

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
 НАУКИ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
 РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 520
 № госрегистрации 01201169228
 Инв. №7056-4

«УТВЕРЖДАЮ»
 Заместитель директора ИЯИ РАН
 Д.В.Кравчук
 " — " 2012 г.


ОТЧЕТ
 О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
 по теме:


«Развитие экспериментальной базы Байкальского глубоководного
 нейтринного телескопа (УСУ-БГНТ) для исследований свойств окружающей
 среды и природы космических объектов методами нейтринной астрофизики»

Шифр «2011-1.8-518-005-073»

(заключительный)

Этап 4 : «Обобщение и оценка результатов исследований»
 (государственный контракт №16.518.11.7056 от 12.05.2011г.)

Руководитель темы,
 член-корр. РАН

 Г.В.Домогацкий

« » 2012 г.

Москва 2012

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы Домогацкий Г.В. (введение, раздел 1, 2, 3, 4, 5, 6)
 эл.-корр. РАИ

Исполнители темы:

с.п.с. к.ф.-м.п.	<u>Айнутдинов В.М.</u>	Разделы 1,2,3,4,5,6
в.п.с. д.ф.-м.п.	<u>Ж.-М.Дркин-Кибдеев</u>	Раздел 1,2,3,4,5,6
п.с., к.т.д.	<u>А.М.Клабуков</u>	Раздел 1,2
инж.-микроп.	<u>А.П.Копечкин</u>	Раздел 1,2
вед. инженер	<u>А.И.Папфилов</u>	Раздел 5
в.с. д.ф.-м.п.	<u>О.Н.Гапоненко</u>	Раздел 1,2
инж.	<u>К.В.Голубков</u>	Раздел 2
Нач. установки	<u>А.В.Аврорин</u>	Составление отчета
Зам. Зав.	<u>П.А.Айранетова</u>	Приложения, оформление
Лабораторией.		
С.п.с. к.ф.-м.п.	<u>В.А.Жуков</u>	Раздел 1,2
С.п.с. к.ф.-м.п.	<u>В.И.Ляшук</u>	Раздел 1,2
п.с.	<u>И.А.Белозапечников</u>	Раздел 1,2,3,4,5,6 (ОИЯИ)
мл.п.с.	<u>Е.Н.Писковский</u>	Раздел 1,2 (ОИЯИ)
с.н.с., к.ф.-м.п.	<u>Э.А.Осипова</u>	Раздел 1,2,3 (НИИЯФ МГУ)
директор, д.ф.-м.п.	<u>И.М.Буднев</u>	Раздел 1,3 (НИИЯФ ИГУ)

Молодые специалисты

п.с.	<u>К.В.Копицев</u>	Раздел 1,2,3,5(ОИЯИ)
Стажер-иссл.	<u>Д.А.Кулецов</u>	Раздел 1,2
Лаборант	<u>А.Д.Аврорин</u>	Раздел 1,2
М.п.с.	<u>Б.А.Шайбинов</u>	Раздел 1,2,3,4,5,6 (ОИЯИ)
Инж.-исследователь	<u>А.А.Шейфлер</u>	Раздел 1,2 (ОИЯИ)
лаборант	<u>Ф.К.Кошель</u>	Раздел 1,2
Инженер	<u>А.А.Зриченко</u>	Раздел 1,2
лаборант	<u>А.Н.Копылов</u>	Раздел 1,2

Реферат

Отчет содержит: 189 стр. текста, 91 рисунок, 15 таблиц.

НЕЙТРИННЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, МОНИТОРИНГ ГИДРОСФЕРЫ

Отчет по 4 этапу НИР «Обобщение и оценка результатов исследований» составлен в соответствии с государственным контрактом от 12.05.2011г. №16.518.11.7056 по теме «Развитие экспериментальной базы Байкальского глубоководного нейтринного телескопа (УСУ-БГНТ) для исследований свойств окружающей среды и природы космических объектов методами нейтринной астрофизики». Отчет содержит краткое изложение результатов 1, 2 и 3 этапов, описание и результаты, полученные на 4 этапе НИР, обобщение и оценку результатов исследований за все время выполнения НИР.

В результате выполнения НИР был установлен в озере Байкал на долговременные испытания экспериментальный образец кластера из 3 гирлянд оптических модулей в режиме набора данных. В составе образца установлена гидроакустическая система позиционирования и гидрологического мониторинга. Исследования характеристик установленного оборудования показали их соответствие требованиям ТЗ.

Материально-техническая и экспериментальная базы предоставлялись 12 организациям пользователям для проведения самостоятельных исследований.

По результатам НИР получено Свидетельство государственной регистрации программы для калибровки оптических модулей, опубликовано 8 статей в ведущих российских и зарубежных журналах.

В исследованиях принимали участие 8 молодых специалистов.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	6-13
1	Краткое описание работ, выполненных на 1,2 и 3 этапах НИР	14-16
2	Анализ экспериментальных данных УСУ по программам поиска новых элементарных частиц, поиска проявлений частиц темной материи, исследования окружающей среды	17-21
2.1	Анализ работы аппаратуры и фоновых условий регистрации экспериментального кластера НТ1000.	21
2.1.1	Результаты мониторинга системы электропитания гирлянд	22-25
2.1.2	Температурные условия работы оптических модулей	26-27
2.1.3	Анализ фоновых условий регистрации оптических модулей (шумы)	27-28
2.2	Коммутатор электропитания кластера НТ1000	29-33
2.3	Моделирование системы сбора данных кластера НТ1000	34-41
2.4	Стенд для тестирования измерительных каналов и аппаратуры триггерной системы НТ1000	42
2.4.1	Структура и состав стенда	42-46
2.4.2	Программное обеспечение для калибровки каналов оптических модулей	46-49
2.4.3	Результаты исследования работы измерительных каналов	50-55
2.5	Оптические модули. Конструкция, технология сборки	56-64
2.6	Анализ динамики положения гирлянды НТ1000	64
2.6.1	Гидроакустическая система позиционирования экспериментального кластера нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба на оз. Байкал	64-65
2.6.2	Современные методы позиционирования	65-69
2.6.3	Система позиционирования экспериментального кластера	69-71
2.6.4	D-MAC протокол	71-75
2.6.5	Сферический метод длиннбазового позиционирования	76-79
2.6.6	Алгоритмы определения положения объекта позиционирования	80-84
2.6.7	Экспериментальные результаты	84-91
2.6.8	Выводы	92-93
2.6.9	Датчик положения (инклинометр)	93-99
2.7	Анализ данных экспериментальной гирлянды 2010 года	99-108
2.8	Анализ и обработка данных экспериментального кластера гирлянд (2012 г.)	108-119
2.9	Долговременный мониторинг гидрофизических процессов	120

2.9.1.	Результаты мониторинга	121-130
2.9.2.	Выводы	131-131
2.10	Анализ данных полученных с помощью экспериментального образца установки для измерения вертикальной компоненты поля	132-133
2.10.1	Наблюдения	133-134
2.10.2	Обсуждение предшествующих результатов	134-136
2.10.3	Новые результаты	136-140
2.10.4	Выводы	140-144
3	Создание системы коллективного доступа к аппаратуре и экспериментальным данным кластера гирлянд на основе глубоководной оптоволоконной системы связи и радиоканала Ethernet	145-152
4	Разработка рекомендаций по созданию нейтринного телескопа нового поколения НТ1000	153
4.1	Результаты анализа и моделирования проекта нейтринного телескопа с увеличенным эффективным объёмом	153-157
4.2	Кластерная структура НТ1000. Проектные решения	158-171
4.3	Совместное рассмотрение данных, полученных на разных установках	172-174
5	Оценка и обобщение результатов НИР	175-177
6	Закупка оборудования	178
7	Составление заключительного отчета	179-180
	Заключение	181-182
	Литература	183-189

ВВЕДЕНИЕ

НИР «Развитие экспериментальной базы Байкальского глубоководного нейтринного телескопа (УСУ-БГНТ) для исследований свойств окружающей среды и природы космических объектов методами нейтринной астрофизики» проводится со следующими целями:

1. Получение новых знаний и результатов в области изучения космических объектов и прогнозирования состояния окружающей среды.
2. Обеспечение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, проводимых организациями Российской Федерации, с предоставлением им возможности использования методов научных исследований, разработанных или освоенных для уникальной установки, стенда (УСУ).
3. Развитие экспериментальной базы УСУ для предоставления научно-исследовательским организациям новых и эффективных методов и средств проведения исследований в области астрофизики элементарных частиц, включая изучение космических объектов и эволюции Вселенной, поиск новых ядерных частиц космического происхождения, исследования темной материи, исследования окружающей среды (гидрологические исследования) с получением результатов мирового уровня.
4. Создание комплекса экспериментальных образцов аппаратуры для регистрации мюонов и нейтрино высоких энергий - кластера гирлянд с использованием новейших достижений науки и техники, обеспечивающих в соответствии с планами развития УСУ-БГНТ создание нейтринного телескопа нового поколения НТ1000.

Одним из главных итогов развития физики XX века стало построение и экспериментальное доказательство справедливости Стандартной модели электрослабого и сильного взаимодействий элементарных частиц. В то же время произошел качественный скачок в развитии представлений о структуре и свойствах Вселенной и о процессах, происходящих в ней. Стало ясным, что

физика элементарных частиц, космология и астрофизика теснейшим образом связаны между собой, поскольку базовые элементы, определяющие структуру микромира, одновременно определяют физику явлений, происходящих на космических масштабах. На стыке этих направлений физики получен целый ряд выдающихся результатов, включая открытие нейтринных осцилляций в экспериментах с солнечными, реакторными и атмосферными нейтрино, первое в истории человечества всестороннее изучение коллапса Сверхновой SN1987A, доказательство существования «темной материи», масса которой в 4-5 раз превышает массу обычного вещества во Вселенной, открытие новой элементарной частицы, аналогичной по свойствам предсказанному в 1964 г. «бозону Хиггса» и многие другие. Эти достижения поставили науку на грань новых, еще более значимых фундаментальных открытий, которые способны кардинально изменить наши представления о процессах в микромире и космосе.

Решающая роль в предстоящих исследованиях отводится экспериментальным исследованиям, направленным на проверку и доказательство выдвинутых теорий и гипотез. При этом все большее значение приобретают исследования природных потоков космических лучей и излучений в области энергий, недоступных для ускорителей и других наземных источников, а также задачи регистрации космических нейтрино высоких энергий и гипотетических частиц: частиц темной материи, магнитных монополей и др. Все эти задачи требуют увеличения на порядки размеров детектирующих установок и их эффективности. По модельным расчетам для поиска и надежной регистрации космических нейтрино в областях энергий более 10 ТэВ водным черенковским детектором минимальный объем рабочей среды (наблюдаемый объем водной среды) должен быть порядка 1-1,5 км³ с количеством высокочувствительных фотоэлектронных умножителей порядка 10 000. В настоящее время существует только один подледный детектор – нейтринный телескоп IceCube на Южном полюсе, который приближается по объему к требуемым размерам

и который направлен на исследование потоков космических нейтрино из Северного полушария относительно Земли. После обработки двухлетних (2011-2012 гг.) данных, полученных на IceCube, были впервые зарегистрированы два события - каскада, вызванные космическими нейтрино с энергиями в диапазоне 1-10 ПэВ. Этот результат открывает очень интересную эру в нейтринной астрофизике с фокусом на черенковские нейтринные телескопы в водной среде и во льду и доказывает необходимость скорейшего создания телескопа соизмеримого масштаба в Северном полушарии. Совместная работа Южного и Северного телескопов обещает новые выдающиеся открытия и возможности в исследовании космоса в составе Глобальной нейтринной обсерватории, процесс создания которой начат международным научным сообществом.

Успешная эксплуатация на протяжении более чем десяти лет нейтринных телескопов первого поколения (Байкальского нейтринного телескопа НТ200/НТ200+, нейтринных телескопов AMANDA на Южном полюсе и ANTARES в Средиземном море), 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, со всей очевидностью продемонстрировали эффективность метода детектирования нейтрино и других элементарных частиц в естественных средах. 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 сотрудничеством БАЙКАЛ ведутся работы по созданию нейтринного телескопа НТ1000 на оз. Байкал с эффективным объемом $\sim 2 \text{ км}^3$. Телескоп будет состоять из функционально независимых

установок – кластеров гирлянд оптических модулей на базе фотоэлектронных умножителей (по 8 гирлянд в каждом кластере).

Телескопы такого объема могут быть созданы только в глубоких естественных водоемах: морях и озерах глубиной более 1 км с очень высокими требованиями к характеристикам воды, и самый естественный путь – развитие материально-технической базы ранее созданных установок, в частности, Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ200+, место установки которого выбиралось путем многолетних исследований. Тем более что эта установка создавалась по постановлению руководящих органов СССР от 1987 г. как первый этап работ по созданию кубокилометрового детектора. В соответствии с заданным планом в 1998 году был создан и поставлен в режим набора данных Байкальский глубоководный нейтринный телескоп НТ200 объемом 2×10^{-2} км³ – первый в мире глубоководный телескоп, запуск которого и полученные результаты исследований вошли в фонд важнейших достижений Российской академии наук. В 2008 г. эффективность телескопа была повышена добавлением 3 внешних гирлянд оптических модулей.

Кроме научных исследований действующий телескоп НТ200+ используется как база для разработки и испытаний новой аппаратуры, предназначенной для кубокилометрового телескопа. Эти работы проводились в связи с тем, что было необходимо качественно повысить эффективность всех блоков телескопа с использованием зарубежных комплектующих, так как предыдущие модификации создавались на отечественных электронных компонентах, производство которых в 90-е годы было прекращено.

К настоящему времени практически закончена разработка и испытания всех блоков и узлов телескопа с использованием самых современных достижений в электронике и информатике, предназначенных для развития материально-технической базы и создания на базе Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ200+ телескопа НТ1000 с

объемом наблюдаемой водной среды $1,5 \text{ км}^3$.

Одновременно рядом организаций и научных коллабораций европейских стран (ANTARES, NESTOR, NEMO) проводятся исследования с целью создания собственного кубокилометрового глубоководного нейтринного телескопа в Северном полушарии, а именно, в Средиземном море - проект Km³Net. К данному моменту еще не выбрано место установки телескопа и научно-технические решения по конструкции и устройству регистрирующей аппаратуры – оптических модулей.

В Байкальском проекте все эти вопросы уже решены и остается только закупка комплектующих, расширение производственной и испытательной базы, изготовление специализированных блоков, модернизация берегового центра, сборка и установка в Байкал элементов телескопа, расширение возможностей сбора, хранения и обработки экспериментальных данных.

Но, несмотря на опережение европейских конкурентов, для сохранения приоритета российской науки в данной области необходимо срочно решить вопросы специального, целевого финансирования запланированных работ. Стоимость всего комплекса работ по модернизации Байкальского глубоководного нейтринного телескопа и доведения его объема до 2 км^3 оценивается в 3 миллиарда рублей в ценах 2011 года. При этом в 2014 году планируется установить и поставить в режим набора данных кластер из 8 гирлянд по 24 (либо 48) оптических модулей (ОМ) в каждой (всего 192 ОМ) и в последующие 5-6 лет установить еще 23 таких же кластера.

Каждый из кластеров – это самостоятельная исследовательская установка, эффективность которой будет соизмерима с действующим с 2008 года в Средиземном море вблизи Тулона нейтринным телескопом ANTARES. Т.е. исследователи и пользователи с 2014 года получат возможность проводить исследования на самой современной в Европе экспериментальной базе.

Последовательное наращивание количества устанавливаемых кластеров и наблюдаемого объема водной среды, учитывая имеющееся отставание европейского проекта на несколько лет, обеспечат не менее чем десятилетнее сохранение уникальности Байкальского проекта по сравнению с европейским аналогом – единственным проектом в мире, который может быть реализован в текущем десятилетии. При этом стоимость Байкальского нейтринного проекта будет в несколько раз меньше европейского, благодаря уникальности возможностей, предоставляемых местом установки телескопа на озере Байкал. Прежде всего, уникальным свойствам воды, наличию относительно ровной площадки на глубине 1300 м в 4 км от берега, отсутствию сильных течений, возможности установки глубоководного оборудования с поверхности льда, транспортной доступности, наличию линии электроснабжения.

Наряду с проблемами астрофизики, нейтринные телескопы и их инфраструктура может использоваться во многих других областях науки и техники, таких как гидроакустика, гидробиология, гидрология, океанография, геология, геофизика, гляциология, экология, охрана окружающей среды.

Байкальский глубоководный нейтринный телескоп (УСУ-БГНТ) относится к группе интенсивно развиваемых у нас в стране и за рубежом методов и средств исследований природных потоков нейтрино с энергиями выше 10 ТэВ [1].

В основе метода лежит регистрация черенковского свечения, возникающего при прохождении нейтрино и мюонов в прозрачных естественных средах (лед, вода), впервые предложенный М.А. Марковым в 1960 году. Впоследствии Россия более 40 лет сохраняла приоритет в данной области исследований, а созданные установки и результаты исследований относятся к наиболее значимым в стране и мире.

Современный уровень знаний о природных потоках нейтрино высоких и сверхвысоких энергий в основном определяется результатами,

полученными за последнее десятилетие в экспериментах на нейтринных телескопах NT200/NT200+ (УСУ-БГНТ) и AMANDA (США). В 2008 г. начат набор данных на нейтринном телескопе ANTARES (коллаборация научных организаций стран ЕС) в Средиземном море. Эти три детектора составляют первое поколение нейтринных телескопов и характеризуются эффективным объемом порядка 10^{-2} км^3 по отношению к регистрации нейтрино с энергией выше 10 ТэВ.

Впервые кубокилометровый нейтринный телескоп IceCube (США) был создан в декабре 2010 г. на Южном полюсе с аналогичными задачами – регистрации прошедших сквозь Землю нейтрино высоких энергий. IceCube предназначен для исследований Северной полусферы Земли. Создание телескопа в Северном полушарии на Байкале необходимо для исследований в Южной полусфере, тем более что такое расположение дает важное преимущество: способность вести практически непрерывное наблюдение центра Галактики (NT1000 - 18 часов и Км3NeT - 15 часов в течение суток) и Галактической Плоскости, где сконцентрирована значительная доля потенциальных галактических источников космических лучей (пульсары, остатки сверхновых, двойные звездные системы, скопления молекулярных облаков, являющиеся мишенью для протонов и ядер космических лучей и т.д.), включая массивную черную дыру Sgr A* в центре Галактики, которые являются наиболее перспективными источниками нейтрино высоких энергий. IceCube и Байкальский глубоководный нейтринный телескоп NT1000, развиваемый на базе УСУ-БГНТ, будут дополнять друг друга, создавая мощный исследовательский комплекс, который способен вести наблюдение и поиск источников нейтрино высоких энергий по всей небесной сфере.

Запланированные работы по развитию экспериментальной базы УСУ-БГНТ прежде всего необходимы для завершения исследований по проекту нейтринного телескопа NT1000 с наблюдаемым объемом водной среды более 1 км^3 . Создание такого телескопа необходимо, так как только такого

размера телескопы способны достоверно регистрировать нейтрино высоких энергий (выше 10 ТэВ) космического происхождения и, следовательно, только с их помощью появляется возможность фундаментальных научных открытий.

За время выполнения НИР 12 исследовательских организаций-пользователей УСУ-БГНТ получили возможность проводить самостоятельные исследования с использованием материально-технической базы и экспериментальных данных УСУ-БГНТ.

Работы выполнялись Институтом ядерных исследований РАН совместно с Научно-исследовательским институтом ядерной физики Московского государственного университета, Научно-исследовательским институтом прикладной физики Иркутского государственного университета, Нижегородским государственным техническим университетом, Санкт-Петербургским государственным морским техническим университетом, Объединенным институтом ядерных исследований (Дубна) при участии сотрудников EvoLogics GmbH (Berlin).

1. Краткое описание работ, выполненных на 1,2 и 3 этапах НИР

На 1 этапе НИР была обоснована необходимость развития экспериментальной базы УСУ-БГНТ. С целью обоснования развития экспериментальной базы УСУ-БГНТ был проведен комплекс исследований с конечной целью поиска технических решений и экспериментальной проверки возможности создания глубоководного нейтринного телескопа следующего поколения НТ1000 на озере Байкал.

На 1, 2 и 3 этапах НИР проводились исследования характеристик и испытания аппаратуры в составе установленного в течение зимних экспедиций 2011 и 2012 гг. оборудования в составе прототипа кластера из 3 гирлянд оптических модулей. Полученные данные использовались для отладки установленной аппаратуры и доработки конструкций и программного обеспечения унифицированных блоков создаваемого телескопа НТ1000.

На 1 и 2 этапах были решены следующие задачи развития комплекса УСУ - Байкальский глубоководный нейтринный телескоп ИЯИ РАН и его оснащения современным научным оборудованием и специализированными системами:

1. Было проведено порядка 460 штатных и калибровочных сеансов набора данных с общим объемом информации около 200 Гб в архивированном виде, было зарегистрировано $1.2 \cdot 10^7$ событий. Были проведены все необходимые калибровочные сеансы набора данных для проведения работ по исследованию характеристик и контролю состояния регистрирующей аппаратуры, временной и амплитудной калибровки телескопа. В результате отладки и доработки программного обеспечения прототип кластера был введен в штатный режим набора данных в августе 2011 г. В целом, установка работает стабильно. Все ОМ, которые были запущены во время первого включения прототипа, работают в штатном режиме по настоящее время. Характеристики установленной аппаратуры превышают мировой уровень,

благодаря использованию последних достижений в электронике и информационных технологиях.

2. На основании полученных данных проведена доработка и лабораторные исследования аппаратуры, предназначенной для установки в составе экспериментального образца кластера в 2012г. По степени готовности к созданию первого в мире глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба полученные результаты существенно опережают европейских конкурентов, работающих над аналогичным проектом Км3Net.

3. С помощью акустической аппаратуры получены данные для исследования поведения гирлянд оптических модулей под влиянием изменяющихся гидрологических условий в озере Байкал.

4. Разработана новая на мировом уровне аппаратура для измерения вертикальной компоненты электрического поля в озере Байкал.

5. Достигнуты запланированные на каждый этап индикаторы по количеству пользователей УСУ – 13 исследовательских организаций; превышены индикаторы по числу публикаций - 3 публикации вместо 2 и привлечению молодых специалистов – 8 вместо 7.

6. Проведены патентные исследования по теме НИР (Приложение к отчету по 1 этапу НИР).

На 3 этапе НИР были продолжены работы, начатые на первых двух этапах.

- Проведена модернизация и лабораторные исследования характеристик электронных блоков сбора и обработки данных кластера гирлянд НТ1000
- Развернут и включен в режим набора данных кластер из трех гирлянд с модернизированными блоками оптических и управляющих модулей и несущими системами
- Подготовлено программное обеспечение для проведения физических исследований на кластере гирлянд

- Установлены две модернизированные системы акустического позиционирования. С помощью системы получены результаты по изучению смещения гирлянд кластера под влиянием течений и погодных условий на озере Байкал.
- Получены предварительные результаты по свечению байкальской воды.
- Установлена модернизированная аппаратура по измерению вариаций вертикальной компоненты электрического поля в озере Байкал.

2. Анализ экспериментальных данных УСУ по программам поиска новых элементарных частиц, поиска проявлений частиц темной материи, исследования окружающей среды

Исследования потоков нейтрино астрофизической природы с помощью нейтринных телескопов ведутся по двум направлениям:

- поиск нейтринного сигнала от известных астрофизических объектов,
- обнаружение не идентифицированных локальных источников из наблюдений превышения сигнала над уровнем фона по всей небесной сфере.

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 близкими по отношению к земному наблюдателю астрофизическими объектами, способными, 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 являются остатки от взрывов сверхновых, пульсары, окрестность черной дыры Sgr A* в центре нашей Галактики, двойные звездные системы, содержащие черную дыру или нейтронную звезду, скопления молекулярных облаков, являющихся 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.

Диффузный поток нейтрино

Другим направлением изучения природного потока нейтрино является исследование энергетического спектра, глобальной анизотропии и состава по типу нейтрино природного диффузного потока нейтрино от не идентифицированных источников в области энергий выше 10^4 ГэВ, в которой фон от атмосферных нейтрино становится сравнимым 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, ассоциирующихся, 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 $\nu_e : \nu_\mu : \nu_T \approx 1 : 2 : 0$. Вследствие эффекта нейтринных осцилляций, это соотношение меняется в зависимости от расстояния до источника. Длина μ - ν_T осцилляций при выборе параметров осцилляции $\delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$ и $\sin 2\theta = 1$, согласно данным эксперимента Super-Kamiokande составляет $L_{OSC} \sim 1.3 \times 10^4 \text{ (Эв/1ПэВ) парсек}$. 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 $\nu_e : \nu_\mu : \nu_T \approx 1:1:1$.

Темная материя

Крупнейшей задачей современного естествознания является поиск 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, но 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 и 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 NT200 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 частицы 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.

2.1. Анализ работы аппаратуры и фоновых условий регистрации экспериментального кластера НТ1000

Информация о состоянии и качестве работы аппаратуры оптических модулей (ОМ) формируется в мониторинной системе контроллеров ОМ. Мониторные данные записываются в информационные блоки и транслируются в Береговой центр сбора данных. В информационном блоке для каждого ОМ содержатся следующие данные:

- номер контроллера, идентифицирующий оптический модуль;
- величины напряжения электропитания ОМ: +5 В, -5 В, +12 В;
- значение высоковольтного напряжения ФЭУ;
- показание датчика температуры;
- состояние счетчика ошибок передачи данных контроллера;
- состояния счетчика шумовых импульсов ФЭУ.

В отдельном информационном блоке содержатся данные о величине напряжения электропитания детектора в целом (-300 В).

Для обработки получаемой мониторинной информации создан и развивается комплекс программ, на основе фреймворка ROOT, разработанного группой программистов из Церна, и пакета библиотек MARS, разработанного в проекте MAGIC. Пакет программ, разработанный для Байкальского эксперимента, назван BARS. Этот пакет содержит набор инструментов для работы с экспериментальными данными установки. В частности, разработаны скрипты, считающие мониторинную информацию, и конвертирующие ее в root-файлы, поддерживающие сортировку данных в древовидной структуре. Такой подход позволяет в полной мере использовать инструменты ROOT для анализа и отображения экспериментальной информации.

2.1.1. Результаты мониторинга системы электропитания гирлянд

Подвод электропитания к гирляндам детектора осуществляется по бронированному кабелю, проложенному по дну оз. Байкал от Берегового центра до Центра сбора данных детектора (длина кабеля ~ 6 км). На гирлянды подается постоянное напряжение 300В, которое разводится на центральный и сервисный модули секций (ЦМ и СМ). Преобразование входного напряжения в рабочее обеспечивают конвертеры 300В/12В и 300В/5В. Модуль управления ОМ коммутирует напряжение 12 В на оптические модули, используя релейный коммутатор. Высоковольтные конвертеры ОМ преобразуют напряжение 12 В в высоковольтное напряжение (до 2 кВ), величина которого подбирается индивидуально для каждого ФЭУ (коэффициенты усиления фотоэлектронных умножителей выравниваются на уровне $\sim 10^7$).

Для контроля за работой установки предусмотрен постоянный мониторинг параметров электропитания всех узлов детектора. Основным интересом представляют высоковольтное напряжение ОМ (HV), от которого зависит корректная работа ФЭУ, напряжение 12В, стабильность которого необходима для работы электроники ОМ и источника HV, и напряжение 300В, питающее всю установку. Мониторинг 12В и HV осуществляется средствами контроллера ОМ. Величина напряжения 300В измеряется специализированными АЦП, установленными на всех каналах коммутаторов электропитания детектора.

Результаты мониторинга системы электропитания ОМ для трех гирлянд оптических модулей представлены на рисунках 2.1.1.1 – 2.1.1.3.

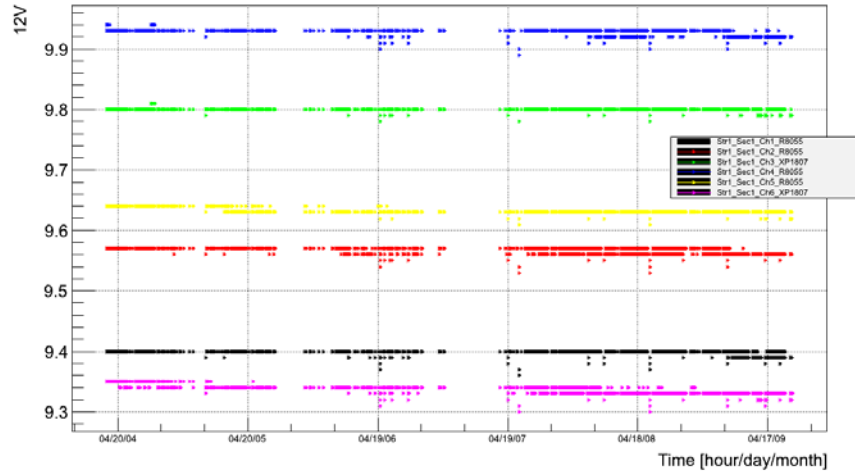


Рисунок 2.1.1.1. Электропитание 12 В для 1-ой гирлянды.

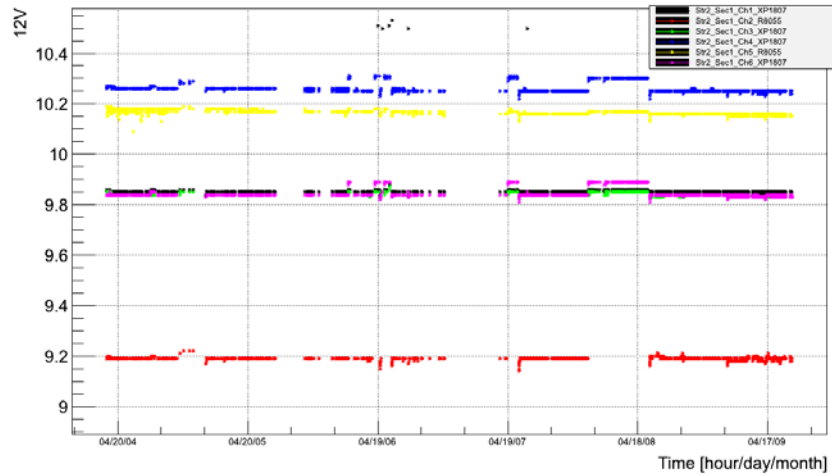


Рисунок 2.1.1.2. Электропитание 12 В для 2-ой гирлянды.

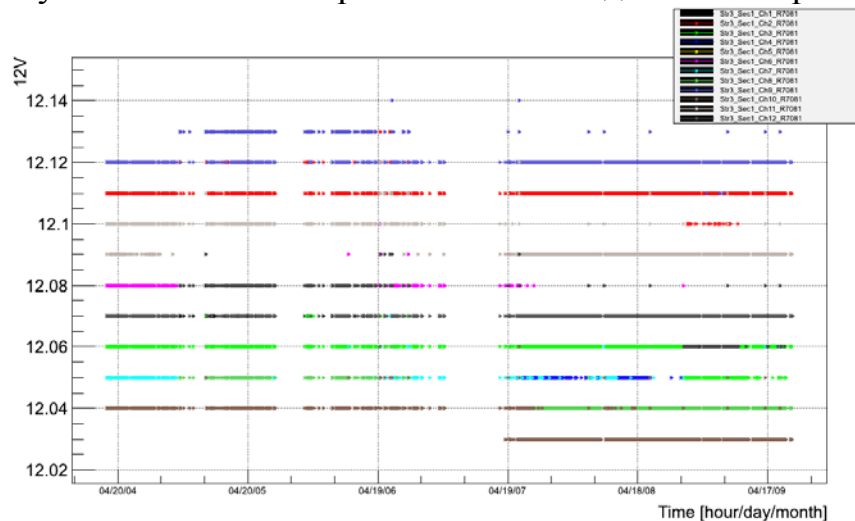


Рисунок 2.1.1.3. Электропитание 12 В для 1-ой гирлянды.

На рисунках 2.1.1.4 – 2.1.1.6 представлены измеренные значения высоковольтного напряжения оптических модулей для трех гирлянд.

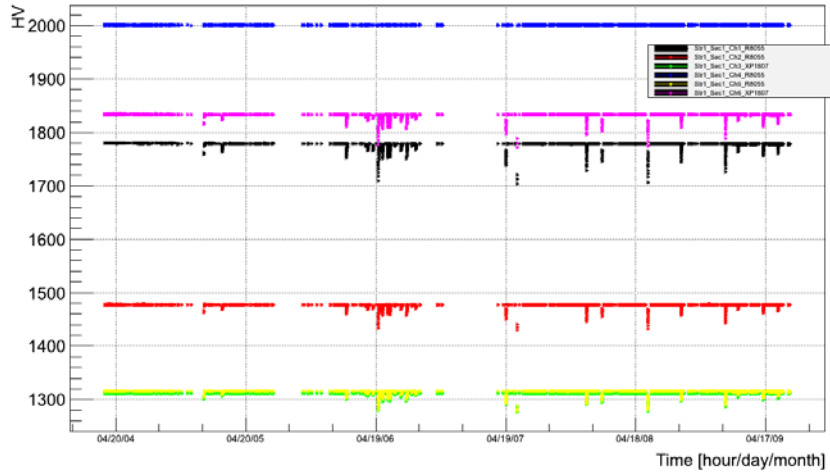


Рисунок 2.1.1.4. Высоковольтное напряжение ОМ 1-ой гирлянды.

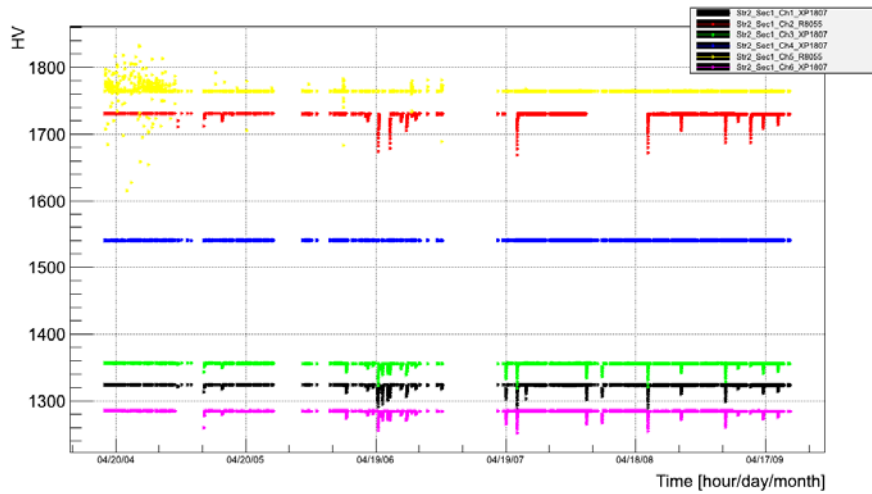


Рисунок 2.1.1.5. Высоковольтное напряжение ОМ 2-ой гирлянды.

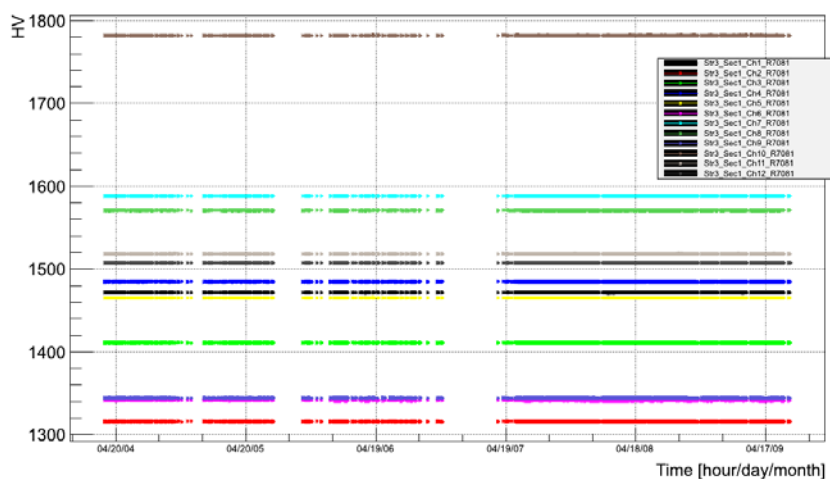


Рисунок 2.1.1.6. Высоковольтное напряжение ОМ 3-ей гирлянды.

Результаты мониторинга напряжения электропитания детектора 300 В представлены на рисунке 2.1.1.7. Измерения проводились в точке ввода электропитания в детектор (набор верхних точек) и в точке ввода в гирлянду

(нижние точки). Разница в величине напряжения объясняется падением напряжения на кабеле, связывающим центр детектора и гирлянду (длина около 1 км).

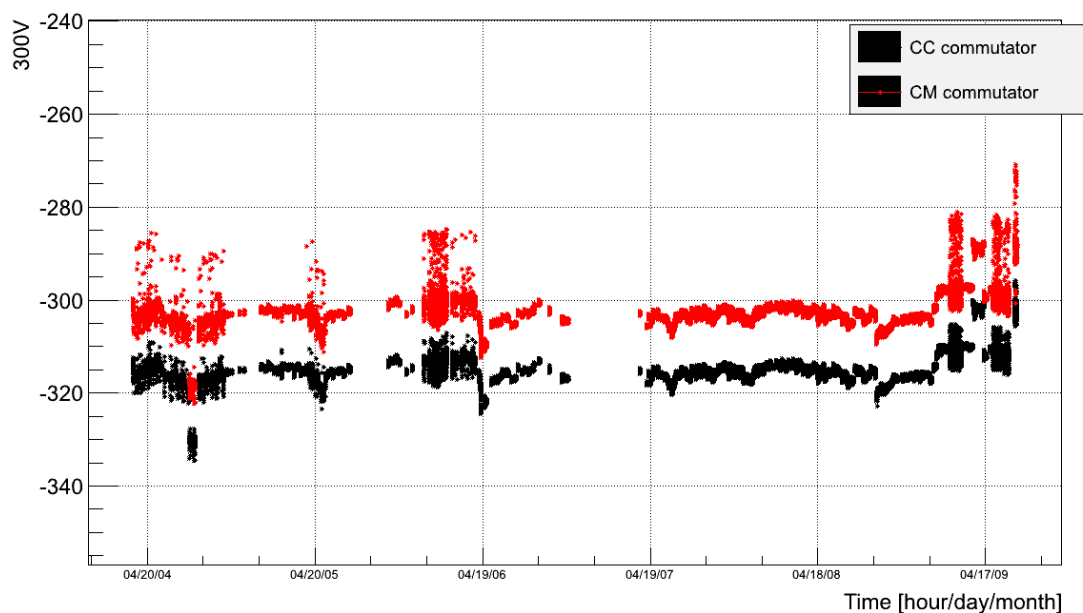


Рисунок 2.1.1.7. Питание кластера 2012 года 300 вольт.

Данные мониторинга, собранные за период апрель – ноябрь 2012г., говорят о высокой стабильности работы системы электропитания детектора. Колебания напряжение 12В не превышают 0,1В (менее 1%). Изменения высоковольтного напряжения фотоэлектронных умножителей могут достигать 100 В для первой и второй гирлянды (порядка 7%). Этот эффект наблюдается только в момент включения электропитания гирлянд. Высоковольтное напряжение оптических модулей третьей гирлянды детектора стабильно (рисунок 2.1.1.6). Отличительная особенность 3–ей гирлянды заключается в том, что в ней полностью разделены системы электропитания ОМ и блоков управления. Поэтому выключение электропитания блоков управления не приводит к изменению величины высоковольтного напряжения на ФЭУ. В дальнейшем такой подход будет применяться для всех гирлянд детектора. Изменения общего питания установки 300В обусловлены главным образом изменением условий заземления и составляют величину около 20 В (~7%).

2.1.2. Температурные условия работы оптических модулей.

Оптические модули расположены на глубине 1 км в оз. Байкал, при температуре окружающей среды близкой к 0°C и охлаждаются через стеклянную оболочку сфер. Воздух из оптических модулей откачан до давления ~0.7 атм., что снижает отвод тепла от работающей электроники. Для контроля теплового режима электронных компонентов ОМ оснащен датчиком температуры. Результаты мониторинрования температуры в оптических модулях представлены на рисунках 2.1.2.1 - 2.1.2.3.

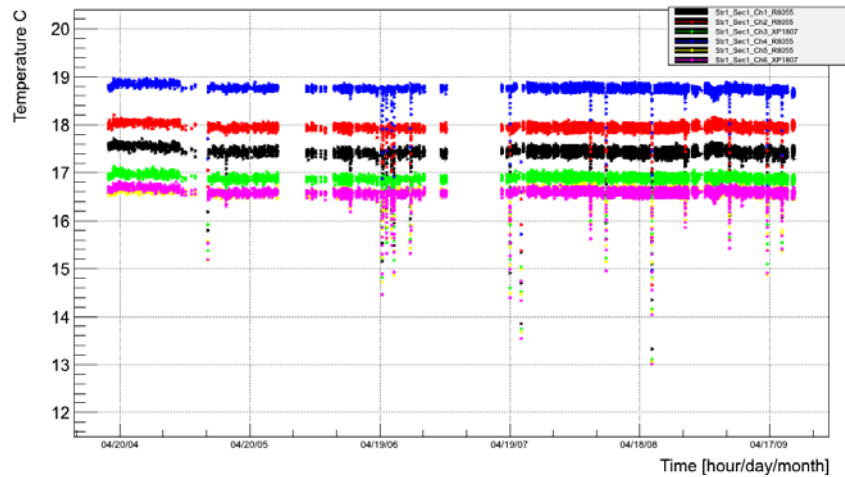


Рисунок 2.1.2.1. Показания датчиков температуры ОМ 1-ой гирлянды.

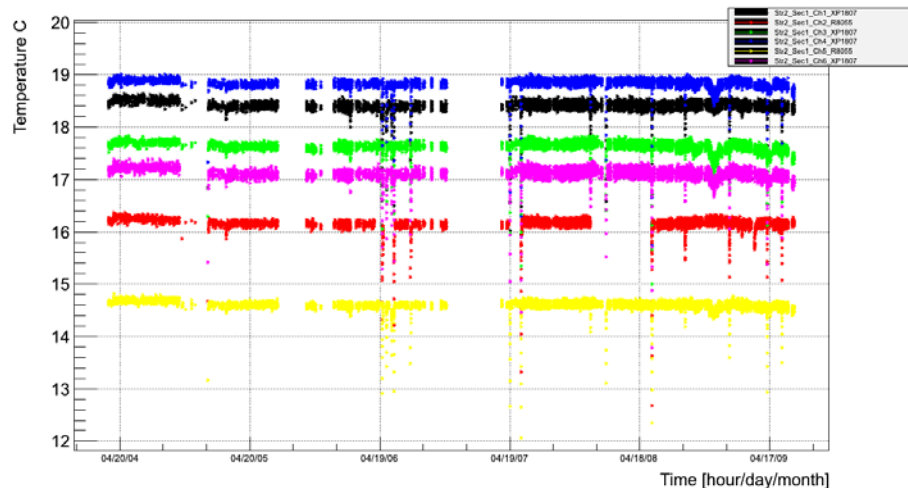


Рисунок 2.1.2.2. Показания датчиков температуры ОМ 2-ой гирлянды

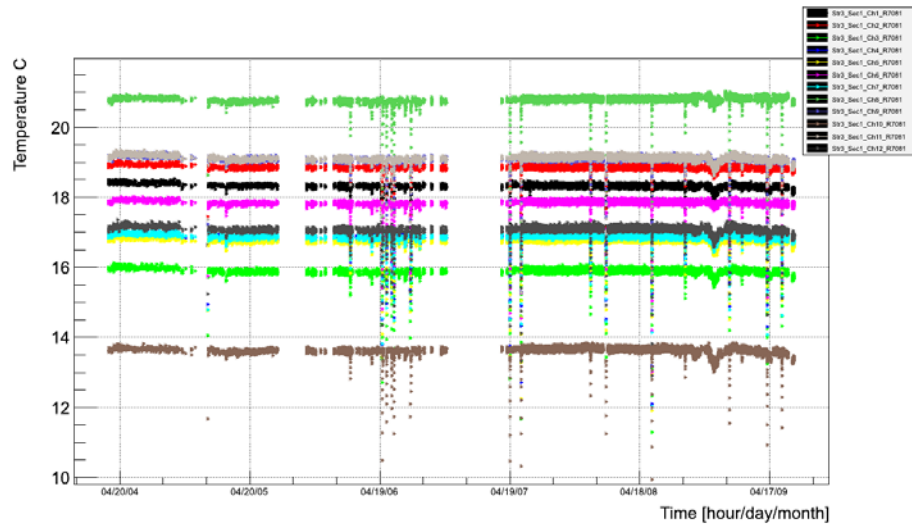


Рисунок 2.1.2.3. Показания датчиков температуры ОМ 3-ей гирлянды.

Точность температурного датчика, установленного на контроллере ОМ не высока. К тому же он меряет температуру только на поверхности контроллера и не дает полной информации о температуре внутри ОМ. Однако даже такой датчик показывает, что температура электроники в оптическом модуле не превышает 25 градусов, и соответственно, не ухудшает условия работы аппаратуры.

2.1.3. Анализ фоновых условий регистрации оптических модулей.

Мониторинг темпа счета шумов фотоэлектронных умножителей необходим для контроля фоновых условий регистрации космического излучения. Кроме того, анализ корреляций шумов на разных каналах и гирляндах оптических модулей позволяет проводить исследования глубоководных течений оз. Байкал.

Результаты долговременных измерений шумовых характеристик ОМ представлены на рисунках 2.1.3.1 – 2.1.3.3. Временная корреляция шумовых пиков на разных каналах говорит о преимущественном вкладе в частоту шума естественного свечения Байкальской воды, вызванного хемилюминесценцией. Средний уровень шумов имеет ярко выраженные сезонные вариации и составляет величину 20 – 40 кГц.

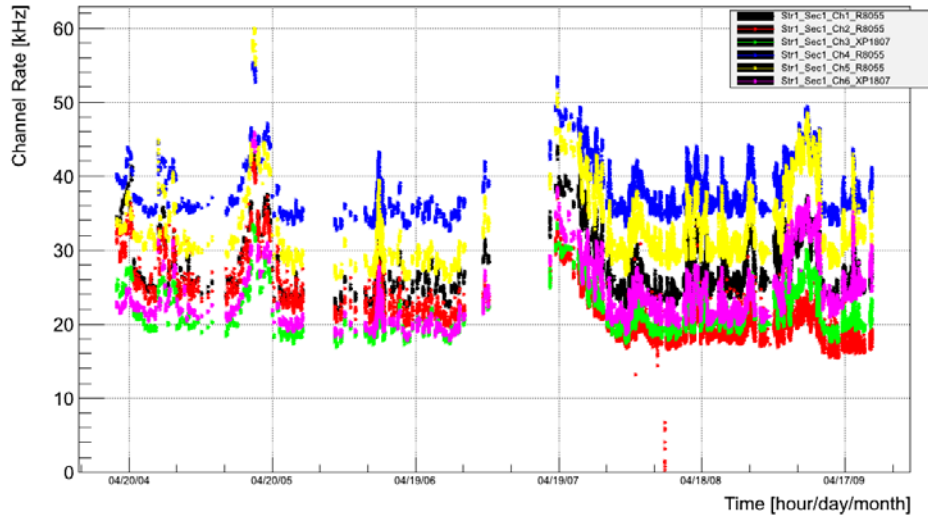


Рисунок 2.1.3.1. Темп счета шумов ОМ 1-ой гирлянды.

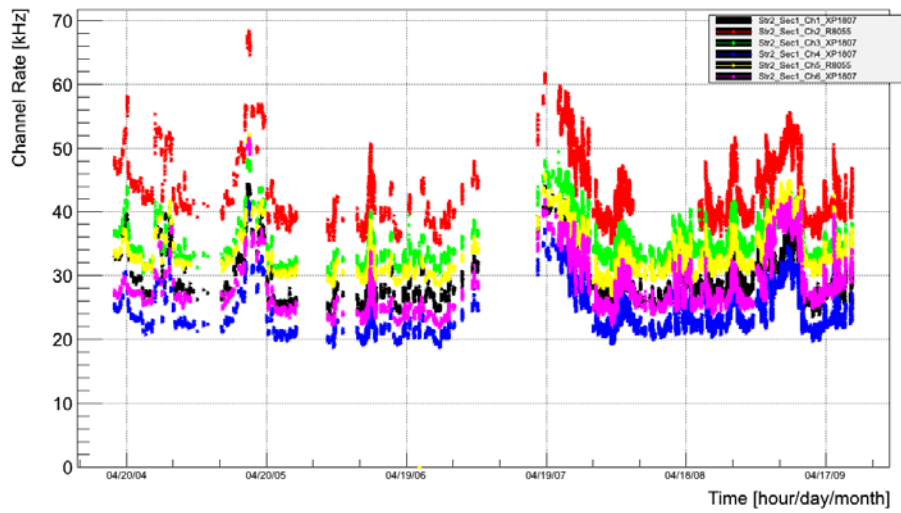


Рисунок 2.1.3.2. Темп счета шумов ОМ 2-ой гирлянды.

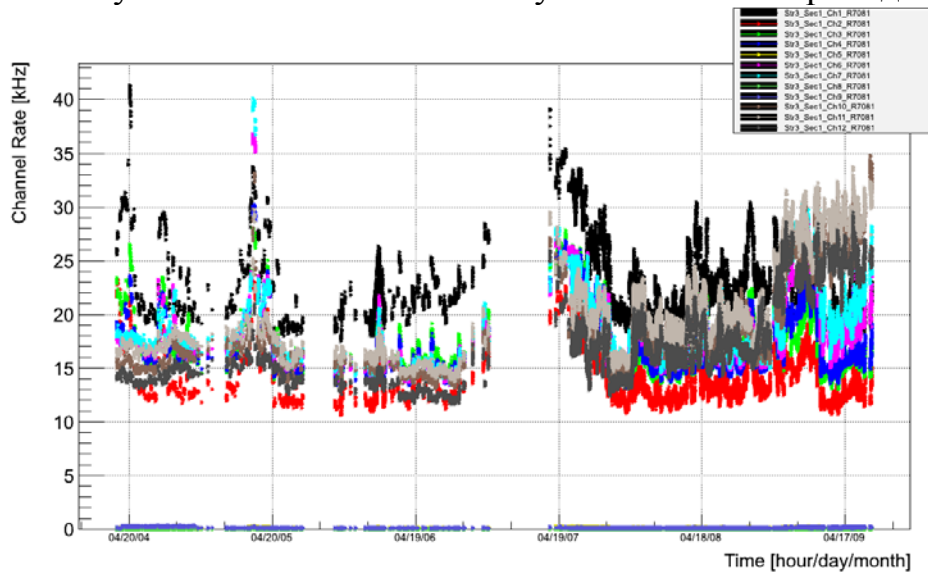


Рисунок 2.1.3.3. Темп счета шумов ОМ 3-ей гирлянды.

2.2. Коммутатор электропитания кластера гирлянд

Коммутатор электропитания предназначен для подключения и отключения электропитания гирлянд. В техническом плане подключение гирлянды коммутатором осуществляется подачей постоянного напряжения 300 В от центральной шины электропитания на блоки вторичного питания гирлянды. Разработанный в рамках проекта коммутатор является уникальным устройством. Коммутация постоянного напряжения 300 В представляет собой достаточно сложную задачу, для решения которой необходимо было подавить возникновения электрической дуги при размыкании высоковольтного контакта. Следует отметить, что широко представленные на рынке промышленные релейные коммутаторы обеспечивают размыкание цепи при постоянном напряжении только до 30 В, или при более высоком переменном напряжении. Поскольку в детекторе используется постоянное напряжение, для решения проблемы коммутации электропитания потребовалась отдельная разработка.

