



УДК 556.024:556.043:556.08:556.551(571.53)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.54.22>

Натурные испытания автономного измерителя вертикального распределения гидрофизических параметров на озере Байкал

И. А. Асламов, К. М. Кучер*

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

М. Ю. Шиховцев

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

Институт динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова СО РАН, г. Иркутск, Россия

Р. Р. Миргазов

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

М. М. Макаров

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Рассмотрен автономный измеритель вертикального распределения гидрофизических параметров, предназначенный для продолжительного мониторинга процессов в водных объектах. Особое внимание уделено проведению натурных испытаний разработанных приборов в прибрежной зоне оз. Байкал и подробному анализу полученных гидрофизических данных. Отмечено, что разработанный измеритель реализует синхронную регистрацию вертикального распределения температуры, подводной освещенности, уровня воды и интенсивности волнения. Модульная архитектура устройства на основе распределенной измерительной системы и блока регистрации с термокомпенсированными часами реального времени и энергоэффективной системой питания обеспечивает временную согласованность данных при частоте дискретизации до 1 Гц и автономную работу более года. Также подробно описаны технические решения, включая выбор сенсоров, особенности схемотехники, конструктивную реализацию и метрологические характеристики. Приведены результаты натурных испытаний двух опытных образцов, установленных летом – осенью 2024 г. в прибрежной зоне Южного Байкала. Полученные данные позволили зарегистрировать широкий спектр гидрофизических процессов: от формирования плотностной стратификации, сменяющейся вертикальным перемешиванием, до эпизодов прибрежного апвеллинга и перестройки режима сейшевых колебаний. Совместный анализ температурных профилей и гидрооптических показаний продемонстрировал высокую чувствительность прибора к динамике водных масс и их прозрачности. Результаты натурных испытаний подтверждают, что разработанный измеритель является эффективным, экономически доступным и технологически инновационным инструментом для комплексного гидрофизического мониторинга. Его применение открывает возможности для расширения сети наблюдений на оз. Байкал и получения длительных согласованных рядов

данных, необходимых как для мониторинга происходящих в озере гидрофизических процессов, так и для выявления по мере накопления данных долгосрочных климатических тенденций.

Ключевые слова: температура воды, уровень воды, волнение, освещенность, термокоса, мониторинг, Байкал.

Благодарности. Статья подготовлена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

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

Для цитирования: Натурные испытания автономного измерителя вертикального распределения гидрофизических параметров на озере Байкал / И. А. Асламов, К. М. Кучер, М. Ю. Шиховцев, Р. Р. Миргазов, М. М. Макаров // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 54. С. 22–38. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.54.22>

Original article

Field Testing of Autonomous Meter of Vertical Distribution of Hydrophysical Parameters in Lake Baikal

I. A. Aslamov, K. M. Kucher*

Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

M. Yu. Shikhovtsev

Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

V.M. Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

R. R. Mirgazov

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

M. M. Makarov

Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The paper presents an autonomous instrument designed for long-term monitoring of the vertical distribution of hydrophysical parameters in aquatic environments. Special attention is given to conducting field testing of the developed instruments in the coastal zone of Lake Baikal and to a detailed analysis of the obtained hydrophysical data. The device provides synchronous measurements of water temperature, underwater illumination, water level, and wave intensity. Its modular architecture—combining a distributed sensor line with a data-logging unit equipped with thermally compensated real-time clocks and an energy-efficient power system ensures precise temporal alignment of all data channels at sampling rates of up to 1 Hz, while enabling more than one year of autonomous operation. The article details the engineering solutions implemented in the device, including sensor selection, electronic design features, structural components, and metrological characteristics. Results from field trials of two prototype units deployed in the littoral zone of Southern Baikal during the summer–autumn period of 2024 are presented. The collected dataset captured a wide range of hydrophysical processes, from the development and breakdown of thermal stratification to episodes of coastal upwelling and shifts in the seiche oscillation regime. Combined analysis of temperature profiles and hydro-optical measurements demonstrated the high sensitivity of the instrument to the dynamics and transparency of water masses. Field results confirm that the developed system is a reliable, cost-efficient, and technologically advanced tool for comprehensive hydrophysical monitoring. Its implementation enables the expansion of observational networks on Lake Baikal and supports the acquisition of long, internally consistent data series essential for tracking hydrophysical variability in the lake and assessing emerging climate-driven trends as the dataset accumulates.

Keywords: water temperature, water level, wave activity, illumination, thermistor chain, monitoring, Baikal.

For citation: Aslamov I.A., Kucher K.M., Shikhovtsev M.Yu., Mirgazov R.R., Makarov M.M. Field Testing of Autonomous Meter of Vertical Distribution of Hydrophysical Parameters in Lake Baikal. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2025, vol. 54, pp. 22-38. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.54.22> (in Russian)

Введение

Современный гидрофизический мониторинг водоемов предполагает непрерывное наблюдение за комплексом ключевых параметров, к числу которых относятся температура, проникающая освещенность, уровень воды и динамика волнения [Смирнов, Оленин, 2015; Automatic ... , 2016; Makarov, Aslamov, Gnatovsky, 2021; Gaisky, Kozlov, 2023]. Температура является одной из основных характеристик, определяющих физические свойства водной среды. Она оказывает непосредственное влияние на плотность воды, что, в свою очередь, обуславливает вертикальную стратификацию водной толщи, интенсивность процессов перемешивания и насыщение кислородом [Гусев, 1987; Liu, Park, Santamarina, 2024]. Экологическая значимость температуры также крайне высока, поскольку от нее зависят скорость и направленность большинства физических, химических и биологических процессов в водоеме [Rising ... , 2024].

Проникающая освещенность представляет собой критически важную характеристику, которая определяет интенсивность процессов фотосинтеза, лежащих в основе формирования первичной продукции водных экосистем [Гершанович, Муромцев, 1982]. Интенсивность подводной освещенности зависит не только от внешних факторов, таких как сезонные вариации и погодные условия, но в значительной степени определяется прозрачностью воды. Таким образом, прозрачность воды служит интегральным показателем ее качества: высокая прозрачность свидетельствует о низкой концентрации взвешенных частиц, растворенной органики и отсутствии цветения, тогда как ее снижение может указывать на эвтрофикацию или загрязнение антропогенного или природного характера [Подлипенская, Бакуменко, 2021; Golubkov, Golubkov, 2024].

