



УДК 556.024:556.043:556.08:556.551(571.53)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.42.3>

Термопрофилирующая система онлайн-мониторинга деятельного слоя на базе глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD

И. А. Асламов, М. М. Макаров, Р. Ю. Гнатовский*

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

И. А. Портянская

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Для круглогодичного мониторинга вертикального профиля температуры в водоемах как косвенной меры происходящих в них динамических процессов в лаборатории гидрологии и гидрофизики Лимнологического института СО РАН была разработана распределенная система измерения температуры. В статье представлены краткое описание системы и предварительные результаты ее испытания в Байкале в течение 2022 г.: термокоса измеряет мгновенный вертикальный профиль температуры с частотой до 1 Гц и разрешением до 1 мК и покрывает деятельный слой оз. Байкал с наиболее выраженными изменениями температуры в течение всего года. Термокоса была интегрирована в один из стрингов нейтринного телескопа Baikal-GVD и подключена к телекоммуникационной сфере, в которую был смонтирован разработанный в ЛИИ СО РАН даталоггер. Полученные материалы помогли рассмотреть некоторые особенности временной изменчивости температуры в деятельном слое по анализу спектральной плотности мощности. Разработанная система мониторинга позволяет в режиме онлайн получать качественно новые данные о гидрофизическом состоянии деятельного слоя пелагиали оз. Байкал.

Ключевые слова: Байкал, гидрофизика, мониторинг, термокоса, температура, термоанемометр, Baikal-GVD.

Благодарности. Статья подготовлена в рамках гранта № 075-15-2020-787 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

Авторы выражают глубокую признательность участникам коллаборации Baikal-GVD за предоставленную инфраструктуру и оказанную всестороннюю помощь при выполнении работ.

Для цитирования: Термопрофилирующая система онлайн-мониторинга деятельного слоя на базе глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD / И. А. Асламов, М. М. Макаров, Р. Ю. Гнатовский, И. А. Портянская // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2022. Т. 42. С. 3–15. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.42.3>

Thermoprofiling System for Online Monitoring of the Active Layer Based on the Deep-Water Neutrino Telescope Baikal-GVD

I. A. Aslamov, M. M. Makarov, R. Yu. Gnatovsky*

Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

I. A. Portianskaya

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. For continuous monitoring of the vertical distribution of temperature in Lake Baikal, as an indirect measure of dynamic processes, a system of distributed temperature sensors was developed in the Laboratory of Hydrology and Hydrophysics of the Limnological Institute of the SB RAS. The system allows to obtain instant vertical temperature profiles with up to 1 Hz frequency and 1 mK resolution. Additionally, each sensor is equipped with a microheater activated by addressed command to implement the thermanemometric mode of operation, to estimate the velocity of water flows. The pilot sample of the thermistor chain contains 11 temperature sensors located along the depth from 20 to 120 meters with a 10 meters step, and covers the active layer of Lake Baikal with the major changes during the year. The developed thermistor chain was integrated into one of the strings of the Baikal-GVD neutrino telescope and connected to the specially developed data logger which placed in the telecommunication spherical module. In this article, we give a brief description of the temperature profiling system and preliminary results of tests in the open Baikal during 2022. The obtained measurement results allowed us to consider the temporal variability of the active layer temperature by analyzing its power spectral density. The developed monitoring system allows obtaining qualitatively new hydrophysical data on the state of the active layer of the pelagic part of Lake Baikal in real time.

Keywords: Baikal, hydrophysics, monitoring, thermistor chain, temperature, thermanemometer, Baikal-GVD.

For citation: Aslamov I.A., Makarov M.M., Gnatovsky R.Yu., Portianskaya I.A. Thermoprofiling System for Online Monitoring of the Active Layer Based on the Deep-Water Neutrino Telescope Baikal-GVD. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2022, vol. 42, pp. 3-15. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.42.3> (in Russian)

Введение

Температура – одна из важнейших характеристик, описывающая физические свойства воды. Она существенно влияет на плотность, а следовательно, обуславливает вертикальную устойчивость водной толщи, ее перемешивание или стратификацию, насыщение кислородом и эмиссию парниковых газов [Del Sontro, Beaulieu, Downing, 2018; Methane emission from ... , 2019]. Также температура является важнейшим экологическим фактором, от которого зависит множество физических, химических и биологических процессов. Таким образом, термический режим и режим перемешивания определяют условия переноса вещества и энергии в водоемах и оказывают значительное воздействие на качество воды и функционирование озерных экосистем в целом [Bronmark, Hansson, 2005, Automatic high frequency ... , 2016]. Вариации температуры являются одним из наиболее удобных для регистрации маркеров динамических процессов, протекающих в водоемах [Thorpe, 2005]. Поэтому температура воды подлежит обязательному измерению при любых гидрофизических, гидрохимических, гидробиологических и других исследованиях водоемов [Automated high frequency ... , 2021].

