного телескопа интенсивность черенковского излучения мюона пропорциональна его энергии и остается практически постоянной. Особенности распространения мюонов в прозрачной среде обуславливают характерный отклик нейтринного телескопа - сработавшие фотодетекторы расположены вдоль

траектории мюона, временная последовательность срабатывания фотодетекторов определяется временем прохождения мюона в окрестности фотодетектора, а амплитудный отклик фотодетекторов зависит от расстояния до траектории мюона. Угловое разрешение траекторий мюонов в ныне действующих нейтринных телескопах составляет примерно 1–3 градуса, а телескопы следующего поколения будут иметь угловое разрешение порядка 0.3–0.5 градусов. Таким образом, метод регистрации нейтрино с помощью мюонов представляет собой мощный инструмент для исследования космических объектов Галактического и внегалактического происхождения. Существенный недостаток мюонного канала исследований заключается в том, что он применим лишь к одному типу нейтрино - мюонным нейтрино.

Ливни высоких энергий, образованные в вершине нейтринного взаимодействия, являются квазилокальными источниками черенковского излучения с интенсивностью, пропорциональной энергии ливня. Поток черенковских фотонов, регистрируемый фотодетекторами телескопа, а следовательно, и амплитуда зарегистрированного сигнала сработавших фотодетекторов, спадает по мере увеличения расстояния до ливня. Время срабатывания фотодетекторов определяется временем распространения черенковских фотонов от ливня до фотодетектора. Восстановление направления развития ливней является более трудной задачей, по сравнению с восстановлением направлений мюонных траекторий. В антарктическом льду, в силу интенсивного рассеяния света, точность восстановления направления ливней составляет примерно 30° . В экспериментах на глубоководных телескопах, из-за малого сечения рассеяния света в воде, угловое разрешение направления ливней существенно выше и составляет 3–5 градусов. Такая точность восстановления позволяет вести поиск и исследование квазилокальных астрофизических объектов, например, скоплений молекулярных облаков в Галактической плоскости по их нейтринному излучению, а также исследование глобальной и локальной анизотропии диффузного нейтринного потока. Несомненным преимуществом ливневого канала регистрации является тот факт, что ливни возникают при взаимодействии всех трех типов нейтрино в чувствительном объеме телескопа. Более того, электронные и τ -нейтрино могут быть зарегистрированы только посредством регистрации вторичных ливней.

1.5 История и современное состояние исследований на нейтринных телескопах

В середине 70 годов прошлого века велось активное обсуждение проблем астрофизики, физики космических лучей и физики элементарных частиц, которые могли бы быть исследованы с помощью глубоководных нейтринных телескопов, в частности, глубоководного нейтринного телескопа DUMAND в Тихом Океане у берегов Гавайских островов [20, 21]. Обобщение результатов этих обсуждений приводится в статье В.С. Березинского и Г.Т. Зацепина [2]. Наиболее существенным результатом, достигнутым в ходе работ по проекту DUMAND, явилось проведение натуральных испытаний пилотной гирлянды, содержавшей семь оптических модулей [22]. Работы по проекту DUMAND были прекращены в 1994 году.

Современный уровень знаний о природных потоках нейтрино высоких и сверхвысоких энергией ($10^{10} - 10^{18}$ эВ), в основном, определяется результатами, полученными за последнее десятилетие в экспериментах на нейтринных черенковских детекторах NT200/NT200+ и AMANDA. В 2008 году начат набор данных на нейтринном телескопе ANTARES в Средиземном море. Эти три детектора составляют первое поколение нейтринных телескопов и характеризуются эффективным объемом порядка 10^7 м³ по отношению к регистрации нейтрино с энергией выше 10 ТэВ.

В 1980 году в Советском Союзе начались исследования нацеленные на создание глубоководного черенковского детектора на оз. Байкал. В 1993 году была смонтирована и введена в

эксплуатацию первая очередь детектора НТ200 содержащая 36 глубоководных оптических модулей. Нейтринный телескоп НТ200 был введен в эксплуатацию в проектной конфигурации в апреле 1998 года и явился первым в мире нейтринным телескопом функционирующим в естественной среде. В 2005 году чувствительный объем Байкальского нейтринного телескопа была увеличен за счет постановки трех дополнительных внешних гирлянд содержащих по 12 оптических модулей на расстоянии 100 м от центра телескопа. Новая версия телескопа (НТ200+) функционирует вплоть до настоящего времени.

Работы по реализации проекта AMANDA (США, Германия, Швеция) были начаты в начале 90 годов. В 1996 году была осуществлена постановка 86 оптических модулей, размещенных на четырех гирляндах на глубине (1.5–1.9) км. В последующие годы осуществлялось планомерное развертывание детектора, и в феврале 2000 года детектор AMANDA был введен в эксплуатацию в проектной конфигурации, содержащей 677 оптических модулей и проработал до 2010 года.

Коллаборация ANTARES (Франция, Англия, Голландия, Россия, Италия) на протяжении последних десяти лет ведет работы по созданию глубоководного черенковского нейтринного телескопа в Тулонском заливе Средиземного моря. Телескоп расположен на расстоянии 25 км от берега на глубине около 2400 м и содержит 900 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), сгруппированных в триплеты и размещенных на 12-ти гирляндах длиной 350 м, разнесенных на 70 метров друг от друга. Первая гирлянда телескопа была развернута в феврале 2006 года, а в марте 2008 года нейтринный телескоп ANTARES приступил к набору данных в проектной конфигурации.

Кроме перечисленных выше действующих нейтринных телескопов первого поколения существуют два средиземноморских проекта - NESTOR и NEMO, направленных на создание нейтринных телескопов, соответственно в Греции и в Италии.

Коллаборация NESTOR ведет работы по созданию нейтринного телескопа первого поколения в Средиземном море у берегов Греции с начала 90-х годов прошлого века. Следует отметить, что географические, гидрооптические и гидрологические свойства среды и уровень фона, обусловленный процессами биолюминесценции, в месте расположения телескопа наиболее адекватны требованиям, предъявляемым к водной среде при создании нейтринного телескопа в Средиземном море. Наиболее значимым результатом достигнутым в рамках работ по реализации проекта за последние 15 лет, является постановка в 2003 году прототипа уменьшенного масштаба (12 ФЭУ) одного этажа будущего детектора. После месяца эксплуатации этого детектора набор данных был прерван в связи с возникшими неполадками в системе энергопитания. Создание первой стационарной установки, использующей несколько сотен ФЭУ, здесь можно ожидать в лучшем случае не ранее чем через два-три года.

Коллаборация NEMO (Италия) несколько лет назад начала активные исследования района Средиземного моря вблизи Сицилии с целью развертывания там детектора, который послужит прототипом будущего кубокилометрового общеевропейского нейтринного телескопа. В декабре 2006 года была осуществлена постановка и начались натурные испытания прототипа одной башни будущего детектора, содержащей 16 оптических модулей. Однако после месяца работы прототип потерял плавучесть и лег на дно. На 2010 год запланирована постановка и испытания одной полномасштабной башни будущего детектора, содержащей 64 ФЭУ.

Успешная эксплуатация на протяжении более чем десяти лет нейтринных телескопов первого поколения (Байкальского нейтринного телескопа НТ200 (НТ200+) и телескопа AMANDA) и достигнутые в этих экспериментах уровни чувствительности к природным потокам нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, которые примерно на два порядка превышают чувствительности наиболее крупных подземных детекторов (SuperKamiokande, MACRO), со всей очевидностью доказали возможность и эффективность метода детектирования нейтрино и других элементарных частиц в естественных средах (в первую очередь в пресной воде оз. Байкал и в антарктическом

льду). В то же время результаты, полученные в экспериментах на нейтринных телескопах первого поколения, явились мотивацией разработки и создания нейтринных телескопов с характерным масштабом порядка кубического километра, которые позволят увеличить чувствительность к природным потокам нейтрино более чем на порядок величины.

В настоящее время в мире активно развиваются три проекта крупномасштабных нейтринных телескопов в естественных средах: IceCube на Южном полюсе, средиземноморский KM3NeT и байкальский NT1000, находящиеся на разных стадиях реализации.

Успешное развитие проекта AMANDA позволило убедить правительство и конгресс США в необходимости выделения значительных средств (около 300 млн. долларов США) на создание на Южном полюсе детектора IceCube с эффективным объемом порядка кубокилометра. Первая из 86 гирлянд IceCube была развернута на Южном полюсе зимой 2005 года. В последующие годы темпы монтажа установки последовательно нарастали, и в декабре 2010-го года детектор был развернут и запущен в эксплуатацию в проектной конфигурации.

Основными участниками проекта KM3NeT по созданию нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба в Средиземном море являются коллаборации ANTARES, NEMO и NESTOR. Финансируется проект из общего бюджета стран ЕС. Начиная с 2006 года, и по настоящее время работы над проектом находятся на стадии поиска технических решений, выработки общей концепции, разработки архитектуры детектора и испытания основных элементов и систем. Окончательное решение о сооружении детектора и месте его размещения ожидается в 2012 году. Объявленной целью является создание детектора к 2015–2017 году.

Каждый из планируемых и создаваемых в настоящее время телескопов следующего поколения (IceCube, NT1000, KM3NeT) обладает определенными преимуществами и недостатками, обусловленными местом его положения, свойствами среды, степенью сложности инженерно-технических решений при создании и эксплуатации установки, затрат на создание и поддержку инфраструктуры, а также возможностью изменения конфигурации и увеличения чувствительности телескопа. Байкальский телескоп NT1000 и средиземноморский KM3NeT, расположенные в северном полушарии, и детектор IceCube на Южном полюсе в силу их географического положения будут взаимно дополнять друг друга и сформируют мировую сеть установок, нацеленных на поиск и исследование источников нейтрино на всей небесной сфере. Детекторы, расположенные в северном полушарии обладают важным преимуществом - они способны вести практически непрерывное наблюдение центра Галактики (NT1000 - 18 часов и KM3NeT - 15 часов в течение суток) и Галактической Плоскости, где сконцентрирована значительная доля потенциальных галактических источников космических лучей (пульсары, остатки сверхновых, двойные системы и т.д.), включая массивную черную дыру Sgr A* в центре Галактики. С целью исследования центра Галактики в телескопе IceCube увеличена плотность фотодетекторов в центральной части телескопа (Deep Core) за счет развертывания дополнительных 6-ти гирлянд длиной по 72 метра с более плотным размещением оптических модулей вдоль этих гирлянд. При этом предполагается, что остальная часть телескопа будет исполнять роль veto-детектора и позволит подавить фон от атмосферных мюонов.

Существенным фактором при сравнительном анализе различных экспериментов в естественных средах являются оптические свойства среды - оптическая прозрачность, уровень собственного свечения (фон), а также агрессивность среды по отношению к конструкционным материалам. Антарктический лед характеризуется сильной неоднородностью по глубине, связанной с прозрачностью атмосферы и условиями образования снежного покрова Антарктиды за период порядка ста тысяч лет. В результате, длина поглощения света льдом на глубинах от 1500 м до 2500 м меняется в широком диапазоне от 30 м до 100 м, длина рассеяния - от 0.4 м до 4 м, а длина ослабления не превышает 30 м. Интенсивное рассеяние света в совокупности со слабым его поглощением в антарктическом льду приводит к быстрой изотропизации светового поля

и соответственно к потере информации о координатах и ориентации источника черенковского излучения. Оптические свойства глубинных вод Средиземного моря характеризуются длиной поглощения 50–70 м и длиной рассеяния порядка 30–60 м. Для глубинных вод оз. Байкал характерными являются длина поглощения 22–25 м и длина рассеяния 30–50 м. Величина длины рассеяния света в байкальской и средиземноморской воде более чем на порядок превышает аналогичную величину в антарктическом льду. Благодаря этому, глубоководные телескопы NT1000 и KM3NeT будут обладать существенным преимуществом в задаче исследования диффузного потока нейтрино в диапазоне энергий $10^2 - 10^6$ ТэВ. Наряду с исследованием энергетического спектра на уровне чувствительности детектора IceCube, они будут способны вести исследование глобальной и локальной угловой анизотропии диффузного потока нейтрино посредством регистрации ливней от нейтрино всех трех типов с последующим восстановлением ориентации оси ливня с точностью порядка нескольких градусов. Отметим, что точность восстановления оси ливня в IceCube не превышает 30 градусов.

С точки зрения природного фона, обусловленного собственным свечением среды, эксперимент IceCube обладает несомненным преимуществом по сравнению с глубоководными экспериментами. В антарктическом льду практически отсутствует собственное свечение среды. Кроме того, благодаря экстремально низким значениям температуры глубинного льда (примерно минус 50 градусов по Цельсию) темновой ток ФЭУ примерно на порядок ниже, чем в случае глубоководных экспериментов. В свою очередь с точки зрения фоновых условий детектор NT1000 обладает преимуществом по сравнению с KM3NeT, так как в отличие от пресной воды оз. Байкал в морской воде Средиземного моря присутствует фон обусловленный процессами биолюминесценции. Как показал опыт эксплуатации телескопа ANTARES, интенсивность свечения воды в этом случае может достигать значений до 1 МГц и выше, что приводит к потере информативности полученных данных. В заключение сравнения разных экспериментов с точки зрения преимуществ, обусловленных свойствами среды, отметим, что соленая вода Средиземного моря предъявляет существенно более жесткие требования, по сравнению с пресной байкальской водой и антарктическим льдом, к антикоррозийным свойствам конструкционных материалов элементов, узлов и несущих конструкций нейтринного телескопа.

Одним из наиболее важных факторов, определяющих реализуемость проектов по созданию крупномасштабных нейтринных телескопов, является создание и поддержка инфраструктуры и степень сложности технической реализации проекта. Проект IceCube использует инфраструктуру полярной антарктической станции Амундсен-Скотт. Поддержка жизнеспособности этой станции требует существенных финансовых затрат, связанных с ее труднодоступностью и экстремальными климатическими условиями на Южном полюсе. Технология развертывания телескопа основана на протаивании скважин глубиной до 2500 метров во льду с помощью специального энергозатратного оборудования. Для протаивания одной скважины требуется 5520 галлонов или 18 тонн топлива. Вмораживание оптических модулей телескопа в лед исключает возможность извлечения и ремонта научного оборудования и изменения конфигурации телескопа. Все эти факторы определяют высокую стоимость проекта. При возникновении необходимости в детекторе более крупного масштаба для решения задач нейтринной астрофизики, расширение IceCube потребует разработки нового проекта и может быть реализовано лишь в отдаленном будущем. В случае средиземноморского проекта KM3NeT создание береговой инфраструктуры не вызывает принципиальных трудностей. С другой стороны, развертывание и долговременная эксплуатация нейтринного телескопа на больших глубинах в соленой воде Средиземного моря предъявляет повышенные требования к надежности электронных и коммуникационных систем и несущих конструкций телескопа, и является трудной и дорогостоящей инженерно-технической задачей. Например, подключение коммуникационного кабеля, обеспечивающего передачу данных и энергопитание телескопа к системному модулю телескопа, установленному на дне моря, осуществля-

ется с помощью специализированных подводных аппаратов, либо подводных роботов. В результате оценочные затраты на создание телескопа КМЗНеТ составляют от 200 до 300 миллионов евро. В отличие от антарктического льда размещение телескопа в море позволяет обеспечить доступность определенной части вышедших из строя элементов и узлов телескопа для проведения ремонтных работ. Это касается в основном гирлянд оптическими модулей, которые при необходимости могут быть отсоединены от донных якорей и при удачном всплытии отправлены на берег для выполнения ремонтных работ. Существенным недостатком проекта КМЗНеТ является отсутствие мирового опыта долговременной эксплуатации глубоководных установок в море - нейтринный телескоп ANTARES в проектной конфигурации с переменным успехом проработал к настоящему времени около трех лет, а длительность функционирования пилотных установок экспериментов NEMO и NESTOR в совокупности составляет не более двух месяцев. Следует отметить, что основной проблемой, стоящей перед коллаборацией КМЗНеТ в настоящее время, и которая должна быть решена в ближайшем будущем, является выбор региона (страны), где будет развернут телескоп, и согласование концепции реализации проекта. Конкуренция в продвижении собственных научных и технических разработок между ведущими научными группами усугубляется конфликтом региональных и государственных интересов стран участниц проекта. Не исключено, что компромиссным решением будет являться создание не одного, а сети из двух или трех, по возможности максимально унифицированных, детекторов меньшего масштаба в разных регионах Средиземного моря.

Проект телескопа НТ1000 предполагает использование при его создании и эксплуатации существующей инфраструктуры Байкальской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Рельеф дна озера позволяет развертывание установки на расстоянии 4–6 км от берега, что существенно меньше характерных расстояний 25–150 км, обсуждаемых для средиземноморских проектов. Наличие в течение примерно двух месяцев (с середины февраля до середины апреля) устойчивого ледового покрова позволяет вести работы по развертыванию телескопа, а также ремонтные, профилактические и исследовательские работы непосредственно со льда, используя его как прочную и неподвижную монтажную платформу. Эта же специфика Байкальского проекта дает возможность планировать модульную архитектуру телескопа НТ1000, сохраняя тем самым возможность последующего наращивания его объема путем постановки дополнительных, функционально независимых кластеров. Кроме того, в байкальских условиях существует уникальная (и уже испытанная) возможность оперативного изменения конфигурации глубоководной установки путем перемещения гирлянд в новое положение непосредственно под водой без их предварительного подъема и демонтажа на поверхности.

Глава 2

Байкальский нейтринный эксперимент

2.1 История реализации проекта НТ200

Ниже приводится краткий обзор этапов создания и эксплуатации Байкальского нейтринного телескопа НТ200 (НТ200+), трудностей и проблем, возникавших на разных этапах, методов и решений, использованных для их устранения. Этот обзор иллюстрирует процесс накопления опыта по созданию глубоководного детектора и профессиональный уровень коллектива Байкальской коллаборации.

Разработке проекта, монтажу и запуску детектора предшествовали исследования гидрооптических, гидрофизических и гидрологических условий проведения экспериментов на оз. Байкал. Была осуществлена постановка на длительную эксплуатацию пилотных глубоководных черенковских детекторов, на которых не только отработывалась методика, но и выполнялись первые физические эксперименты.

Следующей задачей Байкальской коллаборации стало создание первого крупномасштабного глубоководного нейтринного телескопа НТ200 с эффективной площадью регистрации (2-10) тыс. м² (в зависимости от энергии частицы) и проведение на нем широкой программы физических исследований. Монтаж и развертывание этой установки проводились с 1993 г. по 1998 г. на оз. Байкал. Детектор был создан на основе 192 глубоководных оптических модулей, в состав которых входят специально разработанные для Байкальского эксперимента высокочувствительные фотоприемники "КВАЗАР-370" с диаметром фотокатода 370 мм.

В 1993 году была смонтирована и введена в эксплуатацию первая очередь детектора в составе 36 глубоководных оптических модулей, глубоководной системы сбора и передачи данных, берегового центра управления, глубоководной лазерной системы временной синхронизации, группы приборов для постоянного контроля *in situ* параметров водной среды на больших глубинах и гидроакустической системы измерения пространственных координат оптических модулей. Оптические модули были размещены на глубине порядка 1100 м и смонтированы на трех вертикальных гирляндах. Эффективная площадь детектора для регистрации мюонов космических лучей была близка к 300 м². За первый календарный год установка проработала 240 суток в режиме тестирования состояния систем и набора данных. Зарегистрировано свыше 70 миллионов событий от мюонов.

В зимнюю экспедицию 1994 г. была осуществлена частичная модернизация конфигурации установки (расстояние между гирляндами увеличено до 21 м). В этой конфигурации установка

проработала 242 дня. Зимой 1994 г. была осуществлена прокладка дополнительной донной линии кабельной связи на основе грузонесущего оптоволоконного кабеля между районом размещения глубоководных установок и береговым центром управления, сбора и обработки данных.

В марте 1995 г. на детекторе были смонтированы дополнительно 36 оптических модулей. Однако, экстремальные погодные условия (чрезвычайно теплая зима в Сибири) привели к сокращению сроков проведения монтажных работ со льда озера, что, в свою очередь, привело к сокращению объемов испытания глубоководной аппаратуры перед ее погружением и, в конечном итоге, отрицательно сказалось на ее долговременной надежности. На протяжении года эксплуатации вследствие накопления неисправностей в электронных системах и выхода из строя оптических модулей телескопа шло постепенное уменьшение его эффективной площади и ухудшение качества данных. К концу декабря 1995 года на берег не поступали сигналы от 16 из 72 глубоководных оптических модулей.

В период зимней экспедиции 1996 года в значительной части оптических модулей были установлены модернизированные источники питания фотоприемников КВАЗАР-370, обладающие повышенной защищенностью от высоковольтных помех. С целью подготовки детектора к многолетней эксплуатации была произведена замена всех тросовых элементов несущей конструкции телескопа, выполненных из обычной стали, коррозионностойкими стальными канатами из нержавеющей проволоки. Смонтированная в зимнюю экспедицию 1996 года установка содержала 96 оптических модулей на четырех вертикальных гирляндах (по 24 оптических модуля на каждой). Установка проработала 170 суток в режиме непрерывного набора данных.

В зимнюю экспедицию 1997 года на несущем каркасе создаваемого нейтринного телескопа НТ200 было смонтировано 48 новых оптических и 16 электронных глубоководных модулей. В результате, общее число оптических модулей возросло до 144-х. Установка проработала 240 суток в режиме набора данных. В период зимней экспедиции 1997 года был проведен эксперимент по регистрации света от погружаемого точечного источника (на основе оптического лазера) фотоприемниками нейтринного телескопа НТ144 на оз. Байкал. В результате обработки данных этого эксперимента были получены значения оптических характеристик воды для длины волны 480 нм: длина поглощения - (21 - 23) м, асимптотическая длина затухания - (17.0 - 17.6) м. Эти результаты подтвердили возможность и эффективность мониторинга оптических параметров среды с помощью нейтринного телескопа.

В зимнюю экспедицию 1998 года был закончен монтаж и осуществлен запуск в режиме постоянного круглогодичного набора данных Байкальского глубоководного детектора мюонов и нейтрино НТ200, ставшего одним из крупнейших в мире нейтринных телескопов. С 6 апреля 1998 года детектор НТ200 начал функционировать в конфигурации, содержащей 192 оптических модуля скомпонованных в виде восьми вертикальных гирлянд длиной по 72 м, установленных на глубине 1100-1200 м. Скорость счета атмосферных мюонов составляла примерно 14 Гц, а мюонов от атмосферных нейтрино из под горизонта - примерно одно событие в двое суток.

В результате успешного функционирования телескопа НТ200 с апреля 1998 года по февраль 2003 года, был выделен набор качественных экспериментальных данных, соответствующий 1038 дням чистого набора данных, который в последствии был использован при анализе данных в рамках различных физических исследований. Реализация проекта нейтринного телескопа НТ200 является первым в мире удачным опытом создания стационарного крупномасштабного глубоководного черенковского детектора элементарных частиц, открывшем новые перспективы развития исследований в области нейтринной астрофизики. Детектор дал возможность вести поиск новых частиц и редких процессов на недоступном другим методам уровне чувствительности и стал мощнейшим средством мониторинга экосистемы Южного Байкала.

В ходе эксплуатации НТ200 в 2002-2003 г.г. наблюдались нарушения в системе глубоководной кабельной связи с детектором. Анализ характера этих нарушений привел к выводу, что

их причиной является процесс электрохимической коррозии броневой оболочки кабелей в непосредственной близости от детектора, на глубине около 1100 метров. С целью устранения этого эффекта был разработан и изготовлен специальный семижильный кабель-трос с полипропиленовой защитной оболочкой. Первая донная линия связи с использованием этого кабеля была проложена на оз. Байкал в 2004 году.

В 2002 году был разработан проект нейтринного телескопа НТ200+, который наряду с детектором НТ200 имеет в своем составе три внешних гирлянды оптических модулей, размещенных на расстоянии 100 м от НТ200 и включающих в себя по 12 оптических модулей. Эта установка рассматривалась в качестве промежуточного этапа на пути создания кубокилометрового телескопа на оз. Байкала.

В период зимней экспедиции 2003 года была развернута первая внешняя гирлянда и прошли натурные испытания элементов глубоководной системы временной синхронизации и системы сбора данных детектора НТ200+. При испытаниях новые электронные узлы и алгоритм выделения событий, общих для детектора НТ200 и внешней гирлянды, показали достаточную надежность. Количество таких событий от мюонов (около 6000 за время наблюдения) оказалось близким к ожидавшемуся.

В период зимней экспедиции 2004 года основные усилия были сосредоточены на монтаже второй внешней гирлянды детектора НТ200+, системы подводных кабельных коммуникаций, прокладке новой донной кабельной линии связи детектора с береговым центром управления на основе специально разработанного семижильного кабель-троса с полипропиленовой защитной оболочкой, на модернизации системы управления и сбора данных, ее испытании (вполне успешном) в режиме регистрации реальных физических событий. Детектор НТ200, объединенный с внешними гирляндами единой системой управления и сбора данных на базе подводной, локальной сети микрокомпьютеров, был включен 11 апреля в работу в режиме постоянного набора данных. Произведена практически полная модернизация подводной части системы управления и частичная модернизация берегового центра приема и обработки информации. Использование современных сетевых решений в рамках разработанной системы обеспечило увеличение скорости обмена информацией между береговой и подводной аппаратурой более чем на порядок, позволило сократить количество необходимых донных кабельных линий связи. Использование стандартного TCP/IP протокола обмена информацией позволило реализовать режим удаленного управления установкой через систему спутниковой связи, протестированной во время экспериментальных сеансов, проведенных в Москве и в Цойтене (Германия).

В период экспедиции 2005 года, были выполнены: монтаж и постановка последней, третьей внешней гирлянды детектора НТ200+ с регистрирующей глубоководной аппаратурой, установлен новый мощный калибровочный источник света (на основе газового лазера), проложена новая донная линия связи детектора с береговым центром управления на основе семижильного геофизического кабеля в полипропиленовой защитной оболочке, отлажен режим удаленного контроля состояния установки, выполнена большая программа исследований окружающей среды и получен, в частности, ряд совершенно неожиданных, требующих глубокого осмысления результатов в эксперименте по изучению вертикальной составляющей электрического поля Земли.

Исключительно благоприятные погодные условия зимы 2006-го года позволили выполнить весьма внушительный объем работ: в частности, модернизацию глубоководной регистрирующей и управляющей аппаратуры, осуществить прокладку новой (четвертой) донной линии связи детектора с береговым центром управления на основе семижильного геофизического кабеля. В результате выполненных работ эффективность регистрации физических событий установкой НТ200+ была увеличена более, чем на 20% по сравнению с показателями 2005 года. Предварительный анализ экспериментальных данных показал их хорошее согласие с результатами, ожидавшимися на основе численного моделирования. Эффективный объем детектора НТ200+

превышает 10^7 м³ для регистрации с энергией 10 ПэВ. В целях дальнейшего развития экспериментального комплекса Байкальского Глубоководного Нейтринного Телескопа (БГНТ), были поставлены на длительные испытания в составе детектора образцы новых оптических модулей на базе ФЭУ R8055 и R7081-20 фирмы HAMAMATSU и новые контроллеры системы сбора данных, была создана система удаленного доступа к детектору на базе Radio-Ethernet, внедрены системы контроля питания детектора и точной привязки к мировому времени на основе GPS, установлена новая аппаратура для постоянного контроля акустических шумов озера.

Несмотря на исключительно неблагоприятные погодные условия зимы 2007-го года, в период экспедиции был выполнен большой объем работ по анализу состояния, ремонту, частичной замене и модернизации глубоководной регистрирующей и управляющей аппаратуры комплекса БГНТ, по ремонту и замене ряда элементов механического каркаса детектора НТ200, по модернизации архитектуры детектора, а также по программе исследования окружающей среды. Были созданы и исследованы в лабораторных условиях, а затем установлены для длительных испытаний в составе детектора НТ200+ шесть новых регистрирующих глубоководных модулей на основе фотоэлектронных умножителей R8055 фирмы HAMAMATSU и XP1807 фирмы Photonis, была в значительной мере модернизирована калибровочная система детектора, разработаны и поставлены на испытания функциональные узлы создаваемой регистрирующей системы детектора НТ1000.

В 2008 году в период зимней экспедиции на оз. Байкал была смонтирована и установлена на длительные испытания в составе детектора НТ200+ экспериментальная гирлянда регистрирующих модулей - прототип гирлянды будущего нейтринного телескопа НТ1000 на оз. Байкал. 9 апреля 2008 г. детектор НТ200+ был введен в эксплуатацию в режиме постоянного набора данных совместно с экспериментальной гирляндой НТ1000.

В течение 2009-2010 г.г. основные усилия Байкальской коллаборации были сосредоточены на проектировании, создании и проведении натурных испытаний основных узлов регистрирующей системы детектора НТ1000: оптических модулей, системы сбора данных, глубоководных кабельных коммуникаций. В период зимней экспедиции 2009 года был установлен, развернут и введен в эксплуатацию в составе экспериментального комплекса НТ200+ опытный образец гирлянды из 12 оптических модулей на базе фотоэлектронных умножителей R8055 и XP1807. Анализ данных экспериментальной гирлянды, накопленных в течение 2009 г. и содержащих качественно новую информацию о временной форме сигналов, регистрируемых фотодетекторами позволил разработать алгоритмы подавления фоновых и выделения полезных событий и провести отладку программ моделирования отклика новой измерительной системы на черенковское излучение мюонов и ливней высоких энергий.

Во время экспедиции 2010 года снятые к тому времени с производства фирмой Photonis ФЭУ XP1807 были заменены на фотодетекторы R7081HQE. Работа модернизированной экспериментальной гирлянды была возобновлена в апреле 2010 года. Анализ результатов натурных испытаний опытных образцов гирлянды создаваемого детектора НТ1000 показал достаточно высокое качество работы всех ее основных элементов: оптической системы регистрации, системы сбора и передачи данных, кабельных коммуникаций и технологических узлов. В результате выполненных работ были созданы необходимые предпосылки для проведения натурных испытаний в 2011 году опытного образца базового элемента создаваемого детектора НТ1000 - кластера гирлянд глубоководных оптических модулей, позволяющего регистрировать события от мюонов и нейтрино с энергией от 10 ТэВ.

2.2 Характеристика места расположения телескопа

Местом проведения Байкальского нейтринного эксперимента является район акватории озера, примыкающий к 106-км Кругобайкальского участка Восточно-Сибирской железной дороги, где реализуется оптимальное сочетание гидрологических, гидрофизических и ландшафтных факторов, необходимых для создания и функционирования нейтринного телескопа. Географические координаты места расположения комплекса Байкальского нейтринного телескопа составляют $51^{\circ}50'$ с.ш., $104^{\circ}20'$ в.д.. Данный район побережья оз. Байкал достаточно хорошо освоен, он электрифицирован, здесь проходит Кругобайкальский участок ВСЖД. Расстояние по железной дороге от 106 км КБУ ВСЖД до г. Иркутска составляет примерно 190 км. Важным фактором, повлиявшим на выбор места расположения телескопа, является наличие достаточно развитой инфраструктуры в этой части побережья озера, позволяющей, в частности, осуществлять транспортировку грузов и научного оборудования по железной дороге.

Глубина озера в этом районе составляет 1300-1400 метров на расстояниях от трех и более километров от берега. Плоский рельеф дна озера на протяжении в несколько десятков километров от берега обеспечивает принципиальную возможность развертывания детектирующих систем глубоководного телескопа в объеме до 30-ти кубических километров.

Наличие в течение примерно двух месяцев (с середины февраля до середины апреля) устойчивого ледового покрова позволяет вести работы по развертыванию телескопа, а также ремонтные, профилактические и исследовательские работы непосредственно со льда, используя его как прочную и неподвижную монтажную платформу. Качество ледового покрова, отсутствие устойчивых полей торошения и станových щелей является определяющим условием с точки зрения безопасности проведения операций по монтажу глубоководного оборудования и прокладке подводных кабельных линий. Сроки безопасного ведения работ обычно превышают 8 недель. Практически нулевой уровень подледных течений позволяет выполнять монтажные работы с необходимой точностью.

2.3 Оптические свойства глубинных вод оз. Байкал

Основными оптическими параметрами, определяющими распространение света с длиной волны λ в прозрачных средах, являются показатель поглощения $a(\lambda)$, показатель рассеяния $\sigma(\lambda)$, индикатриса рассеяния $\chi(\mu, \lambda)$ ($\mu = \cos(\vartheta)$, ϑ - угол рассеяния фотона) и скорость распространения света в среде $v(\lambda)$. Из анализа данных многолетних измерений оптических параметров глубинных вод оз. Байкал следует, что длина поглощения $L_a = 1/a(\lambda)$ является достаточно стабильным параметром с характерным значением $20 \div 24$ м в окне прозрачности воды ($\lambda = 480 \div 500$ нм). Сезонные изменения длины поглощения, как правило, не превышают 20%. В отличие от длины поглощения, длина рассеяния $L_s = 1/\sigma(\lambda)$ байкальской воды меняется в существенно более широких пределах. При характерных значениях $L_s = 30 \div 50$ м в окне прозрачности воды, в отдельные периоды измерений наблюдались изменения длины рассеяния от $15 \div 20$ м до 70 м. Долговременный мониторинг оптических свойств байкальской воды в районе расположения нейтринного телескопа проводится с помощью специализированного измерительного комплекса ASP-15 (см. Гл. 6). В период зимней экспедиции 2001 года были выполнены одновременные независимые измерения оптических параметров байкальской воды комплексом ASP-15 и прибором коллаборации NEMO (Италия) AC9. На Рис.2.3.1 приводятся значения длины поглощения и показателя рассеяния байкальской воды, измеренные разными приборами в 2001 году [23].

Индикатриса рассеяния выражается через дифференциальное сечение рассеяния:

$$\chi(\mu, \lambda) = \frac{d\sigma}{\sigma d\mu},$$

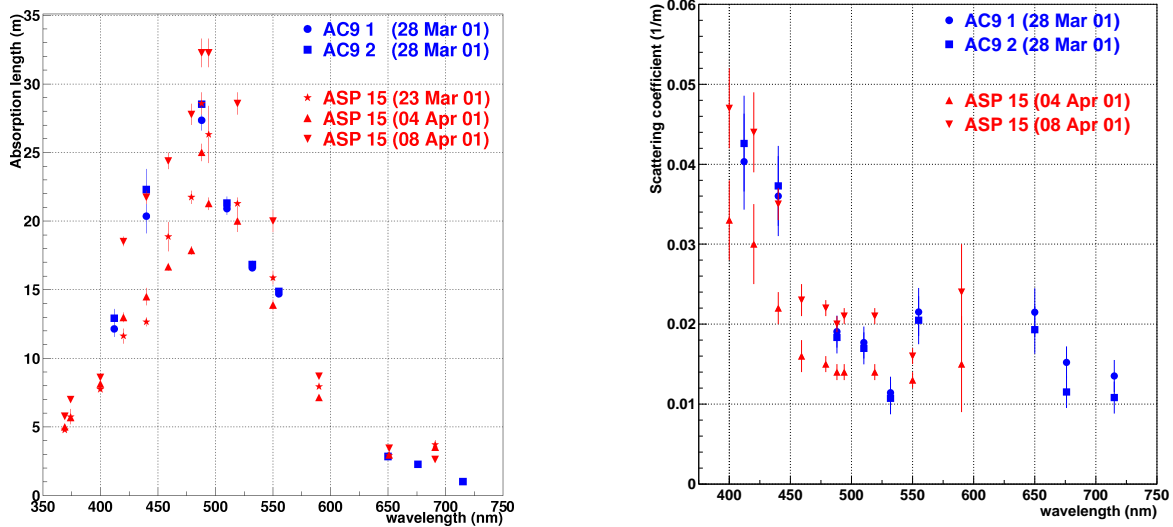


Рис. 2.3.1: Левая панель - спектральная зависимость длины поглощения байкальской воды на глубине 1000 м. Правая панель - спектральная зависимость показателя рассеяния байкальской воды на глубине 1000 м.

$$\int_{-1}^1 \chi(\mu, \lambda) d\mu = 1.$$

Индикатриса рассеяния света глубинных вод оз. Байкал является сильно анизотропной функцией и характеризуется средним углом рассеяния порядка 0.86 - 0.9.

2.4 Байкальский глубоководный нейтринный телескоп

2.4.1 Телескоп НТ200

Телескоп НТ200 расположен на глубине около 1100 м на расстоянии 3.6 км от берега. Глубина озера в месте расположения телескопа составляет 1366 м. Телескоп связан с береговым центром управления и сбора данных донными линиями связи, прокладка которых осуществляется в период зимних экспедиций с ледового покрова озера. Концы кабельных линий связи закреплены на буйковых станциях на глубине 20 м от поверхности и соединяются с помощью кабельных перемычек с центральным электронным блоком телескопа. При этом все соединения производятся с ледового покрова озера. Такой метод выполнения монтажных работ не требует сложной и дорогостоящей аппаратуры для подключения глубоководных кабельных линий связи непосредственно под водой.

Нейтринный телескоп представляет собой трехмерную решетку из оптических модулей, размещенных на вертикальных грузонесущих кабель-тросах, нижние концы которых прикреплены к донным якорям, а верхние - к буйам. Каждый вертикальный кабель-трос с оптическими модулями формирует структурную единицу телескопа - гирлянду оптических модулей (ОМ). Телескоп содержит 192 ОМ, размещенных на 8 гирляндах длиной 68 м каждая. Вокруг центральной гирлянды равномерно вдоль окружности с радиусом 21.5 м расположены периферийные гирлянды (Рис. 2.4.1).

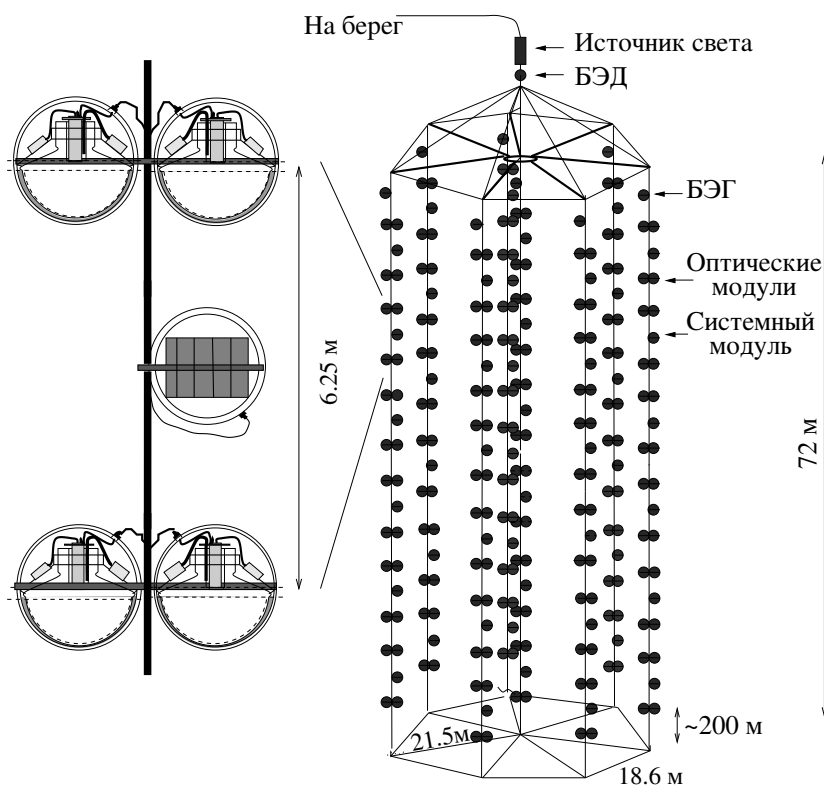


Рис. 2.4.1: Схема телескопа НТ200 (справа). Слева изображен структурный элемент телескопа *связка*, состоящий из двух пар оптических модулей, подключенных на совпадение, и электронный модуль, обеспечивающий их функционирование.

Каждая гирлянда содержит 24 ОМ. С целью подавления темнового темпа счета фотоприемников и фонового свечения глубинных вод озера оптические модули объединены в пары и включены по схеме совпадения регистрируемых сигналов во временном окне порядка 15 нс. Каждая пара ОМ образует один измерительный канал телескопа. В качестве амплитуды сигнала регистрируемого измерительным каналом, выбирается амплитуда одного из двух ОМ пары, заранее выбранного по результатам калибровки регистрирующей системы телескопа. Время срабатывания канала соответствует времени первого сработавшего оптического модуля пары. На каждой гирлянде фотоприемники оптических модулей второго и одиннадцатого каналов (счет каналов ведется сверху вниз) ориентированы фотокатодами вверх, а все остальные фотоприемники гирлянды ориентированы вниз. Расстояния между первым и вторым, а также десятым и одиннадцатым каналами составляют 7.5 м; расстояние между вторым и третьим и 11-м и 12-м каналами составляет 5.0 м; расстояние между всеми остальными соседними каналами - 6.25 м.

Процедуры восстановления параметров мюонов и ливней, регистрируемых нейтринным телескопом, накладывают довольно жесткие требования на точность определения координат фотоприемников. Пространственное расположение фотоприемников контролируется с помощью гидроакустической системы измерения координат ГАСИК (см. Гл. 5), функционирующей в составе нейтринного телескопа. Погрешность измерения координат составляет 20 см.

Ключевым элементом телескопа является оптический модуль. Оптический модуль содержит гибридный фотоприемник Квазар-370, специально разработанный для Байкальского эксперимента [24]. Каждый фотоприемник размещен в корпусе из низкорadioактивного стекла. Пространственный промежуток между поверхностью фотоприемника и стеклянной сферой за-

полняется глицерином, либо силиконовым гелем, для обеспечения оптического контакта.

Квазар-370 состоит из электронно-оптического предусилителя грибовидной формы и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Электрон, выбитый из фотокатода предусилителя, ускоряется напряжением 25 кВ и фокусируется на неорганический сцинтиллятор, расположенный в центре колбы. Время высвечивания сцинтиллятора 40 нс. Испущенный сцинтиллятором свет регистрируется ФЭУ. Сигналы с анода ФЭУ подаются на быстрый предусилитель с коэффициентом усиления 10 и используются для измерения времени срабатывания ФЭУ. Сигналы с 11-го динода через усилитель с коэффициентом усиления 3 поступают в систему измерения амплитуды.

Каждый оптический модуль содержит светодиод, предназначенный для амплитудной калибровки фотоприемника. Оптические модули соединены с системными электронными модулями (СМ) четырьмя глубоководными коаксиальными кабелями для подачи питания и управления, для передачи анодного и динодного сигналов и для управления калибровочным светодиодом.

Система сбора данных и триггерная система состоят из отдельных функциональных модулей и блоков, формирующих иерархическую структуру. Системный модуль обеспечивает работу двух измерительных каналов. 3 СМ связаны с блоком электроники гирлянды (БЭГ). Каждая гирлянда имеет два БЭГа, соединенных с блоком электроники детектора (БЭД).