Изучение уровня режима, в свою очередь, необходимо для понимания водного баланса водоема. Длительный мониторинг уровня позволяет выявлять долгосрочные тенденции в изменении водного баланса озер [Измайлова, Фуксова, Дубровская, 2023]. Регистрация колебаний уровня с высокой частотой дискретизации предоставляет возможность исследования коротко-периодных процессов, таких как сейши и сгонно-нагонные явления [LevelWAN ... , 2025]. Измерения с частотой выше 1 Гц позволяют количественно оценивать параметры ветрового волнения, которое оказывает существенное влияние на стратификацию, термический режим и перемешивание водной толщи. Кроме того, волновое воздействие в сочетании с колебаниями уровня воды является ведущим фактором абразии береговой линии, ремобилизации биогенных и терригенных элементов, а также перераспределения

донных отложений, что напрямую сказывается на состоянии водной экосистемы [Карнаухова, 2019; Coastal ... , 2025].

Перечисленные гидрофизические параметры оказывают комплексное влияние на биогеохимические процессы и экологическое равновесие водных объектов. Организация их комплексного регулярного наблюдения должна являться неотъемлемой частью экологического мониторинга водоемов, что позволит выявлять в них долгосрочные тенденции и корректировать стратегию природоохранных мероприятий в условиях наблюдающихся климатических изменений и возрастающего антропогенного воздействия [Stefanidis, Papastergiadou, 2024].

В настоящее время для решения подобных задач, как правило, применяются автономные одно- или многоканальные логгеры (например, приборы серий RBRsolo, RBRduo компании RBR Ltd. или INFINITY производства JFE Advantech Co. Ltd.) [Measurements ... , 2024; Contributions ... , 2024]. Эти приборы зарекомендовали себя как надежные и высокоточные средства измерений. Их основные преимущества включают высокую метрологическую точность, компактность конструкции и простоту эксплуатации. Каждый логгер представляет собой автономное устройство, оснащенное собственным источником питания и встроенной памятью, что позволяет размещать его на заданной глубине. Однако, наряду с достоинствами, система, построенная на основе сети таких автономных регистраторов, обладает рядом существенных недостатков [Makarov, Aslamov, Gnatovsky, 2021].

Во-первых, встроенные в каждый логгер часы реального времени накапливают ошибку хода, обусловленную систематическими погрешностями кварцевых генераторов. Это нарушает синхронность временной привязки данных, зарегистрированных разными приборами, и ограничивает возможность их применения для исследования высокочастотных процессов. Во-вторых, высокая стоимость подобных систем. Стоимость простых температурных логгеров типа RBRSolo составляет в районе 1000 долл., а многопараметрические приборы стоят уже десятки тысяч долларов. Помимо первоначальных капитальных затрат на оборудование, необходимо учитывать расходы на техническое обслуживание, периодическую поверку каждого отдельного устройства и замену элементов питания, что значительно увеличивает совокупную стоимость эксплуатации измерительной системы.

Наряду с фиксированными на различных глубинах отдельными автономными приборами, также применяют автоматические профилографы. Как правило, автоматический профилограф состоит из коммерческого STD зонда, смонтированного на шасси, закрепленном на вертикально натянутом от дна до поверхности тросе. Профилограф, согласно заложенной программе, осуществляет спуск и подъем, в процессе которого производится измерение вертикального профиля гидрофизических параметров [Coastal ... , 2021]. Недостатками таких комплексов являются их чрезмерная дороговизна, энергозатратность и меньшая надежность по сравнению с измерительными системами без подвижных элементов.

Рассматриваемый в настоящей работе автономный измеритель вертикального распределения гидрофизических параметров лишен указанных недостатков. Конструкция прибора обеспечивает синхронную регистрацию данных с распределенной сети датчиков с частотой дискретизации до 1 Гц. Благодаря оптимизированной схеме питания и низкому энергопотреблению, разработанный измеритель предназначен для длительной автономной работы продолжительностью более года.

Разработка автономного измерителя велась как часть долгосрочного проекта Лимнологического института СО РАН по созданию опытного гидрофизического полигона для исследования термогидродинамических процессов в приклинной зоне оз. Байкал, целью которого является изучение бароклинных волновых процессов, а также механизмов их взаимодействия с поверхностными волнами и рельефом дна. Высокое пространственное и временное разрешение разрабатываемых датчиков позволит дополнительно исследовать процессы конвекции и турбулентности, а также развитие термических баров на озере.

Структура измерителя гидрофизических параметров

Измеритель гидрофизических параметров представляет собой модульную конструкцию, состоящую из блока регистрации и протяженной измерительной системы. Блок регистрации содержит управляющий микроконтроллер, энергонезависимую память объемом 128 Мб, высокоточные часы реального времени, преобразователи напряжения, драйвер шины передачи данных и датчик гидростатического давления с высоким разрешением.

Энергонезависимая память реализована на микросхеме MX35LF1GE4AB в миниатюрном корпусе 8-WSON, позволяет записывать данные с высокой скоростью (> 3 Мб/с) и обеспечивает сохранность данных в течение 10 лет. Низкое энергопотребление (в режиме ожидания и записи 50 мкА и 30 мА соответственно) позволяет использовать ее в приборах с автономным питанием. Один цикл измерения гидрофизических параметров (с учетом данных с двух датчиков освещенности, семи датчиков температуры и одного датчика гидростатического давления) требует 128 байт памяти, что позволяет прибору сохранить свыше 1 млн измерений в течение года работы с интервалом записи 30 с. Встроенное программное обеспечение позволяет гибко настраивать периодичность записи измерений в диапазоне от одного раза в секунду до одного раза в час, в зависимости от решаемой задачи.

Часы реального времени DS3232MZ со встроенным термокомпенсированным кварцевым резонатором обеспечивают высокую стабильность хода в широком диапазоне температур окружающей среды. Приведенная долговременная погрешность хода времени составляет ± 5 ppm ($\pm 0,432$ с в сутки) в диапазоне температур от -40 до $+85$ °C, что в два раза лучше, чем у распространенного часового генератора DS32kHz от Dallas Semiconductor. Часы имеют гибко настраиваемый выход alarm, управляющий электропитанием всей схемы измерителя и полностью отключающий его в периоды между измерениями. Широкий диапазон напряжений питания (до 4,5 В) позволяет

часам работать напрямую от литиевых элементов без промежуточных DC-DC преобразователей. Наличие дополнительной памяти объемом 236 байт и низкого энергопотребления (100 мкА) делает этот компонент привлекательным для использования в устройствах с автономным питанием.

