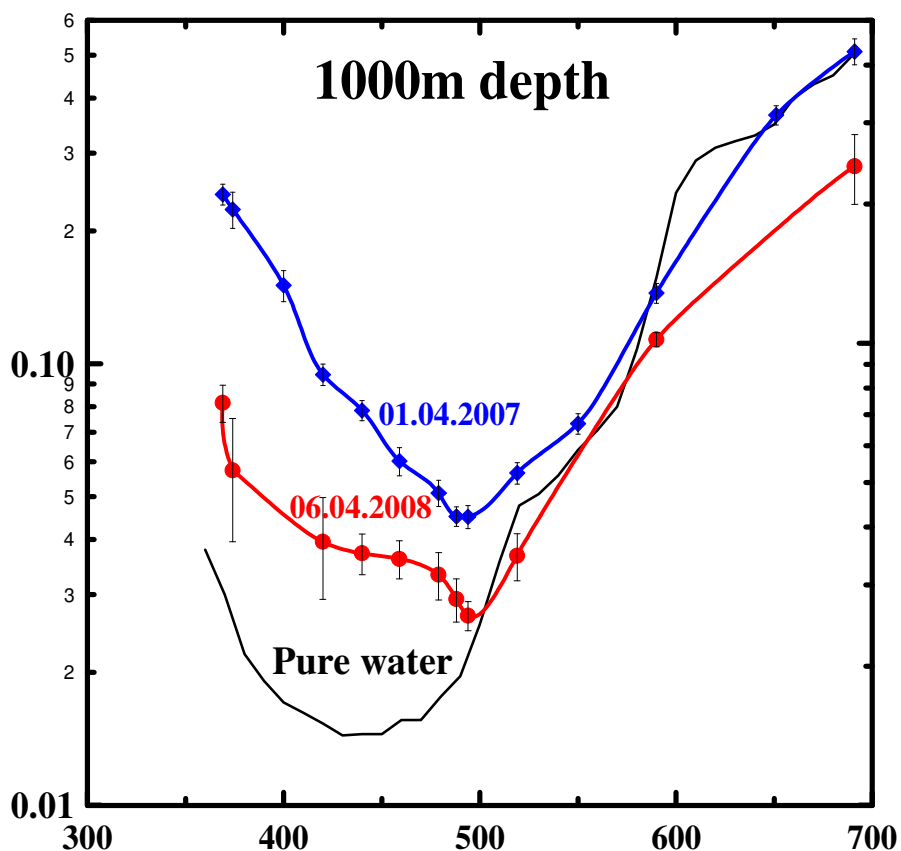


## Гидрооптические исследования

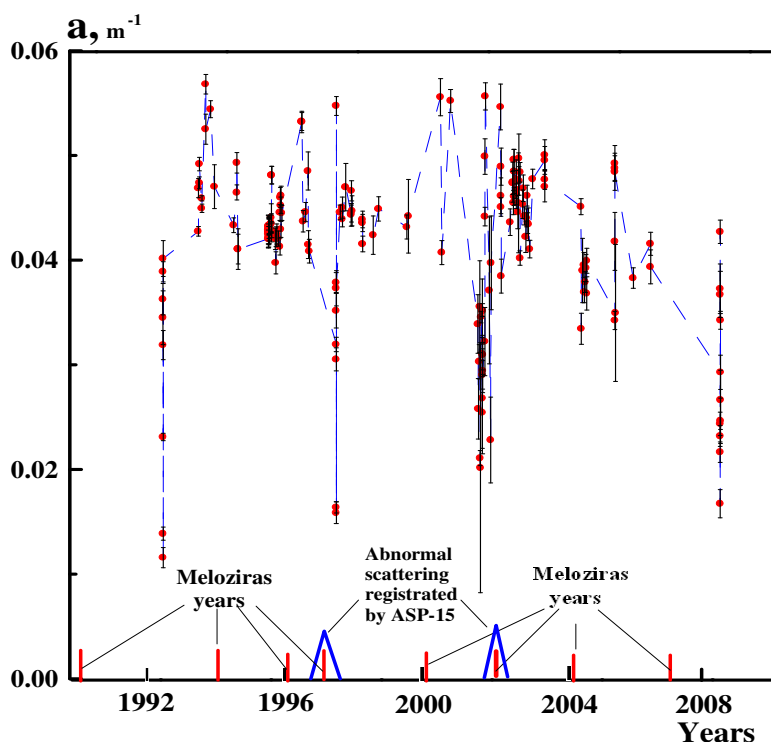
Во время Байкальской экспедиции 2008 г. осуществлен подъем, профилактический ремонт и новая постановка прибора ASP-15 для мониторинга в течение года оптических свойств водной среды в пределах эффективного объема Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ200+. Кроме того, в период экспедиции проведены измерения со льда спектров поглощения, рассеяния и индикатрис рассеяния в поверхностной и в глубинной зонах. На рисунке 3.2.1 приведен пример результатов измерения спектра поглощения во время экспедиции 2008 г. в сравнении со спектром 2007 г. и спектром для чистой воды.



