

УДК 556.082, 556.55

ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ ЛИМНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА ГЛУБОКОГО, РУЗСКИЙ ОКРУГ, МОСКОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)¹

© 2025 г. А. Г. Островский^{а,*}, А. Г. Зацепин^а, О. Ю. Кочетов^а, Д. А. Швоев^а,
А. Н. Дроздова^а, Н. М. Коровчинский^б

^аИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997 Россия

^бИнститут проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, 119071 Россия

*e-mail: osasha@ocean.ru

Поступила в редакцию 08.05.2024 г.

После доработки 24.06.2024 г.

Принята к публикации 25.10.2024 г.

Представлен новый подход к проведению экспериментальных исследований в водной толще в озерах и водохранилищах с помощью роботизированного зонда-профилографа “Винчи”. Автономный подводный аппарат разработан для проведения регулярных мультипараметрических измерений вертикальных профилей (до глубины 60 м) в течение длительного времени (> 1 мес.) в автоматическом режиме на заякоренной гидрологической станции. Опытная эксплуатация аппарата была осуществлена в оз. Глубоком (Рузский район, Московская область) в 2022–2023 гг. Наблюдения позволили детально описать сезонную эволюцию водной среды, включая переход от состояния гомотермии к прямой термической стратификации озера с формированием гипоксии в гипolimнионе в центральной глубоководной котловине озера. В придонном слое были обнаружены интенсивные внутрисуточные колебания содержания растворенного кислорода, температуры и мутности вод. Выдвинута гипотеза о том, что в весенне-летний период гипоксия формируется не только за счет барьерного эффекта металимниона, но также из-за роста потребления кислорода на микробиологическое окисление частиц детрита, поднятых со дна под воздействием пульсирующих выходов подземных вод и взмученных в придонном слое.

Ключевые слова: автономный подводный зонд, озеро Глубокое, гипolimнион, кислородная стратификация, гипоксия, временная изменчивость

DOI: 10.31857/S0321059625030134 EDN: SYCAFI

ВВЕДЕНИЕ

Одно из самых глубоких озер Подмоскovie – Глубокое исследуется со второй половины XIX в. [11]. Оно имеет ледниково-карстовое происхождение [5] и расположено в ложе Тростенской впадины, которая, в свою очередь, может иметь тектоническое происхождение [2].

В 1960-х гг. в ходе гидромелиорации, проведенной на болотистом водосборе озера, поверхностный сток был отведен системой канав напрямую в р. Малая Истра, в результате чего уровень озера понизился. Считается, что в настоящее время водное питание озеро получает за

счет грунтового стока, склонового стока талых вод и атмосферных осадков [9]. Не исключается, что свою роль играют и подводные родники, но этот вопрос остается мало изученным.

Глубокое озеро относительно небольшое по площади (593 тыс. м²), дно имеет характерную форму с подводной террасой глубиной до 8–10 м и шириной 100–300 м, заканчивающаяся резким свалом в центральной чашеобразной котловине диаметром в нижней части 150–200 м, с максимальными глубинами 30–32 м от уреза воды. Геоморфология дна озера способствует развитию явлений застойности вод гипolimниона в летнее и зимнее время. По характеру вентиляции вод оз. Глубокое относится к димиктическим водоемам с двумя периодами полного перемешивания – весной после схода льда и осенью [7, 8].

¹ Статья подготовлена по материалам исследований, выполненных в рамках государственного задания FMWE-2024-0024.

Несколько лет назад интерес к динамическим процессам в оз. Глубоком возник снова. С июня 2017 г. начались гидрологические исследования с помощью современных приборов производства компании “YSI Inc.” (США) [6]. В ходе мониторинга в безледный период года регулярно 1–2 раза в месяц проводятся наблюдения на рейдовой вертикали в центральной котловине озера. В состав наблюдений входят измерения нижеследующих параметров: температуры воды, содержания растворенного в воде кислорода, величины рН, а также прозрачности воды с помощью диска Секки. Проводится отбор проб из поверхностного, придонного слоев и на трех промежуточных горизонтах с целью последующего гидрохимического анализа.