Исторически сложилось, что исследователи, как правило, располагают данными лишь эпизодических измерений температуры, полученными методом зондирования водной толщи приборами с борта научно-исследовательских судов или во время отбора проб с определенных участков водоема и в определенные промежутки времени. Однако этот подход часто не позволяет охватить динамику многих биотических и абиотических процессов, происходящих во временном масштабе, меньшем, чем частота выборки [Dubelaar, Geerders, Jonker, 2004; Continuous monitoring of ... , 2005; Makarov, Aslamov, Gnatovsky, 2021]. Также эпизодический характер измерений затрудняет полноценное исследование эволюции динамических процессов, происходящих в водоеме в течение года. Для проведения таких исследований необходимы непрерывные измерения температурных вариаций на стационарных буйковых станциях.

В 80–90-х гг. прошлого века на оз. Байкал сотрудниками Лимнологического института устанавливались первые буйковые станции с приборами АЦИТ (автономными цифровыми измерителями течения, температуры и электропроводности). Один-два прибора, размещенных по вертикали, не могли дать подробной картины распределения температуры, но позволяли провести исследования закономерностей формирования крупномасштабной циркуляции вод, а также горизонтального макротурбулентного обмена в Байкале.

Новые технические возможности для проведения непрерывного мониторинга вертикального распределения температуры появились с запуском Байкальского нейтринного проекта [Baikal neutrino telescope ... , 2009], в рамках которого в 1992 г. были начаты регулярные ежегодные исследования температурных особенностей в верхних слоях озера в подледный период. Непрерывный круглогодичный мониторинг температурного режима ведется начиная с 1999 г. совместно сотрудниками Лимнологического института СО РАН, Иркутского государственного университета, Швейцарского федерального института водных наук и технологий (EAWAG) и Института ядерных исследований РАН. Ежегодные постановки буйковых станций проводятся в среднем с двумя десятками температурных логгеров, расположенных на глубинах от 20 до 1370 м. Накопленный к настоящему времени массив данных о температурных вариациях позволил уточнить многие особенности тепло- и массообмена по глубине оз. Байкал [Результаты моделирования эволюции ... , 2008; Ловцов, Растегин, Портянская, 2012], исследовать изменения теплосодержания в водной толще [Troitskaya, Budnev, Shimaraev, 2022].

В экспериментах на нейтринном телескопе используются температурные логгеры фирмы RBR instruments (типа TR-1050, TR-1060 и более современные RBRsolo-T). Датчики характеризуются высокой точностью (до $\pm 0,002$ °C), компактностью и удобством в использовании, ведь каждый логгер – это отдельный прибор со своим электропитанием и внутренней памятью, который можно установить на желаемой глубине. Но подобная измерительная система обладает и рядом недостатков. Во-первых, автономность каждого логгера накладывает ограничение на энергоемкость, соответственно, нет возможности настраивать датчики на более частые измерения, чем позволяет ресурс

элементов питания. Во-вторых, встроенные часы реального времени в каждом логгере постепенно расходятся друг от друга в силу неидеальности параметров кварцевых резонаторов, что ограничивает точность определения временных интервалов между событиями, произошедшими на разных датчиках. И в-третьих, индивидуальные логгеры не имеют портов связи для передачи измеренной информации, а значит, данные с них недоступны в течение года. Для получения данных необходимо раз в год, во время зимних работ на льду, извлекать измерительную систему для считывания каждого датчика и замены элементов питания на новые.

С 2020 г. проводится работа по реализации крупного научного проекта «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории», в масштабе которого была поставлена задача разработать и испытать систему онлайн-мониторинга температуры, лишенную вышеперечисленных недостатков и отвечающую всем современным требованиям науки и техники. Цель статьи – представить краткое описание разработанной системы измерения и результаты ее испытания в открытом Байкале в течение 2022 г.

Описание разработанной системы онлайн-мониторинга

Разработанный даталоггер термопрофилирующей системы базируется на 32-разрядном микроконтроллере PIC32MX130F256B (Microchip Technology Inc.). Основной идеей разработки было создание такой архитектуры, которая смогла бы обеспечить разнообразие конфигураций адресуемых датчиков, построенных на единой трехпроводной шине. Для обеспечения обмена информацией между даталоггером и датчиками в качестве протокола физического уровня был выбран однопроводной интерфейс 1-Wire, а две другие линии кабеля были задействованы для подачи напряжения питания в 12 В. Для увеличения протяженности измерительной системы, чтобы избежать влияния повышения паразитной емкости линии, на каждые 100 м кабеля предусмотрена установка повторителей 1-Wire шины на базе микросхемы TCA9517 (Texas Instruments).