**Рисунок 3.2.1. Спектры поглощения света на глубине 1000 м в районе расположения НТ200+ в 2007 и 2008 годах**

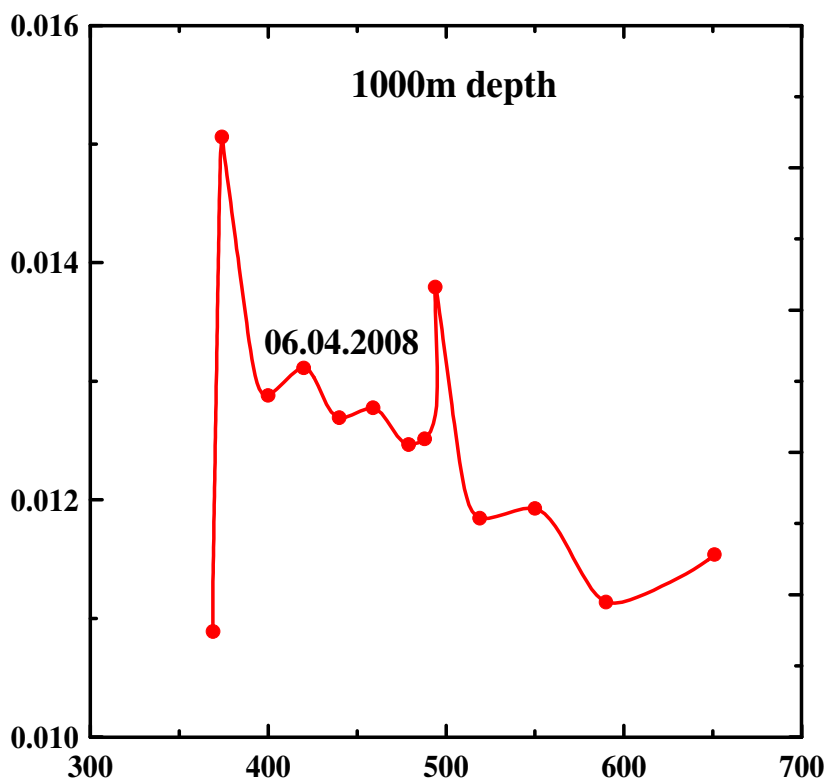
Значения длины поглощения, измеренные в разное время, на разных глубинах в 2008 г., в минимуме спектра менялись от 30 до 50 м, в то время как среднее значение длины поглощения за многие годы составляет 22,5 м и обычные вариации не превышают 10%. В отдельные годы наблюдалась

существенно меньшее значение длины поглощения (рисунок 3.2.2), однако, достоверность полученных ранее «аномально больших» значений длины поглощения вызывала сомнения, ввиду значительных ошибок измерения и не строго экспоненциальной зависимости освещенности от расстояния. Полученные в 2008 г. зависимости освещенности от расстояния, по которым определяются длины поглощения, отличаются от экспоненциальных не более чем на 10%, что говорит о высокой достоверности данных измерений. Причиной «очищения» байкальской воды от растворенной органики может быть абсорбция органических молекул в процессе седиментации фрагментов эндемичных байкальских диатомовых водорослей *Aulacoseira baicalensis*, высокий урожай которых наблюдался в 2007г.