Разработанный коммутатор обеспечивает коммутацию 12-ти каналов электропитания. Каждая гирлянда обслуживается одним каналом коммутатора. С помощью коммутатора имеется возможность отключения от общей шины электропитания гирлянд с неисправной системой электропитания (нарушение гидроизоляции глубоководных кабельных коммуникаций и разъемов, короткое замыкание в преобразователях напряжения 300В), так, чтобы неисправность не мешала нормальной работе кластера в целом.

Коммутатор электропитания расположен в Центре управления кластером (ЦК). Функциональная схема коммутатора приведена на рисунке 2.2.1.

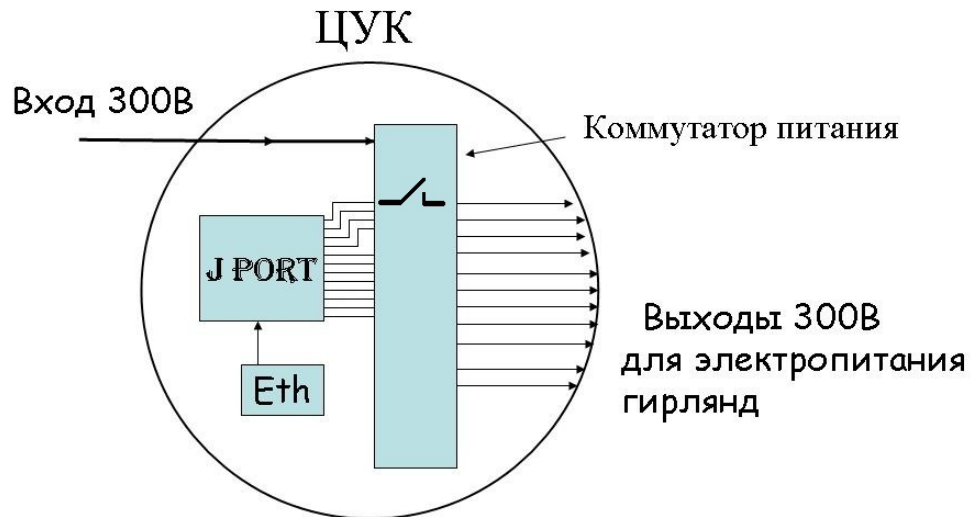


Рисунок 2.2.1. Функциональная схема коммутатора электропитания кластера

Управление коммутатором осуществляется от локальной сети Ethernet через J-порт (промышленный высоконадежный модуль дискретного 16-канального вывода I-7045 – см. Таблицу 2.2.1). Часть каналов коммутатора (4 канала для штатного подключения) используются для внутренних потребителей (дублирования и отключения вторичных блоков электропитания) Центра управления кластером. Таким образом, коммутатор питания представляет собой своеобразный глубоководный "щиток электропитания" управляемый программно с Берегового центра.

Таблица 2.2.1. Характеристики модуля дискретного вывода I-7045

Digital Output	
Channels	16, Source, NMO□
Output Voltage	□10 ~ +40 V
Output Current	650mA per channel, Direct □rive power relay module
Overvoltage Protection	47 VDC
Overload Protection	Yes
Short-circuit□Protection	Yes, 1.4 A
Thermal Overload trip temperature	150°C
4KV ESD Protection (IEC 61000-4-2)	Yes, contact for each terminal

Intra-module Isolation, Field to Logic	3750 Vrms
Interface	
Interface	RS-485
Format	N, 8,
Baud Rate	1200 ~ 115200bps
LED Display	
1 LED as Power/ Communication indicator	
16 LEDs as Digital Output indicators (for I-7045D)	
Power	
Input Voltage Range	10 ~ 30 VDC
Power Consumption	0.6W (I-7045)/1.5W(I-7045D)
Environment	
Operating Temperature	-25 ~ 75°C
Storage Temperature	-40 ~ 85°C
Humidity	5 ~ 95% RH, non-condensing

Подавление дуги при размыкании

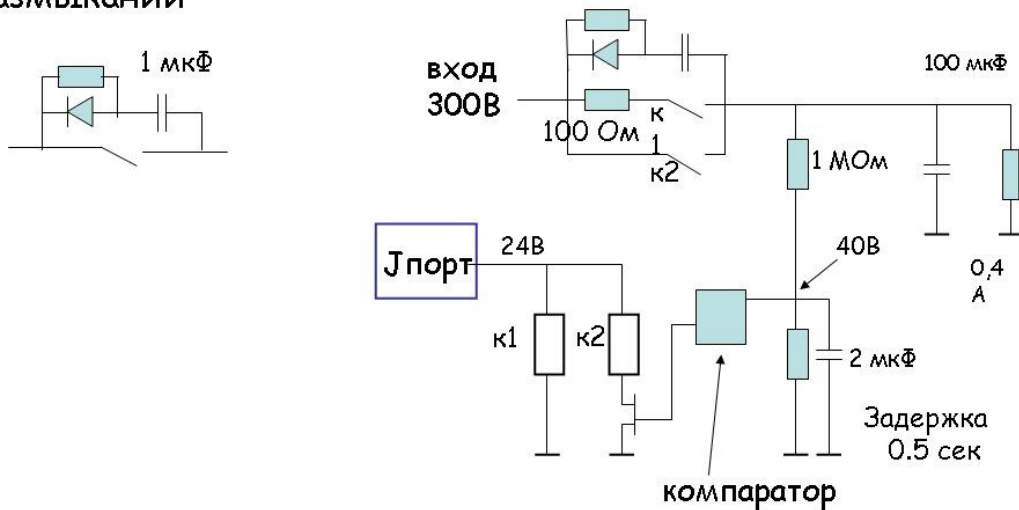


Рисунок 2.2.2. Блок-схема канала коммутатора электропитания.

Блок-схема одного канала коммутатора приведена на рисунке 2.2.2. Ключевые элементы реализованы на реле. Применение реле позволило с одной стороны обеспечить нормальную работу канала при малых токах (миллиамперы) нагрузки, а с другой стороны повысило перегрузочную

способность канала до десятков ампер. Большие токи перегрузки могут возникать при коротких замыканиях (нарушение гидроизоляции и т.п.). Использование реле обеспечило схемотехническую простоту устройства. В канале два реле. Реле К1 включается первым через ограничительный резистор. Второе реле включается позже, примерно через 0.5 сек и подключает нагрузку окончательно к шине 300В. Для гашения дуги (ток постоянный) между контактами реле используется диодно-конденсаторная цепочка. Такое использование реле с дугогасящей цепочкой стало возможным в виду малого требуемого быстродействия канала. Скорость переключения нагрузки каналом составляет 1-3 Гц. Принципиальная электрическая схема одного канала приведена на рисунке 2.2.3.

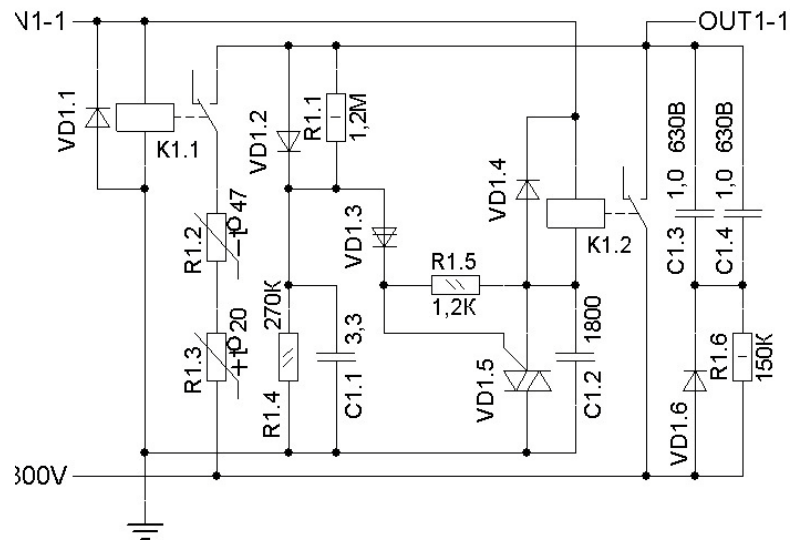


Рисунок 2.2.3. Принципиальная схема одного канала коммутатора

В коммутаторе предусмотрены сигнальные выходы ADC1-1 – ADC3-4 для мониторинга входного и выходных напряжений 300В с помощью внешнего АЦП. Масштабирование выходного сигнала осуществляется высокоомными резистивными делителями R1.9 – R12.2 (рисунок 2.2.4). Используются точные (1%) резисторы типа С2-29. Предусмотрена светодиодная индикация HL1.2 – HL12.2 включения канала.

Внешний вид опытного образца коммутатора (на 8 каналов) приведен на рисунке 2.2.5. Опытные образцы коммутатора прошли успешные лабораторные и натурные испытания в составе электроники кластера.

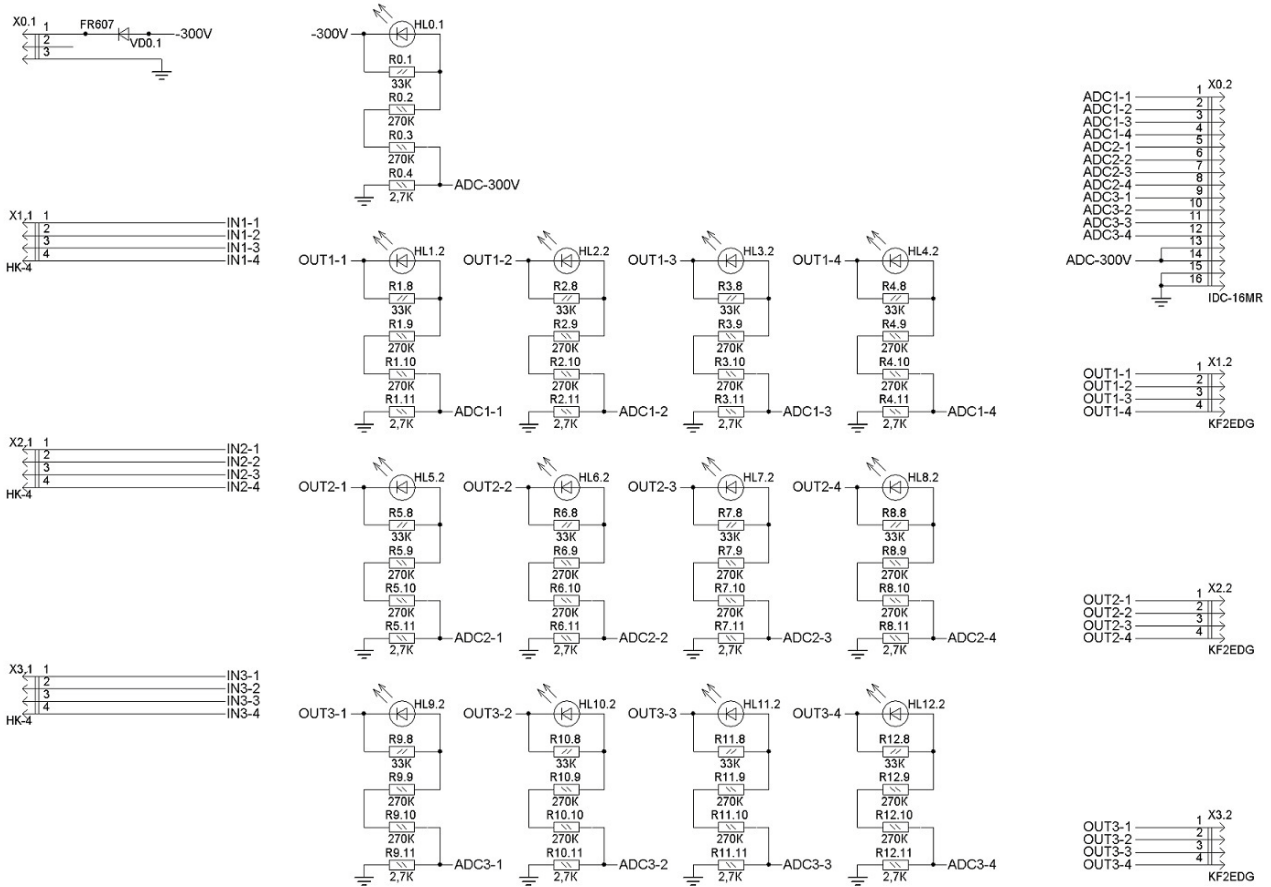


Рисунок 2.2.4. Принципиальная схема выходного интерфейса коммутатора.

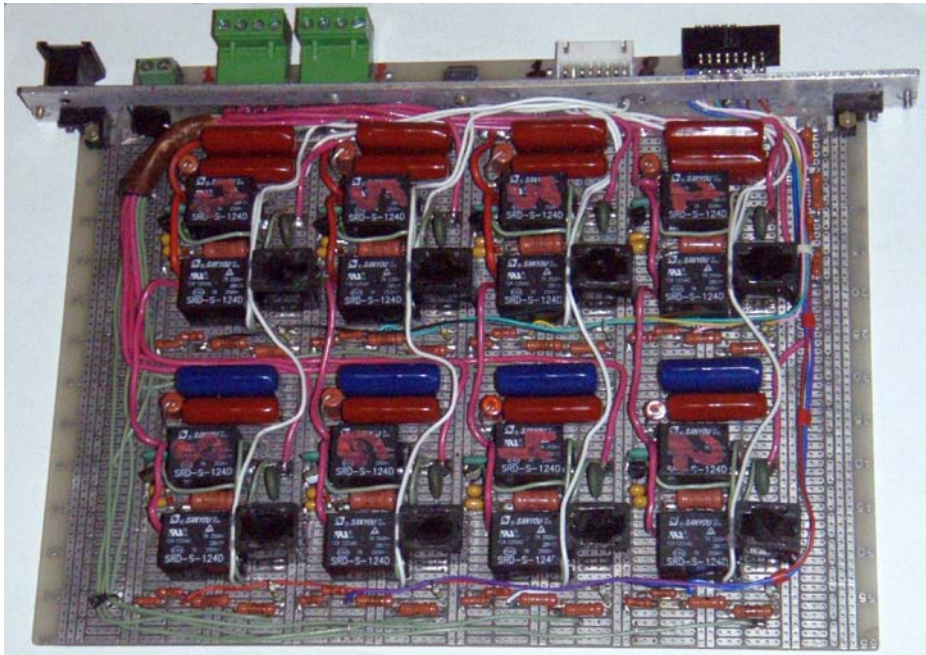


Рисунок 2.2.5. Внешний вид опытного образца коммутатора, установленного для долговременных испытаний в оз. Байкал.

2.3. Моделирование системы сбора данных кластера НТ1000

Подводная локальная сеть кластера НТ1000 представляет собой разветвлённую структуру, состоящую из группы каналов связи, по которым производится обмен информацией между различными узлами детектора. В силу пространственных размеров и географического места расположения установки, локальную сеть передачи данных можно разделить на три уровня, что подразумевает гибкий подход к её проектированию и реализации. Первый уровень охватывает расстояние порядка 6 км от берегового центра (БЦ) до центра кластера (ЦК). Второй уровень имеет протяжённость около одного километра и захватывает область между центром кластера и центром гирлянды. На третьем уровне обеспечивается связь между секциями оптических модулей внутри одной гирлянды, расстояния при этом составляют несколько сотен метров. Увеличение количества детектирующих единиц телескопа – оптических модулей, естественным образом увеличивает и поток данных, идущих на сервер для дальнейшей обработки. Поэтому для построения надёжной и высокоскоростной сети необходимо применять все современные технологии передачи данных, в том числе и оптическую связь.

В 2011 г. в рамках работы коллаборации “Байкал” по созданию гигабитного нейтринного детектора НТ1000 на оз. Байкал был проложен электрооптический магистральный кабель, соединяющий береговой центр с центром кластера. На основе данной линии связи организован первый уровень подводной локальной сети со скоростью обмена информацией до 1 Гбит/с (по одному оптоволокну в режиме мультиплексирования) и рассчитанный на суммарный поток данных со всех восьми гирлянд полного кластера телескопа. Второй и третий уровни подводной локальной сети имеют протяжённость менее километра и содержат большое количество разветвлённых каналов данных, поэтому на данном этапе развития проектируемого телескопа НТ1000 применение оптических линий является экономически и технологически нецелесообразным. Альтернативой оптоволокну и технологии Ethernet на расстояниях от 100 м до нескольких

километров является семейство технологий DSL. В 2011-2012 гг. передача данных в пределах второго и третьего уровней подводной локальной сети прототипа кластера осуществлялась с помощью SHDSL-модемов Sigrand SG-17B. Технология SHDSL обеспечивает симметричную дуплексную передачу информации на скоростях от 192 Кбит/с до 15296 Кбит/с по обычной двухпроводной медной линии связи, при этом рабочая дальность на максимальной скорости составляет около 600 м (провод сечением 0,5 мм²), а на минимальной – свыше 10 км. Таким образом, наиболее эффективная область применения SHDSL модемов, это расстояния порядка нескольких километров, что и было подтверждено относительно невысокой скоростью передачи данных между центром кластера 2012 года и сервисным модулем гирлянды (5696 Кбит/с). Ещё одна особенность технологии SHDSL – симметричная скорость передачи данных в обоих направлениях, что несколько избыточно в процессе реальной работы детектора, когда основной поток информации идёт из-под воды, а от сервера берегового центра лишь изредка поступают командные запросы различным блокам электроники кластера. В данном случае наиболее эффективным решением может стать использование другой передовой DSL технологии – VDSL2.

VDSL2 (Very-high data rate Digital Subscriber Line 2) – технология доступа, которая использует существующую инфраструктуру медных проводов, первоначально развернутую для телефонных сетей. VDSL2 является новейшим и самым передовым стандартом xDSL широкополосных проводных коммуникаций, поддерживающих передачу голоса, видео, данных, телевидения высокой четкости (HDTV). Протокол был стандартизирован как ITU G.993.2 и является расширением G.993.1 (VDSL). Он позволяет передавать данные в асимметричном и симметричном режимах с совокупной скоростью нисходящего и восходящего потоков до 200 Мбит/с по витой паре с пропускной способностью вплоть до 30 МГц.

Использование VDSL2 конвертеров на втором уровне подводной локальной сети (гирлянда – центр кластера) теоретически увеличит скорость

передачи данных до 30 Мбит/с в прямом и 10 Мбит/с в обратном направлениях, и позволит поднять в несколько раз максимальный темп счёта событий с гирлянды, ранее ограничиваемый медленным каналом связи на уровне около 25 Гц (при 5696 Кбит/с). Необходимая проверка возможностей технологии VDSL2 была проведена на конвертерах qBRIDGE-307 отечественного производителя – компании NSGate. В штатном составе кластера 2013 года предполагается использование промышленной модификации конвертеров – qBRIDGE-307i с расширенным диапазоном рабочих температур. Основные параметры данного устройства и его внешний вид представлены в таблице 2.3.1 и на рисунке 2.3.1. Конвертеры имеют один линейный порт VDSL2, один порт Ethernet и DIP-переключатели для настройки. Светодиодные индикаторы показывают состояние портов и работоспособность всего устройства. Предусмотрен выбор специальных режимов: для обеспечения защиты от импульсных помех длительностью до 250 мкс, режим минимальной задержки прохождения пакетов и режим избыточного соотношения сигнал/шум в линии для обеспечения дополнительной помехозащищённости (повышение с 6 дБ до 9 дБ).



Рисунок 2.3.1. Промышленный конвертер qBRIDGE-307i

Таблица 2.3.1 Краткие технические характеристики qBRIDGE-307i

<p>Интерфейс LAN</p> <ul style="list-style-type: none"> · Поддержка IEEE 802.3/ 3u/ 3x flow control · Поддержка Half/Full duplex (10/100-20/200M) · Автоопределение скорости (10/100M) и типа кабеля · Максимальная длина кадра 1536 байт 	<p>Работа в режиме "Bridge connection"</p> <ul style="list-style-type: none"> · Прозрачный режим для VLAN пакетов · Прозрачный режим для VPN пакетов · Протоколы моста: <ul style="list-style-type: none"> - Transparent MAC Bridging · Защита портов от атмосферных разрядов и электромагнитных помех · Защита цепей питания от перегрузки и обратной полярности · Питание: 24 VDC (12~48VDC) или 24 VAC с резервированием · Потребляемая мощность: 4,8 Вт при напряжении питания 48 VDC · Релейный контакт аварийной сигнализации · Размеры: 140 x 95 x 30 мм · Рабочая температура: -40°C ~ 75°C · Влажность: 5 - 95 % без конденсации · MTBF > 250000 часов
<p>Интерфейс VDSL2</p> <ul style="list-style-type: none"> · Электрический интерфейс: ITU-T G.993.1/993.2 · Скорость до 100/70 Мбит/с · Максимальная длина линии до 1,7 км · Линейный код: DMT · Симметричный и ассиметричный режим · Помехозащищенные режимы · Разъем: RJ-45 	

В таблице 2.3.2 представлены результаты тестирования скорости передачи данных конвертером qBRIDGE-307i, предоставленные непосредственно производителем. Тестирование проводилось в симметричном и в ассиметричном режимах. Различие в скоростях нисходящего (Down) и восходящего (Up) потоках обусловлено разными способами распределения частот для передачи данных в направлениях от провайдера к пользователю (downstream) и обратно (upstream).

Таблица 2.3.2 Соотношение скорости передачи и дальности связи для qBRIDGE-307i (витая пара, сечение жилы 0.2 мм²)

Ассиметричный режим						
Длина линии, м	300	500	800	1000	1300	1500
Скорость, Mbps (Down/UP)	87/74	75/62	44/28	39/13	28/6	26/3

Симметричный режим						
Длина линии, м	300	500	800	1000	1300	1500
Скорость, Mbps (Down/UP)	83/80	72/62	43/27	33/18	23/9	20/5

Перед окончательным решением о включении VDSL2-модемов в штатную конфигурацию кластера 2013 года и разрабатываемого телескопа NT1000, было проведено специализированное тестирование конвертеров qBRIDGE-307 в составе стенда имитации системы сбора данных. Стоит отметить, что модели устройств qBRIDGE-307 и qBRIDGE-307i выполнены на едином чипсете, поэтому они полностью совместимы между собой и дают одинаковые значения скоростей приёма/передачи данных.

Стенд для моделирования системы сбора данных позволяет имитировать канал связи между центральным модулем секции и центром кластера. Для этого используется две линии SHDSL-модемов и один экспериментальный канал данных на основе тестируемых VDSL2-модемов. Дополнительно в конфигурацию стенда включены конвертеры интерфейсов Ethernet-RS485 и управляемый коммутатор. Таким образом, стенд, с точки зрения топологии сети, представляет собой полную копию канала данных гирлянды кластера 2013 года. Схема стенда представлена на рисунке 2.3.2.

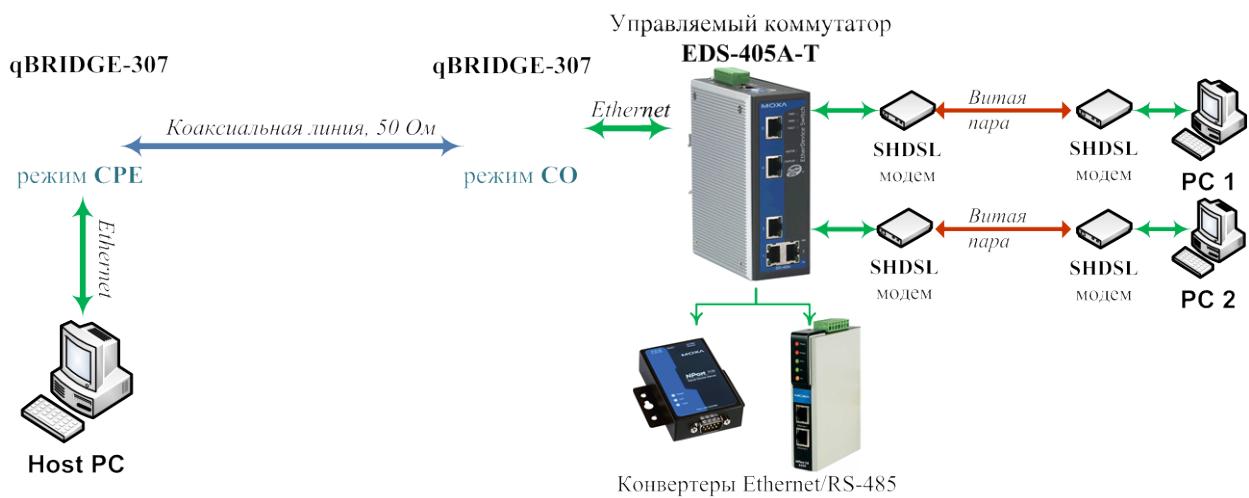


Рисунок 2.3.2. Схема стенда имитации системы сбора данных кластера NT1000

Проверку оборудования на стенде можно разделить на несколько этапов: тестирование максимальной скорости приёма/передачи обновлённых модемов на основе VDSL2, изучение функций управления потоками данных коммутатора EDS-405A-T и передача штатных пакетов информации от двух линий SHDSL-модемов через канал конвертеров qBRIDGE-307.

На первом этапе измерялась зависимость устойчивой скорости передачи данных между двумя VDSL2-модемами от длины линии. В качестве среды передачи использовался коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом. При тестировании производился обмен пакетами данных между двумя компьютерами, соединёнными посредством конвертеров qBRIDGE-307, без использования дополнительных линий SHDSL-модемов, максимальная скорость которых ограничена на уровне 15296 кбит/с. На рисунке 2.3.3. представлены результаты измерения скорости передачи в различных режимах работы qBRIDGE-307. Модем, подключенный напрямую к управляемому коммутатору, работал в режиме CO (Central Office), а соединённый с главным компьютером, был в режиме CPE (Customer Premise Equipment). Скорость передачи данных от CO к CPE в ассиметричном режиме существенно выше, чем в обратном направлении. Эта конфигурация отражает реальную нагрузку на подводную локальную сеть, когда основной большой поток данных идёт от каждой гирлянды в центр кластера и далее на береговой сервер, при этом ассиметричный режим работы VDSL2-модемов позволяет эффективно использовать эту разницу в скорости.

Защита от импульсных помех во время тестирования была отключена. Включение этого режима позволяет защитить данные от единичных помех длительностью до 250 мкс, но при этом увеличивается задержка прохождения данных через устройства. При выключенном режиме защиты от импульсных помех (Fast) задержка прохождения данных через устройства составляет менее 1мс, при включенном (Int, Interleaved) - до 10 мс. Тестирование в симметричном и ассиметричном режимах проводилось при пороговом отношении сигнал/шум равном 6 дБ, когда скорость соединения

максимальна. Режим с отношением сигнал/шум 9 дБ даёт более надёжное соединение и меньшие скорости передачи, однако, при штатном использовании протокола TCP с повторным запросом данных в случае потери необходимость такого режима пропадает.

Анализируя результаты проверки скорости передачи данных, можно сделать вывод, что на штатной дистанции порядка километра, VDSL2-модемы вдвое быстрее SHDSL-модемов, работающих на своей максимальной скорости 15296 кбит/с. Таким образом, комбинация двух этих типов устройств позволяет эффективно использовать полосу пропускания каждого из них на всех участках подводной локальной информационной сети.

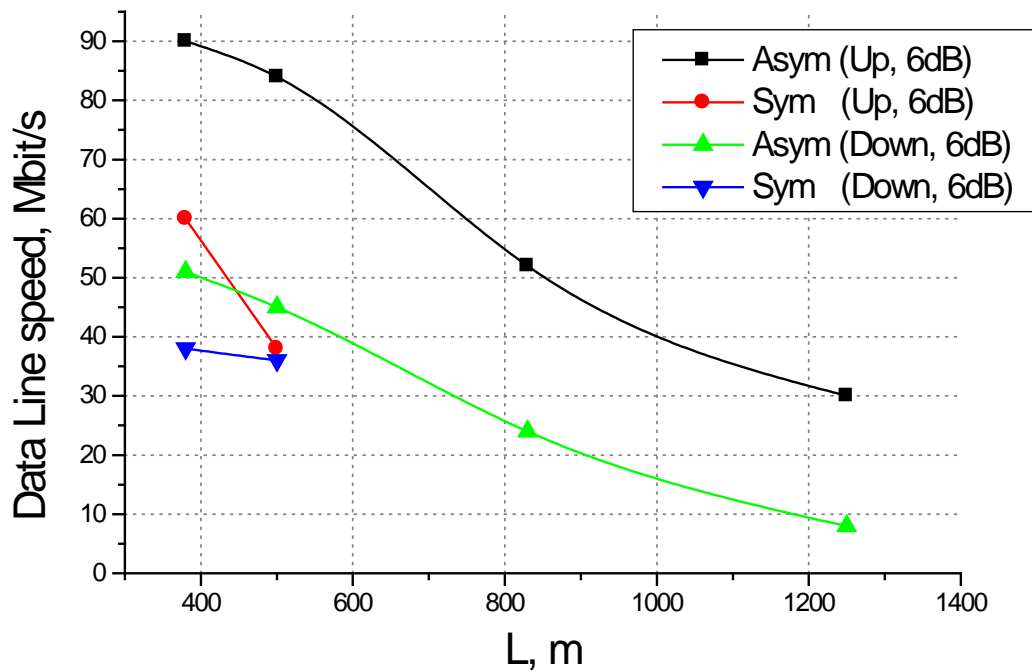


Рисунок 2.3.3. Скорость передачи данных модемов qBRIDGE-307

Дальнейшее тестирование на стенде проходило в полной конфигурации оборудования, представленного на рисунке 2.3.2. На данном этапе имитировалась передача данных от центральных модулей двух секции (PC 1 и PC 2) с обрывом одной из линий связи SHDSL-модемов. В версии подводной локальной сети кластера 2012 года обрыв одной из линий связи

приводил к ошибке в маршрутизации пакетов неуправляемого коммутатора и блокировал работу с конвертерами Ethernet/RS-485, необходимыми для управления питанием и системой позиционирования. Включение в конфигурацию стенда обновлённого управляемого коммутатора EDS-405A-T решило проблему “зависания” портов и обеспечило непрерывный доступ по IP к периферийным устройствам, вне зависимости от обрывов связи нижележащих участков локальной сети. К дополнительным преимуществам управляемого коммутатора можно отнести резервирование линий связи, мониторинг и диспетчеризация трафика, назначение IP-адресов подключаемым устройствам, блокировка трафика от не авторизованных посторонних устройств, SNMP-управление, а также возможность подключения к SCADA-системам.

Заключительный этап проверки работоспособности подводной информационной сети, скомбинированной на основе технологий Ethernet, VDSL2 и SHDSL, проходила при полной загрузке канала линии передачи данных. Расстояние между конвертерами qBRIDGE-307 составляло 1150 м, что немного больше фактической дистанции между центром гирлянды и центром кластера проектируемого телескопа НТ1000. Данные от двух импровизированных центров секций – PC1 и PC2 на максимальных для SHDSL-модемов скоростях (15296 кбит/с) поступали на главный компьютер (Host PS). В результате тестирования конвертеры qBRIDGE-307 стабильно держали поток данных со скоростью около 30 Мбит/с на заданной длине линии связи. К тому же, при максимальной нагрузке на сеть, проверялась доступность для связи одно и двух канальных блоков конвертации интерфейсов Ethernet/RS-485: NPort 5150A-T и NPort IA 5250-T соответственно. Каких-либо критических сбоев связи в процессе длительного тестирования обнаружено не было.

Окончательную проверку всех элементов системы сбора данных проектируемого нейтринного телескопа НТ1000 планируется провести во время их штатной работы в составе кластера 2013 года.

2.4. Стенд для тестирования измерительных каналов глубоководного нейтринного телескопа

Модернизация аппаратуры и кабельных коммуникаций системы сбора данных глубоководного нейтринного телескопа, выполненная на предыдущих этапах работ по проекту, потребовала проведения дополнительных исследований измерительных каналов установки. Для проведения этих исследований на заключительном этапе работ был создан испытательный стенд.

2.4.1. Структура и состав стенда

Стенд для исследования измерительных каналов был создан на базе последней версии аппаратуры, разработанной для глубоководного нейтринного телескопа: многоканальных блоков обработки аналоговых сигналов, блоков управления оптическими модулями, и модуля управления работой системы "Мастер". Структурная схема стенда представлена на рисунке 2.4.1.1. Оптические модули с фотоэлектронными умножителями R7081HQE, помещенные в светоизолированное помещение, подключаются к системе сбора данных стенда посредством специализированных глубоководных кабелей длиной 90 метров (см. отчет по 3-у этапу проекта), аналогичных кабелям, входящим в состав создаваемого нейтринного телескопа. Источником сигналов для измерительных каналов стенда являются как частицы космического излучения, так и калибровочные светодиоды, установленные на каждом ОМ. Дополнительно предусмотрена возможность имитация входных сигналов при помощи генератора наносекундных импульсов. Система электропитания стенда организована по тому же принципу, как и электропитание гирлянд оптических модулей, установленных в оз. Байкал. Используется входное постоянное напряжение 300В, которое преобразуется DC-DC конвертерами в 12 В (электропитание оптических модулей) и 5 В (электропитание блоков управления).

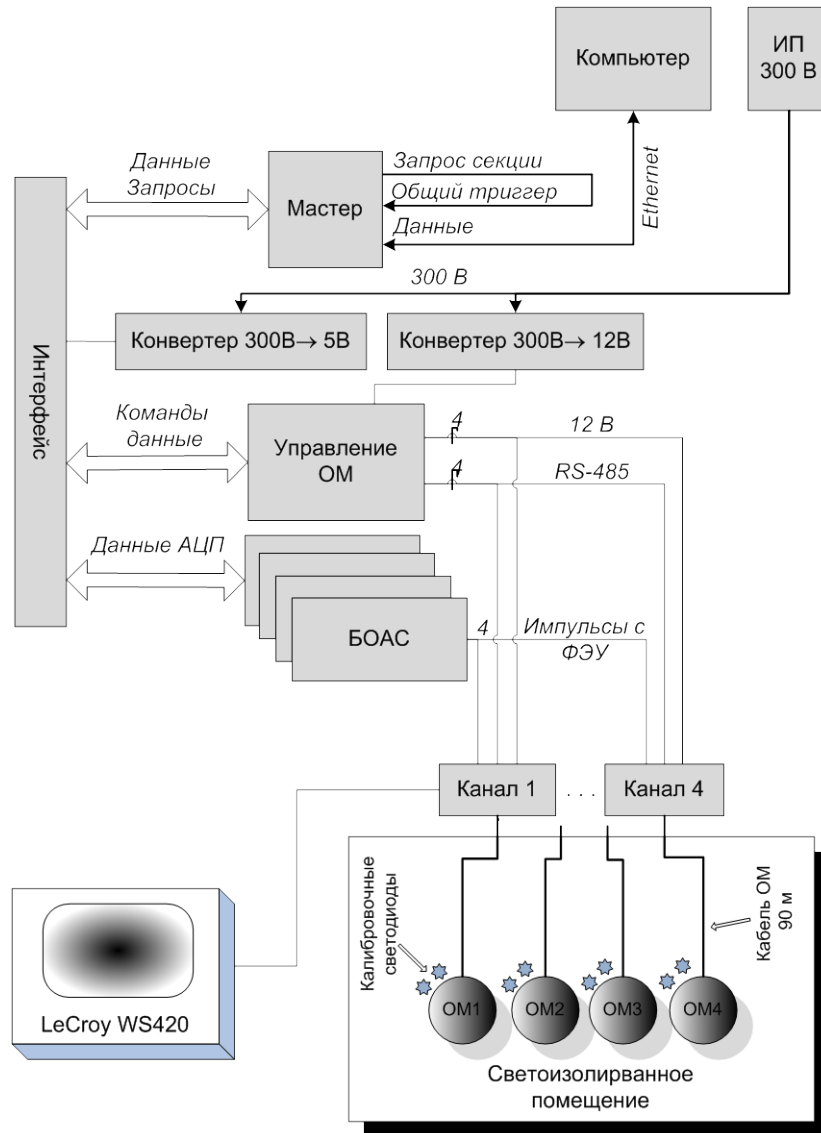


Рисунок 2.4.1.1. Структурная схема стенда для исследования измерительных каналов глубоководного нейтринного телескопа.

Импульсы с ОМ поступают в блоки обработки аналоговых сигналов на базе FADC (БОАС). Блок-схема одного измерительного канала БОАС представлена на рисунке 2.4.1.2. Канал БОАС реализован на базе АЦП AD9430 с разрешением 12 бит и частотой дискретизации 200 МГц. Оцифрованный сигнал с АЦП транслируется в FPGA (Xilinx Spartan 6). Программное обеспечение FPGA, загружаемое по каналу передачи данных, обеспечивает управление, буферизацию и первичную обработку поступающих от АЦП данных. Буфер памяти FPGA 12 Кбайт позволяет

накапливать информацию о форме входного сигнала во временном интервале до 30 мкс. Предусмотрено два режима организации внутренней памяти БОАС: одинарный или двойной циклический буфер. Двойная буферизация позволяет свести к минимуму потери, связанные с мертвым временем системы в период считывания данных из буфера. Триггерный сигнал, вырабатываемый модулем Мастер, останавливает процесс заполнения буферов АЦП, и данные о форме сигнала (событие) транслируются в Мастер через интерфейсный модуль. Начало и длительность временного интервала события являются динамическими параметрами, индивидуально настраиваемыми для каждого канала. К измерительному каналу подключен пиковый детектор и амплитудный анализатор, которые аккумулируют мониторинговую информацию (амплитудные гистограммы), позволяющую контролировать работу измерительного канала. Формирование триггера для АЦП осуществляется на основе информации, формируемой в каналах запросов БОАС. Каждый канал запросов включает в свой состав устройство сглаживания сигналов (уровень сглаживания от 1 до 8), двухуровневый цифровой компаратор с управляемыми порогами (низкий порог L и высокий порог H) и компилятор запросов L и H, транслируемых в триггерный блок модуля Мастер.

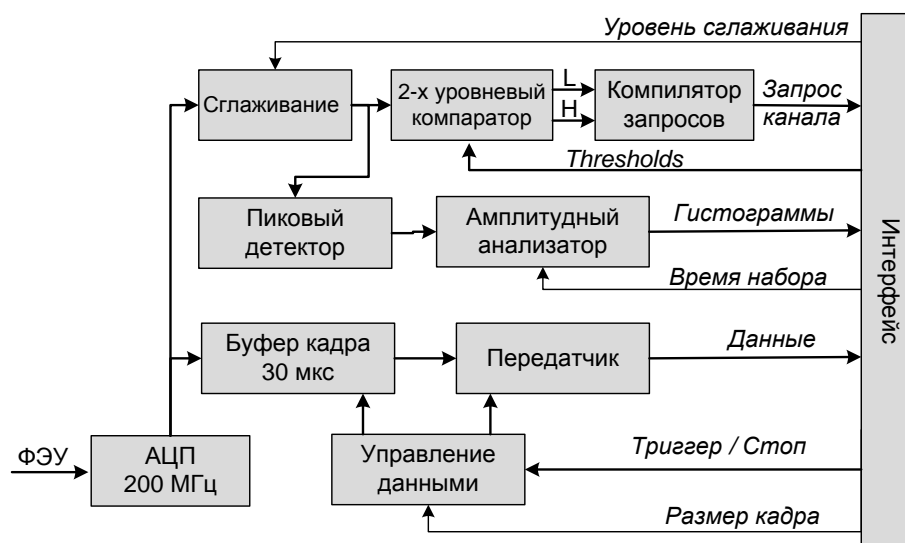


Рисунок 2.4.1.2. Блок-схема одного канала блока обработки аналоговых сигналов (БОАС).

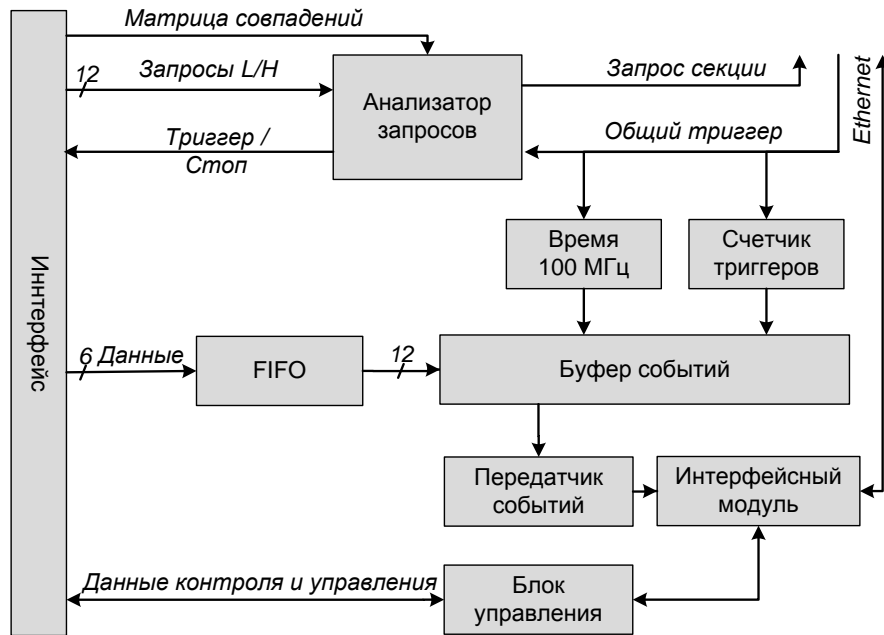


Рисунок 2.4.1.3. Блок-схема модуля Мастер.

Модуль Мастер (рисунок 2.4.1.3) предназначен для формирования триггера, чтения данных с БОАС, трансляцию данных по каналу Ethernet (100 Мбит/с) в центр сбора информации и управления работой аппаратуры. Анализатор запросов модуля Мастер формирует общий триггер на основании обработки поступающих в него данных о запросах L и H со всех каналов АЦП. Для обработки запросов используется встроенный программно-аппаратный модуль "матрица совпадений" ($12N \times 12L$), который обеспечивает максимально простой и быстрый способ генерации триггера. Предусмотрены два режима работы триггерной системы: (А) – мажоритарные совпадения сигналов запросов L в выбранном временном окне ("триггер L"), и совпадения L и H запросов с любых соседних оптических модулей ("триггер L&H"). Триггерный сигнал инициирует формирование общего сигнала Stop для всех измерительных каналов, чтение буфера данных АЦП, формирование выходного буфера события в модуле Мастер и его передачу в центр сбора данных по каналу Ethernet.

Модуль управления оптическими модулями (см. рисунок 2.1.4.4) позволяет включать и выключать электропитание оптических модулей, устанавливать параметры электроники и управлять режимами работы ОМ.

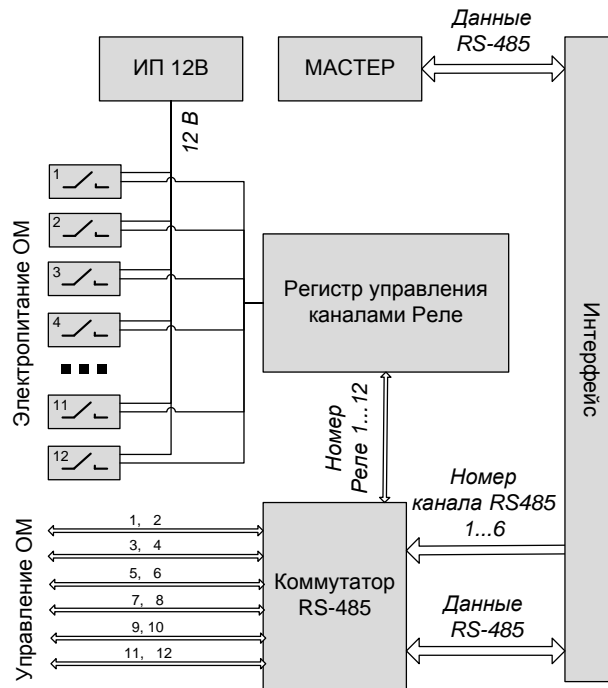


Рисунок 2.4.1.4. Блок-схема блока управления ОМ

Модуль управления включает в свой состав 12 релейных выходов и 6 коммутируемых каналов управления RS-485. Данные, необходимые для работы модуля управления, поступают по каналу Ethernet из центра сбора данных в модуль Мастер, который транслирует их в коммутатор RS-485 модуля управления. Коммутатор в свою очередь пересылает пакет данных в оптический модуль, адрес которого указан в заголовке пакета. К каждому каналу коммутатора подключено два оптических модуля. Скорость передачи информации может быть установлена 9600 или 115200 бод.

2.4.2. Программное обеспечение стенда

Программное обеспечение стенда включает в свой состав 3 программных модуля, предназначенных для управления оптическими модулями, сбором данных и визуализации событий. Базовый набор команд программ управления представлен в таблицах 2.4.2.1 и 2.4.2.2.

Таблица 2.4.2.1. Программа управления оптическими модулями

	Команда	Описание	Параметры
1	Change controller	Установка номера контроллера ОМ	1 ... 255
2	GetNetBaud	Чтение установленной скорости обмена по шине RS-485	-
3	Set\Get HV	Установка напряжения на ФЭУ, Вольты	0...1536
4	Set\Get Threshold	Установка порога счетчика шумов ОМ, Вольт	0...2.45
5	Set\Get LED1 code	Установка кода интенсивности свечения первого светодиода ОМ	0...1536
6	Set\Get LED2 code	Установка кода интенсивности свечения второго светодиода ОМ	0...1536
7	Set\Get LED Delay	Установка величины задержки между вспышками двух светодиодов, нс	0, 90, 135, ... 995
8	Get Status	Чтение мониторинговых параметров: напряжений +5В, +12В, -5В и температуры	-
9	Set\Get Exposure	Установка времени измерения темпа счета сигналов с ФЭУ счетчиком шумов, мс	1 ... 65535
10	Set\Get Interval	Установка интервала между измерениями темпа счета сигналов с ФЭУ счетчиком шумов, мс	1 ... 65535
11	Reserv	-	-
12	Set\Get LED Trig Numb	Установка количества повторов запуска светодиодов	1 ... 65535
13	Set\Get LED Trig Period	Установка периода запуска светодиодов, мс	1 ... 1000
14	Start LEDs	Инициация процедуры запуска светодиодов ОМ	-
15	Reset	Сброс контроллера ОМ	-
17	Set Buffer Size	Установка количества записей в циклическом буфере данных шумов ОМ	1 ... 1000
18	Get Buffer Size	Чтение количества записей в циклическом буфере данных шумов ОМ	-
19	Dump pulses	Измерение шумов ОМ и вывод состояния буфера.	-
20	Get HV	Чтение значения напряжения ФЭУ, Вольт	-
21	GetNetAddr	Чтение адреса контроллера ОМ	-
22	Enable Test Pulse	Разрешение формирования тестового импульса контроллером ОМ	-
23	Get error counter	Чтение (со сбросом) количества ошибок передачи по шине RS-485	-
24	Set power PMT On\Off	Включение и выключение электропитания ОМ	№ ОМ 0 ... 11; 0 – выключен, 1 – включен
25	Get Power PMT	Чтение состояния электропитания ОМ, каналы 0...11	-
26	Select OM	Установка номера канала RS-485	0 ... 5
27	Set OM speed	Установка скорости передачи канала RS-485	0 – 115200 бод 1 – 9600 бод
28	Get OM speed	Чтение скорости передачи данных RS-485	-

Таблица 2.4.2.2. Программа управления системой сбора данных

	Команда	Описание	Параметры
1	Set\Get coincidence	Установка кратности совпадений каналов	Кратность 1...12 0 – без подтвержд. 1 – с подтвержд.
2	Event to accumulate	Количество событий в наборе данных	1 ... 500000
3	Set Thresholds	Установка низких порогов каналов	Номер платы: 0... Nr Номер канала: 0 ... 3 Порог: 0 ... 2047
4	Set Thresholds_High	Установка высоких порогов каналов	Номер платы: 0...Nr Номер канала: 0 ... 3 Порог: 0 ... 2047
5	Set Data Offset	Установка начала временного диапазона для чтения буферов событий, байт	Номер платы: 0... Nr Номер канала: 0 ... 3 Диапазон: 0 ... 10240
6	Set program trigger	Установка режима формирования триггера по команде управляющей программы.	0 – выключен 1 – включен
7	Set Nplat	Установка количества плат АЦА (Nr)	Nr=1, 2, 3
8	Set Master Window width	Установка временного окна совпадений мастерной системы, 10 нс	0 ... 254
9	ReadEnCounter	Чтение счетчика событий	-
10	ResetEnCounter	Сброс счетчика событий	-
11	Reset FADC	Сброс регистров АЦП	-
12	SetTest cmd to FADC	Проверка работы канала АЦП	Номер платы: 0... Nr Номер канала: 0 ... 3
13	Reconnect	Разрыв и последующее восстановление соединения компьютера с платой Мастер	-
14	Set Smooth	Установка уровня сглаживания отсчетов АЦП канала для выработки триггера: 2 ⁿ	Номер платы: 0... Nr Номер канала: 0 ... 3 Сглаживание: n=0,1,2,3
15	Set coincidence matrix type	Установка режима работы мастерной системы	0 – совпадение соседних каналов 1 – мажоритарные совпадения
19	Set Histogram Period	Установка времени накопления данных в амплитудных гистограммах каналов, сек	0.1...100
24	Get Status	Чтение и вывод значений всех установленных параметров	-
25	Start	Инициация набора данных с последующей их записью	-
26	Load Boot	Загрузка внутренней программы платы Мастер (переключение с базовой на рабочую программу)	-
30	Quit	Завершение работы программы	-

Организация программных модулей в виде набора команд, вводимых оператором, позволяет гибко управлять работой стенда, обеспечивая возможность контроля работы измерительных каналов во всех режимах функционирования.

Результаты стендовых измерений записываются в банк данных, для просмотра которого используется программа визуализации событий. Программа разработана на базе интегрированного пакета ROOT и позволяет отображать временную развертку события для выбранных измерительных каналов, масштабировать окно просмотра данных и проводить первичный анализ сигналов (оценка амплитуды, заряда, времени появления). Пример рабочего окна программы показан на рисунке 2.4.2.1.

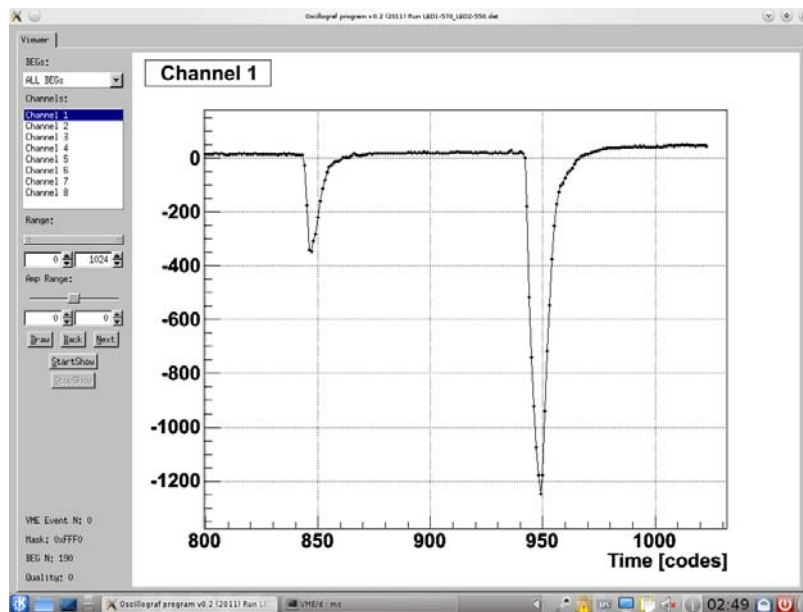


Рисунок 2.4.2.1. Рабочее окно программы визуализации событий.