Датчик гидростатического давления MS5803-05BA, встроенный в корпус регистратора, установлен для измерения уровня воды и оценки интенсивности волнения. Благодаря встроенному 24-битному дельта-сигма аналого-цифровому преобразователю (АЦП) со сверхнизким энергопотреблением (потребление датчика до 1,4 мА в пике во время преобразования и лишь 0,15 мкА в режиме ожидания), чувствительному тензодатчику с программной температурной компенсацией и с внутренними коэффициентами, откалиброванными на заводе, датчик оптимизирован для измерения абсолютного давления в широком диапазоне температур с высоким разрешением. Расчет уровня воды (глубины, на которую погружен логгер) производится вычитанием из его показаний атмосферного давления, измеряемого береговой метеостанцией. Интенсивность волнения оценивается по разнице между максимальной и минимальной величинами гидростатического давления в накопленном массиве значений за период измерения. Разрешающая способность датчика давления – 1 Па, что эквивалентно 0,1 мм водного столба. Доступны датчики давления на следующие максимальные глубины погружения: 10, 50 и 300 м (последний датчик более грубый, с разрешением 10 Па).

Измерительная система

Измерительная система состоит из геофизического кабеля ВП 2х0,2Э-У со встроенными по его длине модулями из датчиков температуры и освещения. Кабель подключается к блоку регистрации через 8-жильный герморазъем (AQUROV). Геофизический кабель представляет из себя витую пару в экране из термопластичной полиуретановой оболочки. Два из трех проводников задействованы для подачи напряжения питания 12 В, а третий проводник используется для двунаправленной линии обмена данными – LIN (Local Interconnect Network). Датчики каждого измерительного модуля расположены на Т-образной печатной плате с выносом чувствительных элементов от кабеля на расстояние 4 см для минимизации его влияния на измеряемую температуру, а также уменьшения возможного затенения кабелем датчика освещения. Герметизация модулей и их соединение с кабелем осуществляется заливкой двухкомпонентным оптически прозрачным полиуретаном Clear Flex 95 в специально спроектированной форме из акрила. Это алифатически прозрачный полиуретан, разработанный для применений, где требуется абсолютная прозрачность и устойчивость к воздействию ультрафиолетового излучения. Перед заливкой платы покрываются полиуретановым лаком белого цвета, чтобы минимизировать нагрев солнечным излучением. Выбор прозрачного полиуретана обусловлен тем, что каждый модуль может быть оснащен сенсором освещенности. В базовой комплектации измерительной системы применяется минимум два датчика освещения на разных горизонтах для расчета показателя ослабления света исходя из экспоненциального приближения.

Датчики температуры TMP117A характеризуются низким энергопотреблением (до 220 мкА в пике в режиме преобразования и 150 нА в режиме ожидания) и позволяют измерять температуру с разрешением $0,0078^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур от -20 до 50°C . А при небольшом накоплении и усреднении можно значительно повысить разрешение. Обмен данными с датчиком организован через интерфейс I^2C , поддерживающий адресацию до 4 устройств на одной шине. Абсолютная точность измерения температуры в пределах $0,01^{\circ}\text{C}$ обеспечена лабораторной калибровкой датчиков в жидкостном термостате ТЕРМОТЕСТ-100-40 (ТЕРМЭКС, Россия).

Датчики освещения TCS34725 имеют высокую чувствительность ($<1 \text{ мкВт/см}^2$), программируемые коэффициенты усиления и время экспозиции обеспечивают широкий динамический диапазон $3,8 \cdot 10^6:1$. Датчик измеряет интегральную интенсивность видимого диапазона, а также интенсивность в красном, синем и зеленом диапазонах длин волн, позволяя исследовать показатель ослабления в трех спектральных диапазонах. Наличие ИК-фильтра, расположенного непосредственно над чувствительными фотодиодами, повышает точность измерения интенсивности в каждом цветовом диапазоне. Низкое энергопотребление (в активном режиме и режиме ожидания 235 мкА и 65 мкА соответственно) позволяет использовать датчик в устройствах с батарейным питанием.

Микроконтроллер PIC12F1840 установлен на каждой плате датчиков для управления алгоритмом считывания данных с сенсоров температуры и освещенности, их накопления, предварительной обработки и передачи по запросу через шину LIN в логгер гидрофизических параметров. Для минимизации размеров платы был выбран корпус типа SOIC, в котором размещено: 4 Кб памяти программ и по 256 байт оперативной и энергонезависимой EEPROM памяти, АЦП, несколько таймеров, UART и встроенный тактовый генератор. Компактный корпус, низкая цена, наличие разнообразной периферии и низкое энергопотребление (30 мкА/МГц в активном режиме и 20 нА в режиме сна) делают этот контроллер идеальным кандидатом для использования его в миниатюрном датчике протяженной измерительной системы.

В качестве драйвера шины LIN используется микросхема TJA1021. По одной микросхеме установлено на каждой плате датчиков измерительной системы, и одна – в корпусе регистратора. Драйвер позволяет общаться в полудуплексном режиме всего по одному проводу с положительным потенциалом относительно земли. Компактные размеры, минимум обвязки и встроенная защита от разрядов высокого напряжения (до 6 кВ) позволяют организовывать помехозащищенную протяженную измерительную систему.

Преобразователь напряжения LDLN025M33R, с нагрузочной способностью до 250 мА, выполнен в миниатюрном корпусе sot-23 и предназначен для преобразования 12 В напряжения, поступающего по геофизическому кабелю, в напряжение питания датчика 3,3 В. Такая схема преобразования выбрана с целью минимизировать падение напряжения на геофизическом кабеле протяженной измерительной системы. Используемый преобразователь напряжения характеризуется низким уровнем шума 6,5 мкВ, что позволяет защи-

тить измерительную схему датчиков температуры и освещенности от помех по линии питания 12 В.