В качестве датчиков температуры была выбрана микросхема MAX31888 (Maxim Integrated), это первый высокоточный цифровой датчик температуры с интерфейсом 1-Wire, разработанный и выпущенный на рынок в конце 2021 г. Датчики характеризуются низким энергопотреблением (ток преобразования температуры всего 68 мкА) и имеют высокое 16-битное разрешение (0,005 °C). При этом заводская точность калибровки составляет $\pm 0,25$ °C в диапазоне от -20 до $+105$ °C. Напряжение питания может варьироваться в диапазоне от 1,7 до 3,6 В, а рабочая температура составляет от -40 до $+125$ °C. Каждая микросхема MAX31888 имеет свой уникальный 64-битный идентификационный номер, который программируется на заводе-изготовителе. MAX31888 выпускается в миниатюрном 6-контактном корпусе uDFN (с размерами $2 \times 2 \times 0,8$ мм) и оснащен тремя логическими портами ввода-вывода, которые могут быть задействованы как для управления другими устройствами, так и для контроля их состояния. Датчик имеет встроенный FIFO-буфер размером в 32 отсчета для хранения измеренных значений.

Для повышения разрешающей способности датчиков температуры каждое измерение вычислялось на основе 32 отсчетов, что позволило получать данные с разрешением $< 0,001$ °С. С целью повышения абсолютной точности датчиков перед установкой они были предварительно откалиброваны в жидкостном термостате «ТЕРМОТЕСТ-100-40» («ТЕРМЭКС», Россия). При проверке в диапазоне температур от -1 до $+20$ °С датчики показали неплохое отклонение заводской калибровки, уложившись в $\pm 0,1$ °С. После введения поправок в виде полиномов второй степени точность привязки к абсолютной шкале была повышена на порядок и составила $\pm 0,01$ °С.

Каждый датчик был распаян на индивидуальной Т-образной печатной плате с выносом от несущего кабеля на расстояние 4 см, чтобы минимизировать его влияние на измеряемую температуру. В качестве соединяющего температурные датчики кабеля был выбран геофизический кабель ВП 2×0,2Э-У («Псковгеокабель»), представляющий собой витую пару в экране и термопластичной полиуретановой оболочке. Витая пара была использована для передачи сигнала и минуса питания, а напряжение питания было подключено на экранирующую оплетку. Для герметизации датчиков и их соединения с кабелем была спроектирована и изготовлена специальная форма для их заливки двухкомпонентным полиуретаном марки Ecast.

Чтобы произвести оценку распределения скоростей течений, в каждый датчик была заложена возможность работы в режиме термоанемометра. С этой целью в датчики были встроены микронагреватели в виде двух SMD-сопротивлений в корпусе 0805 и суммарной мощностью 250 мВт, подключаемые одним из портов ввода-вывода микросхемы MAX31888 через комплементарную пару N- и P-канальных транзисторов к линии питания в 12 В. Принцип работы в этом режиме основан на включении микронагревателя, расположенного на обратной относительно термодатчика стороне печатной платы, и измерении температуры датчика, установившейся после наступления равновесия между теплосъемом окружающей среды и подводом тепла от нагревателя. Разница температур до и после прогрева будет обратно пропорциональна интенсивности теплосъема, который напрямую зависит от скорости течений и конвективного перемешивания. В контроллере предусмотрена настройка периодичности и продолжительности включения микронагревателей, а также маска адресов термодатчиков, участвующих в прогреве. В структуре выходных данных, передающихся на сервер, есть флаг, отвечающий за работу нагревателей.

Ключевым моментом разработанной системы измерения является жесткая временная синхронизация всех датчиков по глубине, т. е. вертикальное распределение температуры измеряется одномоментно, что позволяет с высокой точностью определять фронты температурных возмущений. Стратегия семплирования в опытной станции была организована следующим образом: микроконтроллер даталоггера раз в 10 секунд включает питание, инициализирует измерительную систему и затем каждые 200 мс отправляет широковещательные команды на запуск процесса измерения температур. Время одного преобразования температуры составляет 17 мс, остальные 183 мс измерительная система находится в режиме ожидания. Такое соотношение времен было

выбрано, чтобы исключить саморазогрев датчиков, исходя из предварительных испытаний в атмосферном воздухе, но в среде с высокой теплоемкостью и теплопроводностью, какой является вода, периодичность измерений может быть сокращена на порядок и достигать 1 Гц без потери в точности. Всего контроллером отправляется 32 команды, а результаты измерений сохраняются во внутренних регистрах термодатчиков. По истечении 6,4 с цикл измерения заканчивается, и контроллер по очереди запрашивает с каждого датчика буфер измеренных значений. После усреднения температур данные отправляются на сервер, и контроллер переходит в режим ожидания следующего 10-секундного цикла измерения.

На сервере информацию о вертикальном распределении температуры принимает специально разработанная программа сбора, анализа и сохранения данных в БД под управлением PostgreSQL. Для демонстрации была организована веб-страница мониторинга эволюции вертикального профиля температуры с использованием свободно распространяемой BI-платформы Grafana. Был настроен доступ из Grafana к данным PostgreSQL, сформированы расширенные SQL-запросы для наглядного отображения измеренных данных, обеспечен доступ к информационной панели внешних пользователей. На разработанной информационной панели приводится несколько аналитических графиков (рис. 1): график мгновенного профиля температуры (справа) и изменение профиля во времени как в виде графиков температур отдельных датчиков (верхняя панель), так и в виде тепловой карты (внизу).