Представлена временная развертка 1-го канала БОАС, отображающая сигналы с ФЭУ, инициированные импульсами двух светодиодов ОМ.

Программное обеспечение стенда подготовлено на языках программирования С и С++ и ориентировано для работы в операционной системе Alt Linux.

2.4.3. Результаты исследования работы измерительных каналов.

В настоящее время на созданном стенде проводятся исследования измерительных каналов модернизированной электроники. На первом этапе работ были проведены исследования наводок, влияния новых глубоководных кабелей на работу канала и точности восстановления времени формирования сигналов фотоэлектронными умножителями.

Оптические модули устанавливаются в оз. Байкал на общий грузонесущий кабель-трос, образуя гирлянду. Кабельные коммуникации ОМ монтируются на кабель-трос, образуя участки, на которых кабели проходят в непосредственной близости друг от друга. Длина таких участков в зависимости от места установки ОМ на гирлянде варьируется от 20 до 70 метров. Таким образом, сигнал, регистрируемый на одном измерительном канале, может наводить импульс на другой канал. Для оценки величины этого эффекта на стенде измерялась амплитуда перекрестных наводок для двух 90-метровых кабелях ОМ, проложенных в непосредственной близости друг от друга.

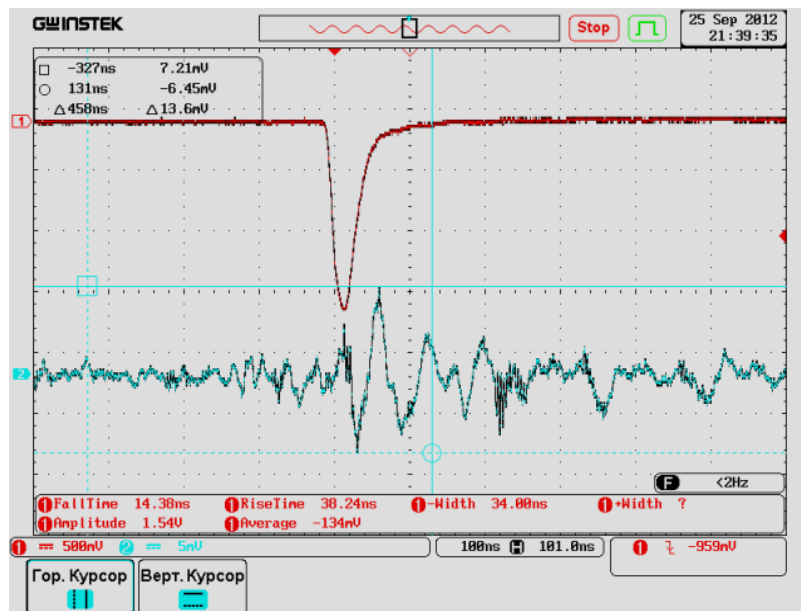


Рисунок 2.4.3.1. Пример наводки с канала на канал.

Величина наводки линейно зависит от амплитуды сигнала. На рисунке 2.4.3.1 показана наводка на канал от сигнала с амплитудой ~ 1500 мВ,

близкой к предельно возможной. Величина наводки не превышает 10 мВ и составляет величину $\sim 0.5\%$ от инициирующей наводку сигнала. Наводки такой амплитуды не превышают порога триггерной системы и не влияют на процесс регистрации событий.

Другим источником наводок являются сигналы управления, передаваемые по кабелям оптических модулей. Линия управления ОМ представляет собой не экранированную пару жил, размещенную в том же 90-метровом кабеле, в котором смонтирована коаксиальная линия передачи аналоговых сигналов. В процессе регистрации событий предусмотрен периодический опрос показаний счетчиков шумов оптических модулей, необходимый для мониторинга фоновых условий регистрации.

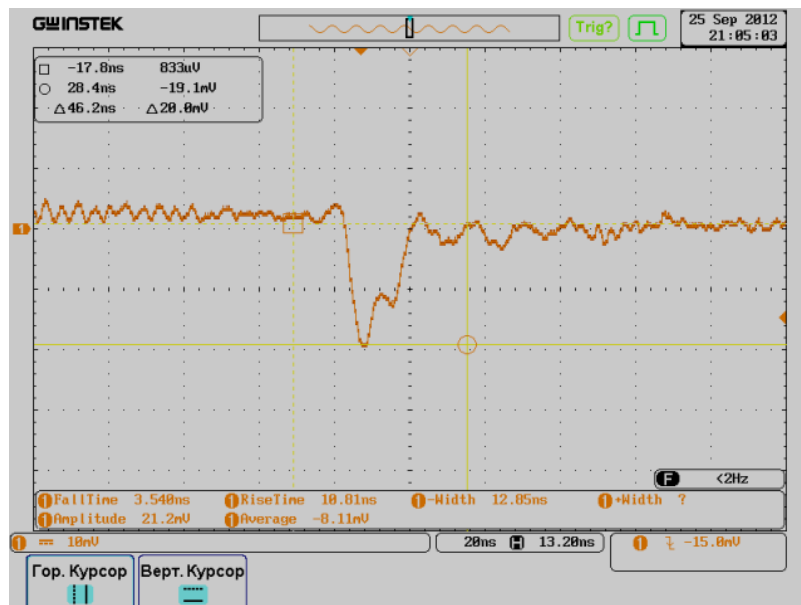


Рисунок 2.4.3.2. Наводка на канал от линии управления ОМ

На рисунке 2.4.3.2 показан пример наводки на измерительный канал от сигнала управления. Амплитуда наводки составляет величину ~ 20 мВ и может превышать порог регистрации триггерной системы. Однако, учитывая то, что частота таких сигналов составляет не более 10^{-6} от частоты шумов фотоэлектронного умножителя (шумы ФЭУ ~ 20 кГц, период опроса счетчика шумов не менее 10^2 секунд) и перекрестная наводка с канала на канал для сигналов управления в лабораторных условиях не наблюдалась (т.е.

отсутствуют коррелированные во времени сигналы с каналов) влиянием данного эффекта на процесс регистрации событий можно пренебречь.

Новая система кабельных коммуникаций оптических модулей выполнена на основе глубоководных разъемов SubConn, волновое сопротивление которых отличается от волнового сопротивления коаксиальной линии передачи аналоговых сигналов 50 Ом. Необходимость использования таких разъемов обусловлена их высокой надежностью и удобством в эксплуатации, что существенно сокращает время монтажа гирлянд в оз. Байкал. Однако, в результате применения новых разъемов в кабелях возникают отражения сигналов, что несколько усложняет процедуру анализа физических событий. На рисунке 2.4.3.3 показан пример отраженного сигнала.

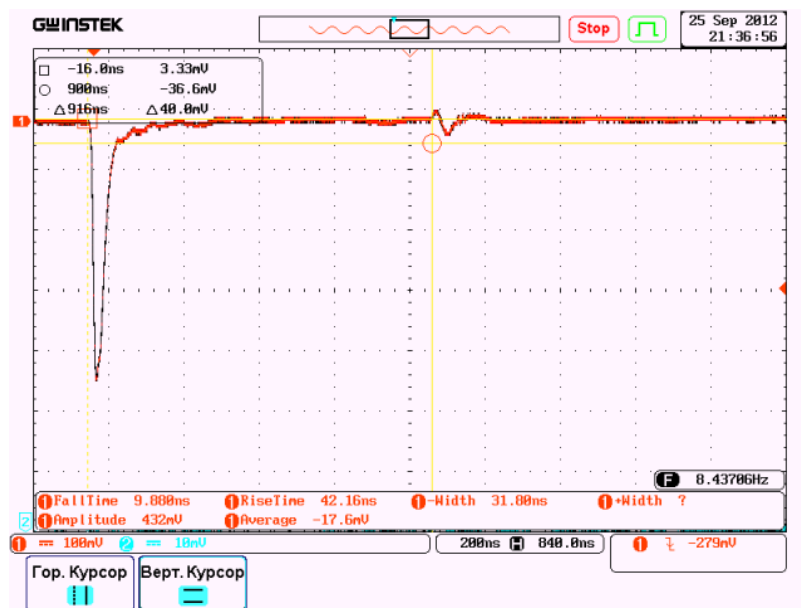


Рисунок 2.4.3.3. Пример отраженного сигнала в кабеле ОМ.

Величина отраженного сигнала составляет $\sim 5\%$ основного сигнала и может достигать 100 мВ для сигналов максимальной амплитуды. Подавление таких импульсов осуществляется в процессе обработки данных на основании информации о задержке сигнала относительно предыдущего. Время

задержки отраженного импульса строго фиксировано и составляет удвоенное время прохождения сигнала через кабель - около 900 нс.

Ключевым параметром нейтринного телескопа, определяющим его угловое разрешение, является точность определения времени регистрации сигналов измерительными каналами (точностью временной привязки). Требуемое угловое разрешение в 0.25° достигается при точности временной привязки на уровне 2 нс. Исследования этого параметра начаты на стенде в отчетный период.

Методика проведения исследований основана на определении временной задержки между импульсами, генерированными двумя светодиодами оптического модуля. На стенде была проведена серия измерений, в которой в широком диапазоне варьировалась интенсивность свечения светодиодных источников света при фиксированной задержке между импульсами, равной 497.3 нс. Пример события с двумя импульсами от светодиодов представлен на рисунке 2.4.2.1. Время задержки между двумя импульсами восстанавливалось на основании обработки информации о временной развертке события.

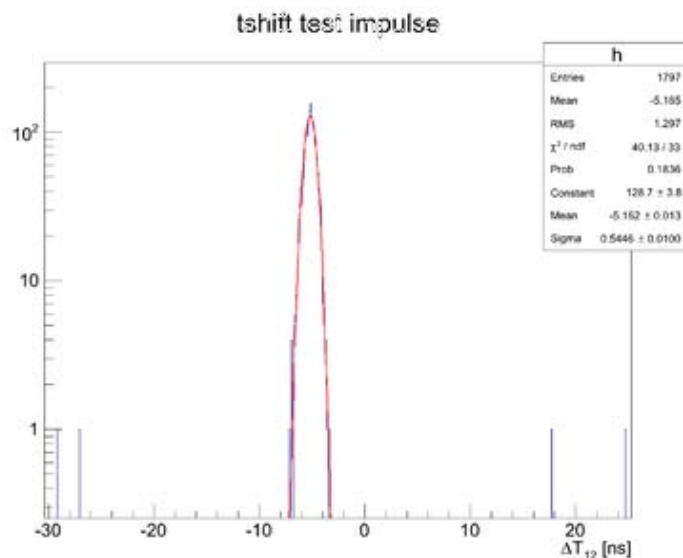


Рисунок 2.4.3.4. Распределение по восстановленному времени задержки между импульсами двух светодиодных источников света: $\Delta T_{12} - 500$, ns

Пример распределения по восстановленному времени задержки ΔT_{12} между двумя импульсами для одного из наборов данных представлен на рисунке 2.4.3.4 (из времени задержки было вычтено 500 нс). За начало импульсов принималось время, соответствующее половине амплитуды сигнала. Предварительный результат анализа проведенной серии измерений представлен на рисунке 2.4.3.5. Отклонение восстановленного времени задержки от ожидаемого, равного $(497 - 500)$ нс, составляет от 3 нс до 5 нс, что превышает требуемое значение ~ 2 нс.

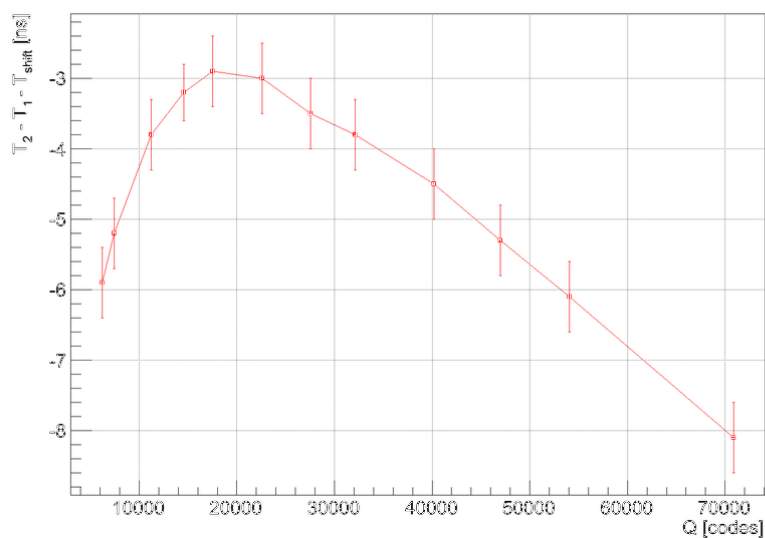


Рисунок 2.4.3.5. Зависимость восстановленной задержки ΔT_{12} между импульсами от величины сигнала светодиодного источника света.

Эффект увеличения задержки от -3 нс до -6 нс в области зарядов до 2×10^3 кодов АЦП объясняется искажением формы переднего фронта импульса. Этот эффект иллюстрирует рисунок 2.3.4.6. После прохождения кабеля длительность переднего фронта прямоугольного импульса увеличивается до ~ 15 нс. Влияние кабеля в меньшей степени сказывается на импульсах с малыми амплитудами из-за малой крутизны фронта. По мере роста амплитуды крутизна фронта растет, и интегрирование сигнала на кабеле проявляется в большей мере. Для предельно больших амплитуд все импульсы имеют одинаковый передний фронт, форма которого определяется

свойствами кабеля, а оценка задержки между сигналами по времени их прихода, определяемому на половине высоты импульса, смещается в сторону увеличения задержки. Этот эффект может быть учтен при анализе данных и не приведет к ухудшению углового разрешения детектора. Для объяснения наблюдаемой на рисунке 2.3.4.5 тенденции к понижению задержки в области зарядов более 2×10^3 кодов АЦП требуются дальнейшие исследования.

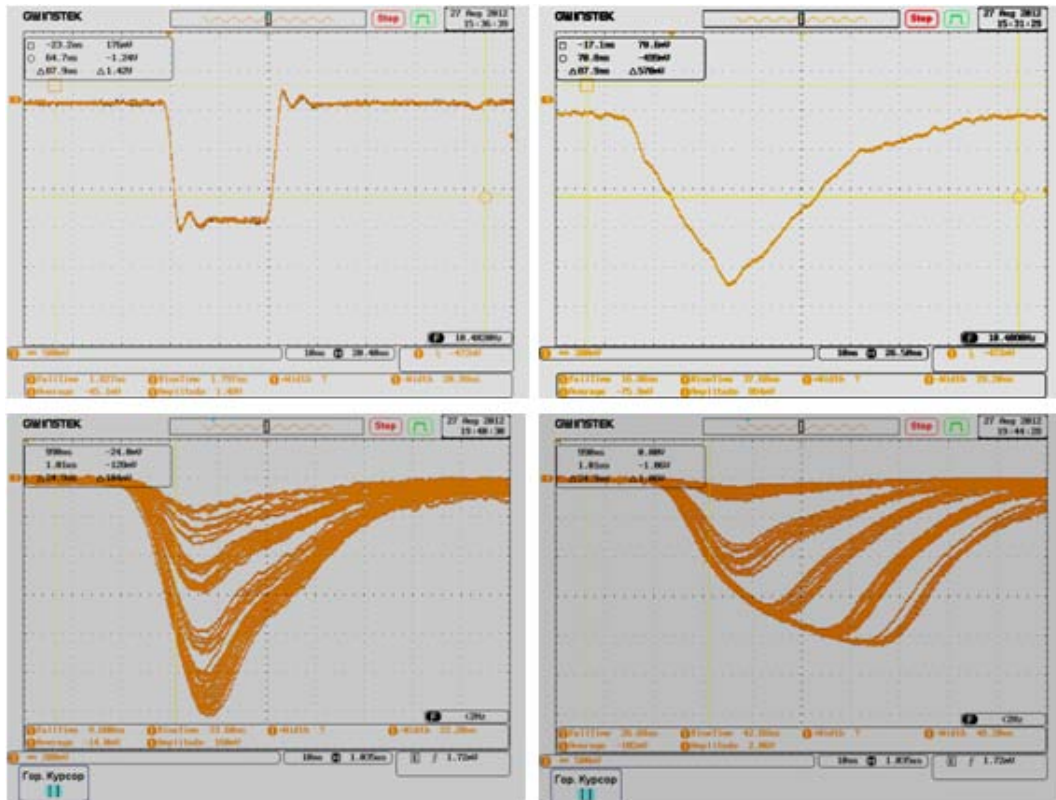


Рисунок 2.4.3.6. Осциллограммы сигналов: импульс от генератора (слева сверху), импульс от генератора после прохождения через 90-метровый коаксиальный кабель (справа сверху), набор импульсов с ФЭУ от светодиодного источника света с малыми амплитудами (слева снизу) и с большими амплитудами (справа снизу)

2.5. Оптические модули. Конструкция и технология сборки

Оптические модули являются главными элементами глубоководного нейтринного телескопа. Оптические модули регистрируют слабое черенковское излучение заряженных частиц – продуктов взаимодействия нейтрино с ядрами атомов воды - около 200 фотонов с 1 см траектории частицы. Диапазон амплитуд регистрируемых субнаносекундных световых импульсов простирается от приблизительно десятка до нескольких десятков тысяч фотонов. Оптимальными фотоприемниками, используемыми в оптических модулях нейтринных детекторов, являются фотоэлектронные умножители (ФЭУ). При этом для обеспечения необходимой чувствительности используются ФЭУ с большими площадями фотокатода. Альтернативой являются оптические модули с большим числом ФЭУ с малыми по площади фотокатодами. Однако такие оптические модули пока находятся в стадии разработки [2].

Фотоэлектронный умножитель непосредственно не может опускаться под воду, так как его стеклянный корпус имеет толщину стенки 5 – 6 мм и не может выдержать внешнее гидростатическое давление. Поэтому ФЭУ помещаются в стеклянные корпуса гидрозащиты, выдерживающие внешнее давление водной массы. Для снижения отражений света пространство между ФЭУ и стеклянным корпусом гидрозащиты заполняется иммерсионным материалом с показателем преломления близким к показателю преломления стекла. Для уменьшения влияния геомагнитного поля на коэффициент сбора фотоэлектронов и вторичных электронов ФЭУ помещается в магнитный экран, представляющий собой проволочную сетку, изготовленную из магнитно-мягкого металла. В состав ОМ входит также необходимая электроника (высоковольтный блок питания, предусилитель и пр.). Корпус гидрозащиты оснащается глубоководным герморазъемом (разъемами), через который передается электропитание, сигнал с ФЭУ и сигналы управления.

Чтобы отдельные части стеклянного корпуса гидрозащиты не могли смещаться относительно друг друга при транспортировке и процедуре погружения нейтринного телескопа внутри ОМ создается небольшой вакуум. Для этого корпус гидрозащиты оснащается вакуумным портом и простым вакуумметром.

Таким образом, в состав оптического модуля глубоководного нейтринного телескопа входят ФЭУ с большим фотокатодом, стеклянный корпус гидрозащиты, иммерсионный слой для оптического согласования поверхностей ФЭУ и стеклянного корпуса, магнитный экран, электроника, глубоководные герморазъемы, вакуумный порт и вакуумметр. Конструкция ОМ показана на рисунке 2.5.1.



Рисунок 2.5.1. Конструкция оптического модуля

Первые оптические модули для глубоководного нейтринного телескопа были разработаны в проекте DUMAND на базе ФЭУ НАМАМАТСУ R2018 с полусферическим фотокатодом диаметром 15 дюймов [3]. Корпусами гидрозащиты служили сферы из боросиликатного стекла диаметром 17 дюймов, выпускаемые фирмой BENTHOS. ФЭУ клеивался в сферу силиконовым гелем Semicosil@912, который одновременно служил и иммерсионным материалом.

В нашей стране первый оптический модуль с большим ФЭУ был создан в 1988 г. также на базе HAMAMATSU R2018 и сферы BENTHOS(17”), но в качестве иммерсионного материала использовался глицерин[4]. Модуль не содержал магнитного экрана. Такими модулями были оснащены первые прототипы глубоководного нейтринного телескопа NESTOR [5]. Позже глицерин в качестве материала для оптического согласования стеклянных элементов использовался в оптических модулях байкальского нейтринного телескопа НТ200 [6].

Преимущества глицерина перед силиконовым гелем в том, что, во-первых, он значительно дешевле, а во-вторых, имеет такой же показатель преломления, что и боросиликатное стекло – 1,47. Еще одно преимущество использования глицерина в том, что такие модули легко разбирать, если появится необходимость замены ФЭУ. Однако применение глицерина усложняет процедуру сборки модуля. Прежде всего, глицерин требует длительной сушки под вакуумом для удаления из него растворенной воды и воздуха. Кроме того, глицерин является проводящей жидкостью. Поэтому при сборке и эксплуатации оптического модуля требуются специальные меры по предотвращению его попадания в блок электроники.

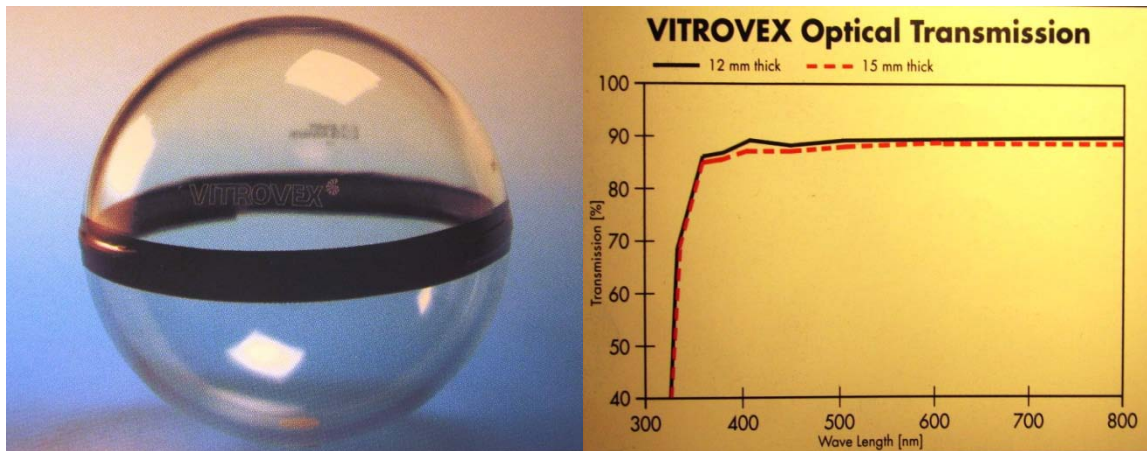
Оценка показала, что использование глицерина дает экономический эффект только при значительном количестве (более ста) собираемых модулей. При меньшем количестве собираемых модулей усложнение процедуры сборки нивелирует все преимущества глицерина. Тем не менее, с прицелом на будущее, нами была разработана технология сборки оптического модуля глубоководного нейтринного телескопа с использованием глицерина для оптического согласования стеклянных поверхностей, которая описана ниже.

В настоящее время в качестве корпусов гидрозащиты нами используются 17-ти дюймовые сферы “VITROVEX”, выпускаемые фирмой Nautilus Marine Service GmbH, Германия (рисунок 2.5.2а). Технические

характеристики материала сфер приведены в Таблице 2.5.1, спектральный ход прозрачности стекла сферы [7] показан на рисунке 2.5.2б.

Таблица 2.5.1. Характеристики боросиликатного стекла [7]

Температурный коэффициент расширения	$3,3 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$
Плотность при 25оС	2,23 г/см ³
Модуль Юнга	63 ГПа
Коэффициент Пуассона	0,20
Коэффициент теплопроводности при 90°С	1,2 Вт/м·К
Теплоемкость	0,8 Дж/г·К
Показатель преломления	1,472
Коэффициент пропускания (8мм, 500 нм)	89%
Коэффициент ослабления (8мм, 500 нм)	$\leq 1 \text{ дБ}$



а

б

Рисунок 2.5.2. Стекло сфера “VITROVEX”

Оптическим приемником служит ФЭУ НАМАМАТСУ R7180 HQE с полусферическим фотокатодом диаметром 10 дюймов с повышенным (до 30%) квантовым выходом. Общий вид ФЭУ показан на рисунке 2.5.3а, характеристики приведены в таблице 2.5.2.

Перед сборкой в стеклосфере сверлятся отверстия для установки вакуумного порта и разъемов. После сверления сфера моется водой с детским мылом. Внутренняя поверхность полусферы, в которой нет отверстий, обезжиривается сначала бензином марки «КАЛОША», затем ацетоном ЧДА и, наконец, изопропиловым спиртом. Подготовленная таким образом полусфера устанавливается в специальный монтажный стапель, показанный на рисунках 2.5.4а,б. Потом в нее помещается полусферическая часть магнитного экрана, к которой прикреплены два пластиковых световода, служащих для подачи на ФЭУ калибровочных световых импульсов.

ФЭУ с тщательно обезжиренной стеклянной поверхностью в области фотокатода закрепляется в держателе и помещается внутрь полусферы и центрируется. Расстояние между полюсом



а

б

Рисунок 2.5.4. Монтажный стапель

ФЭУ и внутренней поверхностью стеклосферы устанавливается порядка 4- 5мм. После фиксации ФЭУ на стапеле в пространство между ним и стеклосферой заливается глицерин, предварительно высушенный под вакуумом при температуре около 80оС. Процесс сушки глицерина длится 12

часов. Глицерин заливается до уровня, превышающего границу фотокатода на 5-6 мм.

Таблица 2.5.3. Технические характеристики SilGel@612 [9]

Плотность при 23оС	0,97 г/см ³
Коэффициент упругости	0,005 МПа
Коэффициент теплопроводности при 20 – 150оС	0,20 Вт/мК
Линейный коэффициент температурного расширения	300·10 ⁻⁶ м/мК
Диэлектрическая проницаемость	2,8
Показатель преломления при 25оС	1,404
Коэффициент пропускания (толщина слоя 10мм)	> 80%
Отношение А:В компонент, весовые части, максимальная твердость	1,5:1
Вязкость смеси	1000 мПа·с
Время пригодности смеси для заливки	2 ч
Время полимеризации слоя 1 см при 23оС	8 ч
Линейный коэффициент усадки	< 0,1%

Сверху глицерин покрывается слоем жидкого двухкомпонентного прозрачного силиконового геля SilGel@612 толщиной 8 см. Гель выпускается фирмой Wacker-Chemie GmbH. Технические характеристики геля приведены в таблице 2.5.3. Гель не смешивается с глицерином и имеет достаточную адгезию к стеклу, чтобы прочно и эластично фиксировать ФЭУ в стеклосфере. Эластичность фиксации важна, поскольку на глубине 1,3 км стеклянная сфера сжимается под давлением воды. Однако силиконовый гель имеет плохую адгезию к металлу. Поэтому во избежание просачивания глицерина сквозь слой силиконового геля вблизи проволок магнитного экрана, та область последнего, которая находится внутри слоя силикона, предварительно покрывается грунтовкой ELASTOSIL@RT601, обеспечивающей очень хорошее прилипание силиконового геля к металлам.



Рисунок 2.5.5. Вакуумная камера

После заливки геля собранная система вместе со стапелем помещается в большую вакуумную камеру, показанную на рисунке 2.5.5, и выдерживается под вакуумом (остаточное давление 0,2 – 0,1 атм.) в течение 1,5 часов для удаления пузырей воздуха, попавших в глицерин и в гель в процессе заливки. Затем вакуум в камере понижается до остаточного давления 0,4 атм. Собранная система остается в вакуумной камере еще 6 часов до полной полимеризации силиконового геля.

После окончания процесса полимеризации силиконового геля в полусферу клеиваются металлические кронштейны, служащие для фиксации блоков электроники и устанавливается ответная часть магнитного экрана. Вторая полусфера оснащается вакуумным портом и глубоководным герморазъемом. После этого собранный модуль готов для установки электроники.

В 2011 – 2012 г.г. нами были смонтированы 25 оптических модулей - 10 в 2011 г. и 15 в 2012 г.- по технологии, в основном, совпадающей с описанной выше. Отличие было только в том, что мы не использовали

глицерин, а заполняли пространство между ФЭУ и внутренней поверхностью полусферы полностью силиконовым гелем, и поскольку после полимеризации гель перестает быть текучим, нам не нужно было покрывать магнитный экран грунтовкой. Это немного упрощало процесс сборки. Выше мы уже отмечали, что использование глицерина целесообразно при больших партиях собираемых оптических модулей.

Собранные оптические модули вошли в состав детекторов-прототипов и экспериментальных образцов будущего Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ1000. Проведенные испытания показали надежность технологии сборки. Не наблюдалось никаких отклонений от нормы в поведении прозрачности, эластичности, адгезии и т.д. при транспортировке, длительном пребывании на морозе, погружении и подъеме модулей на поверхность. Ни один из 25 модулей не потребовал ремонта.

2.6. Анализ динамики положения гирлянды НТ1000

2.6.1. Гидроакустическая система позиционирования экспериментального кластера нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба на оз. Байкал

В апреле 2012 года на оз. Байкал был введен в эксплуатацию экспериментальный кластер, содержащий три гирлянды оптических модулей. Комплекс измерительных систем экспериментального кластера включает в себя экспериментальный образец системы позиционирования, содержащей 9 приемо-передающих модулей. В отчете представлены результаты обработки данных, полученных в апреле-мае 2012 г., по исследованию поведения гирлянд оптических модулей экспериментального кластера с помощью д.б.с.п. с широкополосными гидроакустическими приемо-передатчиками и совмещением функций позиционирования и акустической связи.

Гидроакустическая система позиционирования предназначена для определения координат оптических модулей телескопа. Необходимость

такой специализированной измерительной системы в составе нейтринного телескопа обусловлена тем, что в отличие от подземных или наземных детекторов космических лучей расположение фотодетекторов (оптических модулей) глубоководных нейтринных телескопов невозможно зафиксировать в определенном положении. Даже в условиях развертывания с ледового покрова на оз. Байкал постановка буйковых станций с оптическими модулями не может быть осуществлена с точностью лучше, чем несколько десятков сантиметров. Более того, расположение оптических модулей изменяется в процессе эксплуатации телескопа 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 ф.э.у. составляет 200 – 370 мм. С другой стороны, характерная точность измерения времени системами телескопа, составляет несколько наносекунд, что соответствует расстояниям в несколько десятков сантиметров при распространении света в воде. Таким образом, точность измерения координат оптических модулей нейтринного телескопа НТ1000 должна быть не хуже 10 – 20 см.

2.6.2. Современные методы позиционирования

Сведения о современных методах реализации д.б.с.п. представлены в обзорах [16] и [17]. Задача гидроакустического позиционирования сводится в основном к измерению времени распространения акустического сигнала между объектом позиционирования и базовыми станциями и пересчете этих времен в дальности с учетом скорости звука в воде. При этом точность позиционирования объектов зависит от степени неоднородности водной среды, особенностей многолучевого распространения акустического сигнала, скорости движения объектов позиционирования и отражающих границ [18]. На точность позиционирования также влияет наличие и качество текущих

данных по изменению скорости звука $c(z)$ с глубиной z (в.р.с.з. – вертикальный разрез скорости звука) по мере того, как меняется давление (P), температура (T) и соленость среды (S) в месте проведения измерений. Известно несколько аналитических выражений полученных из анализа экспериментальных данных ([19], [20] и др.), которые позволяют рассчитать величину скорости звука по данным о T , S и P . Соленость S вод озера Байкал очень мала, сухой остаток в среднем составляет 95 мг/л и варьируется не более чем на 30% от максимальной величины. В частности, вклад солености в величину скорости звука в Байкале, рассчитанной по формуле из работы [19], составляет порядка 12 см/с с возможными вариациями порядка 4 см/с. Для определения абсолютных значений скорости звука в районе расположения Байкальских нейтринных телескопов были проведены специальные эксперименты, которые показали, что в диапазоне глубин z от 500 м до дна озера зависимость скорости звука от глубины может быть описана следующим аналитическим выражением:

$$c(z) = 1418.96 + 0.0153645 \cdot z \text{ м/с}, \quad (1)$$

с точностью не хуже 30 см/с, и наилучшим образом согласуется с результатами расчета по формуле для скорости звука из работы [19] при подстановке в нее данных по глубинной зависимости температуры из работы [21]. По данным многолетнего мониторинга температурного режима глубинных вод, исключая придонный слой толщиной порядка 50 м, на глубинах больше 500 м колебания температуры воды не превышают нескольких сотых долей градуса, что приводит к очень редким изменениям скорости звука на величину не более 10 см/с. В придонном слое толщиной порядка 10 м возможны вариации температуры вплоть до 0.1 градуса или скорости звука порядка 0.5 м/с.

Функционирование д.б.с.п. предполагает решение следующих задач: измерение в.р.с.з., измерение времени прихода излученного импульса, сбор

промежуточных или окончательных результатов измерений на одной из станций д.б.с.п. или объекте позиционирования и, на основе этих данных, оценки положения объекта позиционирования в географических или местных координатах. Знание в.р.с.з. позволяет рассчитывать траектории распространения звука [22]. Компенсация не прямолинейности траекторий для известного в.р.с.з. повышает точность измерений, но требует повышенной вычислительной мощности измерителя [23].

Погрешность измерения времени распространения сигнала определяется свойствами акустического тракта, особенностями реализации приемо-передающих устройств и доступа к среде. Время распространения сигнала измеряется при его прохождении от источника до приемника и обратно (двусторонняя задержка) или только от источника до приемника (односторонняя задержка). При измерении двусторонней задержки часы источника и приемника сигнала могут быть не синхронизированы, в то время как при измерении односторонней задержки синхронизация часов источника и приемника сигнала обязательна. В любом случае, для измерения задержки распространения сигнала требуется управление доступом к среде.

Измерение двусторонней задержки требует более частого доступа к измерительной аппаратуре, по сравнению со случаем измерения односторонней задержки. При этом изменяющееся взаимное положение источника и приемника сигнала может существенно влиять на результат измерения; погрешность измерения становится пропорциональной величине взаимных смещений за время распространения сигнала в оба конца. С другой стороны, измерение односторонней задержки, требующее точной синхронизации часов, имеет погрешность, связанную с дрейфом тактового генератора, например, из-за влияния температуры. На практике, дрейф тактового генератора может оказывать значительное влияние на точность позиционирования.

Гидроакустические системы позиционирования можно разделить на несколько типов в зависимости от длины базовой линии антенны, от метода измерения времени распространения акустического сигнала, наличия базовых станций на поверхности, оснащенных приемниками GPS, или наличия мобильных базовых станций. Один из таких типов – д.б.с.п. со стационарными базовыми станциями, развернутыми на дне с длиной базовой линии от 50 до 2 000 м [17]. Другой тип – д.б.с.п. с мобильными базовыми станциями, которые, как правило, размещаются на поверхности с включением в состав буев интегрированных приемников GPS, так называемые «GPS Интеллектуальные Буи» [24]. Такие д.б.с.п. основаны на измерении односторонних задержек распространения сигнала от объекта позиционирования до базовых станции или в обратном направлении. Третий тип – смешанные д.б.с.п. – включают в себя базовые станции расположенные как на дне, так и на поверхности водоема.

Стационарные д.б.с.п. обеспечивают высокую точность позиционирования при условии выполнения точной геодезической привязки базовых станций на дне, что, как правило, делается с поверхности водоема, и поэтому представляет собой достаточно трудоемкую операцию. При использовании автономных донных станций время их работы ограничивается временем работы автономного источника питания. Д.б.с.п. с размещением базовых станций на поверхности водоемов дают меньшую точность, но предоставляют возможность использовать питание от возобновляемых источников, использующих энергию ветра и солнца, а также возможность использования радиоканала для связи между базовыми станциями и точного определения положения базовых станций (по GPS). Однако, поверхностные станции слабо защищены от внешних воздействий, что ограничивает возможные области их применения.

Системы гидроакустического позиционирования могут быть активными или пассивными в зависимости от свойств объектов позиционирования,

которые могут либо принимать, либо излучать акустические сигналы. Пассивные системы разрешают доступ к среде распространения сигнала только для базовых станций. В работе [17] дан подробный обзор пассивных систем позиционирования.

По способу формирования д.б.с.п. можно разделить на одноступенчатые и многоступенчатые. Одноступенчатые д.б.с.п. оценивают положение объекта на основе прямого обмена сигналами между ним и базовыми станциями. Многоступенчатые д.б.с.п. содержат промежуточный этап, на котором один из объектов позиционирования после определения собственной позиции временно становится базовой станцией для последующего определения позиций других объектов позиционирования, которые не были первоначально включены в систему базовых станций [25].

Наибольший интерес для позиционирования оптических модулей глубоководных нейтринных телескопов и ряда других применений представляют исследования, направленные на расширение функциональных возможностей д.б.с.п. путем комбинирования функции активного позиционирования и цифровой гидроакустической связи, а также обеспечивающие доступ к каналу распространения сигнала, как базовым станциям, так и объектам позиционирования [26]. Описываемая в данной работе система позиционирования реализует эти достижения в развитии д.б.с.п.

2.6.3. Система позиционирования экспериментального кластера

Ключевыми элементами любой гидроакустической длиннобазовой системы позиционирования (д.б.с.п.) являются базовые приемо-передающие акустические модули, координаты которых известны, а расстояния между ними образуют базовые линии д.б.с.п., и акустические модули, устанавливаемые в пространственных точках, координаты которых следует

определить в результате измерений. Набор базовых линий большой длины, т. е. длины, соизмеримой с дальностью до объекта позиционирования, образует длиннобазовую антенну. Координаты объекта позиционирования рассчитываются методом трилатерации.

Текущие пространственные координаты оптических модулей нейтринного телескопа НТ200 определялись в результате анализа данных гидроакустической системы ГАСИК [13], которая успешно функционирует в составе Байкальского нейтринного телескопа уже более 15 лет. В системе ГАСИК узкополосные акустические приемо-передатчики закреплены на кабель-тросах, несущих оптические модули телескопа НТ200/НТ200+, координаты этих передатчиков (наклонные дальности) определяются относительно системы автономных гидроакустических маяков, расположенных вблизи дна озера вне телескопа.

В д.б.с.п., альтернативной системе ГАСИК, реализована функция цифровой гидроакустической связи между модулями системы, совмещенная с функцией позиционирования. Наличие гидроакустической связи позволяет быстро позиционировать произвольно размещенные базовые модули системы, оперативно формируя длиннобазовую антенну, и осуществлять передачу данных на большие расстояния через последовательность гидроакустических модулей, а также проводить другие измерения без изменения конфигурации системы, например, измерения скорости звука. В настоящее время в мировой практике акустическая связь используется только в короткобазовых антеннах как дополнительная опция и активизируется переключением режима позиционирования на режим связи.

В рассматриваемой д.б.с.п. используются широкополосные акустические модемы S2C компании EvoLogics, позволяющие реализовать систему позиционирования с расширенными возможностями, повышенной помехоустойчивостью и повышенной точностью определения координат по

сравнению с известными системами. Для объединения функций позиционирования и цифровой гидроакустической связи на программном уровне разработан D-МАС протокол обмена цифровой информацией на основе так называемого МАС-протокола (гибридный МАС-протокол канального уровня общего назначения [14, 15]), реализующий гибридный метод управления доступом к среде. В рассматриваемой системе с объединением функций позиционирования и акустической связи реализован сферический метод позиционирования, используется один и тот же электроакустический тракт для приема и передачи сигналов, один и тот же модуль обработки сигналов, а также установлен режим обмена цифровой информацией между базовыми станциями и объектами позиционирования.

2.6.4. D-МАС протокол

Для объединения функций позиционирования и цифровой гидроакустической связи на программном уровне был разработан D-МАС протокол обмена цифровой информацией на основе так называемого МАС-протокола (гибридный МАС-протокол канального уровня общего назначения, реализующий гибридный метод управления доступом к среде, описание которого дано в работах [14, 15]). Основная особенность D-МАС протокола состоит в комбинировании различных алгоритмов доступа к среде. В частности, для передачи больших объемов данных используется специализированный алгоритм, учитывающий задержки распространения сигнала в канале и реализующий «переплетение» встречных потоков данных [27]. В D-МАС протоколе использованы алгоритмы обмена данными, свойственные гидроакустическим системам связи технологии S2C [28]. В соответствии с этим поддерживаются два типа данных [14], а именно, срочные сообщения (пакеты небольшой длины с фиксированной невысокой скоростью кодирования) и потоковые данные (пакеты большей длины с адаптивной, высокой скоростью кодирования).

Для передачи потоковых данных устанавливаются соединения, в ходе которых определяются параметры канала связи. Программный алгоритм управления потоками данных оптимизирует эффективность гидроакустического канала, повышая скорость передачи до максимально возможного значения [27]. Все получаемые по каналу данные динамически делятся на пакеты сравнительно небольшой длины в зависимости от параметров канала и заносятся в буфер и передаются потребителю в исходном виде.

D-MAC протокол имеет дополнительные программные интерфейсы, обеспечивающие применение специфических пользовательских протоколов управления доступом к среде. В частности, в состав протокола D-MAC входят шесть типов срочных сообщений, три из которых являются синхронными. Протоколы верхнего уровня устанавливают последовательности меток времени приема/передачи синхронных срочных сообщений, позволяющих реализовать собственные алгоритмы доступа к среде, например, узлов гидроакустической сети.

Для передачи срочных сообщений пакетами небольшой длины инициализация соединения не требуется и используется фиксированная (невысокая) скорость передачи данных. Также не требуется и адаптация скорости передачи к параметрам канала. В работе [27] показано, что при малой длине сообщения, время доставки срочного сообщения меньше, чем доставка такого же сообщения по любому из протоколов передачи потоковых данных, требующих адаптации к каналу.

Доставка срочных сообщений не прерывает передачу потоковых данных, т. к. срочные сообщения доставляются как фрагменты последовательности служебного сообщения. Срочное сообщение может иметь длину порядка 10^2 бит, и передаваться с фиксированной скоростью, приемлемой для широкого спектра параметров гидроакустического канала

[14]. С другой стороны, время передачи пакета не должно превышать время когерентности канала [29], и тогда скорость передачи должна быть достаточно высокой, чтобы длина сообщения соответствовала временным ограничениям гидроакустического канала. Протокол физического уровня на основе технологии S2C [28] предоставляет возможность надежной передачи срочных сообщений с фиксированной скоростью передачи. Это относится и к каналам с высокой динамикой характеристик, в частности, к горизонтальным каналам небольшой глубины в процессе перемещения приемного и передающего устройств.

Срочные сообщения могут быть классифицированы по типу адресации сообщений, требованию подтверждения доставки, степени синхронизации. В таблице 2.6.1 представлена классификация срочных сообщений.

Таблица 2.6.1. Классификация срочных сообщений.

срочные сообщения					
асинхронные			синхронные		
робастные	адресные	широко-вещательные	робастные	адресные	широко-вещательные

Доставка асинхронных срочных сообщений осуществляется на основе метода ALOHA, эффективного в отсутствие обмена потоками данных между узлами гидроакустической сети. Асинхронные срочные сообщения также могут доставляться как часть служебных сообщений, сопровождающих доставку пакетов потоковых данных.

Управление доступом к каналу для передачи синхронных срочных сообщений реализуются с помощью протоколов более высокого уровня, чем канальный. В частности, протокол D-MAC предоставляет пользовательский интерфейс, позволяющий протоколам более высокого уровня обеспечивать синхронизацию с физическим уровнем, например, задавать время отправки срочных сообщений и получать время поступления ответного сообщения в

приемный тракт (передача синхронных срочных сообщений при обмене потоковыми данными не предусмотрена).

Синхронные широковещательные срочные сообщения (с.ш.с.с.) отправляются по требованию протокола более высокого уровня и не требуют получения подтверждения о доставке (передача с.ш.с.с. также не предусмотрена при обмене потоковыми данными). Передача с.ш.с.с. начинается либо сразу после запроса протокола более высокого уровня, либо в другой момент времени, определяемый этим протоколом (по временной метке схемы, реализующей физический уровень работы гидроакустического модема). В последнем случае начало передачи определяется в виде суммы времени τ и некоторой задержки отправки δ , так что передача с.ш.с.с. начинается в момент $\tau + \delta$. Протокол D-MAC передает значение задержки δ в составе с.ш.с.с. вместе с другой информацией получателю сообщения. После завершения передачи D-MAC отправляет протоколу более высокого уровня отчет с меткой начала передачи с.ш.с.с. D-MAC на стороне получателя декодирует сообщение, отмечает метку времени приема μ и возвращает его протоколу верхнего уровня вместе с декодированным сообщением и значением задержки δ .

Таблицы 2.6.2 и 2.6.3 иллюстрируют передачу с.ш.с.с. между двумя гидроакустическими модемами (№ 1 и № 2) технологии S2C. Модем № 1 получает команду AT*SENDIMS на отправку с.ш.с.с., за которой следует список разделенных запятыми параметров команды. Первым параметром является длина сообщения, вторым – параметр 255 (широковещательный адрес сети), третьим и четвертым являются, соответственно, параметры τ и δ . При нулевых значениях τ и δ отправки с.ш.с.с. осуществляются немедленно. После передачи, модем № 1 возвращает отчет SENTIMS (сообщение отправлено).

Таблица 2.6.2. Листинг гидроакустического модема № 1

1 AT * SENDIMS,1,255,0,0,-
2 ОК
3 SENTIMS,255,15073173
4 RECVIMS,1,1,255,20740255,1000000,976,-40,120,0,0.1,-

Таблица 2.6.3. Листинг гидроакустического модема № 2.

1 RECVIMS,1,2,255,17406714,0,976,-40,120,0,0.1,-
2 AT * SENDIMS,1,255,17406714,1000000,-
3 ОК
4 SENTIMS,255,18406714

Первый параметр отчета – широковещательный адрес сети, второй параметр – момент начала передачи модема № 1, так что $\tau_1 = 15\ 073\ 173$ мкс.

Гидроакустический модем № 2 получает с.ш.с.с. от модема № 1 и посылает отчет RECVIMS (сообщение принято) протоколу верхнего уровня, как показано в таблице 3.

Первые три параметра – это, соответственно, длина сообщения, адрес источника и адрес получателя (в данном случае, широковещательный адрес равен 255). Метка времени начала передачи модемом № 2 – параметр 4, так что $\mu_2 = 17\ 406\ 714$ (остальные параметры не имеют отношения к теме данной статьи). Модем № 2 получает команду AT*SENDIMS для отправки с.ш.с.с. с задержкой $\delta = 1\ 000\ 000$ мкс после наступления времени $\tau_2 = 17\ 406\ 714$ мкс, т. е. через одну секунду после начала приема с.ш.с.с. от модема № 1. Модем № 1 получает с.ш.с.с. от модема № 2 в момент времени $\mu_1 = 20\ 740\ 255$ мкс при значении задержки отправки $\delta = 1\ 000\ 000$ мкс, как указано в таблице 2. Двусторонняя задержка распространения сигнала может быть оценена на стороне модема № 1 после вычитания μ_1 из суммы отметок времени начала передачи τ_1 и задержки $\delta = 1\ 000\ 000$ мкс. Таким образом, задержка распространения $\tau = \mu_1 - \tau_1 - \delta = 2\ 333\ 541$ мкс.

2.6.5. Сферический метод длиннбазового позиционирования

Д.б.с.п. может быть реализована на основе сферического или гиперболического методов позиционирования [30]. В данной работе использован сферический метод позиционирования, который основан на измерении времени распространения акустических сигналов между базовыми станциями и объектом позиционирования с последующим вычислением координат объекта с помощью трилатерации. Управление процессами измерений осуществляется D-MAC протоколом и пользовательским интерфейсом, который позволяет протоколам более высокого уровня обеспечивать обмен и синхронизацию передачи данных с физическим уровнем с помощью синхронных широковещательных срочных сообщений.

В этом разделе приведено описание алгоритма обмена с.ш.с.с., реализующего сферический метод длиннбазового позиционирования, который обеспечивает измерение всех взаимных задержек распространения между базовыми станциями, а также между каждой из базовых станций и объектом позиционирования.

Задержки распространения

Как упоминалось выше, задержка распространения сигнала может быть измерена при одностороннем или двустороннем обмене сигналами между базовыми станциями и объектом позиционирования. При одностороннем обмене требуется точная синхронизация между базовыми станциями и объектом позиционирования. Это требование трудно выполнимо для большинства практических задач. По этой причине, использование двустороннего обмена является предпочтительным.

Рассмотрим схему обмена сообщениями, которую иллюстрирует рисунок 2.6.1. Здесь цифрами 0 и 1 обозначены базовые станции, цифрой 2 – объект позиционирования. Базовая станция 0 (гидроакустический модем 0)

отправляет сообщение, объект позиционирования (гидроакустический модем 2) измеряет время приема этого сигнала и отправляет ответное сообщение с некоторой задержкой δ_2 . Значение задержки отправки δ_2 передается как часть ответного сообщения.

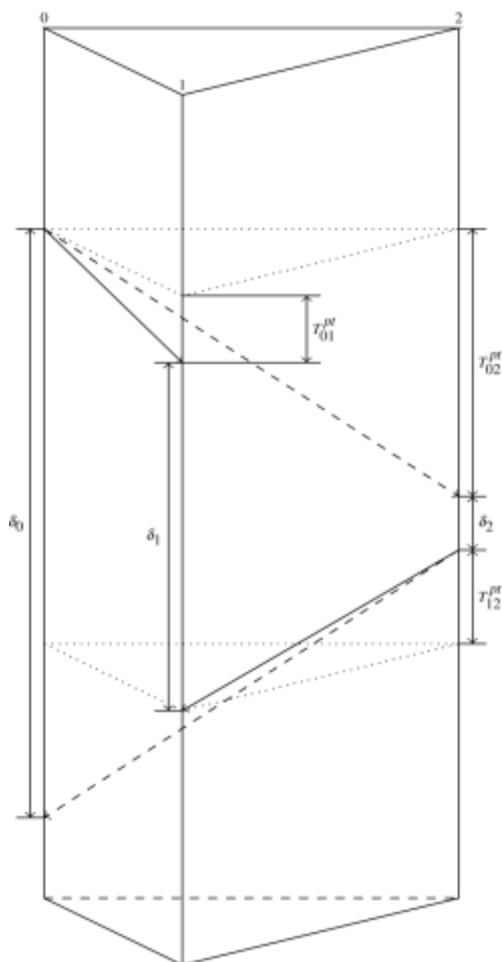


Рисунок 2.6.1. Эскиз пространственно-временной диаграммы локализации объекта позиционирования.

Базовая станция 0 измеряет время приема и оценивает задержку распространения сигнала (рисунок 2.6.1):

$$T_{02}^{pr} = (\delta_0 - \delta_2) / 2 \quad (1)$$

В случае базовой станции 1:

$$T_{01}^{pr} + \delta_1 = T_{02}^{pr} + \delta_2 + T_{12}^{pr} \quad (2)$$

В результате, задержка распространения T_{12}^{pr} между модемами 1 и 2 может быть получена из выражения:

$$T_{12}^{pr} = T_{01}^{pr} + \delta_1 - (\delta_0 + \delta_2)/2. \quad (3)$$

Задержка распространения T_{01}^{pr} между базовыми станциями предполагается известной. Для завершения оценки задержки распространения между станциями 1 и 2, значение δ_0 должно быть передано станции 1.