Анодные и динодные сигналы четырех оптических модулей двух измерительных каналов передаются в соответствующий системный модуль (СМ). Анодный сигнал дискриминируется как амплитудным регулируемым порогом, так и порогом, не пропускающим сигналы короче 8 нс на уровне амплитудного порога. Далее, сигналы с ОМ измерительного канала проверяются на совпадение в окне 15 нс. Затем формируется временная отметка, в качестве которой выбирается время первого сработавшего ОМ, и вместе с амплитудной информацией передается в БЭГ. В БЭГе информация каждого измерительного канала оцифровывается, вырабатывается локальный триггер и формируется сигнал запроса в БЭД. Если в БЭДе накоплено достаточное количество сигналов запроса с БЭГов в интервале 500 нс, формируется сигнал подтверждения, поступающий во все БЭГи. После этого, в БЭГах событию присваивается номер и накопленные данные передаются в береговой центр сбора данных и управления.

2.4.2 Телескоп НТ200+

С целью повышения эффективности регистрации нейтрино высоких энергий в 2004 - 2005 годах телескоп НТ200 был модернизирован. Новая установка получила название НТ200+ и обеспечила как увеличение эффективного объема для регистрации каскадов от нейтрино, так и существенное повышение энергетического разрешения телескопа в целом. Детектор НТ200+ является не только установкой для исследований космического излучения, но и начальной версией структурной единицы будущего Байкальского нейтринного телескопа с эффективным объемом порядка кубического километра.

Нейтринный телескоп НТ200+ был введен в эксплуатацию 9 апреля 2005 года. Телескоп состоит из центральной части (НТ200) и трех внешних гирлянд (НТ+) расположенных на расстоянии 100 м от центральной части детектора (Рис.2.4.2). На каждой внешней гирлянде размещается по 12 оптических модулей, сгруппированных попарно, аналогично ОМ телескопа НТ200. Расстояние между нижней и верхней парами ОМ составляет 140 м. Каждая пара оптических модулей, включенная в режим совпадений для подавления шумовых импульсов, формирует измерительный канал. Оптические модули содержат гибридные фотоприемники "КВАЗАР-370". Верхние каналы внешних гирлянд находятся на такой же глубине, что и нижние каналы телескопа НТ200. Расстояния между каналами внешних гирлянд составляет 20, 50, 20, 30 и 20 м, считая от верхнего канала. Фотоприемники всех оптических модулей ориентированы фотокатодами вниз, за исключением двух нижних на каждой гирлянде, которые направлены вверх.

Постановка дополнительных гирлянд обеспечила увеличение чувствительности детектора к нейтринно сверхвысоких энергий в 3 - 4 раза. Кроме того, наличие внешних гирлянд существенно повысило качество получаемой физической информации, позволяя определять местоположение каскадов и их энергию. Это значительно повысило надежность выделения нейтринных событий.

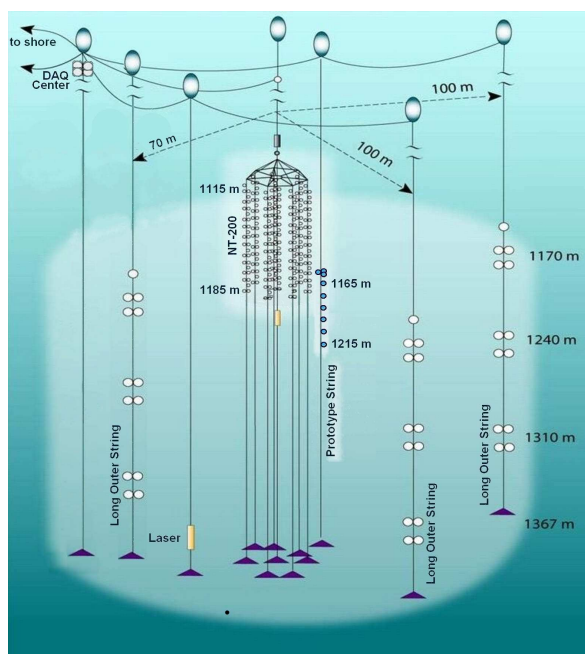


Рис. 2.4.2: Детектор NT200+.

Регистрирующая система NT200+ включает установку NT200 и три внешних гирлянды. Электронные системы внешних гирлянд в значительной степени повторяют по своему составу и принципу функционирования установку NT200. Каждая внешняя гирлянда состоит из 12 оптических модулей, сгруппированных попарно. Оптические модули в паре включены на совпадения и образуют информационный канал. Две пары ОМ имеют общий электронный системный модуль (СМ) и образуют функциональную единицу гирлянды - *связку*. Информация о временах срабатывания и амплитудах сигналов ФЭУ передается с системных модулей на блок электроники гирлянды. В состав внешней гирлянды входит также светодиодная калибровочная система (LED), световые сигналы которой передаются по индивидуальным оптическим волокнам ко всем ОМ гирлянды. Все информационные связи внутри гирлянды осуществляются коаксиальными кабелями РК-50-2-13, покрытыми дополнительной резиновой оболочкой.

В состав СМ входят два блока выработки локального триггера, блок преобразования амплитуды, запуска светодиодов и блок управления. Блок управления служит для установки режимов работы регистрирующей системы и считывания информации о темпах счета фотоприемников. Анодные импульсы фотоприемников канала поступают на вход блока выработки локального триггера, который содержит схему совпадений и два двухуровневых дискриминатора: временной привязки с фиксированным порогом 0.25 - 0.5 ф.э. и амплитудного отбора с управляемым порогом. Временная привязка осуществляется по первому пришедшему от пары оптических модулей импульсу. Выходной сигнал подается на блок преобразования амплитуды для формирования переднего фронта сигнала локального триггера (ЛТ). Динодные импульсы с каждого канала поступают на аналоговые сумматоры блока преобразования амплитуды, выполненного на основе стробируемых преобразователей заряд - длительность. На выходе блока формируются выходные

сигналы системного модуля - локальные триггеры двух каналов связи, длительность которых пропорциональна входным зарядам, а передний фронт определяет время срабатывания канала.

Локальные триггеры (запросы каналов) со всех системных модулей гирлянды поступают в блок электроники внешней гирлянды БЭГ. В состав БЭГ входят шесть измерительных каналов, контроллер и модемы каналов данных и управления.

В то время как оптические модули, системные модули и измерительные каналы внешней гирлянды полностью идентичны аппаратуре НТ200, электроника контроллера БЭГ потребовала существенной модернизации. Каждый измерительный канал содержит 11-ти разрядный преобразователь время-код, 10-ти разрядный преобразователь длительность-код и схему записи номера события. Принцип работы временного преобразователя основан на растяжении временного интервала между сигналом СТАРТ (запрос канала) и СТОП (запрос гирлянды). Дискретность временного преобразователя составляет две наносекунды. Сигнал *запрос гирлянды* формируется блоком запросов контроллера БЭГа при условии двойных совпадений сигналов *запрос канала* во временных воротах 0.5 мкс. Запросы от всех внешних гирлянд передаются в центральный коммутационный модуль установки (DAQ-центр), расположенный вблизи поверхности воды. В этом модуле формируется сигнал *подтверждение*, который возвращается ко всем внешним гирляндам с задержкой около 11 мкс, обеспечивая синхронизацию их работы.

При наличии сигнала *подтверждение* информация о каждом локальном триггере (время, амплитуда, номер события и номер измерительного канала) передается через контроллер БЭГа. Номер события (6-ти разрядный счетчик) при этом используется для объединения информации о различных локальных триггерах одной гирлянды. Кроме номера события гирлянды, в БЭГе формируется глобальный номер события, равный количеству пришедших сигналов *подтверждение*. Эта информация необходима для объединения информации с разных внешних гирлянд в одно событие.

Передача данных с внешних гирлянд осуществляется через контроллер БЭГа. Принципиальной проблемой, которую необходимо было решить при модернизации электроники, являлась низкая скорость передачи данных в контроллере БЭГа НТ200 - не более 6 Кбайт/сек. Такая скорость недостаточна для решения ряда физических задач, запланированных для детектора НТ200+. Отличительными признаками нового контроллера БЭГа внешних гирлянд являются переход на современную электронную компонентную базу, унификация протоколов обмена данными и командами управления между различными частями детектора, существенное упрощение компоновки физических событий детектора.

Контроллер состоит из следующих конструктивных элементов:

- RTL8201 - контроллер Ethernet, выпускаемый фирмой RealTek Semiconductors Corp. Протокол Ethernet реализован на аппаратном уровне.
- W3100A (WIZnet) - Ethernet-ориентированный кристалл класса ASIC (Application Specific Integrated Circuit) семейства W3000 (технология i2Chip) с аппаратной реализацией стека протоколов TCP/IP и протокола канального уровня Ethernet.
- MSP430F149 - 16-и разрядный RISC-микроконтроллер фирмы Texas Instruments, оснащенный 60 Кб флэш-памяти, 2Кб ОЗУ, 12-ти разрядным АЦП. Контроллер сопряжен с интерфейсом RS232, через который может осуществляться подача команд управления на системные модули внешних гирлянд.
- XILINX Spartan3 - FPGA (Field Programmable Gate Array) - программируемая матрица вентилей с тактовой частотой до 326 МГц и собственной оперативной памятью до 128 Кб.

Внедрение нового контроллера БЭГа обеспечило возможность использования современных высоконадежных протоколов и сетевой аппаратуры при создании системы передачи данных

внешних гирлянд: Ethernet коммутаторов, DSL-модемов, протокола TCP/IP.

Для интеграции HT200 и внешних гирлянд в единый детектор HT200+ необходимо было решить две основные задачи: модернизировать систему управления и сбора данных внешних гирлянд и обеспечить временную синхронизацию работы отдельных частей установки с точностью до нескольких наносекунд. Поскольку простое дублирование систем управления и сбора данных для HT200+ и внешних гирлянд было несовместимо ни с количеством доступных кабелей, связывающих детектор с берегом, ни с планами будущей модернизации установки, было принято решение изменить архитектуру системы в целом. Впервые были использованы промышленные DSL-модемы (сеть Ethernet) и так называемые одноплатные промышленные компьютеры, размещаемые под водой. Все кабельные коммуникации систем управления и сбора данных HT200+ коммутируются через центральный коммуникационный узел (DAQ-центр), расположенный на глубине 20 м. DAQ-центр обеспечивает объединение потоков данных и трансляцию всей полученной информации в береговой центр. Подводный коммутационный центр состоит из пяти электронных модулей, размещенных в глубоководных стеклянных сферах: общий БЭГ, ретранслятор канала управления (РУ), модуль DSL-модемов и два подводных компьютера: РС-НТ+, обслуживающий внешние гирлянды, и РС-НТ200.

Информация необходимая для синхронизации и объединения событий HT200 и внешних гирлянд формируется модулем "Общий БЭГ", разработанным специально для HT200+. Общий БЭГ соединен с системами сбора данных телескопа HT200 и внешними гирляндами коаксиальными кабелями длиной более 1 км, по которым передаются сигналы *запрос гирлянд* и *триггер HT200*. Сигнал *запрос* от любой внешней гирлянды инициирует формирование общего сигнала *подтверждение*. Общий БЭГ содержит четыре временных преобразователя, подобных измерительным каналам БЭГов HT200, сигналом СТАРТ для которых служат запросы внешних гирлянд и триггер HT200, а сигналом СТОП - *подтверждение*. Информация с этих временных каналов используется для определения относительных времен срабатывания каналов HT200 и внешних гирлянд. Таким образом, система измерения времени HT200+ имеет два уровня. На первом уровне в БЭГе измеряются задержки срабатываний каналов гирлянды относительно сигнала *запрос гирлянды* с дискретностью 1 нс. На втором уровне измеряются задержки сигналов *запрос гирлянды* относительно общего сигнала *подтверждения* с дискретностью 2 нс. В модуле "Общий БЭГ" также предусмотрен счетчик количества триггеров, сформированных установкой HT200. В результате, каждое событие от внешних гирлянд содержит соответствующий ему номер события HT200, что позволяет синхронизировать потоки данных установки от этих двух детекторов.

Данные с внешних гирлянд передаются в коммутационный центр по каналу Ethernet на основе DSL-модемов (FlexDSL-PAM-SAN). Необходимость использования модемов обусловлена значительной удаленностью внешних гирлянд от коммутационного центра - 1.2 километра. Три DSL-модема, принимающие данные от гирлянд, размещены в одной глубоководной стеклянной сфере.

Передача данных на берег осуществляется под управлением двух подводных компьютеров коммутационного центра, размещенных в глубоководных стеклянных сферах. Состав электроники сфер практически идентичен. Каждая из сфер содержит одноплатный компьютер PC/104 (PC104: Advantech-PCM9340), DSL-модем, управляемый коммутатор Ethernet и модем для управления аппаратурой гирлянд (С-мод - модем медленной связи). Передача данных на берег (*быстрая связь*) осуществляется через DSL-модем по двум жилам подводного кабеля со скоростью до 2 Мбит/с.

Подводные компьютеры и DSL-модемы коммутационного центра объединены в кольцо Ethernet Turbo Ring посредством глубоководных кабелей, обеспечивая резервирование каналов обмена данными. Полное объединение всех потоков данных и команд управления в один DSL-канал

позволяет использовать всего четыре провода береговых кабельных коммуникаций для передачи информации: два для основной и два для резервной линии передачи данных.

Управление режимами работы аппаратуры внешних гирлянд осуществляется через модем медленной связи по каналу, совмещенному с линиями питания гирлянд напряжение в которых составляет 300 вольт. Команды медленной связи транслируются от РС-НТ+ через С-мод в ретранслятор команд управления РУ. Этот модуль в свою очередь транслирует команды к регистрирующей аппаратуре внешних гирлянд. Помимо ретрансляции команд, модуль РУ выполняет также функции коммутации жил электропитания.

2.5 Краткий обзор результатов полученных в экспериментах на нейтринном телескопе НТ200

Байкальский глубоководный нейтринный телескоп является одним из трех крупнейших (наряду с уже ведущим набор данных подледным детектором IceCube на Южном полюсе и подводным детектором ANTARES в Средиземном море) по своей эффективной площади и эффективному объему детекторов нейтрино высоких энергий. К существенным результатам первого этапа (1980-1998 годы) работ по Байкальскому проекту следует отнести результаты анализа данных, полученных на промежуточных установках, который проводился как с точки зрения изучения параметров детекторов, так и по программам исследования потока атмосферных мюонов, выделения событий от нейтрино, поиска магнитных монополей. Результаты этого анализа показали, что данные по поглощению мюонов вплоть до глубин 6000 метров водного эквивалента и их угловому распределению на глубине 1000 м согласуются с теоретическими предсказаниями. Детальный анализ азимутального углового распределения мюонов при больших зенитных углах дал возможность увидеть *тень берега* и тем самым подтвердить эффективность используемых методик регистрации и восстановления событий. Был установлен верхний предел на интенсивность потока сверхтяжелых магнитных монополей по эффекту катализа распада барионов, находившийся на уровне наиболее сильных из существовавших теоретических и экспериментальных ограничений. Также на уровне лучших в мире находились ограничения на величину природного потока магнитных монополей, движущихся со скоростями $v/c > 0.8$. При анализе данных детекторов НТ36 и НТ96 удалось выделить первые инициированные нейтрино события от мюонов, пересекающих чувствительный объем детектора в направлении снизу-вверх, близком к вертикали, что позволило установить одно из наиболее сильных для своего времени ограничений на поток мюонов от эффекта аннигиляции массивных частиц темной материи (нейтралино) в центре Земли - $4.8 \times 10^{-14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. При анализе данных, полученных в экспериментах на детекторе НТ96 за период его эксплуатации с апреля по август 1996 года, было установлено также наиболее сильное ограничение на интенсивность природного потока нейтрино сверхвысоких (свыше 10 ТэВ) энергий. Наиболее значимые результаты были получены в 2005-2008 годах, когда на основе анализа экспериментальных данных Байкальского телескопа были установлены новые, одни из наиболее сильных на сегодняшний день, ограничения на величину природного потока быстрых ($v/c > 0.8$) магнитных монополей - $4.6 \times 10^{-17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ (при $v/c \simeq 1$), на потоки мюонов, сопровождающих процесс аннигиляции массивных частиц темной материи (нейтралино) в центре Земли - $4.2 \times 10^{-15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и в центре Солнца - $3 \times 10^3 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ в области масс нейтралино выше 500 ТэВ, на поток нейтрино от гамма-всплесков в интервале энергий вплоть до 10^7 ТэВ, на поток нейтрино от локальных Галактических источников расположенных на южной небесной полусфере, в зависимости от склонения - $E^2 F < 5 \times 10^{-10} \text{ ТэВ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и, наконец, на интенсивность природного диффузного потока нейтрино, которое в диапазоне энергий от 2×10^4 ТэВ до 2×10^7 ТэВ для величины суммарного потока нейтрино всех типов составляет $E^2 F < 2.9 \times 10^{-7}$

ГэВ $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{стер}^{-1}$ и находится в области теоретически предсказываемых значений. Получено также наиболее сильное на сегодняшний день ограничение на поток электронных антинейтрино в области резонанса с энергией 6.3×10^6 ГэВ, которое составляет $F < 3.3 \times 10^{-20} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{стер}^{-1} \text{ГэВ}^{-1}$. Реализация проекта создания детектора НТ200+ (2003-2006 годы) позволила примерно в 3 раза повысить чувствительность эксперимента по поиску природного диффузного потока нейтрино и начать исследование их энергетического спектра вплоть до энергий 10^{18} эВ.

Удачное сочетание природных факторов, наряду с хорошей изученностью места проведения работ и накопленным опытом развертывания и эксплуатации нейтринного телескопа первого поколения НТ200/НТ200+, обеспечивают необходимые предпосылки для сооружения глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба НТ1000.

Глава 3

Конфигурация нейтринного телескопа НТ1000

3.1 Концепция НТ1000

Глубоководный нейтринный телескоп НТ1000 предназначен для решения широкого круга задач астрофизики, космологии и физики элементарных частиц: поиска локальных нейтринных источников, исследования диффузного потока нейтрино, поиска проявлений темной материи, поиска магнитных монополей и других гипотетических частиц. Глубоководный телескоп следующего поколения НТ1000 на оз. Байкал будет являться экспериментальным комплексом, нацеленным на исследование природных потоков нейтрино в области энергий выше 10 ТэВ посредством регистрации черенковского излучения вторичных мюонов и ливней, генерируемых в нейтринных взаимодействиях.

Концепция НТ1000 базируется на ряде достаточно очевидных требований, предъявляемых к конструкции и организации регистрирующей системы нового детектора: максимально возможном использовании преимуществ монтажа регистрирующей системы с ледяного покрова оз. Байкал, наращиваемости установки и обеспечении ее эффективной эксплуатации уже на первых стадиях развертывания, возможности реализации различных вариантов компоновки и плотности фотодетекторов в рамках одной измерительной системы. Кроме того, принципиальным требованием является минимизация времени создания полномасштабного детектора НТ1000, которое не должно превышать 5 - 6 лет.

На основании перечисленных выше требований был разработан вариант конфигурации установки, который стал основой для дальнейших экспериментальных и расчетных работ в рамках подготовки научно-технического проекта НТ1000. Основными регистрирующими элементами НТ1000 являются фотоэлектронные умножители (ФЭУ) с полусферическими фотокатодами диаметром не менее 250 мм. ФЭУ вместе с управляющей электроникой размещаются в глубоководных стеклянных корпусах, образуя оптические модули. Оптические модули монтируются на вертикальных грузонесущих кабелях, формируя гирлянды. Выбор такого подхода к организации системы регистрации НТ1000 обусловлен методикой развертывания установки со льда, разработанной для детектора НТ200 и прошедшей многолетние испытания. Основной структурной единицей гирлянды является секция оптических модулей. Секция представляет собой функционально законченный узел детектора, включающий в себя системы регистрации излучения, обработки сигналов, калибровки, формирования триггера и передачи данных. Организация системы сбора данных секции позволяет формировать различные конфигурации оптических мо-

дулей. Возможна установка ОМ на различных расстояниях друг от друга индивидуально или попарно. На одной гирлянде можно разместить несколько секций в различных конфигурациях. Конфигурация секции, являющаяся в настоящее время основой для дальнейшего проектирования, включает в свой состав 12 оптических модулей, расположенных на расстоянии 15-20 м вдоль гирлянды, а также геометрически расположенные в середине секции центральный модуль (ЦМ) и служебный модуль (СМ). Аналоговые сигналы со всех ОМ секции передаются в ЦМ по коаксиальным кабелям одинаковой длины ~ 100 м. По этим же кабелям к оптическим модулям подводится низковольтное питание. В ЦМ осуществляется преобразование аналоговых сигналов с оптических модулей в цифровой код и передача полученной информации по линии Ethernet. Служебный модуль предназначен для калибровки временных каналов установки, электропитания ОМ, а так же определения пространственного расположения гирлянды относительно донных мяков. Местоположение гирлянды определяются гидроакустической системой измерения координат ГАСИК (см. Гл. 5), достаточно успешно функционирующей в настоящее время на установке НТ200+.

Каналы синхронизации, электропитания и передачи данных секций объединяются в коммутационном модуле гирлянды (КМ), который связан кабельными линиями длиной ~ 1200 м с центральным блоком управления кластера. Каналы передачи данных организованы на основе Ethernet-технологии. Базовая конфигурация кластера включает в свой состав восемь гирлянд по 24 ОМ каждая (две секции на гирлянде), расположенных на расстоянии ~ 60 м друг от друга. Кластеры гирлянд связаны с Береговым центром комбинированными электро-оптическими кабелями длиной ~ 6 км, содержащими оптоволокно и электрические жилы. Каждый кластер НТ1000 является функционально законченным детектором, способным работать как в составе единой установки, так и в автономном режиме. Это обеспечивает простоту наращивания установки и возможность ввода в эксплуатацию ее отдельных частей по мере развертывания НТ1000.

Общий подход к проектированию элементов и систем НТ1000 заключался в проведении работ в три этапа - разработка и создание опытных образцов элементов и электронных блоков систем регистрации и передачи данных, проведение испытаний и отладки параметров опытных образцов на специализированных контрольно-измерительных стендах в лабораторных условиях, проведение натурных испытаний опытных образцов на оз. Байкал. Проведение долговременных натурных испытаний на оз. Байкал является уникальным преимуществом проектирования НТ1000 по сравнению с другими проектами нейтринных телескопов следующего поколения.

3.2 Оптимизация конфигурации телескопа НТ1000

Выбор оптимальной конфигурации, а также оценка чувствительности и разрешающей способности НТ1000 базируются на результатах полномасштабного моделирования отклика телескопа на черенковское излучение мюонов и ливней. Для решения этих задач создана обширная библиотека расчетных программ, включающая в себя как программы моделирования процесса распространения черенковского излучения в прозрачных средах (в воде, во льду) и отклика фотоприемников нейтринного телескопа на это излучение, так и программы восстановления мюонных траекторий, а также координат и энергии ливней в НТ1000.

Геометрическими параметрами, которые варьировались в процессе оптимизации конфигурации телескопа, являются:

- h - расстояние между оптическими модулями на каждой гирлянде,
- R - расстояние между центральной и периферийными гирляндами кластера,
- H - расстояние между центральными гирляндами соседних кластеров.

В случае мюонов, оптимизируемой величиной являлась эффективная площадь регистрации мюонов, а в случае ливней - эффективный объем телескопа по отношению к регистрации ливней. В качестве фотодетектора был выбран оптический модуль на базе ФЭУ Hamamatsu-7081HQE с повышенной квантовой чувствительностью.

Сценарий моделирования заключался в следующем. На первом этапе проводился розыгрыш энергии, направления и координат мюона или ливня. На следующем этапе разыгрывалось распространение черенковских фотонов от источника до фотодетекторов с учетом процессов поглощения и рассеяния света в воде. Далее, проводился розыгрыш отклика оптического модуля на черенковское излучение с учетом квантовой и угловой чувствительности фотодетекторов. В случае, когда отклик телескопа удовлетворял наперед заданным триггерным условиям, информация о событии сохранялась в банке данных. После розыгрыша статистически значимого числа событий с фиксированными исходными параметрами вычислялась эффективная площадь (в случае мюонов), либо эффективный объем (в случае ливней). Данная процедура проводилась для широкого набора конфигураций телескопа с различными значениями параметров оптимизации. В результате сравнения полученных значений эффективной площади и эффективного объема, выбиралась оптимальная конфигурация телескопа.

3.2.1 Мюоны

Эффективная площадь регистрации мюонов вычислялась методом Монте-Карло для триггерного условия >5 сработавших ОМ расположенных на >2 гирляндах, что обеспечивает необходимый отклик для восстановления геометрических параметров трека мюонов. Поскольку менее энергичные мюоны дают меньшую засветку, то наиболее критичным является зависимость эффективной площади от геометрических параметров детектора в припороговой области регистрации мюонов. Для нашего случая пороговая энергия составляет примерно 10 ТэВ. Расчеты проводились для 30 конфигураций со следующими значениями геометрических параметров конфигурации телескопа:

- расстояние между оптическими модулями на гирлянде $h = 15$ и 20 м;
- расстояние между центральной и периферийными гирляндами кластера $R = 40, 60, 80, 100$ и 120 м;
- расстояние между центральными гирляндами соседних кластеров $H = 150, 200, 250$ и 300 м;
- расстояние между секциями одной гирлянды $X = Z$ (т.е. расстоянию между ОМ) и 100 м.

Направление мюонов разыгрывалось изотропно по нижней полусфере. Площадь моделирования для заданного направления определялась максимальным расстоянием регистрации одним оптическим модулем мюона с заданной энергией. Начало прослеживания трека, т.е. моделирование ливней, рождающихся на треке мюона, также определялось максимальным расстоянием регистрации при максимально возможной энергии ливня.

Результаты расчетов приводятся на Рис.3.2.1. На этом рисунке представлены эффективные площади, усредненные по направлениям распространения мюонов с энергией 10 ТэВ, в зависимости от различных возможных значений геометрических параметров конфигурации телескопа. Как видно из рисунка, предпочтительной является конфигурация телескопа с радиусом кластера равным 40 метрам. Однако этот вариант конфигурации был отвергнут по техническим соображениям - расстояние между гирляндами в этом случае слишком мало и может привести к их перехлесту и спутыванию в течении одного сезона набора данных. Действительно, гирлянды

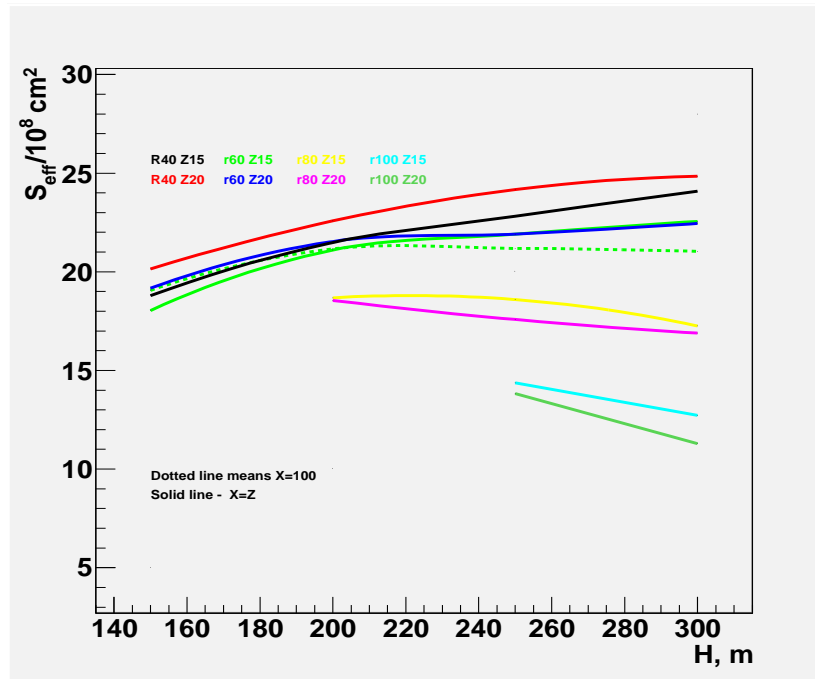


Рис. 3.2.1: Эффективная площадь детектора в зависимости от различных значений геометрических параметров конфигурации телескопа, для регистрации мюонов с энергией 10 ТэВ.

длинной 1300 метров, расположенные на расстоянии всего в 40 метров друг от друга могут запутаться даже под воздействием погодных условий на поверхности озера. А поскольку разница в значениях эффективных площадей регистрации мюонов для конфигураций телескопа с радиусами кластера 40 м и 60 м незначительна, то в качестве наиболее предпочтительной, с точки зрения регистрации мюонов, была выбрана конфигурация с радиусом кластера $R = 60$ м. Поскольку для конфигурации кластера с $R = 60$ м эффективная площадь практически не зависит от параметра H , выбор оптимального расстояния между кластерами будет определяться характером зависимости эффективного объема регистрации ливней высоких энергий от значения этого параметра. Увеличение пролетной базы мюонов в детекторе за счет увеличения расстояния между секциями гирлянд уменьшает величину эффективной площади регистрации мюонов для расстояний между кластерами более 220 метров.

На Рис.3.2.2 представлены зависимости эффективной площади от энергии в диапазоне 100 ГэВ – 1 ПэВ для близких по значениям геометрических параметров конфигураций детектора. Как видно из рисунка, увеличение радиуса кластера, увеличение расстояния между модулями, также как и увеличение расстояния между сегментами гирлянды значительно снижает эффективную площадь при низких энергиях. При высоких энергиях мюонов эффективная площадь практически не зависит от вариации значений перечисленных выше параметров конфигурации телескопа.

3.2.2 Ливни

С целью исследования зависимости эффективного объема регистрации ливней высоких энергий от геометрических параметров установки было выполнено моделирование откликов 12-ти различных конфигураций телескопа. Эти конфигурации отличались величиной геометрических параметров, которые принимали одно из следующих значений:

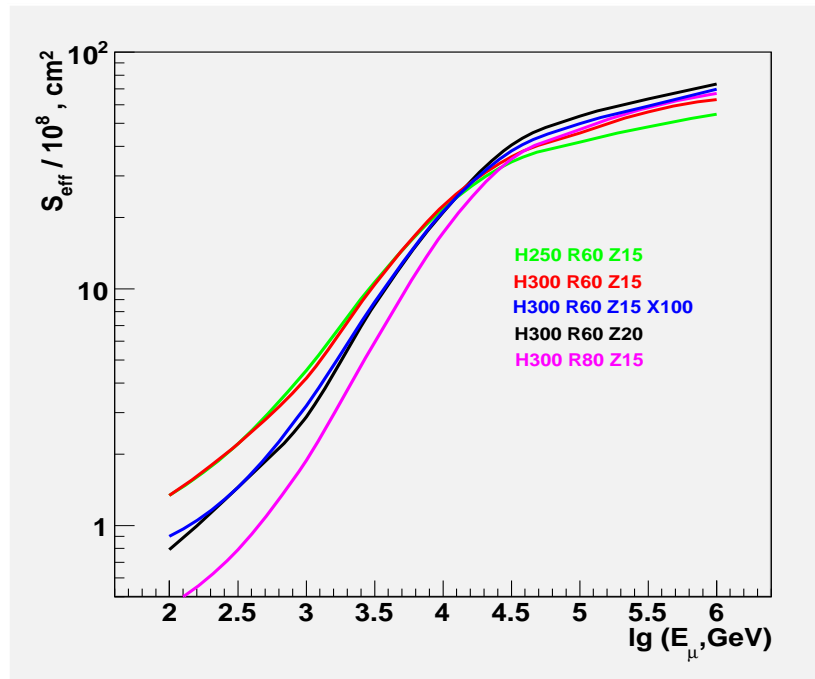


Рис. 3.2.2: Зависимость эффективной площади детектора от энергии мюонов для близких по значениям геометрических параметров конфигураций детектора.

- расстояние между оптическими модулями на гирлянде $h=15$ и 20 м;
- расстояние между центральной и периферийными гирляндами кластера $R=60$ и 80 м;
- расстояние между центральными гирляндами соседних кластеров $H=200, 250$ и 300 м.

Энергия ливней выбиралась из широкого диапазона $10^4 - 10^9$ ГэВ. Направления ливней разыгрывались по изотропному распределению. Координаты ливней разыгрывались равномерно в объеме порядка 1 км^3 , в центре которого был расположен телескоп. При моделировании отклика каждой конфигурации было разыграно 4.4×10^6 событий. Общее число событий, разыгранных в результате моделирования всех конфигураций, составило 5.28×10^7 событий.

Рисунки 3.2.3-3.2.4 иллюстрируют результаты, полученные в ходе проведенных исследований. Результаты исследований показывают, что эффективный объем регистрации ливней слабо зависит как от вариации расстояния между оптическими модулями на гирлянде, так и от изменения расстояния между центральной и периферийными гирляндами кластера при равных значениях остальных геометрических параметров.

На рисунке 3.2.3 (левая панель), в качестве примера, приводятся распределения эффективных объемов по энергии ливней двух конфигураций со значениями параметра $h=15$ м и $h=20$ м. Эти распределения имеют схожую зависимость от энергии ливней и отличаются по величине не более чем на 15%. Распределения эффективных объемов по энергии для двух конфигураций, со значениями параметра $R=60$ м и $R=80$ м, приводится на рисунке 3.2.3 (правая панель). В области энергий выше 100 ТэВ эти распределения практически совпадают.

Сравнение результатов моделирования различных конфигураций указывает на существенную зависимость эффективного объема регистрации ливней от величины расстояния между соседними кластерами установки. На рисунке 3.2.4 приводятся зависимости эффективных объемов от энергии ливней трех вариантов конфигурации телескопа. Верхняя кривая на этом рисунке

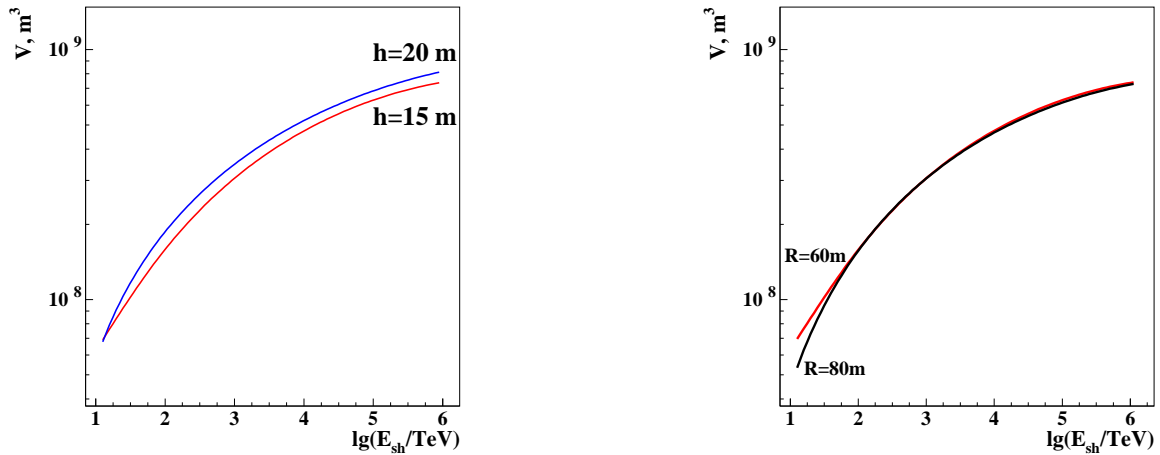


Рис. 3.2.3: Левая панель - зависимость эффективного объема регистрации от энергии ливня. Верхняя кривая соответствует расстоянию между оптическими модулями равным $h=20$ м, нижняя кривая - 15 м. Правая панель - зависимость эффективного объема регистрации от энергии ливней для конфигураций со значениями расстояния между центральной и периферийной гирляндами кластера $R=60$ м и $R=80$ м.

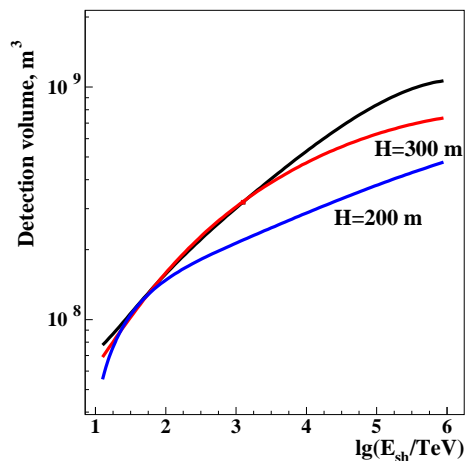


Рис. 3.2.4: Зависимость эффективного объема регистрации ливней высоких энергий от энергии ливня. Верхняя кривая относится к конфигурации с кластерами, разнесенными на бесконечность, средняя кривая относится к конфигурации с расстоянием между соседними кластерами $H=300$ м, нижняя кривая - $H=200$ м.

соответствует случаю, когда эффективные объемы отдельных кластеров телескопа не пересекаются, средняя кривая соответствует конфигурации, в которой расстояние между соседними кластерами $H=300$ м, а нижняя кривая относится к конфигурации с $H=200$ м. Степень влияния параметра H на величину эффективного объема возрастает с ростом энергии ливня. При энергиях выше 10^6 ГэВ эффективные объемы конфигураций с $H=200$ м и $H=300$ м отличаются в полтора раза.

3.3 Базовая конфигурация

Исходя из результатов анализа зависимости эффективного объема регистрации ливней и эффективной площади для регистрации мюонов от значений геометрических параметров телескопа в качестве оптимальной была выбрана конфигурация (см. Рис. 3.3.1), для которой расстояние между оптическими модулями на каждой гирлянде $h=15$ м, расстояние между центральной и периферийными гирляндами кластера $R=60$ м и расстояние между центральными гирляндами соседних кластеров $H=300$ м. Выбранная конфигурация телескопа обеспечивает эффективный объем для регистрации ливней порядка 0.2-0.7 кубических километра в интервале энергий 10^5 - 10^9 ГэВ и эффективную площадь для регистрации мюонов порядка 0.4-0.8 квадратных километров в диапазоне энергий 10^4 - 10^6 ГэВ в зависимости от направления мюонов.

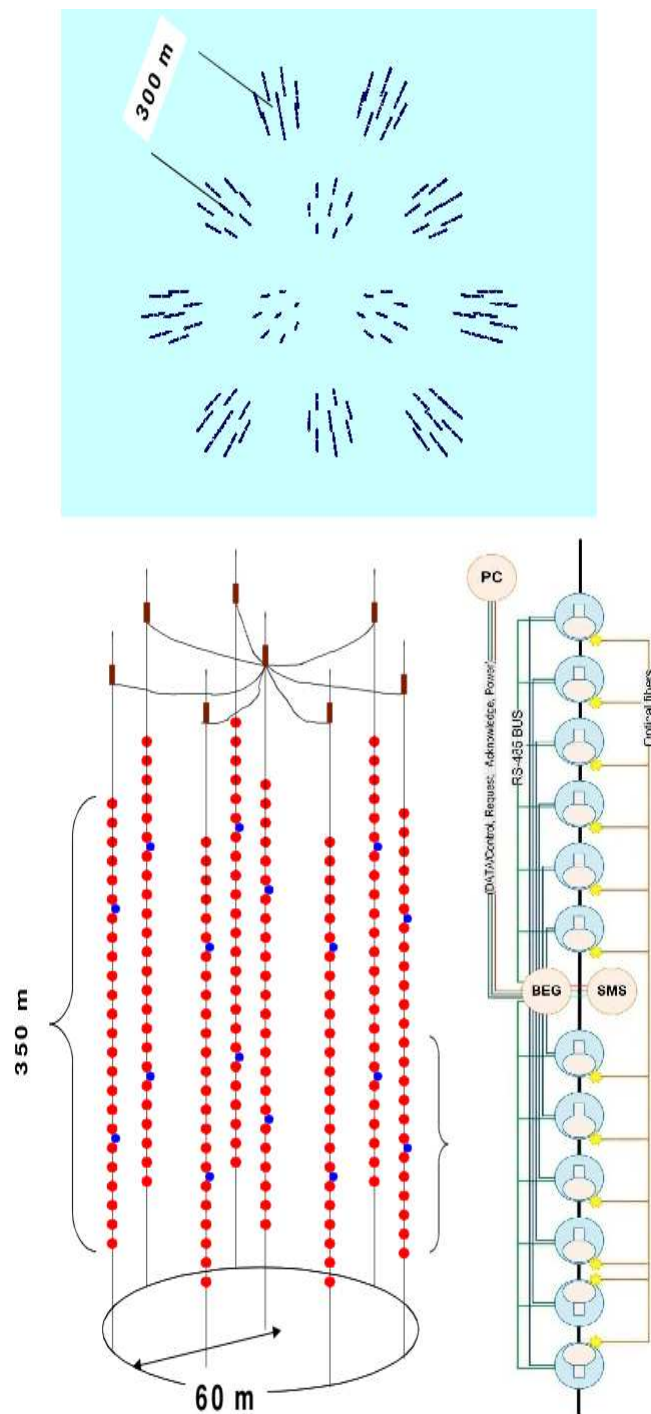


Рис. 3.3.1: Схематичное изображение нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба NT1000 на оз. Байкал. На верхнем рисунке показан вид сверху на NT1000. На левом нижнем рисунке показан кластер телескопа и на правом нижнем рисунке изображена секция ОМ.

Глава 4

Базовые элементы и электронные схемы НТ1000

4.1 Оптический модуль

Регистрирующими элементами установки НТ1000 являются оптические модули (ОМ), которые преобразуют черенковское излучение мюонов и каскадных ливней в электрические сигналы. ОМ состоят из следующих элементов: фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), контроллера, усилителя сигналов, блока светодиодной калибровки и высоковольтного преобразователя напряжения. Блок-схема электроники ОМ представлена на Рис. 4.1.1.

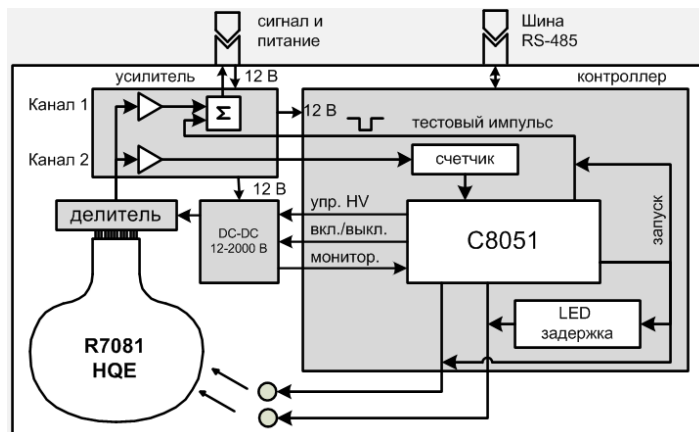


Рис. 4.1.1: Блок-схема электроники оптического модуля.

4.1.1 Фотоэлектронный умножитель

Выбор оптимального типа фотоэлектронного умножителя для установки НТ1000 является первоочередной задачей. Основными требованиями, предъявляемыми к ФЭУ, являются высокое временное разрешение (на уровне единиц наносекунд), большая площадь фотокатода и высокая квантовая эффективность. В настоящее время требованиям эксперимента НТ1000 удовлетворяют только ФЭУ с полусферическими фотокатодами фирмы Hamamatsu: R8055 (площадь фотокатода $\sim 1000 \text{ см}^2$, квантовая эффективность ~ 0.2) и R7081HQE (площадь $\sim 500 \text{ см}^2$, квантовая



Рис. 4.1.2: Плата усилителя и делителя с установленным блоком высоковольтного питания.