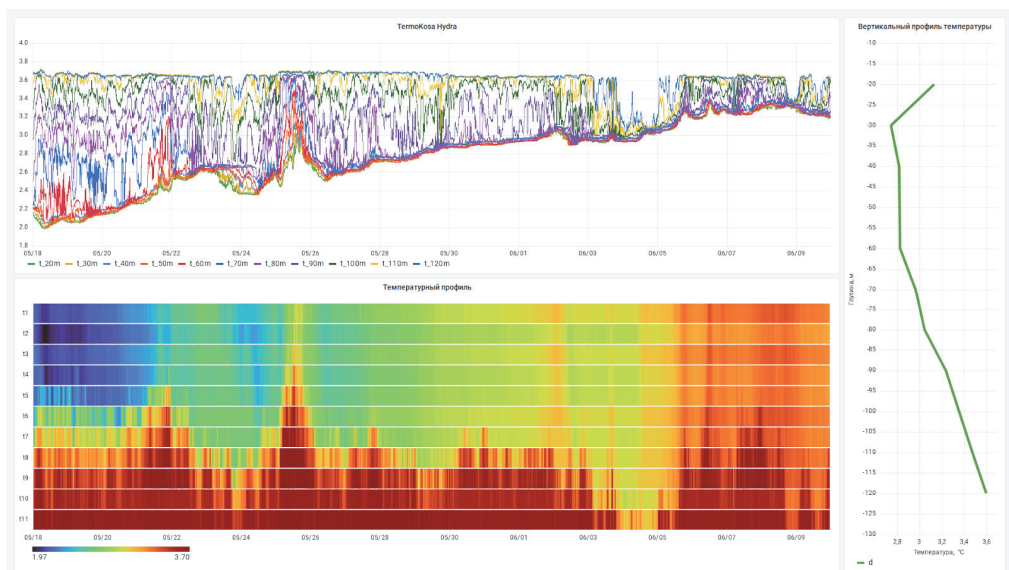


Рис. 1. Веб-страница с информационной панелью для оперативного мониторинга вертикального распределения температуры

Результаты и обсуждение

Опытный образец разработанной системы измерения был установлен в марте 2022 г. в 3 км от берега в Южном Байкале на одной из буйковых станций кластера Hydra нейтринного телескопа Baikal-GVD, в точке с координатой $51^{\circ}46'02''$ с. ш. и $104^{\circ}25'03''$ в. д. Расстояние от берега составило 3,3 км, глубина места – 1363 м. На датчиках, расположенных на глубинах 20, 50 и 100 м, раз в час включался на 2 мин термоанемометрический режим работы. Данные о температуре со всех датчиков, рассчитанные разницы температур в режиме прогрева, а также данные о скорости и направлении ветра с метеостанции ЛИН СО РАН в пос. Листвянка приведены на рис. 2.