Система электропитания

Питание измерителя осуществляется от литий-тионилхлоридных батарей типа ER34615M с напряжением 3,6 В, соединенных параллельно. В базовой комплектации используется три элемента питания, что обеспечивает до года работы измерителя при частоте записи 1 раз в минуту. Батарейные отсеки имеют модульную структуру и могут наращиваться для достижения необходимой емкости батарей с целью увеличения длительности работы или частоты измерений.

Питание измерительной системы осуществляется от повышающего до 12 В преобразователя напряжения, включающегося на время измерения температуры и освещенности. Такой режим работы позволяет обеспечить экономию энергии и не приводит к саморазогреву датчиков температуры.

Конструктивное исполнение и монтаж

Герметичный корпус измерителя представляет собой цилиндр диаметром 50 мм и длиной 350 мм (для версии на три элемента питания), плотно фиксируемый в сварной раме из нержавеющей стали (рис. 1). Рама служит для размещения измерителя на дне водоема путем крепления к якорной системе из бетонной плиты или другого груза. На одной из крышек корпуса измерителя располагается герметичный разъем и отверстие для передачи давления среды к чувствительному элементу. Подключаемая к разъему измерительная система фиксируется вдоль грузонесущего троса, идущего от корпуса к поверхности воды, натянутого блоком поплавков.



Рис. 1. Внешний вид герметичного корпуса регистратора с системой крепления

Результаты натурных испытаний и обсуждение

Натурные испытания оборудования были проведены в летне-осенний период в прибрежной зоне Южного Байкала (рис. 2, А), характеризующийся ярко выраженной сезонной стратификацией, сложной динамикой водных масс и высокой прозрачностью воды. Испытания преследовали цель оценить способность приборов фиксировать пространственно-временную изменчивость гидрофизических процессов, характерных для байкальской экосистемы.

Два экземпляра разработанных измерителей были протестированы с июля по октябрь 2024 г. на склоне северо-западного побережья в районе

106-го км Кругобайкальской железной дороги. Автономные блоки регистрации и измерительные системы были установлены на двух станциях с глубинами 13 и 34 м (см. рис. 2, Б). Температурные датчики располагались на глубинах от 6 до 12 м на первом измерителе, и от 7 до 33 м – на втором с шагом 1 и 2 м соответственно. Верхние датчики обеих измерительных систем и отстоящие на 2 м от них (6 и 8 м на первом измерителе и 7 и 9 м на втором) были оборудованы датчиками освещенности.

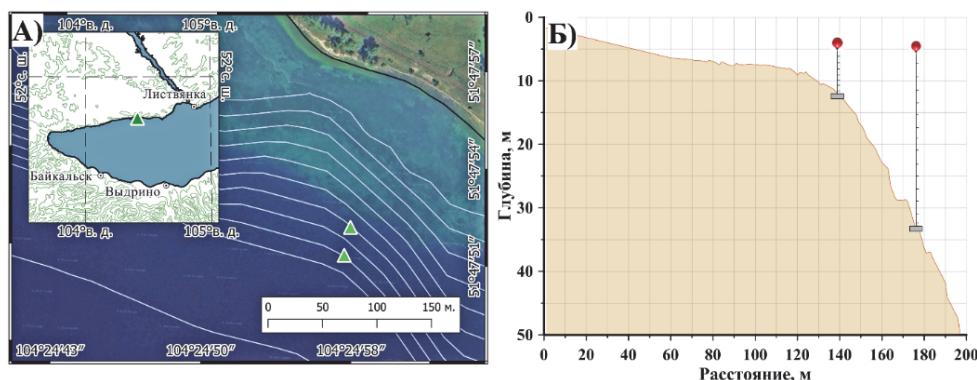


Рис. 2. А – Батиметрическая карта в районе развёртывания измерительных станций (обозначены зелеными треугольниками); Б – профиль дна в районе постановки станций

Станции были запущены и установлены 25 июля. Запись гидрофизических параметров производилась каждые 10 с. Первый пробный период измерений был закончен 17 октября, после чего станции были извлечены на поверхность. В течение последующих суток были считаны данные, произведена очистка измерительных систем и заменены элементы питания. После проведенного обслуживания станции были вновь установлены уже на длительный период наблюдений. На рис. 3 приведены показания температурных датчиков и датчиков гидростатического давления, полученные за время тестовой постановки. В процессе анализа полученных данных было выяснено, что на первом измерителе возникли проблемы с использованными элементами питания, из-за чего они разрядились раньше срока – к 22 сентября.

Из рис. 3, А, Б видно, что изменения температуры на обеих станциях имеют схожий характер, но гораздо более выражены на 34-метровой станции за счет присутствия термодатчиков в глубоких холодных слоях, в то время как в литоральной зоне температура часто выравнивалась по вертикали. Для расчета уровня воды над измерителями использовались показания атмосферного давления с метеостанции берегового центра Байкальского нейтринного телескопа, находящегося в 500 м от места постановки станций. Для удобства сравнения уровень со станции на склоне был приведен к горизонту 13 м. Показания обоих датчиков совпадали с высокой точностью, демонстрируя постепенный рост уровня озера, который достиг своих максимальных значений к середине сентября (см. рис. 3, В). Таким образом, за август прирост уровня составил порядка 30 см.