**Рисунок 3.2.2. Показатель поглощения света в байкальской воде для длины волны 488 нм. Вертикальные линии в нижней части рисунка – в годы высокого урожая *Aulacoseira baicalensis***

Пример спектра рассеяния в 2008 году приведен на рисунке 3.2.3.



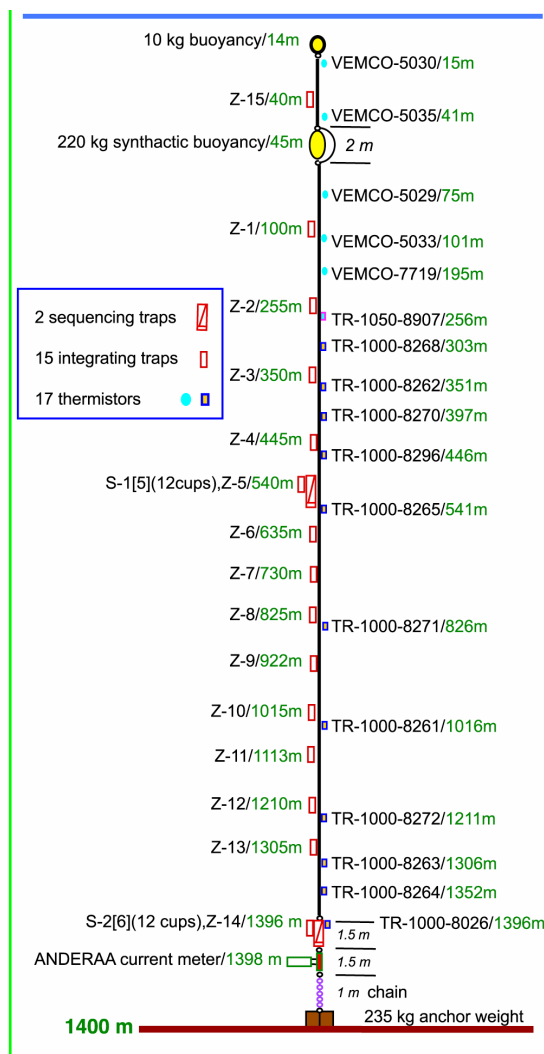
**Рисунок 3.2.3. Спектр поглощения света в байкальской воде на глубине 1000 м 06.04.2008**

В 2008 году была модернизирована система связи с прибором ASP-15, что позволило проводить измерения оптических свойств удаленно с помощью Internet

#### **Долговременный мониторинг температурного режима**

Исследования гидрофизических процессов на основе данных долговременного мониторинга температурного режима начато в 1999 году в сотрудничестве с EAWAG (Швейцария), когда в окрестности БГНТ на расстоянии 3.5 км от берега была установлена первая притопленная буйковая станция (*Neutrino*) с распределенными по вертикали приборами для измерения температуры TR-1000 (разрешение 0.002, точность 0.05 градуса Цельсия) и VEMCO (разрешение 0.015, точность 0.1 градуса Цельсия), открытыми и 2 автоматическими ловушками для исследования процессов седиментации, а также измерителями течений Aanderra RCM7 (разрешение 0.007 м/с, точность, 0.01 м/с, порог 0.02 м/с). В последующие годы были

развернуты еще 2 станции, одна (*East*) также на расстоянии 3,5 км от берега на расстоянии 1 км от первой в восточном направлении, вторая (*Platform*) на полке берегового склона на расстоянии 1 км от берега, где глубина составляет 550 м. На этих станциях дополнительно установлены более точные измерители температуры TR-1050 (разрешение 0.0001, точность 0.002<sup>0</sup>C). На рисунке 3.2.4 представлено размещение гидрологических приборов и ловушек на станции Neutrino.



**Рисунок 3.2.4. Размещение гидрологических приборов и ловушек на станции *Neutrino***

В период с 5 по 12 марта 2008 г. все три станции были подняты на поверхность, произведено считывание накопленной за год информации, осуществлена замена элементов питания и осуществлена повторная постановка всех буйковых станций со следующей конфигурацией термисторов по глубине:

**Neutrino:**

Vemco minilog - 11, 50, 100, 150 и 250 м,  
 TR-1050 - 75, 125, 400, 500 и 1250 м,  
 TR-1000 - 300, 1000, 1300, 1330 и 1350 м (2 м от дна),  
 TDR-2050 - 700 м.