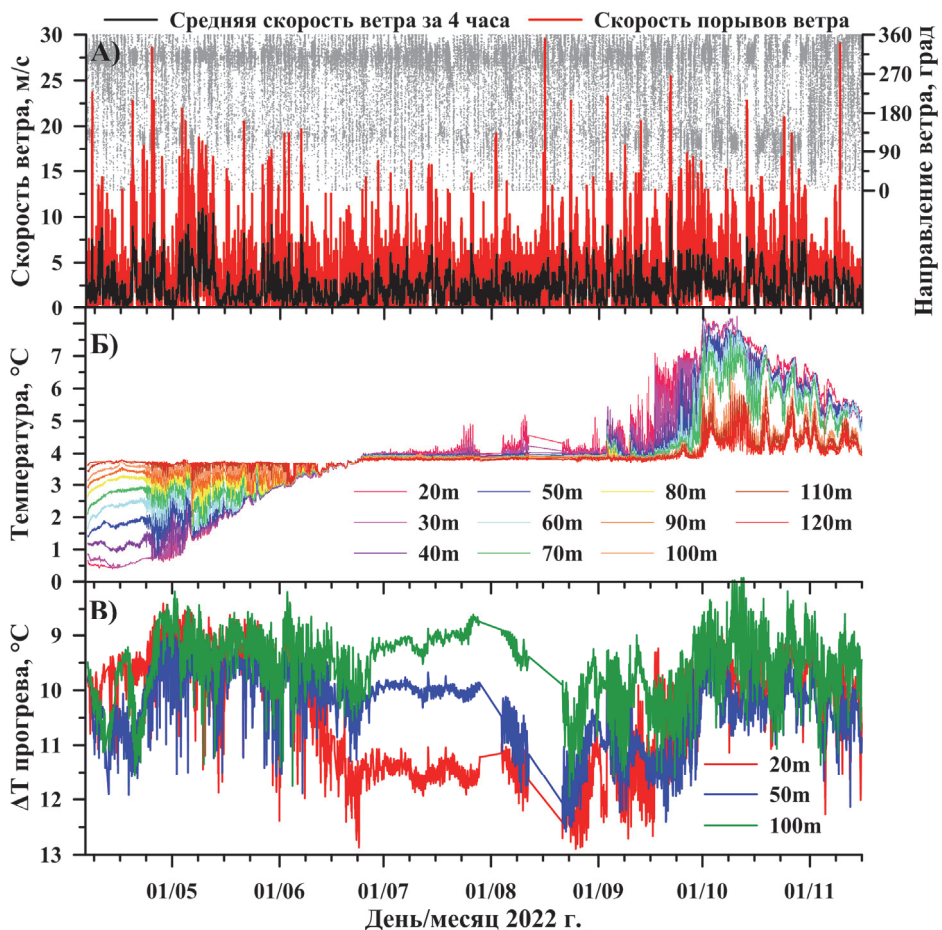


Рис. 2. Гидрометеорологические условия за период наблюдений:

А – скорость и направление ветра, *Б* – эволюция вертикального распределения температуры в верхней части деятельного слоя, *В* – рассчитанная температура прогрева датчиков в термоанемометрическом режиме (шкала температуры инвертирована)

Анализ ветровой активности в Южном Байкале подтверждает господство северо-западного переноса воздушных масс, наиболее сильные и продолжительные ветры дули именно с этого направления (см. рис. 2, А). Второе устойчивое направление ветров было восточное/юго-восточное, оно в большей степени проявилось в весенний и особенно в осенний периоды. Летнее время, с июня до середины августа, было относительно спокойным.

В момент установки измерительной системы Байкал был покрыт ледовым покровом и, соответственно, изолирован от прямого воздействия ветров. Флуктуации температуры воды в этот период были минимальны. В указанное время наблюдался довольно плавный прогрев воды за счет развития подледной конвекции, возникающей вследствие поглощения проходящей солнечной радиации (см. рис. 2, Б). К середине апреля мощность подледного перемешанного слоя достигла 30-метровой глубины. Значительное усиление ветра северо-западного направления 25 апреля привело к отрыву ледового поля и его сгону к восточному берегу озера, в результате образовалась многокилометровая полынья в районе нейтринного телескопа. С этого момента начался процесс активного перемешивания и прогрева поверхностных вод вплоть до наступления периода гомотермии, который продлился 12 сут, с 13 по 25 июня (см. рис. 2, Б).

После 25 июня стратификация в озере изменилась на прямую. При этом вследствие относительного ветрового затишья поступления более теплых верхних слоев, даже до глубины верхнего датчика (20 м), не наблюдалось вплоть до последней недели июля. На температурах прогрева, полученных в режиме термоанометра, также не выделялось масштабных флуктуаций в этот период (см. рис. 2, В). Значительная интенсификация перемешивания и проникновение прогретых масс до глубин 50–70 м начались с сентября. К октябрю интенсивность перемешивания достигла максимума, и в этот процесс был вовлечен уже весь охваченный датчиками 120-метровый слой воды. Размах внутрисуточных колебаний температуры даже на глубине 120 м достигал 1,5 °С. При этом наметился переход к осеннему охлаждению, связанному как с общим уменьшением поступающего с солнечной радиацией тепла, так и с увеличением теплосъема за счет усиления осенних ветров (см. рис. 2, В). Дальнейшее охлаждение привело бы к осенней гомотермии, но на момент подготовки статьи этот период еще не был достигнут.

Важным показателем динамики исследуемых процессов является спектральная плотность мощности (PSD). Она характеризует распределение энергии процесса по частотам, и по ее форме можно оценить соотношение между разными составляющими спектральных возмущений, идентифицировать возможные источники. Построенные характерные распределения спектральной плотности мощности температурных колебаний на глубине 30 м в разные гидрологические сезоны приведены на рис. 3.

Отмеченное поведение спектральной плотности мощности типично для водоемов. На всех реализациях хорошо выражен инерционный интервал, в котором энергетический спектр подчиняется закону “ $-5/3$ ” Обухова – Колмогорова.

рова, и, таким образом, преобладает каскадная передача энергии от крупномасштабных вихрей к более мелким, без ее заметной диссипации [Монин, Озмидов, 1981]. Согласие с законом “ $-5/3$ ” демонстрирует связь наблюдаемой динамики с инерционно-конвективными процессами. Период весеннего подледного прогрева (см. рис. 3, А, красная линия) охарактеризовался мощным пиком на инерционной частоте, связанной с эффектом Кориолиса и определяемой широтой местности (для озера Байкал ~ 15 ч). В то время как в периоды гомотермии и в начале летнего прогрева (см. рис. 3, А, 3, Б, синие линии) спектральная плотность мощности не имела значимых проявлений каких-либо частот вследствие малых градиентов температур. Летние спектры, напротив, отличаются присутствием локальных экстремумов на приливных и сейшевых частотах (см. рис. 3, Б, красная линия, 3, В, синяя линия). Спектр периода осеннего охлаждения (см. рис. 3, В, красная линия) характеризуется общим повышением энергетики примерно на порядок во всем диапазоне частот по сравнению с другими сезонами.