эффективность более 0.3). Оба типа ФЭУ проходят в настоящее время испытания в оз. Байкал в составе прототипа секции НТ1000. Электропитание фотоэлектронного умножителя осуществляется через делитель напряжения с сопротивлением 18 МОм высоковольтным DC/DC конвертером TRACO POWER PHV12-2.0K2500P (см. Рис. 4.1.1). Напряжение электропитания имеет положительную полярность (фотокатод заземлен) и в рабочем режиме составляет величину от 1300 В до 1700 В. Величина напряжения подбирается индивидуально для каждого фотоэлектронного умножителя таким образом, что бы коэффициент усиления диодной системы ФЭУ составлял величину $\sim 10^7$.

Для обеспечения надежной работы спектрометрических каналов установки сигнал с ФЭУ дополнительно усиливается в 10 раз. Такой уровень усиления обеспечивает как достаточно высокое значение средней величины одноэлектронного сигнала ФЭУ (30 - 40мВ) по отношению к амплитуде шумовых импульсов спектрометрического канала, так и необходимый диапазон линейности (до 100 фотоэлектронов). Усилитель монтируется на одной плате с делителем напряжений ФЭУ. Первый канал усилителя используется для спектрометрических измерений, второй канал служит для усиления сигналов, поступающих на счетчик шумовых импульсов фотоэлектронного умножителя. Внешний вид платы усилителя и делителя показан на Рис. 4.1.2.

4.1.2 Контроллер оптического модуля

Управление работой оптического модуля осуществляется по глубоководной шине RS-485 через специализированный контроллер, разработанный для НТ1000 на базе процессора C8051F124 (см. Рис. 4.1.3). Основными функциями контроллера являются:

- регулировка величины высоковольтного напряжения ФЭУ,
- амплитудная и временная калибровка каналов светодиодными источниками света,
- контроль основных параметров ФЭУ и электроники в процессе длительной экспозиции.

Для установки рабочего значения напряжения ФЭУ используется вход управления DC/DC конвертера PHV12-2.0K2500P. Управляющее напряжение формируется цифро-аналоговым пре-

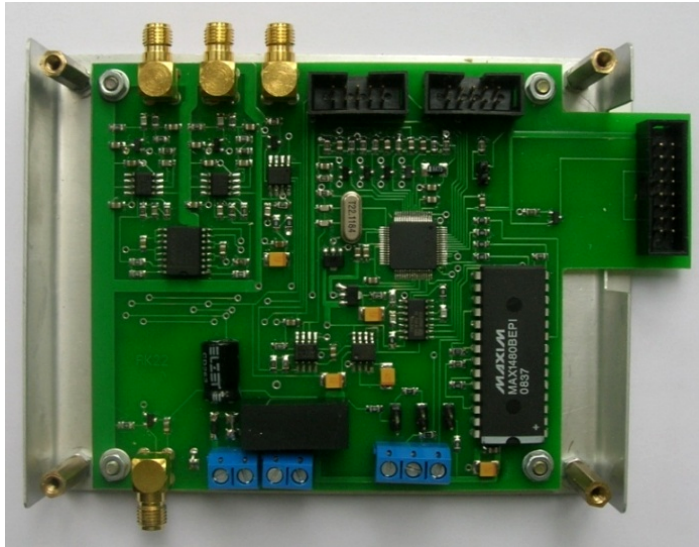


Рис. 4.1.3: Контроллер оптического модуля.

образователем (ЦАП) контроллера в диапазоне 0.0–2.5 В с шагом ~ 1 мВ. Это обеспечивает точность установки рабочего напряжения ФЭУ не хуже 1 В. Амплитудная и временная калибровка фотоэлектронного умножителя осуществляется при помощи двух светодиодов (LED) Kingbright L7113 PBC-A. Максимум светимости светодиодов соответствует длине волны 445 нм, длительность светового импульса около 5 нс. Контроллер обеспечивает прецизионное управление интенсивностью свечения светодиодов и регулирует задержку между их сигналами. Диапазон регулировки интенсивности от 0 до 10^8 фотонов на вспышку, диапазон задержек - от 0 до 1000 нс (шаг ~ 100 нс, точность установки величины задержки < 1 нс). Взаимное влияние двух каналов светодиодов друг на друга не превышает 0.5% в условиях одинакового светового сигнала от каждого из них. Световые импульсы передаются на фотокатод ФЭУ по оптоволоконным кабелям. Контроль работы ФЭУ и электроники ОМ подразумевает периодический мониторинг их основных параметров и условий функционирования. Контролируемыми параметрами фотоэлектронного умножителя являются величина высоковольтного напряжения, временная задержка и уровень собственных шумов ФЭУ. Для контроля величины установленного высоковольтного напряжения в делителе ФЭУ предусмотрен мониторинговый выход, напряжение на котором пропорционально полному напряжению на делителе. Величина этого напряжения измеряется аналого-цифровым преобразователем (АЦП) контроллера ОМ. Методика контроля временной задержки фотоэлектронного умножителя основана на измерении времени между сигналом запуска светодиода и сигналом от светодиода, зарегистрированным ФЭУ. В режиме измерения временных задержек сигнал, совпадающий во времени с сигналом запуска, подается на выходной каскад усилителя спектрометрического канала ОМ. В результате формируется два сигнала, время между которыми определяется задержкой ФЭУ. Оно измеряется на центральном модуле секции с точностью около 2 нс. Следует отметить, что возможность принудительного формирования сигналов на выходе ОМ используется также и для контроля работоспособности секции в целом без включения высоковольтного напряжения на фотоэлектронных умножителях.

Для измерения уровня собственных шумов ФЭУ используется второй канал усилителя (коэффициент усиления ~ 20), сигнал с которого подается на счетчик наносекундных импульсов контроллера ОМ (см. Рис. 4.1.1). Длительность временного окна для подсчета количества шум-



Рис. 4.1.4: Оптический модуль с ФЭУ R7081HQE, защитным экраном из пермаллоя и комплектом электроники.

мовых импульсов и между измерениями может быть задана в диапазоне от единиц миллисекунд до 10 сек, в зависимости от режима работы ФЭУ. Предусмотрена возможность регулировки порога регистрации счетчика: минимальный рабочий порог ограничен амплитудой наводки от процессора контроллера ОМ и составляет величину ~ 10 мВ что соответствует вилчине порядка ~ 0.3 фотоэлектрона. Для мониторинга внешних условий работы электроники ОМ в контроллере предусмотрена возможность измерения температуры и уровней напряжений электропитания. Электропитание 12 В поступает на оптический модуль по тому же проводу, по которому передаются сигналы ФЭУ. Объединение электропитания со спектрометрическим каналом существенно упрощает систему глубоководных кабельных коммуникаций секции НТ1000. Однако такой подход приводит к увеличению уровня шумов спектрометрического канала до 5..7 мВ из-за собственных шумов источника питания. Ток потребления ОМ при напряжении 12 В составляет 200 мА, из которых ~ 80 мА приходится на контроллер.

4.1.3 Конструкция оптического модуля

Конструкция оптического модуля показана на Рис. 4.1.4. Электронные компоненты ОМ размещаются в глубоководной стеклянной сфере VITROVEX диаметром 42 см. Стеклянная сфера состоит из двух полусфер. Для надежной фиксации полусфер из оптического модуля откачивается воздух до давления около 0.7 атм.

Фотоэлектронный умножитель вклеивается в одну из полусфер силиконовым RTV компаундом, который обеспечивает оптический контакт между стеклами сферы и ФЭУ. Для уменьшения влияния магнитного поля Земли область фотокатода ФЭУ защищается экраном из пермаллоя. Контроллер, усилитель и высоковольтный конвертер крепятся на цоколе ФЭУ. Драйверы со светодиодами подключаются к контроллеру ОМ через высокочастотные разъемы SMA. Свет от

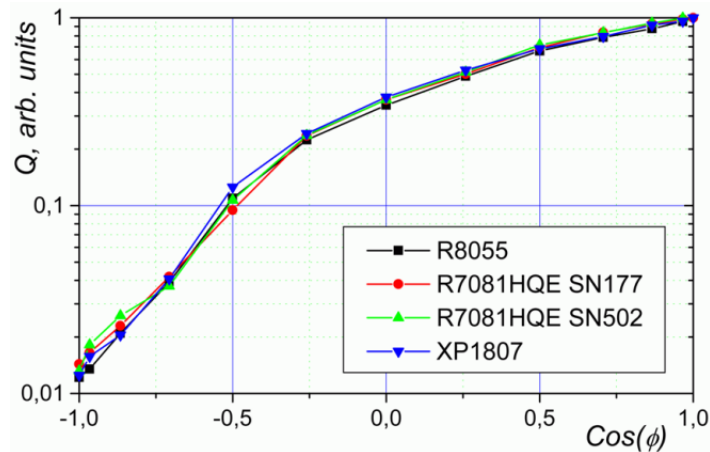


Рис. 4.1.5: Относительная угловая чувствительность ОМ с ФЭУ R8055, XP1807и R7081HQE.

светодиодов поступает в центр фотокатода ФЭУ по оптическим волокнам длиной 0.5 м. Усиленный сигнал с фотоэлектронного умножителя выводится из модуля через глубоководный коаксиальный разъем CP-50-862/863. Через этот же разъем вводится питание ОМ. Для ввода шины управления RS-485 в ОМ так же используется разъем CP-50-862/863. Рядом с двумя разъемами на сфере установлен вакуумный клапан, на котором закреплен манометр для контроля давления внутри ОМ.

4.1.4 Угловые характеристики оптических модулей

Принципиальное значение для решения задач моделирования процессов регистрации мюонов и каскадных ливней в установке NT1000 имеет информация об угловой зависимости отклика оптического модуля на черенковское излучение. Измерения угловых зависимостей проводились для выборочных экземпляров ОМ при помощи диффузного источника света с длиной волны 445 нм, установленного на расстоянии 2.5 м от оптического модуля. Исследуемый оптический модуль размещался в водонаполненном баке. На Рис. 4.1.5 представлены результаты измерения для ОМ на основе ФЭУ R8055, XP1807и R7081HQE.

4.2 Секция

Оптические модули монтируются на вертикальных грузонесущих кабелях, образуя гирлянды. Основной структурной единицей гирлянды является секция оптических модулей. Каждая секция включает в свой состав 12 ОМ, центральный модуль (ЦМ) и сервисный модуль (СМ). Функциональная схема секции показана на Рис. 4.2.1. Центральный модуль выполняет функции сбора и передачи данных и управляет работой электроники секции. Аналоговые сигналы от 12 оптических модулей поступают на ЦМ по коаксиальным кабелям длиной ~ 100 м. Преобразование сигналов ФЭУ в цифровой код осуществляется во временном окне 15 мкс тремя платами 4-х канальных 12-битных АЦП (FADC) с частотой дискретизации 200 МГц. На каналах формируются временные дорожки событий, анализ которых позволяет определить амплитуду и время регистрации сигналов с оптических модулей. При записи информации временных дорожек для минимизации мертвого времени на каждом канале предусмотрено два кольцевых буфера. Помимо преобразования аналоговых сигналов и промежуточного хранения данных, платы АЦП

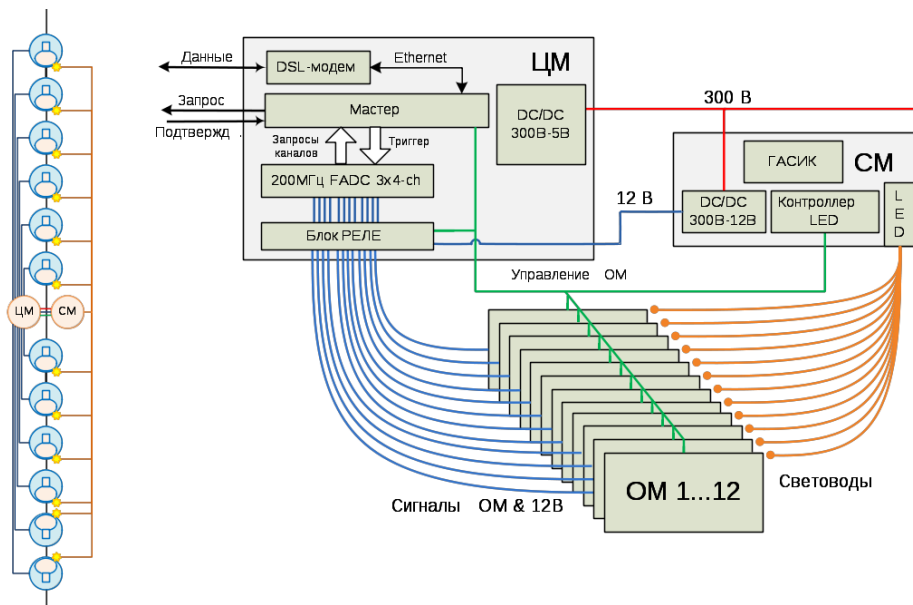


Рис. 4.2.1: Функциональная схема секции НТ1000.

формируют т.н. сигналы запросов каналов. Условие выработки сигнала *запрос* является превышение амплитуды входного сигнала заданного значения порога. Пороговая функция реализована на цифровых компараторах (два компаратора на канал). Пороги компараторов регулируется на программном уровне с дискретностью ~ 1.4 мВ (0.05 ф.э.). Сигналы *запрос* от всех каналов АЦП поступают на электронную плату *Мастер*, которая формирует *запрос* секции. Условие выработки этого сигнала является совпадение сигналов *запрос* от каналов секции в заданном временном окне. Информация о разрешенных комбинаций сигналов, участвующих в совпадениях, динамически загружается в память платы *Мастер* (т.н. матрица совпадений). Сигналы запросов секций передаются в центр кластера по коаксиальным кабелям длиной ~ 1200 м. В центре кластера формируется сигнал *подтверждение*, являющийся глобальным триггером для всех секций, обеспечивающий их синхронную работу. По этому сигналу данные всех каналов АЦП считываются и передаются в центр сбора данных кластера, который связан в свою очередь с Береговым центром оптоволоконной информационной линией.

Считывание данных секции осуществляется по каналу Ethernet платы *Мастер*, который удлиняется до 1200 м через DSL-модемы (скорость передачи до 8 Мбит/с). Для установки режимов работы оптических модулей, калибровки и мониторинга аппаратуры, не требующих больших скоростей передачи команд и данных, используется локальная подводная шина данных RS-485 на основе ASCII-протокола. Преобразователь Ethernet - RS-485 реализован на плате *Мастер*. Напряжение электропитания подается на оптические модули от линейных преобразователей 300 В – 12 В, установленных в сервисном модуле секции (СМ), по токопроводящим жилам спектрметрических каналов через дроссельную развязку. В отдельном блоке реализовано релейное управление включением ОМ, позволяющее отключать модули от источника напряжения в случае возникновения короткого замыкания. Помимо линейных преобразователей напряжения в СМ расположены элементы системы мониторинга и калибровки, а также гидроакустической системы измерения координат (ГАСИК). Система мониторинга позволяет получать информацию о величине напряжения электропитания секции и каждого оптического модуля, о температуре внутри ОМ, о высоковольтных напряжениях на фотоэлектронных умножителях и темпе счета

шумовых импульсов ФЭУ. Калибровка секции осуществляется двумя импульсными светодиодными источниками света, сигналы от которых по оптическим кабелям разветвляются на все оптические модули секции.

Таблица 4.2.1: Основные параметры секции НТ1000.

Количество измерительных каналов	до 12
Тип ФЭУ	R7081HQE
Частота дискретизации АЦП при измерении формы импульса	200 МГц
Количество эффективных разрядов АЦП	11
Динамический диапазон спектрометрических каналов	1-10 ⁴ ф.э.
Линейный диапазон спектрометрических каналов	1-10 ² ф.э.
Временной диапазон измерения канала	до 15 мкс
Частота шумовых импульсов канала на уровне 0.3 ф.э.	<10 КГц
Скорость передачи данных от секции на расстояния до 1200 м	8 Мбит/с
Точность измерения времени каналом	2 нс
Точность амплитудной калибровки канала	10%
Точность определения координат секции	~0.2 м
Напряжение электропитания	300 вольт
Энергопотребление	100 ватт

Конструкция центрального и сервисного модуля секции в значительной степени повторяет конструкцию ОМ. Электроника модулей размещается в глубоководных стеклянных сферах VITROVEX. В нижнюю полусферу клеивается алюминиевое кольцо, на котором монтируется крейт с электроникой. Для передачи сигналов и данных используются глубоководные коаксиальные разъемы CP-50-862/863. Электропитание секции (300В), передача данных (Ethernet) и синхронизация (сигналы *запрос* и *подтверждение*) осуществляются через несущий кабель-трос, в котором предусмотрены три токопроводящие жилы электропитания, одна витая пара и два коаксиальных кабеля. Основные параметры секции оптических модулей представлены в таблице 4.2.1.

4.3 Гирлянда

Гирлянда является основным конструкционным блоком детектора НТ1000. Она представляет собой монтажный узел, состоящий из нескольких секций, размещенных на одном несущем кабеле. Базовая конфигурация гирлянды состоит из двух секций и коммутационного модуля гирлянды (КМ). Функциональная схема гирлянды представлена на Рис. 4.3.1.

Коммутационный модуль гирлянды обеспечивает подключение систем передачи данных, синхронизации и электропитания секций к кабель-тросу, который соединяет гирлянду с центром сбора данных кластера (центром кластера - ЦК). Кабель-трос типа КГ(2РК 50+(2x0,5)Э+3x0,5)-500а (ПСКОВГЕОКАБЕЛЬ) состоит из двух коаксиальных кабелей РК-50 для трансляции сигналов *запрос* и *подтверждение*, трех жил электропитания сечением 0.5 мм² и экранированной витой пары для передачи данных. Данные от двух секций передаются по двум линиям DSL-модемов в КМ и через сетевой коммутатор и третий DSL-модем транслируются в центр сбора данных кластера. Сигналы *запрос* от секций объединяются логическим *ИЛИ* в блоке триггерного коммутатора, формируя общий запрос гирлянды. Получаемый от ЦК сигнал *подтверждение* разветвляется на секции гирлянды. Для базовой конфигурации гирлянды, состоящей из двух секций, не требуется дополнительной коммутации линий электропитания: каждая секция

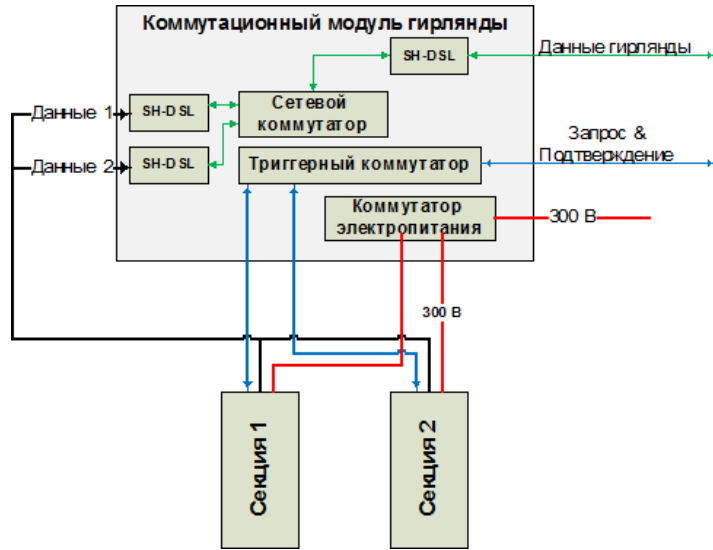


Рис. 4.3.1: Функциональная схема коммутационного модуля гирлянды NT1000.

подключается к собственной жиле электропитания кабель-троса. Управление электропитанием осуществляется в центре кластера через тиристорный коммутатор. В случае увеличения количества секций в коммутационном модуле гирлянды планируется использование тиристорного коммутатора.

4.3.1 Калибровка каналов гирлянды

Установка NT1000 предназначена для многолетней экспозиции в потоке космического излучения. Характеристики каналов регистрации установки могут меняться с течением времени из-за изменения параметров фотоэлектронных умножителей, измерительной электроники и режима работы аппаратуры (в частности, напряжения питания ФЭУ). Преобразование измеряемых величин в физические параметры (поток фотонов и время их регистрации) осуществляется калибровочной системой секции. Можно выделить две основные составляющие калибровочной процедуры секции: временная и амплитудная калибровки. Первая служит для определения собственных временных задержек каналов (временных сдвижек), обусловленных длинами кабельных коммуникаций и задержками в фотоэлектронных умножителях. Вторая предназначена для преобразования сигнала отклика ФЭУ в количество фотоэлектронов (ф.э.). Для перехода от фотоэлектронов к потоку черенковских фотонов используется известное значение квантовой чувствительности фотокатода ФЭУ, которое в свою очередь контролируется при помощи подводного лазерного источника света и атмосферных мюонов. Временная калибровка производится при помощи светодиодного источника света, расположенного в сервисном модуле. Световой импульс от источника разветвляется и подводится к каждому оптическому модулю по оптоволоконным кабелям с калиброванной задержкой. Измерение времени регистрации этого импульса осуществляется всеми измерительными каналами секции, что при известной временной задержке в оптическом кабеле позволяет определить относительные временные сдвижки каждого канала. Эта методика была испытана при эксплуатации детекторов NT200 и NT200+ и обеспечила точность временной калибровки около 2 нс. Недостатком данного подхода является необходимость монтажа 12 оптоволоконных кабелей для каждой секции, что заметно увеличивает время ее развертывания со льда оз. Байкал. Применение FADC в измерительных каналах секций позволяет использовать альтернативную методику временной калибровки, которая основана на прямом

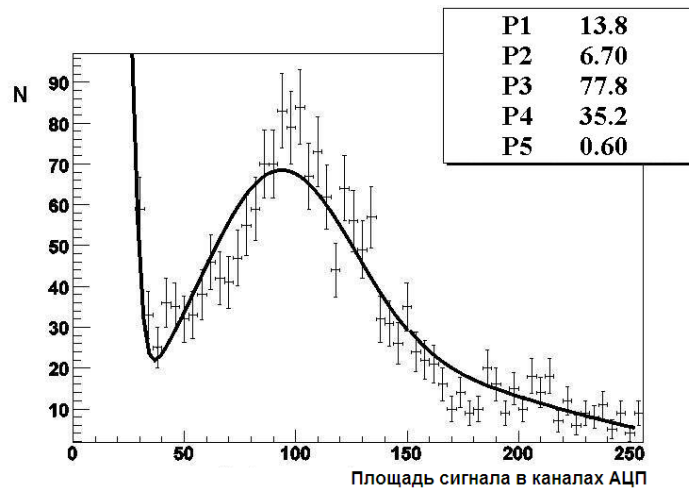


Рис. 4.3.2: Одноэлектронный спектр ФЭУ.

измерении временной задержки сигнала в оптическом модуле (методика измерения представлена в п. 4.1). Для получения временных сдвижек каналов достаточно к задержке сигнала в ОМ добавить измеренную в лаборатории временную задержку сигнальных кабелей (процедура эквивалентна калибровке задержек в оптоволоконных кабелях). Функциональные возможности электроники измерительного канала НТ200 не позволяли использовать такой подход к временной калибровке, поэтому в процессе натурных испытаний секции НТ1000 (см. п. 4.5.2) были реализованы оба подхода. Амплитудная калибровка спектрометрических каналов базируется на широко используемой методике измерения одноэлектронных спектров фотоэлектронных умножителей. Для измерения одноэлектронных спектров ФЭУ используется светодиодная система калибровки оптических модулей (п. 4.1.4). Особенность применения этого метода в НТ1000 заключается в том, что для измерения одноэлектронного спектра используется два сигнала с двух светодиодов ОМ. Одноэлектронные сигналы формируемые первым светодиодом регистрируются только при наличии задержанного на время ~ 200 нс сигнала от второго светодиода с амплитудой ~ 1000 ф.э. Такой подход позволяет надежно выделять одноэлектронные сигналы из шумов фотоэлектронного умножителя. Пример одноэлектронного калибровочного спектра ФЭУ показан на Рис. 4.3.2. Средний заряд, определенный по полученному спектру, составляет 78 кодов канала АЦП (параметр P3 на Рис. 4.3.2) с учетом величины пьедестала канала (параметр P1). Амплитуда, соответствующая среднему заряду одноэлектронного спектра, используется в качестве коэффициента преобразования канала. Полученный таким образом калибровочный коэффициент можно использовать только в линейной области преобразования канала, которая ограничена сигналами ~ 100 ф.э. Именно эта область представляет основной интерес при реконструкции физических событий в НТ1000. Большие сигналы превышают верхнюю границу динамического диапазона АЦП и преобразуются нелинейно. Для того, что бы использовать амплитудную информацию в нелинейной области необходимо измерять градуировочные характеристики каналов. Измерение градуировочных характеристик осуществляется системой из двух светодиодов ОМ путем последовательного удвоения светового потока и регистрации соответствующего отклика ОМ. Пример градуировочной характеристики канала показан на Рис. 4.3.3. При градуировке канала по мере увеличения амплитуды сигнала происходит накопление ошибок и может возникать систематическое смещение градуировочной характеристики. Величина систематического смещения в области до $\sim 10^3$ ф.э. была измерена независимым методом и составила величину меньшую 10%, что не

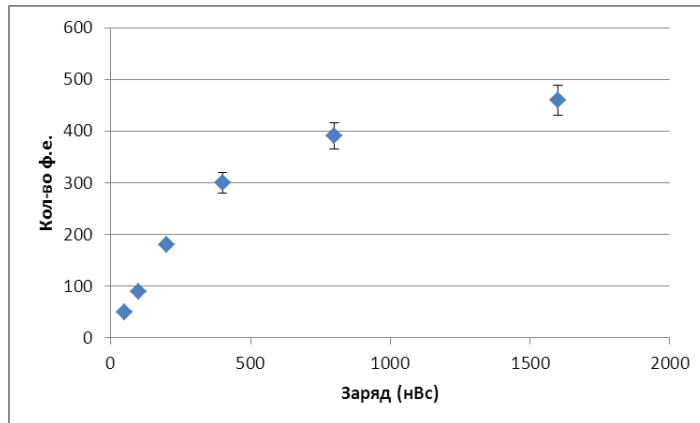


Рис. 4.3.3: Пример градуировочной характеристики спектрометрического канала. Измерения проводились с нагрузкой 50 Ом.

превышает статистической ошибки измерения на границе линейного диапазона (100 ф.э.).

4.4 Кластер

Базовая конфигурация кластера НТ1000 включает в свой состав восемь гирлянд, каждая из которых состоит из 2-х секций по 12 оптических модулей, центра сбора данных кластера и кабельных коммуникаций, связывающих кластер с Береговым Центром (БЦ). Центр сбора данных кластера (см. Рис. 4.4.1) состоит из трех подводных модулей, расположенных вблизи поверхности оз. Байкал (глубина около 30 м): коммутационного центра, РС-сферы и муфты оптического кабеля.

Гирлянды связаны с центром сбора данных кластера кабелями длиной ~ 1.2 км, по которым осуществляется передача данных, электропитания и синхронизация работы секций. Данные от 8 гирлянд транслируются по двухпроводным линиям связи на основе SH-DSL модемов, расположенных в модуле РС-сфера (скорость передачи до 8 Мбит/с). В этом же модуле размещается подводный микрокомпьютер, позволяющий проводить on-line анализ поступающей информации. Данные, получаемые от гирлянд, передаются из РС-сферы в Муфту оптического кабеля по подводной линии 100 Мбит Ethernet для последующей их трансляции в береговой центр (БЦ) через сетевой коммутатор EDS-G308-2SFP-T. Центр управления кластера связан с БЦ кабелем длиной около 6 км. По этому кабелю на кластер подается электропитание и осуществляется передача цифровой информации по гигабитной волоконно-оптической линии связи (ВОЛС). ВОЛС состоит из 3-х пар одномодовых волокон (AllWave FLEX ZWP). Две пары используются для передачи данных (основная и резервная линии), а одна пара предназначена для синхронизации работы кластеров НТ1000. Для электропитания кластера используются блоки БИП-300 (береговые источники питания) с постоянным выходным напряжением до 450 В и мощностью до 1 кВт. Выходное напряжение источников регулируется таким образом, что бы на подводном конце 6-километровой линии электропитания напряжение составляло величину 300 В. Подводная часть аппаратуры, предназначенной для управления системой электропитания кластера и синхронизации работы измерительной системы гирлянд, размещается в коммутационном центре. Независимое включение и выключение электропитания 300 В каждой из гирлянд осуществляет тиристорный коммутатор, который управляется через 16-канальный модуль дискретного вывода I-7045 и асинхронный сервер RS485/Ethernet (NPort 5150A-T). Этот же коммутатор использу-

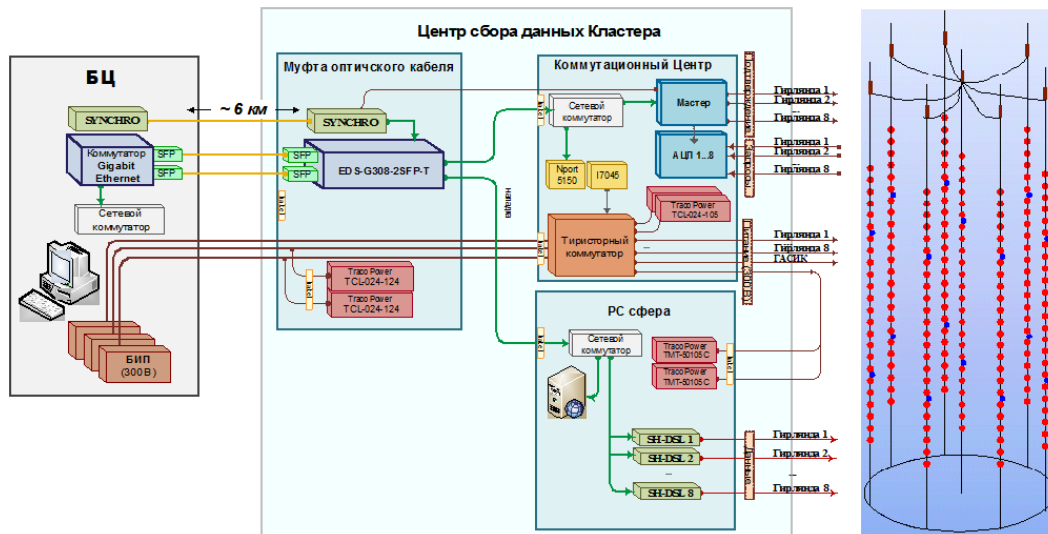


Рис. 4.4.1: Функциональная схема центра сбора данных кластера (слева) и кластер из восьми гирлянд (справа).

ется для включения питания гидроакустической системы измерения координат ГАСИК и для переключения основных и резервных источников питания коммутационного центра и РС-сферы: TMT-50105C и TCL-024-105. Электропитание самого коммутатора и управляющих его работой устройств осуществляется от источников TCL-024-124, расположенных в муфте оптического кабеля. Синхронизация работы регистрирующих систем секций кластера обеспечивается электронным блоком Мастер, полностью аналогичным устройствам, расположенным в центральных модулях каждой секции. Запросы от всех гирлянд поступают в центр сбора данных кластера, где измеряется время их прихода. Для измерения времени используется 8-канальный блок FADC, аналогичный аналого-цифровым преобразователям каналов секций. Общий триггер формируется блоком Мастер кластера. По общему триггеру вырабатывается сигнал *подтверждение*, который разветвляется на все секции всех гирлянд. Относительно этого сигнала осуществляется измерение времени регистрации излучения каналами секций. Для того, что бы компенсировать разницу времен прохождения сигналов *запрос* и *подтверждение* от разных секций через кабельные линии связи, на блоке Мастер предусмотрена возможность измерения времени между формированием сигнала *запрос* и поступлением сигнала *подтверждение* с точностью ~ 5 нс.

4.5 Системы передачи данных и формирования триггера

Система передачи данных и триггерная система установки НТ1000 тесно взаимосвязаны. Нейтринный телескоп регистрирует достаточно редкие события. Однако, достижение высокой эффективности регистрации полезных событий (мюонов и каскадных ливней), выделяемых триггерной системой на аппаратном уровне, требует максимального уменьшения порогов регистрации каналов. Это приводит к тому, что основную долю в общем потоке данных составляют фоновые (шумовые) события. Фильтрация фона осуществляется на стадии первичного анализа поступающей от установки информации компьютерами вычислительного комплекса Берегового центра. Задачей системы передачи данных является обеспечение передачи полного потока данных, который достигает десятков Мбит/с, от подводной части установки в Береговой центр без

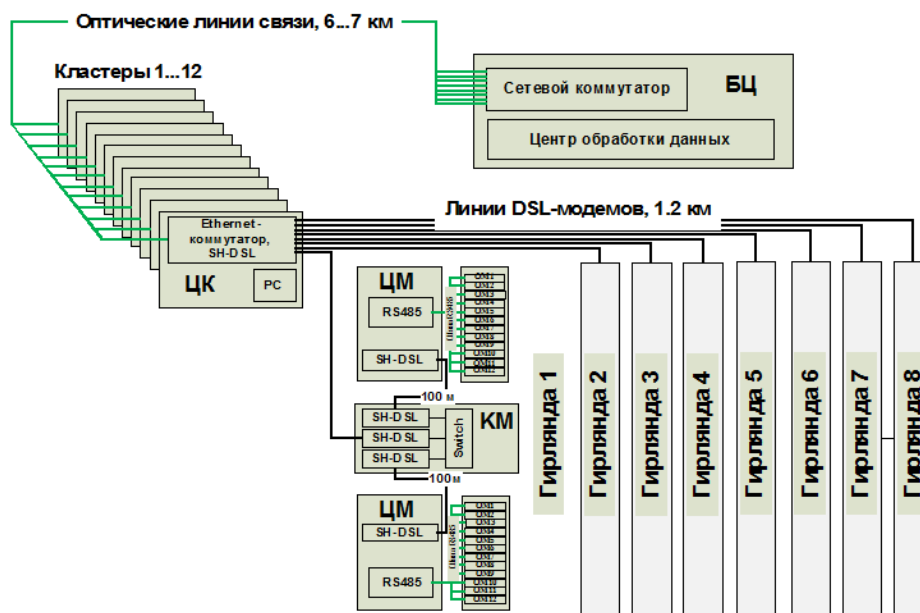


Рис. 4.5.1: Архитектура подводной информационной сети НТ1000.

потерь.

4.5.1 Система передачи данных

Подводная информационная сеть установки НТ1000 организована на основе технологии Ethernet. Схема организации сети представлена на Рис. 4.5.1.

Можно выделить четыре типа сегментов подводной информационной сети: линии связи Берегового центра сбора данных (БЦ) с центрами кластеров (ЦК) - береговые сегменты; линии связи ЦК с коммутационными модулями гирлянд (КМ) - сегменты кластеров; линии связи КМ с центральными модулями секций (ЦМ) - сегменты гирлянд; сегменты секций, связывающие ЦМ с оптическими модулями.

Таблица 4.5.1: Сегменты подводной информационной сети НТ1000.

Сегмент	Длина сегмента	Тип кабельной линии связи	Технология	Скорость передачи
Береговой сегмент	6-7 км	Оптическое волокно	1000BaseFX	1 Гбит/с
Сегмент кластера	1.2-1.3 км	Витая пара	SH-DSL	7 Мбит/с
Сегмент гирлянды	100-200 м	Витая пара	SH-DSL	10 Мбит/с
Сегмент секции	100 м	Витая пара	RS-485	115200 бит/с

В таблице 4.5.1 представлены основные характеристики линий связи для всех типов сегментов. Указанные в таблице скорости передачи информации для линий связи на основе SH-DSL и RS-485 технологий получены в результате прямых экспериментальных измерений с реальными кабельными коммуникациями, которые будут использованы в установке НТ1000. Для управления работой оптических модулей секций, не требующего высокой скорости передачи информации, используется двухпроводная шина RS485 с протоколом ASCII типа. По этому каналу устанавливаются режимы работы ОМ (уровень высоковольтного напряжения ФЭУ и состояния калибровочных и тестовых систем модуля) и передается мониторинговая информация от оптических модулей: темпы счета шумов и значения напряжений электропитания оптических модулей.

Тестирование линии связи RS-485 в реальных условиях подводной эксплуатации в оз. Байкал показало ее надежную работу на расстояниях до 120 м (длина одной секции гирлянды) при скорости 115200 бит/сек. При уменьшении скорости обмена до 9600 бит/сек, надежная передача данных возможна на расстояния до 1 км. Для передачи данных о временных дорожках FADC каналов секций требуются существенно более высокие скорости. Это связано со значительным объемом информации сопутствующей каждому зарегистрированному событию. Объем информации о событии определяется степенью сжатия данных временных дорожек системой on-line обработки блока Мастер ЦМ. В том случае, если обработка данных не производится и передается полная информация из временного окна 5 мкс каждого канала FADC (2 Кбайт на канал), то объем данных одного события секции (120М) составляет величину 24Кбайт. Этот технологический режим используется для тестирования и мониторинга регистрирующей аппаратуры и не требует высоких скоростей передачи данных. В рабочем режиме регистрации размер события может быть существенно сокращен за счет выделения из временных дорожек только полезной информации из областей превышения сигнала над уровнем шумов канала - 40 байт на каждый импульс, в среднем около 200 байт на событие, зарегистрированное одной секцией (с учетом вклада шумовых импульсов ФЭУ). При таком размере события предельная пропускная способность последовательно включенных сегментов сети *секция-гирлянда* и *гирлянда-кластер* составляет $\sim 2 \times 10^3$ событий/с. Последующая передача данных в береговой центр по оптоволоконной линии связи практически не уменьшает пропускную способность системы в целом.

4.5.2 Триггерная система

Частота поступления физических событий регулируется триггерной системой НТ1000. Общий подход к организации триггерной системы основан на выделении событий, в которых наблюдаются совпадения сигналов с определенных групп каналов установки (триггерных групп) в заданном временном интервале (разрешающее время совпадений). Ограничения на выбор групп каналов, участвующих в совпадениях, связаны только с организацией кабельных коммуникаций НТ1000, по которым передаются триггерные сигналы. Возможен выбор следующих триггерных групп: совпадения сигналов от ОМ одной секции, совпадения триггерных сигналов секций в пределах одной гирлянды и совпадения между гирляндами одного кластера. Система управления триггерной аппаратурой установки позволяет задавать значения следующих параметров для каждой триггерной группы:

- величину порогов цифровых компараторов каналов (на каждом канале предусмотрено два компаратора),
- набор разрешенных комбинаций каналов, участвующих в совпадениях,
- разрешающее время совпадений.

Оптимальная настройка триггерной системы зависит от текущих приоритетов физических задач, размеров детектора (зависящего от этапа развертывания установки) и конфигурации регистрирующей аппаратуры. В настоящее время в качестве базового рассматривается вариант настройки триггерной системы, представленный на Рис. 4.5.2. Триггер нижнего уровня вырабатывается триггерными группами отдельных секций. Каждый канал секции формирует сигналы запросов двух типов: низкий порог $l \sim 0.3$ ф.э. и высокий порог $h \sim 3$ ф.э. Частота поступления сигналов l от каждого канала в период повышенной световой активности оз. Байкал может достигать значения ~ 40 кГц, темп счета сигналов h примерно на два порядка меньше. Характерная зависимость фактора подавления шумовых импульсов ФЭУ от порога регистрации при экспонировании ФЭУ на больших глубинах оз. Байкал показана на Рис. 4.5.3. Сигналы запросов каналов поступают на плату Мастер ЦМ, где формируется сигнал *запрос* секции - совпадение

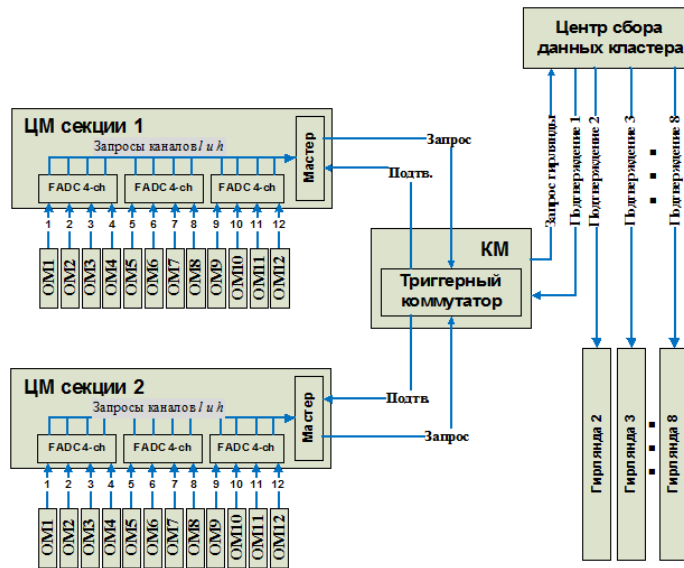


Рис. 4.5.2: Функциональная схема организации триггера.

сигналов l и h от двух любых соседних оптических модулей во временном окне 100 нс (сигнал lh). Частота сигналов lh для пары оптических модулей составляет значение около 3 Гц, а для секции из 12 ОМ 30..40Гц. Сигналы запросов от двух секций поступают в коммутационный модуль гирлянды (КМ), где они объединяются в общий сигнал *запрос* гирлянды. Частота сигналов *запрос* гирлянды может достигать значения ~ 100 Гц.

Сигналы *запрос* гирлянд передаются по коаксиальным кабелям длиной ~ 1.2 км в центр сбора данных кластера, где формируется триггер кластера как логическое *ИЛИ* запросов всех гирлянд. Триггер кластера формирует общий для всех гирлянд сигнал *подтверждение*. Сигнал *подтверждение* возвращается на все гирлянды кластера, разветвляется в КМ и транслируется на все секции, обеспечивая синхронную обработку данных всеми платами FADC. Задержка между сигналами *запрос* и *подтверждение* определяется главным образом длиной кабеля и составляет величину около 13 мкс. Это значение определяет, в частности, величину временного окна измерений FADC - 15 мкс.

Частота выработки сигналов *подтверждение* складывается из частот поступления сигналов *запрос* от 8 гирлянд, и составляет значение ~ 1 кГц. По сигналу *подтверждение* данные от всех гирлянд передаются в центр сбора данных кластера (пропускная способность информационных каналов гирлянд $\sim 2 \times 10^3$ событий/с), а затем транслируются по оптической линии связи в Береговой центр, где на программном уровне в режиме реального времени осуществляется фильтрация шумов и отбор полезных событий.