**East:**

Vemco minilog - 17, 32, 56, 70, 85 и 104 м,  
 TR-1000 - 794, 1294, 1334 и 1353 м (2 м от дна),  
 TR-1050 - 379 м и TDR-2050 - 994 м.

**Platform:**

Vemco minilog - 15, 50, 100, 150, 200, 250 и 300 м,  
 TR-1000 - 400, 450, 500 и 547 м (3 м от дна),  
 TR-1050 - 525 м,  
 Aanderaa RCM7 - 16 и 548 м.

В связи с тем, что на основе анализа данных длительного мониторинга температуры в 2004 -2007 годах с помощью термисторов, размещенных на 3 буйковых станциях, впервые были обнаружены случаи присклонового опускания холодных вод, была поставлена задача совместно с ЕАВАГ и ЛИН СО РАН развернуть еще одну буйковую станцию на береговом склоне примерно в километре на восток от станции **Platform**. Совместный анализ данных с приборов на 4 станциях должен позволить построить более точную количественную модель механизма обновления глубинных вод в Байкале. С этой целью ГОУ ВПО ИГУ приобрел 5 наиболее современных термисторов TR-1060 (разрешение 0.0001, точность 0.002 градуса Цельсия), еще 3 таких же прибора было куплено ЛИН СО РАН. Основная задача на период экспедиции состояла в выборе такого места на береговом склоне, где уклон не слишком велик и не было бы опасности, что якорь буйковой станции начнет ползти по дну. Для выбора места были проведены работы по промеру глубин в 18 точках на полигоне размером 300х300 м при средней глубине 500 м. К сожалению, не удалось найти участка с совсем плоским дном, поэтому станция была размещена на участке, где уклон составил около 10 %. Координаты этой точки 51°47'14.3 северной широты, 104°25'41.7 восточной долготы. При постановке этой станции были использованы пластиковые

сферические плавучести Travel Float N446 объемом 8,4 л производства немецкой фирмы ENGEL-NETZE. В расчете на килограмм плавучести они в 4-5 раз дешевле используемых до сих пор в Байкальском нейтринном проекте алюминиевых куктылей. При наблюдении за станцией в течении двух недель после постановки ее смещения не обнаружено. Распределение термисторов на этой новой станции, получившей название «*Youth*» следующее:

TR-1060 - 15, 50, 75, 100, 200, 250, 300, 350 м,

TR-1050 – 485 м (4 м от дна).

Одним из методов, который, в принципе, позволяет вести долговременный мониторинг динамических процессов с различными пространственно–временными масштабами является предложенная Мунком акустическая томография, успешно развивающаяся на протяжении ряда лет для исследования водной толщи морей и океанов. Это связано с потенциально высокой информативностью дистанционных акустических методов зондирования, позволяющих измерениями с разных точек исследовать достаточно большие водные объемы. При распространении в водной среде параметры акустических сигналов претерпевают изменения в зависимости от свойств среды. До настоящего времени в мировой практике для анализа используется ограниченное число характеристик принятого акустического сигнала, в первую очередь, время распространения, которое определяется средней скоростью звука вдоль направления распространения сигнала. В тоже время, в ИСЗФ СО РАН в работах по зондированию ионосферы развиты подходы, позволяющие извлекать информацию о неоднородностях среды из характеристик частотно-манипулированного радиосигнала. В основу предлагаемой методики акустического зондирования больших водных объемов положен способ регистрации вариаций фазы сигнала и искажений формы импульсов за счет частотной дисперсии затухания.

**Обслуживание геофизической буйковой станции**

В период экспедиции был осуществлен подъем, профилактическое обслуживание, замена источников питания и повторная постановка измерителя геоэлектрического поля. На геофизической станции была произведена замена алюминиевых кувшал на пластиковые плавучести Travel Float N446 объемом 8.4 л производства немецкой фирмы ENGEL-NETZE.

Предварительный просмотр полученных данных показал, что они содержат в себе много интересной информации о процессах в гидросфере и подстилающей литосфере, расширяющих знания о влиянии электрических полей на эти процессы и позволяющих прогнозировать природные явления.