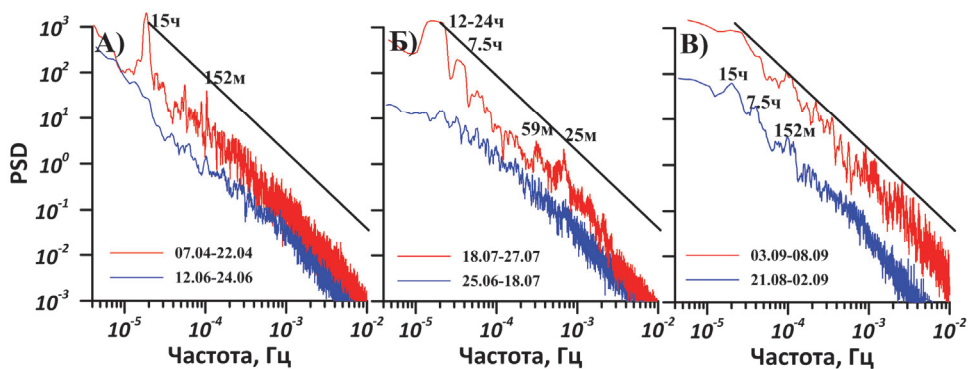


Рис. 3. Характерное распределение спектральной плотности мощности температурных колебаний на глубине 30 м в разные гидрологические сезоны: А – апрель (подледный прогрев), июнь (гомотермия); Б – июль (летний прогрев); В – август – сентябрь (осеннее охлаждение). Черными линиями показан наклон энергетического спектра согласно закону “ $-5/3$ ”

В целом следует отметить, что на энергетических спектрах, кроме инерционной частоты (15 ч) и ее первой гармоники (7,5 ч), также периодически выделяются колебания приливного (12 и 24 ч) и сейшевого происхождения. В частности, проявляются колебания 2-узловой продольной сейши оз. Байкал (152 мин) и сейши его Южной котловины (59 мин), колебания с периодом 25 мин также были обнаружены в годовом спектре колебаний уровня оз. Байкал [Сейшевые колебания Байкала, 2014]. Так как инерционная частота проявляется на большей части построенных спектров мощности, было решено исследовать сезонную эволюцию этой части спектра во времени и по глубине (рис. 4).

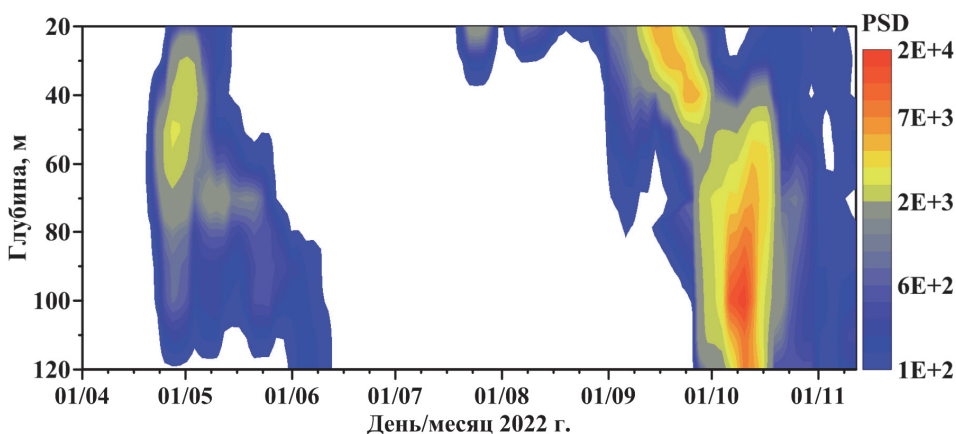


Рис. 4. Вертикальное распределение спектральной плотности мощности температурных колебаний на инерционной частоте (~15 ч) за время наблюдений

При анализе спектральной плотности мощности на инерционной частоте в разные гидрологические сезоны можно отметить интенсификацию возмущений в весенний и летне-осенний периоды, что совпадает с усилением ветровой активности в эти сезоны. При этом период осеннего охлаждения отличается на порядок большей энергетикой. Из рис. 4 видно, как начиная с приповерхностных слоев идет постепенная передача энергии температурных колебаний до глубины 50 м, а затем довольно быстро в возмущения вовлекается весь нижележащий слой воды, охваченный датчиками.