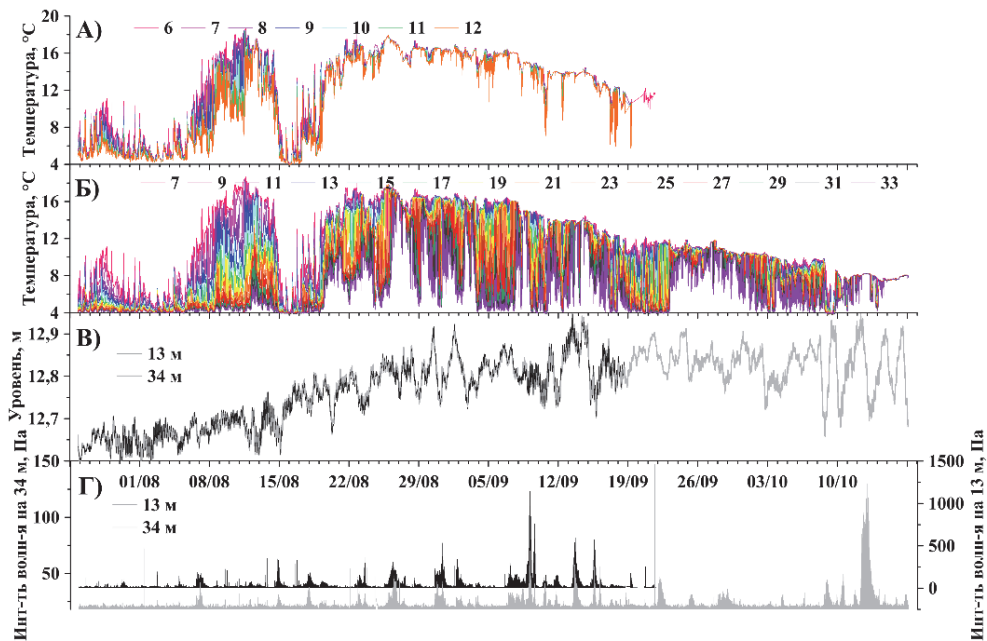


Рис. 3. Зарегистрированные данные с двух автономных измерителей: А – распределение температуры воды на станции 13 м; Б – распределение температуры воды на станции 34 м; В – рассчитанный уровень воды по двум измерителям, приведенный к горизонту 13 м; Г – интенсивность волнения по двум измерителям (для удобства шкалы смещены)

По рис. 3, Г можно сравнить интенсивность волнения по обоим измерителям, для удобства нули шкал на осях были разнесены. Обращает на себя внимание разность в масштабах: если на 13 м волнение создает колебания давления до 1000 Па, то на 20 м глубже оно едва превышает 100 Па. Меньшая регистрируемая интенсивность волновых колебаний уровня на более глубоком датчике объясняется усреднением волновой картины с гораздо большей площади поверхности озера, вследствие чего амплитуда колебания давления экспоненциально затухает с глубиной. Несмотря на отличие в амплитуде колебаний практически на порядок, их характер на обеих станциях почти идентичен и отличается лишь нечувствительностью глубоководной станции к волнениям малой амплитуды.

Интересно рассмотреть более подробно увеличенный участок данных, наглядно демонстрирующий работу датчиков гидростатического давления (рис. 4). Видно, что данные по уровню озера, рассчитанные по обоим измерителям, хорошо согласуются между собой, с отклонениями до 1 см в периоды интенсивной волновой деятельности и вновь сходящиеся при ее затухании. Изначально, 4 сентября, волнение было незначительное, и изменение уровня воды характеризовалось слабо выраженными сейшевыми колебаниями с периодом порядка 4,6 ч, соответствующем одноузловой продольной сейше [Seiche ... , 2014]. С постепенным увеличением волнения 6–7 сентября наблюдалось уменьшение амплитуды одноузловой сейши с одновременным

проявлением колебаний с периодом около 60 минут, соответствующих, по всей видимости, сейше южной котловины [Seiche ... , 2014]. Но после максимального развития волнения 9 сентября характер колебаний кардинально изменился, и уровень Байкала стал описывать ярко выраженную синусоиду одноузловой продольной сейши с амплитудой до 6 см (см. рис. 4). Определение причины наблюдаемого перестроения – будь то барометрический градиент давления, ветровой нагон или импульсное воздействие фронтов, – требует специального исследования, выходящего за рамки настоящей статьи.

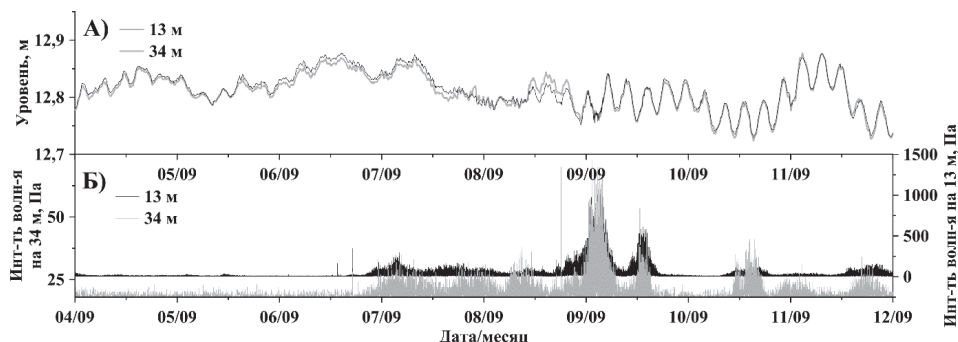


Рис. 4. Данные об уровне воды (А) и интенсивности волнения (Б) с двух измерителей в момент генерации продольных сейшевых колебаний высокой амплитуды

Рассмотрим подробнее еще одно интересное зарегистрированное событие. На рис. 5 представлен увеличенный фрагмент показаний второго измерителя с 13 по 20 августа. В это время в районе постановки развивался прибрежный апвеллинг холодных вод гиполимниона. До апвеллинга (13–14 августа) наблюдалась выраженная стратификация водной толщи, с температурами около 15–16 °С на глубине 7 м и в районе 5 °С – на 33 м.

Процесс апвеллинга был инициирован 14 августа усилением ветра северо-западного направления, что привело к сгону поверхностных вод от западного берега к восточному и сопровождалось понижением среднего уровня воды в месте наблюдений (см. рис. 5). Во второй половине дня, на фоне увеличения скорости ветра до 13 м/с и последовавшего роста волнения (см. рис. 5, Г), температура воды на всех горизонтах начала постепенно снижаться вследствие вынужденного подъема глубинных вод, компенсирующего отток вод эпилимниона. К 12 часам дня 15 августа температура во всей толще, охваченной датчиками, установилась на уровне 4 °С. Утром 16 августа ветер сменил направление на восточное и апвеллинг постепенно начал релаксировать. До исходных температур вода прогрелась только 19 августа.

Так как глубинные воды в Байкале обладают высокой прозрачностью [Ryabov, Tarashansky, 2021], в отличие от поверхностных вод эпилимниона, в котором в августе наблюдается пик цветения фитопланктона [Characteristics ... , 2007], то процесс апвеллинга также был зарегистрирован и по данным освещенности (рис. 5, А, Б). Рассчитанный показатель ослабления μ для 13 и 14 августа лежал в диапазоне 0,25–0,3 м⁻¹, а уже 15 августа он снизился в два раза до 0,15 м⁻¹, обозначив приход более прозрачной воды.