### **Экспериментальная отработка в натуральных условиях методики зондирования водной среды частотно – манипулированными сигналами**

В последние годы предложена и экспериментально проверена новая методика изучения гидрофизических процессов с помощью когерентного акустического зондирования среды частотно-манипулированными сигналами. Методика позволяет вести долговременный мониторинг динамических процессов с различными пространственно–временными масштабами. В основу этого метода положен способ регистрации вариаций фазы сигнала и искажений формы импульсов за счет частотной дисперсии затухания. Его разрешающая способность для измерения скорости движения воды, в том числе вертикальной компоненты, лучше 1 мм/с, а температуры - 0.001°C. Причем в данной методике происходит автоматическое усреднение измеряемых величин вдоль направлений распространения акустических сигналов. При этом удастся наблюдать тонкие особенности развития гидрофизических процессов, например, свободной конвекции в подледный период.

Основы методики зондирования описаны в работе [1]. Для регистрации малых вариаций параметров водной среды анализируются изменения полной

формы узкополосных импульсных сигналов, которые могут быть представлены в виде:

$$u(t) = a(t) \cos(\omega_0 t) + b(t) \sin(\omega_0 t) \quad (1)$$

Здесь  $\omega_0$  – несущая частота, или частота заполнения,  $a(t)$  и  $b(t)$  – низкочастотные квадратурные компоненты. Огибающая и фаза сигнала связаны с квадратурными компонентами следующими соотношениями:

$$a(t) = \sqrt{a^2(t) + b^2(t)} \text{ и } \varphi(t) = \arctg(b/a) \quad (2)$$

Для излученного узкополосного ( $\Delta f / f_0 \leq 0,1$ ) импульса, имеющего форму

$$u(t) = a(t) \cos \omega_0 t \quad (3)$$

принятый сигнал может быть представлен в виде:

$$u_r(t) = e^{-\Gamma} [ a(t-\tau) \cos (\omega_0 t + \varphi) + b(t-\tau) \cos (\omega_0 t + \varphi) ], \quad (4)$$

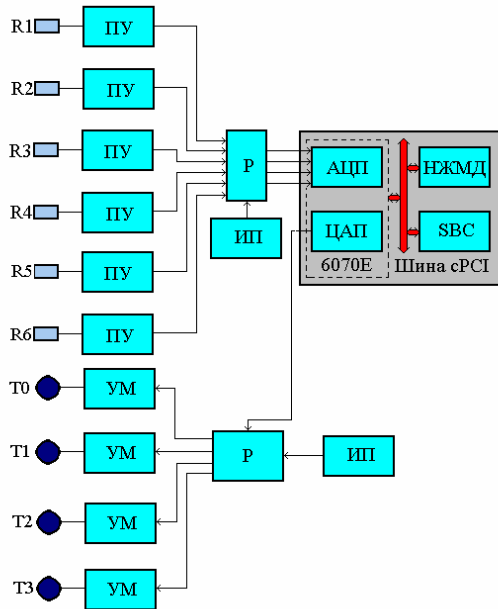
где  $\varphi$  - фазовый набег,  $\tau$  - групповая задержка,  $\Gamma$  - коэффициент затухания,  $b(t) = (d\Gamma/d\omega) da/dt$  – дополнительная квадратурная компонента, появившаяся за счет дисперсии затухания (частотной зависимости  $\Gamma(f)$ ). Для визуализации вариаций используется представление сигнала на фазовой диаграмме, когда сигнал задается как параметрическая кривая в осях  $a$  и  $b$ . При этом амплитудно-модулированный сигнал (3) имеет вид отрезка прямой линии, и любое отличие фазовой диаграммы от отрезка, уширение ее или изгиб являются следствием воздействия среды на сигнал. По порядку величины, отношение осей эллипса ( $b/a$ ) есть  $2\Gamma \Delta f/f$ , где  $\Gamma$  - коэффициент затухания на данной частоте,  $\Delta f$  – ширина спектральной полосы импульса,  $f$  – частота заполнения импульса. В случае малых искажений сигнала, фазовая диаграмма приобретает вид лепестка, (форма которого зависит от формы огибающей излученного сигнала), поворот лепестка относительно осей дает фазу сигнала, (с точностью до  $2\pi$ ), при наличии дисперсии скорости звука лепесток будет еще и изогнут. Таким образом, при зондировании среды последовательностью импульсов, изменение положения лепестка на фазовой диаграмме от импульса к импульсу дает изменение фазового пути, которое



зависит от скорости звука и скорости движения среды вдоль трассы распространения сигнала.