Другим вариантом является передача значения $\gamma_{12} = T_{12}^{pr} + \delta_0/2$ базовой станции 0. Этот вариант рассматривается в следующем разделе.

Цикл обмена сообщениями

Пусть длиннобазовая антенна состоит из N базовых станций и M объектов позиционирования. Цикл обмена сообщениями начинается с передачи с.ш.с.с. одной из базовых станций (стартовой станцией). Получив начало с.ш.с.с., инициирующего цикл, каждый объект позиционирования определяет интервалы времени для отправки своего ответа. Таким образом формируется временная цепочка обмена сообщениями. Базовые станции получают с.ш.с.с. от всех объектов позиционирования и оценивают дальности до них. Затем они передают оценки этих дальностей стартовой станции. В зависимости от исполнения д.б.с.п. такая передача может осуществляться по гидроакустическому каналу, радиоканалу или кабелю.

Позиционирование одного объекта требует передачи двух с.ш.с.с. и доставки $N - 1$ значений τ_{i1} от i -й базовой станции к стартовой станции, где индексом 1 обозначен первый объект позиционирования. Позиционирование дополнительного, j -го объекта, требует передачи одного с.ш.с.с. и $N - 1$ значений τ_{ij} от всех базовых станций к стартовой базовой станции. Значения τ_{ij} для фиксированного числа i может доставляться одним сообщением,

поэтому количество пакетов, доставляемых стартовой станции, остается неизменным. Один цикл позиционирования M объектов требует передачи $M + I$ с.ш.с.с. и $N - I$ пакетов с M значениями задержек τ_{ij} в каждом из них. Если базовые станции размещены на дне моря для автономной работы, то доставка τ_{ij} может выполняться по гидроакустическому каналу. В этом случае в конце цикла обмена сообщениями стартовая базовая станция получает значения задержек τ_{ij} путем передачи потоковых данных, предусмотренных D-MAC протоколом.

Рассмотрим настройку задержки отправки δ . Задержка отправки с.ш.с.с. должна быть определена как функция которая зависит от сетевого адреса станции и, дополнительно, от специального кода, включенного в состав обмениваемых сообщений. Например, с.ш.с.с. может включать в себя последовательность адресов станций или хэш-код последовательности, в частности, для предопределения порядка обмена между станциями. В простейшем случае каждая станция вычисляет задержку передачи для отправки ответа путем умножения порядкового номера сообщения на максимально возможное значение задержки распространения для данной конфигурации длиннобазовой антенны. Эта функция известна всем станциям гидроакустической сети.

После завершения цикла обмена, стартовая станция получает все задержки распространения между объектами позиционирования и базовыми станциями. Этих данных достаточно для оценки положения объектов позиционирования, предполагая прямолинейное распространение сигнала в гидроакустическом канале. Если в.р.с.з. известен, позиции объектов могут быть рассчитаны по более сложному алгоритму, учитывающему не прямолинейность траекторий распространения сигнала.

2.6.6. Алгоритмы определения положения объекта позиционирования

Как показано в работах [23] и [31], упрощающее предположение о прямолинейном распространении сигнала не обеспечивает высокой точности позиционирования. В свою очередь, оценка формы траектории при известном в.р.с.з., обеспечивает более высокую точность. В работе [23] использовалась трассировка лучей по методу, изложенному в работе [22], основанному на решении системы уравнений для траектории распространения сигнала. Основная идея этого алгоритма состоит в расчете поверхностей, имеющих равное удаление для каждой из базовых станций, и вычислении положения цели, как точки, в которой сумма квадратов расстояний до всех таких поверхностей минимальна. Хотя этот алгоритм дает высокую точность оценки позиции, его вычислительная трудоемкость очень высока. В работе [31] представлен другой подход, в котором в.р.с.з. аппроксимируется несколькими линейными участками. Идея состоит в построении траектории распространения сигнала в стратифицированной среде, состоящей из нескольких слоев, в пределах которых скорость звука не меняется. Этот подход позволяет добиться такой же точности, как в работе [23], но имеет существенно меньшую вычислительную сложность.

В работе [22] система уравнений описывающих траекторию распространения сигнала представлена в следующем виде (уравнения даны в цилиндрической системе координат, где r обозначает горизонтальное удаление, а z – глубину):

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{1}{c(r, z)} \frac{dr}{ds} \right) = - \frac{1}{c^2(r, z)} \nabla c(r, z), \quad (4)$$

где $r = [r(s), z(s)]$ – координата, задаваемая функцией длины дуги s , $r(s)$ – смещение по горизонтали, $z(s)$ – смещение по вертикали и $c(r; z)$ – скорость звука.

Уравнения могут быть упрощены до уравнений первого порядка путем введения переменных $(\rho(s), \zeta(s))$, пропорциональных вектору касательной в данной точке:

$$\frac{dr}{ds} = c\rho(s), \quad (5)$$

$$\frac{d\rho}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial r}, \quad (6)$$

$$\frac{dz}{ds} = c\zeta(s), \quad (7)$$

$$\frac{d\zeta}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial z}. \quad (8)$$

Предполагается, что скорость звука c меняется только с глубиной, поэтому начальными условиями являются:

$$r(0) = r_s, z(0) = z_s, \quad (9)$$

$$\rho(0) = \cos(\alpha)/c(0), \zeta(0) = \sin(\alpha)/c(0), \quad (10)$$

где (r_s, z_s) обозначает положение источника сигнала, и α – угол по отношению к горизонтальной плоскости, проходящей через соответствующую базовую станцию.

Пусть задержка распространения между базовой станцией i и объектом позиционирования j равна τ_{ij} и определена в ходе обмена с.ш.с.с. по алгоритму, описанному выше. Если акустическая волна излучается базовой станцией в момент времени $t = 0$, то поверхность равноудаленная от данной базовой станции, определяется как множество точек, которые эта волна достигает в момент времени $t = \tau_{ij}$. Кроме того, пусть так же, как в работе [23], в.р.с.з. не меняется при горизонтальном смещении от базовой станции, тогда, существует осевая симметрия линий удаления от базовой станции.

Назовем сечение этой поверхности в плоскости горизонта изолинией дальности. Изолиния дальности может быть получена путем задания угла α в системе уравнений для траектории распространения сигнала. Сделаем упрощающее предположение, что с увеличением угла α , глубина изолинии дальности изменяется монотонно. Начальное приближение положения цели может быть получено в рамках прямолинейной модели распространения сигнала c_α . Эта модель предполагает, что звук распространяется прямолинейно с некоторой средней скоростью. Наклонная дальность между базовой станцией и объектом позиционирования равна:

$$R_{ij}^{(0)} = \tau_{ij} \cdot c_\alpha, \quad (11)$$

где i – индекс базовой станции, j – индекс объекта позиционирования. Это значение должно быть определено для каждой из базовых станций. Положение объекта оценивается путем трилатерации. Обозначим координаты начального приближения для положения объекта позиционирования $(x_j^{(0)}, y_j^{(0)}, z_j^{(0)})$. Найдем наклонные дальности от базовой станции i до объекта позиционирования j с использованием системы уравнений для траектории распространения сигнала со следующими граничными условиями:

$$r(0) = 0, z(0) = z_i, z(s_{ij}) = z_j^{(k)}, \quad (12)$$

где r – горизонтальное удаление, z – глубина, s_{ij} – длина дуги в момент времени τ_{ij} , $z_j^{(k)}$ – значение z -координаты объекта позиционирования, полученное на k -й итерации уточнения положения объекта позиционирования. Уравнение (11) с граничными условиями (12) может быть решено с использованием метода деления отрезка пополам, изменяя угол α в пределах $(-90^\circ, +90^\circ)$. Решение существует, если $z_j^{(k)}$ лежит внутри интервала глубин, соответствующих границам угла α .

Упрощающее предположение, предложенное выше, обеспечивает сходимость алгоритма. Пары (α, z) , получаемые в ходе деления отрезка пополам, могут сохраняться и использоваться для уточнения первоначального интервала в ходе следующей итерации уточнения положения объекта позиционирования. В результате, решение задачи может быть получено в виде $(r_{ij}^{(k+1)}, z_j^{(k)})$. Наклонная дальность на итерации $k + 1$ равна:

$$R_{1j}^{(k+1)} = \sqrt{(z_j^{(k)})^2 + (r_{1j}^{(k+1)})^2}. \quad (13)$$

Рисунок 2.6.2 иллюстрирует процесс уточнения положения объекта позиционирования в плоскости. S_1 и S_2 – изолинии дальностей от станций n_1 и n_2 , j – индекс объекта.

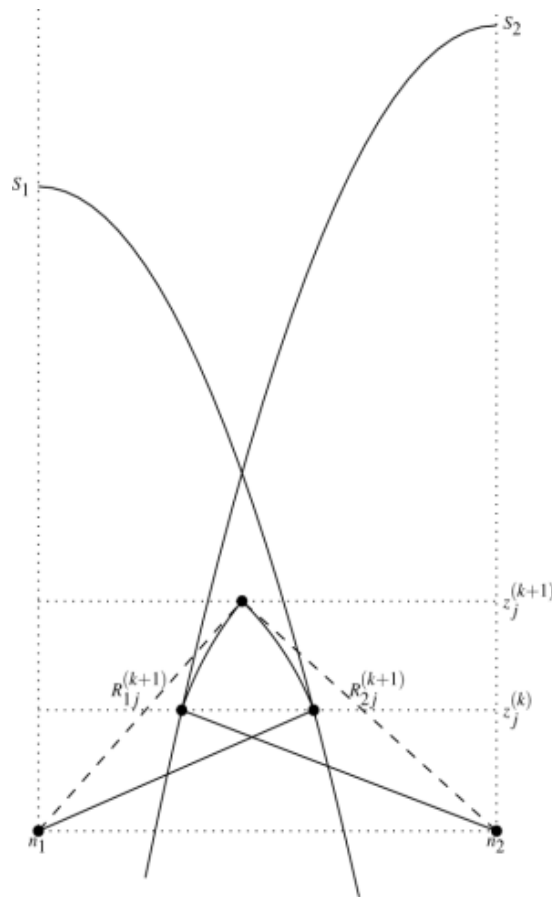


Рисунок 2.6.2. Иллюстрация к уточнению положения объекта позиционирования (в плоскости).

На итерации $k + 1$ находятся точки на изолиниях дальности, соответствующих глубине $z_j^{(k)}$, а затем определяются наклонные дальности $R_{1j}^{(k+1)}$ и $R_{2j}^{(k+1)}$ между базовыми станциями и объектом позиционирования.

С определением новой наклонной дальности, наряду с $(k + 1)$ -ым уточнением глубины $z_j^{(k+1)}$ определяются новые координаты объекта позиционирования. Итерационный процесс прерывается при выполнении одного из следующих условий:

- $\|z_j^{(k+1)} - z_j^{(k)}\| < \varepsilon$, где ε – некоторое наперед заданное малое значение;
- максимальное число итераций k_{max} достигнуто;
- решение краевой задачи не существует для заданных значений задержки распространения сигнала;
- трилатерация невозможна для заданных значений задержки распространения сигнала.

По завершении итерационного процесса по упрощенному алгоритму получаем такую же точность определения координат объекта позиционирования, как в работе [23].

2.6.7. Экспериментальные результаты

В апреле 2012 г. на оз. Байкал был развернут и введен в эксплуатацию модернизированный экспериментальный кластер телескопа НТ1000, включающий экспериментальный образец д.б.с.п. Д.б.с.п. экспериментального кластера нейтринного телескопа состоит из девяти гидроакустических модемов: три из них формируют донную длиннобазовую антенну, а шесть других устройств являются объектами позиционирования (маяками-ответчиками) размещенными на трех гирляндах оптических модулей. Базовые станции прикреплены к якорям гирлянд кластера. Геодезическая привязка базовых станций (по отношению к реперу), была проведена непосредственно после развертывания кластера с поверхности

льда, и ее результаты представлены в таблице 2.6.4. В таблице 2.6.5 приводятся номер гирлянды и глубина расположения каждого из девяти гидроакустических модемов.

Таблица 2.6.4. Геодезическая привязка базовых станций на дне.

№ устройства	X (север), м	Y (восток), м	Z (глубина), м
1	-124.297	47.840	1 356.891
4	-126.412	7.596	1 357.020
7	-134.009	146.369	1 357.372

Таблица 2.6.5. Расположение акустических устройств.

Глубина (z), м	Гирлянда	Устройство
929	№ 3	№ 2
1 094	№ 3	№ 3
1 271	№ 3	№ 5
1 357 (дно)	№ 2	№ 4
1 197	№ 1	№ 6
1 357 (дно)	№ 1	№ 1
1 196	№ 2	№ 8
1 216	лазер	№ 9
1 357 (дно)	лазер	№ 7

Гидроакустическая система запускается по командам из Берегового центра управления нейтринным телескопом с помощью берегового и подводного компьютеров по оптоэлектронному кабелю, связывающему Береговой центр и прототип кластера НТ1000.

Ниже представлены результаты анализа данных д.б.с.п., накопленных за период с 6 апреля по 4 мая 2012 года. За это время было проведено более 65 тысяч циклов измерений с периодом в 30 сек.

В результате многолетнего мониторинга физических параметров воды в районе постановки Байкальского нейтринного телескопа было установлено, что сезонные колебания скорости звука в этом районе не превышают 0,1 м/с. Исходя из этого, при обработке данных д.б.с.п. экспериментального кластера 2012 года координаты объектов позиционирования оценивались в предположении, что скорость звука на разных глубинах, представляющих практический интерес, не меняется со временем и соответствует в.р.с.з., измеренному в начале апреля 2012 года.

Результаты измерения координат

На рисунке 2.6.3 представлены результаты измерения координат (X , Y , Z) маяка-ответчика № 2 (высота над грунтом 431 м). Как следует из рисунка, в период с 6 по 22 апреля происходили лишь незначительные изменения координат маяка ответчика (в пределах одного метра). После 22 апреля ситуация изменилась. В течение 5 дней зафиксированы существенные изменения координат маяка-ответчика. Смещения маяка-ответчика № 2 от устойчивого положения достигали 7 метров.

На рисунке 2.6.4 представлены кривые перемещения маяка-ответчика № 2 в плоскости (X , Y). Устойчивое положение маяка-ответчика находится в окрестности точки с координатами (104.1 м, 29.6 м) (в подавляющем большинстве случаев отклонения от этой точки не превышают одного метра). В период наибольшей динамики, с 22 по 27 апреля, маяк-ответчик

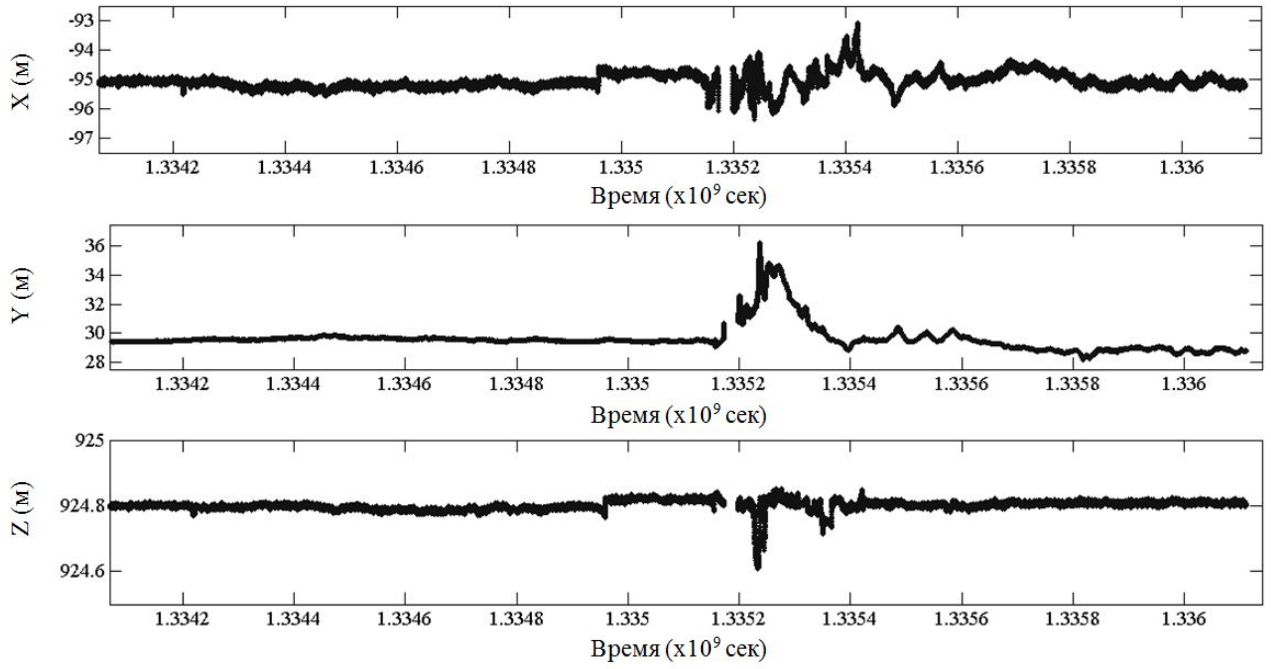


Рисунок 2.6.3. X-, Y-, Z-координаты маяка-ответчика № 2.

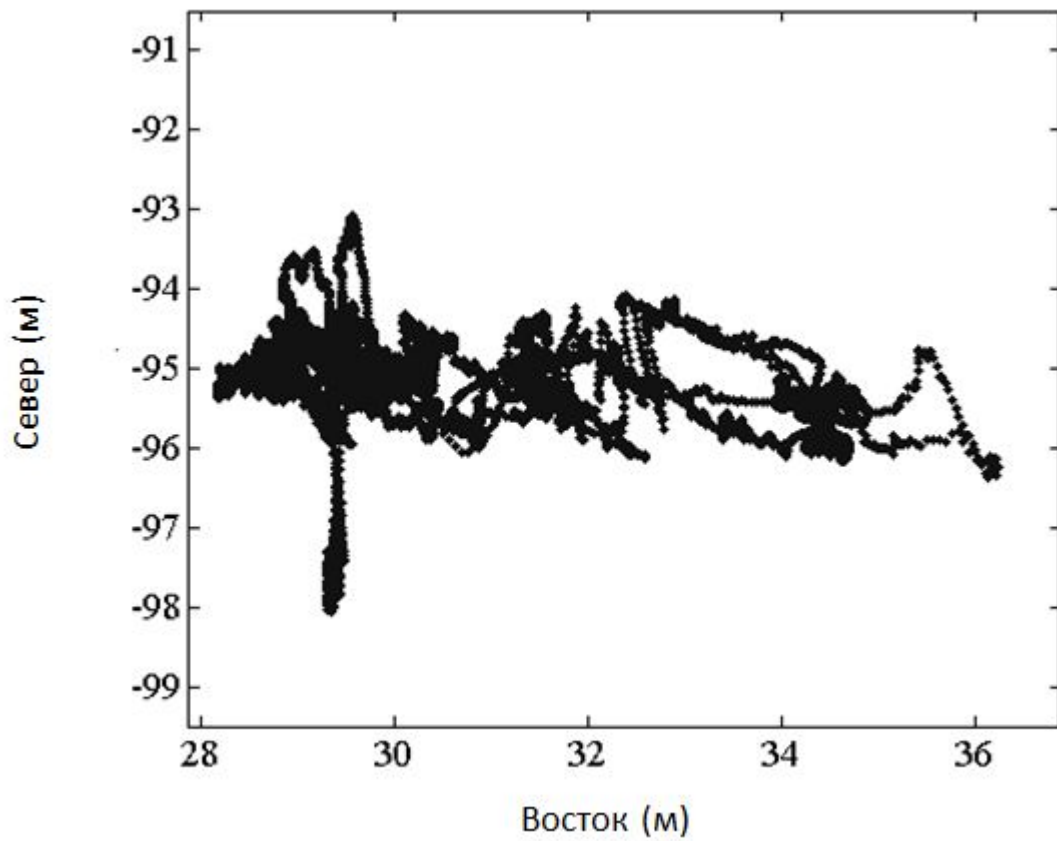


Рисунок 2.6.4. Кривая перемещения маяка-ответчика № 2.

испытывает быстрые изменения положения с отклонениями от этой точки в восточном направлении до координат (105.5 м, 36.5 м). Размер пятна, в пределах которого мог находиться маяк-ответчик, превышал 8 метров по сечению запад-восток и 3 метров по сечению север-юг.

Результаты измерения координат (X , Y , Z) остальных маяков-ответчиков демонстрируют аналогичные смещения от устойчивого положения, достигающие 9 метров, в тот же период времени (22 – 27 апреля 2012 года).

На рисунке 2.6.5 приводятся смещения маяка-ответчика № 3 в плоскости (X , Y) (высота над грунтом 266 м). При устойчивом положении в окрестности точки (110 м, 30.5 м) отклонения в период наибольшей динамики, с 22 по 27 апреля, в восточном направлении достигали координаты (109.3 м, 33.8 м). Размер пятна, в пределах которого мог находиться маяк-ответчик, превышал

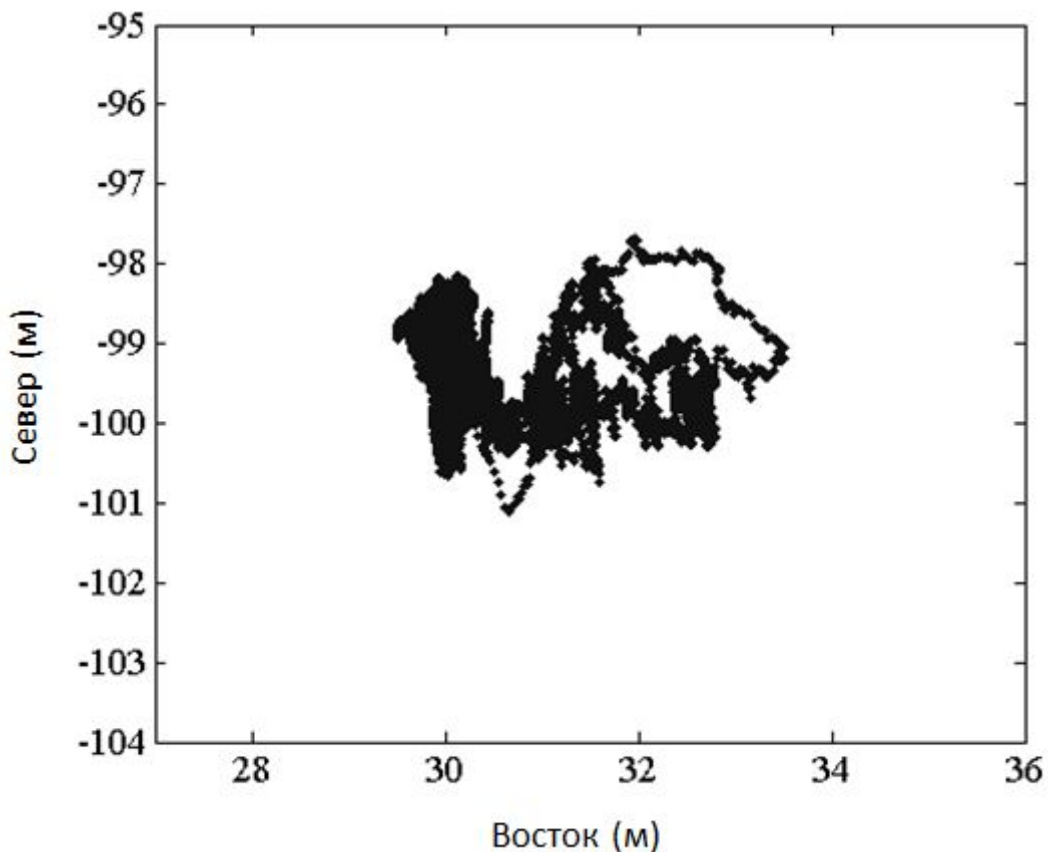


Рисунок 2.6.5. Кривая перемещения маяка-ответчика № 3.

4 метра по сечению запад-восток и 2.7 метра по сечению север-юг. Меньший размер пятна обусловлен расположением маяка-ответчика № 3 на большей глубине по сравнению с маяком-ответчиком № 2.

Устойчивое положение маяка-ответчика № 5 в плоскости (X, Y) (высота маяка над грунтом 90 м) соответствует точке с координатами (110.1 м, 30.8 м). Отклонения в период с 22 по 27 апреля маяка-ответчика № 5 в восточном направлении достигали координаты (110 м, 31.5 м). Размер пятна, в пределах которого мог находиться маяк-ответчик, был небольшим и составлял 90 см по сечению запад-восток и 70 см по сечению север-юг (на рисунках не представлено).

На рисунке 2.6.6 представлена кривая смещения маяка-ответчика № 6 в плоскости (X, Y) . При устойчивом положении в окрестности точки (133.5 м, 47.3 м) отклонения в период с 22 по 27 апреля в восточном направлении

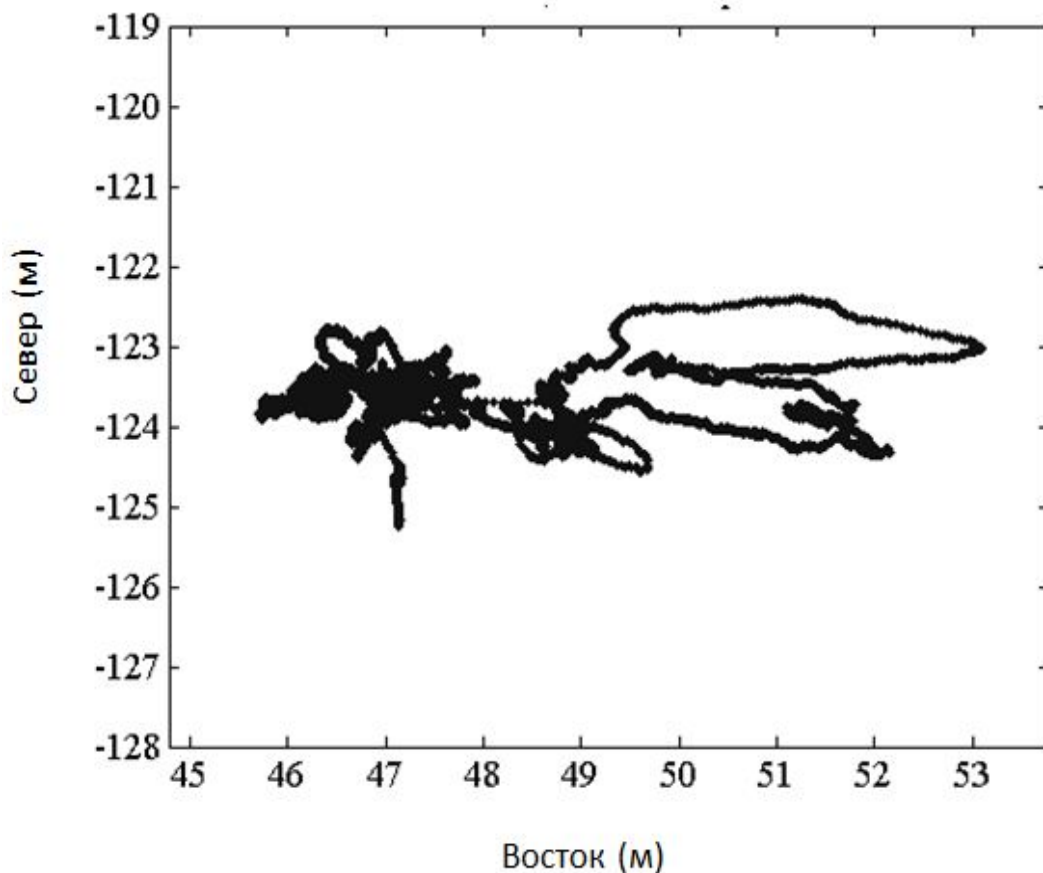


Рисунок 2.6.6. Кривая перемещения маяка-ответчика № 6.

достигали координаты (135 м, 53.1 м). Размер пятна, в пределах которого мог находиться маяк-ответчик, составлял 6.2 м по сечению запад-восток и 2.2 м по сечению север-юг.

На рисунке 2.6.7 представлена кривая смещения маяка-ответчика № 8 в плоскости (X, Y) (высота над грунтом 164 м). При устойчивом положении в окрестности точки (136.1 м, 8.3 м) отклонения в период наибольшей динамики, с 22 по 27 апреля, в восточном направлении достигали координаты (135.1 м, 16.1 м). Размер пятна, в пределах которого мог находиться маяк-ответчик, составлял 9 м по сечению запад-восток и 3.3 м по сечению север-юг.

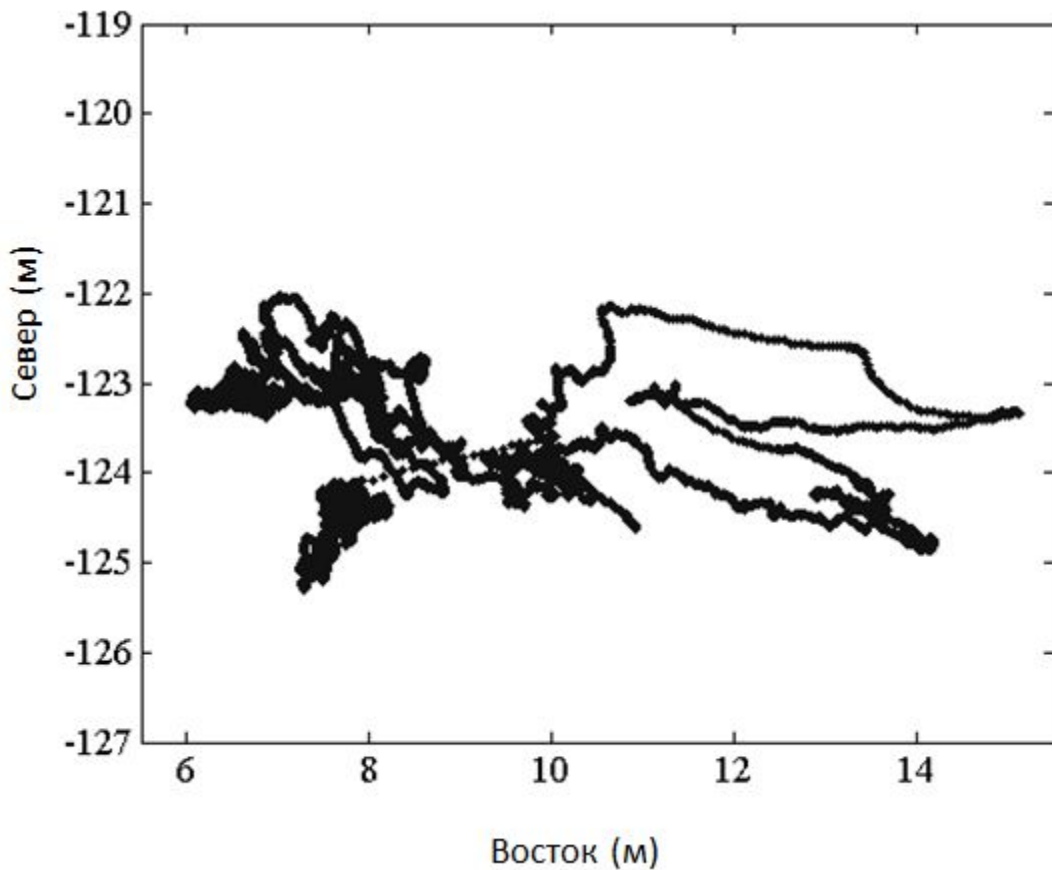


Рисунок 2.6.7. Кривая перемещения маяка-ответчика № 8.

Устойчивому положению маяка-ответчика № 9 в плоскости (X , Y) (высота над грунтом 144 м) соответствует точка с координатами (137.1 м, 143.4 м), Отклонения в период наибольшей динамики, с 22 по 27 апреля, в восточном направлении достигали координаты (136.2 м, 148.2 м). Размер пятна, в пределах которого мог находиться маяк-ответчик, был также небольшим и составлял 6 м по сечению запад-восток и 2.5 м по сечению север-юг (на рисунках не представлено).

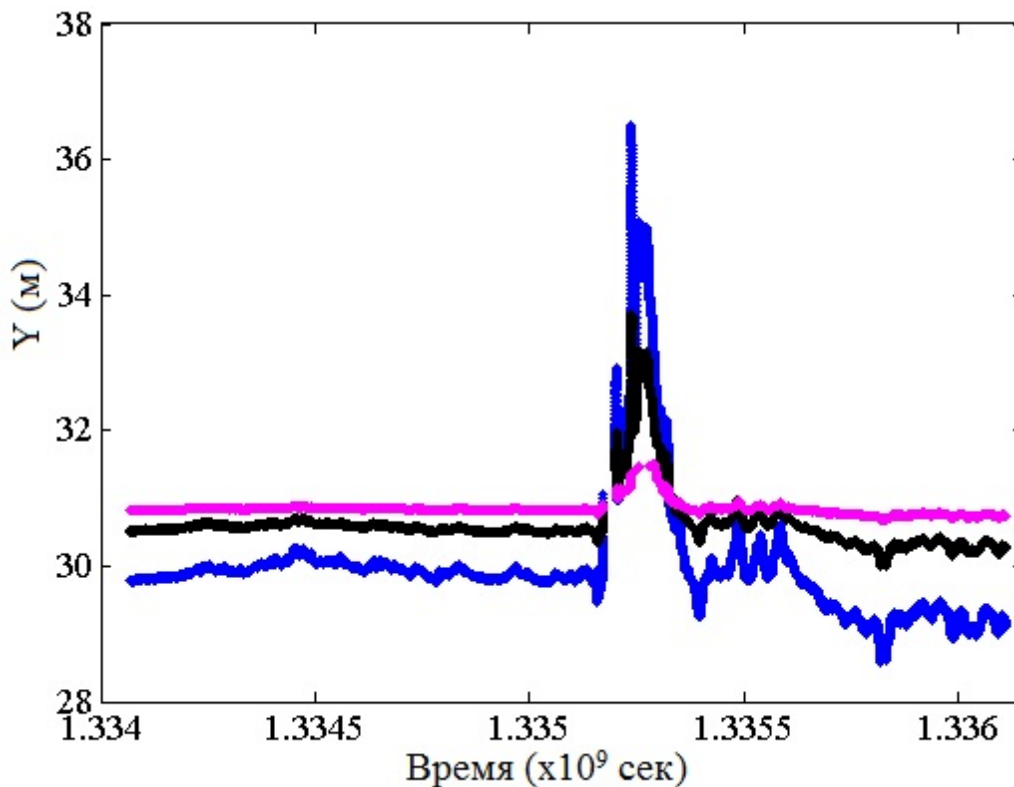


Рисунок 2.6.8. Зависимость от времени Y-координат маяков-ответчиков №№ 2, 3 и 5.

На рисунке 2.6.8 приводятся Y-координаты положения маяков-ответчиков 2, 3 и 5 расположенных на гирлянде 3 в зависимости от времени наблюдения. Как следует из рисунка, перемещения маяков-ответчиков на разных глубинах хорошо согласованы. Из сопоставления аналогичных кривых для маяков-ответчиков расположенных на других гирляндах следует хорошая согласованность перемещений всех маяков-ответчиков на всех гирляндах.

2.6.8. Выводы

Представленный в работе алгоритм приема/передачи цифровой информации, основанный на протоколе D-MAC, позволил реализовать цепь обмена синхронными широкополосными срочными сообщениями между гидроакустическими модемами технологии S2C производства компании EvoLogics и, таким образом, обеспечить точные измерения задержек распространения сигналов в гидроакустическом канале. Объединение функций позиционирования и гидроакустической цифровой связи на основе широкополосных акустических модемов компании EvoLogics S2C и использование разработанных программных алгоритмов и протокола обмена данными, реализующих на канальном уровне протокол D-MAC, позволил создать надежную долговременную гидроакустическую систему позиционирования экспериментального кластера нейтринного телескопа NT1000.

Предложенный метод учета нелинейности траекторий распространения сигнала, основанный на решении системы уравнений с граничными условиями, задаваемыми на основе упрощающих предположений о характеристиках среды распространения сигнала, позволил добиться высокой точности позиционирования при сравнительно невысокой сложности вычислений. При длине базовой линии от 40 до 140 м, экспериментальная точность позиционирования маяков-ответчиков, находящихся в состоянии медленных перемещений на расстояниях до 420 метров от донной антенны, имела порядок сантиметров (по среднеквадратическому отклонению).

За период с 6 апреля по 4 мая 2012 года системой позиционирования кластера 2012 года было выполнено более 65 000 измерений местоположения каждого из объектов позиционирования, и, соответственно, проведено такое же количество сеансов цифровой гидроакустической связи между станциями

и объектами позиционирования (при номинальной скорости передачи цифровой информации 1 кбит/с). Полученные результаты подтверждают высокую надежность функционирования тестируемой д.б.с.п. и канала цифровой гидроакустической связи.

Описанная в статье архитектура протокола D-MAC обеспечивает гибкость и оперативность разработки специальных приложений для выполнения разнообразных подводных технических задач, требующих позиционирования подводных объектов и цифровой связи с ними.

2.6.9. Датчик положения (инклинометр)

Для анализа положения оптических модулей гирлянды НТ1000 в марте 2012 года во время экспедиции в один из модулей был установлен датчик определения положения ТСМ ХВ - инклинометр + компас. Это было сделано в дополнение к существующей акустической системе. Паспортная погрешность измерений датчика: 0,3 градуса для азимутального угла и 0,2 градуса для угла наклона. Для снятия показаний датчик имеет электрический интерфейс RS-232.

Общий вид датчика и направление осей измерения углов положения показаны на рисунке 2.6.9. В настройках установка прибора можно задать другие варианты направления осей, что и было сделано для данного расположения платы датчика в модуле (рисунок 2.8.2).

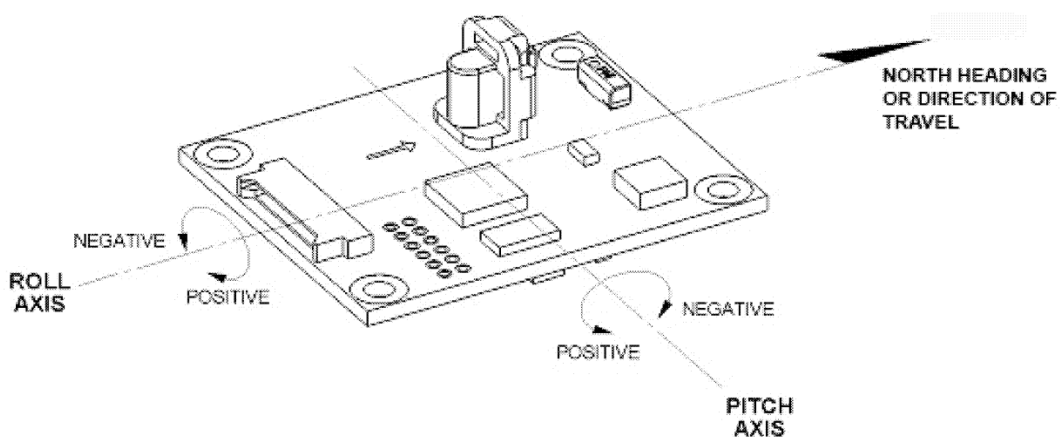


Рисунок 2.6.9. Общий вид датчика.

На рисунке 2.6.10 показано расположение датчика в модуле коммутации (КМ). Модуль КМ установлен на буйковой станции БПСЭ(3)-11(Рисунок 2.6.11) и находится на отметке 441 м от дна, общая глубина места установки - 1366 м, верхний буй стоит на отметке 1343 м.

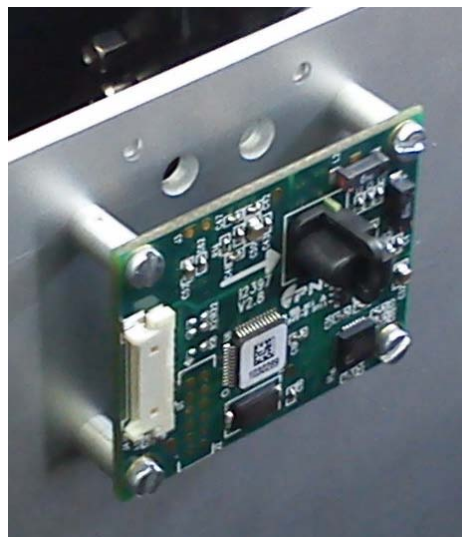
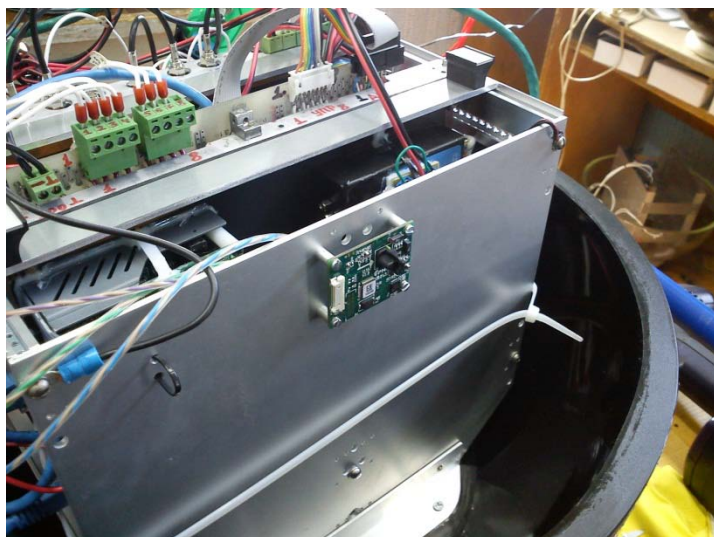


Рисунок 2.6.10

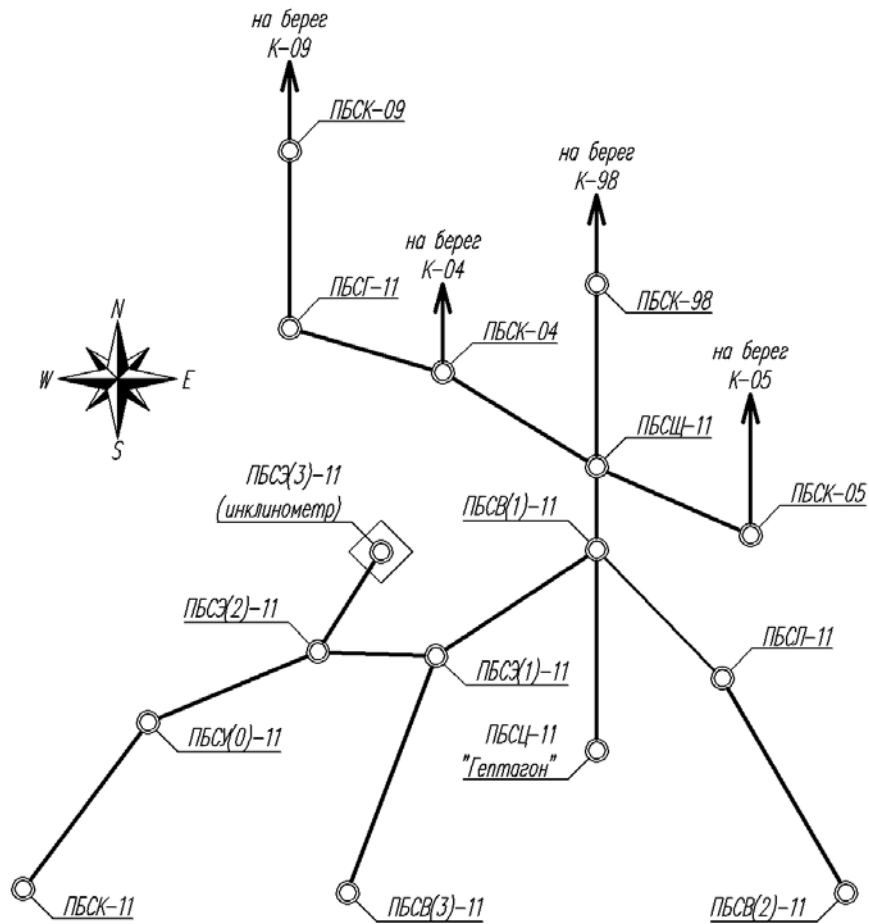


Рисунок 2.6.11. Расположение буйковых станций.

Проверка работы датчика

Первоначально была проверена работоспособность датчика: при помощи юстировочных винтов он был установлен на неподвижную пластину, винтами менялся наклон и снимались измеряемые показания.

На рисунке 2.6.12 представлена зависимость показаний датчика от угла его наклона. Исходя из графика видно, что прибор имеет линейную характеристику измерения углов, а разброс значений лежит в пределах погрешностей.

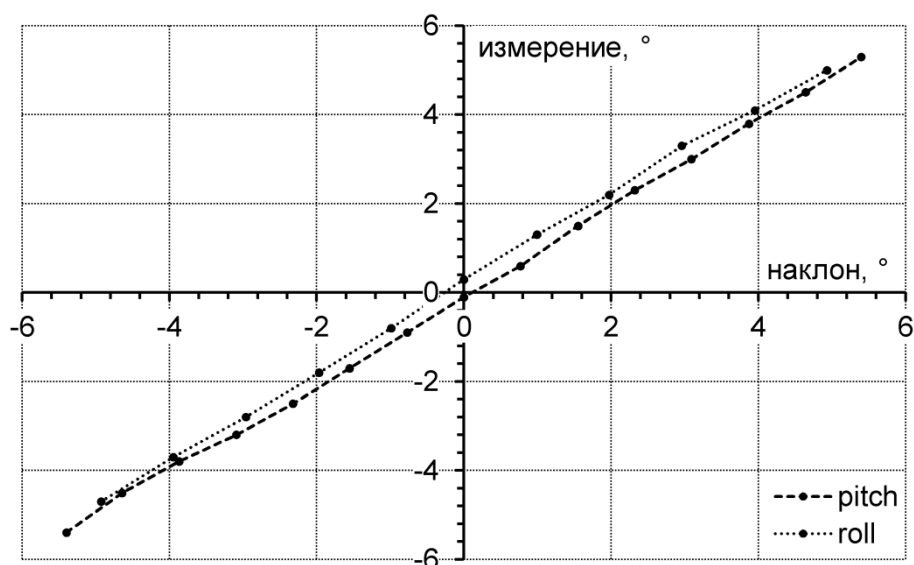


Рисунок 2.6.12. Графики зависимости θ и ρ от времени

Первые испытания

4 апреля 2012 г. было произведено «касание дна», т.е. частичная постановка массы буйковой станции ПБСЭ(3)-11 на грунт дна озера Байкал. После этого было произведено снятие показаний датчика. На рисунке 2.8.8 точки соответствующие этим данным показаны символом «x».

Начиная с 8 июня 2012 г. начался штатный сбор показаний датчика в процессе работы установки. Данные снимались с периодом в 10 минут. На основе этих данных при помощи преобразования Эйлера был получена величина отклонения от вертикали ρ и азимутальный угол θ наклона датчика (рисунок 2.8.5). Графики зависимости θ и ρ от времени представлены на рисунках 2.6.13, 2.6.14 и 2.6.15.

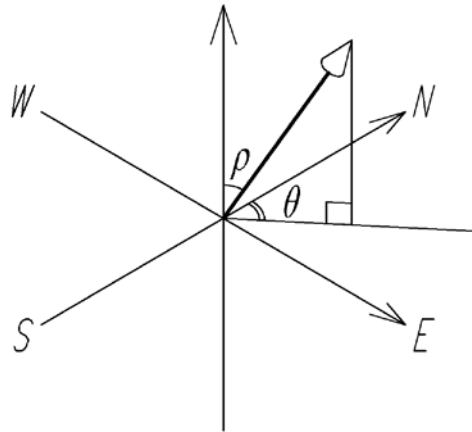


Рисунок 2.6.13. Система координат

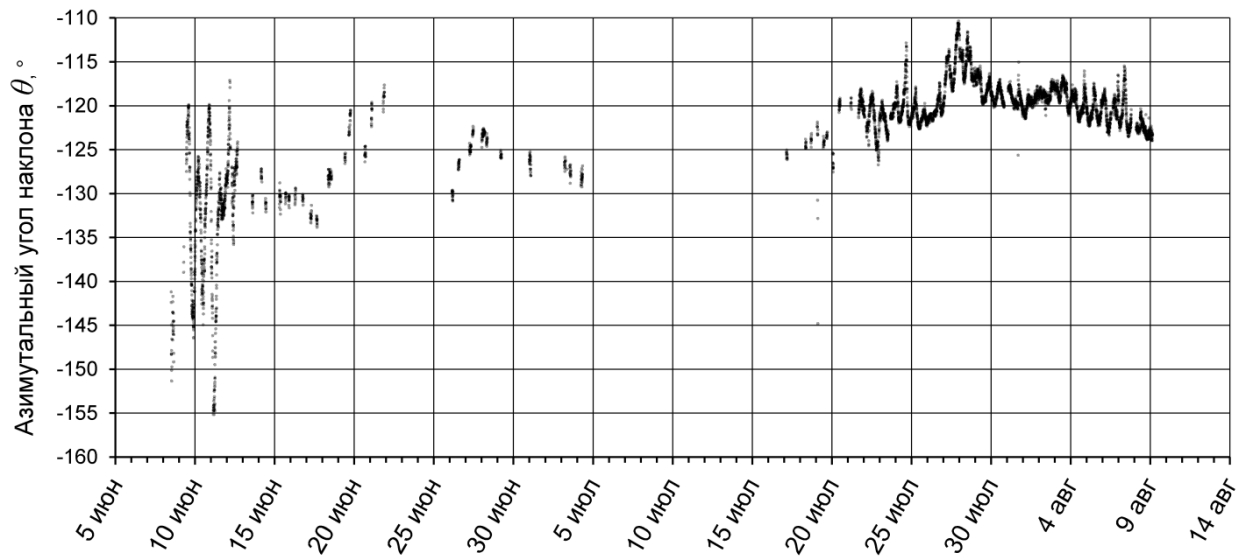


Рисунок 2.6.14. Изменение азимутального угла наклона во времени.