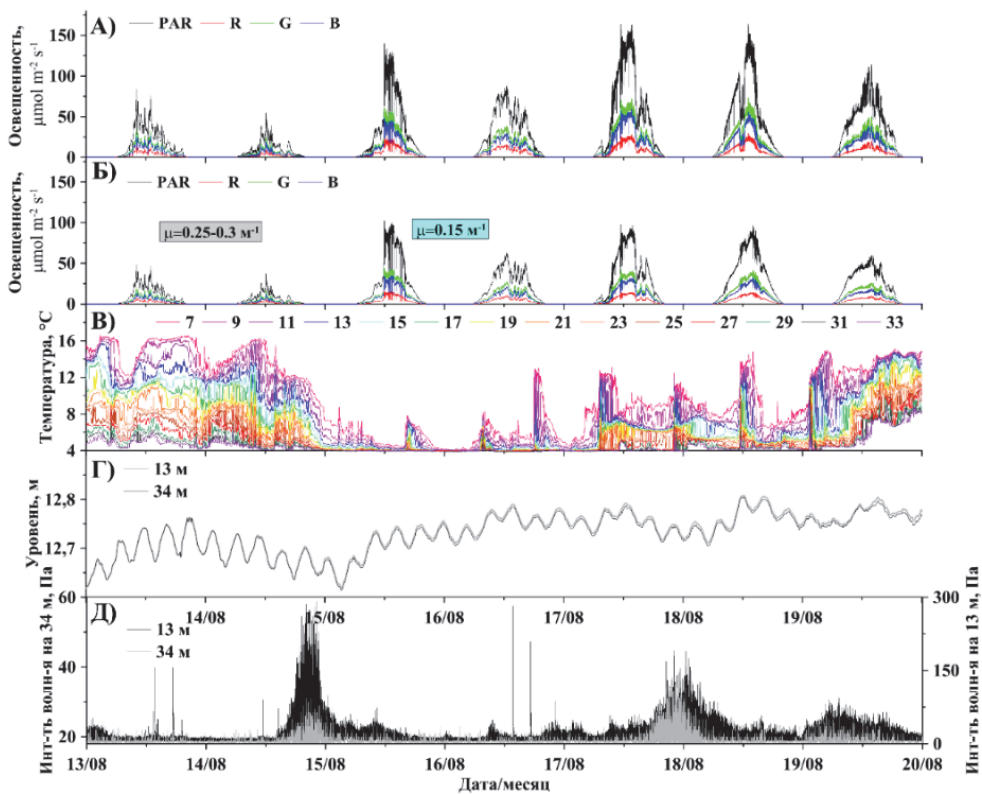


Рис. 5. Данные по освещенности на горизонте 7 (А) и 9 (Б) м, температуре воды (В), уровне воды (Г) и интенсивности волнения (Д) в момент апвеллинга. На панели Б в закрашенных прямоугольниках приведены оценки показателя ослабления μ

Присутствие в измерительной системе оптических датчиков требует поднятия вопроса об их возможном биообрастании – ключевом факторе, снижающем точность долгосрочного автономного оптического мониторинга. Обрастание датчиков колониями бактерий, микроводорослей и более крупными организмами приводит к систематическому дрейфу показаний сенсоров, в некоторых случаях эффект может проявиться уже через неделю [Automated ... , 2021]. В настоящее время наиболее распространенным методом борьбы с биообрастанием остается регулярная ручная очистка, которая, однако, сводит на нет ключевые преимущества автоматизированных систем. Поиск эффективных автономных методов защиты от обрастания является приоритетной задачей для развития мониторинга. Существующие решения (механические скребки, покрытия с биоцидами, УФ-стерилизация или электромеханические вибрационные системы) часто имеют ограничения из-за высокого энергопотребления, сложности интеграции или негативного влияния на чувствительные элементы [Automatic ... , 2016]. Важно отметить, что интенсивность биообрастания напрямую связана с трофическим статусом водоема. В олиготрофных водоемах, таких как оз. Байкал, характеризующихся низкой биологической продуктивностью, скорость обрастания существен-

но ниже, особенно на глубинах за пределами фотической зоны. Это позволяет автономным системам, размещенным в глубоководных районах, функционировать с приемлемым уровнем дрейфа данных в течение продолжительных периодов. Тем не менее даже в таких условиях проблема постепенного накопления отложений остается актуальной для многомесячных и тем более многолетних наблюдений, и без периодического обслуживания биооптические данные следует рассматривать лишь в качественном отношении.

Заключение

Разработан и испытан в натурных условиях автономный измеритель для комплексного гидрофизического мониторинга водоемов. Ключевым результатом настоящего исследования стало подтверждение эффективности прибора в условиях оз. Байкал – уникального глубоководного водоема, отличающегося сложной пространственно-временной динамикой водных масс. Преимуществом примененного подхода при проектировании измерителя являлась единая временная привязка данных со всей измерительной системы, что устраняет неопределенности, присущие системам из отдельных логгеров, и повышает достоверность установления причинно-следственных связей. Результаты натурных испытаний подтвердили работоспособность автономного измерителя и его способность выполнять длительные синхронные измерения вертикального профиля температуры, показателя ослабления света, уровня воды и интенсивности волнения. Четырехмесячная работа двух опытных образцов на горизонтах 13 и 34 м в прибрежной зоне Южного Байкала с интервалом измерений 10 с позволила получить согласованный массив данных для анализа взаимосвязанных процессов.

Проведенный анализ полученных данных позволил выявить четкую временную последовательность событий во время эпизода прибрежного апвеллинга 14–19 августа 2024 г. Установлена связь между усилением северо-западного ветра, сгонным понижением уровня, подъемом вод гипolimниона и последующим охлаждением всей водной толщи до $\sim 4^\circ\text{C}$ в течение суток. Синхронное снижение показателя ослабления света с $0,25\text{--}0,3\text{ м}^{-1}$ до $0,15\text{ м}^{-1}$ дополнительно подтвердило замещение водных масс и показало эффективность совместного анализа температурных и гидрооптических данных для идентификации подобных явлений. Дополнительно продемонстрирована возможность измерителя для детального наблюдения за уровневым режимом водоема во всех диапазонах частот (от короткопериодного волнения и сейшвых колебаний до синоптических флуктуаций и долговременных трендов). Показан момент перестройки колебаний уровня, вызванный сильным ветровым воздействием, идентифицированным по интенсификации волнения.