Для экспериментальной проверки метода зондирования озера Байкал с помощью акустических частотно-манипулированных сигналов был создан аппаратно-программный комплекс поддержки трехмерных синхронных акустических измерений. Тестовые наблюдения проводились с ледового покрова озера в марте – апреле 2005-2008 годов. На рисунке 3.2.5 представлена блок-схема измерительного комплекса. Его базовая часть включала рабочую станцию на основе платформы Compact-PCI компьютера МАХI-65120 и многофункциональное устройство ввода-вывода РХI-6070Е, усилители мощности (УМ) и предварительные усилители (ПУ). Генерация зондирующих сигналов осуществлялась методом прямого цифрового синтеза цифро-аналоговым преобразователем РХI-6070Е с дальнейшим усилением аналоговыми усилителями. Аналого-цифровое преобразование (АЦП) принятых зондирующих сигналов, также производилось платой РХI-6070Е с использованием общего встроенного генератора синхронизации, чем достигалась жесткая синхронизация излучаемых и регистрируемых зондирующих сигналов. Исследования велись как на вертикальных, так и на горизонтальных трассах. Расположение излучающих ( $T_0 - T_3$ ) и приемных гидрофонов ( $R_1 - R_6$ ) в марте-апреле 2008 года показано на рисунке 3.2.6. Полигон находился над крутым склоном со средней глубиной около 250 м в 400 м от берега в районе 106 км КБЖД на южном Байкале, где ведутся исследования в рамках Байкальского нейтринного проекта. Береговая линия озера в этом районе направлена почти точно с запада на восток. Выбранная конфигурация позволяла с большей точностью изучать свойства среды в наиболее активной присклоновой области и уменьшить влияние нестабильности аппаратуры. Режим работы в этом эксперименте был следующим. Последовательно с 4-х гидрофонов излучателей с частотой повторения 2.5 Гц посылались три амплитудно-модулированных импульса, имеющих огибающие вида "синус в квадрате". Каждый импульс имел по 18

периодов, длительностью 34, 33 и 32 микросекунды соответственно, между импульсами была пауза длительностью 100 микросекунд. Несущие частоты для тройки излучаемых импульсов были выбраны равными: 29,4117 кГц, 30,3030 кГц и 31,2500 кГц. Регистрация велась на частоте дискретизации 125 кГц.



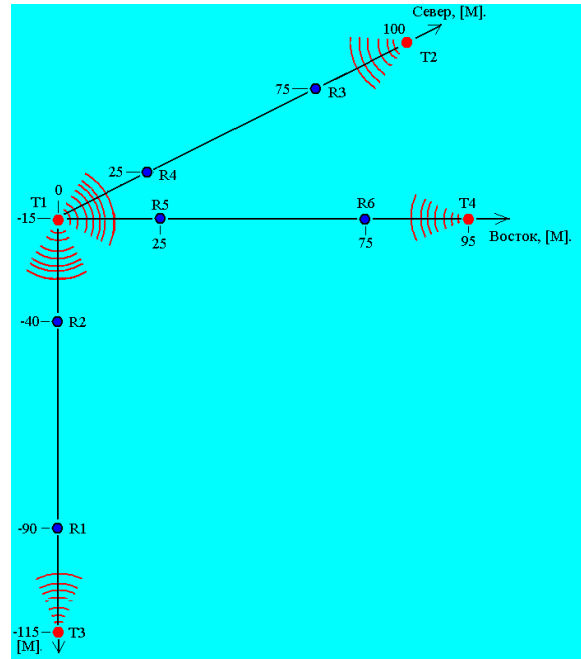
**Рисунок 3.2.5. Блок-схема измерительной установки.**

R1 - R6 – приемные гидрофоны;  
 T0 - T3 – излучающие гидрофоны;  
 ПУ – предварительные усилители;  
 УМ – усилители мощности;  
 АЦП – аналого-цифровой преобразователь;  
 ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;  
 Р – разветвители;  
 НЖМД – накопитель на магнитном диске;  
 SBC – одноплатный компьютер;  
 ИП – источники питания.