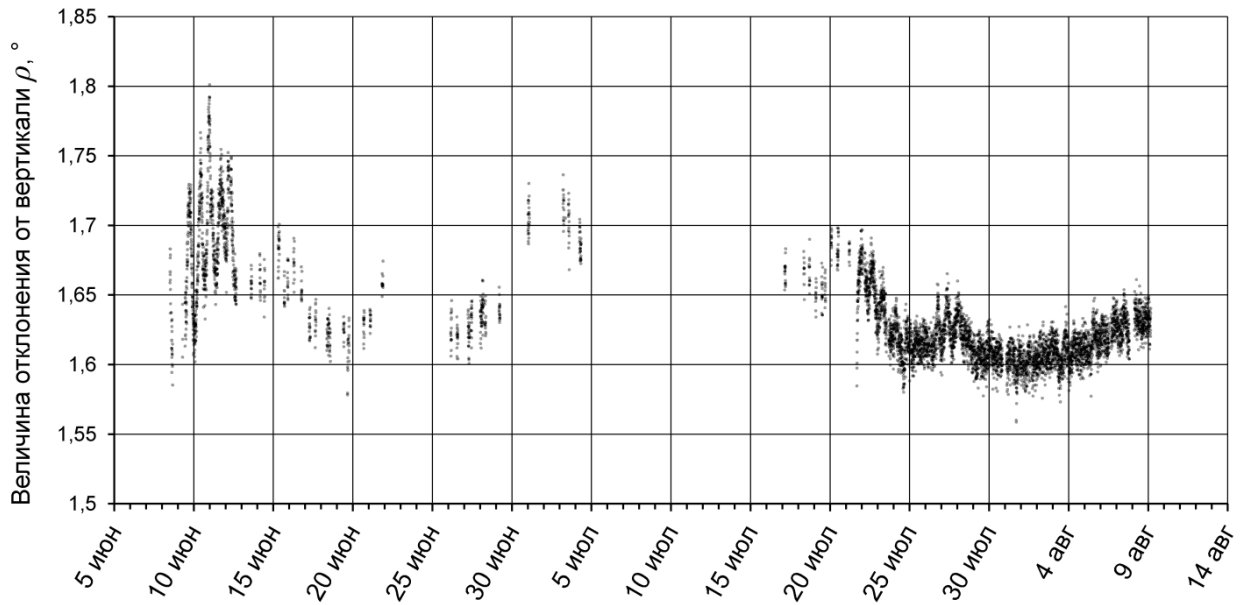


Рисунок 2.6.15. Изменение отклонения от вертикали во времени.

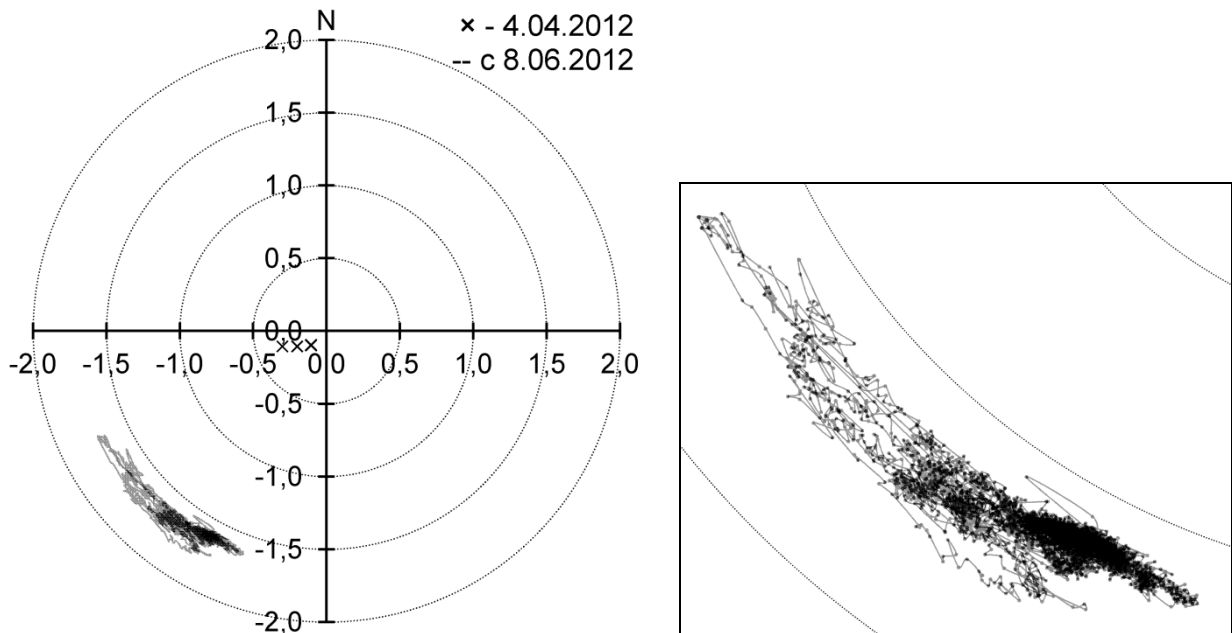


Рисунок 2.6.16. Азимут наклона в угловых координатах.

На рисунке 2.6.16 расстояние от начала координат до точки графика – это величина отклонения от вертикали в градусах.

Из результатов видно, что буйковая станция отклоняется на юго-запад в направлении БПСЭ(2)-11, что обусловлено провисанием кабельной перемычки между станциями.

При установке нескольких подобных датчиков на одну станцию, можно восстановить отклонения для каждого модуля и таким образом уточнить координаты модуля и поведение гирлянды в целом.

Вывод. Использование датчиков типа ТСМ ХВ в дополнение к акустической системе позиционирования целесообразно для уточнения координат оптических модулей и изучения поведения гирлянд под воздействием течений.

2.7. Анализ данных экспериментальной гирлянды 2010 года.

Носителями информации о нейтрино являются конечные продукты нейтринных взаимодействий со средой - мюоны и ливни высоких энергий, черенковское излучение которых регистрируется фотодетекторами (оптическими модулями) нейтринного телескопа. Траектории и направления прихода частиц определяются по измерениям времени прихода световых импульсов на объемную решетку высокочувствительных оптических модулей, основой которых являются фотоэлектронные умножители и управляющая электроника, помещенные в прозрачные стеклянные сферы на глубине от 500 до 1300 м в чистой прозрачной воде озера Байкал. В создаваемом нейтринном телескопе НТ1000 рассматривается возможность создания решетки из 10 000 оптических модулей и с наблюдаемым объемом водной среды более 1 км^3 . Даже при таких больших объемах ожидаемое количество регистрируемых событий, вызванных космическими нейтрино высоких энергий, исчисляется единицами в год. Поэтому набор экспериментальных данных для исследований длится годами, а объем обрабатываемых данных измеряется терафлопами.

Регистрация световых импульсов черенковского свечения, вызванного космическими частицами, сложнейшая научно-техническая задача на грани возможностей самых современных средств оптоэлектроники. Создание систем, способных многие годы работать в глубоководных условиях, сохраняя основные характеристики при сверхвысокой чувствительности и быстродействии, основывается на проведении тщательных лабораторных исследований характеристик создаваемого оборудования, испытаний его на лабораторных стендах и в натуральных условиях. постоянном совершенствовании методов калибровки и контроля за правильностью работы оборудования.

Натурные испытания экспериментальных образцов и прототипов устройств для создаваемого нейтринного телескопа НТ1000 позволяют оценить точность, с которой система детектирующих элементов может определить время прихода фотонов на ФЭУ. Такие измерения были проведены и обработаны для детектора 2010 года со светодиодами, лазерным калибровочным источником и мюонами космических лучей.

Первый шаг анализа данных представлял собой изучение точности измеряемого времени прихода сигнала от задержанных импульсов светодиода. Время регистрации определялось из данных о форме импульсов. Полученная средняя величина задержки временной отметки из анализа формы импульса составила ~ 1 нсек, что соответствует ожиданию. Дисперсия составила величину менее 2 нсек. Эти величины отражают временное разрешение измерительных временных каналов.

Более детальное изучение временной точности проведены с лазерным источником света, расположенным на расстоянии около 100 метров от детектора. Временная разница между парами каналов измеренная для лазерных вспышек оказалась в хорошем соответствии с ожидаемыми величинами. При этом среднее отклонение для различных оптических модулей составило около 2 нсек. Этот результат включает в себя как ошибки калибровки, так и неопределенности, связанные с положением лазера

относительно детектора.

Поток атмосферных мюонов из верхней полусферы дает возможность протестировать все уровни понимания установки начиная с проверки временной калибровки при условии регистрации искомым источников света (мюонов и ливней) до соответствия углового распределения зарегистрированных и восстановленных событий с ожидаемым.

В данном параграфе мы представляем результаты анализа данных по

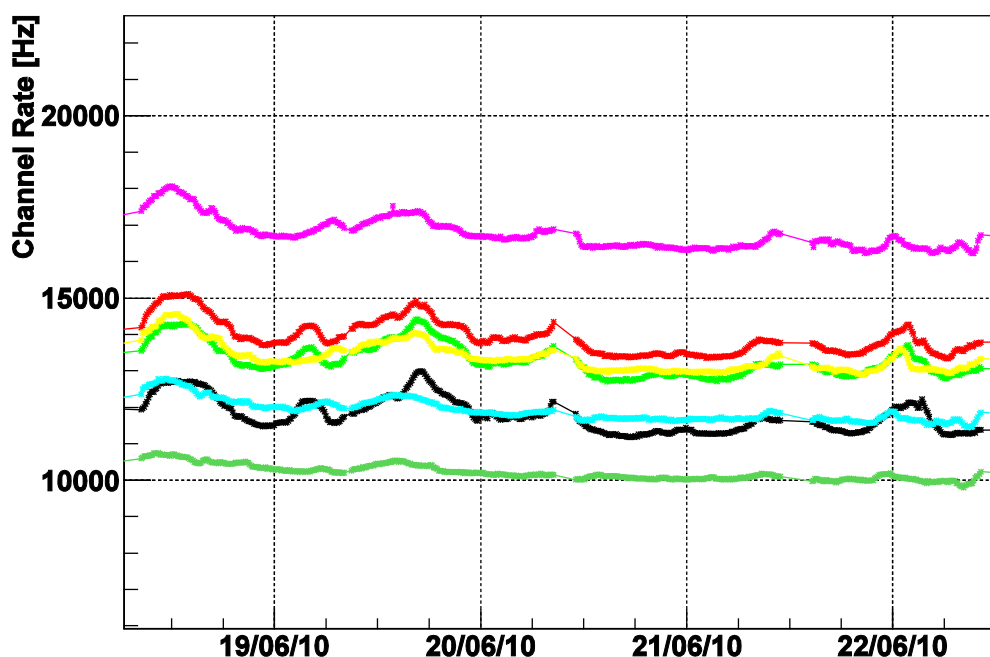


Рисунок 2.7.1 . Темпы счета оптических модулей.

регистрации мюонов от космических лучей в детекторе 2010 г.

Из всего набора данных был выбран период 1 месяц (28.04.2010 – 29.05.2010). Этот период характеризуется спокойным поведением свечения озера, т.е. флуктуации темпов счета составляют ~10%. Такой период был выбран, чтобы, с одной стороны, вводить конкретные значения для шумовых темпов счета для оптических модулей, с другой стороны — чтобы сравнение экспериментальных и ожидаемых характеристик проводилось при работе установки в штатном режиме. На рисунке 2.7.1 представлены характерные

темпы счета оптических модулей в стабильный период излучения озера. Для описания ожидаемых характеристик были проведены расчеты методом Монте-Карло, которые учитывают индивидуальные параметры ОМ, такие как квантовая чувствительность, темп счета и угловая зависимость эффективной площади. В дальнейшем мы будем сравнивать экспериментальные результаты именно с этими данными.

Для восстановления геометрических параметров треков мюонов в модели одиночного мюона для конфигурации установки, состоящей из одной гирлянды, необходимо срабатывание 4-х или более оптических модулей. Однако в событии могут присутствовать сигналы от шумов ФЭУ, свечения озера, групп мюонов и электромагнитных ливней, образующихся на треке мюонов за счет процессов взаимодействия мюона с веществом. Все перечисленные источники будут искажать искомую модель одиночного мюона и, таким образом, вносить ошибки в восстановление. Поэтому для исключения подобных сигналов/каналов используется набор критериев, призванных оставить для восстановления только импульсы/каналы удовлетворяющие искомой модели.

Используются следующие критерии:

1. Принцип причинности: разность времен импульсов на разных каналах должна быть меньше времени распространения светового сигнала между этими каналами:

$$|t_{m_i k_j} - t_{m_j k_i}| < \frac{r_{m_i k_j}}{c} + \delta \quad (1)$$

В правую часть выражения введена константа δ равная 7 нс, для компенсации влияния временного джиттера ФЭУ. Путем попарного перебора всех импульсов i, j , расположенных на каналах m и k , соответственно, находятся пары, нарушающие условие. Импульсы на каналах, которые содержатся в нескольких таких парах, исключаются из процедуры восстановления. Если на канале после отбора не осталось ни одного импульса, такой канал так же

исключается. При этом число исключенных каналов N_{excl} в дальнейшем может служить характеристикой сложности события.

2. Мюонный критерий. Для любых двух импульсов на каналах, m_i и k_j , вычисляются граничные значения зенитных углов мюона θ_{max} и θ_{min} определенные для данной временной разности $\Delta t_{m_i k_j}$ (в предположении, что это импульсы от одиночного мюона):

$$\cos(\theta_{min} + \theta_{ch}) < \cos\left(\theta_{ch} \frac{c \Delta t_{m_i k_j}}{z_m - z_k}\right) < \cos(\theta_{max} - \theta_{ch}) \quad (2)$$

где θ_{ch} - черенковский угол, z_m и z_k - z -координаты каналов. Тогда должна существовать область мюонных зенитных углов с общим пересечением (разрешенная область). Далее находятся импульсы, нарушающие это условие, и исключаются из анализа. В качестве дополнительных выходных параметров данного алгоритма получаем предельные значения θ_{min} и θ_{max} , определяющие диапазон зенитных углов, которому принадлежит искомая траектория.

Возможно, что в канале несколько импульсов прошли отбор. Тогда для восстановления на дорожке берётся первый по времени импульс, удовлетворяющий критериям отбора, поскольку прямой черенковский свет от мюона всегда самый ранний.

Процедура восстановления пространственных параметров мюонных траекторий основана на минимизации следующего функционала:

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^{N_{hit}} (T_i(\theta, \varphi, fX, fY, t_0) - t_i)^2 / \sigma_{t_i}^2 \quad (3)$$

где t_i - время регистрации импульса на i -том канале, σ_{t_i} - ошибка измерения времени, N_{hit} - число сработавших каналов в данном событии. T_i - ожидаемое время регистрации сигнала каналом для данной траектории:

$$t = t_0 - \frac{1}{c} (z \cos \theta) + \frac{(n_{zp} - \cos \theta_{ch})}{c \cdot \sin \theta_{ch}} \sqrt{(z \sin \theta + fX)^2 + (fY)^2} \quad (4)$$

θ, φ - зенитный и азимутальный углы соответственно, fX, fY - координаты точки пересечения мюоном плоскости, перпендикулярной треку и проходящей через центр установки.

Для ОМ расположенных на одной гирлянде существует вырождение по φ , так как установка обладает осевой симметрией. Величина σ_{ii} должна зависеть от амплитуды. В настоящее время мы пренебрегаем этой зависимостью и принимаем значение равным 3 нс (порядка джиттера ФЭУ).

Очищенный таким образом отклик используется для процедуры восстановления. Результат восстановления смоделированной выборки событий представлен на рисунке 2.7.2 в виде распределения по разнице смоделированного и восстановленного зенитного угла. Эффективность

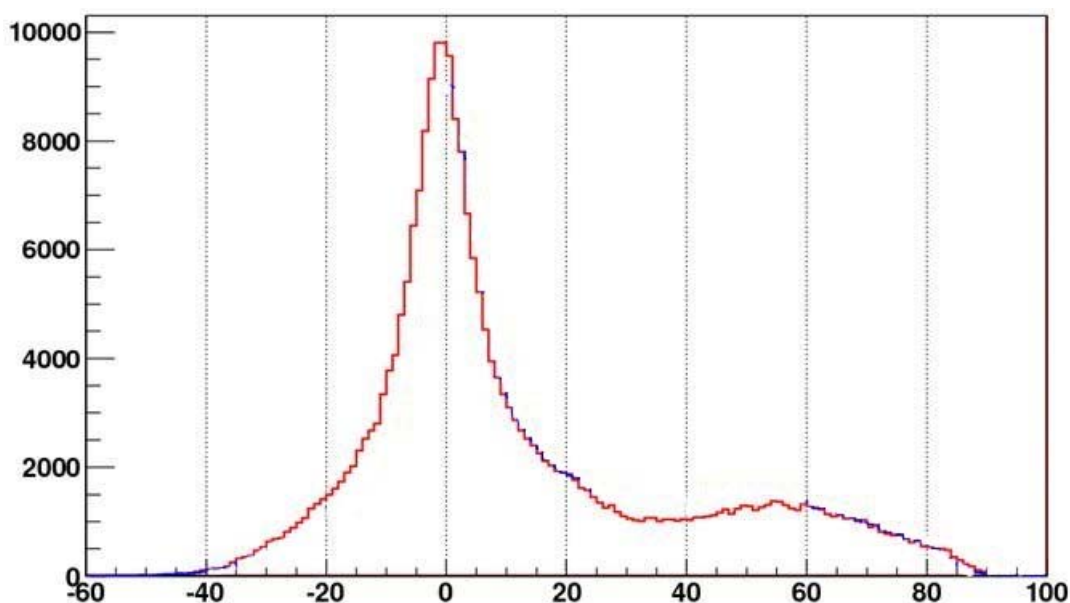


Рисунок 2.7.2. Распределение по разнице зенитного угла для истинных и восстановленных событий.

восстановления составляет около 80%. Скромная точность и невысокая эффективность восстановления связаны с тем, что для данной конфигурация имеет большую вероятность регистрации групп мюонов и меньшую для одиночных мюонов. Распределение по множественности мюонов, участвующих в формировании временного отклика детектора представлено на рисунке 2.7.3.

Улучшить точность реконструкции геометрических параметров трека можно используя отбор событий по качеству восстановления, при этом теряя, конечно, эффективность.

Следующие характеристики были выбраны как оптимальные для определения качества восстановления:

- значение приведенного χ^2 после минимизации функционала

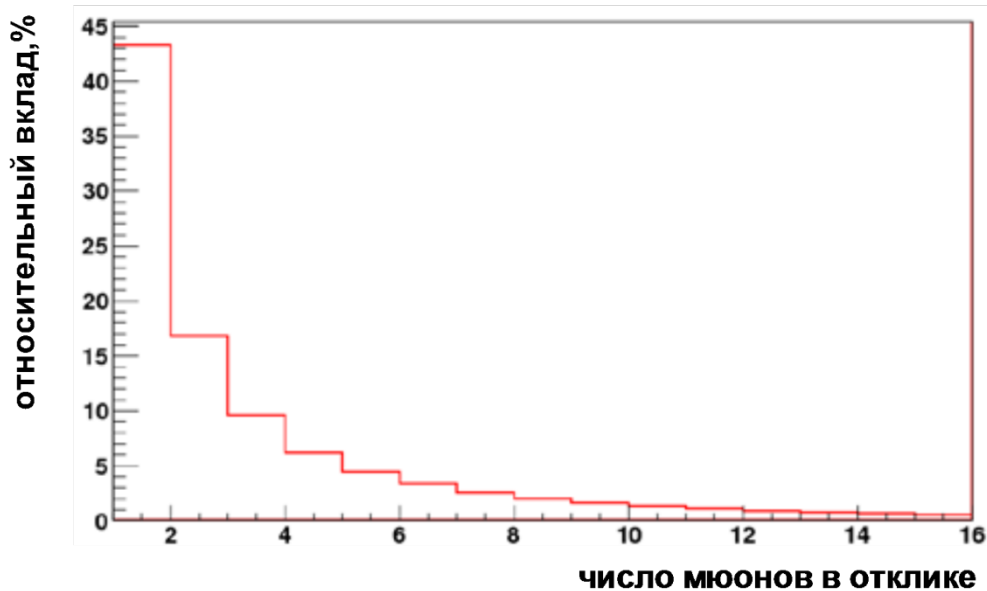


Рисунок 2.7.3. Распределение по числу мюонов в событии

- значение ошибки восстановления зенитного угла, вычисляемое из матрицы ошибок, $Er\theta$
- fX – координата x точки пересечения траектории мюона с плоскостью, перпендикулярной этой траектории

Оптимизация ограничений на указанные параметры с точки зрения максимизации эффективности и минимизации ошибки привело к получению следующих ограничений на параметры:

$$fX < -15\text{м}; Er\theta < 10^0 \text{ и } \chi^2 < 50.$$

Здесь уместно проверить насколько поведение параметров отбора для смоделированных и отобранных событий соответствует экспериментальным данным. В таблице 2.7.1 представлены результаты в темпах счета для

Таблица 2.7.1. Темпы счёта событий в зависимости от накладываемых условий

Тип данных ограничения	Данные МК-расчётов 1/сек	Экспериментальные данные 1/сек
$N_{hit} > 3$	0,081	0,083
$q = 1$	0,075	0,077
$q = 1, f_X > 15$	0,047	0,05
$q = 1, f_X > 15,$ $E_{r??} < 10$	0,039	0,043
$q = 1, f_X > 15,$ $E_{r??} < 10, \sigma^2 < 50$	0,037	0,038

эксперимента и МК ожидания на разных уровнях ограничений на параметры. Как видно из таблицы, на всех уровнях отбора соответствие очень хорошее,

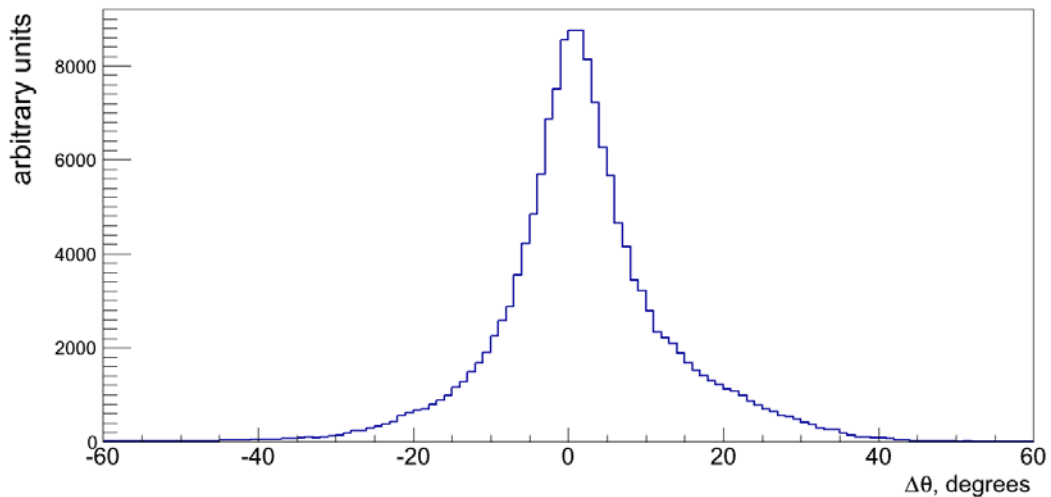


Рисунок 2.7.4. Распределение по разнице зенитного угла для истинных и восстановленных событий после применения критериев отбора.

что позволяет утверждать, что экспериментальный материал хорошо описывается МК расчетами. Точность восстановления значительно улучшилась, однако осталась невысокой (рисунок 2.7.4) . Причина такого

результата в том, что после даже после отбора по качеству вклад событий с группами мюонов остается достаточно велик.

На рисунке 2.7.5 представлена зависимость усредненной ошибки восстановления по зенитному углу в зависимости от числа мюонов

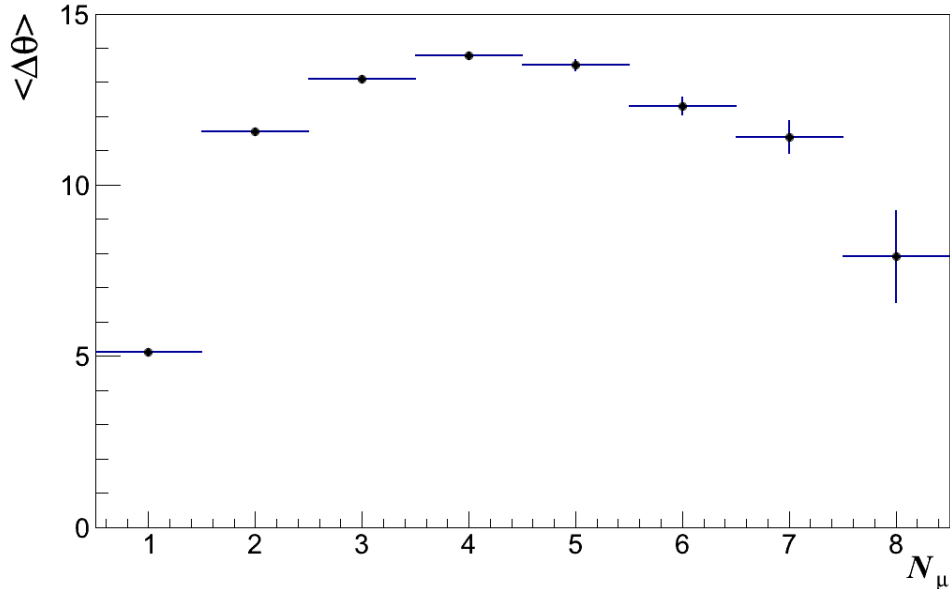


Рисунок 2.7.5. Зависимость среднего по точности зенитного угла от числа мюонов в отклике детектора.

участвующих в формировании временного отклика. Из рисунка видно, что события сформированные одним мюоном в отклике восстанавливаются с хорошей точностью. Но как только в событии участвуют 2 мюона и более,

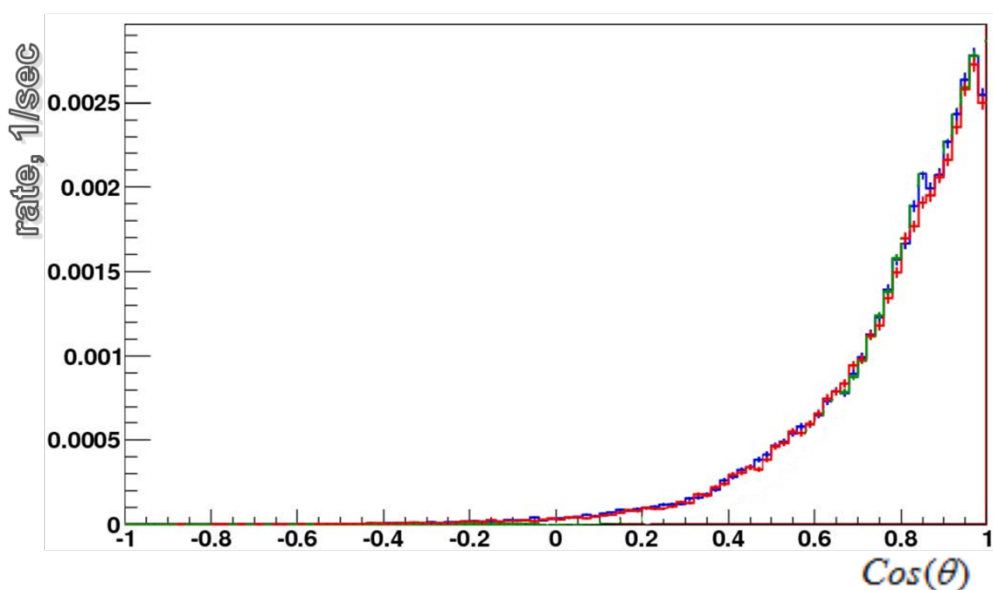


Рисунок 2.7.6. Ожидаемый(красный) и измеренный(синий) темпы счета событий от атмосферных мюонов в зависимости от зенитного угла

средняя точность становится хуже 10° .

На рисунке 2.7.6 показано распределение восстановленных событий то зенитному углу для экспериментальной и смоделированной выборки. Как видно из рисунка согласие очень хорошее во всем диапазоне углов. Это факт позволяет нам сделать следующие выводы:

1. Временные точности заложенные в МК модель соответствуют экспериментальным.
2. Полученное соответствие говорит о хорошем понимании отклика детектора на достаточно сложные события.
3. Первые 2 пункта дают нам уверенность в наших оценках на ожидаемые эффективные площади и точности восстановления для большой установки.

2.8. Анализ и обработка данных экспериментального кластера гирлянд (2012 г.)

Триггерная система телескопа выделяет наиболее значимые события, произошедшие в телескопе, и формирует их, а система сбора данных передает их от телескопа на берег, и, затем, записывает их в определенном формате данных. Данные представляют собой поток событий, содержащие оцифрованные временные развертки каналов секции, временную отметку события относительно начала сеанса и номер события, а также вспомогательную информацию о состоянии систем телескопа. Основная задача обработки данных заключается в приведении их к виду, удобному для дальнейших анализов. Для этого необходимо, во-первых, проверить данные на целостность, т.е. проверить последовательности номеров и временных отметок, проверить временные развертки на предмет появления на них артефактов. Во-вторых, связать события на разных секциях в единое событие по номерам и временным отметкам событий. В-третьих, выделить на

оцифрованных временных дорожках каналов импульсы от ФЭУ и определить их характеристики. В-четвертых, определить характеристики каналов, с помощью которых можно привести выделенные импульсы к единым амплитудной и временной шкалам, т.е. провести амплитудную и временную калибровки.

Целостность событий

Тесты последовательностей номеров и временных отметок событий кластера 2011 года показали, что в крайне редких случаях информация о событии может частично или полностью теряться во время их передачи на берег. Поэтому, в 2012 году система передачи данных была переведена с менее надежного протокола UDP на протокол TCP/IP. В 2012 году нарушений в последовательностях номеров и временных отметок событий обнаружено не было.

На временных развертках кластера 2011 были обнаружены резкие, узкие и высокие выбросы, которые не могут быть вызваны сигналами с ФЭУ. Причина появления таких выбросов была выявлена в работе алгоритма, заложенного в мастерной плате, и была устранена.

Компоновка события кластера

Полное событие в кластере komponуется из событий на секциях путем сопоставления номеров событий. Качество компоновки события кластера проверяется по временным отметкам событий. Ввиду того, что таймеры секций разбегаются относительно друг друга, сравниваются разности временных отметок соседних событий на одной секции с такими же разностями на другой секции. Точность временной привязки событий на разных секциях составляет порядка 1 мкс (рисунок 2.8.1).

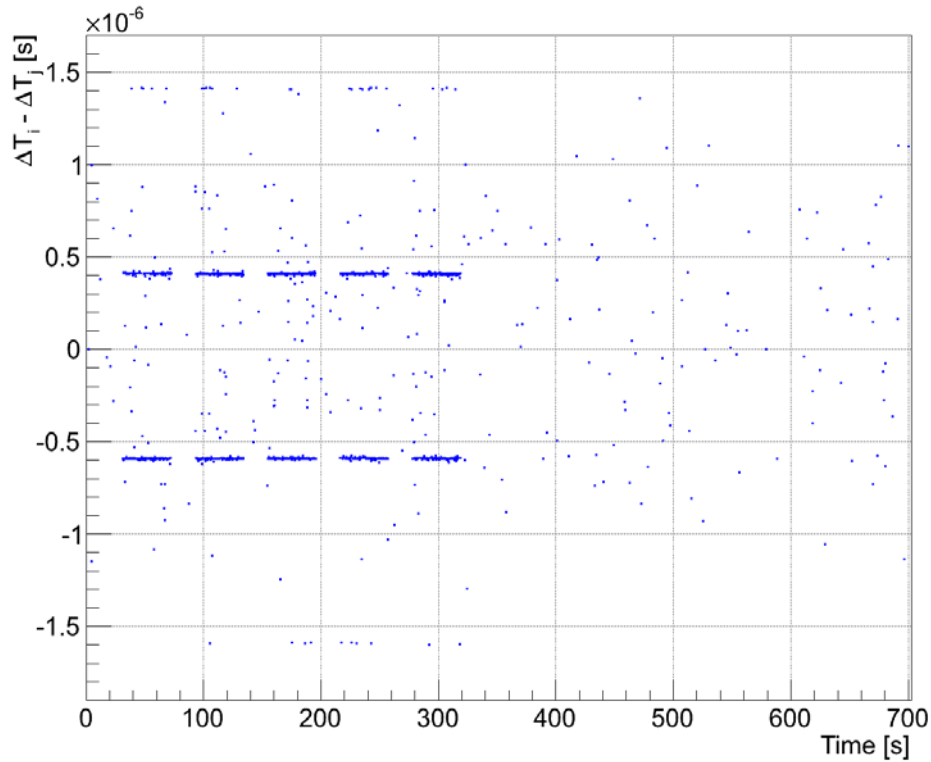


Рисунок 2.8.1. Точность временной привязки событий на разных секциях в лазерном сеансе набора данных.

Сигналы с ФЭУ усиливаются и передаются через 90 м кабель на вход flash АЦП. На этом этапе, сигнал имеет длительность порядка 30-40 нс и фронт порядка 15-20 нс. Для того чтобы сохранить форму сигнала используется 200 МГц flash АЦП с шагом дискретизации 5 нс. Выделение сигналов на временной развертке flash АЦП основывается на поиске их превышения порога, который вычисляется исходя из текущего значения разброса пьедестала. Порог был выбран на уровне 4-х стандартных отклонений пьедестала, ввиду того, что в таком случае в среднем количество случайных сигналов из-за шума на временной развертке с 1024-мя отсчетами будет 0.06. На спектрометрическом тракте встречаются высокочастотные наводки от блока питания. Для того чтобы исключить их из дальнейшего анализа, применяется еще один критерий выделения сигналов: сигнал должен иметь длительность больше 0.6 отсчетов.

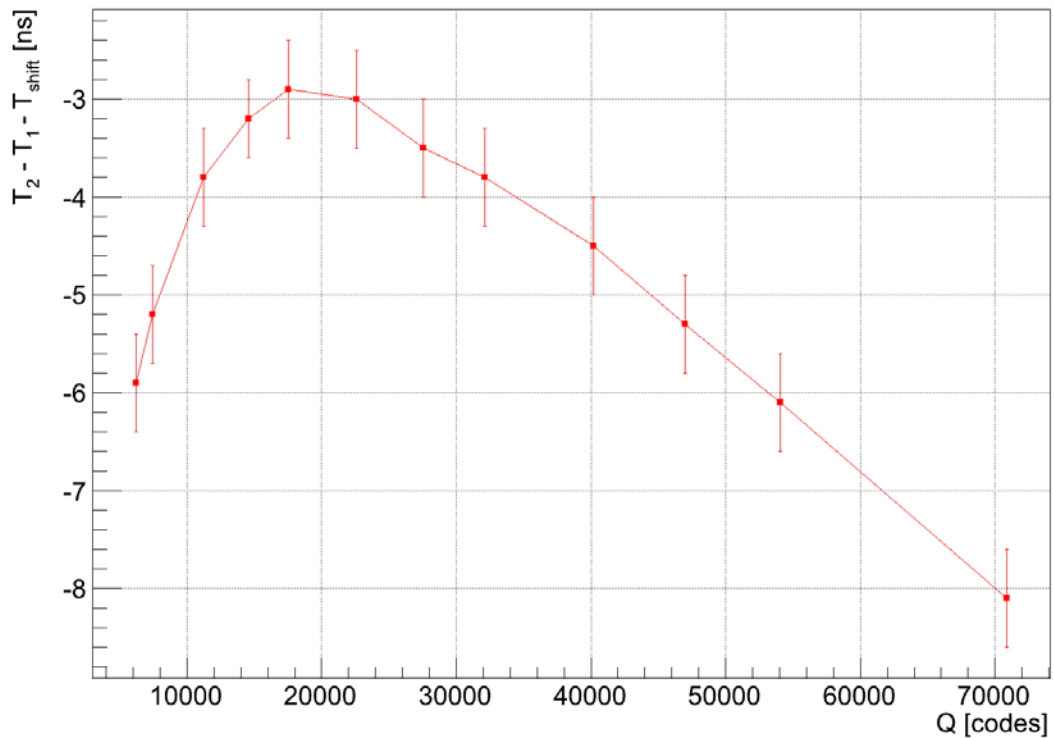


Рисунок 2.8.2. Разность времен между светодиодными сигналами в зависимости от заряда одного из сигналов.

После выделения сигнала, на временной развертке определяются его характеристики: максимальная амплитуда сигнала за вычетом пьедестала; заряд, вычисляемый как сумма амплитуд всех отсчетов сигнала выше порога; длительности сигнала на уровне порога и на уровне половины высоты сигнала и временная отметка сигнала. Временная отметка должна быть выбрана таким образом, чтобы она как можно меньше зависела от амплитуды сигнала. За временную отметку была выбрано время пересечения сигнала уровня половины высоты сигнала. Были проведены специальные лабораторные сеансы набора данных, в которых сравнивалась разность времен между светодиодными сигналами в зависимости от их амплитуды (рисунок 2.8.2). Видно, что временная отметка может меняться в зависимости от амплитуды на 3 нс. В дальнейших анализах, где требуется высокая

точность измерения времени сигнала, эту зависимость необходимо учитывать.

Амплитудная калибровка

Цель амплитудной калибровки заключается в определении по характеристикам сигнала среднего числа фотоэлектронов, вызвавших появление этого сигнала. В исследовании в качестве такой характеристики были выбраны заряды импульсов, так как они позволяют получить лучшую точность измерений по сравнению с максимальными амплитудами импульсов.

Амплитуда подавляющего числа импульсов, вызванных прохождением заряженных частиц в телескопе, находятся в диапазоне линейности между зарядом импульса и числом фотоэлектронов и, поэтому основной характеристикой, получаемой в амплитудной калибровке, является коэффициент перехода от заряда импульса к числу фотоэлектронов.

Коэффициент α определялся стандартным для такого рода измерений методом однофотоэлектронного спектра. Для набора этого спектра использовались как шумовые импульсы, набранные в сеансе набора данных с принудительным триггером, так и светодиодные импульсы. Методика калибровки по светодиодным импульсам заключается в засветке ОМ двумя задержанными друг от друга импульсами света от встроенных в ОМ светодиодов. Второй импульс служит реперной точкой на временной развертке для нахождения области, в которой ожидается появление первого импульса. Интенсивность засветки первого импульса подбирается такой, чтобы выбивать в среднем 0.1 фотоэлектрон с фотокатода ОМ. Таким образом, получается 1 ф.э. распределение, среднее которого дает искомый коэффициент α пересчета от кодов кодировщика к фотоэлектронам (рисунок 2.8.3). В результате по двум разным методикам были получены

коэффициенты α для всех каналов, которые в пределах ошибок измерений совпадают друг с другом.

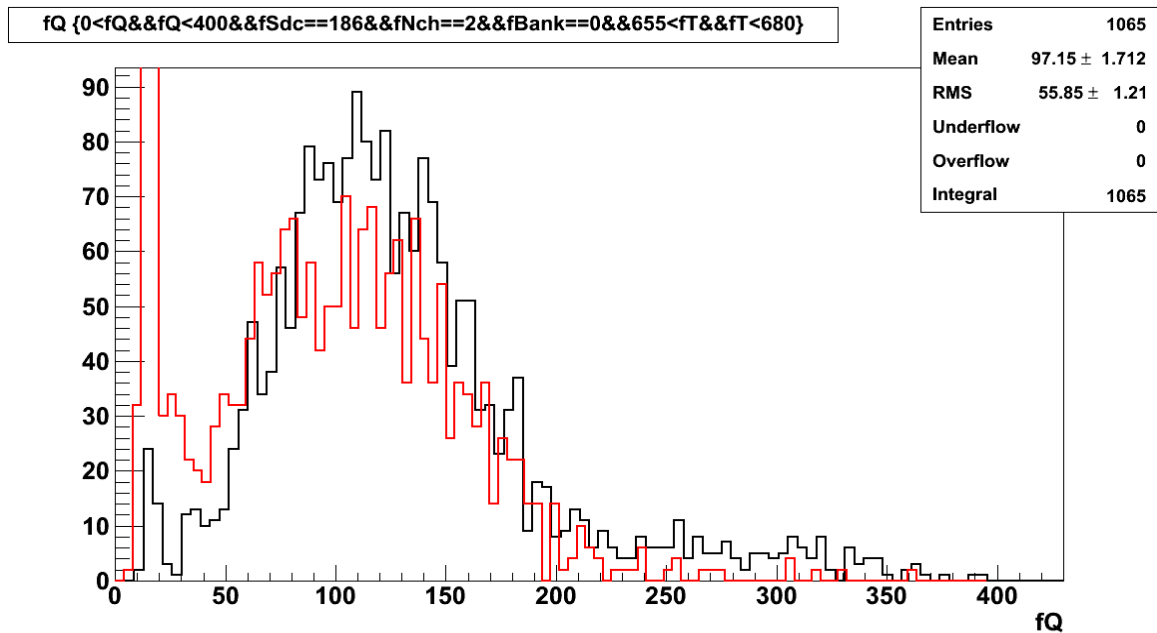


Рисунок 2.8.3. Однофотозлектронные распределения, полученные с помощью шумовых (красная гистограмма) и светодиодных импульсов (черная гистограмма).

Временная калибровка

Для восстановления прохождения элементарных частиц в телескопе необходимо знание времён падения черенковского света на все ОМ в кластере. В эксперименте регистрируются только лишь временные развертки с ФЭУ. Для того чтобы из времен импульсов получить относительные времена падения света на ОМ, необходимо измерить задержки сигнала в спектрометрическом тракте от начала формирования сигнала и до его регистрации в АЦП.

В общем виде, происходит следующая цепочка процессов в спектрометрическом тракте для сигнала, вызвавшего срабатывание установки. При падении черенковского света, на фотокатоде рождаются

фотоэлектроны. Через время T_{pmt}^i , где i — номер канала, на выходе ФЭУ формируется сигнал, который через время прохождения сигнала по электрическому кабелю T_{cable}^i достигает входа АЦП в центральном модуле секции (ЦМ). По превышению сигнала амплитудного порога АЦП вырабатывает сигнал запроса, который регистрируется в мастерной плате. В свою очередь, мастерная плата анализирует сигналы, поступающие со всех каналов секции, и вырабатывает сигнал запроса в центральный модуль кластера (ЦК), который распространяется за время T_{section}^j , где j — номер секции. По удовлетворению триггерного условия ЦК формирует сигнал подтверждения, который посылается всем секциям установки. Через время T_{section}^j сигнал достигает мастерной платы ЦМ. На тот момент времени в буфере АЦП хранится временная развертка с ФЭУ за прошедшие 32 мкс. В буфере выделяется временная развертка длиной 5 мкс, отстоящая на T_{offset}^j от времени появления сигнала подтверждения на мастерной плате. Время T_{offset}^j выбирается таким, чтобы триггерный импульс находился в середине временной развертки в 5 мкс. Такие временные развертки, именуемые далее дорожками, сохраняются для всех каналов.

Таким образом, в течение штатного сеанса набора данных имеются временные отметки импульсов относительно начала дорожки (рисунок 2.8.4). Значения задержек T_{offset}^j устанавливаются во время запуска очередного сеанса набора данных, T_{cable}^i измеряются в лаборатории до начала развертывания установки. Задержки T_{pmt}^i и T_{section}^j требуется определить из калибровочных сеансов набора данных.

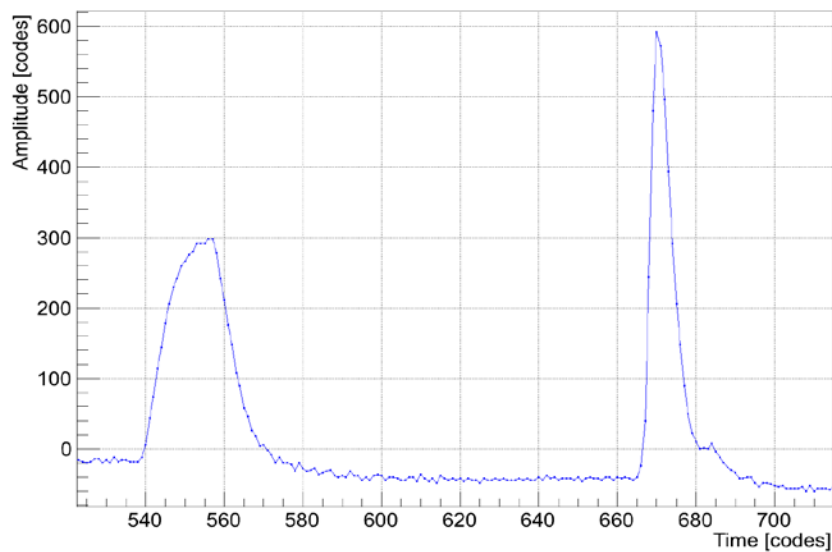


Рисунок 2.8.4. Пример дорожки с включенными тестовыми и светодиодными импульсами.

Задержки ФЭУ T_{pmt}

Задержки T_{pmt}^i определяются из сеансов набора данных с включенными тестовыми импульсами и светодиодами. Запуск светодиодного импульса задержан относительно тестового на определенный промежуток времени с точностью лучше, чем 1 нс. Определяя разность времен между импульсами, были получены задержки T_{pmt}^i для всех каналов с точностью 1 нс. Надо отметить, что существуют дополнительные задержки такие, как время распространения сигнала от контроллера до светодиода, и временная задержка, связанная с тем, что фронты тестовых импульсов положе светодиодных. Но так как эти задержки одинаковые для всех каналов, они не влияют на окончательный результат калибровки.

После проведения первых калибровочных сеансов было выяснено, что необходимо контролировать амплитуду светодиодного импульса, чтобы она не была слишком высокой. Потому что, тогда возникают предимпульсы, существенно искажающие общую картину. Кроме того, в ходе обработки данных была обнаружена дополнительная задержка между запуском тестового импульса и собственно его появлением в спектрометрическом тракте, различная для разных каналов. Для ее учета были проведены лабораторные исследования контроллеров и полученные значения учитывались в подсчете задержек T_{pmt}^i .

Задержки T_{section}

Задержки T_{section}^j определяются по положению триггерного импульса на дорожке. Для упрощения процедуры нахождения триггерного импульса, проводятся калибровочные раны с тестовыми импульсами с требованием одного сработавшего канала в схеме совпадений ЦМ. Т.к. время выработки сигнала запроса АЦП связана с временем превышения триггерного порога, за временную отметку импульса берется отметка на высоте триггерного порога. Задержки T_{section}^j вычисляются из временной отметки импульса относительно начала дорожки T_{fadc}^j по следующей простой формуле:

$$T_{\text{section}}^j = (T_{\text{offset}}^j - T_{\text{fadc}}^j) / 2.$$

Т.к. играют роль только относительные значения T_{section}^j , в этой формуле удалены слагаемые одинаковые для каждой секции.

В ходе обработки калибровочных сеансов были получены задержки T_{section}^j для всех секций. Было также проверено, что задержки T_{section}^j практически не зависят от канала, вызвавшего срабатывание установки (рисунок 2.8.5).

String 1. Run tst1

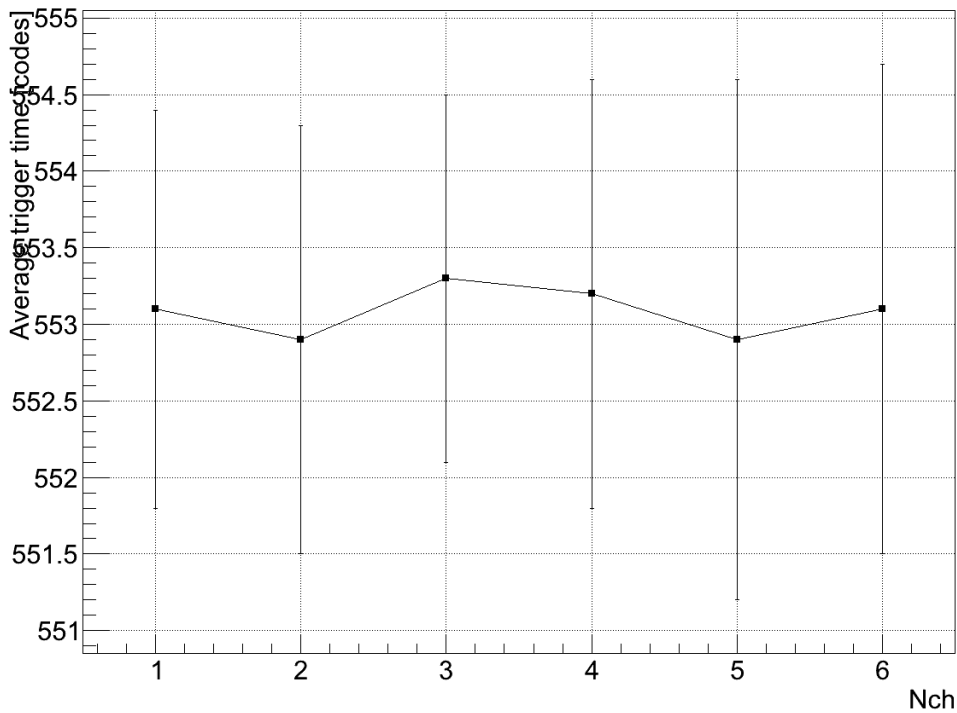


Рисунок 2.8.5. Зависимость T_{fadc}^j от канала, вызвавшего срабатывание установки.

Проверка калибровочных значений по светодиодным и лазерным сеансам набора данных

Проверка калибровочных значений по сеансам с искусственными наносекундными источниками света заключается в сравнении получаемых экспериментальных калиброванных разностей времен срабатывания ОМ с ожидаемыми значениями из геометрии расположения ОМ и источника света. На рис. 6 представлены результаты проверки по сеансам набора данных с включенными светодиодами на ОМ №4 секции №3 (сеанс 19) и на ОМ №5 секции №3 (сеанс 10). Амплитуды регистрируемых импульсов от светодиода на разных каналах различаются на порядки величины. В таком широком диапазоне амплитуд наблюдается изменение фронта импульса, по которому определяется временная отметка (рисунки 2.8.6, 2.8.7). Этим, по всей

видимости, и обуславливаются небольшие расхождения наблюдаемых величин от ожидаемых.

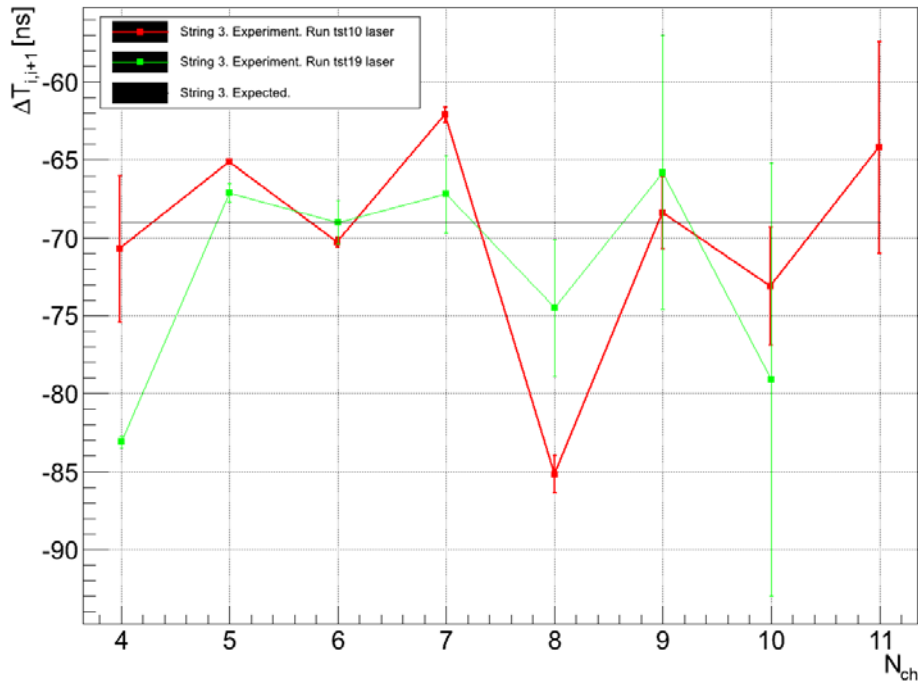


Рисунок 2.8.6. Разность времен срабатывания соседних каналов в светодиодном сеансе.