Таким образом, разработанный измеритель является функциональным инструментом для комплексного мониторинга водоемов, подтвердившим свою эффективность. Запланированное в дальнейшем расширение сети установленных станций и создание ортогонального берегу разреза с объединением измерителей в единый гидрофизический полигон позволит детально изучить пространственную структуру процессов в приклинной зоне оз. Байкал

(прохождение осеннего и весеннего термобара, ап- и даунвеллингов, генерацию мезомасштабных вихрей и др.). Оснащение установленных измерителей каналом передачи данных в режиме, близком к реальному времени, и накопление длительных рядов наблюдений создадут основу для оценки многолетних трендов в условиях изменяющегося климата. Низкие эксплуатационные требования и экономическая эффективность разработанного измерителя делают его практичным и доступным решением для организации долговременного мониторинга озера.

Список литературы

- Гершанович Д. Е., Муромцев А. М. Океанологические основы биохимической продуктивности Мирового океана. Л. : Гидрометеиздат, 1982. 319 с.
- Гусев А. М. Основы океанологии. М. : Изд-во МГУ, 1987. 247 с.
- Измайлова А. В., Фуксова Т. В., Дубровская К. А. Многолетние изменения основных составляющих приходной части водного баланса крупнейших водохранилищ азиатской территории России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 14–16. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_3_4
- Карнаухова Г. А. Обстановки осадконакопления и особенности состава донных отложений в Ангарских водохранилищах // Отечественная геология. 2019. № 3. С. 74–82.
- Подлипенская Л. Е., Бакуменко Ю. С. Исследование процессов эвтрофикации и самоочищения водоемов // Экологический вестник Донбасса. 2021. № 1. С. 10–18.
- Смирнов Г. В., Оленин А. Л. Морские информационно-измерительные системы и новые каналы измерения гидрофизических параметров // Океанология. 2015. Т. 55, № 2. С. 321–325.
- 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 [et al.] // Journal of Limnology. 2021. Vol. 80. N 2.
- Automatic High Frequency Monitoring for Improved Lake and Reservoir Management / R. Marcé, G. George, P. Buscarinu [et al.] // Environmental Science & Technology. 2016. Vol. 50. N 20. P. 10780–10794. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01604>
- Characteristics of Lake Baikal summer phytoplankton and autotrophic picoplankton / O. I. Belykh, G. V. Pomazkina, I. V. Tikhonova [et al.] // International Journal on Algae. 2007. Vol. 9, No. 3. P. 247–263.
- Coastal Erosion as a Major Sediment Source in the Inner Gulf of Thailand: Implications for Carbon Dynamics in Tropical Coastal Ocean Systems / B. Wei, S. Kusch, T. J. J. Hanebuth [et al.] // Geophysical Research Letters. 2025. Vol. 52, N 10. Art. e2025GL115606.
- Coastal Observation Using a Vertical Profiling System at the Southern Coast of Korea / Y. Park, S. Seo, D. G. Kim [et al.] // Frontiers in Marine Science. 2021. Vol. 8.
- Contributions of Tropical Cyclones and Internal Tides to Deep Near-Inertial Kinetic Energy Under Eddy Modulation / Z. Zhang, J. Gao, J. Wang, F. Wang // Geophysical Research Letters. 2024. Vol. 51, N 24. P. 1–9.
- Gaisky P. V., Kozlov I. E. Thermoprofilemeter for measuring the vertical temperature distribution in the upper 100-meter layer of the sea and its testing in the Arctic basin // Ecol. Saf. Coast. Shelf Zones Sea. 2023. N 1. P. 137–145.
- Golubkov M., Golubkov S. Patterns of the relationship between the Secchi disk depth and the optical characteristics of water in the Neva Estuary (Baltic Sea): the influence of environmental variables // Frontiers in Marine Science. 2024. Vol. 11. P. 1265382–1265397.
- LevelWAN: a cost-effective, open-source IoT system for water level monitoring in highly dynamic aquatic environments / I. Cherif, F. Cherqui, F. Perret [et al.] // HardwareX. 2025. Vol. 23. Art. e00685.
- Liu M., Park J., Santamarina J.C. Stratified water columns: homogenization and interface evolution // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. 11453. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62035-w>

Makarov M. M., Aslamov I. A., Gnatovsky R. Yu. 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, N 22. P. 7659–7673. <https://doi.org/10.3390/s21227659>

Measurements of dune erosion processes during the RealDune/REFLEX experiments / P. van Wiechen, J. Rutten, S. de Vries [et al.] // *Scientific data*. 2024. Vol. 11, N 1. P. 421–439.

Rising water temperature in rivers: Ecological impacts and future resilience / M. F. Johnson, L. K. Albertson, A. C. Algar [et al.] // *Wiley Interdisciplinary Reviews Water*. 2024. Vol. 11, N 4. Art. e1724.

Ryabov E., Tarashansky B. Monitoring of optical properties of deep lake water // *Journal of Instrumentation*. 2021. Vol. 16. Art. C09001. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/09/C09001>

Seiche oscillations in Lake Baikal / S. V. Smirnov, K. M. Kucher, N. G. Granin [et al.] // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2014. Vol. 50, N 1. P. 92–102. <https://doi.org/10.1134/S0001433813050125>

Stefanidis K., Papastergiadou E. Ecological Monitoring and Assessment of Freshwater Ecosystems: New Trends and Future Challenges // *Water*. 2024. Vol. 16, N 11. P. 1460–1468.