Заключение

Разработан и изготовлен опытный образец термопрофилирующей системы онлайн-мониторинга водной толщи. Пробная постановка измерительной системы произведена в марте 2022 г. на базе нейтринного телескопа *Vaikal-GVD*. Благодаря развитой инфраструктуре телескопа, в частности организации бесперебойного электропитания и канала связи с берегом, появилась возможность передавать измеренные каждые 10 секунд вертикальные профили температуры воды на сервер Лимнологического института. В процессе эксплуатации выяснилось, что интернет-связь на телескопе организована через радиоканал и может периодически пропадать, что приводило к потере данных. Поэтому при очередном обслуживании измерительной станции в 2023 г. будет проведена ее модернизация: в логгер будут добавлены микросхема часов реального времени и внутренняя энергонезависимая память; будет организована синхронизация времени с сервером Лимнологического института. Планируется существенное удлинение измерительной системы, по возможности вплоть до измерения придонных температур. Прорабатывается перспектива интеграции в систему измерения датчиков скоростей течений и электропроводности, а также инклинометров и датчиков гидростатического давления для учета отклонений системы от вертикального положения. На пе-

риод открытой воды планируется установка автономного плавучего буйа с компактной ультразвуковой метеостанцией, закоренного за притопленный буй стринга нейтринного телескопа. Несмотря на очевидную необходимость дальнейшего совершенствования, разработанный опытный образец системы мониторинга и его интеграция в систему нейтринного телескопа позволили в режиме онлайн получать качественно новые данные о гидрофизическом состоянии деятельного слоя пелагиали оз. Байкал.

Список литературы

Ловцов С. В., Растегин А. Э., Портыанская И. А. Особенности переноса энергии по результатам спектрального анализа температурных данных // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2012. Т. 5. С. 195–204.

Монин А. С., Озмидов Р. В. Океанская турбулентность. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 320 с. Результаты моделирования эволюции температурного режима верхних слоев оз. Байкал по данным экспериментов 2000–2001 гг., 2004–2005 гг. / Н. М. Буднев, С. В. Ловцов, И. А. Портыанская, А. Е. Растегин, В. Ю. Рубцов, М. Shturm, M. Shurter, A. Wuest // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2008. Т. 1. С. 76–83.

Сейшевые колебания Байкала / С. В. Смирнов, К. М. Кучер, Н. Г. Гранин, И. В. Стурова // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 1. С. 105–116.

Automated high frequency monitoring of Lake Maggiore through in situ sensors: system design, field test and data quality control / R. Tiberti, R. Caroni, M. Cannata, A. Lami, D. Manca, D. Strigaro, M. Rogora // Journal of Limnology. 2021. Vol. 80. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2021.2011>

Automated high frequency monitoring for improved lake and reservoir management / R. Marcé [et al.] // Environmental Science and Technology. 2016. Vol. 50. P. 10780–10794.

Baikal neutrino telescope – an underwater laboratory for astroparticle physics and environmental studies / V. Aynutdinov [et al.] // Nuclear Instruments and Methods. 2009. Vol. 598. P. 282–288. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.08.124>

Bronmark C., Hansson L. A. The Biology of Lakes and Ponds. Oxford University Press, 2005. 285 p.

Continuous monitoring of phytoplankton dynamics in Lake Balaton (Hungary) using on-line delayed fluorescence excitation spectroscopy / V. Istvanovics, M. Honti, A. Osztoics, H. M. Shafik, J. Padisak, Y. Yacobi, W. Eckert // Freshw. Biol. 2005. Vol. 50. P. 1950–1970.

Del Sontro T., Beaulieu J. J., Downing J. A. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change // Limnol. Oceanogr.: Letters. 2018. Vol. 3, N 3. P. 64–75. <https://doi.org/10.1002/lol2.10073>

Dubelaar G. B. J., Geerders P. J. F., Jonker R. R. High frequency monitoring reveals phytoplankton dynamics // J. Environ. Monit. 2004. Vol. 6. P. 946–952.

Makarov M., Aslamov I., Gnatovsky R. Environmental Monitoring of the Littoral Zone of Lake Baikal Using a Network of Automatic Hydro-Meteorological Stations: Development and Trial Run // Sensors. 2021. Vol. 21. P. 7659. <https://doi.org/10.3390/s21227659>

Methane Emission From the Surface of the Mozhaik Valley-Type Reservoir / M. G. Grechushnikova [et al.] // Geogr. Nat. Resour. 2019. Vol. 40. P. 247–255. <https://doi.org/10.1134/S1875372819030077>

Thorpe S. A. The Turbulent Ocean. Cambridge University Press, 2005. 439 p.

Troitskaya E., Budnev N., Shimaraev M. Changes in the Heat Content of Water Column in the Slope Area of the Southern Basin of Lake Baikal in the 21st Century // Water. 2022. Vol. 14. P. 348. <https://doi.org/10.3390/w14030348>

References

Lovtsov S.V., Rastegin A.Je., Portyanskaya I.A. Osobennosti perenosa jenergii po rezul'tatam spektral'nogo analiza temperaturnyh dannyh [Features of energy transfer based on the results of spectral analysis of temperature data]. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2012, vol. 5, pp. 195-204. (in Russian)