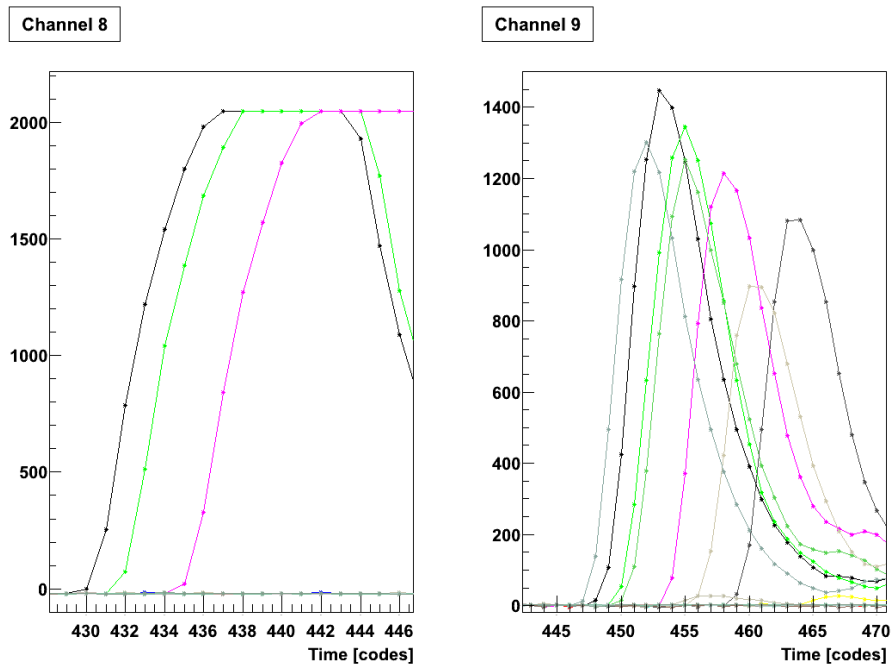


Рисунок 2.8.7. Фронты импульсов на каналах 8 и 9 секции 3, вызванных светодиодом на канале 5.

Лазерный калибровочный источник света расположен на отдельной буйковой станции рядом с кластером гирлянд. Положение источника относительно ОМ кластера известно из акустической системы позиционирования, что позволяет получить ожидаемые разности времен срабатывания ОМ на излучение источника. Сравнение экспериментальных калиброванных разностей времен срабатывания соседних ОМ с ожидаемыми значениями показано на рисунке 2.8.8 видно хорошее согласие между двумя кривыми для всех пар каналов, кроме пар 2-3 и 8-9. Причины расхождения для данных пар исследуются в настоящее время.

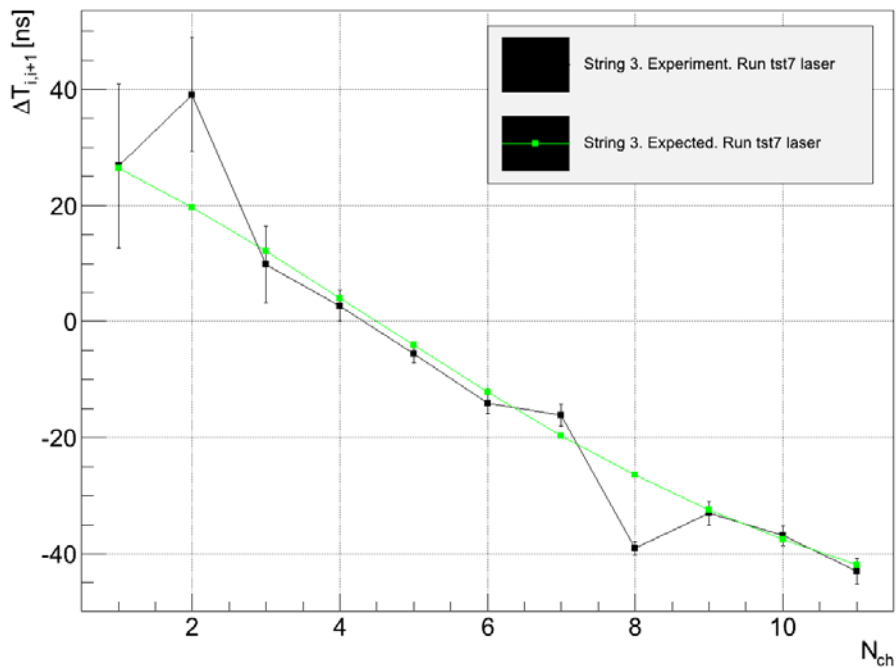


Рисунок 2.8.8. Разность времен срабатывания соседних каналов в лазерном сеансе.

2.9. Долговременный мониторинг гидрофизических процессов

Основные цели и задачи исследований состояли в следующем:

- организовать проведение долговременного мониторинга гидрофизических процессов тепло и массопереноса с помощью трехмерной глубоководной гидрологической системы, расположенной в окрестности Байкальского глубоководного нейтринного телескопа с использованием его материально-технической и экспериментальной базы в рамках ЦКП «Байкальская нейтринная обсерватория»;
- разработать и создать мобильный комплекс оборудования для гидрологического, гидрохимического и гидробиологического мониторинга, отбора проб воды и седиментов, а также манипуляций с буйковыми станциями с ледового покрова озера Байкал;
- провести исследования по оптимизации линий передачи данных от глубоководных распределенных многопроцессорных информационно-измерительных систем и согласующих устройств, разработать предложения по устройству линий передачи и модемов связи;

Развитие новых методов наблюдений с помощью приборов и оборудования, размещенных на стационарных притопленных буйковых станциях открывает новые возможности для проведения многопараметрического мониторинга за состоянием экосистемы озера Байкал. Разработанные технологии развертывания стационарных притопленных буйковых станций, связанных с береговым центром кабельными линиями связи и организация систем сбора данных и управления могут быть использованы для создания других многофункциональных информационно – измерительных систем с большим числом распределенных в большом объеме датчиков.

2.9.1. Результаты мониторинга

Наиболее адекватным методом получения данных о различных гидрофизических и биогеохимических процессах в озере Байкал является долговременный мониторинг процессов в больших объемах воды с помощью приборов, размещенных на стационарных притопленных буйковых станциях, в том числе, связанных кабельными линиями связи с береговым центром сбора данных УСУ-БГНТ и далее с помощью сети Internet с удаленными центрами.

Долговременный трехмерный мониторинг температурного режима озера Байкал ведется с помощью 38 высокоточных глубоководных измерителей температуры воды (термисторов) TR-1000, TR-1050, TR-1060, размещенных на 4-х буйковых станциях, расположенных в районе крутого западного склона на южном Байкале в районе м.Ивановский (Рисунок 2.9.1.1). Разрешение по температуре для этих приборов составляет 0.001 - 0.0001 градуса Цельсия, они преимущественно размещаются на больших глубинах, где вариации температуры не велики. Интервал времени для сохранения величины температуры для этих приборов -10 минут. На меньших глубинах используются 11 более дешевых измерителей температуры VEMCO (разрешение 0.01 градуса Цельсия). Также на станциях «Платформа» и «Нейтрино» установлено 28 открытых и 2 автоматические ловушки для исследования процессов седиментации, а также измерители течений AANDERAA.

В работе приведены результаты анализа и исследований данных, накопленных в результате долговременного многопараметрического мониторинга в 2009-2012 г. В том числе, данных, которые были считаны из памяти приборов при подъеме буйковых станций с гидрофизическим оборудованием, и данных, полученных в результате анализа седиментационных ловушек. На рисунке 2.9.1.2 приведена для примера схема буйковой станции «Молодежная», установленной на относительно



Рисунок 2.9.1.1. Расположение буйковых станций для долговременного мониторинга гидрофизических и биогеохимических процессов.

пологом участке берегового склона. Название этой станции связано с тем, что ее разработка и постановка осуществлялась, в основном, молодыми исследователями. На рисунке 2.9.1.3 приведена фотография установки глубоководного измерителя температуры воды TR-1060 на буйковой станции «Молодежная».

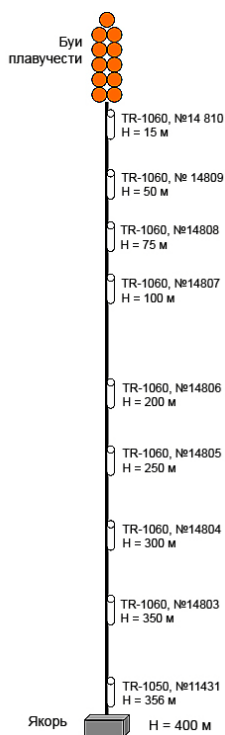


Рисунок 2.9.1.2. Схема буйковой станции «Молодежная».



Рисунок 2.9.1.3. Установка глубоководного измерителя температуры воды TR-1060 на буйковой станции «Молодежная»

Вертикальное температурное распределение

На рисунке 2.9.1.4 приведены результаты измерения температуры по всему диапазону глубин за три года (заметим, что на приведенном рисунке шкалы для каждого процесса свои и одинаковы для глубин от дна до 794м).

На основе представленных данных можно, как это делается обычно, выделить три диапазона глубин, качественно различающихся по своему температурному режиму:

0 - 300 м - поверхностная зона, в которой наблюдаются большие вариации температуры, а величина ее средней температуры зависит от интенсивности солнечной радиации и температуры атмосферы;

300 - 1250 м - глубинная зона, в которой температура воды медленно убывает с глубиной не зависимо от времени года, но в которой наблюдаются коррелированные по глубине возмущения температуры, их величина максимальна в период близкий к осенней гомотермии;

1250 - 1366 м - придонная зона, температурный режим которой практически не связан с процессами в глубинной зоне, но где наблюдаются значительные сохраняющиеся длительное время вариации температуры.

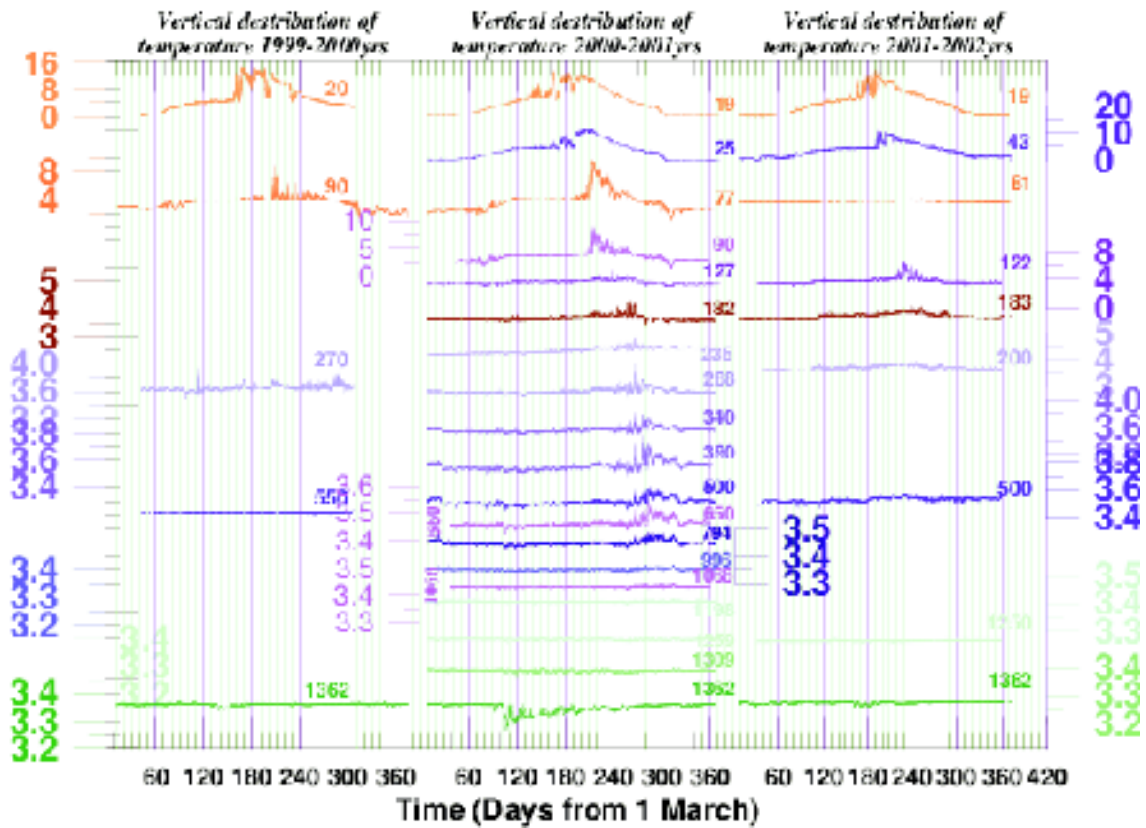


Рисунок 2.9.1.4. Годовой ход температуры воды за три года

В поверхностной зоне развиваются сложные гидрофизические процессы (Рисунок 2.9.1.5). Весенний прогрев воды в озере начинается в марте месяце из-за увеличения проникающего в воду потока солнечной радиации. Проходящий через лед поток света экспоненциально затухает с глубиной z :

$$E(\lambda, z) = E_0(\lambda) e^{-\frac{z}{l_a}} \quad (1)$$

Длина поглощения света l_a для длины волны $\lambda = 480\text{nm}$ в верхнем слое озера не превышает 20 м и быстро уменьшается в красной и голубой частях спектра [41]

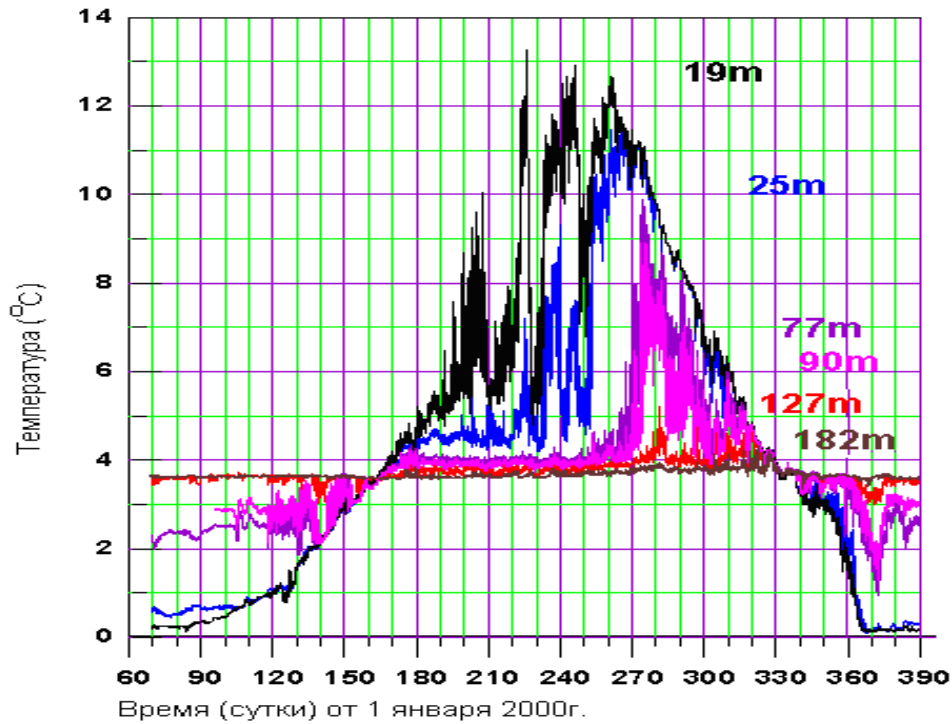


Рисунок 2.9.1.5. Годовой ход температуры в верхнем слое озера.

Радиационный нагрев затрагивает, в основном, самый верхний слой. В весеннее время, когда температура воды на поверхности близка к нулю, прогрев приводит к конвективным процессам. Физическую сущность развивающейся конвекции можно пояснить на примере. На глубине z выделим частицу жидкости с температурой T_1 . Если T_1 ближе, чем температура окружающей среды $T(z)$, к значению на данной глубине $T_{md}(z)$ температуры максимальной плотности, то выделенная частица начнет, как имеющая большую плотность, тонуть. В противном случае, когда T_1 дальше, чем температура окружающей среды, от температуры максимальной плотности, частица будет всплывать. В формировании стабильного температурного профиля изменение температуры максимальной плотности с глубиной играет, наряду с внешними факторами, определяющую роль. В результате уже в апреле подо льдом начинается интенсивное перемешивание вод. Таким образом, поступающее тепло затрачивается на нагрев все увеличивающегося слоя воды, температура которого постоянна. Этот слой, как говорят, находится в состоянии гомотермии.

Воздействие интенсивных конвективных процессов в мае стимулирует увеличение амплитуды колебаний воды на глубинах 77 и 90 м почти на порядок. На этих же глубинах (77 и 90 м) весь подледный период сохраняются длиннопериодные возмущения температуры большой амплитуды (градус и более). Такие температурные возмущения оказываются долгоживущими, перемещающимися и их движение наблюдается в течение всего подледного периода.

При дальнейшем прогреве выход из состояния гомотермии также начинается с верхних слоев, прогрев на глубине 19 м происходит со скоростью 2°C в месяц. При этом на глубинах, больших 77м сохраняется устойчивая температурная стратификация, и температура воды в этих слоях длительное время практически совпадает с температурой максимальной плотности на соответствующих глубинах [35], [37], [38].

Возможный механизм установления такой стратификации ниже будет рассмотрен детально. Температура этого слоя практически не менялась даже при сильных ее вариациях в верхних слоях (например, на глубинах 19 и 25м). Передача тепла в глубинные слои в это время очень мала и происходит только за счет молекулярной теплопроводности и проникающей сюда небольшой части сине-зеленого солнечного света. Отметим очень высокие температуры $\approx 12-13^{\circ}\text{C}$ на глубине 19 м в августе - сентябре.

Температура слоя воды ниже 77 м начинает существенно расти только в октябре. Быстрый рост температуры здесь, а потом и ее падение связано, с охлаждением поверхностного слоя воды, которое вновь, как и в период весеннего нагревания, приводит к интенсификации свободной конвекции и установлению осенней гомотермии.

Охлаждение в октябре-декабре происходит со скоростью 3.7°C в месяц на глубинах 19-100 м и приводит к установлению зимней температурной стратификации. Следует отметить, что ежегодно в январе месяце после периода осенней гомотермии на глубинах 77- 127 м формируется пик температуры. Этот пик прослеживается и в глубинной зоне. Сомнительно,

чтобы такое понижение температуры имело значительные горизонтальные масштабы. Иначе было бы затруднительно объяснить последующее повышение температуры на 2 градуса в течение нескольких дней.

Глубинная зона

Наиболее характерной особенностью глубинной зоны является то, что на фоне общей слабой температурной стратификации в этой зоне наблюдаются почти одновременные (рисунок 2.9.1.6) коррелированные по форме, хотя и различающиеся по амплитуде, температурные возмущения, захватывающие всю зону или большую ее часть.

Максимальная величина этих возмущений наблюдается в период близкий к осенней гомотермии и связана с притоком более теплой воды из вышележащих слоев. Амплитуда колебаний температуры в это время на глубине 500 м достигает 0.1°C , а на глубине 996 м -0.02°C . Интересно, что значимые возмущения меньшей амплитуды, причем как положительные (с ростом температуры на данном горизонте), так и отрицательные (с уменьшением температуры) наблюдаются практически в течение всего года, в том числе в подледный период. Малый временной сдвиг, порядка нескольких часов, между моментами появления возмущений в большом диапазоне глубин может означать, что генерация этих возмущений происходит за счет вертикального смещения водных масс. Скорость таких смещений может быть достаточно большой, например, $\sim 0.001^{\circ}\text{C}/\text{час}$. Эти возмущения могут охватывать области в несколько сот метров по глубине, и максимум возмущения также может располагаться на различной глубине.

Известно несколько основных механизмов, приводящих к смещению водных масс в большом диапазоне глубин: фронты [42], термобары [38] и внутренние волны [43]

Локальное вертикальное опускание или подъем вод в океанических фронтах наблюдается достаточно часто [42]. Их образование обычно связывают со смешением вод разной температуры и солености в результате,

которого образуются более плотные или наоборот менее плотные воды по сравнению с окружающими. П.Шерстянкин для объяснения своих гидрооптических данных предположил, что и на Байкале могут наблюдаться явления подобные океаническим фронтам [44] и предложил возможные механизмы их формирования [45].

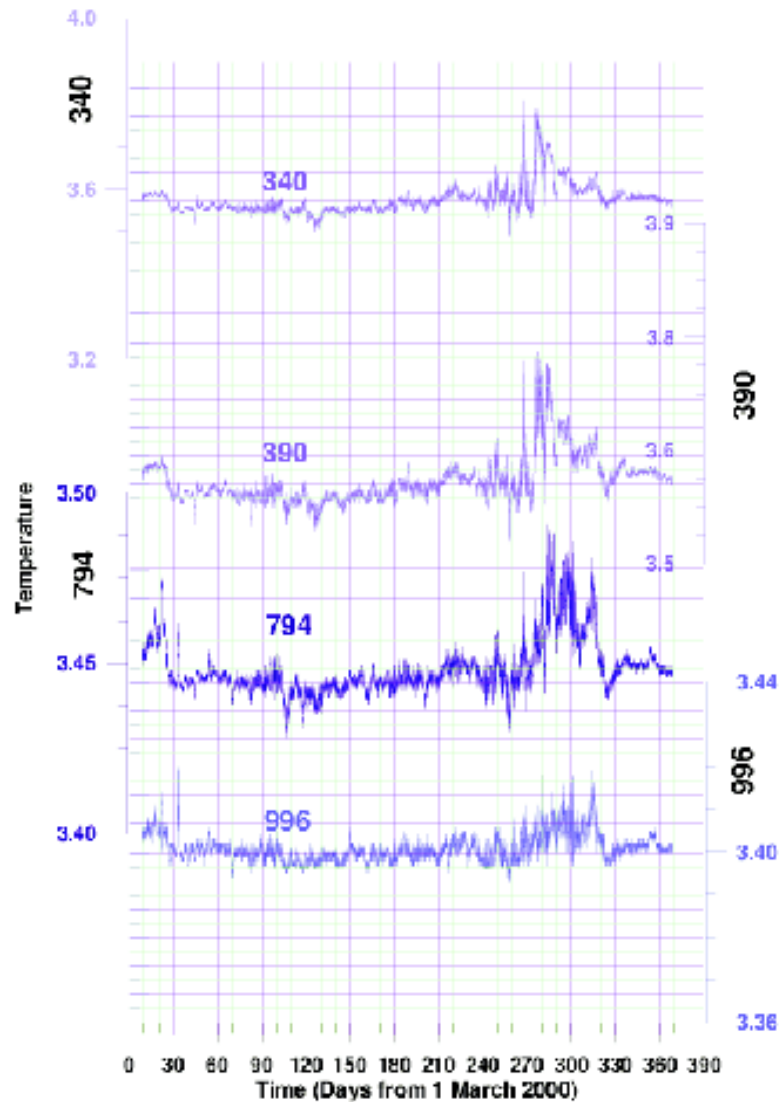


Рисунок 2.9.1.6. Годовой ход температуры в глубинной зоне озера.

Затухающие с глубиной возмущения температуры в ноябре-декабре, на наш взгляд могут быть связаны с развитием фронта не слишком далеко от глубоководного комплекса НТ-200. Наблюдающиеся в другие периоды года возмущения, захватывающие не весь диапазон глубин и имеющие иногда

максимум на промежуточных глубинах не противоречат прохождению внутренних волн. Однако в данный момент полученные нами данные можно рассматривать только как указание на возможность развития фронтов океанического типа или глубинных внутренних волн в Байкале.

В любом случае, мы имеем дело с тонкой игрой термодинамических характеристик стратифицированных байкальских вод, в результате которой происходит вертикальное смещение водных масс. Для ясного количественного объяснения наблюдаемых явлений требуется провести дальнейшие исследования.

Придонная зона

Наиболее существенное изменение температуры придонной зоны, причем ее понижение с 3.6°C до 3.28°C произошло в июне 2000г, когда ни на одном вышележащем горизонте не было воды с температурой ниже, чем 3.4°C . Это означает, что появление такой холодной воды не может быть связано с ее опусканием в районе непосредственного проведения измерений. Холодная вода с небольших глубин либо была принесена за счет присклоновых течений [46] причем ее перемещение вдоль склона должно было начаться не позже начала июня и происходить достаточно медленно, либо приповерхностная холодная вода опустилась заметно раньше в другом месте и была принесена придонными течениями. Нелокальный характер понижения температуры в придонном слое, а значит и мощность интрузии сюда вод из верхних слоев озера, подтверждается данными, полученными с помощью гидроакустической системы измерения координат Нейтринного телескопа НТ-200 [39]. В которой среди прочих измеряются времена распространения акустических сигналов по радиальным трассам длиной $L=600\text{м}$ между расположенными в 4-х метрах от дна на жестких рамах гидрофонами акустических маяков и гидрофоном управляющего модуля акустической системы, расположенным также в 4-х метрах от дна на

гидрологической гирлянде. Длина данной трассы не меняется, поэтому изменения времени прохождения акустического сигнала между гидрофонами $\Delta\tau$ определяется исключительно изменением средней скорости звука на трассе ΔC , которое, в свою очередь, пропорционально изменению средней температуры на трассе ΔT

$$\Delta\tau = \frac{L}{\Delta C} = \frac{L}{\alpha T} \quad (2)$$

В соответствии с работой *Chen-Millero* [40] величина коэффициента $\alpha \approx 5 \text{ м/}^\circ\text{С}$
 $\alpha \sim 5.04 \text{ м/сек}$

На рисунке 2.9.1.7 сделано сравнение результатов прямых измерений температуры прибором TR-1000 на расстоянии 4 м от дна и вычислений средней температуры слоя из данных акустической системы. Для простоты восприятия на рисунке не указаны ошибки определения температуры из акустических данных, которые составляют 4 см/сек. В целом, имеется хорошая корреляция данных. Таким образом, наши результаты подтверждают данные других работ [35], [36] о повышенной скорости и особом характере обновления придонных вод.

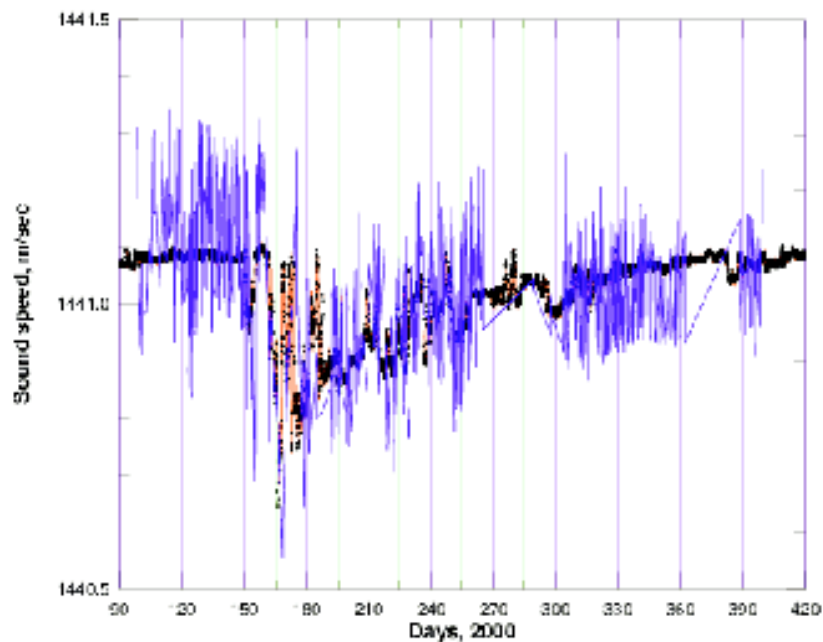


Рисунок 2.9.1.7. Годовой ход температуры в придонной зоне озера.

2.9.2. Выводы

Представленные данные о температуре свидетельствуют о наличии достаточно сложных и многообразных гидрофизических процессов в озере Байкал. Некоторые из них, такие как: гомотермия, термобар и др. достаточно хорошо изучены. Наши результаты дают дополнительную информацию о деталях их развития. Однако, природа ряда явлений, ярко проявившихся при долговременных измерениях температуры, а именно: формирование и эволюция крупномасштабных температурных неоднородностей, практически синхронные температурные возмущения в глубинной зоне в разные периоды года, интрузия холодных вод в придонную зону после весенней гомотермии не вполне понятна. Рассмотренные здесь механизмы, способные в какой-то степени объяснить данные, должны рассматриваться как затравочные гипотезы и требуются дополнительные исследования для подтверждения их справедливости и уточнения деталей или для признания негодными.

Все основные результаты доложены на нескольких международных научных конференциях, прошедших в России и за рубежом, опубликованы в российских и зарубежных журналах и сборниках трудов конференций.

2.10. Анализ данных полученных с помощью экспериментального образца установки для измерения вертикальной компоненты поля

Анализ данных, полученных с помощью экспериментального образца установки, необходимо соотнести с контекстом ведущихся исследований. В последние годы на озере Байкал ведется глубоководный эксперимент по измерению вертикальной компоненты электрического поля на базе поверхность-дно (около полутора км). Эксперимент является уникальным в практике морских электромагнитных исследований, как по величине вертикальной базы, так и по длительности – несмотря на технические перерывы, получено четыре годовых серии измерений. Исследование показало, что теллурическая составляющая в вертикальной компоненте электрического поля здесь отсутствует, а наблюдаемое поле является суперпозицией поля индуцированного течениями (в диапазоне периодов примерно от 14 часов до 10 суток) и поля тока замыкания глобальной электрической цепи (на периодах десятки сотни суток) [63, 64]. Кроме того, при землетрясениях наблюдаются сильные поля, связанные с их непосредственным эффектом, предвестниками и длительной релаксацией [65].

Настоящая работа посвящена дальнейшему изучению вариаций вертикальной компоненты электрического поля в водной толще Байкала, связанных с током замыкания на участке глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Вывод о наличии таких вариаций поля был впервые сделан в работе Шнеера и др. [63] на основе спектрального анализа первой серии измерений 2003/2004 г., обнаружившего сигнал большой амплитуды на периодах “перемежающихся” (“intermittent”) колебаний (100-150 суток) связанных с вариациями наиболее жесткой компоненты волнового излучения Солнца [66-68]. Этот вывод был бы подтвержден спектром второй годовой серии наблюдений на Байкале (2007/2008) [64].

Была предложена гипотеза, что вариации тока замыкания ГЭЦ связаны с вариациями проводимости на участке нейтральной атмосферы под действием наиболее жесткой компоненты солнечного излучения. Однако этот вывод был сделан только на выявлении характерной периодичности в вариациях поля, без прямого сравнения с солнечными данными.

Настоящая работа восполняет этот пробел совместным анализом вертикальной компоненты электрического поля в водной толще с потоком солнечного рентгеновского излучения. Кроме того, расширена наблюдательная база за счет привлечения третьей годовой серии. В итоге корреляция вариаций солнечного рентгена с электрическим полем в озере подтверждается, и гипотеза о его воздействии на ток становится более убедительной.

2.10.1. Наблюдения

Установка для измерения вертикальной компоненты поля E_z расположена в юго-западной части озера в районе Байкальского нейтринного телескопа НТ-200 (ИЯИ РАН). Она представляет вертикальную антенну, заземленную в воде при помощи слабополяризующихся свинцовых электродов на ее концах. Глубина в месте постановки 1360 м. Верхний электрод находится на глубине 60 м под поверхностью, нижний – на высоте 50 м над дном. Блок электроники помещен в контейнере, расположенном вблизи уровня верхнего электрода. Регистрация поля ведется со скважностью 10 с и относительной погрешностью порядка 0.1 %. Расстояние установки от берега около 10 км. Более подробное описание аппаратуры приведено в работе Шнеера и др. [63].

Установка рассчитана на ежегодный и частичный подъем для считывания данных и смены питания. Эта операция выполняется в конце марта со льда. По техническим и гидрометеорологическим причинам подъем станции удавалось сделать не каждый год. В этих случаях установка исчерпывала резерв автономности и наблюдения прерывались. Всего было

получено четыре серии наблюдений длительностью не менее года каждая: 2003/2004г., 2007/2008 г., 2008/2009 г. и 2009/2010 г. Начало и конец каждой серии соответствуют последним числом марта соответствующего года. При этом серия 2008/2009г. оказалась сильно возмущенной сейсмoeлектрическим полем, интересным самим по себе [65], но представляющим помеху для задачи изучения ГЭЦ, поэтому данные по ней не использовались.

2.10.2. Обсуждение предшествующих результатов

Хотя концепция ГЭЦ в планетарной геофизике стала общепринятой уже довольно давно [69-71] и активно развивается [72], она экспериментально обоснована лишь наблюдениями в атмосфере, но не литосфере или гидросфере. Обнаружению тока ГЭЦ в литосфере препятствует его малая величина, техническая трудность измерения вертикальной компоненты и высокая неоднородность среды, приводящая к возникновению теллурической помехи. В океане последние два препятствия отпадают, но первое усугубляется из-за высокой проводимости морской воды. В больших озерах условия однородности и достаточно высокого сопротивления среды выполняются, но почти во всех из них глубина недостаточна для реализации длиннобазовых высокочувствительных измерений. С другой стороны, геофизически наиболее благоприятны для обнаружения тока ГЭЦ зоны активных глубинных разломов, над которыми за счет эманации радона 222 наблюдается повышенная проводимость нижней атмосферы и можно ожидать плотности вертикального тока существенно большей среднепланетарного значения [73]. Озеро Байкал, как самое глубокое, расположенное над активным рифтовым разломом, в наибольшей степени удовлетворяет этим требованиям. При достаточном удалении от берега и вне непосредственной проекции приповерхностных разломов, как в описываемом эксперименте, вертикальная компонента теллурического тока (главная помеха) практически отсутствует, что показывают результаты математического моделирования, сделанные для данного района [74].

Анализ наблюдений по двум сериям 2003/2004 г. [63] и 2007/2008 г. [64] показал, что длиннопериодные (более месяца) вариации поля большой амплитуды (порядка 10 мкВ/м) могут быть связаны только с током ГЭЦ. Теоретически вертикальный ток может складываться из тока смещения, тока проводимости и конвекционного тока. Элементарная оценка показывает, что ток смещения на столь длинных периодах практически отсутствует.

Ток проводимости должен меняться при изменениях ионизации средней атмосферы вызываемых вариациями солнечного коротковолнового излучения. Амплитудные спектры вертикальной компоненты электрического поля в воде показали наличие всех характерных для этого излучения периодов в диапазоне от 27 суток до полугода. Подчеркнем, что теллурическая составляющая поля, общеизвестным образом связанная с солнечной активностью, в измеренном сигнале полностью отсутствует, поэтому данный факт является нетривиальным.

Наибольшей амплитудой в первой серии наблюдений обладал максимум на периоде около 140 суток. Поскольку Фурье-спектр в области периодов сопоставимых с длиной ряда ненадежен, был выполнен громоздкий, но наиболее надежный (с точки зрения точности совместного определения периода и амплитуды) расчет методом глобального минимума [75]. В результате достоверность этой наиболее типичной 140-суточной вариации свойственной перемежающимся колебаниям была подтверждена [63]. В серии 2007/2008 г. этот период оказался несколько короче и добавился полугодовой максимум.

Особенностью спектров E_z явилось, однако то, что они оказались гораздо более круто падающими, чем у любых обычных индексов солнечной активности: максимумы на периодах более 100 суток примерно в 5 раз превосходили максимум на 27-суточном периоде. Этот факт может быть объяснен тем, что перемежающиеся вариации характерны именно для наиболее жесткой компоненты солнечного излучения (в частности, повторяемости -

вспышек), соответственно в наибольшей степени повышающей проводимость нейтральной атмосферы.

Роль конвекционного тока весьма существенна. Путем совместного анализа E_z с приземными метеоэлементами по первым двум сериям установлено [2], что межгодовая изменчивость метеорологической активности (в данном случае, прежде всего – меридиональной компоненты ветра) за счет изменения интенсивности турбулентного обмена ведет к значительному изменению амплитуд поля. Так, несмотря на понижение среднегодовой солнечной активности, амплитуда вариаций поля в метеорологически аномально активном 2007/2008 г. увеличилась по сравнению с 2003/2004 г. примерно в 6 раз. Однако форма спектров при этом изменялась мало.

2.10.3. Новые результаты

Предположение о влиянии на E_z вариаций, наиболее жесткой компоненты солнечной радиации, в частности, -вспышек проверить по стандартным спутниковым данным затруднительно, так как анализ во временной области не демонстрирует явной связи коротких событий на Солнце с E_z . Стандартные данные по жесткому рентгену короче 0.5 \AA представляют дискретные фрагменты, сопоставление которых с непрерывными рядами E_z представляет, вообще говоря, некорректную задачу. Однако можно воспользоваться тем фактом, что всякое усиление интенсивности более мягкой фоновой рентгеновской компоненты является необходимым, хотя и недостаточным условием усиления более жесткой. Поэтому, предполагая генетическую связь вариаций E_z именно с жесткой компонентой можно ожидать, что в спектре мягкой компоненты только часть максимумов будут иметь отклик в спектре E_z .

На рисунке 2.10.1. показаны нормированные амплитуды спектров E_z и потока рентгеновского излучения Солнца X в диапазоне $0.5-4 \text{ \AA}$ в диапазоне периодов от 10 до 220 сут (рассчитанные по среднесуточным данным

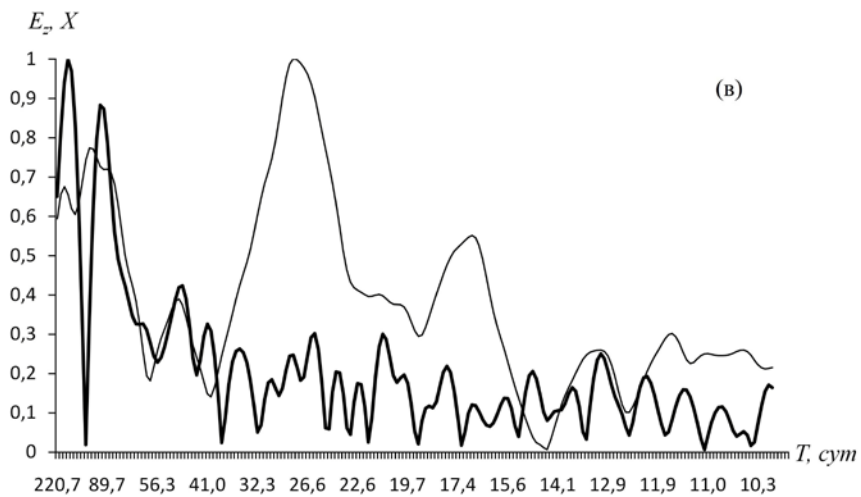
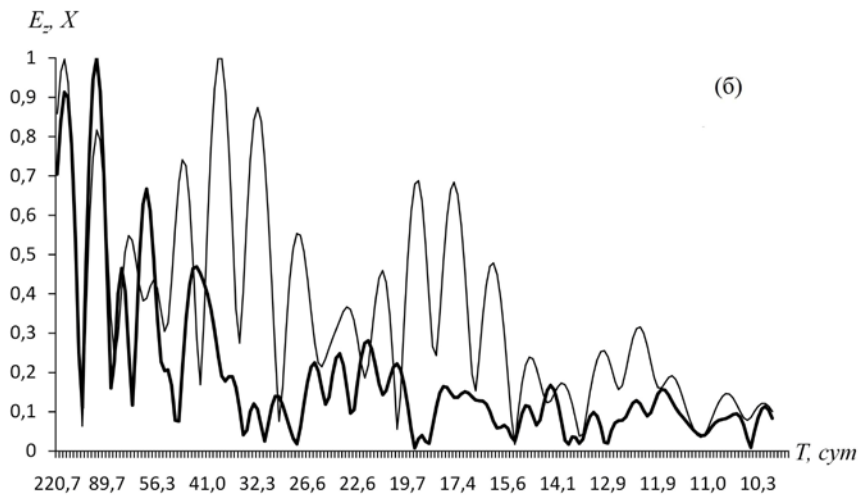
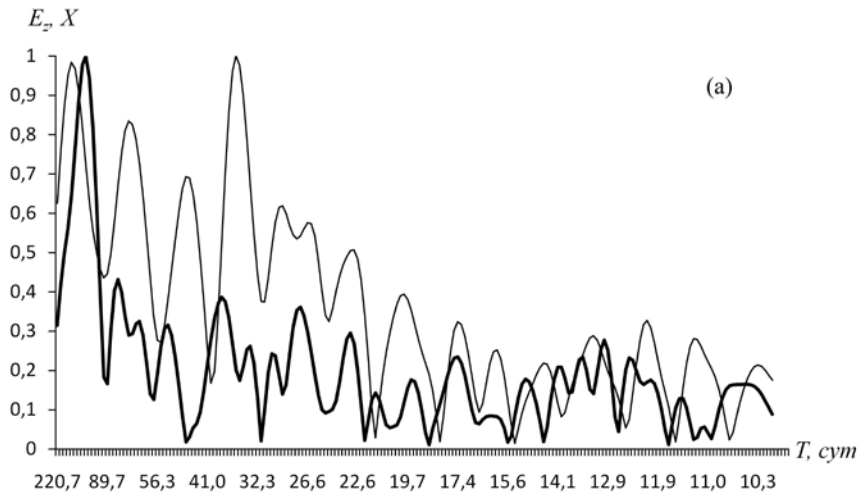


Рисунок 2.10.1. Нормированные на максимальные значения амплитудные спектры E_z (жирные линии) и X (тонкие линии) по трем сериям наблюдений: (а) 2003/2004 г., (б) 2007/2008 г., (в) 2009/2010 г.

методом интеграла Фурье с предварительным снятием тренда, аппроксимируемого кубическим полиномом) по всем трем сериям наблюдений. Нормировка позволяет избавиться от эффекта межгодовой изменчивости амплитуд. Во всех трех сериях видно хорошее совпадение положения максимумов в длиннопериодной части спектра. Самый длиннопериодный – полугодовой максимум в первой серии отсутствует и в X , и в E_z . Следующий максимум отвечает перемежающимся колебаниям, его период в разных сериях несколько меняется (в пределах 103-150 суток). Заметим, что наиболее точное совпадение форм в длиннопериодной части спектра наблюдается в метеорологически самом активном 2007/2008 году. На периодах короче примерно трех месяцев подобие спектров X и E_z теряется, вариации, связанные вращением Солнца, хорошо заметные в спектре X , имеют гораздо меньшую относительную амплитуду в E_z . Таким образом, подтверждается предположение о том, что имеется соответствие спектра E_z с той частью спектра относительно мягкого рентгена, который необходимо соответствует жесткому.

Вторым шагом был корреляционный анализ X и E_z . Поскольку спектры оказались подобны только в длиннопериодной части диапазона, данные были предварительно подвергнуты низкочастотной фильтрации $T > 86$ сут. Вообще, граничный период высоко- и низкоррелированных вариаций, определенный по спектрам, несколько отличается в каждой серии, величина $T = 86$ сут соответствует серии 2007/2008г., она является наибольшей из трех и поэтому взята как общая для сопоставимости результатов. Для расчета корреляционной функции временные ряды среднесуточных значений X взяты начинающимися за 100 суток раньше начала и кончающиеся 100 сутками позже конца соответствующих рядов E_z . По этим фильтрованным данным рассчитывалась корреляционная функция $r(\tau)$, где $\tau > 0$ соответствовало запаздыванию E_z относительно X , $\tau < 0$ – опережению.

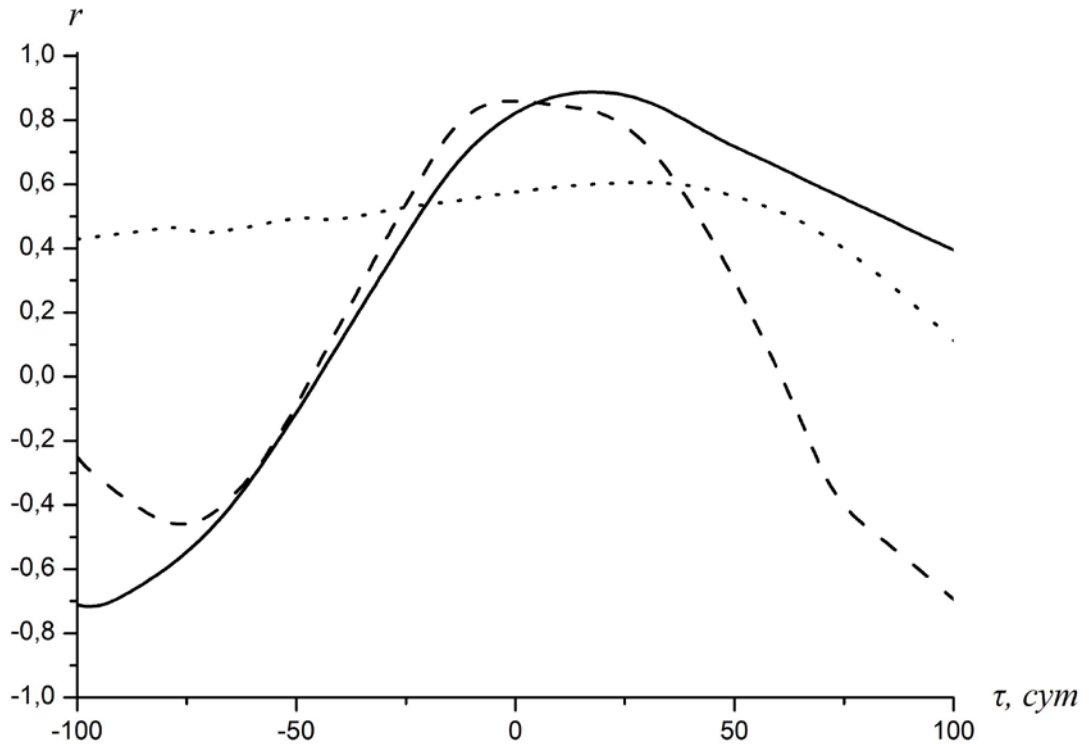


Рисунок 2.10.2. Корреляционные функции E_z и X (сплошная линия – 2003/2004 г., штриховая – 2007/2008 г., пунктирная – 2009/2010 г.).

Результаты расчетов показаны на рисунке 2.10.2. Величины максимумов составляют: для серии 2003/2004 г. $r = 0.89 \pm 0.03$, для 2007/2008 г. $r = \pm 0.86 \pm 0.03$, для 2009/2010 г. $r = 0.61 \pm 0.05$. Все три величины удовлетворяют критерию реальности связи Визе ($|\delta r/r| > 10$). При этом величины корреляций оказались ранжированы в соответствии со среднегодовыми уровнями солнечной активности. Поэтому факт связи E_z с рентгеновским измерением Солнца не только статистически достоверен, но выглядит вполне физично.

Однако расчет корреляционной функции в области низких частот по рядам длительностью лишь один год ведет к тому, что ее максимум оказывается весьма плоским, поэтому его положение недостаточно достоверно. Физически можно было ожидать максимума при нулевом или небольшом положительном τ . На рисунке 2.9.2 для серии 2003/2004 г. $\tau = 18$

сут, для 2007/2008 г. $\tau = -1$ сут (нефизично), для 2009/2010г. $\tau = 28$ сут (явное искажение за счет вращения Солнца). Для достоверной оценки $\tau(r_{\max})$ необходимы ряды большей длины. К сожалению, при существующей методике постановки эксперимента, имеющиеся годовые серии рискованно объединять, даже если бы между ними не было перерыва, поскольку при спуске/подъеме установки возможен неконтролируемый сдвиг собственных потенциалов электродов. В будущем планируется преодоление этой трудности за счет увеличения автономности установки до нескольких лет и передачи данных по гидроакустическому каналу на береговой центр сбора данных в реальном времени.

2.10.4. Выводы

Сделан обзор и проведен анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках НИР. Из обзора следует, что основным сдерживающим началом развития многоплановых глубоководных исследований вертикальной компоненты электрического поля на базе БГНТ является недостаточная надежность измерительной системы.

Обоснован выбор развиваемого направления исследований – измерений вертикальной компоненты электрического поля с минимизацией нестабильности собственных потенциалов электродов.

Обоснована необходимость использования УСУ для достижения целей работы – только при использовании УСУ можно осуществить контроль собственных потенциалов непосредственно в ходе работы установки

Изложена методика проведения исследований, включающего лабораторные и полевые измерения, математическую обработку данных и проектные расчеты. Обоснование их использования основано на конкретных результатах мониторинга источников естественного электрического поля и прогноза землетрясений;

Результаты исследований кратко суммируются следующим образом:

Спроектирован, изготовлен и тестирован экспериментальный образец системы регистрации и хранения данных измерений разностей потенциалов трех различных комбинаций электродных пар в глубоководной установке для наблюдения вертикальной компоненты электрического поля. Система в течение срока автономной работы не менее года каждые 10 секунд измеряет вертикальную компоненту электрического поля на базе поверхность-дно, с одновременным измерением собственных потенциалов приповерхностной и придонной электродных пар, температуры воды вблизи верхней пары и отклонение антенны от строго вертикального положения. Каждые сутки автоматически производится автоматическая калибровка измерительных каналов, включая их чувствительность и возможный дрейф нуля. Кроме того, автоматически выполняется диагностика правильности функционирования подсистем. Выполнены лабораторные исследования датчиков в длительном режиме, оценен спектр шумов и количественно определены связи с различными шумообразующими факторами. Экспериментальный образец комплекса аппаратуры установлен на глубоководной станции в режим набора данных в составе УСУ-БГНТ. Разработано полное описание образца и инструкции для пользователей, включая подготовку прибора к работе, тестирование и запуск прибора, и считывание накопленных данных. Учитывая большой объем и многообразие основных и вспомогательных данных, дано подробное описание их организации в рабочем, калибровочном, проверочно-временном и стартовом блоках. В результате анализа полученных данных установлена статистически достоверная связь вариаций вертикальной компоненты электрического поля E_z в озере Байкал с потоком рентгеновского излучения Солнца на периодах более трех месяцев. Геоактивными с точки зрения E_z оказались, в первую очередь, перемежающиеся (intermittent) колебания, а также полугодовая вариация солнечного рентгена. Косвенно подтверждена гипотеза о воздействии на ток замыкания глобальной электрической цепи наиболее жесткой компоненты солнечного излучения.

В мировой практике измерения отсутствуют работы по измерению вертикальной компоненты электрического поля сопоставимые по масштабу (величине измерительной базы) и длительности. Более того, выполненная НИР полностью преодолела основную трудность измерений вертикальной компоненты, обычно снижающую их точность и достоверность – нестабильность собственных потенциалов верхних и нижних датчиков, находящихся в резко различных условиях, а также возможность отклонения антенны от вертикали. Достигнутый в НИР прогресс в технике эксперимента привел к обнаружению ранее неизвестных природных процессов. В частности, установлена статистически достоверная связь вариаций вертикальной компоненты электрического поля E_z в озере Байкал с потоком рентгеновского излучения Солнца на периодах более трех месяцев. Геоактивными с точки зрения E_z оказались, в первую очередь, перемежающиеся (intermittent) колебания, а также полугодовая вариация солнечного рентгена. Косвенно подтверждена гипотеза о воздействии на ток замыкания глобальной электрической цепи наиболее жесткой компоненты солнечного излучения. Особо важно, что созданная система оптимально пригодна для прогноза землетрясений, с одной стороны, обеспечивая необходимую чувствительность, а с другой – исключая ложные тревоги за счет электродных помех физико-химического происхождения. Достигнутые результаты не только соответствуют мировому уровню электромагнитной геофизики, но, фактически, формируют его. Они могут быть использованы в дальнейших геофизических исследованиях на Байкале и различных районах Мирового океана, а также в фундаментальных экспериментальных физических исследованиях. Результаты НИР, включающие созданный образец, полученные и проанализированные данные должны быть и уже используются при проектировании и создании на базе УСУ-БГНТ нейтринного телескопа

нового поколения НТ1000; в последующих исследованиях по астрофизике, космологии, физике элементарных частиц, в продолжении исследований по экспериментальному прогнозу землетрясений. Установлена статистически достоверная связь вариаций вертикальной компоненты электрического поля E_z в озере Байкал с потоком рентгеновского излучения Солнца на периодах более трех месяцев. Геоактивными с точки зрения E_z оказались, в первую очередь, перемежающиеся (intermittent) колебания, а также полугодовая вариация солнечного рентгена. Косвенно подтверждена гипотеза о воздействии на ток замыкания глобальной электрической цепи наиболее жесткой компоненты солнечного излучения.