### Результаты измерений

По результатам измерений рассчитывались полные фазы зондирующих сигналов на указанных на рисунке 3.2.6 трассах зондирования. Далее, проводилась оценка вариаций температуры и скорости течения, а также средних за сеанс скоростей течения.

В результате оказалось, что как горизонтальное, так и вертикальное движение вод в конце ледового периода носит неустойчивый характер:



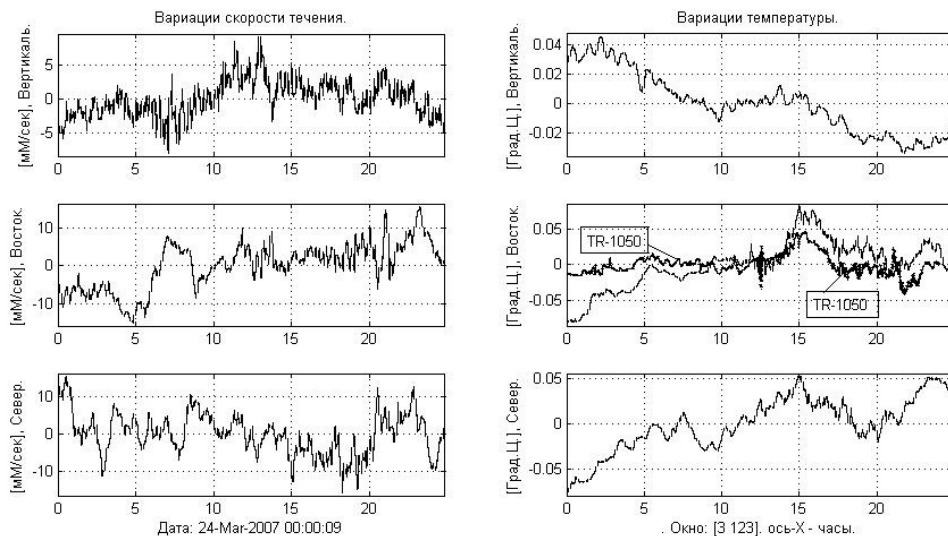
**Рисунок 3.2.6. Схема расположения приемников R1 ÷ R6 и излучателей – T0 ÷ T3 в измерениях 2008 года.**

может несколько раз в сутки меняться направление движения при значениях обеих составляющих горизонтальной скорости порядка 5–20 мм/с, а вертикальной - до 5 мм/с, причем последняя может сохранять устойчивое направление в течение нескольких часов, не смотря на значительные флуктуации амплитуд вокруг среднего значения 1-3 мм/с. Также велики суточные изменения температуры. Вдоль вертикальной трассы вариации температуры редко превышали  $0,02^{\circ}\text{C}$ , а вдоль горизонтальных они достигали  $0,15^{\circ}\text{C}$ .

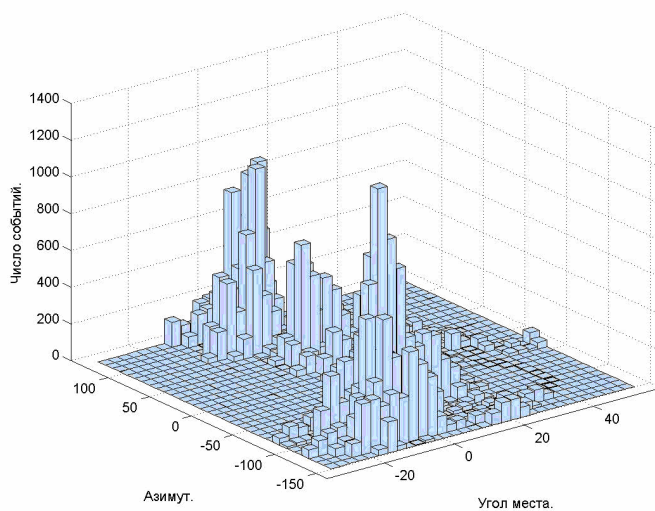
На рисунке.3.2.7 приведен пример суточного изменения температуры и течений 24.03.2008 г. Для сравнения приведены результаты измерения температуры с помощью прибора TR-1050, размещенного на середине трассы запад-восток. Наблюдается качественное согласие поведения данных. Количественные различия могут быть связаны с пространственными неоднородностями с характерными масштабами, сравнимыми с длиной измерительной базы. Пространственные неоднородности могут быть обусловлены динамическими процессами, происходящими в подледной толще воды Байкала. На наличие таких процессов указывают данные расчетов поведения вектора скорости течения в пределах измерительного полигона (рисунок 3.2.8.).