4.6 Натурные испытания гирлянды

Натурные испытания аппаратуры секции НТ1000 проводились в оз. Байкал в период с 2008 по 2010 год. В 2008 году была установлена гирлянда из 6 оптических модулей для изучения методики регистрации черенковского излучения аппаратурой на основе FADC. В 2009 г. гирлянда была расширена до 12 ОМ - две секции по 6 ОМ каждая (см. Рис. 4.6.1). Расстояния между ОМ составляли 10 м, общая длина гирлянды - 110 м. Все фотоэлектронные умножителя гирлян-

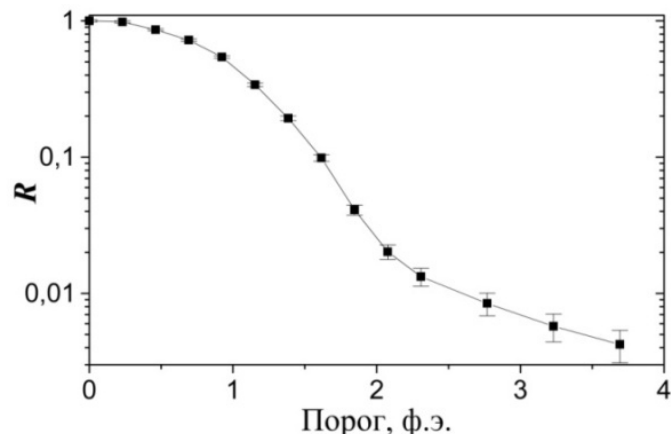


Рис. 4.5.3: Пример зависимости фактора подавления шумов фотоэлектронного умножителя R от порога регистрации.

ды кроме двух нижних были ориентированы фотокатодом вниз. В центральной части гирлянды расположены два ЦМ, один СМ и компьютерный модуль (РС-сфера), выполнявший роль центра сбора данных кластера НТ1000. В гирлянде использовались ФЭУ Photonis XP1807 с фотокатодом 12" и Hamamatsu R8055 с фотокатодом 13". В 2009 году фирма Photonis прекратила выпуск ФЭУ с фотокатодом 12", а фирма Hamamatsu анонсировала новый ФЭУ R7081HQE с фотокатодом 10" повышенной квантовой эффективности (более 30%). ФЭУ XP1807 были заменены на R7081HQE в апреле 2010 г. и работы с экспериментальной гирляндой были продолжены до августа 2010 г. Система управления и передачи данных гирлянды максимально приближена к базовой конфигурации, разработанной для секции НТ1000. Роль центра сбора данных кластера выполняет компьютерный модуль, обеспечивающий формирование общего сигнала *подтверждение* двух секций и передачу данных в Береговой центр по каналу Ethernet через DSL-модем. Поскольку компьютерный модуль располагался в непосредственной близости от центральных модулей гирлянды, связь его с ЦМ1 и ЦМ2 осуществлялась без использования DSL-модемов, которые предусмотрены в базовой конфигурации аппаратуры секции. Аппаратура гидроакустической системы измерения координат (ГАСИК) располагалась в отдельных модулях в верхней и нижней части гирлянд. Основной задачей, которая решалась в ходе эксплуатации экспериментальной гирлянды, являлась комплексная проверка работы всех электронных узлов, глубоководных кабельных коммуникаций и несущих конструкций в условиях долговременной экспозиции аппаратуры в потоке космического излучения. В общей сложности за период с 2008 по 2010 годы экспериментальная гирлянда в различных конфигурациях проработала около 12 месяцев. За это время не было зафиксировано значимых ошибок в функционировании или нарушений герметичности основных узлов гирлянды: оптических модулей, блоков АЦП и управления, глубоководных кабелей и разъемов. Перерывы в работе гирлянды были связаны с выходом из строя DC/DC конвертеров сервисного модуля. На основании этого опыта в настоящее время разработана и внедряется система грозозащиты и резервирования электропитания гирлянды.

Ключевым параметром нейтринного телескопа НТ1000 является угловое разрешение, которое должно быть существенно лучше 1° . Угловое разрешение зависит в первую очередь от точности измерения времени регистрации черенковского излучения каждым каналом детектора. Это точность определяется двумя параметрами регистрирующей системы: временным разрешением каналов и точностью их временной калибровки. Исследования этих параметров эксперимен-

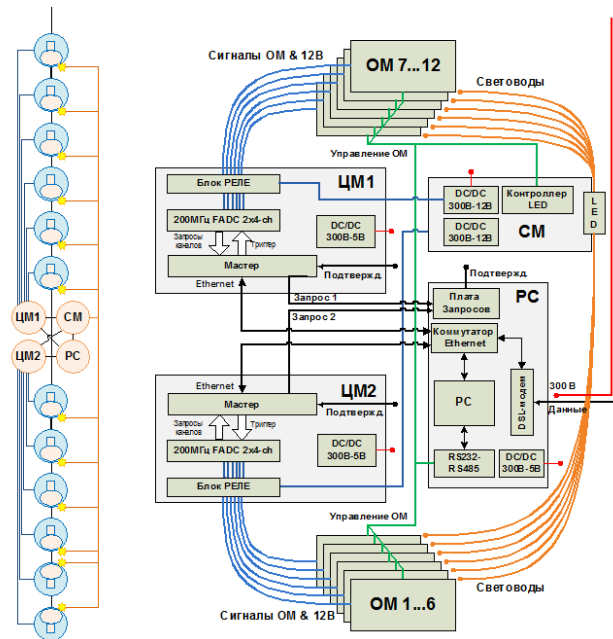


Рис. 4.6.1: Блок-схема экспериментальной гирлянды из двух секций по 6 ОМ.

тальной гирлянды проводилось в режимах регистрация излучения от светодиодных источников, лазерного калибровочного источника и атмосферных мюонов. Временное разрешение каналов измерялось в режиме калибровки гирлянды светодиодным источником света. Источник, расположенный в центре гирлянды в сервисном модуле, генерировал серию двойных импульсов со строго фиксированным временным интервалом (задержкой) между ними. Задержка (~ 500 нс) была выбрана таким образом, чтобы оба импульса попадали во временное окно одного события. Световые импульсы передавались ко всем ОМ гирлянды по оптическим кабелям. Положение импульсов на временных дорожках каналов определялось по факту превышения фиксированного порога, выбранного на уровне ~ 0.5 ф.э. На рисунке 4.6.2 представлены результаты измерения величины задержки между импульсами светодиодного источника для всех каналов гирлянды. Усредненная по всем каналам величина задержки (498.3 нс) отличается от ожидаемой (497.5 нс) менее чем на 1 нс. Усредненное по всем каналам среднеквадратичное отклонение задержек составляет 1.6 нс. Это значение характеризует временное разрешение канала гирлянды. Следует отметить, что можно добиться некоторого улучшения временного разрешения, используя для определения положения импульсов на дорожке фитирование их формы. Значительный разброс по величине среднеквадратичного отклонения объясняется разницей амплитуд световых импульсов (от 1 до 100 ф.э.), которая обусловлена различными условиями фокусировки света от светодиодов источника на вводы оптических кабелей. Этой причиной, в частности, объясняется отсутствие информации по 3-му каналу на Рис. 4.6.2.

Точность временной калибровки каналов - второй фактор, влияющий на временные характеристики детектора. Калибровка подразумевает определение относительных временных сдвижек каналов t_{shift} , обусловленных разницей в длинах кабельных коммуникаций каналов и задержек фотоэлектронных умножителей. Значения калибровочных параметров t_{shift} , полученные двумя методами (измерением времен регистрации общего для всех каналов сигнала от светодиодного источника света и измерением собственных задержек ФЭУ), согласуются в пределах 3 нс, что несколько превышает ожидаемое значение 2 нс. Исследование причин расхождения результатов

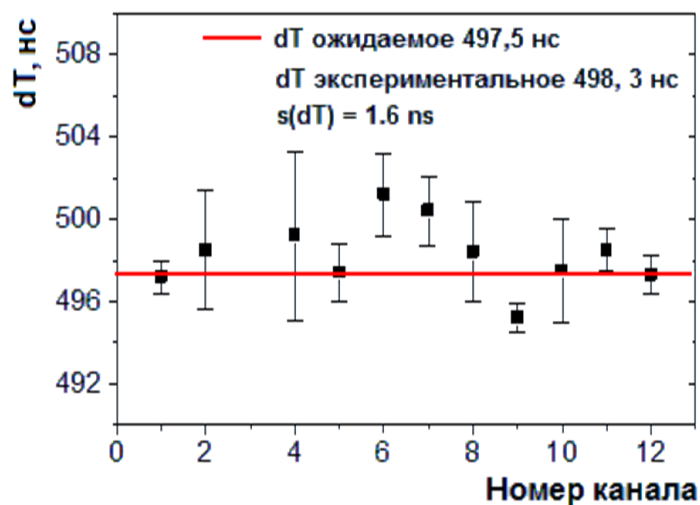


Рис. 4.6.2: Величина временного интервала между сигналами светодиодов, измеренная для 12 каналов экспериментальной гирлянды.

калибровок будет продолжено. Для последующего анализа работы экспериментальной гирлянды использовались результаты светодиодной временной калибровки. Точность измерения времени регистрации черенковского излучения каналами экспериментальной гирлянды оценивалась по результатам ее калибровки лазерным источником света (калибровочный лазер). Калибровочный лазер представляет собой изотропный источник света с интенсивность излучения до 5×10^{13} фотонов на импульс при длине волны 475 нм и длительности светового импульса менее одной наносекунды. Лазерный источник был расположен на расстоянии около 100 м от экспериментальной гирлянды на глубине ~ 1.2 км. Гидроакустическая система измерения координат обеспечивает точность определения взаимного расположения лазерного источника и оптических модулей гирлянды на уровне 0.5 м. Это позволяет сопоставить ожидаемое время регистрации излучения каналами гирлянды с экспериментально полученными значениями. В качестве экспериментально измеряемого параметра использовалась разность времен срабатывания каналов гирлянды ΔT . Результаты сопоставления измеренных значений $\Delta T_{\text{ИЗМ}}$ и ожидаемых из геометрических соображений $\Delta T_{\text{ГЕОМ}}$ представлены в таблице 4.6.1 в зависимости от расстояния между каналами. Значения $dT_{\text{ИЗМ}}$ в таблице получены в результате усреднения по всем комбинациям каналов, находящихся на одинаковом расстоянии R друг от друга. Полученные результаты позволяют утверждать, что точность измерения времен регистрации каналами гирлянды не хуже 3 нс, что обеспечивает достижение необходимого уровня углового разрешения детектора НТ1000.

Таблица 4.6.1: Калибровка каналов гирлянды лазерным источником света.

Расстояние между каналами, м	10	20	30	40	50
$\Delta T_{\text{ИЗМ}} - \Delta T_{\text{ГЕОМ}}$, нс	0.3	-1.2	-2.2	0.5	1.3

Анализ фоновых условий регистрации экспериментальной гирлянды в оз. Байкал не выявил новых эффектов по сравнению с ранее исследованными на детекторе НТ200. На Рис. 4.6.3 показана зависимость от времени темпа счета шумовых импульсов (порог ~ 0.5 ф.э.) для семи каналов гирлянды, расположенных на расстоянии 10 м друг от друга. Четко выраженная

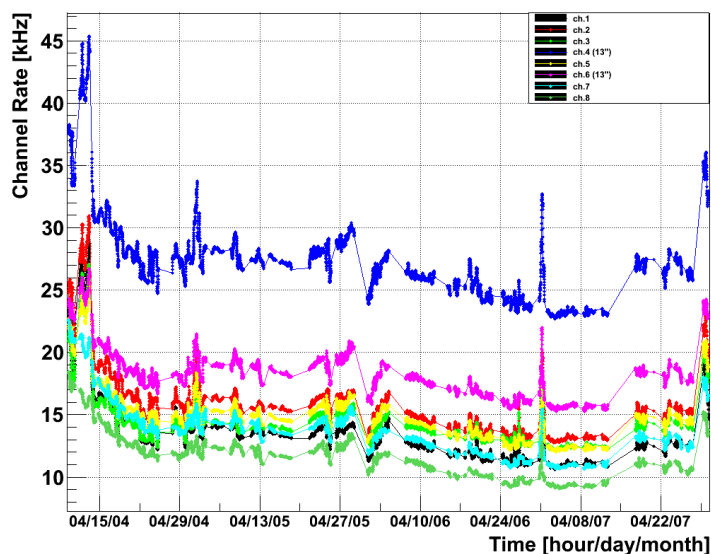


Рис. 4.6.3: Темп счета семи каналов экспериментальной гирлянды в течение четырех месяцев экспозиции.

корреляция темпов счета каналов указывает, что существенной составляющей шумов ФЭУ является свечение воды оз. Байкал. Независимые исследования показывают, что природа свечения связана с процессами хемилюминесценции. Наряду с относительно стабильными периодами свечения видны всплески его интенсивности, увеличивающие темп счета шумовых импульсов более чем в два раза. Природа возникновения таких всплесков связана с переносом светящихся масс глубоководными течениями оз. Байкал.

Поток атмосферных мюонов позволяет исследовать временные характеристики экспериментальной гирлянды в условиях, максимально приближенных к реальному режиму эксплуатации. Анализ мюонных событий из верхней полусферы был выполнен для пары ОМ с ФЭУ, ориентированных вверх, которые наиболее адекватно имитируют условия регистрации нейтринных событий из нижней полусферы. Экспериментальное распределение по разнице времен срабатываний каналов ΔT сопоставлялось с результатами моделирования отклика гирлянды на атмосферные мюоны (см. Рис. 4.6.4).

Экспериментальное распределение хорошо согласуется с расчетом. Смещение распределений по временной шкале друг относительно друга составляет $\sim 2-3$ нс. Эта величина характеризует временную точность экспериментальной гирлянды в целом, включая все источники ошибок измерения времени.

4.7 Береговой центр сбора данных и управления

4.7.1 Общие принципы, закладываемые в береговой центр сбора данных и управления

Основные требования, предъявляемые к береговой системе сбора и обработки данных :

- Поток данных с каждого отдельного кластера (частота срабатывания до 10^4 Гц), с учетом сжатия данных, свыше 4 мегабит в секунду (для полной установки из 12-и кластеров до 50 мегабит/сек.)

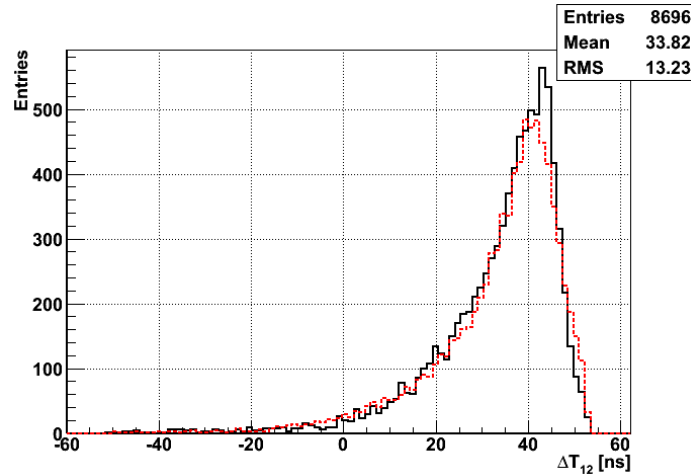


Рис. 4.6.4: Распределение по разнице времен срабатывания каналов гирлянды (ФЭУ ориентированы фотокатодами вверх): эксперимент (сплошная гистограмма) и результаты моделирования отклика на атмосферные мюоны (пунктирная гистограмма).

- Система должна выделять из этого потока события по заданному системному триггеру (или, если для разных задач применяются разные условия, – триггерам), позволяющему выделять события в масштабе всей установки, и направлять такие события в выходной поток данных.
- Использование оптоволоконной линии связи в качестве основной при передаче вышеуказанных (до 50 Мбит/сек.) потоков данных, т.к. использование витой пары и ADSL-модемов (которые на данный момент обеспечивают пропускную способность на уровне 6 мегабит в секунду на линиях свыше 6-и км) не имеет значительного резерва на случай непредвиденного увеличения потока данных либо деградации витой пары.
- Обязательная буферизация входящих событий. Входной поток данных объединяется из 12 отдельных каналов по одному каналу с каждого кластера, что в сочетании со стандартными сетевыми протоколами передачи данных не позволяет гарантировать правильную последовательность доставки информации о событиях. Поэтому для выделения событий в режиме реального времени входящие события должны быть буферизованы. Необходимый размер буфера зависит от максимально возможных задержек при передаче данных, а также от соотношения между средней загрузкой и пиковой производительностью системы.
- Гибкость и масштабируемость системы сбора данных в целом при увеличении объемов установки и количества передаваемых данных. Независимость системы сбора данных от количества компонентов детектора (кластеров, гирлянд, оптических модулей).
- Архитектурная независимость: в целом система должна быть легко адаптируемой к изменению аппаратной вычислительной составляющей берегового центра. При необходимости система должна быть легко переносима на экзотические, отличные от Intel x86 аппаратные платформы.
- Простота и надежность в использовании: современный и эргономичный интерфейс пользователя, позволяющий комфортное управление установкой. Точность временной привязки данных эксперимента к мировому времени должна быть лучше 100 мкс. Такие точности

могут быть достигнуты установкой и настройкой локальных приемников GPS и настройкой сервиса *ntp* (*network time protocol*).

Береговая система сбора и обработки событий должна выглядеть следующим образом. Донные кабельные линии, общим числом 12 штук (по одной на каждый кластер) через 16-ти портовый сетевой коммутатор заводятся на вход рабочей станции (Host PC), где и происходит дальнейшая обработка потока данных. Рабочая станция (категории *сервер уровня предприятия*, предназначенные в том числе и для научных расчётов) представляет многопроцессорную платформу (от четырёх четырёхядерных процессоров и выше), содержащую до 128 Гб оперативной памяти, в адресном пространстве которой из входного потока формируется единый массив данных. Рабочая станция должна обладать достаточно большой надёжностью (вплоть до *горячей* замены компонентов), простотой в обслуживании и гибкостью в распределении ресурсов. Предварительные оценки показывают, что такая система минимально достаточна для стабильной обработки полного потока данных по всем основным задачам установки. Однако, в случае непредвиденного увеличения необходимых вычислительных мощностей сервера к достоинствам выбранного решения можно отнести возможность относительно простого наращивания его мощности путём масштабирования. После формирования массив данных фильтруется, отбрасываются события, не прошедшие триггер, выбранный для конкретной физической задачи, а прошедшие его события направляются в выходной поток данных. Выходные данные сохраняются либо на RAID-массиве (RAID-5), либо на внешних носителях. Прогнозируемый поток информации от установки позволяет ожидать, что объём выходных данных за год (суммарно для всех задач) не превысит нескольких терабайт. Таким образом, не только проблема хранения, но и возможность оперативной передачи данных по сети интернет и их использования и обработки решается вполне удовлетворительно.

4.7.2 Основная Программа системы сбора данных

Основная Программа (ОП) обслуживания установки, запускаемая на Host PC, предназначена для выполнения следующих задач:

- Редактирование статической конфигурации телескопа (числа кластеров, гирлянд, номеров ФЭУ, адресов контроллеров передачи данных и т.д.). Изменение динамических параметров состояния гирлянд, оптических модулей телескопа (установка высоких напряжений, порогов дискриминаторов, запуск светодиодов, установка параметров в контроллеры передачи данных гирлянд).
- Сохранение и запись различных конфигураций установки.
- Выполнение различных типов сеансов (ранов) детектора (стандартных, лазерных, калибровочных, дополнительных отладочных сеансов).
- Выполнение тестов измерительных и управляющих систем телескопа.
- Установка параметров мастерной системы в контроллерах передачи данных гирлянд, сброс и установка счетчиков мирового времени, установка порога мюонного триггера, старт/стоп режима *Мастер*.
- Сохранение полученных данных в формате реального времени с использованием большого набора информационных сообщений. Различные типы получаемых данных (после их преобработки) сохраняются в файлах данных и обозначаются соответствующими метками.
- Автоматическое ведение текстового журнала проведенных сеансов и журнала тестов измерительных систем.

- Предоставление интегрированного набора необходимых низкоуровневых программных утилит, необходимых для работы с отдельными ОМ и контроллерами передачи данных.
- Формирование мониторинговой информации (амплитудные и временные распределения, статистические распределения, спектры формы импульса измерительных каналов), необходимой для on-line контроля поступающей информации.

Программное обеспечение Host PC разработано в ОС Linux на языках C и C++, с использованием графических библиотек Qt и ROOT (и имеющимися в ней средствами разработки и проектирования прикладных интерфейсов пользователя).

Одной из ключевых особенностей разрабатываемого берегового программного обеспечения является возможность полного удаленного управления работой детектора через специализированные сетевые протоколы SSH и VNC, предоставляемая на уровне операционной системы. Данная возможность необходима экспертам по работе с установкой для решения возникающих проблем в штатном режиме работы детектора на протяжении сеансов набора данных и оперативного контроля за качеством поступающей информации. Внедрение системы удаленного контроля и управления детектором существенно увеличивает эффективность работы установки, однако, при этом возникает опасность несанкционированного доступа в локальную вычислительную сеть телескопа. Для защиты от несанкционированного доступа вычислительная сеть разделена на две зоны: зону пользователей, в которой находятся компьютеры для доступа пользователей в Интернет, и зону безопасности, в которой находится оборудование, необходимое для работы телескопа. В зоне безопасности размещаются компьютеры системы сбора данных телескопа (Host PC), систем мониторинга работы установки и подводная локальная компьютерная сеть, связанная с береговой частью системы управления через оптоволоконный кабель. На выходе локальной сети в Интернет для регулирования доступа установлен маршрутизирующий компьютер. Также на маршрутизаторе установлен брандмауэр для запрещения всех неавторизованных входящих соединений. При входе в локальную сеть доступ к компьютерам берегового центра осуществляется только после прохождения соответствующих процедур аутентификации.

Глава 5

Акустическая система позиционирования

5.1 Основные результаты измерений пространственных координат фотодетекторов действующих байкальских нейтринных телескопов НТ200 и НТ200+

В отличие от подземных или наземных детекторов космических лучей положение фотодетекторов глубоководных нейтринных телескопов невозможно определить точно. Даже в условиях развертывания с ледового покрова на оз. Байкал постановка буйковых станций не может быть осуществлена с точностью лучше, чем несколько десятков сантиметров. Более того, положение оптических модулей изменяется в процессе эксплуатации под воздействием подводных течений. Вместе с тем, эффективное восстановление событий, регистрируемых нейтринным телескопом, предполагает достаточно точное знание пространственных координат элементов установки. Масштабом требуемой точности измерения координат является размер фотодетектора, который для разных типов ФЭУ составляет 200–370 мм. С другой стороны, характерная точность измерения времени, определяемая как “электронным” так и “физическим” джиттером, составляет несколько наносекунд, что соответствует расстояниям в несколько десятков сантиметров при распространении света в воде. Таким образом, точность измерения координат оптических модулей телескопа должна быть порядка 20 см.

Измерение координат оптических модулей, калибровочных источников света и других составляющих Байкальского нейтринного телескопа осуществляется с помощью гидроакустической системы измерения координат ГАСИК, которая успешно функционирует на протяжении более пятнадцати лет в составе подводного экспериментального комплекса нейтринного телескопа. ГАСИК представляет собой совокупность глубоководных электронно-акустических устройств, расположенных на гирляндах телескопа, в точках, координаты которых необходимо определить, и на удалении от телескопа в реперных точках, относительно которых проводятся измерения.

В состав системы ГАСИК входят (Рис. 5.1.1):

- береговой блок, состоящий из управляющей ЭВМ, модема и блока питания,
- кабельная линия связи длиной порядка 7 км,
- подводное оборудование, распределенное на буйковых станциях,
- автономные донные маяки приемо-ответчики.

Функционально, подводное оборудование делится на приемо-излучающие приборы (формирователи запуска маяков - ФЗМ и собственно маяки) и приемники ультразвуковых сигналов (измерители наклонной дальности - ИНД). Приборы, размещенные на буйковых станциях, питаются по кабелю с берега и оснащены микропроцессорными модулями измерения, управления и связи с береговым центром. Маяки питаются от гальванических элементов, энергоресурс которых обеспечивает 2–3 года их автономной эксплуатации. Шесть маяков, расположены равномерно по окружности радиусом 600 м с центром в точке постановки гидрологической гирлянды телескопа. Их гидрофоны закреплены на жесткой штанге в 4-х метрах от дна озера. Маяки являются реперными точками, привязанными к географическим координатам. Шесть реперных точек (маяков) выбрано для обеспечения надежности, избыточности измерений и уточнения результатов измерений при последующей их статистической обработке. Точные географические координаты маяков определяются при постановке системы, геодезическими методами. Относительные глубины расположения гидрофонов измерены с погрешностью порядка 1 см.

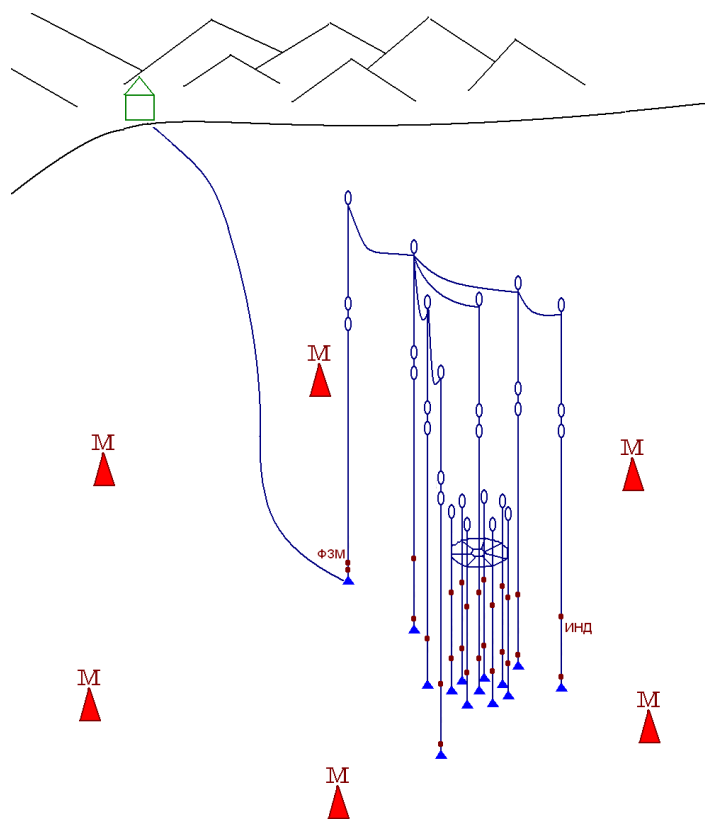


Рис. 5.1.1: Гидроакустическая система измерения координат Байкальского нейтринного телескопа НТ200. ФЗМ - формирователь запуска маяков, М - маяки, ИНД - измерители наклонной дальности.

Два формирователя запуска маяков (ФЗМ) расположены вблизи дна на гидрологической гирлянде. ФЗМ, по команде с берега, запрашивают поочередно все маяки ГАСИК специальными, индивидуальными для каждого маяка сигналами. Ответные сигналы маяков принимаются всеми ФЗМ и ИНД ГАСИК. Точное положение их гидрофонов определяется так, чтобы обеспечить устойчивую акустическую связь со всеми маяками. Отсутствие связи с тем или иным маяком может объясняться условиями интерференции акустических лучей на трассе ФЗМ - ма-

як. Экспериментально установлено, что наилучшая связь с большинством маяков реализуется в случае, если гидрофоны ФЗМ, также как и гидрофоны маяков, расположены на расстоянии 4 м от дна.

Измерители наклонных дальностей (ИНД) расположены рядом с верхними и нижними оптическими модулями (ОМ) на каждой гирлянде НТ200, на внешних гирляндах, рядом с лазером и на нескольких горизонтах на гидрологической гирлянде. Они предназначены для приема акустических сигналов от ФЗМ и маяков и измерения интервалов времени от запроса ФЗМ до прихода ответного акустического сигнала маяка. В системе ГАСИК НТ200 используется время - импульсное кодирование запроса маяков по гидроакустическому каналу связи на частоте 28 кГц, с ответами маяков на частоте 32,768 кГц. В качестве электроакустических преобразователей используются сферические пьезоэлектрические элементы диаметром 50 мм. Частоты запроса и ответа маяков стабилизированы кварцевыми генераторами. Имеется возможность по команде с береговой ЭВМ изменять пороги компараторов приемных трактов ИНД и ФЗМ и времена инициализации их приемных трактов, что позволяет устанавливать приемники в различных точках глубоководного комплекса нейтринного телескопа. Архитектура измерительных систем ГАСИК предусматривает возможность увеличения числа измеряемых точек (ИНД) на буйковых станциях, в случае возникновения такой потребности.

Цикл измерений координат инициируется береговой управляющей ЭВМ, которая по кабельным линиям связи передает синхронизирующий импульс (групповой старт) контроллерам всех ФЗМ и ИНД. Контроллеры приборов выполняют заложенные в них программы. ФЗМ излучает кодовые посылки запроса последовательно для каждого из маяков. Соответствующий данному кодовому сигналу маяк излучает ответный импульс длительностью 1 мс и частотой 32,768 кГц. Контроллеры ИНД и ФЗМ измеряют времена прохождения ультразвуковой посылки от момента запроса до приема ответного сигнала маяка. В счетчиках ФЗМ записывается время распространения звука от ФЗМ до маяка и обратно до ФЗМ (τ_{k0} , где k - номер маяка). ИНД могут работать в режиме измерения времени прохождения звука по пути - от ФЗМ до маяка и от маяка до ИНД (τ_{ki} , где i - номер ИНД), а также возможно измерение времени прохождения звука от ФЗМ до ИНД (τ_{fi}). Расстояние от точки, в которой расположен гидрофон i -ого ИНД до гидрофона k -ого маяка, так называемая наклонная дальность R_{ki} , определяется из выражения:

$$R_{ki} = (\tau_{ki} - \tau_{k0}/2) \cdot C(z).$$

В этом выражении $C(z)$ - среднегармоническая скорость звука.

При восстановлении координат гидрофонов ИНД по результатам измерений системы ГАСИК используется прямоугольная система координат с осью x , направленной с юга на север, и осью y - с запада на восток. Ось z направлена вертикально вверх. Начало координат соответствует глубине 1367 метров (условное дно в точке постановки гидрологической гирлянды телескопа). Местоположение гидрофона i -ого ИНД в пространстве определяется как точка пересечения сфер, центры которых расположены в точках установки маяков, а радиусы равны наклонным дальностям R_{ki} от гидрофона k -ого маяка до гидрофона ИНД. Координаты ИНД x_i , y_i и z_i удовлетворяют системе уравнений:

$$R_{ki}^2 = (x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2, \quad k = 1, 2, 3.$$

Для решения этой системы уравнений используется следующий алгоритм: вычитая из первого и второго уравнений системы третье, получаем линейную систему уравнений для определения x_i , y_i , как линейных функций от z_i . Подставляя $x_i = x(z)$, $y_i = y(z)$ в исходную систему уравнений, получаем квадратное уравнение для определения z_i . При этом $C(z)$ берется при некотором значении z_0 . Далее, заменяя $C(z_0)$ на $C(z)$, повторяем процедуру вычислений. Эта итерационная процедура быстро сходится. При точности расчетов 1 см достаточно трех итераций.

Первые измерения местоположения оптических модулей с помощью системы ГАСИК были выполнены в 1994 году и ведутся по настоящее время. Анализ многолетних измерений выполненных с помощью системы ГАСИК показал, что, как правило, в течение года гирлянды телескопа НТ200 в основном смещаются от первоначального положения на небольшие расстояния: ИНД, расположенные в нижней части гирлянд в 175 метрах от дна, смещаются не более, чем на 40 см, а ИНД, расположенные непосредственно над верхними оптическими модулями на расстоянии 260 м от дна, смещаются не более чем на 60 см (Рис. 5.1.2). Движение телескопа происходит согласованно - начинается и заканчивается практически одновременно, несмотря на то, что соединение гирлянд на верхней несущей раме телескопа имеет определенную свободу. Как правило, отклонения верхней плавучести на несущей телескоп буйковой станции лежит в пределах нескольких десятков метров. При этом гирлянды телескопа повторяют движение верхнего буя, отклоняясь от первоначального положения менее чем на 1 м. Максимальные, достигающие порядка 50 м отклонения верхнего буя телескопа наблюдались в периоды осенних штормов. Максимальное наблюдавшееся отклонение верха телескопа составило 1.3 м, а низа - 1 м. Во всех подобных случаях телескоп отклонялся от вертикального положения не более чем на 1 градус, а смещение телескопа относительно первоначального положения происходило практически как жесткого целого.

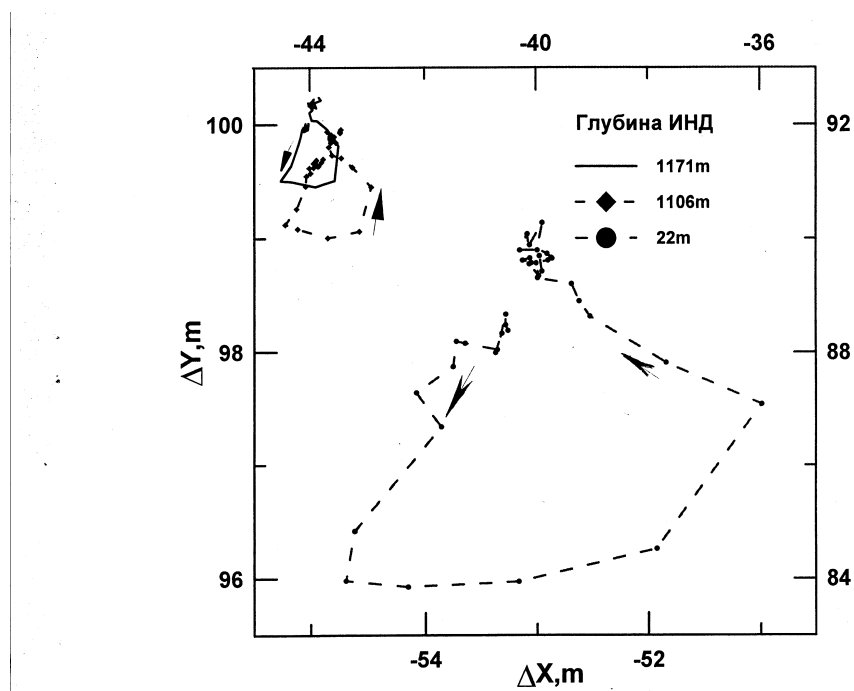


Рис. 5.1.2: Пример смещения Байкальского нейтринного телескопа НТ200 под действием течения. Сплошная линия - смещение ИНД, расположенного на центральной гирлянде НТ200 на глубине 1171 м. Штрих-пунктир - ИНД на глубине 1106 м, пунктир - ИНД на глубине 22 м.

В отличие от установки НТ200, гирлянды оптических модулей нейтринного телескопа НТ1000, подвешиваемые к буйковым станциям, не имеют жестких связей с другими гирляндами и ведут себя аналогично буйковым станциям внешних гирлянд телескопа НТ200+. Как показали результаты проведенных в 2010 году измерений, смещение таких отдельно стоящих буйковых станций значительно сильнее, чем связанных буйковых станций нейтринного телескопа НТ200, в кото-

ром имеется много глубоководных плавучестей. На Рис. 5.1.3 приводятся зарегистрированные системой ГАСИК в течение 2010 года смещения 2-х ИНД 1-ой внешней гирлянды НТ200+, размещенных на расстоянии 4 м и 175 м от дна. На Рис. 5.1.4 приведена зависимость смещения ИНД на внешних гирляндах НТ200+ до и во время шторма 18 августа 2010 года.

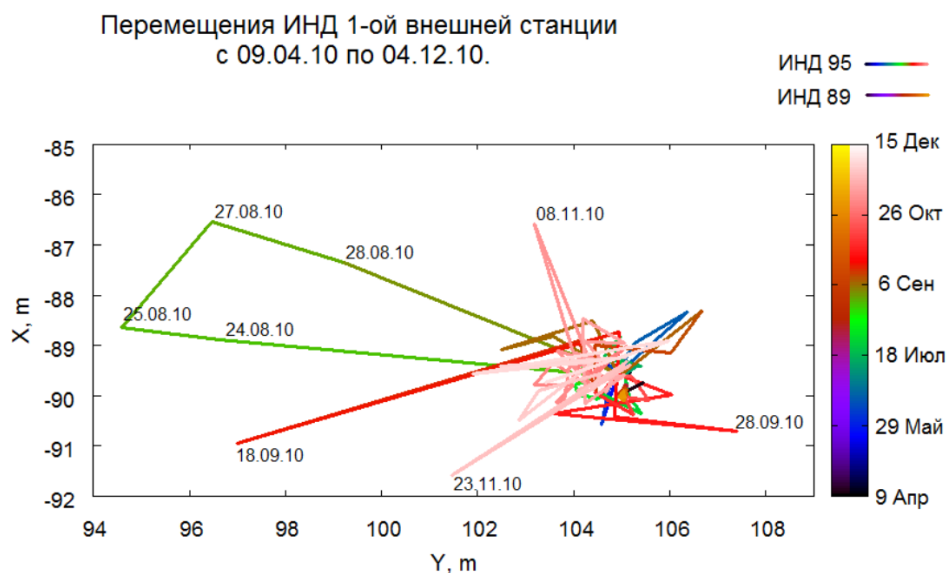


Рис. 5.1.3: Смещения 2-х ИНД 1-ой внешней гирлянды НТ200+, размещенных на расстоянии 4 м и 175 м от дна озера в 2010 году.

Как следует из рисунка 5.1.3, в период открытой воды смещения, как правило, не превышают 1 - 2 метров. Однако, в отдельные дни в смещения ИНД, расположенных всего в 175 м от дна, достигали значений порядка 10 метров. Такие сильные отклонения буйковых станций, как правило, связаны со штормами на поверхности озера. Они могут длиться от нескольких часов до нескольких суток. Максимальная моментальная скорость смещения превысила 14 м/час, а для одного из ИНД в течение ~50 минут наблюдалась скорость смещения более 6 м/час. Важно, что в периоды сильных отклонений значительно меняются и относительные расстояния между ИНД, что может объясняться различием в конфигурации приповерхностных кабельных перемычек, связывающих существующую в данный момент систему буйковых станций нейтринного телескопа. Отсюда следует, что, в принципе, достаточно проводить полные сеансы измерения координат установки с периодом порядка суток, но одновременно ГАСИК должна вести постоянный контроль с периодом 10 - 20 минут смещения ИНД, расположенного на наиболее чувствительной к воздействию течений буйковой станции. И в случае начала его движения проводить полные сеансы измерения координат установки.

5.2 Система позиционирования нейтринного телескопа НТ1000 (ГАСИК - НТ1000)

Архитектура системы позиционирования нейтринного телескопа НТ1000 (ГАСИК-НТ1000) является развитием системы ГАСИК телескопа НТ200+ с учетом роста размера установки и опыта эксплуатации существующей системы. Система содержит береговую и подводную ЭВМ, подводные маяки, размещенные вблизи дна на части буйковых станций НТ1000 и вокруг теле-

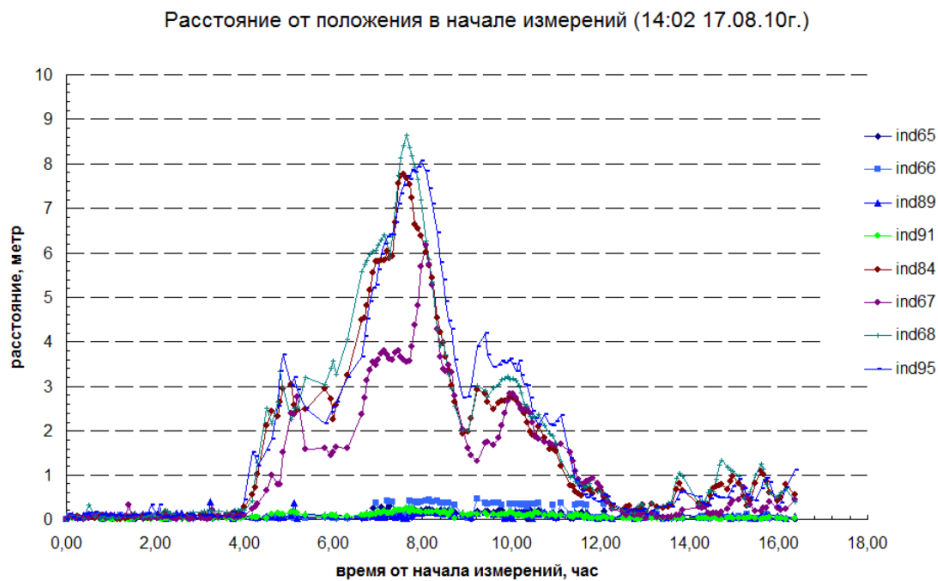


Рис. 5.1.4: Смещения ИНД на внешних гирляндах НТ200+ до и во время шторма 17 августа 2010 года.

скопа, формирователи запуска маяков (ФЗМ) и измерители наклонной дальности (ИНД) (Рис. 5.2.1)

Основным существенным отличием новой системы позиционирования является использование в ней частотно модулированных (ЧМ) сигналов, в отличие от монохроматических сигналов использовавшихся в ГАСИК НТ200. Применение широкополосных ЧМ сигналов позволяет подавить интерференционные эффекты, возникающие в результате многолучевого распространения акустического сигнала в гидроакустическом канале, а также понизить степень неопределенности в оценке времени приема сигнала, и соответственно, неопределенности в оценке расстояния до точки его излучения. Приемо-передатчики (модемы) всестороннего действия для системы позиционирования телескопа НТ1000 удовлетворяют следующим техническим и функциональным требованиям:

- рабочая глубина - до 1500 м,
- диапазон рабочих частот - 20-40 кГц,
- максимальная дальность действия - 2500 м,
- скорость передачи данных - 2400-9600 бит/сек,
- точность измерения координат - не хуже 20 см.

Блок-схема гидроакустического приёмо-передающего устройства показана на рисунке 5.2.2. Процессорный Блок (ПБ) управляет приёмом, распознаванием и посылкой акустического сигнала. С гидрофона (Гф) сигнал поступает на входной усилитель сигнала (входной УС). Блок “входной УС” осуществляет усиление сигнала в рабочей полосе частот с коэффициентом усиления 10000. С входного УС сигнал поступает в ПБ, где осуществляется выделение входного пакета и принимается решение о формировании ответного пакета. Ответный пакет в цифровом виде подаётся на выходной усилитель сигнала (выходной УС), который усиливает и формирует пакет для передачи по акустическому каналу через Гф. Амплитуда сигнала, подаваемого на гидрофон, - 48 В, мощность 20 Вт. Источник питания (ИП) подаёт 5 В на ПБ и 12 В на остальные блоки.