Созданный экспериментальный образец рекомендуется к тиражированию. Это позволит решить первоочередную задачу, стоящую перед экспериментальными исследованиями электрического поля в оз. Байкал – перехода от точечных измерений к площадным. Первоначально необходимо изготовление хотя бы еще одной глубоководной станции на основе копии экспериментального образца, что позволит проводить измерения в двух гидрологически однородных, но геофизически резко отличающихся точках – над основным рифтовым разломом и в нескольких километрах в стороне от него. В дальнейшем необходимо развертывание площадной сети содержащей не менее 20 станций, что при наличии созданного образца может быть сделано в срок не более двух лет.

Кроме того данный экспериментальный образец, обеспечивая максимальный контроль локальных воздействий на датчики рекомендуется для использования в физических экспериментах по изучению макроскопических нелокальных корреляций.

Уже в настоящее время в составе действующей станции созданный образец значительно улучшает качество экспериментального материала в исследованиях влияния рентгеновского излучения Солнца на электрическое

поле в водной толще, мониторинг течений, детектирование предвестников землетрясений и нелокальных корреляций удаленных процессов.

Хотя образец предназначался для измерения вертикальной компоненты электрического поля, учитывая число каналов и менее строгие требования к контролю измерений горизонтальных компонент, он может быть успешно, без каких-либо доработок, использован как блок электроники трехкомпонентной теллурической станции или как составная часть блока электроники шестикомпонентной магнитотеллурической станции. Это позволит резко расширить саму тематику геофизических исследований, включив в нее магнитотеллурические зондирования земной коры и мантии, электроразведку с помощью искусственных источников поля и расширив возможности ведущегося мониторинга естественных источников.

В итоге внедрение в практику измерений созданного образца должно привести к качественному скачку в ведущемся на Байкале электромагнитном мониторинге сейсмической и тектонической активности и откроет перспективу глубоководных площадных глубинных электромагнитных зондирований.

Кроме того, образец может быть использован в морских магнитотеллурических станциях для работы в любых районах мирового океана.

Результаты НИР в целом, включая созданный образец, полученные и проанализированные данные должны продолжать использоваться:

- при проектировании и создании на базе УСУ-БГНТ нейтринного телескопа нового поколения НТ1000,
- в исследованиях по астрофизике, космологии, физике элементарных частиц,
- в экспериментальном прогнозировании землетрясений в зоне основного разлома Байкальской рифтовой зоны.

3. Создание системы коллективного доступа к аппаратуре и экспериментальным данным кластера гирлянд на основе глубоководной оптоволоконной системы связи и радиоканала Ethernet

Центр коллективного пользования «Байкальская нейтринная обсерватория» предназначен для обеспечения доступа к новейшему научному оборудованию и комплексу материально-технических средств широкому кругу пользователей для проведения исследований в области астрофизики, гидрологии и смежных наук. В ниже приведен состав учреждений и подразделений, обеспечивающих работу ЦКП.

Институт ядерных исследований РАН	
Лаборатория нейтринной астрофизики высоких энергий (ЛНАВЭ)	
	Управление, научное руководство, координация, сопровождение, планирование и материально-финансовое обеспечение работ
	Разработка и лабораторные испытания аппаратуры и специального оборудования. Сборка, наладка, испытания..
	Научно-технические разработки и сопровождение работ по эксплуатации и модернизации комплекса в целом
	Обработка и анализ данных
Байкальская нейтринная обсерватория Института ядерных исследований РАН.	
Озеро Байкал, 106 км КБЖД	
Байкальский глубоководный нейтринный телескоп (БГНТ)	Система притопленных буйковых станций
Донная кабельная линия связи	Кабели электропитания и связи
Береговой центр	Блок управления и сбора данных
	Блок спутниковой связи
	Бытовой блок – стационарные корпуса, обеспечивающие длительное пребывание персонала на озере Байкал, 106 км КБЖД
	Блок ремонта и настройки глубоководной аппаратуры
Блок обеспечения экспедиционных	Эксплуатационная служба
	Передвижные жилые и технические

работ	средства
	Энергоснабжение и связь
Байкальский технический стационар ИЯИ РАН в г. Байкальске	Подъемное оборудование
	Льдорезное оборудование
	Кабелеукладочное оборудование
	Аварийно-спасательное оборудование
	Склад
	Гараж
	Мастерские
	Технический корпус
	Автомобильный и водный транспорт

Байкальская нейтринная обсерватория расположена в Южной котловине озера Байкал, 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 нескольких десятков километров от берега обеспечивает принципиальную возможность развертывания детектирующих систем глубоководного телескопа в объеме до 30-ти кубических километров.

Наличие 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 станowych 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.

На рисунке 3.1 показано место расположения телескопа и Берегового центра Байкальской нейтринной обсерватории. Береговой центр располагается на 106 и 107 км КБЖД.

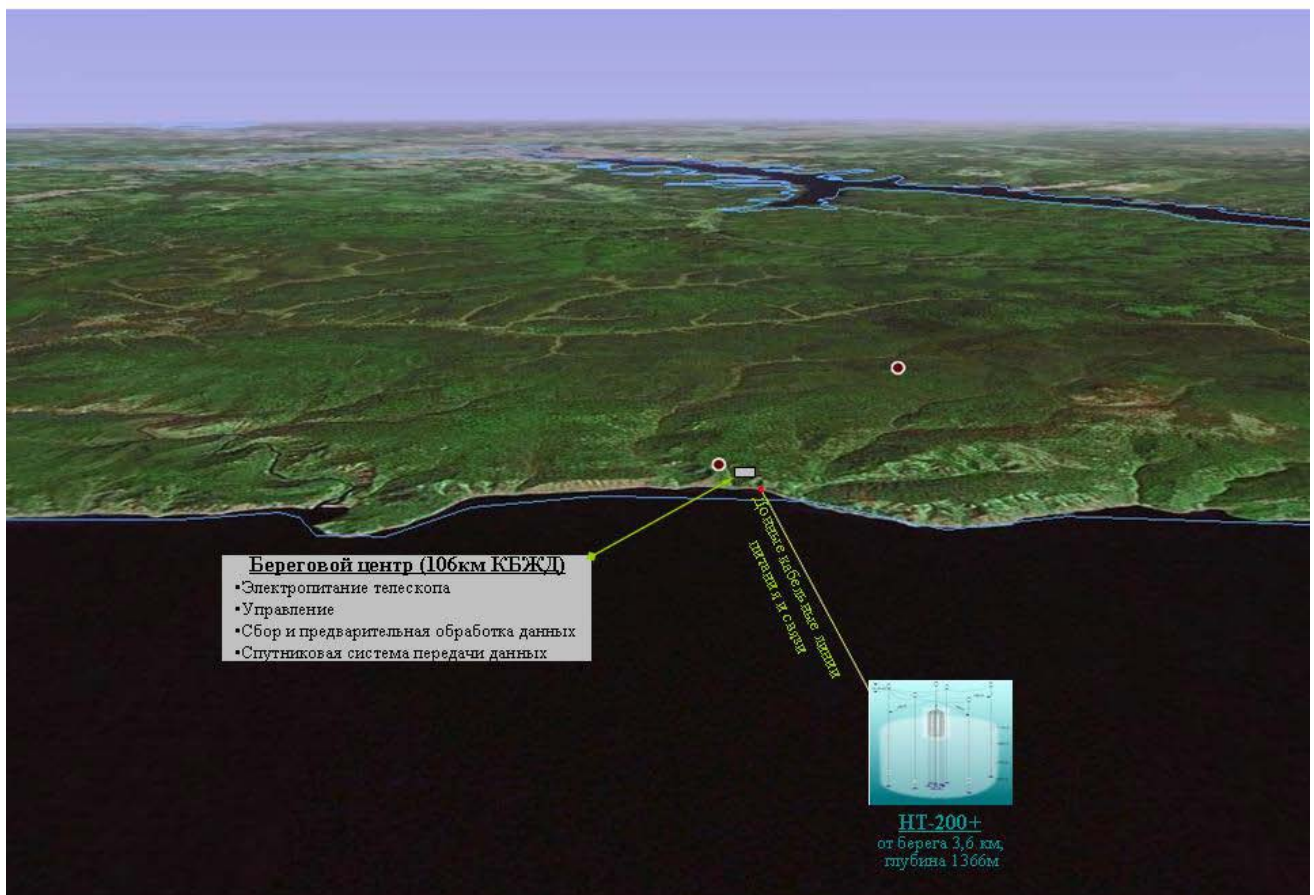


Рисунок 3.1. Карта-схема расположения блоков Байкальского глубоководного нейтринного телескопа



Для установки и ремонта глубоководных систем нейтринного телескопа ежегодно в период становления надежного ледового покрова на озере Байкал в 4 километрах от берега устанавливается ледовый лагерь с

автономным электропитанием, подъемно-транспортным оборудованием и обеспечению рабочих условий для персонала (рисунок 3.2).

В таблице 3.1 приведен перечень имеющегося оборудования и подъемно-транспортного оборудования для обеспечения экспедиционных работ и эксплуатации научного оборудования.

Таблица 3.1. Имеющееся оборудование и транспортные средства ледового лагеря

№№	Наименование	Наличие
1	Спуско-подъемное устройство СПУ-84-86 (Лебедка от СК1-74, г/п 2тс)	7
2	Спуско-подъемное устройство СПУ27М (Лебедка от ПК-3,5 (г/п 3,5тс))	7
3	Смоточно-намоточное устройство (барабан №14)	2
5	Кабелеукладочный комплекс	1
6	Кабельный транспортер на полозьях(барабан №14)	2
7	Кабельный транспортер (барабан №25)	2
8	АД 30-Т400 Дизельный генератор 30 кВт в контейнере «Север» К-3	1
9	АД 75-Т400 Дизельный генератор 75 кВт в контейнере «Север» К-3,6	2
10	ГК ТСС Дизель-генератор LS-15/1P с электростартером Напряжение, В 1х220В12 кВт	2
11	Кузов КМ-500 (КУНГ) на полозьях	12
12	Фургон почтовый на полозьях	3
13	Сани грузовые	3
14	Склады ледовые на полозьях	3
15	А\м ГАЗ-33081 Садко фургон (перевозка пассажиров, приборов, грузов и буксировка ледового оборудования)	2
18	А\м УАЗ-315195 Hunter (перевозка персонала, приборов, инструмента)	2
19	ГАЗ 34039-23 Грузопассажирский плавающий снегоболотоход гусеничный (Буксировка ледового оборудования, носитель ледорезного оборудования)	2
20	Колесный трактор Трактор МТЗ 82.1 Беларусь (Носитель ледорезного оборудования)	1
21	Бульдозер Агромаш 90ТГ 2047А (ДТ-75) - Двигатель А-41, жесткий отвал, с электрозапуском двигателя, с ВОМ и задней гидронавеской. (Береговые работы)	1

Береговой центр предназначен для подготовки глубоководных систем телескопа и научного оборудования пользователей для глубоководной установки и ремонта, управления телескопом и научными экспериментами, подачи электропитания в системы телескопа, сбора и передачи данных в

удаленные исследовательские центры по системе радио-Интернет, хранения оборудования, приемки и отправки грузов, обеспечения бытовых условий для персонала. В период проведения экспедиционных работ Береговой центр должен обеспечивать условия для работы и быта до 50-60 человек одновременно.

На рисунке 3.3 показан объект действующего берегового центра – центр управления телескопом, расположенный в здании Путевой полуказармы Кругобайкальской железной дороги. Бревенчатый дом общей площадью 50 м², построен в 1911-1915 гг., охраняемый памятник архитектуры, в ветхом состоянии, необходима реставрация. Используется по договору аренды с ЖКУ г. Слюдянка. Отопление дома дровяное, канализация и водоснабжение отсутствуют. Вода доставляется ведрами из проруби.



Рисунок 3.3. Центр управления телескопом. Путевая полуказарма

В центре управления телескопом расположены рабочие места 2 операторов, осуществляющих постоянное дежурство. Рабочие места

оснащены компьютерной станцией, принимающей данные с телескопа и после первичной обработки передающей данные удаленным пользователям по линии радио-интернет, средствами сигнализации и связи. В доме расположены также оконечные устройства оптического и электрических кабелей, система стабилизированного питания телескопа, лабораторное помещение для отладки и ремонта оптических и электронных модулей, бытовое помещение для отдыха операторов.

На рисунке 3.4 показано здание «Дом бригадира», в котором расположены штаб экспедиции, кухня, столовая и бытовые помещения для отдыха персонала. Общая площадь 100 м², бревенчатый дом постройки 1905 г. , отопление дровяное, водоснабжение и канализация отсутствуют.



Рисунок 3.4. Бытовой корпус. Дом Бригадира

В городе Байкальске расположен Байкальский технический стационар, предназначенный для выполнения работ по техническому обслуживанию экспедиций, приемке и отправке грузов, транспортировке грузов, сборке и ремонту экспедиционного оборудования и автотранспортной техники. Стационар расположен в г. Байкальск Слюдянского района Иркутской области.

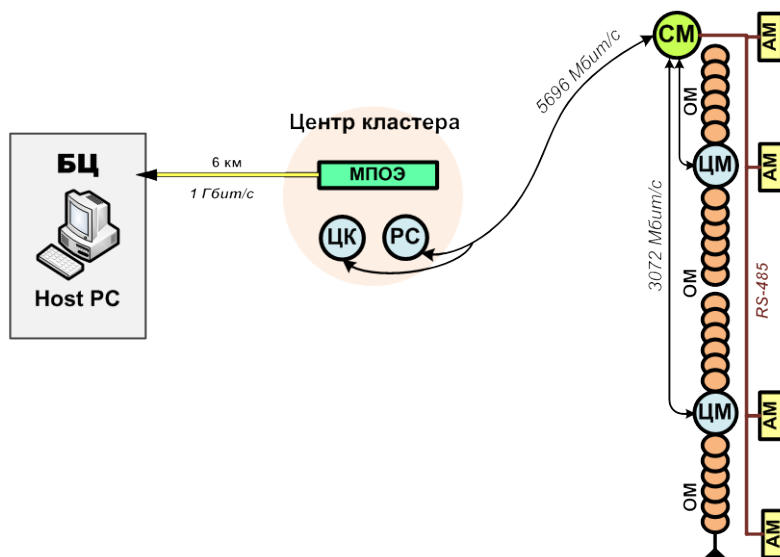


Рисунок 3.5. Организация системы сбора данных.

Центр установленного в 2012 г. кластера NT1000 из 3 гирлянд оптических модулей и сопутствующего оборудования связан с береговым центром (БЦ) при помощи двух оптоволоконных линий Ethernet, пропускная способность которых составляет 1 Гбит/с (рисунок 3.5). Организованная линия связи позволяет передавать большие объёмы информации, и рассчитана на суммарный поток данных со всех восьми гирлянд полного кластера телескопа и обеспечивает передачу данных с научного оборудования пользователей ЦКП. Локальная сеть компьютеров внутри кластера построена на базе технологий DSL. Передача информации между сервисным модулем гирлянды и центром кластера осуществляется парами SHDSL-модемов со скоростью 5696 Мбит/с. DSL-модемы являются на сегодняшний день одной из наиболее эффективных систем передачи информации на большие расстояния. В 2012 году применяются SHDSL-модемы Sigrand SG-17B. Такие же устройства применяются для передачи данных между центральными модулями и сервисным модулем гирлянд.

Описанный выше комплекс обеспечивал в 2011-2012 гг. доступ 12 научным организациям для проведения исследований по своим научным программам астрофизики, изучении космических лучей (проект «Сфера»), гидрологии, гидробиологии, лимнологии.

4. Разработка рекомендаций по созданию нейтринного телескопа нового поколения НТ1000

4.1. Результаты анализа и моделирования проекта нейтринного телескопа с увеличенным эффективным объёмом

В настоящее время стало возможным проводить сравнительный анализ как действующих, так и проектируемых нейтринных телескопов в естественных средах. Особый интерес в этом смысле представляют данные установки IceCube на Южном полюсе, как первой полноразмерной и функционирующей (с 2010 года) установки в мире. На ней впервые были зарегистрированы два события, вызванные космическими нейтрино высокой энергии, что с одной стороны стало подтверждением правильности расчетов и направления по увеличению объемов телескопов, с другой стороны, IceCube до сих пор не смогла определить локальных источников нейтрино, что может объясняться как её не слишком удачным расположением (галактическое ядро и практически вся галактическая плоскость находятся выше горизонта и не позволяют использовать толщу Земли в качестве фильтра нейтрино), так и тем, что реальные потоки нейтрино от этих объектов являются ниже ожидаемых. Эти положительные и отрицательные результаты указывают, что создание нейтринного телескопа в Северном полушарии с объемом сравнимым или больше, чем у IceCube, имеют очень хорошие перспективы в исследованиях космических процессов и поисках темной материи и экзотических элементарных частиц. На основе анализа всей совокупности данных, включая и собственные результаты эксплуатации телескопа НТ200+ и проектирования, в научно-технический проект НТ1000 вносятся корректировки, касающиеся как объема установки, так и ее конфигурации. Подобные корректировки прорабатываются и в европейском проекте KM3Net.

Наиболее перспективным является создание сети телескопов в Северном и Южном полушарии, объединяющей IceCube с создаваемыми телескопами KM3Net и НТ1000. Причем каждый телескоп должен иметь

объем не меньше, чем объем IceCube, т.е. выше порогового, но не больше, чем это позволяют национальные средства и время создания. Сеть таких телескопов позволит набирать необходимую статистику и осуществлять проверку достоверности результатов. Для повышения эффективности создаваемой сети предлагается создать Глобальную нейтринную обсерваторию с функцией координации и проведения совместных исследований. Проект ГНО интенсивно обсуждается его потенциальными участниками с целью завершить создание в 2013 г.

Что касается Байкальского проекта, то корректировка заключается только в увеличении эффективного объёма за счёт увеличения количества кластеров с 12 до 27 штук и количества модулей на каждой гирлянде с 24 до 48. Такой подход обусловлен тем, что все основные элементы проекта NT1000 уже отработаны и прошли натурные испытания с положительными результатами, а принятая конструкция телескопа позволяет увеличивать объем простым наращиванием количества однотипных единиц – кластеров телескопа.

Количество оптических модулей на каждой гирлянде могут лимитироваться как возможностями электроники, так и физической длиной гирлянды. Возможности электроники вполне допускают увеличение количества секций с 2-х (в проекте NT1000) до 4-х (или даже, укомплектовывая секции максимально допустимым на существующем дизайне количеством оптических модулей – по 16 штук – можно ограничиться тремя секциями на гирлянде). Длина гирлянды с 48 модулями при расстоянии между ними 15 метров так же укладывается в границы возможной. Чуть более 700 метров заняты оптическими модулями, ~500 метров – верхняя часть, непригодная к работе из-за достигающего этой глубины солнечного света и ~100 метров придонный слой с повышенным содержанием органических взвесей укладываются в общую глубину Байкала 1367 метров в месте расположения установки.

Увеличение количества кластеров с 12 до 27 представляет собой просто добавление ещё одного (внешнего) кольца из 15 кластеров к установке с сохранением её трёхлучевой симметрии (Рисунок 4.1). Количество оптических модулей при этом возрастает до 10368 штук.

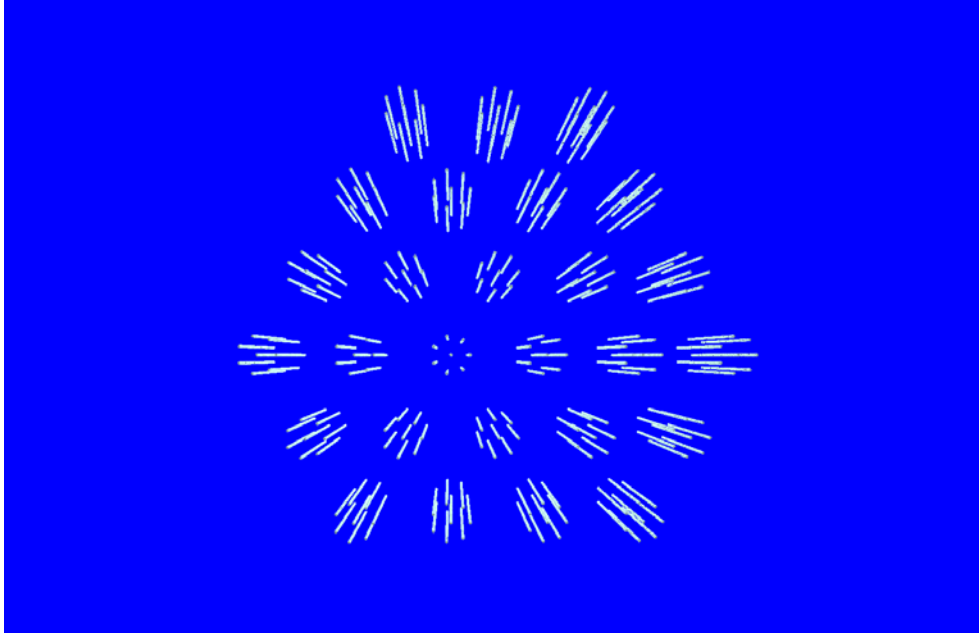


Рисунок 4.1. Расположение 27 кластеров телескопа, вид сверху.

Следует заметить, что помимо вышеприведённой схемы нами рассматривались и другие варианты, в частности, вариант с большим увеличением количества кластеров без увеличения количества ОМ в каждом из них. Вариант с 52 кластерами и 24 ОМ, имея сравнимое количество модулей (9984), отличался несколько большим приростом эффективного объёма в задаче детектирования мюонов за счёт значительно большего внешнего объёма (растущего практически пропорционально горизонтальным размерам установки). Однако среди недостатков такого варианта следует отметить большую стоимость и сложность монтажа установки, меньшую точность восстановления событий во внешнем объёме, а так же меньшую его пригодность для регистрации событий непосредственно в объёме детектора. Поэтому на данном этапе этот вариант рассматривается как менее перспективный.

На рисунке 4.2 приведены зависимости эффективных площадей от энергии мюонов для изотропного (по полусфере) потока мюонов фиксированной энергии до (красная линия) и после коррекции (зеленая линия). По горизонтали отмечен десятичный логарифм энергии (в ТэВ), по вертикали – площадь в м².

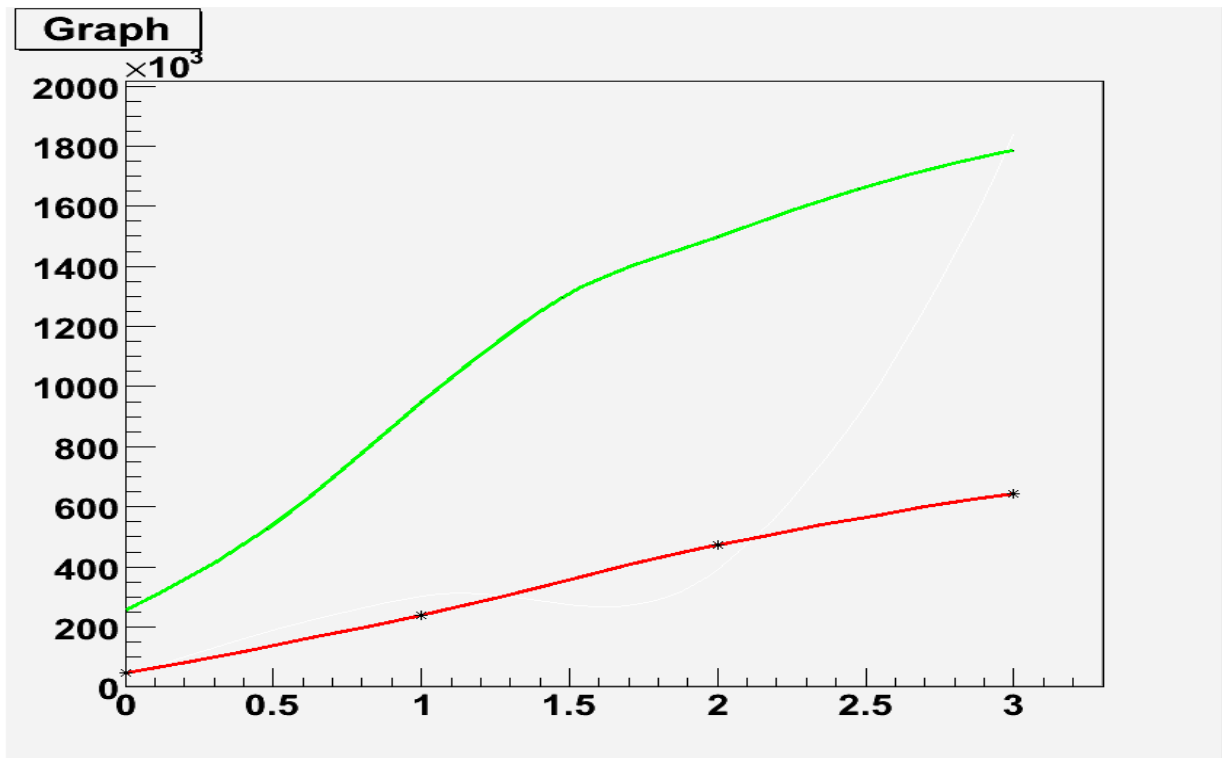


Рисунок 4.2. Эффективная площадь телескопов до и после коррекции для мюонов фиксированной энергии.

Данная эффективная площадь выводится для триггера 1-3-6, означающего, что сигнал локального триггера был выдан не менее чем одним кластером и что событие содержит не менее 6 сработавших оптических модулей на не менее чем 3-х гирляндах. Триггер 1-3-6 мы полагаем минимальным триггером, допускающим реконструкцию события.

На рисунке 4.3 приведена чувствительность к изотропному (по полусфере) потоку нейтрино фиксированной энергии.

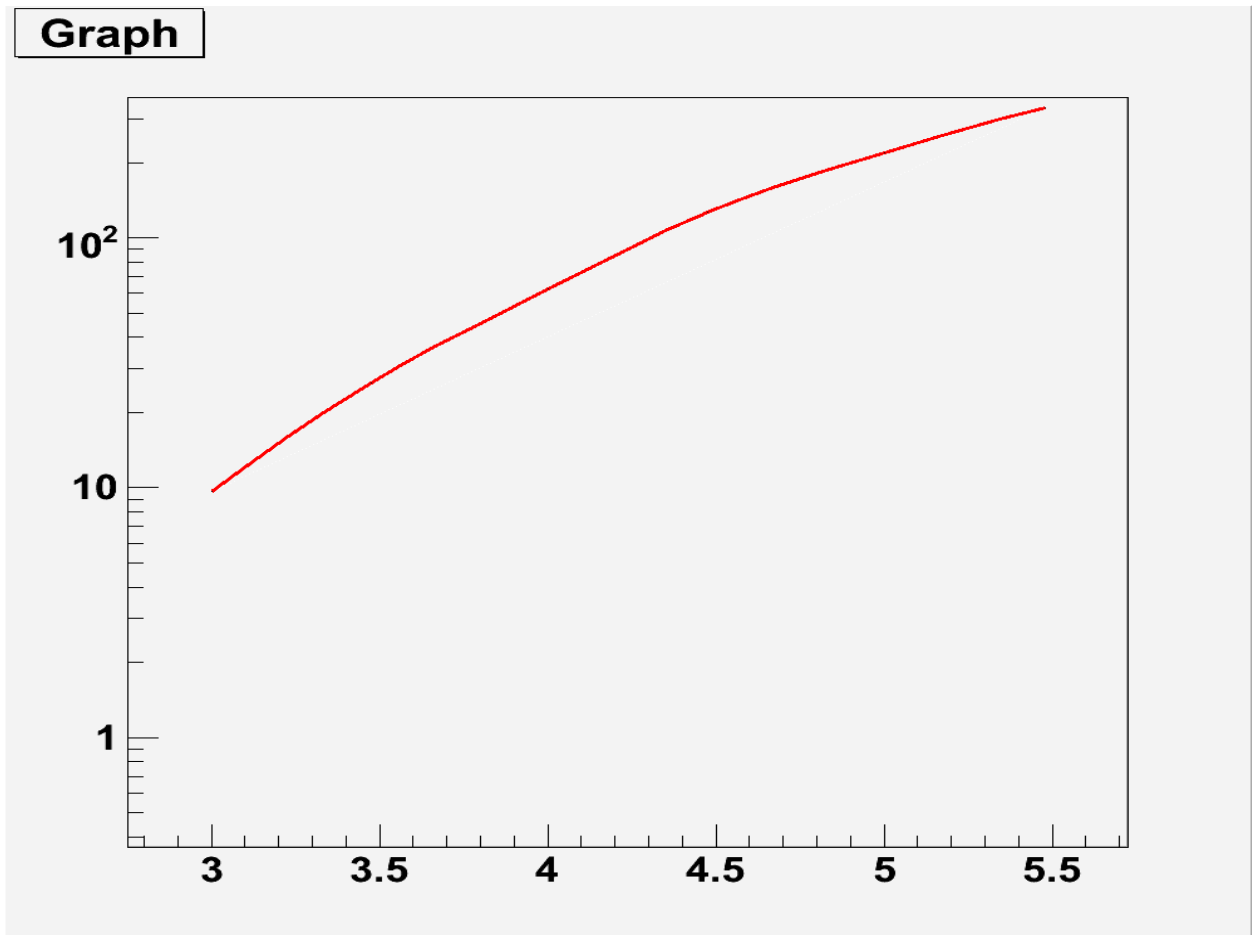


Рисунок 4.3. Эффективная площадь регистрации нейтрино фиксированной энергии для телескопа с увеличенным объемом.

По горизонтали отложен десятичный логарифм энергии исходного нейтрино (в ГэВ), по вертикали – эффективная площадь установки (в квадратных метрах). Эффективная площадь так же, как и в предыдущем случае, отложена для триггера 1-3-6, минимального триггера, допускающего реконструкцию события.

Вариант телескопа после коррекции имеет эффективную площадь $\sim 1,7$ км² для мюонов высокой энергии и до ~ 300 м² для нейтрино. Такая установка, в случае её реализации, будет сравнима по эффективности с IceCube и проектируемыми вариантами нейтринных телескопов в рамках европейского проекта KM3Net.

4.2. Кластерная структура НТ-1000. Проектные решения

В соответствии с результатами численного моделирования нейтринного телескопа как физической установки, были выработаны проектные решения несущих систем и кабельных коммуникаций для создаваемого Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ-1000, в том числе, осуществлена привязка телескопа к ландшафту и береговой базе, скорректированы технологии его развертывания, разработан план модернизации парка спуско-подъемного, ледорезного, кабелеукладочного, и прочего оборудования ледового лагеря.

Для НТ-1000 рекомендована структура установки, когда телескоп представлен в виде набора автономных одинаковых структур – кластеров (структурных элементов верхнего уровня). Монтажными единицами кластеров НТ-1000, являются притопленные буйковые станции - ПБС, состоящие из кабель-троса, несущего троса, якоря и буюв, обеспечивающих вертикальное положение несущего троса в заданном месте, и донные кабельные линии (КЛД). Кластер состоит из следующих основных элементов:

- 8 ПБС с секциями оптических модулей телескопа - ПБСТ, ,
- ПБС центра управления кластера - ПБСЦ,
- одной оптико-электрической донной кабельной линии - КЛД с кабельной ПБС - ПБСК,
- подповерхностных кабельных линий -КЛП, которыми станции кластера на глубине 30-40 метров соединены с ПБСЦ.

Длина КЛП на 5-15% больше расстояния между якорями соответствующих станций, что позволяет производить монтажные, отладочные и ремонтные работы со станциями в произвольном порядке независимо от состояния соседних станций кластера.

Структурными элементами НТ-1000 нижнего уровня являются так называемые «Секции» - набор из установленных на несущем тросе (либо кабель-тросе) ПБС через 15м по вертикали 12-ти оптических модулей - ОМ и

одного центрального модуля – ЦМ (в центре секции). ОМ соединены с ЦМ кабелями равных длин по 90м; эти секции устанавливаются на нижних буйрепах ПБСТ.

Ниже, как иллюстрации проектных решений, приведены виды сверху (план-карты) и перспективные проекции (общие виды) кластера и вариантов несущих систем и связанных с ними кабельных линий нейтринного телескопа.

Вариант 1: «12*8*24 (300-60-15)» – 12 кластеров в 300м друг от друга, содержащие по 8 гирлянд в центре и в вершинах правильного семиугольника радиусом 60м; в этих гирляндах по 2 секции из 12 фотоприемников (24 оптических модуля), между ОМ расстояние равно 15м (всего $12*8*24 = 2304$ ОМ); высота гирлянды $15*23 = 345$ метров.

Вариант 2: «27*8*48 (300-60-15)» – 27 кластеров в 300м друг от друга, содержащие по 8 гирлянд в центре и в вершинах правильного семиугольника радиусом 60м; в этих гирляндах по 4 секции из 12 фотоприемников (48 оптических модулей), между ОМ расстояние равно 15м (всего $12*8*24 = 2304$ ОМ); высота гирлянды $15*47 = 705$ метров.

Оба варианта НТ-1000 отличаются только количеством фотоприемников в гирляндах и количеством кластеров; собственно Вариант-1 есть физически значимый детектор, но при этом является предшествующим этапом развертывания Варианта-2.

Конструкции станций кластера аналогичны установленным в 2011-2012гг., а именно: станции управления ПБСУ-11 (как центр Кластера), ПБСЭ(3)-12 (как станция ПБСТ Кластера), КЛД-11 с кабельной станцией ПБСК-11 - последние являются также донной кабельной линией экспериментального кластера - описание этих монтажных единиц приведено в **Отчете по 3 этапу НИР (раздел 2 «Развертывание кластера из трех гирлянд на оз.Байкал, модернизация УСУ-БГНТ»)**

На рисунках 4.4 и 4.5 приведены схемы, карты и планы комплекса буйковых станций (БС) и донных кабельных линий (КЛД) по состоянию на лето 2012г. символами обозначены:

- К-98, К-04, К-05, К-09, К-11 – кабельные донные линии (КЛД) и соответствующие кабельные ПБС, развернутые в 1998, 2004, 2005, 2009, 2011 годах (последняя К-11 – оптико-электрическая линия первого кластера) соответственно;

- В(1), В(2), В(3), Щ – притопленные буйковые станции внешние ПБСВ и центр управления ПБСЩ комплекса НТ-200+, установленные вокруг телескопа НТ-200 «Гептагон» соответственно;

- Г – гидрологическая ПБС

- Л – лазерная ПБС

- Э(1), Э(2), Э(3), У - притопленные буйковые станции экспериментального кластера НТ-1000 и его центр управления соответственно.

Рисунок 4.6 – общий вид кластера. Его вид сверху и состав показан на врезках рисунков 4.7 и 4.8.

Рисунки 4.7-4.9 - карта-схема, общий вид и схема кабельных линий Варианта 1: «12*8*24 (300-60-15)».

Рисунки 4.10-4.12 - карта-схема, общий вид и схема кабельных линий Варианта 2: «27*8*48 (300-60-15)».

Обозначения:

- Cable МЕОС (Main Electro-Optical Cable) - оптико-электрическая донная кабельная линия КЛД

- Cable BS - кабельная ПБС (ПБСК)

- DAQ BS (Data Acquisition Buoy Station) - ПБС центра управления Кластера

- Strings BS - станции ПБС с секциями регистрирующих модулей телескопа (ПБСТ).

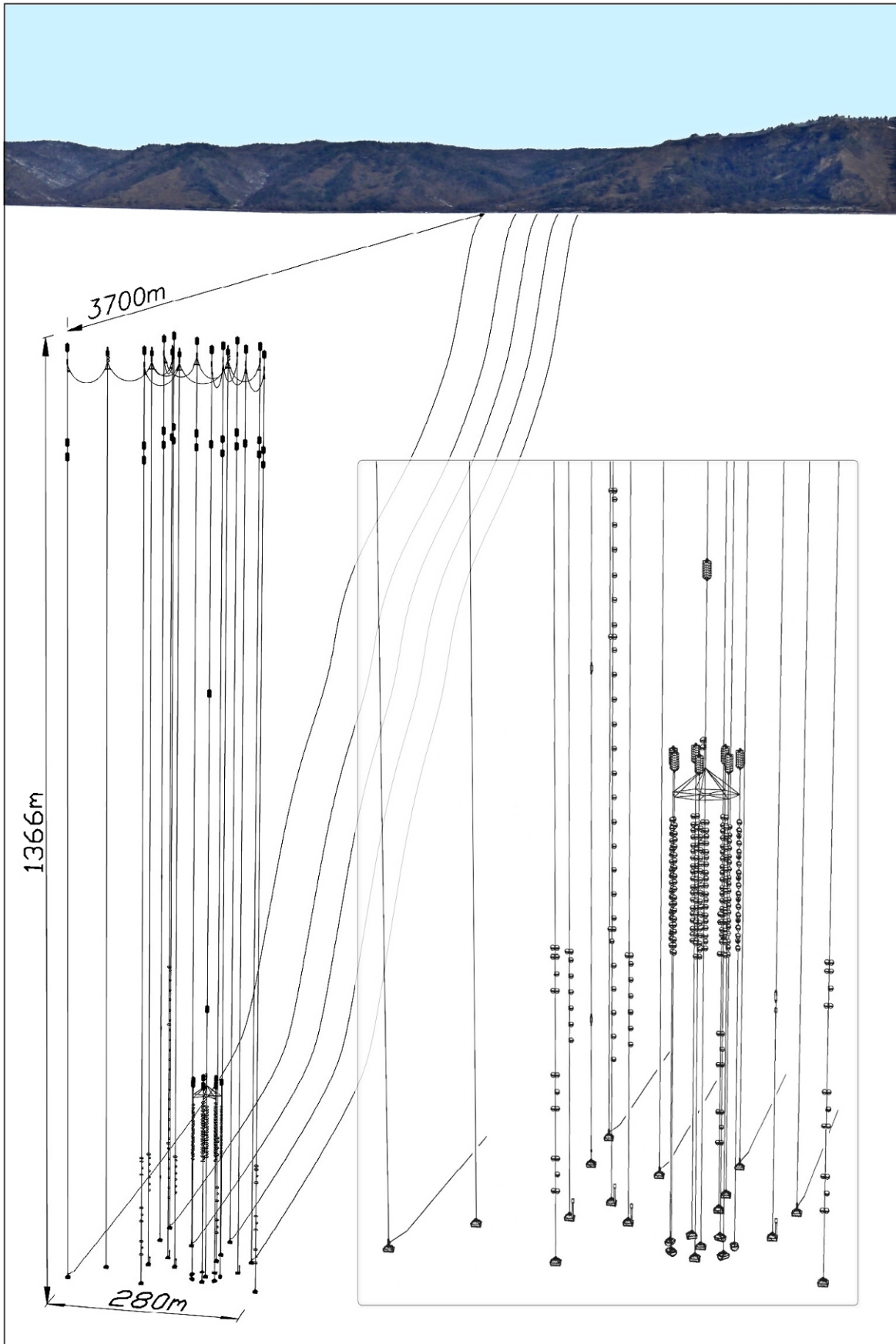


Рисунок 4.4. Общий вид комплекса буйковых станций (БС) и донных кабельных линий (КЛД) НТ-200+ по состоянию на лето 2012г.

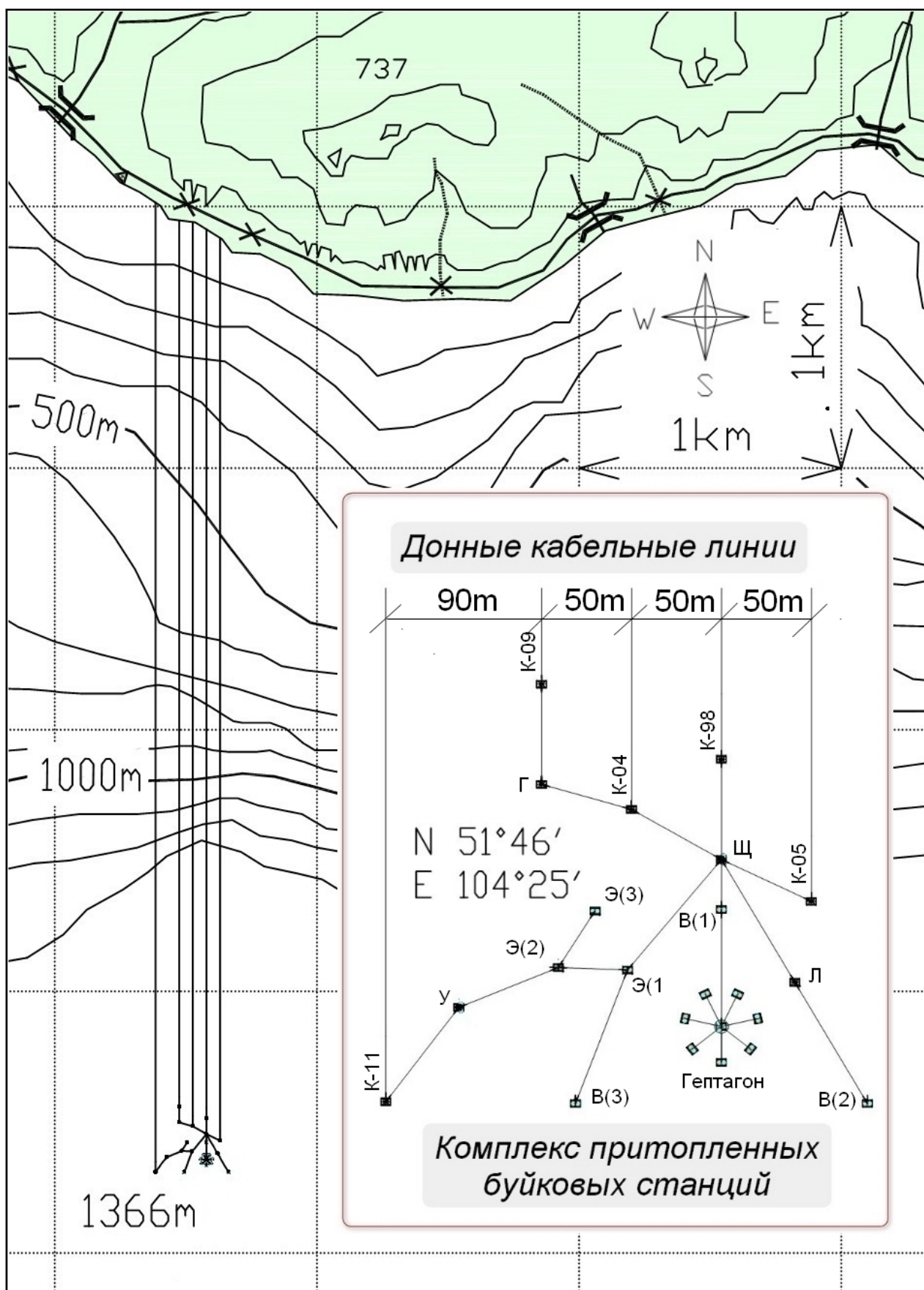


Рисунок 4.5. Карта-схема комплекса буйковых станций (БС) и донных кабельных линий (КЛД) НТ-200+ по состоянию на лето 2012г.

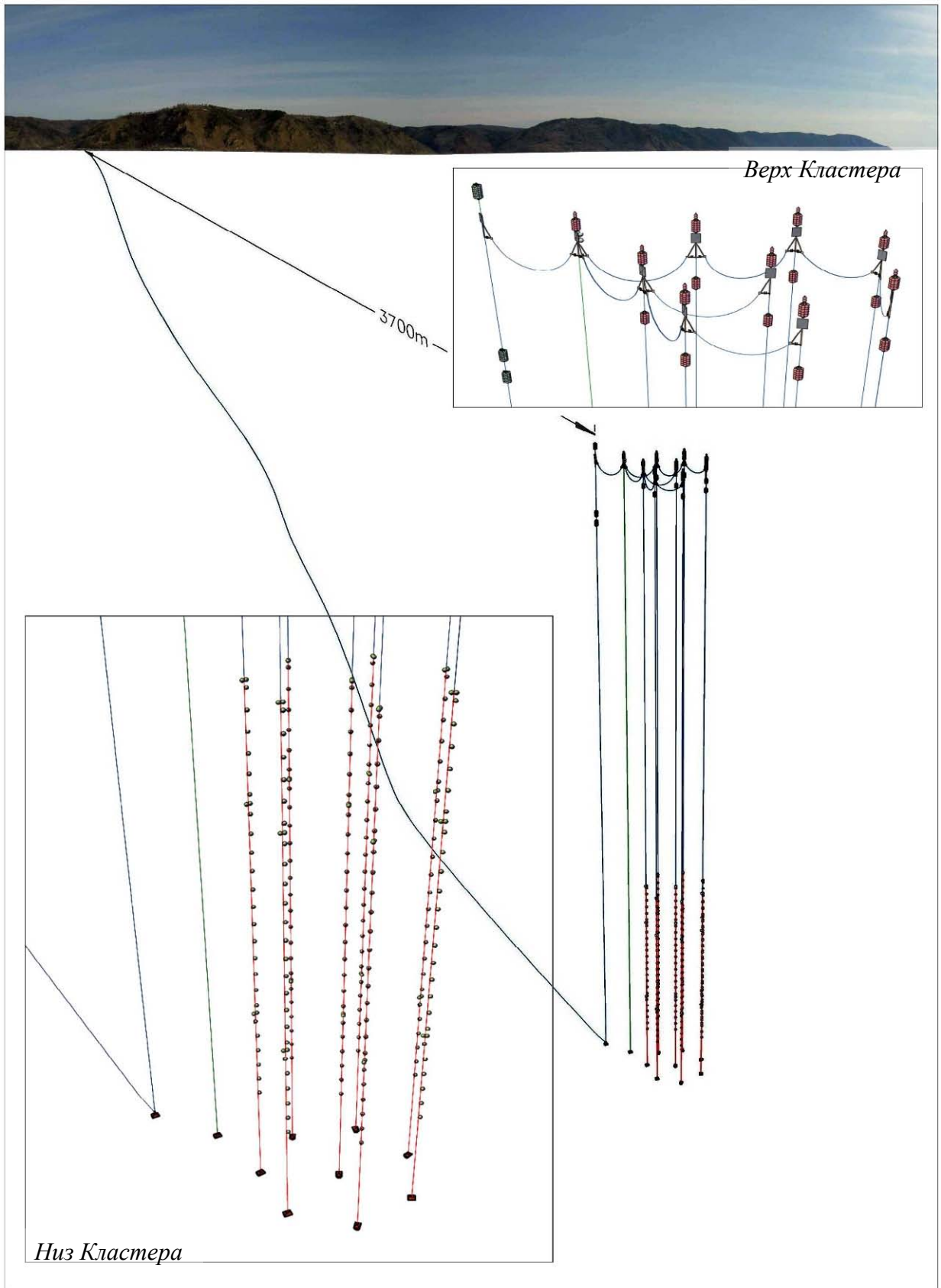


Рисунок 4.6. Общий вид кластера.