### **Заключение**

Разработан и апробирован новый метод когерентного акустического зондирования с использованием встречного синхронного излучения зондирующих сигналов для исследования динамических процессов в естественных водных средах. Чувствительность созданного экспериментального комплекса к изменениям температуры среды порядка  $0.001^{\circ}\text{C}$ , а интегральной скорости течения – 1 мм/с. Метод позволил впервые инструментально измерить вертикальную составляющую скорост движения воды в озере Байкал. Данные обработки с использованием трех и ортогональных трасс зондирования показали существенную изменчивость гидрофизических процессов в подледный период.



**Рисунок 3.2.7. Суточные изменения скорости течения и температуры на горизонтальных и вертикальной трассах зондирования для 24 марта 2008 года, (скользящее сглаживание на 2-х минутных интервалах)**



**Рисунок 3.2.8. Оценка совместного распределения направления вектора течения в горизонтальной (Азимут) и вертикальной (Угол места) плоскостях для 22-03-2008 года.**

### **3.3. Лазерная калибровка в экспедиции 2008 г.**

#### **Светодиодная матрица.**

В зимней экспедиции 2008 г был проведен демонтаж выработавших рабочий ресурс лазерных источников света и их замена на матричные светодиодные источники с малыми временами излучения. Всего было установлено два новых светодиодных источника: матрица светодиодов для калибровки нейтринного телескопа НТ-200, и матрица для калибровки экспериментального стринга, содержащего 6 оптических модулей (ОМ).

Для экспериментального стринга были изготовлены 6 светопроводящих оптоволоконных линий для временной синхронизации фотоумножителей. Была выполнена работа по проверке качества новых линий, их тестовые испытания, отработана методика монтажа.

Для нейтринного детектора НТ200 также были выполнены ремонтно-профилактические работы по восстановлению и наладке оптоволоконных линий (поиск и отбраковка линий с низкой величиной пропускания светового сигнала, ремонт и замена поврежденных линий), и были выполнены работы по монтажу калибровочного светодиодного источника на телескоп НТ200.

В настоящий момент система временных калибровок БГНТ (НТ200+ с экспериментальным стрингом) содержит две светодиодные матрицы, осуществляющие засветку оптических каналов телескопа НТ200 и экспериментального стринга соответственно, и внешнего мощного лазерного источника света, осуществляющего калибровки всего телескопа непосредственно через водную среду.

#### **Выводы по разделу 3 отчета**

В период зимней Байкальской экспедиции 2008 г. выполнены следующие работы:

- Подъем гирлянды с гидрооптическим и гидроакустическим оборудованием,

- Подъем 3-х буйковых станций с гидрологическим оборудованием и геофизической станции, предназначенной для измерения вертикальной компоненты электрического поля,
- Проведено регламентное обслуживание всех приборов и их повторная постановка для дальнейших измерений.
- Как показали результаты проведенных нами исследований, по-видимому, основным механизмом, ответственным за крупномасштабные интрузии в придонную зону, является присклоновое опускание вод в периоды, близкие к весенней и осенней гомотермии. С целью получить более подробные данные об этом процессе проведены поиск места, подходящего для установки 4-ой притопленной буйковой станции для наблюдения за температурой в присклоновой области.
- Продолжены эксперименты по отработке методики когерентного акустического зондирования водной среды частотно-манипулированными сигналами.
- Произведены: ремонт световолоконных линий, демонтаж выработавших ресурс калибровочных лазеров, установка двух светодиодных матриц.

### **Литература к разделу 3**

1. Орлов И.И., Ильин Н.В.//Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 11-12.С. 1585 - 1591.