- Monin A.S., Ozmidov R.V. *Okeanskaya turbulentnost* [Ocean turbulence]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1981. 320p. (in Russian)
- Budnev N.M., Lovtsov S.V., Portyanskaya I.A., Rastegin A.E., Rubtsov V.Ju., Shturm M., Shurter M., Wuest A. Rezultaty modelirovaniya jevoljucii temperaturnogo rezhima verhnih sloev oz. Bajkal po dannym jeksperimentov 2000-2001gg., 2004-2005gg. [The results of modeling the evolution of the temperature regime of the upper layers of the lake. Baikal according to the data of experiments in 2000-2001, 2004-2005]. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2008, vol. 1, pp. 76-83. (in Russian)
- Smirnov S.V., Kucher K.M., Granin N.G., Sturova I.V. Cejshevye kolebanija Bajkala [Seishe oscillations of Baikal]. *Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Proceedings of the RAS. Physics of the atmosphere and ocean], 2014, vol. 50, no. 1, pp. 105-116. (in Russian)
- Tiberti R., Caroni R., Cannata M., Lami A., Manca D., Strigaro D., Rogora M. Automated high frequency monitoring of Lake Maggiore through in situ sensors: system design, field test and data quality control. *Journal of Limnology*, 2021, vol. 80. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2021.2011>
- Marcé R. et al. Automatic high frequency monitoring for improved lake and reservoir management. *Environmental Science and Technology*, 2016, vol. 50, pp. 10780-10794.
- Aynutdinov V. et al. Baikal neutrino telescope – an underwater laboratory for astroparticle physics and environmental studies. *Nuclear Instruments and Methods*, 2009, vol. 598, pp. 282-288. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.08.124>
- Bronmark C., Hansson L. A. *The Biology of Lakes and Ponds*. Oxford University Press, 2005, 285 p.
- Istvanovics V., Honti M., Osztóics A., Shafik H. M., Padisak J., Yacobi Y., Eckert W. Continuous monitoring of phytoplankton dynamics in Lake Balaton (Hungary) using on-line delayed fluorescence excitation spectroscopy. *Freshw. Biol.*, 2005, vol. 50, pp. 1950–1970.
- Del Sontro T., Beaulieu J.J., Downing J.A. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change. *Limnol. Oceanogr.: Letters.*, 2018, vol. 3, no. 3, pp. 64-75. <https://doi.org/10.1002/lol2.10073>.
- Dubelaar G.B.J., Geeders P.J.F., Jonker R.R. High frequency monitoring reveals phytoplankton dynamics. *J. Environ. Monit.*, 2004, vol. 6, pp. 946-952.
- Makarov M., Aslamov I., Gnatovsky R. Environmental Monitoring of the Littoral Zone of Lake Baikal Using a Network of Automatic Hydro-Meteorological Stations: Development and Trial Run. *Sensors*, 2021, vol. 21, pp. 7659. <https://doi.org/10.3390/s21227659>
- Grechushnikova M.G. et al. Methane Emission from the Surface of the Mozhaisk Valley-Type Reservoir. *Geogr. Nat. Resour.*, 2019, vol. 40, pp. 247-255. <https://doi.org/10.1134/S1875372819030077>
- Thorpe S.A. *The Turbulent Ocean* // Cambridge University Press, 2005, 439 p.
- Troitskaya E., Budnev N., Shimaraev M. Changes in the Heat Content of Water Column in the Slope Area of the Southern Basin of Lake Baikal in the 21st Century. *Water*, 2022, vol. 14, pp. 348. <https://doi.org/10.3390/w14030348>

Сведения об авторах

Асламов Илья Александрович
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Лимнологический институт СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 3
e-mail: ilya_aslamov@bk.ru

Макаров Михаил Михайлович
кандидат географических наук,
старший научный сотрудник
Лимнологический институт СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск.
ул. Улан-Баторская, 3
e-mail: mmmsoft@hlserver.lin.irk.ru

Information about the authors

Aslamov Ilya Aleksandrovich
Candidate of Sciences (Physics and
Mathematics), Research Scientist
Limnological Institute SB RAS
3, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk,
664033, Russian Federation
e-mail: ilya_aslamov@bk.ru

Makarov Mikhail Mikhailovich
Candidate of Sciences (Geography),
Senior Research Scientist
Limnological Institute SB RAS
3, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: mmmsoft@hlserver.lin.irk.ru

Гнатовский Руслан Юрьевич*научный сотрудник**Лимнологический институт СО РАН**Россия, 664033, г. Иркутск,**ул. Улан-Баторская, 3**e-mail: gnat@hlserver.lin.irk.ru***Gnatovsky Ruslan Yurievich***Research Scientist**Limnological Institute SB RAS**3, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,**Russian Federation**e-mail: gnat@hlserver.lin.irk.ru***Портянская Инна Александровна***старший преподаватель**Иркутский государственный университет**Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Марса, 1**e-mail: iportyanskaya@mail.ru***Portianskaya Inna Aleksandrovna***Senior Lecturer**Irkutsk State University**1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,**Russian Federation**e-mail: iportyanskaya@mail.ru***Код научной специальности:** 1.6.16Статья поступила в редакцию **18.10.2022**; одобрена после рецензирования **05.12.2022**; принята к публикации **08.12.2022**The article was submitted **October, 18, 2022**; approved after reviewing **December, 5, 2022**; accepted for publication **December, 8, 2022**