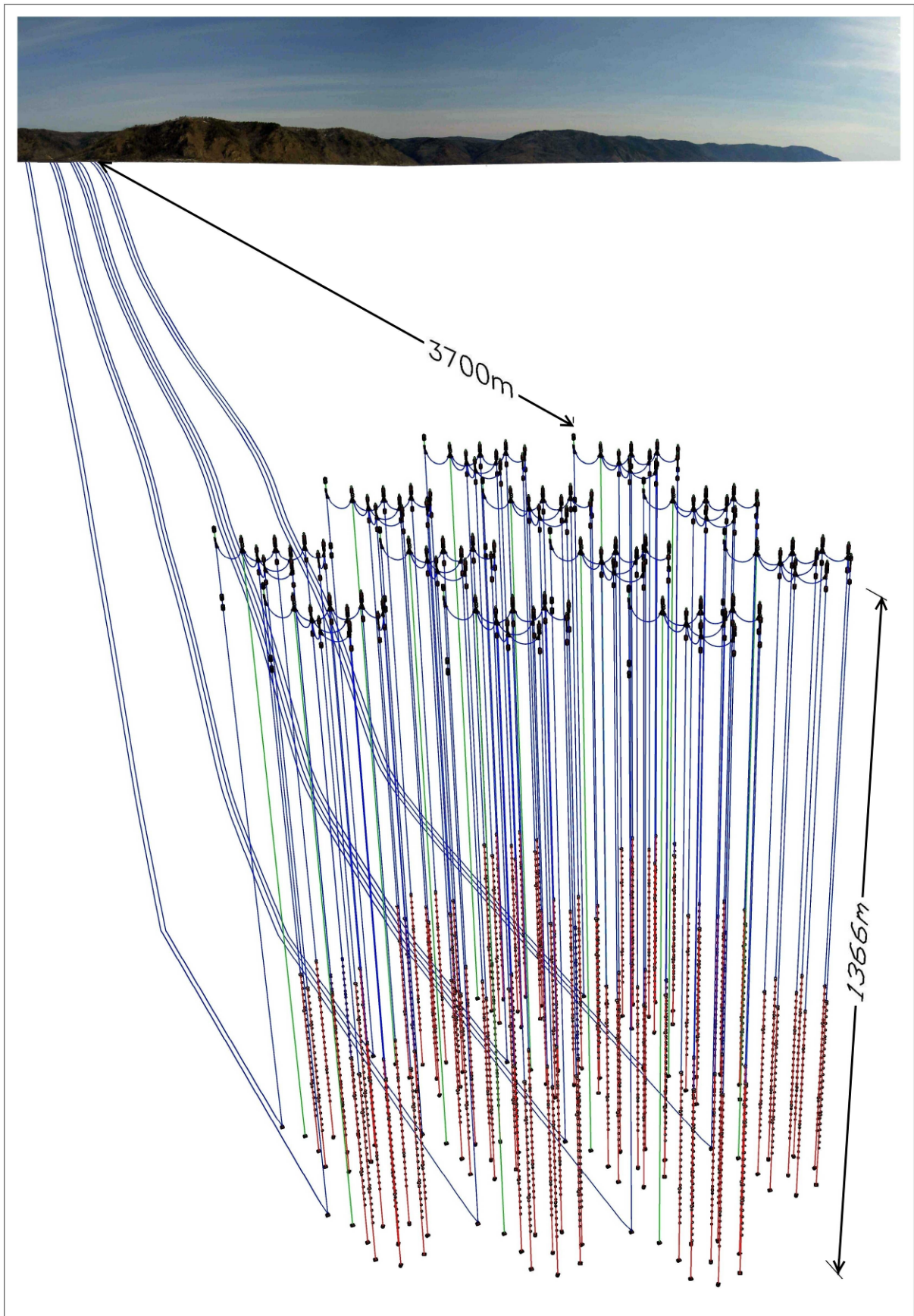


Рисунок 4.7. Общий вид комплекса буйковых станций (БС) и донных кабельных линий (КЛД) НТ-1000 - Вариант 1: «12*8*24 (300-60-15)»

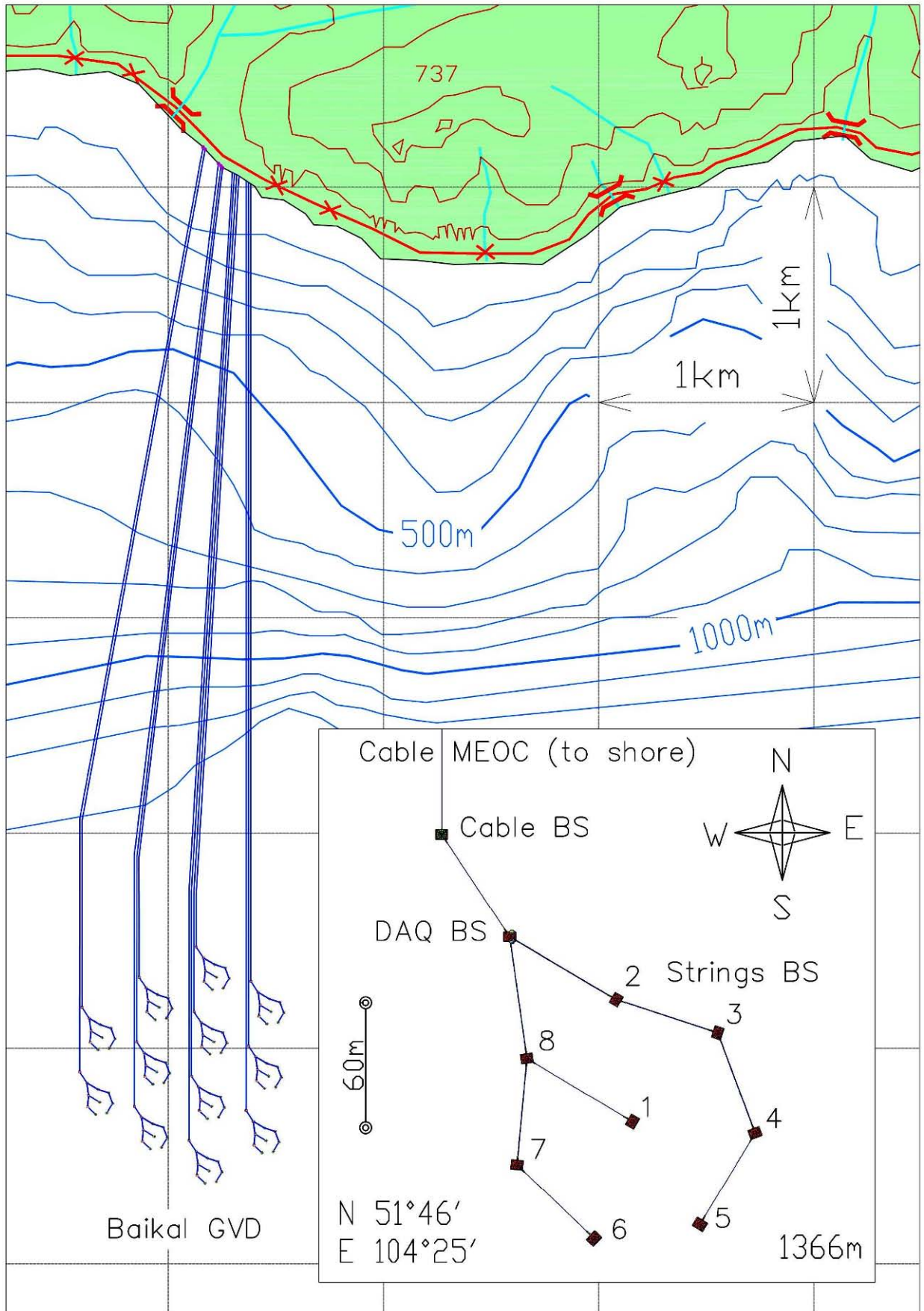


Рисунок 4.8. Карта-схема комплекса буйковых станций (БС) и донных кабельных линий (КЛД) НТ-1000 - Вариант 1: «12*8*24 (300-60-15)»

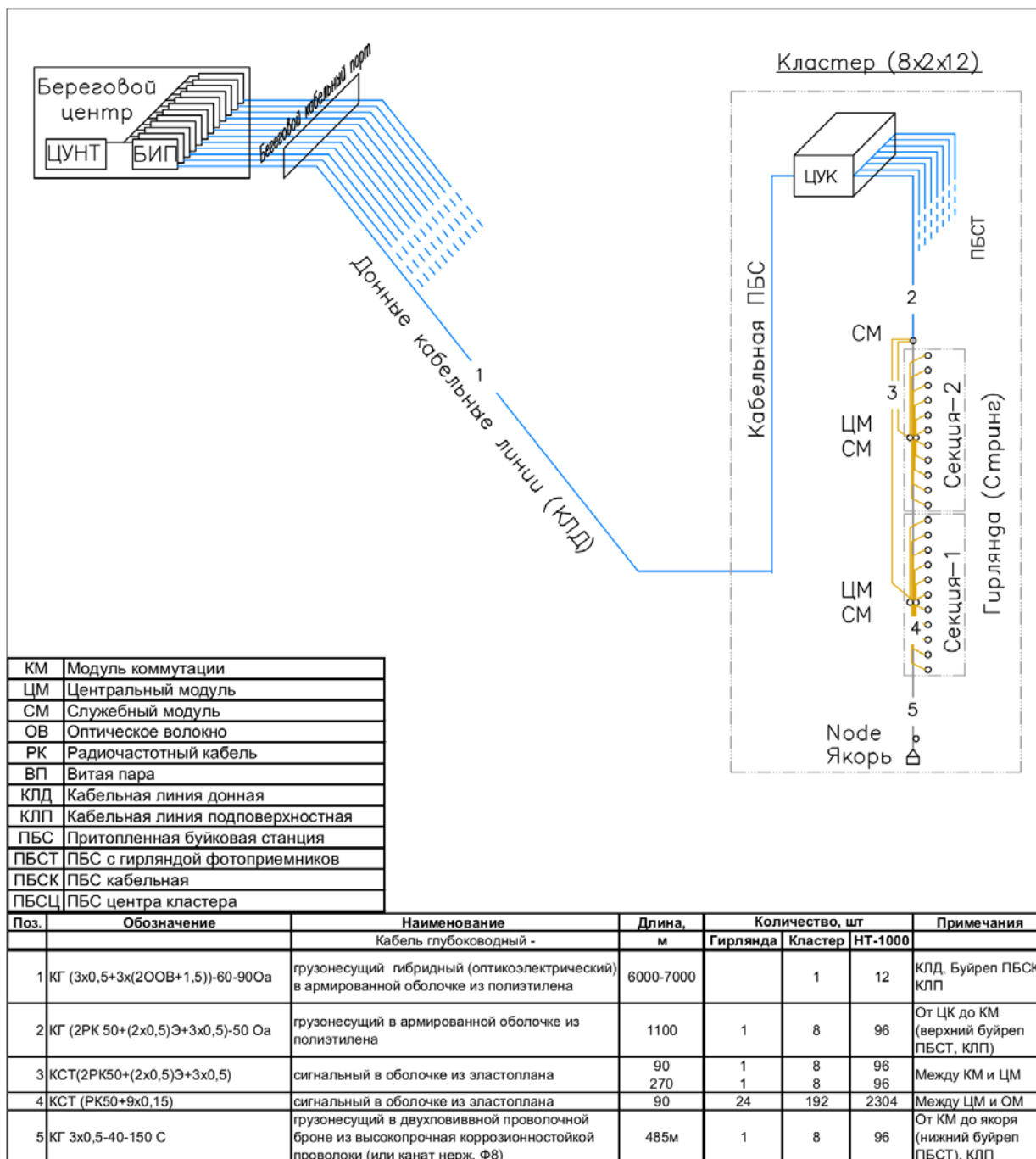


Рисунок 4.9. Схема кабельных линий комплекса буйковых станций (БС) и донных кабельных линий (КЛД) НТ-1000 - Вариант 1: «12*8*24 (300-60-15)»

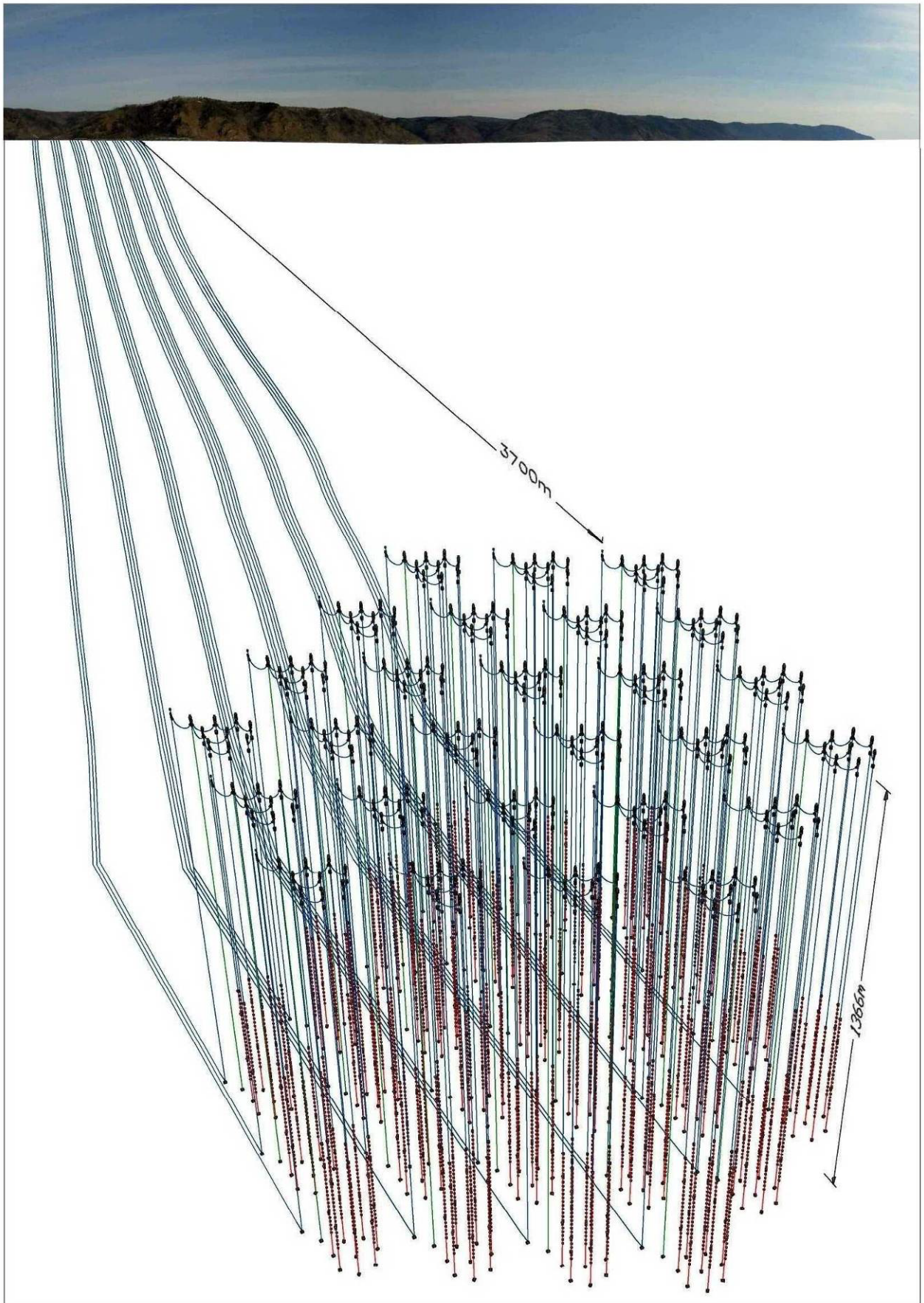


Рисунок 4.10. Общий вид комплекса буйковых станций (БС) и донных кабельных линий (КЛД) НТ-1000 - Вариант 2: «27*8*48 (300-60-15)».

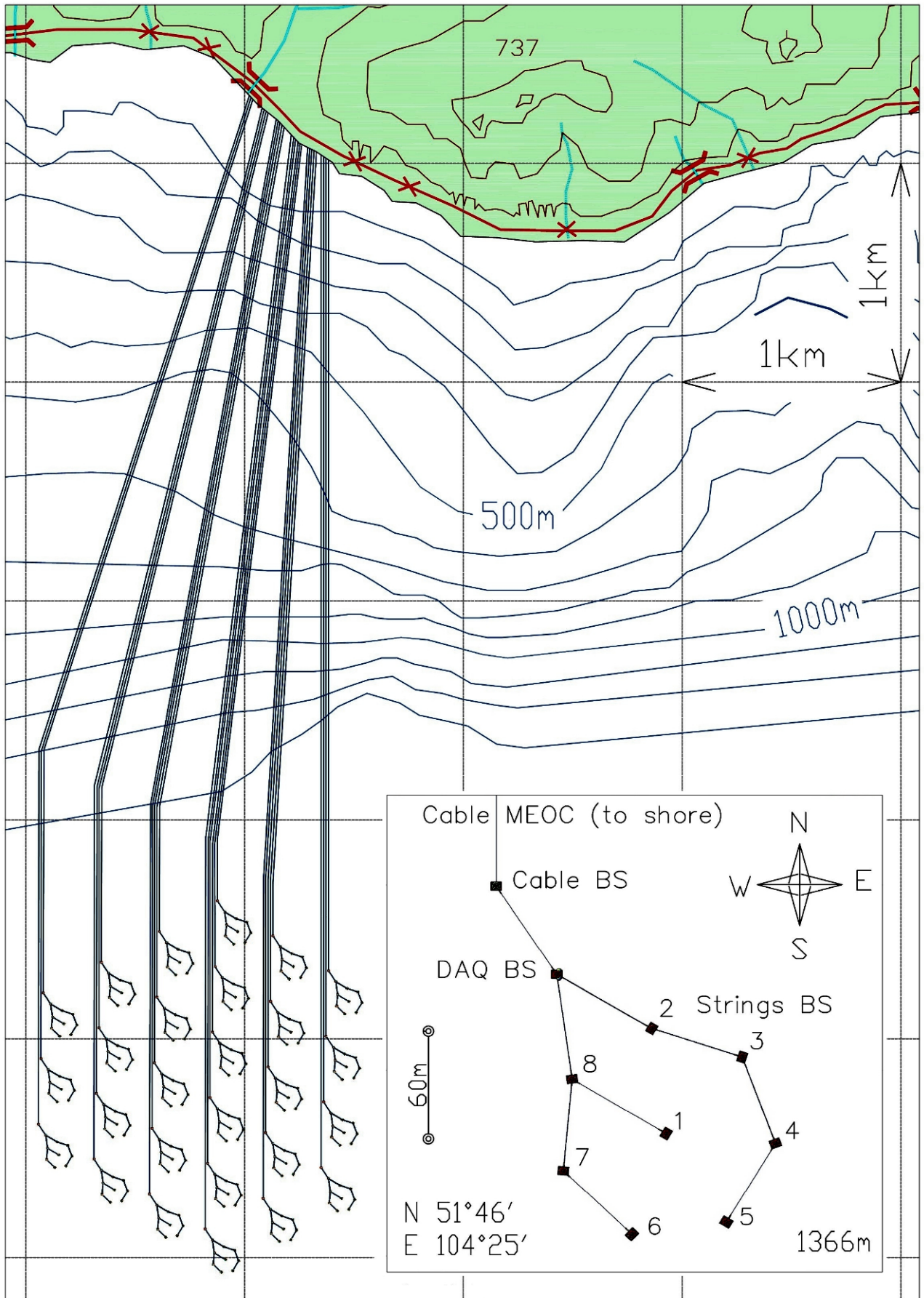


Рисунок 4.11. Карта-схема комплекса буйковых станций (БС) и донных кабельных линий (КЛД) НТ-1000 - Вариант 2: «27*8*48 (300-60-15)».

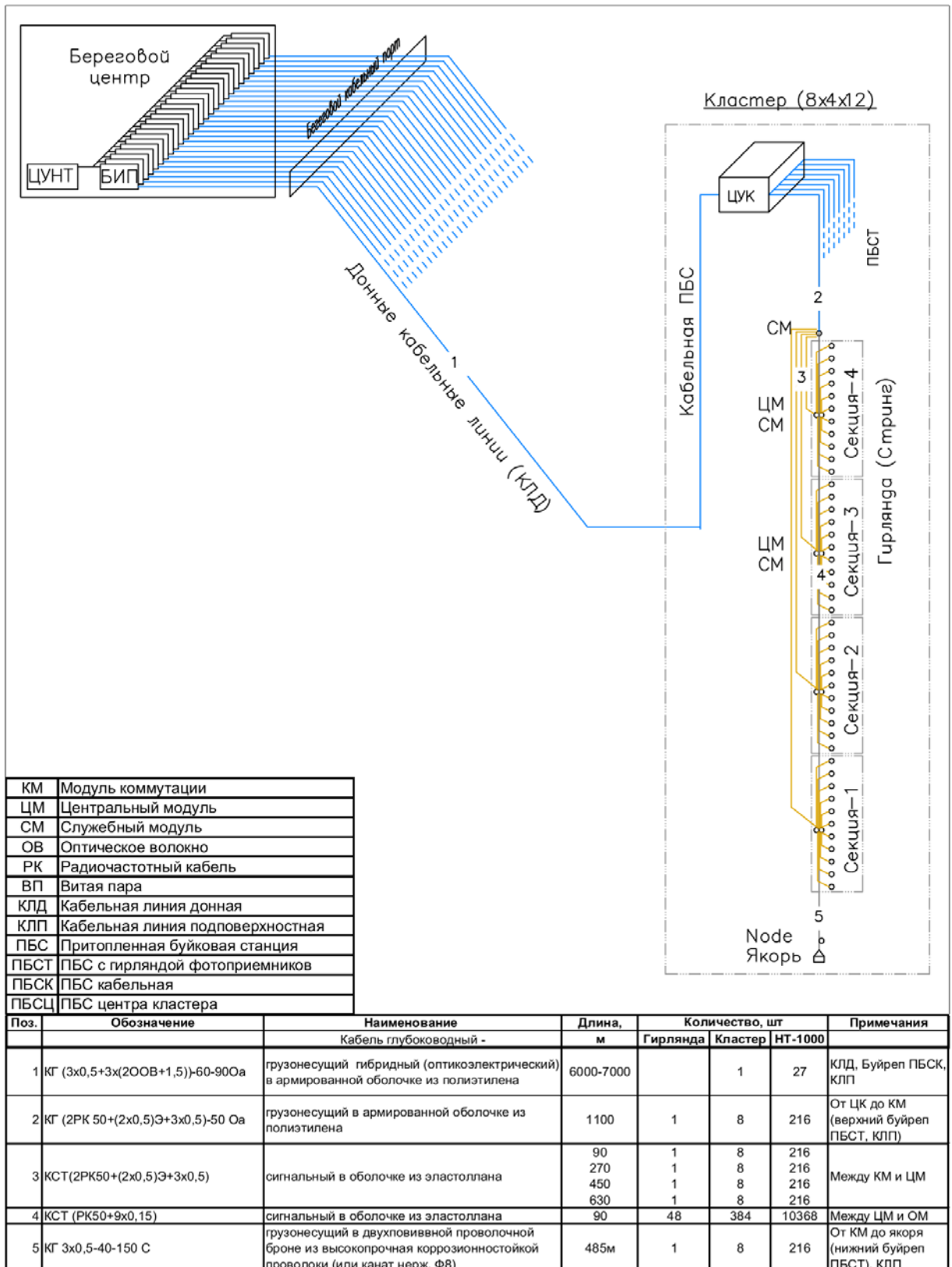


Рисунок 4.12. Схема кабельных линий комплекса буйковых станций (БС) и донных кабельных линий (КЛД) НТ-1000 - Вариант 2: «27*8*48 (300-60-15)».

Следует особо отметить возможность изменять геометрию кластера, переставляя ПБСТ без их демонтажа на значительные расстояния - это одно из уникальных преимуществ Байкальского проекта. Изменения места расположения станций могут быть вызваны как технологическими причинами, так и потребностью оптимизация геометрии телескопа под наиболее актуальные задачи. Необходимо учитывать, что перемещение кабельной станции (ПБСК) не рекомендуется из-за присоединенной к якорю донной кабельной линии, хотя корректировать положение якоря допустимо и для нее. К настоящему времени освоены 3 метода перемещения ПБС.

Метод «перестановки» применяется для перемещения укомплектованной и стоящей на грунте ПБС на расстояние до 20 м. В исходном месте «А» станция приподнимается подъемным канатом с помощью СПУ-А до появления на поверхности воды верха концевого буя. В точке «Б», куда надо переместить станцию, в ледовом покрове разрабатывается майна, из которой в исходную майну подо льдом протягивается подъемный канат, коренной конец которого заведен на СПУ-Б, а ходовой крепится за грузовой рым концевого буя в майне «А». СПУ-А опускает станцию на грунт (верх концевого буя опускается на глубину около 25 м), после чего СПУ-Б поднимает ПБС в майну «Б». Необходимо следить за подъемными канатами, выбирая излишнюю слабину. Желательно выбирать канаты из плавучих материалов - полипропилен, полистил). Операцию «перестановки» удобно производить при демонтаже станции, когда подъемная (водолазная) майна вырезается сразу в целевой точке «Б» ледового покрова, но не далее 20 метров от проекции якоря станции на поверхность водоема.

Метод «перевешивания». Станция в исходном месте «А» с помощью СПУ-А приподнимается к поверхности воды (возможен частичный демонтаж ее элементов); на нужном горизонте станции на буйреп через зажим устанавливается треугольная монтажная рама (при необходимости под этой рамой крепится дополнительный буй) и станция перехватывается за верхний

угол рамы. В точке «Б» в ледовом покрове разрабатывается майна и устанавливается на ней СПУ-Б, из целевой майны в исходную подо льдом протягивается подъемный канат, коренной конец которого заведен на СПУ-Б, а ходовой крепится за второй верхний угол монтажной рамы. Поочередно с шагом 10-20 метров СПУ-А стравливает, а СПУ-Б выбирает подъемные канаты, пока перевешиваемая станция не повиснет полностью на СПУ-Б, после чего буйреп заводится на СПУ-Б, а рама с подъемными канатами снимается. Длины КЛП приводятся в соответствие с новой геометрией.

Метод «перетаскивания» - на перемещаемой станции отсоединяются КЛП и затем на буйреп навешиваются 2 системы плавучестей: буй и плавучий гайдроп. Размер буя рассчитывается так, чтобы вес станции в воде был равен около 50 кГ. Гайдроп представляет собой линейную плотную вязку 40 алюминиевых кухтылей (плавучесть гайдропа 100кГ, его длина около 5 м); между буюм и гайдропом крепятся ходовые концы подъемных канатов, заведенных из исходной майны А и из целевой майны Б; далее СПУ-А травит, а СПУ-Б выбирает слабины подъемных канатов, в результате чего станция перемещается из А в Б, скользя гайдропом по нижней стороне ледового покрова озера. Прилагаемые СПУ усилия при перемещении станции не должны превышать 100 кГ, расстояния перемещения могут составлять несколько сотен метров (помехой могут быть только ледяные торосы и, отчасти, «водолазные пузыри»).

Вариант перемещения выбирается в зависимости от состояния ледового покрова, расстояния перемещения и траектории (возможны промежуточные майны). Самым значительным эпизодом использования этих технологий было «перевешивание» в 2004г. станции НТ-200 «Гептагон» на 100 метров. В 2014 году планируется «перетаскивать» развернутые станции экспериментального кластера на штатные места их установки в системе телескопа НТ1000.

4.3. Совместное рассмотрение данных, полученных на разных установках

В свете текущих тенденций создания нескольких нейтринных телескопов в удаленных географических точках (Средиземное море, Байкал, Антарктида) рассматривается вопрос объединения телескопов, находящихся в разных частях земного шара в единую сеть. Следует отдельно остановиться на процедурах объединения экспериментальных данных, получаемых на таких установках. Это особенно актуально для европейского проекта KM3Net, который проектируется как два нейтринных телескопа разной конструкции в двух несвязанных между собой местах Средиземного моря, обладающих разными гидрологическими условиями, характеристиками свойств воды и уровнями естественного фона. А при условии создания Глобальной нейтринной обсерватории - сети, включающей действующий телескоп IceCube, KM3Net и Байкальский телескоп НТ1000, методически важно отработать оффлайновую совместную обработку экспериментальных данных с целью повысить статистическую обеспеченность итоговых результатов.

Вообще говоря, данные с разных (даже если и однотипных) установок трудны для объединения, так как получаются при различных уровнях внешнего фона, разных уровнях собственных шумов установки, в различных конфигурациях настройки оборудования и разных уровнях детектируемого сигнала просто вследствие отличий в относительном положении детектора и источника этого сигнала. Тем не менее, для ряда задач такое объединение является вполне естественным.

Например, в задаче поиска локальных источников нейтрино. Основной физический результат в данной задаче представляет собой набор восстановленных энергий и координат точек источников событий на небесной сфере. При этом процедура реконструкции событий методом наименьших квадратов подразумевает нахождение невязки для каждого события индивидуально. И поскольку именно величина невязки является

мерой достоверности восстановления этого события, то можно полагать несущественным, а точнее, уже учтённым в этом параметре все остальные различия в уровне шумов и местоположении установок. Тем более что все эти параметры могут сильно отличаться и в разных частях одной установки. Пополнение банка нейтринных событий является, безусловно, важным.

Также разумно использовать оффлайновую совместную обработку экспериментальных данных в задаче построения ограничений на поток при отсутствии наблюдаемых событий, например, при поиске магнитных монополей. Очевидно, что при некотором условно принятом потоке вероятность «не наблюдения» событий на всех телескопах равна перемножению вероятностей «не наблюдения» на каждом в отдельности, и увеличение количества при объединении данных различных телескопов можно рассматривать как увеличение экспозиции. Исходя из принятого уровня достоверности (три сигмы, шесть сигм, и т.д.), подбор потока с условием «не наблюдения» событий во всех детекторах в совокупности является хотя и более сложной задачей, чем для одного детектора в отдельности, но вполне осуществимой.

Следующее, о чём стоит упомянуть, - принципиальная возможность определения спектров и измерения уровней фона в разных установках в рамках единых алгоритмов с помощью численного моделирования, как прямой задачи (моделирования отклика детектора на известный поток излучения), так и обратной (восстановление исходного спектра по известному отклику детектора), несмотря на значительные различия в оптических свойствах, уровнях шумов и прочих параметров сред, в которых расположены эти детекторы, свойств фотоумножителей и первичных критериев отбора событий. На практике, конечно, такие алгоритмы требовали бы чрезмерных вычислений, а потому для каждой установки используются свои методы, оптимизированные под её конкретные особенности. Тем не менее, корректные расчеты позволяют использовать полученные таким способом значения эффективных площадей каждой

установки для объединения их данных. В какой-то мере, можно считать, что данное утверждение подтверждается и практическими результатами. Почти в каждом нейтринном телескопе оптические параметры среды меняются во времени и в объёме, конфигурация установки меняется от одного сеанса набора данных к другому, что требует применения тех же самых методик для получения обобщённых данных за период работы.

5. Оценка и обобщение результатов НИР

В результате выполнения НИР практически закончена разработка и испытания всех блоков и узлов телескопа с использованием самых современных достижений в электронике и информатике, предназначенных для развития материально-технической базы и создания на базе Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ200+ телескопа НТ1000 с объемом наблюдаемой водной среды 1,5 -2 км³.

Установленный в 2012 г. на долговременные испытания в озере Байкал экспериментальный образец кластера из 3 гирлянд содержит все основные блоки создаваемого телескопа НТ1000. Полученные к настоящему моменту данные о состоянии его систем показывают полное соответствие всем требованиям Технического задания на НИР.

Одновременно рядом организаций и научных коллабораций европейских стран (ANTARES, NESTOR, NEMO) проводятся исследования с целью создания собственного кубокилометрового глубоководного нейтринного телескопа в Северном полушарии, а именно, в Средиземном море - проект Km³Net. К данному моменту еще не выбрано место установки телескопа и научно-технические решения по конструкции и устройству регистрирующей аппаратуры – оптических модулей.

В Байкальском проекте все эти вопросы уже решены и остается только закупка комплектующих, расширение производственной и испытательной базы, изготовление специализированных блоков, модернизация берегового центра, сборка и установка в Байкал элементов телескопа, расширение возможностей сбора, хранения и обработки экспериментальных данных.

Но, несмотря на опережение европейских конкурентов, для сохранения приоритета российской науки в данной области необходимо срочно решить вопросы специального, целевого финансирования запланированных работ. Стоимость всего комплекса работ по модернизации

Байкальского глубоководного нейтринного телескопа и доведения его объема до 2 км^3 оценивается в 3 миллиарда рублей в ценах 2011 года. При этом в 2014 году планируется установить и поставить в режим набора данных кластер из 8 гирлянд по 24 (либо 48) оптических модулей (ОМ) в каждой (всего 192 ОМ) и в последующие 5-6 лет установить еще 23 таких же кластера.

Каждый из кластеров – это самостоятельная исследовательская установка, эффективность которой будет соизмерима с действующим с 2008 года в Средиземном море вблизи Тулона нейтринным телескопом ANTARES. Т.е. исследователи и пользователи с 2014 года получают возможность проводить исследования на самой современной в Европе экспериментальной базе.

Последовательное наращивание количества устанавливаемых кластеров и наблюдаемого объема водной среды, учитывая имеющееся отставание европейского проекта на несколько лет, обеспечат не менее чем десятилетнее сохранение уникальности Байкальского проекта по сравнению с европейским аналогом – единственным проектом в мире, который может быть реализован в текущем десятилетии. При этом стоимость Байкальского нейтринного проекта будет в несколько раз меньше европейского, благодаря уникальности возможностей, предоставляемых местом установки телескопа на озере Байкал. Прежде всего, уникальным свойствам воды, наличию относительно ровной площадки на глубине 1300 м в 4 км от берега, отсутствию сильных течений, возможности установки глубоководного оборудования с поверхности льда, транспортной доступности, наличию линии электроснабжения.

Нейтринные телескопы при достижении необходимых объемов могут использоваться для решения широкого круга научных задач астрофизики элементарных частиц:

а) исследование космоса с использованием нейтрино высоких энергий:

i) поиск астрофизических источников нейтрино высоких энергий таких, как всплески сверхновых, микроквазары, пульсары, активные ядра галактик (AGN), всплески гамма-излучений (GRB) и, возможно, неизвестных явлений;

ii) поиск нейтрино, образующихся в результате взаимодействия космических лучей с межгалактической материей и полями, что относится к области космологии.

b) исследования фундаментальных физических проблем:

i) поиск нейтрино, образующихся в результате аннигиляции или распада частиц темной материи;

ii) поиск эффектов квантовой гравитации как следствия возможного нарушения Лоренцевской инвариантности (VLI) или эффекта некогерентности с помощью анализа атмосферных нейтрино либо нейтрино от удаленных источников;

iii) поиск экзотических частиц таких, как магнитные монополи, суперсимметричные Q-balls или nuclearites;

iv) измерение поперечного сечения нейтрино ультравысоких энергий, что могло бы быть проверкой эффектов непротурбативной квантовой хромодинамики (QCD) как проявлений новой физики вне рамок Стандартной модели.

c) Изучение космических лучей с помощью приходящих снизу мюонов или измерением спектра и химического состава.

d) Мониторинг Галактики для регистрации нейтрино от всплесков сверхновых.

Наряду с проблемами астрофизики, нейтринные телескопы и их инфраструктура используется во многих других областях науки и техники, таких как гидроакустика, гидробиология, гидрология, океанография, геология, геофизика, гляциология, экология, охрана окружающей среды.

6. Закупка оборудования

Закупленное в рамках контракта оборудование предназначалось и было использовано в качестве комплектующих для создания системы сбора информации и оптических модулей экспериментального кластера NT1000 в соответствии с пп. Технического задания

	Наименование	Дата	Кол-во	Стоимость (руб.)	Назначение
1	Комплект устройств EDS-205A-T и NPort 5150A-T (Тайвань)	Июнь 2011	6	38352,5	Система сбора данных экспериментального кластера NT1000
2	Преобразователи напряжения SHV, TCL, TEN, Япония	Июнь 2011	26	78408	Оптические модули экспериментального кластера NT1000
3	Модули Ethernet, (Тайвань)	Июнь 2011	6	29320	Система сбора данных экспериментального кластера NT1000
4	Электронные узлы центрального модуля гирлянды. (НИИЯФ МГУ)	Ноябрь 2011	25	495000	Система сбора данных центрального модуля гирлянд
5	Интегрированные узлы электроники оптической системы (НИИЯФ МГУ)	Июнь 2012	25	460524	Оптические модули экспериментального кластера NT1000
6	Элементы комбинированной системы сбора данных (НИИЯФ МГУ)	Июнь 2012	54	425000	Система сбора данных экспериментального кластера гирлянд
7	Интегрированные узлы электроники оптической системы (НИИЯФ МГУ)	Окт. 2012	5	99946	Оптические модули экспериментального кластера NT1000
8	Коммутатор запроса (НИИЯФ МГУ)	Июнь 2012	1	65000	Система сбора данных экспериментального кластера гирлянд
Всего				1691550,5	

7. Составление заключительного отчета

Заключительный отчет составлен в соответствии с п. 4.1 Технического задания на НИР.

а) Выполнен обзор и анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках НИР – Отчет по 1 этапу НИР.

б) Обоснован выбор развиваемого направления исследований – Отчет по 1 этапу НИР.

в) Обоснована необходимость использования УСУ для достижения целей работы – Отчет по 1 этапу НИР.

г) Изложены методики проведения исследований и обосновано их использование – Отчет по 1 этапу НИР.

д) Получены новые результаты на каждом из этапов НИР, которые подробно описаны в отчетах по каждому из этапов НИР и кратко сформулированы в выводах к разделам отчетов по этапам и в заключениях к каждому из промежуточных и заключительному отчету и Резюме.

е) Дана оценка результатов НИР в заключениях и резюме к каждому из промежуточных и заключительному отчету.

ж) Обобщение и выводы по результатам НИР приведены в отчете по 4 этапу (заключительном).

з) Рекомендации и предложения по использованию результатов НИР приведены в отчете по 4 этапу (заключительном).

и) Результаты работ, выполненных для сторонних организаций, в рамках ЦКП приведены в отчетах по 1,2 и 3 этапам.

В соответствии с п. 5.2 «Требования к разрабатываемой документации» были разработаны, согласованы и утверждены установленным порядком следующие документы:

- промежуточные и заключительный отчеты о НИР с приложениями, оформленные в соответствии с ГОСТ 7.32-2001;

- отчет о патентных исследованиях, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96 –оформлен и включен в качестве приложения к отчету по 1 этапу НИР.

Отчетная документация была представлена Заказчику на бумажном носителе и в электронном виде на оптическом носителе в одном экземпляре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На 4 этапе НИР были получены следующие результаты:

- a создан комплекс программ (BARS) на основе фреймворка ROOT и пакета библиотек MARS, содержащий набор инструментов для анализа и отображения экспериментальной информации,
- b Введена в эксплуатацию система мониторинга электропитания гирлянд НТ1000 и температурного режима в оптических модулях,
- c Определены фоновые условия для регистрации космических частиц модернизированными оптическими модулями. Определен уровень шумов в 20-40 кГц и установлено, что основной вклад дает естественное свечение байкальской воды,
- d разработан 12 канальный коммутатор электропитания гирлянд, позволяющий повысить уровень защиты гирлянд и управления телескопом, позволяя подключать и отключать питание гирлянд,
- e разработан стенд для моделирования системы сбора данных, который позволяет имитировать канал связи между центральным модулем секции и центром кластера и испытывать вновь подключаемую аппаратуру,
- f разработан стенд для исследования измерительных каналов, полностью имитирующий измерительные каналы создаваемого телескопа НТ1000,
- g отработана технология сборки модернизированных оптических модулей для телескопа НТ1000, обеспечивающая сохранение характеристик при долговременной эксплуатации,
- h получены новые данные влияния течений в озере Байкал на поведение гирлянд экспериментального образца кластера НТ1000 с помощью гидроакустической системы позиционирования. Разработаны программные алгоритмы и протокол обмена данными D-MAC. С помощью инклинометра, рассчитаны углы наклона гирлянд в задаче позиционирования,

i в результате долговременного мониторинга зафиксированы процессы формирования и эволюции крупномасштабных температурных неоднородностей в глубинной зоне в разные периоды года, интрузия холодных вод в придонную зону после весенней гомотермии. Рассмотрены механизмы, способные объяснить данные явления,

j доработана основная программа управления нейтринным телескопом и комплексом измерительного глубоководного оборудования, расширяющая возможности проведения экспериментов пользователям из удаленных исследовательских центров,

k разработаны рекомендации по структуре создаваемого нейтринного телескопа НТ1000 и совместного рассмотрения экспериментальных данных в рамках создаваемой Глобальной нейтринной обсерватории,

l проведен анализ и обобщение результатов НИР. Достигнуты все индикаторы и показатели в соответствии с техническим заданием.

Результаты по НИР в целом:

a в результате лабораторных исследований и двух экспедиций на озеро Байкал установлен на долговременные испытания в режиме набора данных экспериментальный образец кластера из трех гирлянд с модернизированными оптическими модулями и электронными блоками сбора и передачи данных, с модернизированными системами акустического позиционирования и калибровки оптических модулей. Кластер содержит экспериментальные образцы всех блоков, которые будут использованы в развертывании кубокилометрового нейтринного телескопа НТ1000,

b разработана и установлена система измерения и испытаний всех основных блоков создаваемого телескопа НТ1000,

c разработан научно-технический проект телескопа НТ1000 и рекомендации по его основным характеристикам

d достигнуты все индикаторы и показатели в соответствии с техническим заданием на НИР.

Литература

1. Spiering C. High energy neutrino astronomy: status and perspectives // AIP Conf. Proc. Vol. 1085/ 2009/ Pp 18-2
2. P. Bagley et al., KM3NeT Technical Design Report ISBN 978-90-6488-033-9, <http://www.km3net.org/TDR/TDRKM3NeT.pdf>
3. C.M. Alexander, et al., DUMAND-2-93 (DUMAND Collaboration)
4. А.О.Дейнеко и др. Глубоководный зонд-фотометр для измерений сверхслабых световых потоков. ПТЭ. 1990. №5. 2с.
5. И.Ф. Баринов и др. Калибровка детектирующего модуля глубоководного нейтринного телескопа из десяти фотодетекторов. (Средиземное море). Препринт ИЯИ РАН П-0796. - М.,1993.12 с.
6. Безруков Л.Б., Борисовец Б.А., Глуховской Б.М., Б. К. Лубсандоржиев и др. Фотоэлектронный умножитель для глубоководного нейтринного телескопа НТ-200 // ПТЭ. 2000. N.1. С.104.
7. [http://www.nautilus-gmbh.de/files/vitrovex instrumentation housings.pdf](http://www.nautilus-gmbh.de/files/vitrovex_instrumentation_housings.pdf) 292
8. Photomultiplier tubes and assemblies for scintillation counting and high energy physics. <http://hamamatsu.com>
9. Wacker SilGel 612; <http://www.wacker.com>
10. Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Balkanov V.A. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2009. V. 602. P. 227.
11. Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Belolaptikov I.A. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2011. V. 626-627. P. 13.
12. Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Belolaptikov I.A. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2011. V. 639. P. 30.
13. Айнутдинов В.М, Балканов В.А., Белолоптиков И.А. и др. //Акустический журнал. 2005. Т. 51. № 6. С. 721.
14. Kebkal O. (2011). // “Instant Messaging for Underwater Acoustic Communication”. UAM. 2011.

15. Kebkal O., Komar M., Kebkal K. et al. // "D-MAC: Media access control architecture for underwater acoustic sensor networks". OCEANS, 2011. IEEE - Spain, P. 1.
16. Kinsey J.C., Eustice R.M., Whitcomb L.L. // IFAC Conference of Manoeuvring and Control of Marine Craft. Lisbon. Portugal. 2006.
17. Tan Hwee-Pink, Diamant R., Winston K.G.S. et al. (Oct. 2011). // Ocean Engineering. 2011. V. 38, № 14-15, P. 1663.
18. Chitre M., Shahabudeen S., and Stojanovic M. // Marine Technology Society Journal. 2011. V. 42. P. 103.
19. Chen C.-T. // Ph.D.thesis. Univ.Miami. 1977. P. 159.
20. Колотило Л.Г., Шерстянкин П.П. // Б.М.П. 1986. зарегистрировано в ЦВМБ. Д221/К614-Т.
21. Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Balkanov V.A. et al // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2009. V. 598. P. 282.
22. Porter M.B., Bucker H.P. // Acoustical Society of America Journal. 1987. V. 82, P. 1349.
23. Ameer P.M., Jacob L. // "Localization Using Ray Tracing for Underwater Acoustic Sensor Networks". Communications Letters. 2010. IEEE 14.10, P. 930.
24. Thomas H.G. // Proceedings of Autonomous Underwater Vehicles AUV'98, 1998. P. 181.
25. Othman A.K. // Proc. of 5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, 2008. WOCN '08. P. 1.
26. Isik M.T., Akan O.B. // Wireless Communications. 2009. V. 8. № 9. P. 4457.
27. Kebkal A.Г. // OCEANS. – EUROPE. 2009. P. 1.
28. Kebkal K.G., Bannasch R. // The Journal of the Acoustical Society of America. 2002. V. 112. № 5, P. 2043.

29. Sklar B. // Digital communications: fundamentals and applications. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series. Prentice-Hall PTR. 2001.
30. Kebkal, O.G., Kebkal K.G. and Bannasch R. // OCEANS 2012 MTS/IEEE Yeosu. 2012.
31. Ramezani H. and Geert L. (2012). // Sensors. 2012. V. 12. № 3, P. 2996
32. Верещагин Г.Ю. Некоторые данные о режиме глубинных вод Байкала в районе Маритуя// Труды комиссии по изучению Байкала. 1927. Т.2. С.77-136.
33. Россолимо Р.Р. Температурный режим озера Байкал// Труды Байкальской лимнологической станции АН СССР. 1957. Москва. Т.16. 552 с.
34. Weiss, R. F. Deep-water renewal and biological production in Lake Baikal. /Weiss, R. F., E. C. Carmack, and V. M. Koropalov // Nature 1991. -V.349. P.665-669.
35. Гранин Н.Г. Устойчивость стратификации и некоторые механизмы генерации конвекции в Байкале. Дисс. канд. геогр наук. Иркутск 1999. с.102.
36. Шимараев М.Н., Гранин Н.Г. К вопросу о стратификации и механизме конвекции в Байкале // ДАН СССР. 1991. Т.321. С.81-385.
37. Shimaraev .M.N., Verbolov V.I., Granin N.G., Sherstyankin P.P.// Physical limnology of Lake Baikal:a rewiew//Baikal Internacional Center for Ecological Research. Print.N.2. Irkutsk-Okayama. 1994. p.81.
38. Shimaraev .M.N., Granin N.G., Zhdanov A.A. Deep ventilation of Lake Baikal due to spring thermal bars// Limnol. Oceanogr. 8(5). 1993. p. 1068-1072.
39. Belolaptikov I.A. et al, The Baikal underwater neutrino telescope: Design, performance, and first results// Astroparticle Physics. 1997.V.7. P.263-282.

40. C.T. Chen, F.J. Millero. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range. *Limnol. Oceanogr.* **31**(3), 1986. p 657-682
41. Безруков Л.Б., Буднев Н.М., Гальперин М.Д. и др. Измерение показателя поглощения в водной среде оз. Байкал// *Океанология* 1990. Т.30. Вып.6. С.1022-1026.
42. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов// Л. Гидрометеиздат. 1983. 296 с.
43. L.G.Redecopp On the theory of solitary Rossby waves. *J. Fluid Mech.* Vol 82 1977. pp. 725-745.
44. Chr. Garrett Space-Time Scales of Internal Waves: A Progress Report. *J. Geophys. Research.* Vol.80 No.3 pp.291-297.
45. Шерстянкин П.П. Фронтотенез на Байкале по материалам гидрооптических наблюдений// *Докл. РАН.* Т.326. N.2. С.66-370
46. Шерстянкин П.П., Куимова Л.Н. Об уплотнении при смешении вод в пресных водоемах.// *Докл. РАН.* 1992 Т.25. N.5. С.1087-1090.
47. Афанасьев А.Н., Верболов В.И. Течения в Байкале// Новосибирск. Наука. Сибирское отд. 1977. 160 с.
48. Martin Schmid Lake Baikal deepwater renewal mystery solved /Martin Schmid, Nikolay M. Budnev, Nick G. Granin, Michael Sturm, Michael Schurter, and Alfred Wuest // *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 2008. V. 35, L09605, doi:10.1029/2008GL033223.
49. Ловцов С.В., Парфенов Ю.В., Растегин А.Э., Рубцов В.Ю., Ченский А.Г. Крупномасштабные возмущения и внутренние волны в озере Байкал // “Астрофизика и физика микромира”, Материалы Байкальской школы по фундаментальной физике, Иркутск, 11-17 октября 1998г. – Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 1998, с. 279-285.
50. D.M. Farmer Observation of Long Nonlinear Internal Waves in a Lake. *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 8 pp.63-73.

- 51.V. Aynutdinov Baikal neutrino telescope - an underwater laboratory for astroparticle physics and environmental studies /V. Aynutdinov, V. Balkanov, I. Belolaptikov et al.// Nucl.Instrum.Meth.A. 2008. doi:10.1016/j.nima.2008.08.124
- 52.Н.Н. КАЛИТКИН. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ. // М.Наука.1981
- 53.W. Press. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing / W.Press, S. Teukolsky, W. Vetterling, and B. Flannery // Cambridge Univ. Press, New York, 1997.- 2nd ed., 994 pp.
- 54.Physical limnology of Lake Baikal:a review / M.N. Shimaraev, V.I. Verbolov, N.G. Granin, et al. // Baikal Int. Center for Ecological Research. Print. N.2.Irkutsk-Okayama. 1994. 81 p.
- 55.F.Panagiotopoulos. (2005), Observed trends and teleconnections of the Siberian high: A recently declining center of action / Panagiotopoulos, F., M. Shahgedanova, A. Hannachi, and D. B. Stephenson // J. Clim., 2005, V. 18, pp. 1411 – 1422. doi:10.1175/JCLI3352.1.
- 56.Mackay, A. W. The paleoclimatology of Lake Baikal: A diatom synthesis and prospectus. // Earth Sci. Rev. 2007, V.82, pp. 181– 215.
- 57.Wuest, A., Cold intrusions in Lake Baikal—Direct observational evidence for deep water renewal / Wuest, A., T. M. Ravens, N. G. Granin, O. Kocsis, M. Schurter, and M. Sturm // Limnol. Oceanogr., 2005. - V. 50, pp. 184– 196.
- 58.Hohmann, R. Processes of deep water renewal in Lake Baikal / Hohmann, R., R. Kipfer, F. Peeters, G. Piepke, D. M. Imboden, and M. N. Shimaraev //Limnol. Oceanogr. 1997, - V. 42, pp. 841– 855.
- 59.Akimoto, K. Deep convection in a lake triggered by wind: Two-dimensional numerical experiments with a nonhydrostatic model / Akimoto, K., K. Tanaka, T. Awaji, and N. Imasato J. // Oceanogr., 1995 – V.51, pp. 171– 185.
- 60.Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 736 с.

61. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 224 с.
62. Н.М. Буднев, С.В. Ловцов, Ю.В. Парфенов, И.А. Портянская, А.Э. Растегин, В.Ю. Рубцов М.Н. Шимараев, Е.С. Троицкая М. Shturm, M. Shurter, A. Wuest. О случаях прибрежного апвеллинга в Южном Байкале по измерениям температуры на буйковых станциях в районе нейтринного телескопа // Избранные тексты докладов международной конференции «Потоки и структуры в жидкостях» (Санкт-Петербург, 2-5 июля, 2007). Изд-во ИПМ РАН, Москва, 2008
63. Шнеер В.С., Гайдаш С.П., Трофимов И.Л., Коротаев С.М., Кузнецова Т.В., Цирульник Л.Б., Панфилов А.И., Буднев Н.М., Миргазов Р.Р. Долговременные наблюдения вертикальной компоненты электрического поля в озере Байкал // Физика Земли. №4. С. 71-75. 2007.
64. Коротаев С.М., Гайдаш С.П., Шнеер В.С., Сердюк В.О., Буднев Н.М., Миргазов Р.Р., Бузин В.Б., Халезов А.А., Панфилов А.И. Межгодовая изменчивость вариаций вертикальной компоненты электрического поля в оз. Байкал // Физика Земли. 2011. №2. С. 74-80.
65. Коротаев С.М., Шнеер В.С., Гайдаш С.П., Буднев Н.М., Миргазов Р.Р., Халезов А.А., Панфилов А.И. Эффект и предвестники землетрясения 27.08.2008 в вертикальной компоненте электрического поля в озере Байкал // Доклады Академии наук. 2011б. Т. 438. № 5. С. 683-686.
66. Reiger E., Share G.H., Forrest D.G. A 154 day periodicity in the occurrence of hard flares // Nature. V. 312. P. 625-627. 1984.
67. Lean J.L., Brueckner G.E. Intermediate-term solar periodicities: 100-500 days // Astrophys. J., 1989, V.337, p.p. 568-578.
68. Kuznetsova T.V., Tsiurulnic L.V. Oscillations in the Sun-Earth system // Proc. the 4-th International Conference Problems of Geocosmos, Petersburg, 3-8 June/ Austrian Acad. of Sci., Vienna, Austria. 2002, p.p. 8-11.

69. Моргунов В.А. Пространственные неоднородности электрического поля атмосферы как фактор лито-ионосферных связей // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.:ОИФЗ. С. 106–113. 2000.
70. Пивоваров В.Г. Теоретические аспекты исследования проблемы глобальная электрическая цепь // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.:ОИФЗ. С. 12–17. 2000.
71. Троицкая В.А., Моргунов В.А., Анисимов С.В. Электрическое взаимодействие геосферных оболочек // Сб. «Электрическое взаимодействие геосферных оболочек», М.: ОИФЗ, 2000, с. 5-11
72. Анисимов С.В., Мареев Е.А. Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли. № 10. С. 8–18. 2008.
73. Морозов В.Н., Шварц Я.М., Щукин Г.Г. Глобальная электрическая цепь: физико-математическое моделирование и регулярные измерения в нижней атмосфере // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.:ОИФЗ. С. 55–67. 2000.
74. Pankratov O.V., Kuvshinov A.V., Avdeev A.B. Ez-response, as a monitor of Baikal rift fault electrical resistivity:3-D-modeling studies // Annals of geophysics. V. 47. № 1. P. 151–156. 2004.
75. Кузнецова Т.В., Цирульник Л.Б., Петров В.Г. Изменение межпланетного магнитного поля в различной области периодов по данным измерений во время космической эры // Известия Академии Наук, серия физическая, 2000, т. 64, №9, с. 1880-1886.