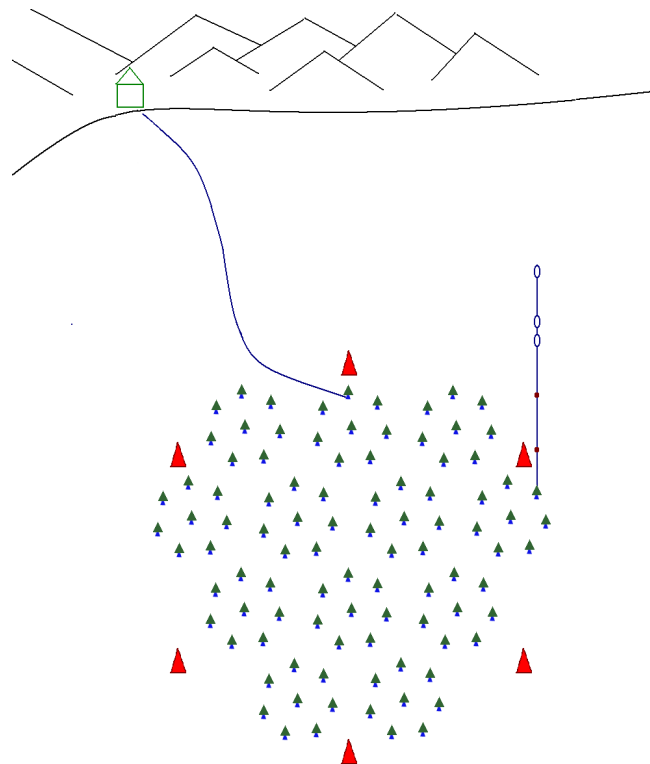


Рис. 5.2.1: Расположение приборов ГАСИК НТ-1000.

Для отладки модема используется лабораторный источник питания Т-60В. Все задачи детектирования и формирования посылок для акустического сигнала решает ПБ, принципиальная схема которого приведена на рисунке 5.2.3. Микроконтроллер PIC18F4320 работает на частоте 20 МГц, задаваемой кварцевым резонатором. Микросхема стабилизатора питания ADM666A обеспечивает электропитание контроллера. Аналоговый входной сигнал поступает на вход компаратора микроконтроллера для получения логических уровней сигнала и на вход АЦП микроконтроллера для измерения уровня сигнала. С выхода компаратора сигнал поступает на вход модуля сравнения/захвата в режиме захвата для измерения времени прихода сигнала. Ответный сигнал формируется модулем сравнения/захвата в режиме Широтно-Импульсной Модуляции (ШИМ). Все параметры модулей захвата, компаратора и АЦП задаются программой микроконтроллера. Частотно-модулированная посылка с выходов ШИМ микроконтроллера поступает на входы двух драйверов ключей IR2104S, управляющих четырьмя транзисторами IRFZ44N. Ток потребления платы ПБ в активном режиме микроконтроллера - 8.5 мА. Принципиальная электрическая схема анализатора и усилителя выходного сигнала показана на рисунке 5.2.4.

В системе ГАСИК-НТ1000 выбрана частотная манипуляция с минимальным сдвигом (Minimal Shift Keying (MSK)) - способ модуляции, при котором не происходит скачков фазы, а изменение частоты происходит в моменты пересечения несущей нулевого уровня. В MSK значение частот, соответствующих логическим "0" и "1", отличаются на величину равную половине скорости передачи данных. Другими словами, индекс модуляции равен 0.5:

$$m = \Delta f \cdot T, \quad \Delta f = |f_1 - f_0|,$$

где T - длительность бита. Например, при скорости передачи 9600 бит/с MSK сигнал будет

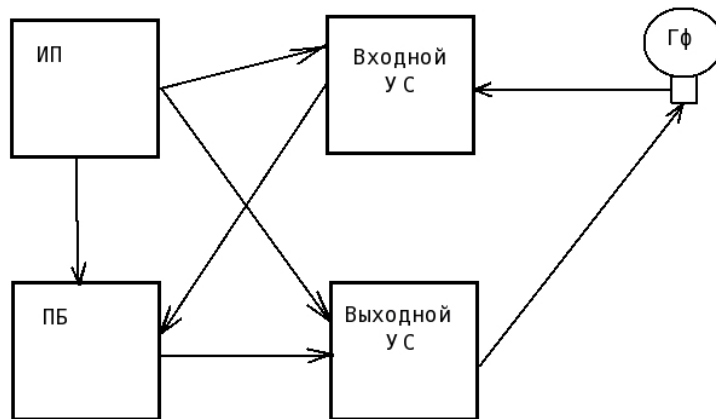


Рис. 5.2.2: Блок-схема гидроакустического приёмо-передающего устройства с частотной модуляцией.

сформирован из колебаний с частотами 27600 Гц и 32400 Гц соответствующих логическим “1” и “0”. Данные частоты попадают в полосу рабочих частот используемых гидрофонов и взяты в качестве рабочих в данном устройстве. За основу протокола взят протокол высокоуровневого управления каналом передачи данных HDLC. HDLC является опубликованным ISO стандартом и базовым для построения других протоколов канального уровня. На рисунке 5.2.5 показан формат пакета данных. Возможные режимы работы гидроакустического прибора в системе показаны на рисунке 5.2.6. Гидроакустический приёмо-передатчик может функционировать как “ведущий” (инициатор акустической связи) и как “ведомый” (исполнитель команд “ведущего”). На рисунке показано взаимодействие ведущий-ведомый в системе измерения координат. Все приборы в системе будут иметь уникальные адреса.

В 2010 году в натуральных условиях на озере Байкал проведены успешные испытания изготовленного на современной элементной базе универсального гидроакустического приёмо-передатчика, который полностью поддерживает протокол работы ГАСИК НТ-200+. В нём также заложена возможность работы протокола с частотно-модулированными сигналами для модификации системы. Данный приёмо-передатчик может функционировать и как маяк, при наличии проводной связи как ФЗМ или ИНД. В настоящее время на оз. Байкал установлены три маяка такой конструкции в составе экспериментального комплекса нейтринного телескопа. Дальнейшие натурные испытания гидроакустических приёмо-передатчиков будут проведены в 2011 году в составе прототипа кластера нейтринного телескопа НТ1000.

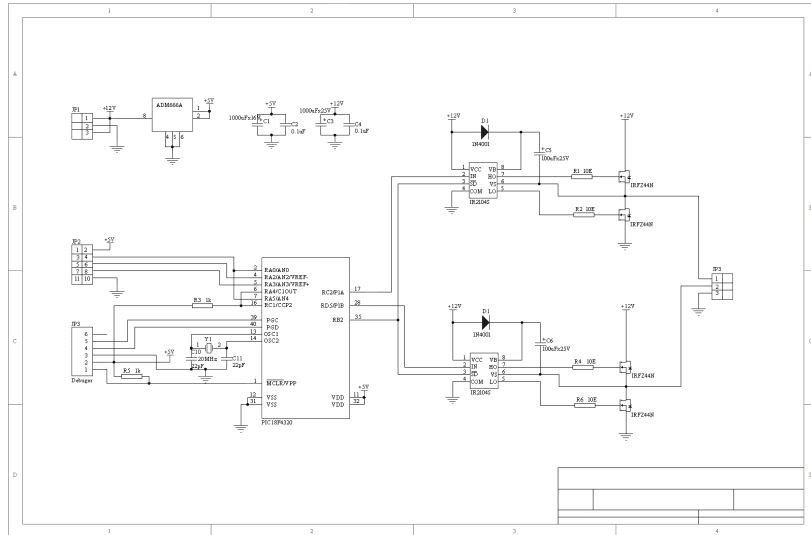


Рис. 5.2.3: Принципиальная схема платы процессорного блока устройства.

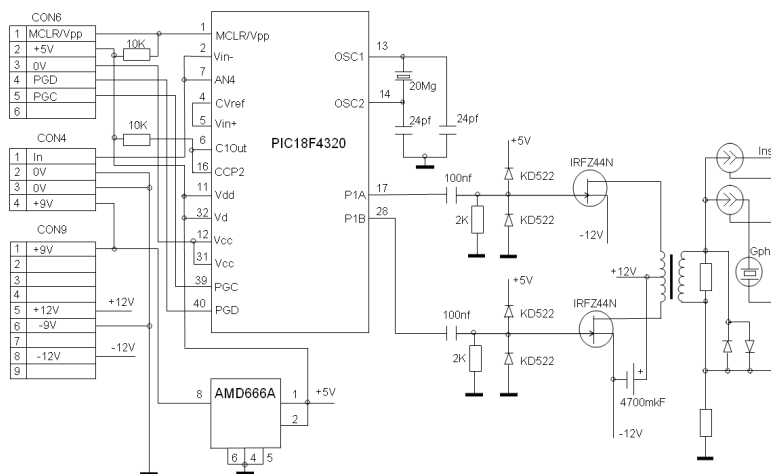


Рис. 5.2.4: Принципиальная электрическая схема анализатора и усилителя выходного сигнала.

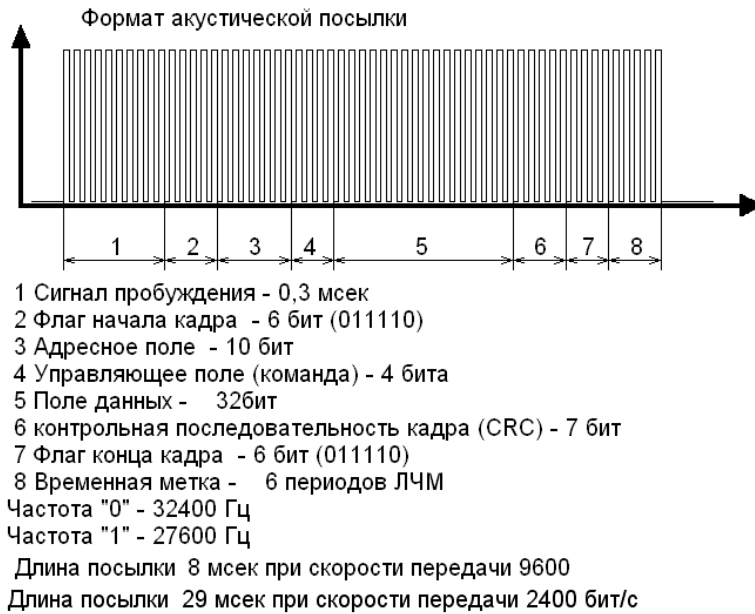


Рис. 5.2.5: Формат пакета данных.

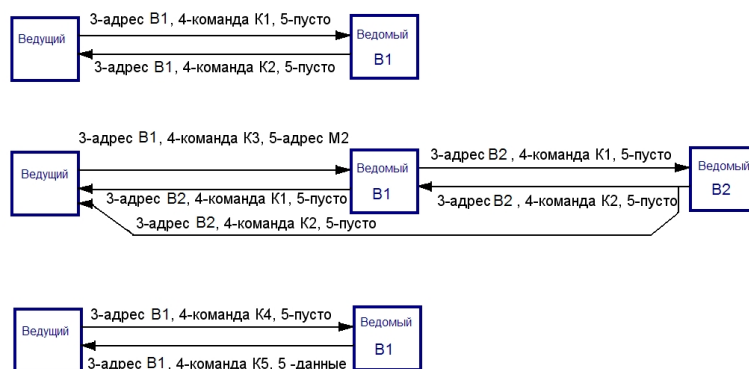


Рис. 5.2.6: Режимы работы системы.

Глава 6

Мониторинг оптических свойств среды

6.1 Измерение первичных гидрооптических характеристик

Для эффективного восстановления информации, получаемой с помощью глубоководного черенковского детектора необходимо знать оптические свойства водной среды в месте расположения установки. Для описания процесса распространения света в поглощающей и рассеивающей среде от произвольного источника необходимо определить первичные гидрооптические характеристики (ПГХ) среды: показатели поглощения $a(\lambda)$ и рассеяния $b(\lambda)$, зависящие от длины волны λ , и индикатрису рассеяния света $\chi(\theta, \lambda)$ - функцию, описывающую вероятность рассеяния на данный угол света с данной длиной волны. Часто удобней оперировать длиной поглощения $L_a = 1/a$ и рассеяния $L_b = 1/b$. В коротковолновой области спектра (<500 нм) поглощение в естественных водах происходит, в основном, на растворенном органическом веществе (РОВ), а в длинноволновой области поглощает собственно вода. Рассеивающие свойства водной среды определяются, в основном, взвесями. Количественный и качественный состав растворенных веществ и взвешенных частиц может меняться со временем, поэтому измерение оптических свойств байкальской воды как рабочего тела черенковских детекторов на оз. Байкал было начато уже в 1982 году. К сожалению, несмотря на многолетнюю историю гидрооптических исследований, в мире до сих пор не существует коммерчески доступных приборов, которые позволяли бы вести долговременные измерения оптических свойств глубинных вод. С самого начала реализации Байкальского нейтринного эксперимента была поставлена задача выработки методик измерения абсолютных величин ПГХ, зная которые, можно рассчитать любые другие гидрооптические параметры, такие как: эффективная длина рассеяния, длина ослабления, средний косинус угла рассеяния и др. Более того, методика должна позволять вести долговременные измерения прибором, установленным на стационарной буйковой станции, в пределах эффективного объема глубоководного черенковского детектора.

За основу была принята методика, предложенная В.Н. Пелевиным [25] для измерения длины поглощения света в воде. Она позволяла измерять непосредственно длину поглощения в поглощающей и слабо рассеивающей среде. Методика основана на измерении характеристик светового поля квазиточечного изотропного источника света приемником с широкой апертурой. Отсутствие необходимости какой-либо юстировки в данном подходе, позволяет менять базу прибора и тем самым калибровать его по абсолютной величине *in situ*, исключая зависимость результатов измерений от обрастания оптических поверхностей при длительном мониторинге ПГХ.

В развитие методики измерений поглощения нами были разработаны методы измерения

длины и индикатрисы рассеяния с помощью узконаправленного приемника и перемещающегося изотропного источника света. Эти методы также не требуют предварительной юстировки и калибровки. С течением времени разрабатывались новые методики измерения во всем диапазоне длин рассеяния. Кроме того, появилась возможность оценить величину и спектральную зависимость обратного рассеяния. Величина обратного рассеяния важна для расчета отклика оптического модуля телескопа, отвернутого от источника света.

На основе этих методик в 1993 году был создан гидрооптический прибор ASP-15 [26] (см. Рис. 6.1.1) предназначенный для стационарной постановки и долговременного мониторинга оптических параметров глубинных вод оз. Байкал. С помощью данного прибора проведены многочисленные измерения первичных гидрооптических характеристик байкальской воды, результаты которых используются при обработке данных, получаемых с помощью НТ200 и НТ200+. ASP-15 имеет два приемника: с широкой апертурой для измерения длины рассеяния и поглощения и с узкой апертурой для измерения индикатрисы рассеяния. Для выделения света с определенной длиной волны световой поток проходит через интерференционные светофильтры, которые меняются с помощью ленточного транспортера. Белый источник света с широкой диаграммой направленности, излучающий в неограниченный водный объем, перемещается с помощью шагового двигателя в пределах 1 - 15 метров от корпуса с приемниками.

Результаты многолетних исследований оптических свойств среды в районе постановки НТ200, подтверждают правильность тезиса о необходимости их постоянного контроля в пределах эффективного объема черенковских детекторов на озере Байкал. Хотя значения ПГХ водной среды на больших глубинах оз. Байкал относительно стабильны (вариации коэффициента поглощения не превышают 10%, а коэффициента рассеяния - 30%), наблюдаются периоды существенных и длительных их отклонений от типичных значений.

6.2 Поглощение света в байкальской воде

Типичные распределения показателя поглощения света байкальской воды на глубине 1000 м в зависимости от длины волны λ , лежат, как правило, в области, отмеченной на рисунке 6.2.1 синим цветом. Как видно из этого рисунка, отклонения наблюдаемых спектров от среднего не превышают 10%. Как правило, показатель поглощения слабо (на 20–30%) меняется с глубиной, но иногда общий градиент длины поглощения может достигать 2. Такая относительно слабая изменчивость показателя поглощения связана со стабильностью средней концентрации РОВ, которая является результатом динамического равновесия процессов заноса органики, ее усвоения микроорганизмами, их распадом и седиментацией. Для существенных вариаций оптических параметров водной среды требуются значимые изменения в экосистеме озера Байкал. Средняя длина поглощения в минимуме спектра (488 нм) равна 22.7 м. На рисунке 6.2.1, для сравнения, приведены также спектры аномально малого показателя поглощения, наблюдавшиеся в 1992 г. и 2001 г. Аналогичное уменьшение поглощения наблюдалось в некоторые другие годы (рисунок 6.2.2). На этом рисунке отчетливо видны периоды аномально низких значений показателя поглощения, а значит и концентрации растворенного органического вещества.

6.3 Рассеяние света в байкальской воде

Характеристики рассеяния света в байкальской воде отличаются значительной изменчивостью от места, глубины и времени, что связано с большой неоднородностью и нестационарностью распределения фито- и зоопланктона. Характерный пример глубинной зависимости коэффициента рассеяния света в Байкале представлен на рисунке 6.3.1. После резкого уменьшения сечения рассеяния на первых 100 метрах далее наблюдается относительно слабое уменьшение рассеяния

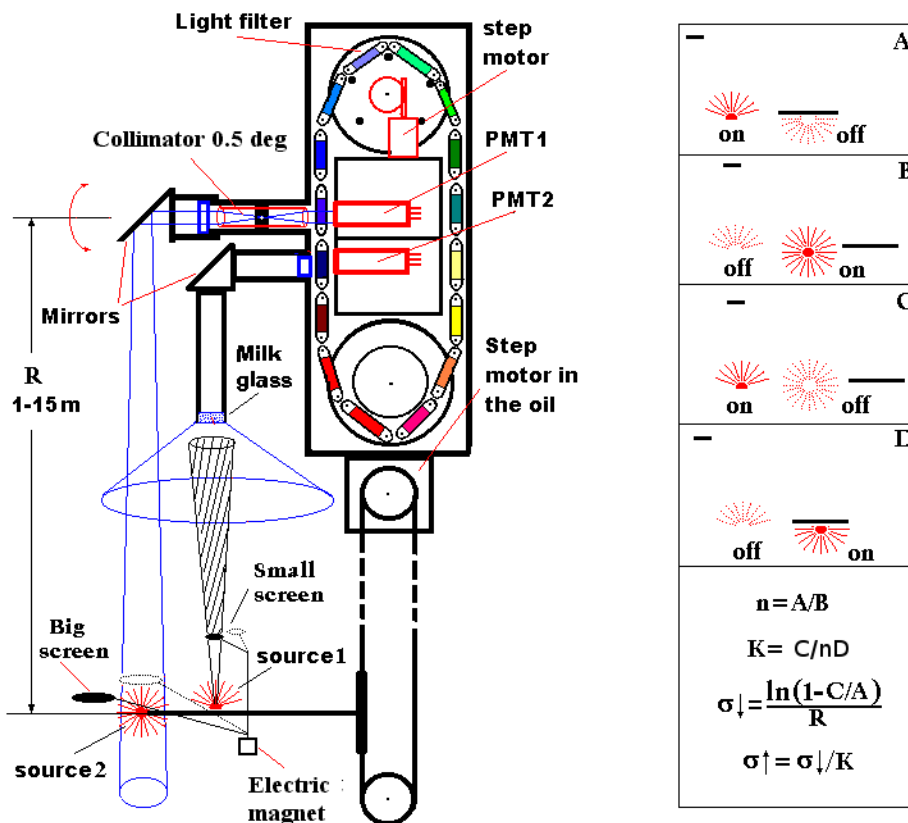


Рис. 6.1.1: Схематичное изображение прибора ASP-15 и схема измерения показателей прямого и обратного рассеяния.

с глубиной. Максимум градиента длины рассеяния наблюдается на глубинах меньших 50 м и меняется, в зависимости от года, от 2 до 5. Градиент длины рассеяния в глубинной зоне (500–1200 м) равен приерно 2. В придонной области наблюдается 20% возрастание рассеяния.

Большие кратковременные (Рис. 6.3.2) и длительные вариации рассеяния наблюдаются не только на малых, но и на больших глубинах, где расположены оптические модули НТ200. При этом коэффициент поглощения меняется незначительно (Рис. 6.3.3). Значительный рост рассеяния на больших глубинах явление относительно редкое и связано, по-видимому, с осажде-нием взвеси в так называемые *мелозирные годы*, когда численность эндемичной диатомовой водоросли *Aulacoseira Baikalensis* возрастает в десятки и сотни раз по сравнению с типичны-ми ее значениями. Такие вспышки размножения под ледовым покровом водорослей *Aulacoseira Baikalensis* наблюдаются в Байкале с периодичностью 3-5лет. Более 80% календарного време-ни длина рассеяния света на больших глубинах, где предполагается размещение оптических модулей нейтринного телескопа НТ1000, превышает 30 м и довольно часто превышает 50 м. От-носительное постоянство показателя поглощения в периоды резкого роста рассеяния говорит о том, что взвесь, вызывающая рассеяние, слабо поглощает, кроме того, это крупная взвесь (>1 мк), дающая основной вклад в рассеяние на малые углы (меньше 5 градусов), и увеличение рассеяния не приводит к существенному ухудшению условий работы черенковских детекторов в

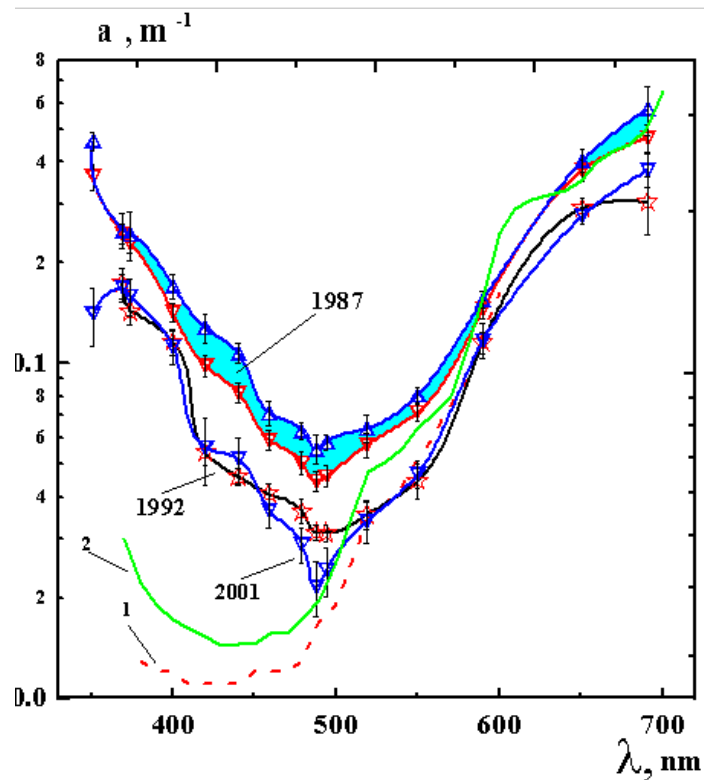


Рис. 6.2.1: Спектры поглощения в байкальской воде в окрестности НТ200 измеренные в разные годы. Спектры 1 и 2 получены при измерениях показателя поглощения в чистых морских водах [27], [28].

байкальской воде.

6.4 Индикатриса рассеяния

Индикатрисы рассеяния света в природных водах формируются из индикатрис рассеяния на разнообразных по форме и размеру взвесьях. Как правило, преобладает рассеяние на малые углы и наблюдается множество размытых интерференционных экстремумов. На рисунке 6.4.1 в качестве примера приведены результаты измерения индикатрисы рассеяния света на глубине 1000 м.

Для практического использования при расчетах распространения черенковского излучения в воде достаточно знать несколько интегральных параметров индикатрисы рассеяния, таких как средний косинус угла рассеяния и коэффициент асимметрии $K = b/b_{back}$. Измерение среднего косинуса рассеяния затруднено сильным влиянием на эту величину малоугловой ($< 2^\circ$) части индикатрисы. Типичное значение среднего косинуса угла рассеяния для глубинной байкальской воды составляет 0.9 и растет с ростом величины показателя рассеяния, то есть с ростом вклада от рассеяния на взвеси по сравнению с постоянной величиной изотропного релеевского рассеяния. Вариации коэффициента асимметрии для байкальской воды значительные. Минимальные значения $K \sim 5$ наблюдались в глубинной зоне. На поверхности среднее значение коэффициента $K \sim 60$, но наблюдались значения $K \sim 500$.

6.5 Прибор нового поколения ВАКАЛ-4D

В настоящее время завершается отладка и доводка экспериментального образца гидроопти-

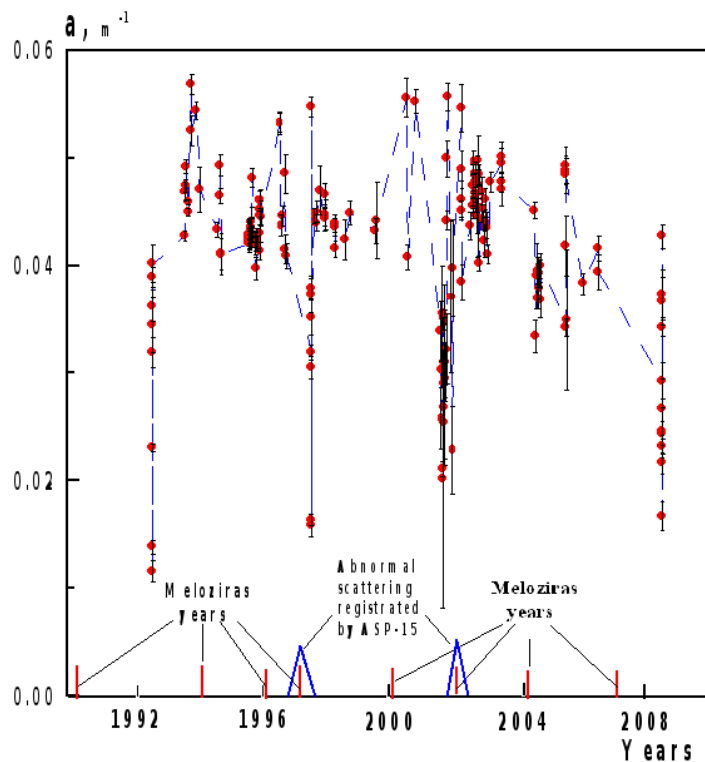


Рис. 6.2.2: Показатель поглощения света с длиной волны 488 нм в байкальской воде на глубине 1000 м в районе места расположения НТ200.

ческого прибора нового поколения Baikal-4D (Рис. 6.5.1), предназначенного для долговременного мониторинга непрерывных спектров показателя поглощения и рассеяния водной среды в пределах эффективного объема Байкальских нейтринных телескопов. Этот прибор имеет ряд принципиальных достоинств по сравнению с ASP15, а именно: используется источник света на основе дифракционной решетки, что позволяет более чем на два порядка снизить засветку оптических модулей НТ1000; с помощью системы манипуляции световым пучком упрощены механизмы, работающие непосредственно в воде; существенно улучшена электроника приемного тракта, системы связи и управления прибором. В тоже время в приборе используются отработанные ранее с помощью ASP15 методы измерения спектров поглощения и рассеяния с помощью изотропного источника, а также метод абсолютной калибровки прибора путем изменения базы.

В целях повышения быстродействия и минимизации механических перемещений вместо одного перемещаемого источника света в приборе BAIKAL-4D используется пять световодов, в которые поочередно направляется свет от монохроматора 6. Другие концы световодов снабжены изотропизирующими излучателями и находятся в воде на разных расстояниях от приемника. На рисунке 6.5.1 световоды обозначены номерами 1-5. Источником света является интенсивный “белый” светодиод, расположенный в монохроматоре, диспергирующим элементом которого служит вогнутая дифракционная решетка. Использование единого источника позволяет уменьшить влияние нестабильности тракта излучатель - приемник путем сокращения времени измерения. Для измерения относительной яркости излучателей, рамка, на которой закреплен излучатель 2 имеет возможность перемещаться от минимального расстояния (Рис. 6.5.1, слева), до максимального (Рис. 6.5.1, центр).

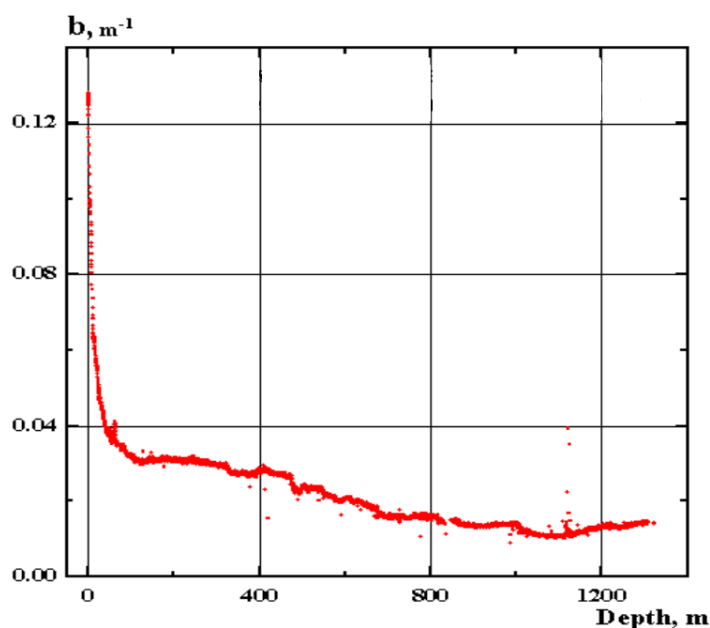


Рис. 6.3.1: Пример глубинной зависимости показателя рассеяния света в окрестности расположения НТ200.

Во избежание сложной операции настройки положения затеняющего экрана, применяемого при измерении рассеяния, используется тонкая леска, натянутая вдоль оси источник - приемник. Таким образом, экран всегда затеняет излучатель 4, даже при условии деформации нежесткой конструкции прибора, что позволяет использовать его в зондирующем режиме. При измерении относительной яркости затеняемого излучателя необходимо сместить экран в горизонтальном направлении, что осуществляется с помощью перемещаемой рамки, на которой закреплен излучатель 2 (см. Рис. 6.5.1, центр). После того, как измерены относительные яркости на всех длинах волн, излучатель 2 устанавливается на среднем расстоянии (Рис. 6.5.1, справа) и излучатели по очереди испускают свет, длина волны которого изменяется с шагом 1 нм от 430 нм до 650 нм.

После проведения этапов измерений 1, 2 и 3 строится зависимость $\ln(NR^2)$ от расстояния R , которая должна описываться прямой линией, с тангенсом угла наклона, равным показателю поглощения. Отличие от прямой говорит об изменении относительной яркости излучателей, например, в случае их различного обрастания. Новая калибровка прибора должна восстановить линейную зависимость.

Оптимальное расстояние экрана относительно источника 4 должно определяться экспериментально из условия малости количества света, претерпевшего дифракцию на краях экрана по сравнению с количеством рассеянного света. Причем это условие должно проверяться в среде с минимальным рассеянием (т.е. в глубинной зоне) для света, минимально подверженного рассеянию (т.е. ~ 600 нм).

Относительная яркость излучателя 5 измеряется один раз при калибровке, в которой излучатель 5 помещается рядом с излучателем 1 и направляется на приемник. В процессе измерений в стационарном режиме источник 5 устанавливается в штатное положение и не калибруется. Спектр обратного рассеяния вычисляется согласно описанной в [29] методики, при этом яркость излучателя 5 пересчитывается на максимальное расстояние.

Аппаратно-программное обеспечение измерительного комплекса Baikal-4D включает в себя:

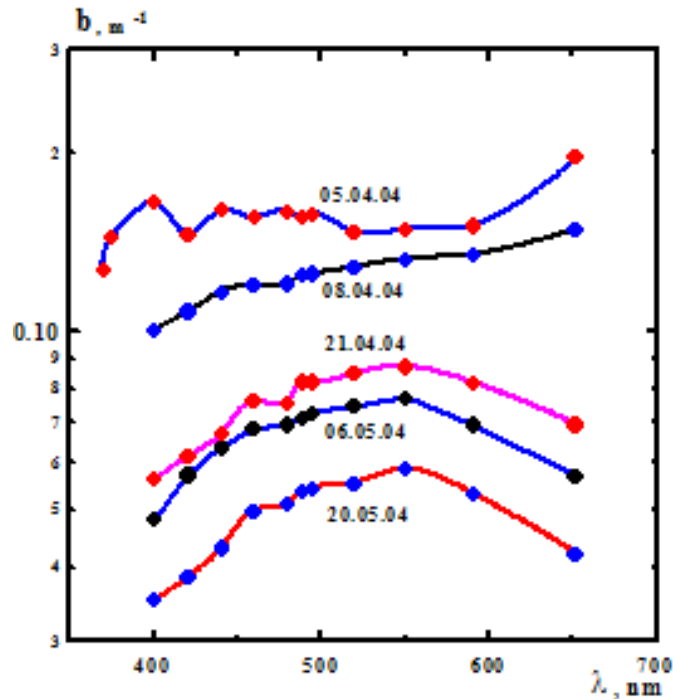


Рис. 6.3.2: Пример кратковременной изменчивости показателя рассеяния света на глубине 1000 м в окрестности расположения НТ200 в апреле - мае 2004 года.

1. Быстродействующий усилитель-компаратор для ФЭУ-130, обеспечивающий нелинейность скорости счета фотонов не более 1% при средней частоте выходных импульсов 1МГц. Верхняя граница динамического диапазона регистрирующей системы составляет не менее 10^7 импульсов в секунду.
2. Микропроцессорный блок управления измерительным комплексом на базе сигнального процессора DSPic30F6014, программное обеспечение которого осуществляет выполнение следующих функций:
 - измерение средней скорости счета фотонов;
 - управление яркостью источника света;
 - управление шаговыми двигателями приводов оптической системы;
 - первичная обработка данных измерений;
 - управление приводом перемещения калибровочного источника;
 - программное управление каналом передачи данных.
3. Аппаратное обеспечение для реализации канала связи измерительного комплекса Baikal-4D с компьютерным модулем гидрологической гирлянды. Разработано аппаратное обеспечение для двух вариантов реализации канала связи:
 - Интерфейс RS-485 в полудуплексном режиме передачи, позволяющий реализовать канал связи с длиной 1.5 км и скоростью передачи данных не менее 19200 бод. Недо-

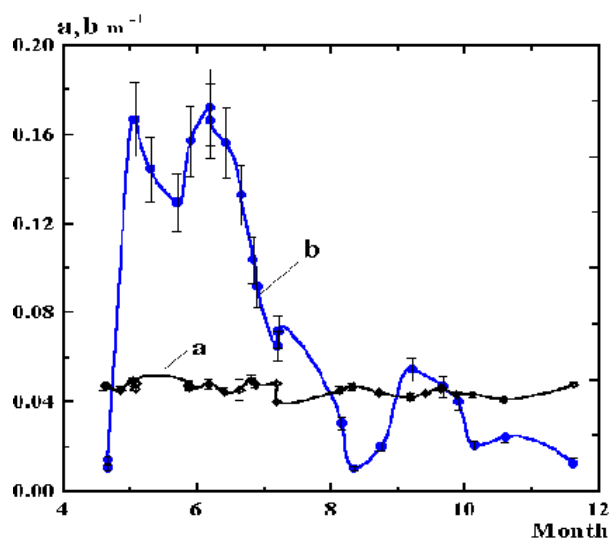


Рис. 6.3.3: Зависимость показателя поглощения a и рассеяния b света на глубине 1000 м в окрестности расположения НТ200 в 2002 году.

статком применения указанного интерфейса является необходимость задействовать два дополнительных провода для организации канала связи.

- Передача данных в формате USART по линии питания измерительного комплекса (-300В) с использованием модема. Для аппаратной реализации модема выбрана микросхема модема ST7540 с частотной модуляцией передаваемых данных. Скорость передачи данных может программироваться в пределах 600–4800 бод. Расчетная дальность передачи данных по кабелю КГ-3 составляет до 20 км.
4. Программа-драйвер для ПК, осуществляющая управление измерительным комплексом Байкал-4D. Программа разработана в среде программирования Delphi 7.0. Основные функции программы:
- организация протокола обмена информацией между прибором и ПК;
 - организация пользовательского интерфейса;
 - автоматизация эксперимента;
 - отображение результатов измерения и их сохранение.

Натурные испытания макета прибора БАЙКАЛ-4D в экспедиции 2010 года показали соответствие, в целом, разработанной концепции прибора требованиям ТЗ. В то же время, выявлен ряд проблем, для решения которых выполнены следующие пункты модернизации аппаратно-программного обеспечения измерительного комплекса БАЙКАЛ-4D:

1. Разработано аппаратное обеспечение канала связи по проводу питания измерительного комплекса с возможностью дистанционного изменения частотного канала в пределах 60–132 кГц. Указанное усовершенствование существующего схемотехнического решения позволит выбирать оптимальные по помехоустойчивости параметры ЧМ модулированного сигнала для связи береговой и подводной частей измерительного комплекса, а в перспективе

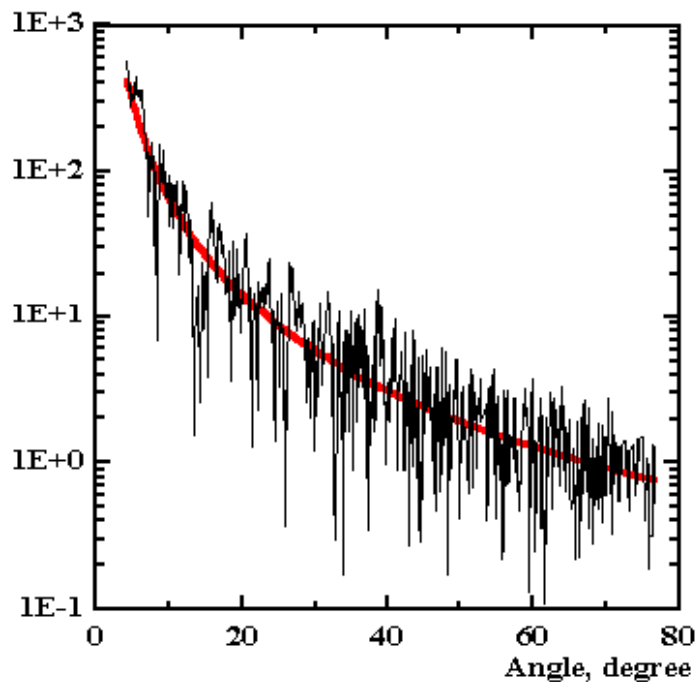


Рис. 6.4.1: Индикатриса рассеяния света на глубине 1000 м.

и реализовать возможность частотного разделения каналов связи при одновременной эксплуатации двух идентичных приборов на одном проводе электропитания. С этой целью в схему модема с ЧМ введен дополнительный промежуточный контроллер DD1 (Рис. 6.5.2), реализованный на микросхеме PIC24FJ64GA002-I/SO. Основной его функцией является запись 24-х битного контрольного регистра в микросхему ЧМ - модема DD2 (микросхема ST7540). Указанный контроллер и его программное обеспечение ориентированы на канал связи с реализацией протокола PPP, в котором существует ряд запрещенных байтов, передаваемых при использовании операции байтстаффинга. В режиме передачи данных между управляющим компьютером и подводной частью измерительного комплекса контроллер DD1 работает как промежуточный буфер. При необходимости перепрограммировать контрольный регистр микросхемы ST7540 со стороны ПК посылается кадр, конец и начало которого обозначаются как 011h (запрещенный символ), что служит сигналом для контроллера о переходе в режим программирования контрольного регистра. Новое значение контрольного регистра содержится в информационном поле указанного кадра.

2. Усовершенствовано аппаратное и программное обеспечение микропроцессорного блока управления подводной частью измерительного комплекса на базе сигнального процессора dsPIC30f6014 (Рис. 6.5.3), что обусловлено необходимостью добавить в систему управления дополнительные функции. Для реализации в измерительном комплексе функции измерения индикатрисы рассеяния необходим дополнительный канал регистрации. С этой целью в усовершенствованном микропроцессорном блоке управления выполнено два независимых параллельных канала счета импульсов ФЭУ. Разработано программное обеспечение функционирования указанной системы регистрации.

В программном обеспечении микропроцессорного блока управления реализован интерфейс

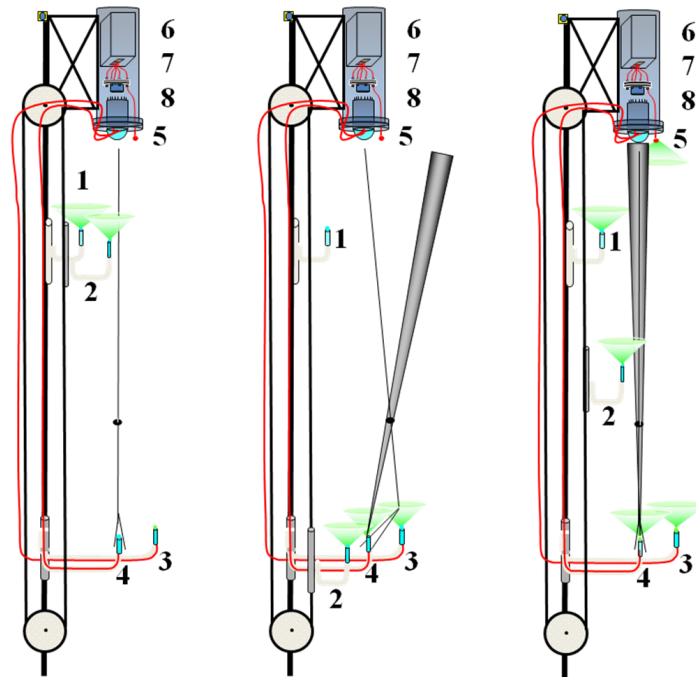


Рис. 6.5.1: Стадии работы прибора ВАИКАЛ-4D: 1) Калибровка относительной яркости источников 1 и 2. 2) Калибровка относительной яркости источников 2, 4 и 3. 3) Режим измерения спектров поглощения и рассеяния.

UART и PPP протокол для связи с береговой частью измерительного комплекса. Решено отказаться от реализации интерфейса RS-485 для построения физического канала связи, т.к. при этом требуется дополнительные два провода кабель троса.

Решено отказаться от размещения усилителей мощности шаговых двигателей оптической системы на одной плате с процессором, что позволяет повысить её надежность и универсальность. Логические сигналы управления шаговыми двигателями выведены на разъем, посредством которого происходит соединение с платой усилителей мощности.

Для микропроцессорного блока разработана, выполнена и отлажена новая печатная плата с учетом новых габаритов отсека электроники в корпусе подводной части.

3. Разработан быстродействующий усилитель-компаратор для ФЭУ-130 (Рис. 6.5.4), конструктивно выполненный в одном экранированном корпусе с высоковольтным делителем для ФЭУ. Определены характеристики усилителя компаратора.

Дальнейшие испытания прибора ВАИКАЛ-4D будут выполнены в период зимней экспедиции 2011 года на оз. Байкал.

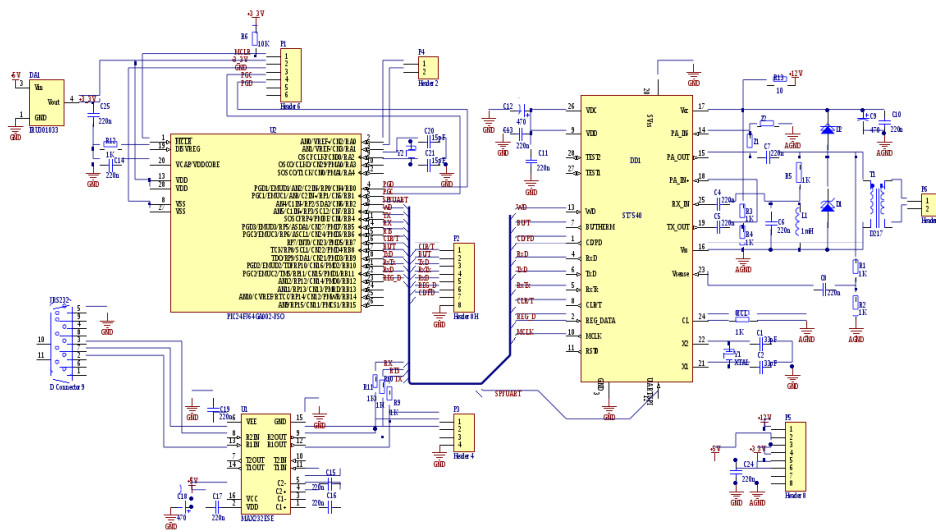


Рис. 6.5.2: Схема модема с частотной модуляцией на микросхеме ST7540.