References

Gershanovich D.E., Muromcev A.M. *Okeanologicheskie osnovy biohimicheskoy produktivnosti Mirovogo okeana* [Oceanological foundations of the biochemical productivity of the World Ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982, 319 p. (in Russian)

Gusev A.M. *Osnovy okeanologii* [Fundamentals of Oceanology]. Moscow, MSU Publ., 1987, 247 p. (in Russian)

Izmajlova A.V., Fuksova T.V., Dubrovskaja K.A. Mnogoletnie izmeneniya osnovnykh sostavljajushhih prihodnoj chasti vodnogo balansa krupnejshih vodohranilishh aziatskoj territorii Rossii [Long-term variations of the main inflow components in the water balance of the largest reservoirs in the Asian territory of Russia]. *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie* [Water Management in Russia: Problems, Technologies, Governance], 2023, no. 3, pp. 14–16. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_3_4 (in Russian)

Karnauhova G.A. Obstanovki osadkonakoplenija i osobennosti sostava donnyh otlozhenij v Angarskih vodohranilishhah [Sedimentation environments and composition features of bottom sediments in the Angara reservoirs]. *Otechestvennaja geologija* [Russian Geology], 2019, no. 3, pp. 74–82. (in Russian)

Podlipenskaja L.E., Bakumenko Ju.S. *Issledovanie processov jevtrofikacii i samoochishhenija vodoemov* [Investigation of eutrophication and self-purification processes in water bodies]. *Jekologicheskij vestnik Donbassa* [Ecological Bulletin of Donbass], 2021, no. 1, pp. 10–18. (in Russian)

Smirnov G.V., Olenin A.L. Morskie informacionno-izmeritel'nye sistemy i novye kanaly izmerenija gidrofizicheskikh parametrov [Marine Information-Measuring Systems and New Channels for Measuring Hydrophysical Parameters]. *Okeanologija*. [Oceanology], 2015, vol. 55, no. 2, pp. 321–325. (in Russian)

Tiberti R., Caroni R., Cannata M. et al. 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, no. 2.

Marcé R., George G., Buscarinu P. et al. Automatic High Frequency Monitoring for Improved Lake and Reservoir Management. *Environmental Science & Technology*, 2016, vol. 50, no. 20, pp. 10780–10794. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01604>

Belykh O.I., Pomazkina G.V., Tikhonova I.V. et al. Characteristics of Lake Baikal summer phytoplankton and autotrophic picoplankton. *International Journal on Algae*, 2007, vol. 9, no. 3, pp. 247–263.

Wei B., Kusch S., Hanebuth T.J.J. et al. Coastal Erosion as a Major Sediment Source in the Inner Gulf of Thailand: Implications for Carbon Dynamics in Tropical Coastal Ocean Systems. *Geophysical Research Letters*, 2025, vol. 52, no. 10, art. e2025GL115606.

Park Y., Seo S., Kim D.G., et al. Coastal Observation Using a Vertical Profiling System at the Southern Coast of Korea. *Frontiers in Marine Science*, 2021, vol. 8.

Zhang Z., Gao J., Wang J. et al. Contributions of Tropical Cyclones and Internal Tides To Deep Near-Inertial Kinetic Energy Under Eddy Modulation. *Geophysical Research Letters*, 2024, vol. 51, no. 24, pp. 1–9.

Gaisky P.V., Kozlov I.E. Thermoprofilemeter for measuring the vertical temperature distribution in the upper 100-meter layer of the sea and its testing in the Arctic basin. *Ecol. Saf. Coast. Shelf Zones Sea*, 2023, no. 1, pp. 137-145.

Golubkov M., Golubkov S. Patterns of the relationship between the Secchi disk depth and the optical characteristics of water in the Neva Estuary (Baltic Sea): the influence of environmental variables. *Frontiers in Marine Science*, 2024, vol. 11, pp. 1265382-1265397.

Cherif I., Cherqui F., Perret F., et al. LevelWAN: a cost-effective, open-source IoT system for water level monitoring in highly dynamic aquatic environments. *HardwareX*, 2025, vol. 23, pp. e00685.

Liu M., Park J., Santamarina J.C. Stratified water columns: homogenization and interface evolution. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, art. 11453. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62035-w>

Makarov M.M., Aslamov I.A., Gnatovsky R.Yu. 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, no. 22, pp. 7659-7673. <https://doi.org/10.3390/s21227659>

van Wiechen P., Rutten J., de Vries S. et al. Measurements of dune erosion processes during the RealDune/REFLEX experiments. *Scientific data*, 2024, vol. 11, no. 1, pp. 421-439.

Johnson M.F., Albertson L.K., Algar A.C. et al. Rising water temperature in rivers: Ecological impacts and future resilience. *Wiley Interdisciplinary Reviews Water*, 2024, vol. 11, no. 4, art. e1724.

Ryabov E., Tarashansky B. Monitoring of optical properties of deep lake water. *Journal of Instrumentation*, 2021, vol. 16, art. C09001. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/09/C09001>

Smirnov S.V., Kucher K.M., Granin N.G., et al. Seiche oscillations in Lake Baikal. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 92-102. <https://doi.org/10.1134/S0001433813050125>

Stefanidis K., Papastergiadou E. Ecological Monitoring and Assessment of Freshwater Ecosystems: New Trends and Future Challenges. *Water*, 2024, vol. 16, no. 11, pp. 1460-1468.

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

Кучер Константин Мировиславович

главный специалист по электронике
Лимнологический институт СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 3
e-mail: kost@hlserver.lin.irk.ru

Шиховцев Максим Юрьевич

кандидат географических наук,
младший научный сотрудник
Лимнологический институт СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 3
младший научный сотрудник
Институт динамики систем и теории
управления имени В. М. Матросова
СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 134
e-mail: max97irk@yandex.ru

Information about the authors

Aslamov Ilya Aleksandrovich

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

Kucher Konstantin Miroslavovich

Electronics Engineer
Limnological Institute SB RAS
3, Ulan Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: kost@hlserver.lin.irk.ru

Shikhovtsev Maksim Yurievich

Candidate of Sciences (Geography), Junior
Research Scientist
Limnological Institute SB RAS
3, Ulan Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
Junior Research Scientist
V. M. Matrosov Institute of System Dynamics
and Control Theory SB RAS
134, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: max97irk@yandex.ru

Миргазов Рашид Рамзельевич
старший научный сотрудник
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: mrashid777@rambler.ru

Mirgazov Rashid Ramzelevich
Senior Research Scientist
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: mrashid777@rambler.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

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

Код научной специальности: 1.6.16

Статья поступила в редакцию 03.11.2025; одобрена после рецензирования 12.12.2025; принята к публикации 15.12.2025

The article was submitted November, 03, 2025; approved after reviewing December, 12, 2025; accepted for publication December, 15, 2025