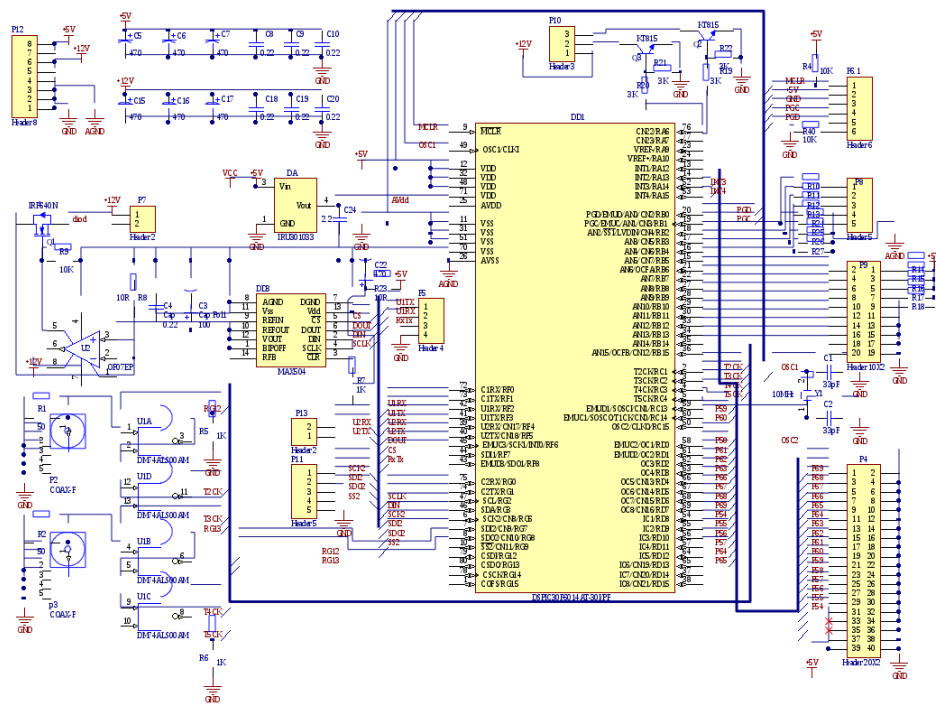


Рис. 6.5.3: Модифицированная принципиальная схема управления прибором ВАИКАЛ-4D.

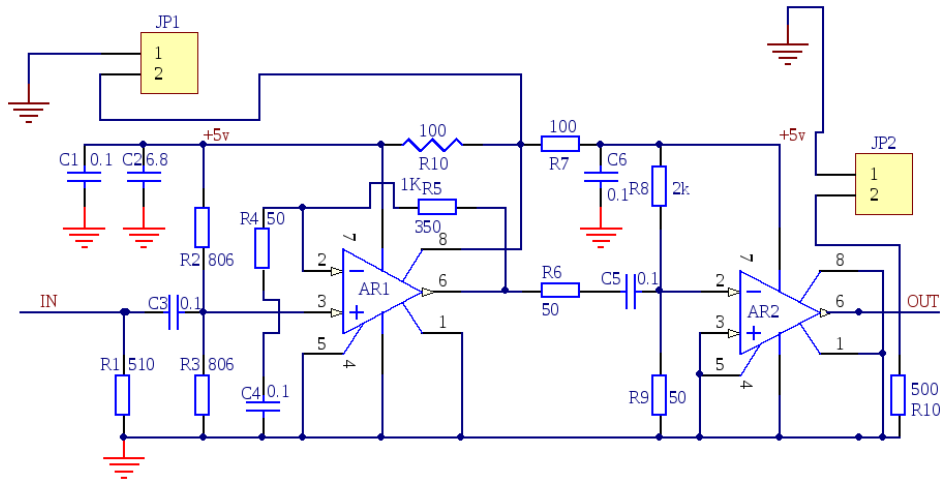


Рис. 6.5.4: Быстродействующий усилитель-компаратор для ФЭУ-130.

Глава 7

Развертывание

7.1 Несущие системы и кабельные глубоководные линии НТ1000

Основой несущих систем глубоководных нейтринных телескопов на оз. Байкал [30] являются притопленные буйковые станции (ПБС). Под поверхностью озера станции ПБС соединяются подповерхностными кабельными линиями (перемычками - КЛП). Свойства, конструкции, а также порядок работ по развертыванию ПБС и донных кабельных линий (КЛД) на оз. Байкал подробно описаны в [31]. Там же приводятся характеристики среды (течения, волнения), ее влияние на конструкции, ледовые условия и другие исходные данные, необходимые для проектных работ, и обоснована структура и геометрия ПБС. Ниже описываются лишь конструкции, отличающиеся от описанных в [30, 31] систем НТ200 и НТ200+.

Карта расположения несущих систем и кабельных линий НТ1000 и схема подсоединения кабельных линий приводятся на Рис. 7.1.1 и 7.1.2.

7.1.1 Основные типы притопленных буйковых станций (ПБС)

Как было отмечено выше, основной монтажной единицей несущих конструкций телескопа НТ1000 являются ПБС. Их схемы изображены на рисунке 7.1.3. Используются следующие обозначения: z - горизонт (м); h - высота над дном (м); P - вес элемента в воде (кН); T - натяжение буйрепа ниже элемента (кН); Q - вес станции ниже элемента (кН).

В отличие от схем ПБС экспериментального комплекса НТ-200+, применение в качестве буйрепов специальных кабелей с армированной оболочкой дало возможность отказаться от накладных кабелей. Кроме того, такие кабели значительно легче по сравнению с кабелями с двухповивной проволочной броней. В связи с этим требуемая общая плавучесть буев снизилась на 30-40% и появилась возможность отказаться от промежуточных плавучестей.

В экспериментальном комплексе НТ1000 используются следующие типы притопленных буйковых станций:

- ПБСТ - ПБС собственно телескопа, предназначена для размещения регистрирующей и вспомогательной аппаратуры телескопа (см. Рис. 7.1.4);
- ПБСК - кабельная ПБС, служит для вывода под поверхность озера морского конца линии донной кабельной линии;
- ПБСУ - ПБС центра управления, на ней размещается центр управления кластера;
- ПБСН - ПБС промежуточная, конструктивно аналогична ПБСУ, но служит в качестве механической опоры подповерхностной кабельной линии;

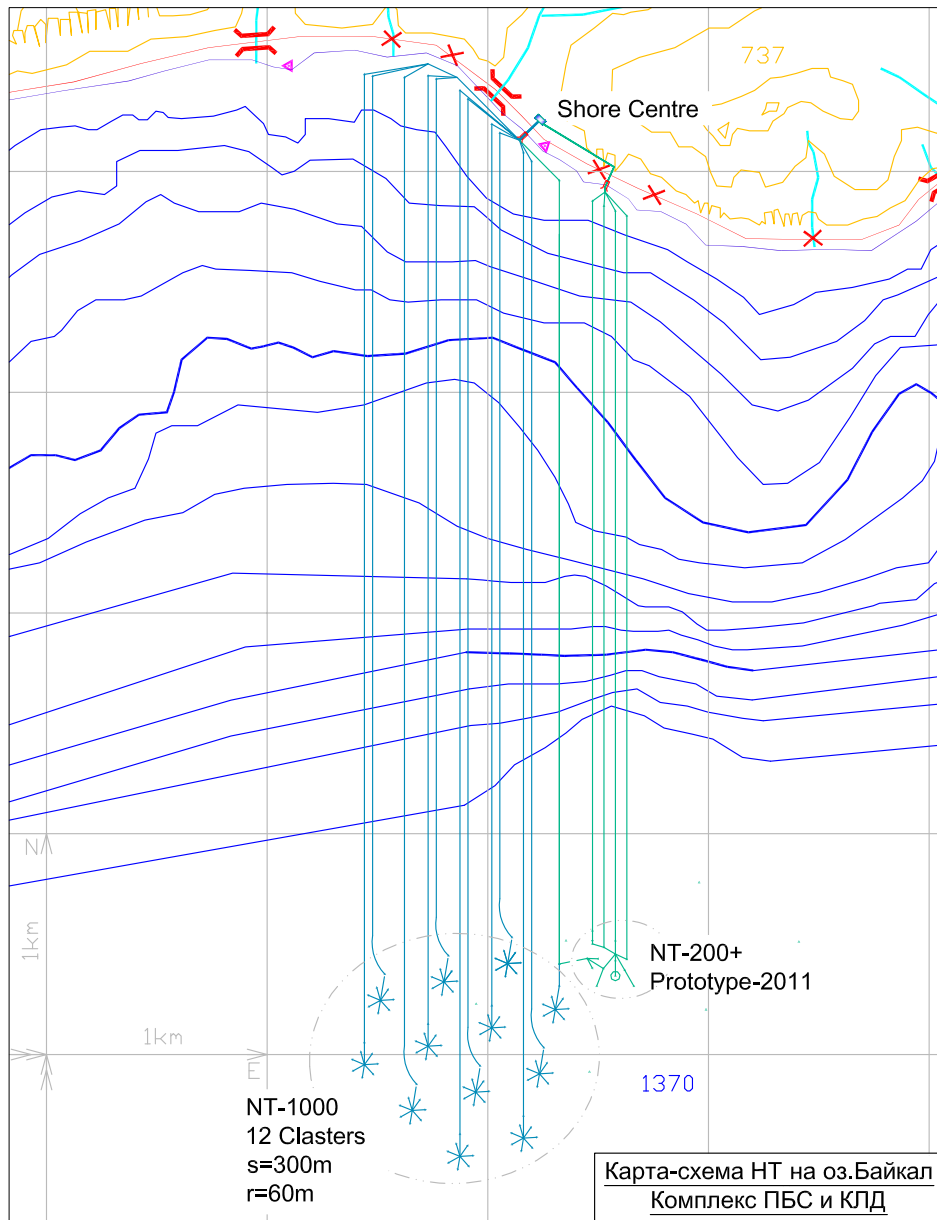


Рис. 7.1.1: Карта-схема расположения притопленных буйковых станций и кабельных линий НТ1000.

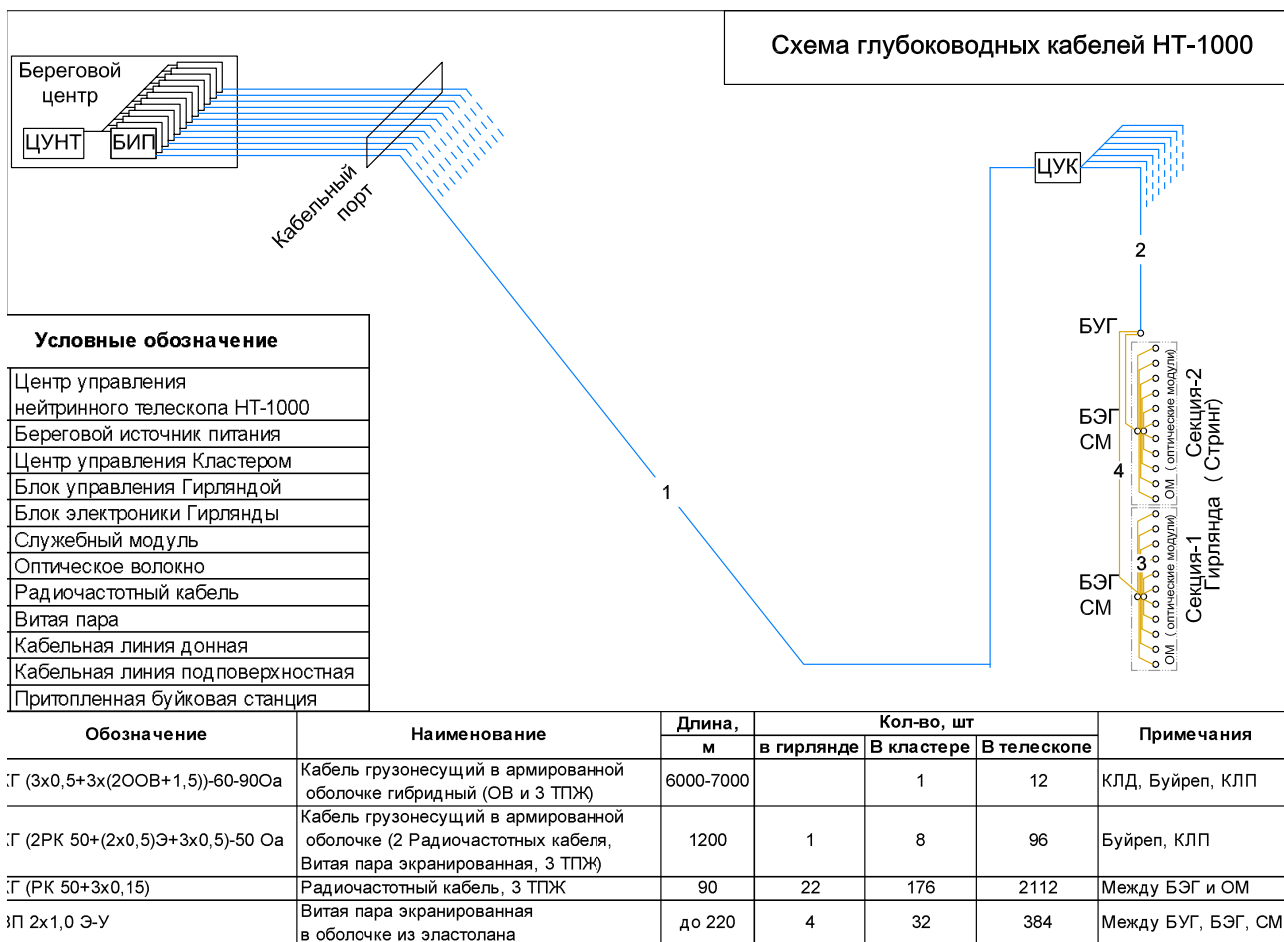


Рис. 7.1.2: Схема подключения кабельных линий.

- ПБСТ - ПБС гидрометрическая, несущая аппаратуру мониторинга параметров водной среды.

7.1.2 Основные элементы ПБС

В последние годы в связи с проектированием нейтринного телескопа НТ1000 на оз.Байкал был разработан и освоен ряд новых элементов несущих систем и глубоководных кабельных коммуникаций более долговечных и технологичных по сравнению с аналогичными элементами предыдущего поколения.

Канаты и глубоководные кабели, в том числе грузонесущие

В телескопе НТ1000 используются кабели современной конструкции, аналогичные геодезическим кабелям для скважинных работ, которые, в отличие от кабелей с открытой броней, значительно легче и имеют изолированную от внешней среды броню, что существенно увеличивает срок службы кабельных линий и позволяет уменьшить плавучесть несущих буюв. Кабели спроектированы и изготавливаются ООО "ПсковГеоКабель". Они удовлетворяют требованиям условий эксплуатации в составе телескопа НТ1000 и имеют все необходимые электрические провода (жилы) требуемых типов (в том числе коаксиальные и витые пары), что позволяет многократно уменьшить число используемых кабелей и герморазъемов. Используются следующие типы кабелей:

- КГ (2РК 50+(2x0-5)Э+3x0-5)-50 Оа - грузонесущий комбинированный кабель (см. Рис. 7.1.5) используется в качестве буйрепа ПБСТ и соединяет регистрирующие гирлянды с ПБСУ (центром управления кластера);
- КГ(РК+3x0,15) - радиочастотный кабель с тремя тонкими ТПЖ в оболочке из эластолана, предназначен для соединения оптических модулей с БЭГами (см. Рис. 7.1.6). Его конструкция позволяет использовать один кабель с одной парой герморазъемов на один ОМ;
- ВП2x05Э-У - экранированная витая пара в оболочке из эластолана.

На станциях ПБСТ в качестве нижних частей буйрепов, на которых размещаются модули с регистрирующей и сервисной аппаратурой, используется канат из нержавеющей стали (канат спиральный 7,6-Г-1-Н-МК-1770 из 08Х18Н7Г10АМЗ-П). Он также выполняет функцию "заземления" в схеме электропитания НТ1000.

В качестве буйрепов используются синтетические канаты и шнуры (например, шнур полиамидный диаметром 14 мм). Они также используются в качестве такелажной и технологической оснастки при проведении монтажных работ. Современный богатый ассортимент выпускаемых синтетических канатов (в основном для нужд рыбного промысла) позволяет выбрать наиболее подходящие для каждой конкретной операции типы и материалы канатов (шнуров). Кроме уже традиционных полипропилена (ПП) и полиамида (ПА) следует отметить освоенный промышленностью несколько лет назад полистил, который плавуч как ПП и прочен как ПА.

Кабельные зажимы и наконечники

ЗКУ - зажим кабельный унифицированный. ЗКУ с рабочей поверхностью в виде шестигранной прямой призмы, был разработан в 1986 г. специально для кабель-тросовых БС на оз.Байкал; благодаря своей конструкции надежно удерживает грузонесущие кабели типа КГ с двухповивной наружной броней, и при этом не деформируют их токопроводящие жилы.

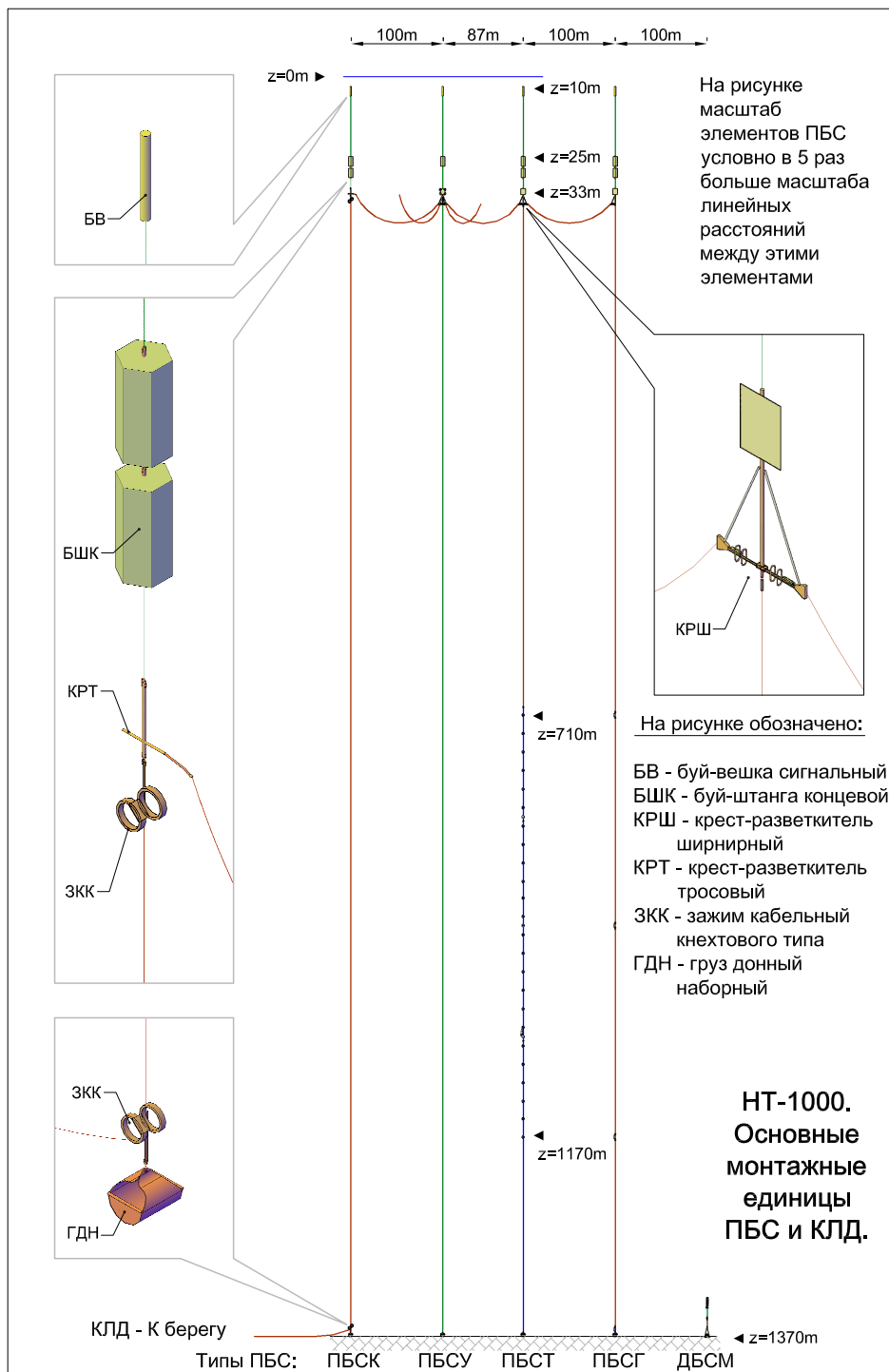


Рис. 7.1.3: Конструкция ПБС.

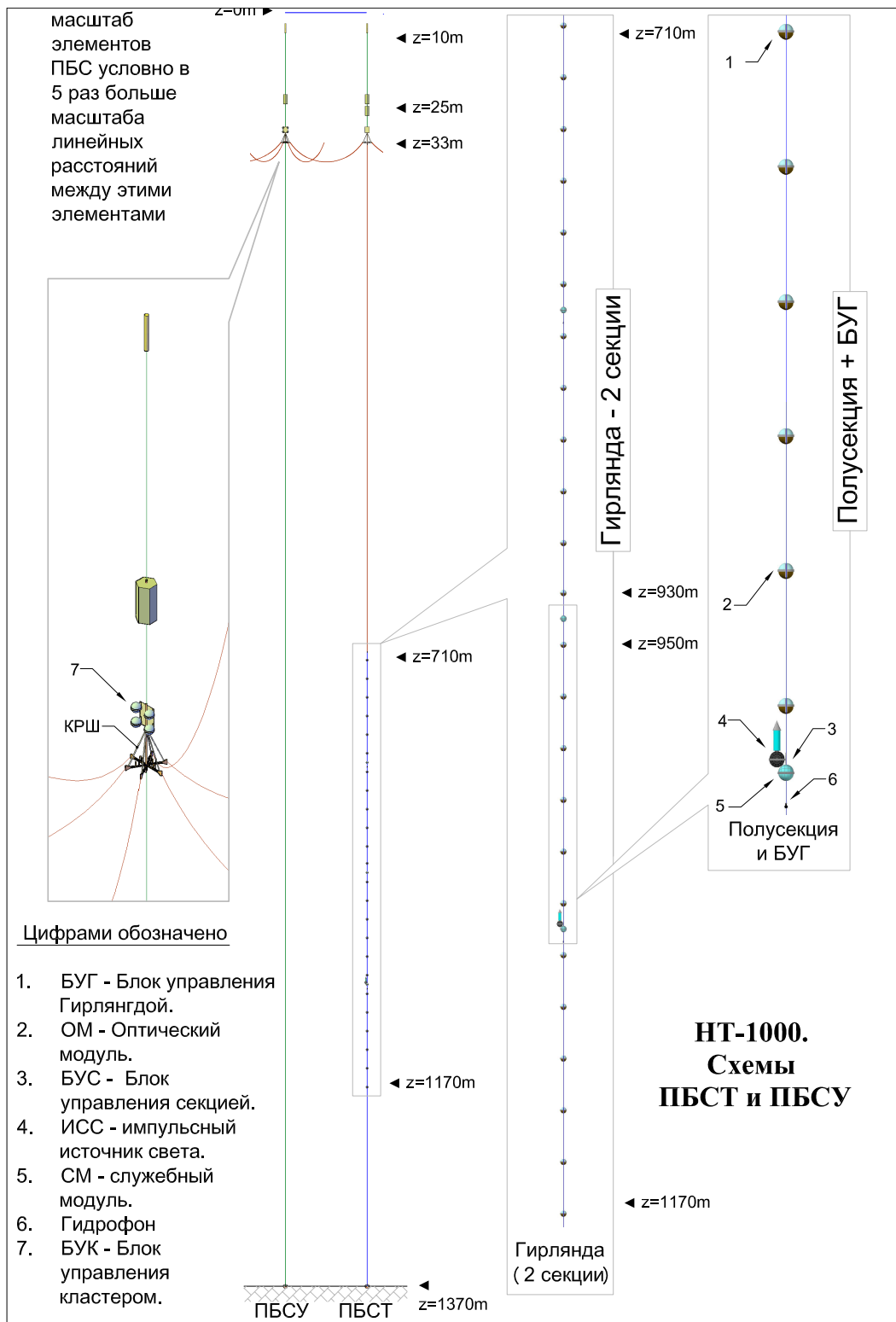
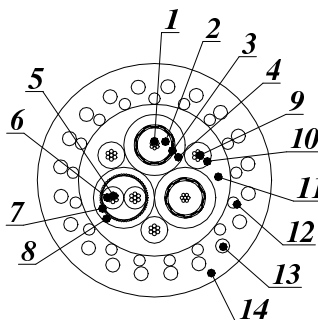


Рис. 7.1.4: Конструкция ПБСТ.

КГ (2РК 50+(2x0,5)Э+3x0,5)-50 Оа



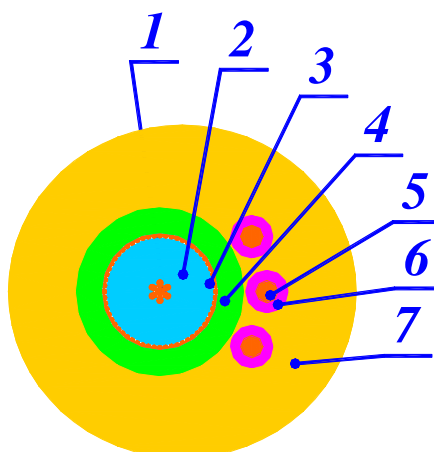
№	Наименование элементов конструкции	Материал элементов конструкции, размеры	Диаметр, мм.
1	Токопроводящей жилы	Медь мягкая, 7x0,26	0,78
2	Изоляция	ПНД 271-70К Δ=0,96 мм.,	2,7
3	Коаксиальная оплетка	Медь мягкая, 54x0,12	3,18
4	Изоляция	ПНД 271-70К Δ=0,81 мм.,	4,8
5	Токопроводящая жила	Медь мягкая, 7x0,31	0,93
6	Изоляция	ПНД 271-70К Δ=0,4 мм.	1,73
7	Коаксиальная оплетка	Медь мягкая, 60x0,12	3,18
8	Оболочка	ПВД 107-02К Δ=0,8 мм.	4,8
9	Токопроводящая жила	Медь мягкая, 7x0,31	0,93
10	Изоляция	ПНД 271-70К Δ=0,4 мм.	1,73
11	Оболочка	ПНД 271-70К Δ=0,8 мм.	11,8
12	Первый повив	Проволока стальная оцинкованная 17x1,1 ГОСТ 7372-80	13,3
13	Второй повив	Проволока стальная оцинкованная 20x1,1 ГОСТ 7372-80	15,5
14	Наружная оболочка	ПНД 273-81К Δ=1,25 мм.	18

Основные параметры

Диаметр кабеля , мм.....18,2 мм
 Электрическое сопротивление внутреннего проводника коаксиальной пары.....57 Ом/км
 Электрическое сопротивление экрана, не более.....41 Ом/км
 Волновое сопротивление коаксиальной пары, не более.....50 Ом
 Коэффициент затухания на частоте 5 МГц, не более.....0,04 дБ/м
 Сопротивление изоляции, не менее.....20000МОм*км
 Электрическое сопротивление проводника витой пары.....41 Ом/км
 Сопротивление изоляции, не менее.....20000МОм*км
 Волновое сопротивление витой пары, не более.....100 Ом
 Коэффициент затухания на частоте 10 МГц, не более.....0,05 дБ/м
 Максимальная рабочая температура.....60 °С
 Минимальная рабочая температура.....-50 °С
 Масса кабеля , не более.....560 кг/км.

Вес в воде Ф18,0 ρ= 560-3.14159*1,8²/4*100= 305,5г/м= 2,997Н/м
 Вес в воде Ф17,7 ρ= 560-3.14159*1,77²/4*100= 313,9г/м= 3,080Н/м

Рис. 7.1.5: Кабель КГ (2РК 50+(2x0-5)Э+3x0-5)-50Оа.



КГ (РК 50+3x0,15)

№	Наименование элементов конструкции	Материал элементов конструкции, размеры	Диаметр, мм.
1	Токопроводящей жилы	Медь мягкая, 7x0,31	0,93
2	Изоляция	ПНД 271-70К Δ=0,96 мм.,	3,3
3	Обмотка	Медь мягкая, 54x0,12	3,8
4	Изоляция	ПНД 271-70К Δ=0,6 мм.,	5,0
5	Токопроводящая жила	Медь мягкая ММ 0,45	0,45
6	Изоляция	ПНД 271-70К Δ=0,25 мм.	0,95
7	Наружная оболочка	Эластолан 1185 Δ=1,3 мм.	9,4

Основные параметры

Диаметр кабеля , мм.....8,0 мм
 Электрическое сопротивление внутреннего проводника коаксиальной пары....70 Ом/км
 Электрическое сопротивление экрана, не более.....57 Ом/км
 Волновое сопротивление коаксиальной пары, не более.....50 Ом
 Коэффициент затухания на частоте 100 МГц, не более.....16 дБ/100м
 Сопротивление изоляции, не менее.....20000МОм*км
 Электрическое сопротивление проводника витой пары.....120 Ом/км
 Сопротивление изоляции, не менее.....5000МОм*км
 Максимальная рабочая температура.....60 °С
 Минимальная рабочая температура.....-50 °С
 Масса кабеля , не более.....73 кг/км.

Стоимость кабеля составит 26 000 руб/км без НДС.

d, sm	#d=0,94
m, кг/км	#m=73
v, l/km	$d^2/4 * \pi * 100 = 69,397782$
p, kG/km=	$m - d^2/4 * \pi * 100 = 3,602218$
p, N/m=	$(m - d^2/4 * \pi * 100) * 9,81 / 1000 = 0,0353378$

Рис. 7.1.6: Кабель КГ(РК+3x0,15).

Зажим ЗКУН выполнен из нержавеющей стали и применяется на канатах из нержавеющей стали.

Зажимы натяжные и поддерживающие спирального типа НСО и ПСО (ТУ 3449-015-27560230-2006). Эти зажимы уже несколько лет изготавливаются ЗАО «Электросетьстройпроект» для городского электрохозяйства (уличного освещения, наземного электротранспорта), элементов зданий и сооружений при длине пролетов до 110 м. Зажимы изготавливаются в климатическом исполнении УХЛ, категории 1 по ГОСТ 15150. Зажим сопрягается со стандартной сцепной арматурой. Зажимы НСО и ПСО высоконадежны, просты в обращении, недороги, доступны и имеют многократный запас прочности при весьма щадящем влиянии на армированную оболочку кабелей. Предполагается использовать НСО в качестве силовых элементов креплений на буйрепах и КЛП из кабелей с армированной пластиковой (ПЭ) оболочке.

Буи концевые БКН и промежуточные БПН

В системах телескопа НТ1000 в качестве плавучестей концевых буйев (рабочие горизонты до 30м) вместо используемых в настоящее время алюминиевых куктылей типа 2Б-23,5-1200 предполагается использовать пластиковые траловые наплава Trawl float №446 производства ENGEL-NETZE GMBH & CO KG (Германия). Эти наплава существенно дешевле и проще в обращении. Их предполагается использовать вязками на шнурах ПА Ф10-12мм до 10шт. в каждой. Каждая вязка имеет по 2 петли на ПА шнурах, через которые эти вязки закрепляются за верхний рым креста-разветвителя КРШ (концевой буй - БКН) или за коуш спирального зажима под КРШ (промежуточный буй - БПН). Естественно, что при этом изоляционная вставка грозозащиты не требуется. Такие наплава успешно используются в качестве концевых буйев на оз. Байкал с 2003 г., а именно, на лимнологических и геофизической автономных ПБС.

7.1.3 Долговременная надежность ПБС и КЛД

Предполагаемое время функционирования НТ1000 в полном составе составляет порядка 10 лет при возможности внепланового ремонта до 3 ПБС в год. Это создает жесткие требования к надежности систем и отдельных элементов установки. Необходимо учитывать долговременное механическое и химическое (в том числе электрохимическое) воздействие внешней среды, особенно с учетом принятой схемы электропитания с использованием внешней среды (донных грунтов и вод Байкала) в качестве проводника. Применяемые методы противокоррозийной защиты описаны в разделе о системе электропитания НТ1000. Эффективность этих методов подтверждается тем, что подобные описанным выше станции ПБС и донные кабельные линии КЛД в различных модификациях и различного назначения успешно действуют с 1986 г. в составе телескопа НТ200. В частности, КЛД-86 и ее ПБСК-86 функционировали с 1986 г. до их планового демонтажа в 2006 году.

7.1.4 Описание операций при развертывании и демонтаже несущих систем. Монтажное оборудование

Главной особенностью описываемых монтажных работ является использование ледового покрова озера Байкал. Уникальные свойства байкальского льда, благоприятные метеорологические и ландшафтные условия при практическом отсутствии течений и дрейфа ледовых полей дают возможность проводить монтажные работы каждый год в течение 6–8 недель (с февраля по начало апреля). Эти факторы и специально разработанное монтажное и кабеле-укладочное оборудование позволяют развертывать глубоководные несущие конструкции телескопа практи-

чески любых требуемых размеров и конфигураций. При этом достигаются точности постановок по вертикали и горизонтали до 20–50 см на глубинах в 1300–1500 м, что обуславливается низкими монтажными скоростями и, соответственно, минимальными динамическими нагрузками.

Выше отмечалось, что операции по развертывании несущих систем и оборудования, а также их демонтажу (для ремонта, модернизации, обслуживанию установленного на них оборудования) практически полностью аналогичны описанному в [31]. Накоплен большой опыт в проведении подобных работ. Создан парк необходимого оборудования, способного надежно работать в ледовых условиях оз. Байкал, включающий 14 спуско-подъемных устройств (СПУ) с кабельными лебедками, в том числе, 7 СПУ большой cableемкости (до 4 км для кабелей диаметром 18мм) и грузоподъемностью до 3500 кг, комплекс ледорезного и кабелеукладочного оборудования (КУК), 12 мобильных полевых помещений на санях (типа КУНГ), 2 передвижных дизель-генератора по 50 кВт и набором силовых полевых кабелей, кабельные транспортеры, грузовые сани и пр.. Имеется необходимая автотракторная техника для транспортировки людей, грузов и буксирования установленного на санях оборудования.

Развертывание станций комплекса НТ-1000 будет производиться в течение 5 - 6 полевых сезонов, то есть планируется развертывать в среднем по 2 кластера с прокладкой 2 донных кабельных линий за сезон.

Развертывание и демонтаж притопленных буйковых станций (ПБС)

Монтаж ПБС проводится в следующей последовательности. К майне на месте постановки станции выдвигается СПУ (кабель буйрепа предварительно набран на его лебедку, выхожен под номинальной нагрузкой и размечен), а также сани с комплектом оборудования (донные грузы, плавучести, монтажные элементы). На буйреп навешивается якорь и начинается погружение. Далее в естественной последовательности (снизу вверх) по мере сматывания буйрепа на него монтируются все элементы станции, в том числе измерительное оборудование, соединяемое кабелями. На протяжении всего монтажа производится проверка работоспособности приборной части. Также контролируется длина вытравленного кабеля и его натяжение, эти параметры постоянно сравниваются с расчетными.

При погружении производится контрольное касание якорем дна для точного определения мест крепления концевых элементов станции, так чтобы верх концевого буй встал на расчетной глубине. Далее устанавливается Крест-разветвитель (КР), присоединяются горизонтальные подповерхностные кабельные линии-перемычки (КЛП); на КР монтируется и подключается к кабелям необходимая аппаратура; крепится концевой буй. Станция перевешивается на постановочный поводок (канат) и погружается до касания якорем дна, после чего производится окончательная проверка ее работоспособности в составе телескопа. При положительных результатах тестирования постановочный канат сбрасывается в воду.

Демонтаж станции начинается с того, что с помощью легких водолазов за рым концевого буй (глубины до 25 м) через карабин крепится подъемный поводок, который заводится на лебедку СПУ. Поводок изготавливается из плавучего трехрядного каната (полистил или полипропилен), на ходовом конце которого заплетен сгон для карабина. Далее работы производятся в последовательности, обратной монтажу ПБС.

Кабельные ПБС и донные кабельные линии (КЛД). Монтаж ПБСК

Прокладку кабелей осуществляют со льда озера, используя разработанный и созданный в Нижегородском политехническом институте кабелеукладочный комплекс КУК, в состав которого входят:

- планировщик (подготовка ледяного поля, расчистка от неровностей и торосов);

- дискофрезерная машина типа ЛФМ-4 (прорезание траншеи во льду);
- укладчик кабеля типа УК-5 (укладка кабеля в щель);
- кабельная лебедка типа ЛПК-145 с автономным бензогенератором (удержание, опускание, и подъем укладываемого под лед кабеля).

Это оборудование разработано в прицепном исполнении, носителем его является дооборудованный плавающий гусеничный транспортер типа ГАЗ-72 или трактор класса 06–09 с ходоуменьшителем (используется трактор МТЗ-82). ПБСК является выводом кабеля КЛД под поверхность озера и ставится синхронно с двух майн, расположенных примерно в створе прокладки трассы КЛД на расстоянии около 300 метров друг от друга. Морской конец петли опускается с помощью СПУ, а береговой конец - с лебедки ЛПК через укладчик УК. Такой способ позволяет позиционировать якорь ПБСК с точностью в несколько метров. После касания якорем дна в расчетной точке, ЛФМ режет в ледовом покрове щель, в которую с лебедки ЛПК через укладчик УК опускается кабель. Лебедка и укладчик движутся синхронно по щели за ЛФМ примерно в 100 м позади нее. При этом длина стравленного в щель и уложенного на дно кабеля соответствует прокладочной таблице, предварительно рассчитанной по критерию непроскальзывания кабеля по береговому склону. В прокладочной таблице представлены также расчетные значения угла схода кабеля в воду с укладчика и натяжения кабеля. Эти параметры также контролируются в процессе прокладки.

Около берега на глубине 5 м кабель крепится за “береговой якорь”, на который укладывается около 200 м ремонтной петли кабеля, а береговой конец кабеля через береговой кабельный порт выводится на берег.

В период прокладки морской конец КЛД остается на постановочном СПУ, а после укладки более 2000 м КЛД это СПУ выбирает до 150 м кабеля, поднимая на такую же высоту якорь ПБСК. На заданных горизонтах на буйрепе монтируются промежуточные буйи, крест-разветвитель, подключаются кабельные линии перемычки (КЛП), крепится концевой буй. Станция ставится на грунт и измеряются ее точные координаты (с точностью около 1 м).

Монтаж подповерхностных кабельных перемычек КЛП

Перемычки КЛП соединяют между собой соседние ПБС и крепятся на них на крестах-разветвителях КР. КЛП проводятся подо льдом с помощью специально созданного оборудования - “подледного трактора”, имеющего положительную плавучесть и перемещающегося подо льдом по командам оператора, либо “торпеды” - устройства, самонаводящегося на выставленный ультразвуковой маяк.

Придонные буйковые станции маяков (ДБСМ)

ДБСМ служит для размещения придонной автономной аппаратуры (маяков - транспондеров гидроакустической системы позиционирования) и имеет короткий буйреп (30-50м) - с небольшим бумом на конце. Под бумом находится специальный “воротник”, за который при необходимости подъема цепляют ДБСМ демонтажным устройством УД-93, представляющим из себя горизонтальную штангу с навешенными на нее крюкама-захватами.

7.1.5 Организация ледовых работ

Период монтажных работ на оз.Байкал определяется прежде всего состоянием его ледового покрова. Как правило, начало ледостава на южном Байкале приходится на конец января (плюс-минус одна-две недели), после чего толщина льда увеличивается каждые сутки на 3–5 см. К

середине или к концу февраля, когда толщина ледового покрова достигает 40–50 см, можно начинать работы на льду с помощью тяжелой техники (масса единицы используемого оборудования не превышает 5000 кг).

Во-первых производится ледовая разведка. На легковых вездеходах или (и) мотонартах, ориентируясь по навигатору GPS, компасу и спидометру, отряд выходит в окрестность развертывания ледового лагеря; по пути следования проводятся измерения толщины и качества ледового покрова. С помощью теодолита, ориентируясь по трем береговым опорным точкам с известными координатами, с погрешностью не более 50 см выставляется главная опорная точка ледового лагеря (репер). После чего от выставленного репера с помощью теодолита и лазерного дальномера размечаются места постановок всех буйковых станций.

Для проведения работ организуется Ледовый лагерь (ЛЛ), в состав которого входят вагончики и домики (монтажные, лабораторные, складские и бытовые модули), спускоподъемные устройства, электростанции, кабельная сеть питания и связи. Некоторые работы могут проводиться малыми отрядами на значительном удалении от основного лагеря.

В соответствии с ледовой обстановкой уточняется план размещения на льду экспедиционного оборудования, размечаются дороги и трассы прокладки КЛД. Далее проводится разметка и расчистка площадок и автомобильных дорог. По мере надобности на лед вывозится и устанавливается монтажное оборудование, помещения, электростанции, раскладываются и подключаются кабельные линии. В соответствии с планом и обстановкой проводятся монтажные и пусковые работы. Завершение экспедиции определяется ледовой обстановкой и относится к началу апреля (как правило 5–10 число месяца). В конце марта - начале апреля начинается постепенная эвакуация лагеря.

Мониторинг состояния льда ведется непрерывно, ориентируясь также на прогнозы погоды и на режим работы официальных ледовых переправ на оз. Байкал. При угрозе резкого ухудшения состояния льда ледовый лагерь частично вывозится на берег и переводится в режим ожидания срочной полуторасуточной эвакуации (ночь-день-ночь).

Глава 8

Физические характеристики

8.1 Мюоны высоких энергий

Количественная теория эффекта Вавилова-Черенкова в рамках классической электродинамики была разработана в 1937 году И.Е. Таммом и И.М. Франком [32]. Среда, в которой заряженная частица, в частности мюон, движется со скоростью большей, чем фазовая скорость света в этой среде, является источником черенковского излучения. Число черенковских фотонов с длиной волны в интервале $\lambda, \lambda + \Delta\lambda$, испускаемых с элементарного отрезка траектории dx определяется из выражения:

$$\frac{d^2 n_\gamma}{d\lambda dx} = 2\pi\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \frac{1}{\lambda^2}, \quad (8.1.1)$$

где $\alpha = 1/137$ – постоянная тонкой структуры, $n(\lambda)$ – фазовый показатель преломления среды, $\beta = v/c$ – скорость частицы в единицах скорости света в вакууме. Черенковское излучение обладает замечательной особенностью, заключающейся в том, что фотоны испускаются под практически фиксированным углом θ_c относительно направления движения частицы. Величина угла θ_c зависит от отношения фазовой скорости света в среде к скорости частицы и определяется из выражения $\cos \theta_c = 1/(\beta n)$. В то же время, абсолютное значение скорости черенковских фотонов равно групповой скорости распространения света соответствующей длины волны в среде:

$$v = \frac{c}{n_g(\lambda)}, \quad n_g(\lambda) = n(\lambda) - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (8.1.2)$$

Интервал длин волн фотонов 350–600 нм является рабочим диапазоном фотоприемников Байкальского нейтринного телескопа. Нижняя граница этого интервала обусловлена поглощением света стеклом оптического модуля, а верхняя – увеличением показателя поглощения света в воде, уменьшением интенсивности черенковского излучения, а также уменьшением квантовой чувствительности фотоприемников с увеличением длины волны в красной области спектра. Спектральная зависимость обратной скорости $1/v(\lambda)$ распространения света в байкальской воде [33] приводится на рис. 8.1.1 (левая панель). Видно, что скорость распространения света растет с увеличением длины волны фотонов. Время задержки фотонов с длиной волны 350 нм относительно фотонов с длиной волны 600 нм в байкальской воде в зависимости от пройденного ими пути приведено на рис. 8.1.1 (правая панель). Спектральная зависимость скорости света в воде приводит к размытию светового сигнала от заряженных частиц во времени.

Область энергий мюонов, доступная для исследования с помощью нейтринных телескопов, простирается от десятков ГэВ до ультравысоких энергий. Световой поток, испускаемый при прохождении мюона в среде, включает в себя черенковское излучение, инициируемое электрическим

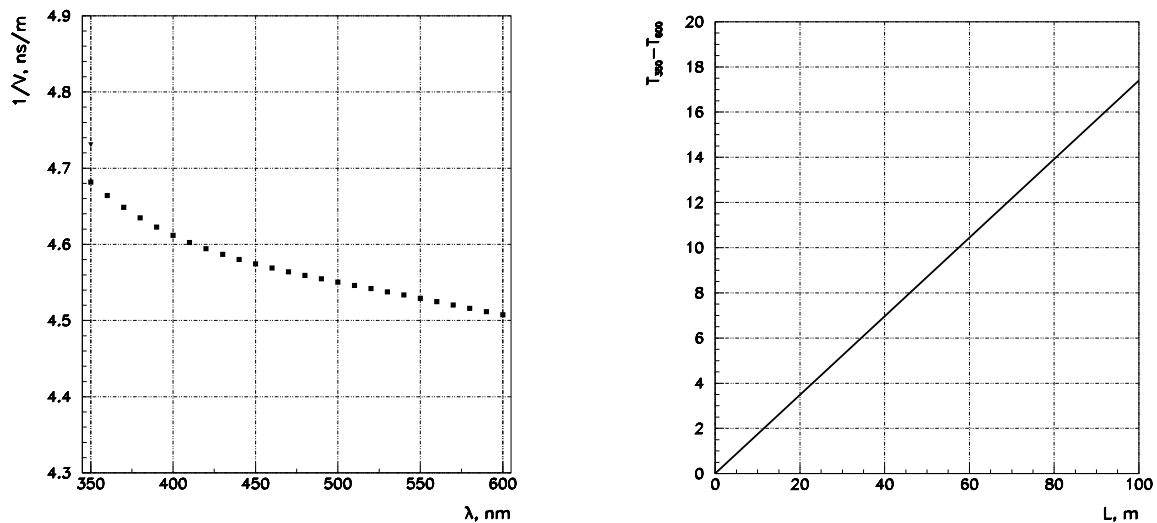


Рис. 8.1.1: Левая панель – спектральная зависимость обратной скорости света в байкальской воде. Правая панель – разность времен прихода фотонов с длиной волны 350 нм и 600 нм в байкальской воде в зависимости от пройденного ими пути.

зарядом мюона, черенковское излучение δ -электронов, рождающихся при ионизации атомов среды мюоном, а так же черенковское излучение ливней, образующихся в результате рождения e^+e^- пар, либо тормозного и фото-ядерного взаимодействий мюона со средой. Как было показано в работе [34], черенковское излучение δ -электронов с энергией $E_\delta < 20$ МэВ является квазинепрерывным вдоль траектории мюона с линейной плотностью, составляющей, примерно, 8% от линейной плотности черенковского излучения собственно мюона. В отличие от черенковских фотонов собственно мюона, испускаемых под фиксированным углом, данное распределение простирается во всей области углов относительно траектории мюона и имеет максимальное значение в направлении движения мюона.

Таким образом, световое поле, инициируемое мюоном в среде, можно разделить на две составляющие. Первая составляющая излучается непрерывно с постоянной линейной плотностью по мере движения мюона вдоль его траектории. Линейная плотность и угловое распределение фотонов в этом источнике обусловлены черенковскими фотонами собственно мюона и δ -электронов. Вторая составляющая формируется локальными (в грубом приближении, точечными) источниками на траектории мюона и описывает черенковское излучение ливней, образующихся в результате рождения e^+e^- пар, а также в результате тормозного и фото-ядерного взаимодействий мюона.

8.1.1 Краткое описание программы моделирования мюонных событий

Задача выделения событий от мюонов из-под горизонта, т.е. событий от мюонных нейтрино, предполагает достаточно надежную оценку уровня ожидаемого фона от атмосферных мюонов. Наиболее вероятными кандидатами на плохое восстановление являются события от мюонных групп, что предопределяет необходимость детального моделирования потока атмосферных мюонов.

Программу моделирования событий от атмосферных нейтрино и фоновых событий от атмосферных мюонов в установке можно условно разделить на следующие части:

- Моделирование потока атмосферных мюонов на уровне моря.
- Моделирование взаимодействия мюонных нейтрино со средой с рождением вторичных мю-

онов.

- Распространение мюонов до уровня установки.
- Моделирование отклика установки на черенковское излучение мюонов с учетом работы электронных систем.

Для моделирования потока атмосферных мюонов на уровне моря использовалась программа CORSIKA5.7 [35] (адронное взаимодействие разыгрывалось по модели QGSJET [36], химический состав первичного космического излучения – согласно данным, приведенным в работе [37]). Интенсивность потока мюонов на уровне моря с энергиями выше 300 ГэВ (пороговая энергия для прохождения мюоном 1 км в воде), полученная при моделировании, оказалась в 1.6 раз меньше интенсивности, полученной из аппроксимации существующих экспериментальных данных [38, 39]. Причина такого расхождения в настоящее время не известна. Поэтому при сравнении экспериментального и расчетного темпа счета событий в установке мы увеличиваем последний в 1.6 раз, т.е. фактически нормируем его на поток мюонов на уровне моря, измеренный в других экспериментах.

При моделировании потока мюонов от атмосферных нейтрино в качестве первичного спектра использовался спектр нейтрино, приведенный в работе [40]. Поскольку порог регистрации мюонов от нейтрино для триггера, необходимого для однозначного восстановления, составляет > 10 ГэВ, процессами взаимодействия нейтрино, такими, как квази-упругое рассеяние и однопионное рождение, можно пренебречь. Расчет сечений глубоконеупругого взаимодействия нейтрино с веществом проводился с использованием функции партонных распределений CTEQ4M [41]. Распространение мюонов через воду и грунт разыгрывалось по программе MUM (MUons + Medium) [42]. Проведенное сравнение полученного потока мюонов на уровне установки с другими, в том числе и аналитическими расчетами на базе различных моделей спектра атмосферных нейтрино (см. например [43]) и моделей взаимодействия, выявило различие по абсолютной величине потока мюонов от нейтрино $\pm 10\%$ и отклонение по форме спектра $< 4\%$. Оба этих расхождения обусловлены, в основном, различием в используемых спектрах атмосферных нейтрино.

При учете эффекта осцилляций мюонных нейтрино при их распространении от точки рождения до точки взаимодействия использовалась вероятность выживания мюонных нейтрино в рамках простой модели осцилляций двух типов нейтрино:

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu} = 1 - \sin^2 \left(1.27 \times 10^{-6} \frac{\Delta m^2}{10^{-3} \text{ eV}^2} \frac{L}{1 \text{ km}} \frac{1 \text{ TeV}}{E_\nu} \right),$$

где $\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$, L - расстояние от точки генерации нейтрино до точки наблюдения. При этом точка рождения нейтрино выбиралась на высоте 15 км от поверхности Земли. Как видно из выражения для вероятности выживания, при расчете предполагалось полное смешивание.

Распространение черенковского излучения мюонов в воде и отклик оптического модуля на это излучение моделировались по специально созданным для Байкальского эксперимента программам [44]. При распространении мюона в воде энергетические потери на образование δ -электронов с энергией меньше 20 МэВ рассматриваются как непрерывные, и световое поле от таких δ -электронов добавляется к световому полю мюона. Рождение δ -электронов с энергией выше 20 МэВ, e^+e^- пар, тормозных γ -квантов и акты фотоядерного взаимодействия разыгрываются вдоль трека мюона в соответствии с сечениями этих процессов. Световое поле от каскадов различных энергий моделируется разбиением каскадной кривой на отрезки длиной в 1 метр. При моделировании учитывается зависимость показателя поглощения от длины волны. Ввиду слабого влияния рассеяния в байкальской воде на время задержки и амплитуду светового сигнала при регистрации фотонов с расстояний, меньших 50 м, рассеяние в основной

программе не учитывается. При решении задач, в которых важен вклад черенковского излучения с больших расстояний (расчет отклика установки на ливни высоких энергий и магнитные монополи), рассеяние света в воде учитывается по методике, описанной в работе [45]. Среднее число фотоэлектронов, рожденных на фотокатодах фотоприемников, рассчитывается с учетом индивидуальной чувствительности данного оптического модуля и его ориентации относительно направления прихода фотонов. Переход к числу фотоэлектронов от среднего осуществляется с учетом распределения Пуассона. Время срабатывания фотодетектора определялось с учетом временного джиттера фотодетектора.

8.1.2 Атмосферные мюоны

Атмосферные мюоны в первую очередь формируют естественный фон при регистрации природных потоков нейтрино. В тоже время они могут быть использованы в качестве калиброванного источника различных типов событий. Поэтому детальное моделирование ожидаемого отклика телескопа на атмосферные мюоны является важным со всех точек зрения.

Для вычисления ожидаемого темпа счета событий от атмосферных мюонов была использована выборка заранее сгенерированных событий от первичного космического излучения, мюоны от которых имеют энергию больше, чем необходимо для того, чтобы достичь уровня расположения детектора для заданного зенитного угла.

Ожидаемый темп счета событий от атмосферных мюонов, удовлетворяющих триггерному условию срабатывания кластера (срабатывание 2-х соседних фотодетекторов внутри 100 нс с соответствующими амплитудными порогами (см. раздел 4.5.2), составляет для всей установки 170 событий в секунду. Для триггера, необходимого для восстановления геометрических параметров траектории мюона (срабатывание 6 и более оптических модулей на 3 и более гирляндах - триггер 6/3), расчетный темп счета составляет 10.5 событий в секунду. Угловое распределение событий по триггеру 6/3 представлено на Рис.8.1.2 (верхняя кривая). Повышение темпа счета вблизи направления наблюдения на зенит обусловлено тем, что вероятность регистрации мюонов достаточно низких энергий больше для мюонов распространяющихся вдоль гирлянды, т.е. околоразвертикальных траекторий. При отклонении от вертикали вероятность регистрации падает.

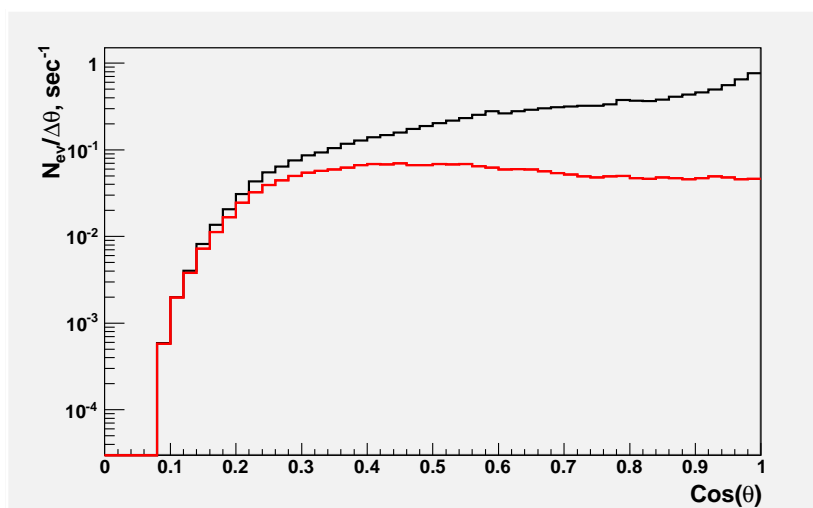


Рис. 8.1.2: Угловое распределение событий от атмосферных мюонов. Верхняя гистограмма - все события. Нижняя гистограмма - события от одиночных мюонов.

В случае установки с низкой плотностью пространственного распределения фотодетекторов,

что справедливо для НТ1000, вероятность регистрации событий, обусловленных группами мюонов, может значительно превышать вероятность регистрации одиночных мюонов. Для базовой конфигурации НТ1000 ожидаемый темп счета событий от одиночных мюонов равен примерно 2.2 событиям в секунду, что составляет около 20% от полного числа ожидаемых событий по триггеру 6/3. Однако этого достаточно для калибровки чувствительности телескопа по атмосферным мюонам. Угловое распределение событий от одиночных мюонов приводится на Рис.8.1.2 (нижняя кривая). Как видно из этого рисунка, доля событий от одиночных мюонов увеличивается от зенита к горизонту. Так, при зенитных углах $\cos(\theta) < 0.4$ вклад событий от одиночных мюонов становится преобладающим.

Для проверки и тестирования алгоритмов выделения и восстановления ливней высоких энергий необходима информация об ожидаемом темпе счета ливневых событий, инициированных атмосферными мюонами. Темп счета таких событий с энерговыделением > 10 ТэВ и множественностью числа сработавших фотодетекторов ≥ 10 составляет $4 \cdot 10^{-3}$ событий в секунду.

8.1.3 Атмосферные нейтрино

Для моделирования отклика на поток атмосферных нейтрино использовались модели, описанные в разделе 8.1.1. Ожидаемый темп счета мюонов от атмосферных нейтрино из нижней полусферы с энергией $> E_\nu$ (черная кривая) и $< E_\nu$ (красная кривая) представлены на Рис.8.1.3 для триггерного условия 6/3. Ожидаемое число событий от атмосферных мюонных нейтрино составляет порядка 4300 событий в год. Как видно из рисунка 8.1.3, темп счета слабо зависит от

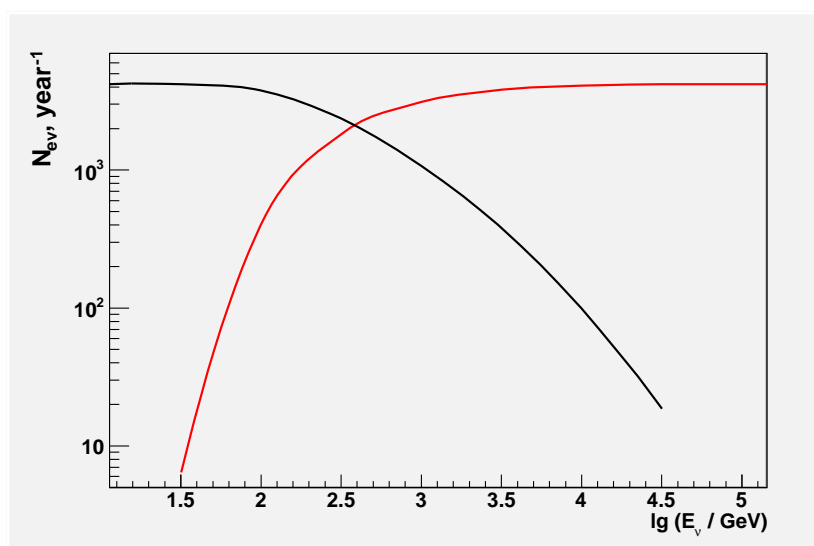


Рис. 8.1.3: Ожидаемый темп счета мюонов от атмосферных нейтрино из нижней полусферы с энергией $> E_\nu$ (черная кривая) и $< E_\nu$ (красная кривая).

пороговой энергии в диапазоне энергий < 100 ГэВ. Более детальное представление припороговой области по энергии нейтрино показано на Рис.8.1.4 (слева). Как видно из этого рисунка, пороговой областью энергий для крутопадающего спектра атмосферных нейтрино является область 30 – 80 ГэВ. Из-за относительно высокого порога эффект осцилляций уменьшает полное число ожидаемых событий в год на ~ 100 событий. Для данного энергетического спектра 90% событий лежат в области (90 ГэВ – 14 ТэВ).

Угловое распределение событий из нижней полусферы по зенитному углу представлено на Рис.8.1.4 (справа). Разница в темпе счета в зависимости от зенитного угла обусловлена особенностями конфигурации установки (см. раздел 3.2.2): для мюонных траекторий близких к

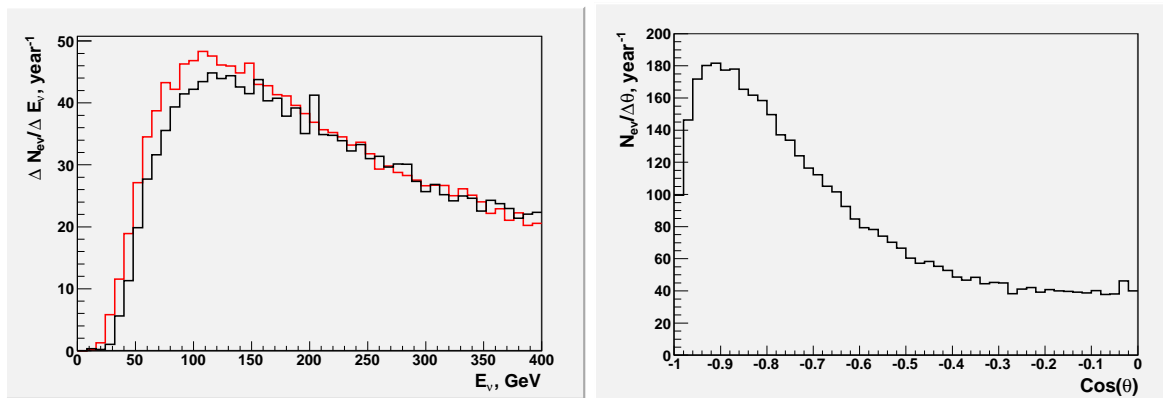


Рис. 8.1.4: Слева – распределение событий по энергии атмосферных мюонных нейтрино в припороговой области (красная – без осцилляций, черная - с учетом осцилляций). Справа – угловое распределение событий от атмосферных нейтрино из нижней полусферы по зенитному углу.

направлению на надир геометрическая площадь составляет около 0.8 км^2 , в то время как для горизонтальных мюонов эта величина равна примерно 0.35 км^2 . Дополнительным фактором, увеличивающим эффективную площадь вблизи направления на надир, является ориентация оптических модулей телескопа вниз. Резкое уменьшение темпа счета при угле 180° обусловлено триггерным условием $6/3$, т.е. требованием срабатывания по крайней мере 3-х гирлянд телескопа. Поскольку, минимальные расстояния между гирляндами составляет примерно 60 метров и мюоны имеют в основном низкую энергию, то вероятность регистрации таких событий мала. Следует отметить, что восстановление зенитного угла околоризонтальных мюонных траекторий снизу может быть выполнено с учетом амплитудной и временной информации ОМ одной гирлянды, что приводит к увеличению эффективной площади регистрации таких мюонов.

8.1.4 Подавление случайных срабатываний и выделение фотодетекторов, сработавших от физических событий

Из анализа данных, набранных при работе экспериментальной гирлянды (стринга) в течение 2008–2010 годов, следует, что темпы счета отдельных оптических модулей составляют около 20 кГц. В основном фотодетекторы срабатывают либо в результате наличия собственного шума ФЭУ (темновой ток), либо из-за свечения воды, вызванного разными факторами. При таком высоком уровне шума, очевидно, что при регистрации мюонов в отклике телескопа наряду с фотодетекторами, сработавшими от черенковских фотонов, будут присутствовать фотодетекторы, сработавшие от шумовых импульсов. Сработавшие от шумовых импульсов фотодетекторы будут существенно искажать временной отклик телескопа и, соответственно, влиять на точность реконструкции траекторий мюонов. Поэтому до проведения реконструкции траектории мюона необходимо выявить и исключить из анализа данных фотодетекторы, сработавшие от шумовых импульсов.

Для разработки алгоритмов режекции фотодетекторов сработавших от шумов, было проведено моделирование отклика телескопа при прохождении мюона с учетом шумовых импульсов. При моделировании предполагалось, что темп счета оптического модуля, обусловленный шумами, одинаков для всех фотодетекторов и составляет 20 кГц. Амплитудное распределение шумовых импульсов было получено из анализа данных экспериментальной гирлянды (см. Рис. 8.1.5). Из ансамбля найгранных событий отбирались события, удовлетворяющие триггерному условию (*триггер 1*); - срабатывание двух соседних фотодетекторов на гирлянде внутри времен-

ного окна 100 нс. При этом амплитуда одного из двух фотодетекторов должна превышать 3 ф.э., а амплитуда другого - 0.3 ф.э. При выполнении *триггера 1* кластер считается сработавшим, и информация о всех сработавших фотодетекторах в данном кластере сохраняется.

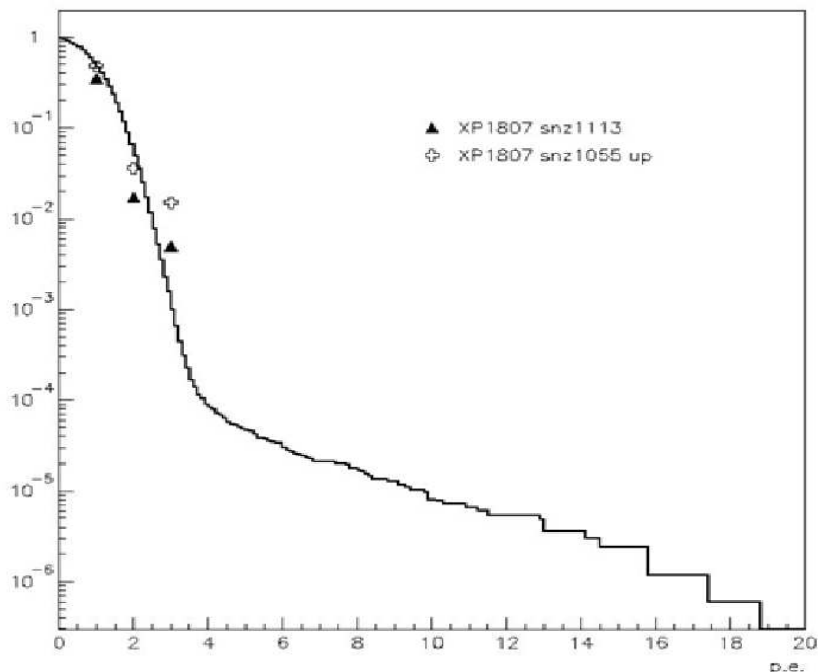


Рис. 8.1.5: Амплитудное распределение шумовых импульсов.

Как уже отмечалось ранее, при реконструкции траектории мюонов минимальным триггерным условием (*триггер 2*) является срабатывание 6 и более фотодетекторов на 3-х и более гирляндах. Анализ наигранных событий, удовлетворяющих *триггеру 2*, показал, что при энергии мюона 10 ТэВ среднее число фотодетекторов, засвеченных черенковскими фотонами, равно 10.8, а среднее число ОМ, сработавших от шумовых импульсов, - 19.4. Распределение по сработавшим фотодетекторам приведено на рисунке 8.1.6.

Процедура режекции фотодетекторов, сработавших от шумовых импульсов, предполагает выполнение следующих условий: разность времен срабатывания любой пары фотодетекторов должна быть меньше времени распространения светового сигнала между этими фотодетекторами (*критерий причинности*), т.е. должно выполняться соотношение:

$$|\Delta t_{ij}| < (r_{ij} n_g)/c + \delta,$$

где $|\Delta t_{ij}|$ – абсолютная величина разности времен срабатывания *i*-го и *j*-го фотодетектора, r_{ij} – расстояние между фотодетекторами, n_g – показатель преломления света в воде с учетом групповой скорости, c – скорость света, δ – константа равная 5 нс, которая вводится для компенсации временного джиттера фотодетектора. Путем попарного перебора всех сработавших фотодетекторов находят пары, нарушающие критерий причинности. Исключается фотодетектор, содержащийся в максимальном количестве пар нарушающих условие причинности и имеющий амплитуду меньше 3 фотоэлектронов. Затем процедура исключения фотодетекторов повторяется до стадии, когда все пары фотодетекторов будут удовлетворять критерию причинности.

В результате этой процедуры среднее число фотодетекторов, сработавших от шума, составило 2.7, а среднее число фотодетекторов, сработавших от черенковских фотонов, равно 10.7 для энергии мюона 10 ТэВ. Распределение событий по числу сработавших фотодетекторов после применения процедуры режекции представлено на рисунке 8.1.7.

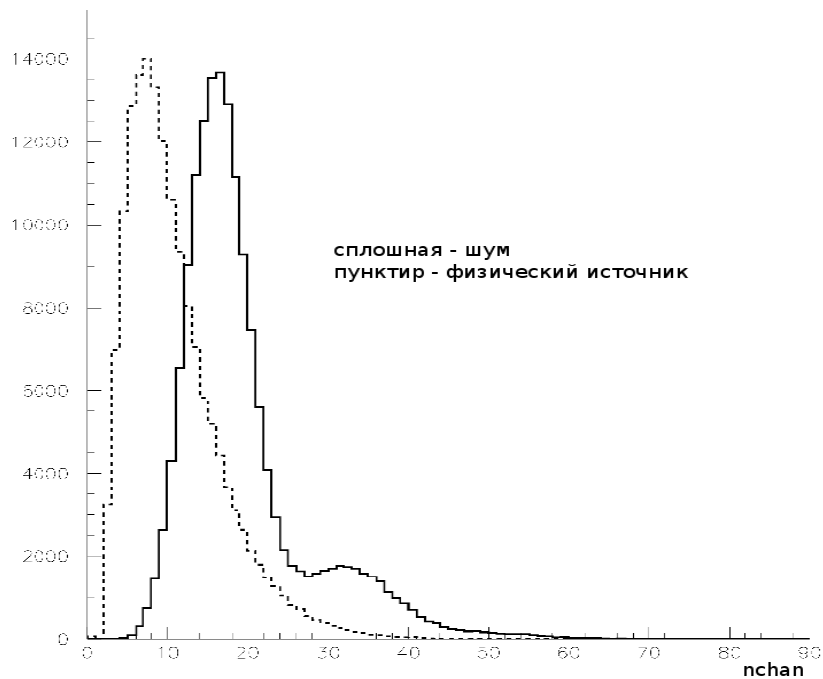


Рис. 8.1.6: Распределение событий, удовлетворяющих триггеру 2, по числу сработавших фотодетекторов. Энергия мюона 10 ТэВ. Сплошная линия – фотодетекторы, сработавшие от шумовых импульсов. Пунктирная линия – фотодетекторы, сработавшие от черенковских фотонов.

В результате применения процедуры режекции из последующего анализа удаляется так же и некоторая доля фотодетекторов, сработавших от черенковских фотонов вторичных ливней, генерируемых мюонами в процессе электромагнитного взаимодействия. Среднее число удаленных фотодетекторов, сработавших от черенковских фотонов равно соответственно 0.4 , 0.98 и 3 для энергий мюона 1, 10, 100 ТэВ. В таблице 8.1.1 представлено среднее число фотодетекторов в событиях, удовлетворяющих триггеру 2, сработавших от шумовых импульсов (N_{noise}) и от черенковских фотонов (N_{cher}) до и после процедуры режекции для мюонов с энергией 1, 10, 100 ТэВ. Из таблицы видно, что для мюонов низкой энергии вклад шумовых срабатываний со-

Таблица 8.1.1: Среднее число сработавших фотодетекторов в событиях.

Энергия	До режекции		После режекции	
	N_{noise}	N_{cher}	N_{noise}	N_{cher}
1 ТэВ	16.8	2.9	4.02	3.0
10 ТэВ	19.4	10.8	2.7	10.7
100 ТэВ	21.2	26.8	3.2	24.6

ставляет более 50%, что неизбежно приводит к понижению точности восстановления параметров трека мюона при восстановлении. Поэтому для следующего этапа подавления влияния шумовых импульсов используется информация об отклонении времени срабатывания фотодетектора от ожидаемого в модели плоского фронта, которая используется в качестве 1-ого приближения в процедуре реконструкции треков мюонов.

Процедура подавления шумовых срабатываний осуществляется следующим образом: после восстановления события в модели плоского фронта проверяется отклонение времени каждого

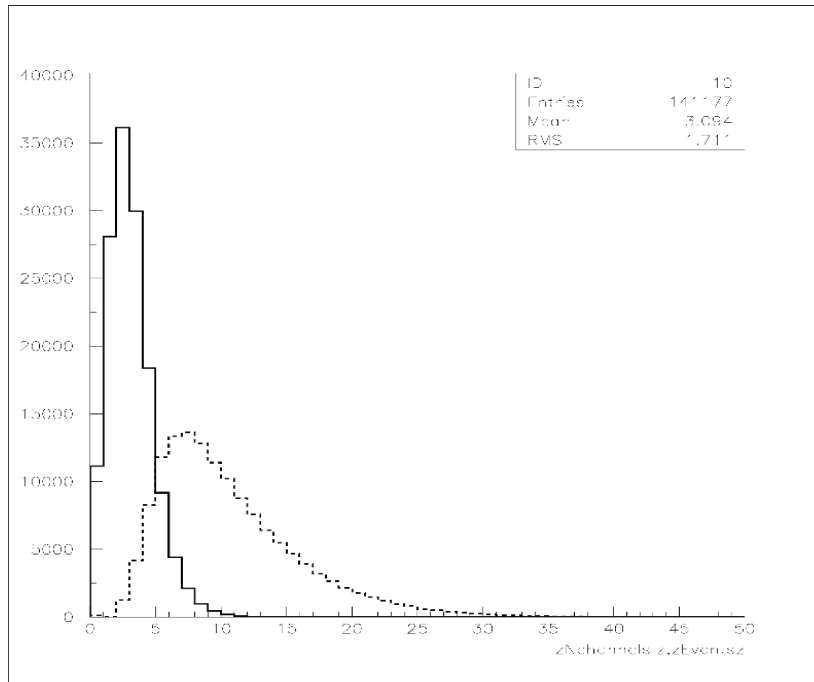


Рис. 8.1.7: Распределение по числу сработавших фотодетекторов после применения процедуры режекции. Энергия мюона 10 ТэВ. Сплошная линия – фотодетекторы, сработавшие от шумовых импульсов. Пунктирная – фотодетекторы, сработавшие от черенковских фотонов.

сработавшего фотодетектора от теоретически ожидаемого. Если данное отклонение для фотодетектора превышает 100 нс по абсолютной величине, амплитуда срабатывания < 3 ф.э. и у фотодетектора нет сработавшего соседа на гирлянде, то такой фотодетектор интерпретируется как сработавший не от физического источника и в дальнейшем не используется для анализа. Результат данной процедуры представлен для мюонов от атмосферных нейтрино и для ряда энергий в таблице 8.1.2. Как видно из таблицы относительный вклад шумовых срабатываний

Таблица 8.1.2: Среднее число фотодетекторов в событиях после критерия причинности и отбора по модели плоского фронта.

Энергия	N_{cher}	N_{noise}
Атм.	6.9	1.9
1 ТэВ	5.8	1.7
10 ТэВ	11.5	0.9
100 ТэВ	25.4	1.0

значительно уменьшается, что влечет за собой повышение точности восстановления мюонов.

8.1.5 Процедура восстановления параметров мюонов

Разработанный ранее и используемый при анализе данных NT200 алгоритм восстановления траектории мюонов основан на предположении, что черенковский свет испускается строго под черенковским углом - так называемая модель *голого* мюона. Использование этой модели достаточно эффективно при реконструкции одиночных мюонов с энергией меньше нескольких ТэВ. С

увеличением энергии мюона использование модели голого мюона приводит к понижению точности реконструкции, так как в процессах электромагнитного взаимодействия мюона с веществом воды рождаются дополнительные частицы сопровождения, что приводит к увеличению светового потока от мюона. При этом, фотодетектор, находящийся на фиксированном расстоянии от мюона, видит увеличивающийся с ростом энергии значительный отрезок траектории, а не только небольшую часть траектории, для которой излучение, испущенное под черенковским углом, попадает на фотодетектор. Распределение по времени прихода фотонов на ОМ при увеличении энергии мюона будет изменяться от дельта-функции (для случая модели голого мюона) до квазиэкспоненциального распределения. С целью разработки алгоритма реконструкции траектории мюонов высокой энергии по данным телескопа НТ1000 были рассчитаны распределения по времени прихода фотонов от мюонов различных энергий для различных ориентаций ОМ и различных расстояний от ОМ до мюона. В результате выполненных расчетов было показано, что форма распределений не зависит от ориентации ОМ по отношению к мюону в области до 100–150 нс, где поведение распределения особенно важно.

Далее эти распределения были параметризованы выражением следующего вида:

$$F(t, a, b) = t^a \exp(bt) / (|b|^{(-1+|a|)} \Gamma(1 - |a|)),$$

где t – время в нс, a и b – параметры распределения, зависящие от энергии мюона и расстояния от ОМ до трека мюона. Фитирование временного распределения этим выражением при всех возможных расстояниях от траектории мюона до фотодетектора оказалось достаточно удовлетворительным. Зависимость параметров аппроксимации временных распределений от расстояния для различных энергий является плавной, что позволяет провести интерполяцию параметров для промежуточных расстояний.

Однако, данное распределение не включает в себя джиттер ФЭУ, который с хорошей точностью описывается гауссовским распределением с характерной величиной $\sigma \simeq 2 \div 5$ нс. Конечная функция временного распределения является сверткой $F(t, a, b) \otimes N(t, 0, \sigma)$. В результате, при $s \equiv \sigma$, получаем следующее выражение:

$$FL(t, a, b, s) = \frac{1}{\sqrt{\pi}s\Gamma(1 - |a|)} 2^{-1+\frac{a}{2}} e^{-\frac{t^2}{2s^2}} \left(\frac{1}{s^2}\right)^{\frac{1}{2}(-1-a)} |b|^{1-|a|} \\ \times \left(\Gamma\left[\frac{1+a}{2}\right] H1F1\left[\frac{1+a}{2}, \frac{1}{2}, \frac{(bs^2+t)^2}{2s^2}\right] \right. \\ \left. + \sqrt{\frac{2}{s^2}} (bs^2+t) \Gamma\left[1+\frac{a}{2}\right] H1F1\left[\frac{2+a}{2}, \frac{3}{2}, \frac{(bs^2+t)^2}{2s^2}\right] \right),$$

где $H1F1$ – гипергеометрическая функция $1F1$. Полученные вероятности регистрации фотодетектором сигнала в момент времени t , с учетом джиттера ФЭУ используются при построении функции правдоподобия для всех сработавших ОМ. Поведение вероятностей регистрации фотодетектором, расположенным на расстоянии 10 м от мюона, сигнала в момент времени t для различных значений энергии мюона представлены на рисунке 8.1.8.

Восстановление параметров трека осуществляется максимизацией функций правдоподобия следующего вида:

$$L(\rho, \theta, \phi, E_\mu, t) = \prod_{hit} P_{time}(\rho, \theta, \phi, E_\mu, t) \times \prod_{hit} P_{phit}(\rho, \theta, \phi, E_\mu) \times \prod_{non} P_{pnon}(\rho, \theta, \phi, E_\mu),$$

где $P_{time}(\rho, \theta, \phi, E_\mu, t)$ – временной функционал для сработавших ОМ, $P_{phit}(\rho, \theta, \phi, E_\mu)$ – вероятности срабатывания для сработавших оптических модулей, $P_{pnon}(\rho, \theta, \phi, E_\mu)$ – вероятности

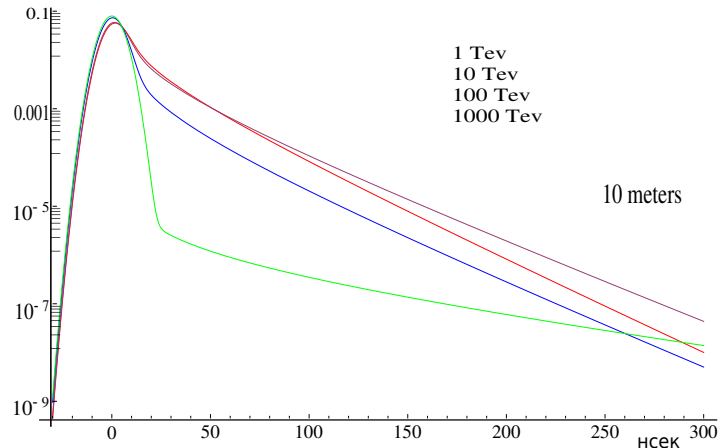


Рис. 8.1.8: Вероятность регистрации сигнала фотодетектором, расположенным на расстоянии 10 м от трека мюона. Зеленая кривая – энергия мюона 1000 ТэВ, синяя – 100 ТэВ, сиреневая – 10 ТэВ, красная – 1 ТэВ.

несработавшим ОМ не быть засвеченными черенковским излучением. В функциях правдоподобия намеренно не используется амплитудная информация, поскольку флуктуационный характер радиационных и фотоядерных процессов, сопровождаемых распространением мюона в среде, вносит дополнительные искажения в модель.

Алгоритм восстановления находится на стадии разработки, поэтому здесь приводятся предварительные результаты по оценке угловой точности восстановления и в качестве сопутствующего результата оценки на точность восстановления энергии мюонов, полученные по описанной выше методике.

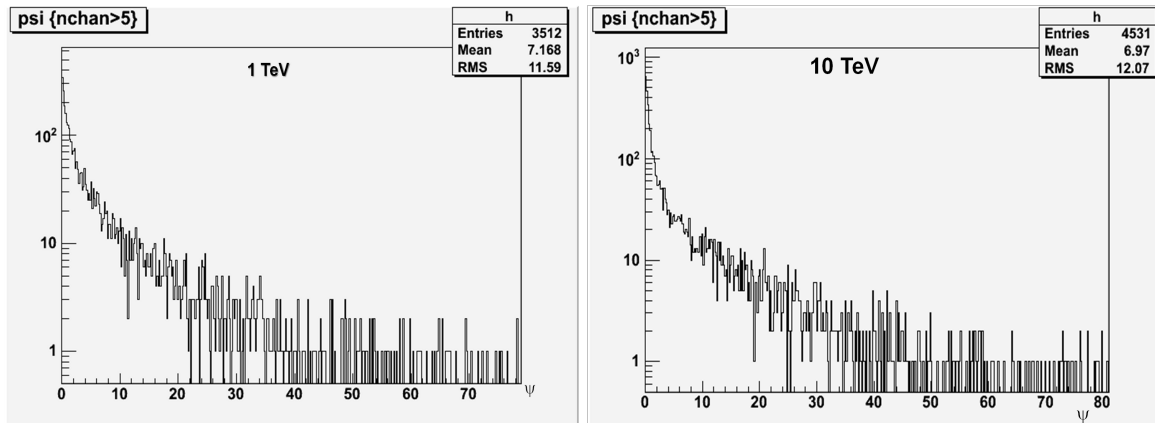


Рис. 8.1.9: Распределение событий по углу ψ между разыгранным и восстановленным треками мюонов для энергии мюона 1 ТэВ и 10 ТэВ.

На Рис.8.1.9 показаны распределения по углу ψ между разыгранным направлением траектории и восстановленным для энергии мюона 1 ТэВ и 10 ТэВ. Как видно из сравнения распределения очень похожи, что говорит о малой зависимости точности восстановления от энергии для данного диапазона. Медиана данных распределений также одинакова и составляет 0.7 градуса. Представленные распределения были получены без каких бы то ни было ограничений на параметры качества восстановления траекторий мюонов и без поиска оптимальных решений, как это делалось при обработке данных телескопа НТ200. Опыт использования таких дополнительных возможностей позволяет прогнозировать точность восстановления мюонных траекторий по данным НТ1000 на уровне 0.4–0.5 градусов в диапазоне энергий мюона от сотен ГэВ до сотен ТэВ.

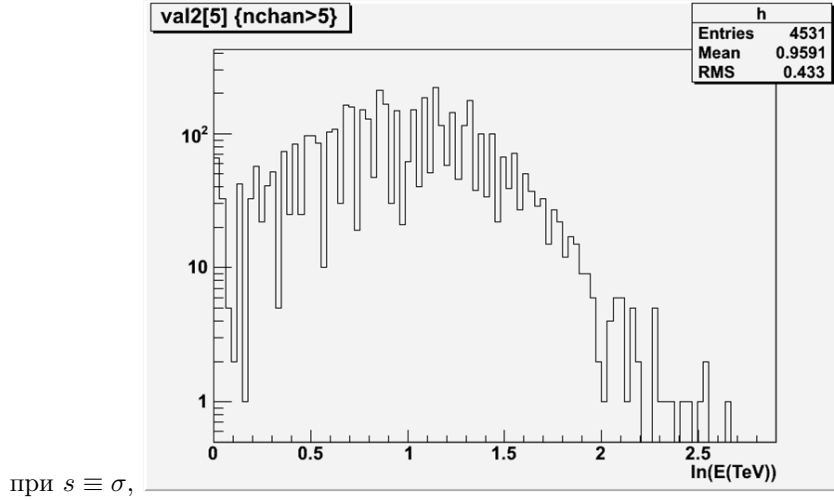


Рис. 8.1.10: Распределение событий от мюонов с энергией 10 ТэВ по восстановленной энергии.

Как уже отмечалось ранее, функция правдоподобия, используемая для восстановления параметров трека, содержит оценку на энергию мюона как параметр. На Рис. 8.1.10 представлено распределение по восстановленной энергии событий от мюона с энергией 10 ТэВ. Несмотря на то, что данный алгоритм не был оптимизирован для восстановления энергии мюонов, полученное распределение по восстановленной энергии является не смещенным по отношению к разыгранной энергии мюона с разрешением на уровне 0.4 по логарифму. Таким образом, описанная процедура восстановления позволяет оценить энергию мюона на весьма удовлетворительном уровне и получить нулевое приближение для специализированного алгоритма восстановления энергии.

8.2 Ливни высоких энергий

Ливни высоких энергий являются источниками черенковского излучения с характерными пространственным, угловым и временным распределениями генерируемых фотонов, которые формируются в процессе развития ливня. Наиболее полно развитие ливня можно воспроизвести МК-моделированием. Однако, эта процедура требует больших затрат машинного времени. При моделировании отклика нейтринных телескопов на черенковское излучение ливней целесообразно использование аналитических аппроксимаций продольного распределения заряженных частиц вдоль оси ливня и универсального углового распределения генерации черенковских фотонов (см., например, [46, 47, 48, 49, 50, 51]). Поперечный размер электромагнитного ливня характеризуется Мольеровским радиусом (для воды $r_m \approx 9.3$ см) и, в связи с его малостью, практически не влияет на отклик ОМ в глубоководных экспериментах.

Полное число черенковских фотонов электромагнитного или адронного ливня пропорционально суммарной длине траекторий заряженных частиц L_{ch} и, соответственно, энергии ливня E_0 :

$$N_{tot}^{ch} = n_{ch} L_{ch} = B E_0, \quad (8.2.1)$$

где n_{ch} – линейная плотность излучения фотонов в рассматриваемом диапазоне длин волн. В частности, в интервале длин волн фотонов 350–600 нм, который является рабочим диапазоном регистрации черенковского излучения оптическими модулями нейтринных телескопов, $n_{ch} = 240$ γ /см. В случае электромагнитного ливня, коэффициент пропорциональности $B = 1.04 \times 10^5 \div$

1.16×10^5 ГэВ⁻¹ в зависимости от варианта МК-расчета [50, 51]. В работе [52] была получена следующая зависимость суммарной длины траекторий L_{ch} от энергии адронного ливня:

$$L_{ch} = 625f(\epsilon) \frac{E_0}{1 \text{ ГэВ}} \text{ см}, \quad \epsilon = \lg(E_0/1 \text{ ТэВ}), \quad (8.2.2)$$

$$f(\epsilon) = -1.27 \cdot 10^{-2} - 4.76 \cdot 10^{-2}(\epsilon + 3) - 2.07 \cdot 10^{-3}(\epsilon + 3)^2 + 0.52\sqrt{\epsilon + 3}.$$

Соответственно, коэффициент пропорциональности B описывается выражением:

$$B = 0.86 \cdot 625 \cdot f(\epsilon) n_{ch} \text{ ГэВ}^{-1}, \quad (8.2.3)$$

где множитель 0.86 согласно [50] учитывает уменьшение величины n_{ch} для нерелятивистских электронов в адронном ливне.

Число черенковских фотонов $N_{ch}(x, \theta, t) dx d\vec{\Omega} dt$, испущенных в момент времени t с интервала dx вдоль оси ливня в окрестности точки x в элементе телесного угла $d\vec{\Omega}$ под углом θ к оси ливня, с достаточной степенью точности может быть представлено в виде:

$$N_{ch}(x, \theta, t) dx d\vec{\Omega} dt \simeq N_{e^\pm}(x) \Psi_{ch}(\theta) n_{ch} \delta(t - x/c) dx d\vec{\Omega} dt, \quad (8.2.4)$$

где $N_{e^\pm}(x)$ – плотность электронов и позитронов вдоль оси ливня, $\Psi_{ch}(\theta)$ – угловое распределение черенковских фотонов в области соответствующей максимуму каскадной кривой, n_{ch} – линейная плотность черенковского излучения. В случае электромагнитных ливней нами используется аналитическая аппроксимация $N_{e^\pm}(x)$ ($E_0 > 5$ ГэВ), предложенная Беленьким в работе [46]:

$$N_{e^\pm}(x) = \left(\frac{E_0}{E_c} \right)^S S^{-1.5x} \exp(-2.49S + 0.5(S-1)x + 0.025), \quad (8.2.5)$$

$$S = \frac{3x}{x + 2 \ln(E_0/E_c) - 2.4}, \quad E_c = 72 \text{ МэВ}.$$

В случае адронных ливней используется аппроксимация распределения $N_{e^\pm}(x)$, предложенная в работах [39, 53] и имеющая следующий вид:

$$N_{e^\pm}(x) = S_0 \frac{E_0}{E_c} \left(1 - \frac{\lambda}{x_{max}} \right) \exp \left(\frac{x_{max} - x \cdot x_0}{\lambda} - 1 \right) \left(\frac{x \cdot x_0}{x_{max} - \lambda} \right)^{\frac{x_{max}}{\lambda}} \quad (8.2.6)$$

где $x_{max} = x_r \ln(E_0/E_c)$, $x_0 = 36.1$ см, а значения параметров S_0 , x_r , λ и E_c , полученные из сравнения (15) с МК-расчетом, приведены в таблице 8.2.1.

Таблица 8.2.1: Значения параметров, используемых в выражении (8.2.6) [53].

Начальная частица	Протон	Пион	Каон
S_0	0.11842	0.036684	0.0298
x_r (г см ⁻²)	39.562	36.862	36.997
λ (г см ⁻²)	113.03	115.26	119.61
E_c (ГэВ)	0.17006	0.052507	0.048507

Выражение (8.2.5) является удовлетворительной аппроксимацией пространственного распределения частиц электромагнитного ливня в области энергий порядка нескольких ПэВ и ниже. При больших энергиях при расчете распределения $N_{e^\pm}(x)$ необходимо учитывать уменьшение сечения тормозного излучения электронов и сечения образования e^+e^- пар за счет коллективного влияния атомов среды (эффект Ландау, Померанчука, Мигдала [54, 55, 56]).

В работе [57] на основе МК-моделирования электромагнитных ливней исследовано влияние LPM-эффекта на продольное распределение $N_{e^\pm}(x)$. Основные выводы, полученные авторами, заключаются в следующем: LPM-эффект практически не влияет на суммарную длину траекторий частиц ливня, которая остается пропорциональной его энергии; пространственное распределение частиц в окрестности максимума каскадной кривой существенно уширяется, но число частиц в максимуме уменьшается; отличие в форме продольного распределения $N_{e^\pm}(x)$ от аппроксимаций, справедливых при низких энергиях, становится существенным, начиная с энергии порядка 20 ПэВ. Выше этой энергии длина ливня (например, длина ливня на уровне $0.1N_{max}$) растет с ростом энергии пропорционально $E_0^{1/3}$.

Относительное угловое распределение черенковских фотонов, просуммированное по траекториям всех заряженных частиц ливня, $\Psi_{ch}(\theta)$ (см. рис. 8.2.1 и [58]) при $E_0 > 100$ ГэВ практически не зависит от энергии ливня [34]. Угловые распределения черенковских фотонов, испущенных с разных участков ливня в области максимума каскадной кривой, незначительно отличаются от суммарного распределения $\Psi_{ch}(\theta)$ [51], что позволяет использовать $\Psi_{ch}(\theta)$ в качестве универсального углового распределения черенковских фотонов, испускаемых с любого участка ливня.

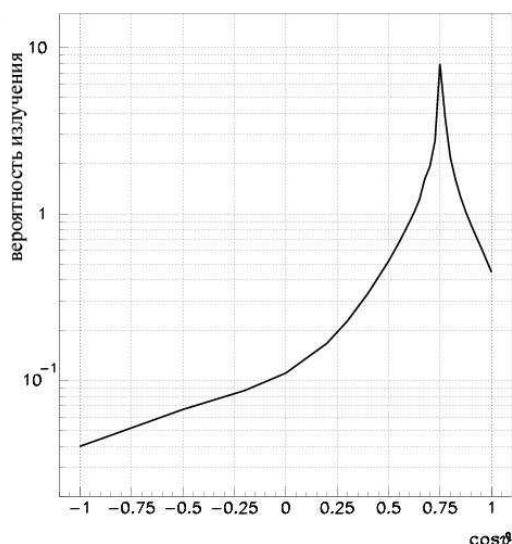


Рис. 8.2.1: Суммарное по всем траекториям e^\pm угловое распределение черенковского излучения от электромагнитных ливней высоких энергий.

Таким образом, число черенковских фотонов, испускаемых с участка вдоль оси ливня Δx в окрестности x , можно представить в следующем виде:

$$N_{ch}(x, \Delta x, \theta, t) = BE_0 \Psi_{ch}(\theta) \delta(t - x/c) \int_{x-\Delta x}^{x+\Delta x} \bar{N}_{e^\pm}(x') dx', \quad (8.2.7)$$

где $\bar{N}_{e^\pm}(x)$ – нормированное на единицу распределение e^\pm вдоль ливня, описываемое аппроксимацией (8.2.5) в случае электромагнитного ливня, либо аппроксимацией (8.2.6) для адронных ливней.

Алгоритм моделирования процесса генерации черенковского излучения ливней высоких энергий выглядит следующим образом. Продольная длина ливня разбивается на элементарные отрезки Δl и ливень рассматривается как суперпозиция точечных источников черенковского излучения, расположенных в центре каждого отрезка Δl , с интенсивностью $N_{ch}(l, \Delta l, \theta, t)$, полученной из (8.2.7).

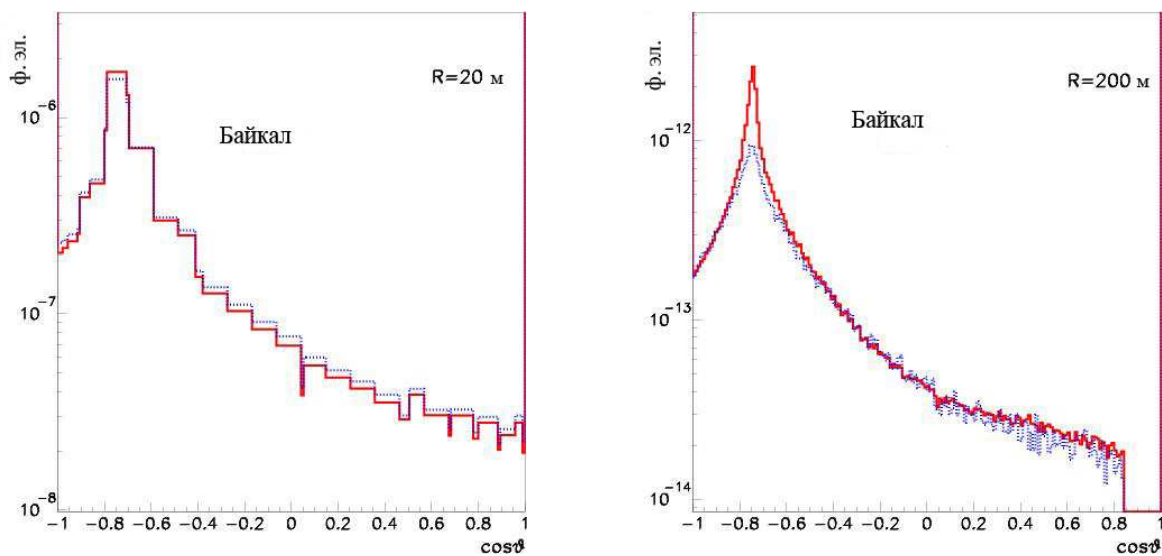


Рис. 8.2.2: Отклик сферического оптического модуля, расположенного на расстоянии $R = 20$ м (левая панель) и $R = 200$ м (правая панель). Сплошная и пунктирная гистограммы соответствуют моделированию без учета и с учетом рассеяния света в воде.

8.2.1 Распространение черенковского излучения ливней высоких энергий в воде и моделирование отклика оптического модуля на это излучение

Распространение черенковского излучения ливней от источника до фотоприемника обусловлено процессами поглощения и рассеяния света в воде. Характерной особенностью процесса генерации черенковского излучения ливнями высоких энергий является ярко выраженная анизотропия углового распределения фотонов. В среде без рассеяния анизотропия диаграммы излучения источника обуславливает анизотропию пространственно-углового распределения фотонов в среде. Рассеяние света в среде в общем случае приводит к искажению пространственного, углового и временного распределения фотонов по сравнению с распределением в среде без рассеяния. На Рис. 8.2.2 в качестве иллюстрации степени анизотропии пространственного распределения фотонов приводятся проинтегрированные по времени распределения среднего числа фотоэлектронов в зависимости от косинуса угла θ в гипотетическом фотоприемнике, идентичном по своим параметрам фотоприемнику байкальского телескопа, но обладающего равномерной угловой чувствительностью. Фотоприемники расположены на расстояниях $R = 20$ м и $R = 200$ м от точечного ливня единичной мощности. Полярный угол θ отсчитывается от направления, противоположного направлению оси ливня. Как видно из этих рисунков пространственное распределение сохраняет ярко выраженный пик, обусловленный анизотропией углового распределения черенковского излучения ливней на расстояниях вплоть до 200 и более метров от источника. По сравнению со случаем без рассеяния пространственное распределение на достаточно больших расстояниях от ливня уширяется, а число фотонов в максимуме распределения на расстояниях порядка 100 м и 200 м уменьшается, соответственно, примерно в 2 и 3 раза.

В средах с малым рассеянием и острой индикатрисой, к которым относится байкальская вода, проинтегрированное по времени угловое распределение черенковских фотонов от локального источника (например, точечного ливня) в любой пространственной точке имеет ярко выраженный максимум в направлении от источника, формируемый не рассеявшимися (прямыми), либо рассеявшимися на малые углы фотонами. В результате, отклик оптического модуля байкальского телескопа, ориентированного на источник, в 50–100 раз превышает отклик ОМ, отвернутого от источника. Благодаря достаточно широкому углу обзора фотодетекторов на базе больших полусферических фотоумножителей, подавляющая часть оптических модулей телескопа, срабо-

тавших от черенковского излучения ливня, регистрирует прямые, либо рассеявшиеся на малые углы фотоны.

Основными факторами, влияющими на формирование временного распределения черенковского излучения ливней в окрестности фотодетектора, являются: спектральная зависимость скорости света и показателя поглощения, рассеяние света в воде и пространственная протяженность ливня. При ориентациях ОМ на ливень (в модели точечного источника), когда основной вклад в отклик дают нерассеявшиеся фотоны, временное распределение обусловлено спектральной зависимостью скорости света и показателя поглощения. Ширина временного распределения в этом случае составляет 4–12 нс в зависимости от расстояния до ливня. Влияние рассеяния при ориентации ОМ на ливень начинает сказываться на расстояниях $R > 100$ м и растет с ростом R , понижая величину максимума и уширяя временное распределение по сравнению со случаем без рассеяния. В байкальской воде в случаях таких ориентаций ОМ, когда отклик, в основном, формируется нерассеявшимися фотонами ливня, степень влияния размера ливня на временное распределение зависит от взаимного расположения ливня и ОМ. В тех случаях, когда ОМ находится перед ливнем, влияние размера ливня на временное распределение незначительно и ливень можно рассматривать как точечный источник, расположенный в области, соответствующей максимуму каскадной кривой. Используя временную информацию оптических модулей из этой пространственной области, можно с хорошей точностью восстанавливать координаты ливня в модели точечного источника. В случае, когда ОМ расположен в области позади ливня, временное распределение фотонов в точке регистрации зависит от энергии ливня и его удаленности от фотодетектора и может привести к довольно существенному уширению временного распределения.

Перечисленные выше характерные особенности процессов генерации и распространения черенковского излучения в байкальской воде с одной стороны, и функциональные особенности фотодетекторов, используемых в нейтринных телескопах, с другой позволяют реализовать достаточно эффективный алгоритм восстановления параметров ливней высоких энергий с использованием временной и амплитудной информации фотодетекторов нейтринного телескопа. Данный алгоритм основан на сравнении экспериментальной информации с ожидаемым амплитудно-временным откликом телескопа и предполагает детальное моделирование процессов излучения, распространения и регистрации черенковских фотонов ливней. МК-моделирование проводится с помощью стандартного пакета расчетных программ Байкальской коллаборации. Одной из определяющих частей этого расчетного инструментария является пакет программ, позволяющий рассчитать временное распределение среднего числа фотоэлектронов в фотодетекторе в зависимости от его пространственного положения и ориентации по отношению к ливню. В результате расчета формируется пятимерный массив значений среднего числа фотоэлектронов $\bar{n}_{pe}(\rho, z, \theta, \varphi, \tau)$ в объеме порядка 10^8 м³ вокруг ливня. Переменные ρ и z характеризуют положение оптического модуля относительно точечного ливня - расстояние до модуля от оси ливня ρ и координата вдоль оси \vec{z} , ориентированной в направлении, обратном направлению оси ливня. Полярный угол θ , отсчитываемый от направления совпадающего с направлением \vec{z} , и азимутальный угол φ характеризуют взаимную ориентацию оптического модуля и ливня. Переменная τ характеризует временную задержку регистрируемых фотонов относительно времени прихода прямых фотонов.

8.2.2 Восстановление параметров ливней высоких энергий по данным нейтринного телескопа

Восстановление координат ливня

Процедура восстановления параметров ливней высоких энергий - энергии, направления ливня и координат ливня - осуществляется в два этапа. На первом этапе проводится восстановление координат ливня \vec{r}_{sh} с использованием временной информации сработавших фотодетекторов телескопа. При этом предполагается, что ливень является точечным источником света. В качестве координат ливня (x, y, z , в прямоугольной системе координат, либо r, θ, φ , в сферической системе координат) выбираются значения параметров, соответствующие минимальному значению функционала:

$$\chi_t^2 = \frac{1}{(N_{hit} - 4)} \sum_{i=1}^{N_{hit}} \frac{(T_i(\vec{r}_{sh}, t_0) - t_i)^2}{\sigma_{ti}^2}, \quad (8.2.8)$$

где t_i - время i -ого сработавшего фотодетектора, T_i - теоретически ожидаемое время срабатывания i -ого фотодетектора, t_0 - время зарождения ливня, σ_{ti} - неопределенность измерения времени, N_{hit} - число сработавших фотодетекторов в событии. Как уже отмечалось ранее, в случае детектирования черенковского излучения ливней высоких энергий в байкальской воде, основная доля фотодетекторов срабатывает от прямых фотонов либо от фотонов, рассеявшихся на малые углы. Это обстоятельство существенно упрощает процедуру восстановления координат ливней. А именно, в качестве теоретически ожидаемого времени T_i может быть выбрано время распространения прямых фотонов от ливня до соответствующего фотодетектора. Качество восстановления может быть повышено путем применения дополнительных критериев отбора событий, основанных на ограничении допустимых значений специально выбранных параметров, характеризующих события.

Восстановление энергии и направления развития ливня

На втором этапе проводится восстановление энергии и направления развития ливня с применением метода максимального правдоподобия и с использованием восстановленных на первом этапе координат ливня. В качестве полярного и азимутального углов, характеризующих направление развития ливня, и энергии ливня выбираются значения переменных θ, φ и E_{sh} , соответствующие минимальному значению функционала:

$$L_A = - \sum_{i=1}^{N_{hit}} \ln p_i(A_i, E_{sh}, \vec{\Omega}_{sh}(\theta, \varphi)). \quad (8.2.9)$$

Функции $p_i(A_i, E_{sh}, \vec{\Omega}_{sh}(\theta, \varphi))$ представляют собой вероятности регистрации сигнала с амплитудой A_i (измеряемой в фотоэлектронах) от ливня с энергией E_{sh} и направлением оси $\vec{\Omega}_{sh}$ i -ым сработавшим фотодетектором телескопа и имеют следующий вид:

$$p_i = \sum_{n=1}^{\infty} P(n/\bar{n}) \int_{A_i - \frac{\alpha}{2}}^{A_i + \frac{\alpha}{2}} \xi_i(A, n) dA, \quad (8.2.10)$$

где $P(n/\bar{n})$ - вероятность регистрации n фотоэлектронов при среднем \bar{n} для распределения Пуассона, $\xi(A, n)$ - плотность вероятности регистрации амплитуды A при уровне засветки в n фотоэлектронов, α - цена деления амплитудного кодировщика в фотоэлектронах. Средние значения \bar{n} определяются в результате моделирования откликов оптических модулей телескопа на черенковское излучение ливня с энергией E_{sh} и направлением развития ливня $\vec{\Omega}_{sh}$ с учетом

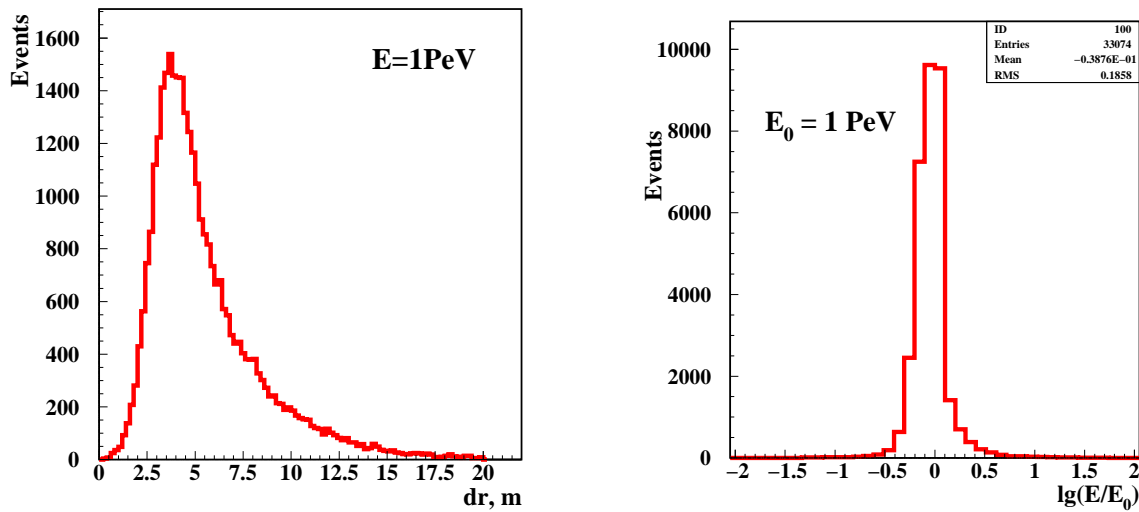


Рис. 8.2.3: Левая панель – разность координат восстановленной и разыгранной вершин ливня. Правая панель – распределение логарифма отношения восстановленной к разыгранной энергий ливней.

распространения света в воде, относительного расположения и ориентации оптических модулей и ливня и эффективной чувствительности оптических модулей.

8.2.3 Энергетическое и угловое разрешение НТ1000 относительно регистрации ливней высоких энергий

Как уже отмечалось ранее, эффективность исследования природных потоков нейтрино зависит как от чувствительности нейтринного телескопа, так и от разрешающей способности телескопа по отношению к измерению энергии и направления распространения вторичных мюонов и ливней. С целью исследования энергетического и углового разрешения базовой конфигурации телескопа по отношению к регистрации ливней высоких энергий было выполнено моделирование отклика телескопа в данной конфигурации на черенковское излучение ливней с последующим восстановлением энергии, направления и координат вершины ливней.

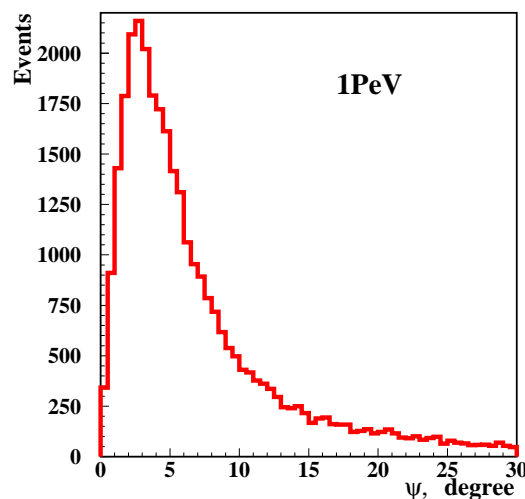


Рис. 8.2.4: Распределение событий по углу ψ между разыгранным и восстановленным направлениями развития ливней.

Рисунки 8.2.3–8.2.4 иллюстрируют эффективность восстановления координат, энергии и на-

правления развития ливней высоких энергий. На рисунке 8.2.3 (левая панель) представлено распределение событий по переменной $dr = |\vec{r}_{rec} - \vec{r}|$, где \vec{r} и \vec{r}_{rec} – разыгранные и восстановленные координаты вершины ливня с энергией $E_{sh} = 10^6$ ГэВ относительно центра телескопа. Среднее значение этого распределения составляет 5.5 м. Распределение событий по логарифму отношения восстановленной к разыгранной энергии ливня с энергией $E_{sh} = 10^6$ ГэВ приводится на рисунке 8.2.3 (правая панель). Точность восстановления энергии ливня в логарифмическом масштабе

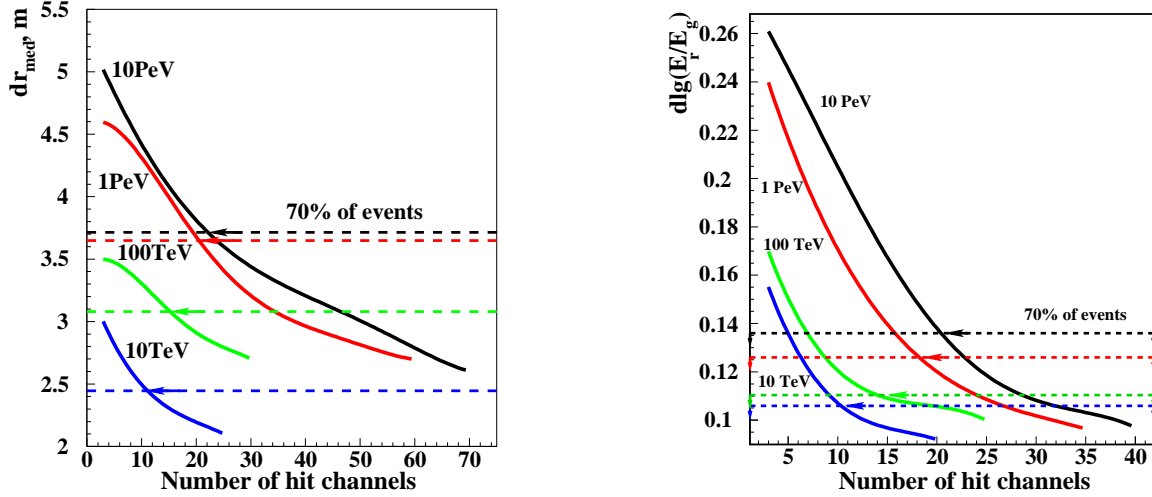


Рис. 8.2.5: Левая панель – зависимость медианного значения распределений разности восстановленных и разыгранных координат вершины ливня для разных энергий ливней. Правая панель – зависимость дисперсии распределения логарифма отношения восстановленной энергии ливня к разыгранной от числа сработавших фотодетекторов в событии для разных энергий ливней.

составляет 19–21%. Распределение событий по углу ψ между разыгранным и восстановленным направлениями ливней с энергией $E_{sh} = 10^6$ ГэВ приводится на рисунке 8.2.4. Медианный угол этого распределения равен 4.5° , а средний угол равен 6.2° .

Эффективность восстановления параметров ливней зависит от числа сработавших фотодетекторов N_{hit} в зарегистрированном событии, которое растет с ростом энергии ливня. На рисунке 8.2.5 (левая панель) приводятся медианные значения распределений разности разыгранных и восстановленных координат вершины ливня в зависимости от числа сработавших фотодетекторов для четырех значений энергии ливня (значения энергий приводятся на Рис. 8.2.5 около соответствующих распределений). Из этого рисунка видно, что точность восстановления координат улучшается с увеличением числа сработавших фотодетекторов. Точность восстановления координат вершины ливня для 70% событий составляет порядка 2–4 метров в зависимости от энергии ливня. Результаты исследования энергетического разрешения обсуждаемой конфигурации иллюстрирует рисунок 8.2.5 (правая панель), на котором представлена зависимость дисперсии распределений логарифма отношения восстановленной энергии ливня к разыгранной от числа сработавших фотодетекторов для разных энергий ливней. Точность восстановления логарифма энергии ливня для 70% событий составляет 8–13% или 20–35% по энергии ливня. Зависимость медианного угла между разыгранным и восстановленным направлениями ливня от числа сработавших фотодетекторов приводится на рисунке 8.2.6. Это распределение практически не зависит от энергии ливня. Точность восстановления направления ливня для 70% событий составляет 5–7 градусов.

Таким образом, конфигурация телескопа, выбранная в результате оптимизационных расчетов, обладает энергетическим и угловым разрешением, адекватным требованиям исследований энергетического спектра, глобальной и локальной анизотропии и состава по типам нейтрино

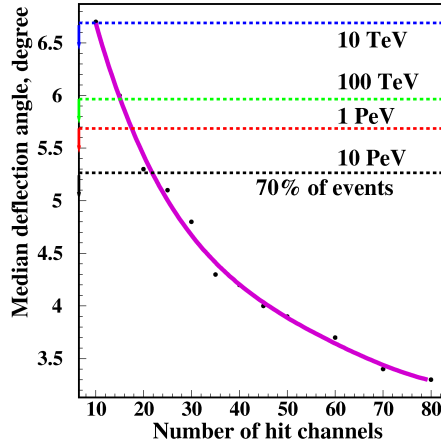


Рис. 8.2.6: Зависимость медианного угла ψ_{med} между разыгранным и восстановленным направлениями развития ливней от числа сработавших фотодетекторов в событии.

природных нейтринных потоков.

8.3 Эффективность регистрации нейтринных потоков

Эффективность регистрации потока нейтрино астрофизической природы телескопом НТ1000 зависит, помимо эффективности регистрации вторичных ливней самой установкой, также от формы энергетического спектра нейтрино и направления их прихода на установку. Нейтринный поток достигающий окрестности телескопа из направлений снизу вверх испытывает ослабление и трансформацию первичного энергетического спектра при прохождении сквозь Землю. Причем степень искажения потока различна для разных типов нейтрино и зависит от зенитного угла распространения нейтрино. На Рис. 8.3.1 (левая панель) приводится эффективная площадь регистрации изотропного потока электронных нейтрино фиксированной энергии E_ν телескопом НТ1000 в зависимости от начальной энергии нейтрино для различных диапазонов зенитных углов. При энергиях выше 100 ТэВ поток из-под горизонта подавлен за-счет взаимодействия нейтрино с веществом Земли.

Эффективность регистрации природного нейтринного потока зависит от формы первичного энергетического спектра. На Рис. 8.3.1 (правая панель) приводится усредненная по зенитному углу вероятность регистрации от первичной энергии электронных нейтрино для различных степенных спектров. Показатели степенных спектров приводятся возле соответствующих распределений. Эффективный диапазон энергий регистрации нейтрино сдвигается в область более высоких энергий по мере уменьшения показателя спектра.

На рисунке 8.3.2 приводятся ожидаемые распределения событий по энергии нейтрино и вторичных ливней регистрируемых в НТ1000 для изотропного степенного спектра $10^{-7}E^{-2}$ ГэВ $^{-1}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$ стер $^{-1}$. В предположении об отсутствии сигнала и ожидаемых фоновых событий за время набора данных в течение одного года телескопом НТ1000 предел на суммарный поток по всем типам нейтрино со спектром E^{-2} на 90% уровне достоверности составит $E^2F = 1.5 \times 10^{-8}$ ГэВ см $^{-2}$ с $^{-1}$ стер $^{-1}$.

В задаче поиска локальных источников нейтрино по регистрации мюонных нейтрино при энергетическом спектре E_ν^{-2} характерном для ускорения космических лучей в модели Ферми ожидаемый результат в предположении об отсутствии сигнала за год накопления данных составит, на 90% уровне достоверности, $E^2dF/dE = 6 \cdot 10^{-12}$ ТэВ см $^{-2}$ с $^{-1}$ для склонений от -90° до

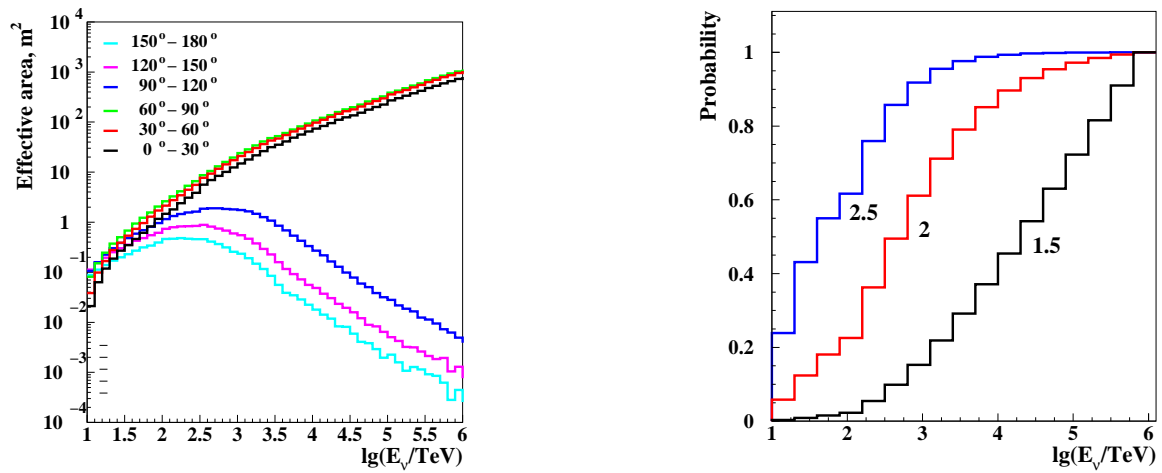


Рис. 8.3.1: Левая панель – эффективная площадь регистрации в зависимости от направления нейтрино. Правая панель – вероятность регистрации в зависимости от энергии нейтрино для разных показателей энергетического спектра.

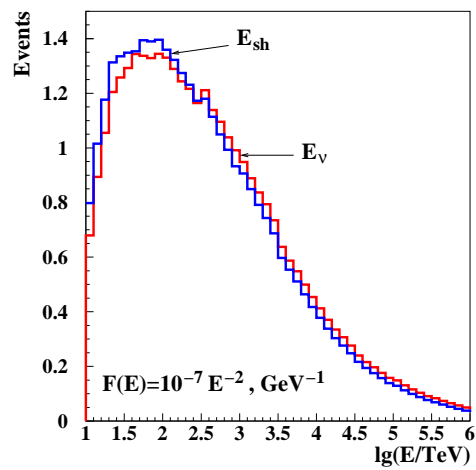


Рис. 8.3.2: Распределение ожидаемых событий от электронных нейтрино в зависимости от энергии нейтрино и вторичных ливней.

–38°.

Настоящая работа выполнена при участии специалистов DESY (Германия) и РИЦ "Курчатовский институт и финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (ГК 02.740.11.0018, ГК 02.518.11.7158, П1242, П2504, П133, П878, П1146, РНП 2.2.1.1/1483, РНП 2.1.1/1539, РНП 2.2.1.1/5901, РЕЦ "БАЙКАЛ") и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 08-02-00432, 08-02-00198, 09-02-00623, 09-02-12295, 10-02-10007).

Литература

1. Markov M. A. On high energy neutrino physics // Proc. 1960 Annual Int. Conf. on High Energy Phys. Rochester: 1960. Pp. 572–575.
2. Березинский . ., Зацепин . . Возможности экспериментов с космическими нейтрино очень высоких энергий: проект ДЮМАНД // УФН. 1977. Т. 122, № 1(500). С. 1–36.
3. Learned J., Mannheim K. High-energy neutrino astrophysics // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2000. Vol. 50. Pp. 679–749.
4. Spiering C. High energy neutrino astronomy: status and perspectives // AIP Conf. Proc. Vol. 1085. 2009. Pp. 18–29.
5. Fukuda Y., Hayakawa T., Ichihara E. et al. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 81. P. 1562.
6. Dirac P.-A. M. // Proc. Roy. Soc. 1931. Vol. A133. P. 60.
7. Франк . . Излучение Вавилова-Черенкова. Москва: Наука, 1988. С. 192.
8. t'Hoofst G. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1974. Vol. 79. P. 276.
9. Polyakov A. // JETP Lett. 1974. Vol. 20. P. 194.
10. Домогацкий . ., Железных . . // Ядерная физика. 1969. Т. 10. С. 1238.
11. Рубаков . . // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33. С. 658.
12. Callan C. G. // Phys. Rev. D. 1982. Vol. 26. P. 2058.
13. Безруков . . и др. // Ядерная физика. 1990. Т. 52. С. 86.
14. The Baikal Neutrino Telescope NT-200. Project Description: Tech. rep. Moscow: INR RAS, 1992.
15. Аврорин . ., Айнутдинов . ., Балканов . . и др. Байкальский глубоководный нейтринный телескоп NT-200+. Препринт ИЯИ РАН 1265/2010, 2010. С. 1–23.
16. Andres E., Askebjerg P., Barwick S. W. et al. The AMANDA neutrino telescope: principle of operation and first results // Astroparticle Phys. 2000. Vol. 13. P. 1.
17. Circella M. et al. // Nucl. Inst. & Meth. A. 2009. Vol. 602. P. 1.
18. Abbasi R. et al. // Nucl. Inst. & Meth. A. 2009. Vol. 601. P. 294.
19. Katz U. F. // Nucl. Inst. & Meth. A. 2009. Vol. 602. P. 40.
20. Proc. 1976 DUMAND Summer Workshop / Ed. by A. Roberts. Honolulu: 1977.

21. Proposal for a deep ocean neutrino detector: Tech. Rep. HDC-2-88: Univ. Hawaii Press, 1988. DUMAND Collaboration.
22. Bolest J. W. et al. // Proc. 25-th ICRC Durban. Vol. 7. 1997. P. 29.
23. Balkanov V., Bezrukov L., Belolaptikov I. et al. Simultaneous measurements of water optical properties by AC9 transmissometer and ASP-15 inherent optical properties meter in Lake Baikal // Nucl. Inst. & Meth. A. 2003. Vol. 498. Pp. 231–239.
24. Bagduev R. I., Balkanov V., Belolaptikov I. A. et al. The optical module of the Baikal deep underwater neutrino telescope // Nucl. Inst. & Meth. A. 1999. Vol. 420. Pp. 138–154.
25. Pelevin V. N., Prokudina T. M. Determination of the value of the absorption coefficient of light in sea water from light field parameters of a point like isotropic source // Ocean and atmospheric optics. Leningrad: 1972. P. 148.
26. Тарашанский . ., Миргазов . ., Почейкин . . Стационарный глубоководный измеритель гидрооптических характеристик «Бурхан» // Оптика океана и атмосферы. 1995. Т. 8, № 5. С. 771–774.
27. Pelevin V. N., Rostovseva V. V. // Atm. Oceanic Opt. 1997. Vol. 10. P. 989.
28. Tam A. C., Patel K. N. // Appl. Opt. 1979. Vol. 18. P. 3348.
29. Budnev N. M., Kokhanenko G. P., Krekova M. M. et al. Measurements of hydrosol scattering asymmetry by use of light field from a point source // Atm. Oceanic Opt. 2005. Vol. 18, no. 1–2.
30. Проект НТ-200+: Тех. доклад. Москва: ИЯИ РАН, 2002.
31. Домогацкий . ., Никифоров . ., Панфилов . ., Розанов . . Подводные несущие конструкции и донные кабельные линии глубоководного нейтринного телескопа НТ-200 на озере Байкал: Технический проект НТ200М.00.000: Государственный морской технический университет Санкт-Петербурга (ГМТУ), 1995.
32. Тамм . ., Франк . . // J. Phys. USSR. 1939. Vol. 1. P. 439.
33. Kuzmichev L. A. On the velocity of light signals in the deep underwater neutrino experiments // Nucl. Inst. & Meth. A. 2001. Vol. 482. Pp. 304–306.
34. Белолаптиков . . Дипломная работа, МИФИ, Москва, 1987.
35. Capdevielle J. et al. The Karlsruhe extensive air shower simulation code CORSIKA: KfK Report 4998. Karlsruhe: Kernforschungszentrum, 1992.
36. Калмыков . ., Остапченко . . // Ядерная физика. 1993. Т. 56. С. 105.
37. Wiebel-Sooth B., Biermann P. Cosmic Rays. 1999.
38. Волкова . ., Зацепин . ., Кузьмичев . . // Ядерная физика. 1980. Vol. 29. P. 1252.
39. Gaisser T. Cosmic Rays and Particle Physics. Cambridge University Press, 1990.
40. Agrawal V., Gaisser T., Lipari P., Stanev T. Atmospheric neutrino flux above 1 GeV // Phys. Rev. D. 1996. Vol. 53. P. 1314.
41. Lai H. L. et al. Improved parton distributions from global analysis of recent deep inelastic scattering and inclusive jet data // Phys. Rev. D. 1997. Vol. 55. P. 1280.

42. Sokalsky I. A., Bugaev E. V., Klimushin S. I. MUM: Flexible precise Monte Carlo algorithm for muon propagation through thick layers of matter // *Phys. Rev. D.* 2001. Vol. 64. P. 074015.
43. Honda M. et al. // *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 1996. Vol. 123. P. 483.
44. Belolaptikov I. A., Bezrukov L. B., Borisovets B. A. et al. The Baikal underwater neutrino telescope: Design, performance and first results // *Astroparticle Phys.* 1997. Vol. 7. Pp. 263–282.
45. Джилкибаев .-. . Влияние оптических параметров среды на эффективность регистрации одиночных мюонов в глубоководных экспериментах.: Препринт. Москва: ИЯИ РАН, 2001.
46. Беленький . . Каскадные процессы в космических лучах. Москва: Гостехиздат, 1948.
47. Greisen K. *Progress in Cosmic Ray Physics*, Ed. by J. Wilson. Amsterdam: North-Holland, 1956. Vol. 3. P. 3.
48. Hillas A. Angular and energy distributions of charged particles in electron photons cascades in air // *J. Phys.* 1982. Vol. G8. Pp. 1461–1473.
49. Fenyves E. et al. Electromagnetic components of 10^{14} – 10^{16} eV air showers // *Phys. Rev. D.* 1988. Vol. 37. P. 649.
50. Wiebusch C. Detection of faint light in deep underwater neutrino telescope: Ph.D. thesis. Aachen, Germany, 1995.
51. Bezrukov L., Butkevich A. Fast simulation of the Cherenkov light from showers // *Proc. of workshop “Simulation and Analysis Methods for Large Neutrino Telescopes”* / Ed. by Ch.Spiering; DESY Zeuthen. Germany: 1998.
52. Alvarez-Muniz J., Zas E. The LPM effect for EeV hadronic showers in ice: implications for radio detection of neutrinos // *Phys. Lett. B.* 1998. Vol. 434. Pp. 396–406.
53. Alvarez-Muniz J., Zas E. EeV hadronic showers in ice: the LPM effect. 1999. URL: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9906347>.
54. Ландау ., Померанчук . // *Доклады Академии Наук СССР.* 1953. Т. 92, № 3. С. 535.
55. Ландау ., Померанчук . // *Доклады Академии Наук СССР.* 1953. Т. 92, № 4. С. 735.
56. Migdal A. Bremsstrahlung and pair production in condensed media at high energies // *Phys. Rev.* 1956. Vol. 103, no. 6. Pp. 1811–1820.
57. Alvarez-Muniz J., E.Zas. Cherenkov radio pulses from EeV neutrino interactions: the LPM effect // *Phys. Lett. B.* 1997. Vol. 411. Pp. 218–224.
58. Belyaev A., Ivanenko I., Makarov V. // *Proc. of the 1978 DUMAND Summer Workshop* / Ed. by A. Roberts. Vol. 1. 1979. P. 337.