Современные данные о вертикальных распределениях температуры, кислорода и прозрачности вод, а также об уровне воды оз. Глубокого в теплые полугодия (с апреля по октябрь) 2017–2021 гг. были приведены в работе [3]. Согласно этим данным, водная толща озера наиболее равномерно насыщена кислородом весной. В летний сезон оксиклин обычно располагается на глубинах 5–8 м, а в октябре заглубляется. В августе–сентябре 2017, 2018 и 2020 гг. отмечен промежуточный минимум кислорода. Глубокая зона низкой концентрации кислорода (<1 мг/л) наблюдается в гипolimнионе примерно с середины июля, причем глубина залегания верхней границы этой зоны может сильно варьировать от года к году.

Эпизодичные ежемесячные наблюдения позволили получить данные об эволюции гидрологических условий на временных масштабах >1 мес. в теплое время года, но при этом процессы развития гипоксии на масштабах от нескольких часов до нескольких суток остались не исследованными. Редкие измерения не позволяют изучать процессы перемешивания и определять продолжительность летней стратификации (например, [12]). Эпизодичность наблюдений можно отчасти компенсировать, измеряя температуру воды и растворенный кислород на фиксированных горизонтах с помощью цепочек датчиков (например, [1]). Поэтому в мае 2018 г. в оз. Глубоком на девяти горизонтах рейдовой вертикали (0,5, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, и 26 м) были

установлены логгеры температуры воды “НОВО Pendant” (Австралия) [6]. Однако и этот подход не решил задачу получения тонкоструктурных (с вертикальным разрешением порядка 10 см) вертикальных профилей параметров водной среды в гипolimнионе, где развивается гипоксия.

Для более детального изучения внутрисуточной и межсуточной изменчивости целесообразно проводить мультипараметрические измерения с периодом один раз в 1–3 ч с шагом 10–20 см по вертикали от поверхности раздела вода–воздух до придонного слоя. Получить длинные временные ряды данных с высоким вертикальным разрешением реально, если использовать автономный подводный аппарат. Получаемые таким способом вертикальные профили мультипараметрических данных однородны, поскольку измерения проводятся одним набором датчиков с одинаковой точностью во всем столбе воды. Эти аргументы легли в основу решения о постановке в оз. Глубоком гидрологической станции с подводным аппаратом для зондирования водной среды в автоматическом режиме, чему и посвящена настоящая статья. Необходимо было использовать подводный аппарат с большой автономностью, который мог бы совершать измерения в стандартные сроки или чаще в заданной географической точке и оперативно передавать данные измерений после всплытия. Для погружений аппарата-профилографа на глубину требуется, чтобы его герметичный корпус был прочным (он должен выдерживать наружное давление в несколько атмосфер). Микроэлектронная система аппарата в автоматическом режиме должна управлять как процессом погружения/всплытия, так и гидрологическими датчиками и устройствами приема/передачи данных. Автономность аппарата должна быть достаточно продолжительной, чтобы за одну постановку получить сотни вертикальных профилей параметров водной среды, на измерение которых обычными методами требовались бы многократно большие вложения материальных и трудовых ресурсов.

Решение указанных задач возможно на основе новой технологии автоматизированного мониторинга водной среды, разработанной в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Эта технология основана на применении созданного авто-

рами настоящей статьи автономного привязного подводного аппарата, названного “Винчи” [13]. Аппарат оборудован лебедкой и прецизионными гидрологическими датчиками, стабильно работающими в автономном режиме в течение длительного времени. С помощью аппарата можно получить длинные частые (с интервалом ~1 ч) временные ряды однородных данных о водной толще от дна (от глубин < 60 м) до поверхности воды с высоким вертикальным разрешением (~ 10 см). Постановки аппарата “Винчи” выполнены в оз. Глубоком в весенне-летний период в 2022 и 2023 гг. Ниже описано оборудование аппарата “Винчи”, а затем представлены полученные данные о короткопериодной изменчивости в гипolimнионе, которые меняют представления о формировании гипоксии в придонном слое озера.

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

Автономный подводный аппарат “Винчи” (рис. 1) предназначен для проведения регулярных измерений вертикальных профилей параметров водной среды в автоматическом режиме во внутренних водоемах и в прибрежной зоне моря в течение длительного времени. “Винчи” компактен и удобен для постановок с малых плавсредств. Технические характеристики аппарата приведены в табл. 1.

Зонд-профилограф “Винчи” спроектирован так, чтобы стабилизировать его положение в потоке воды. Конструктивная схема тримарана включает главный цилиндрический корпус с двумя присоединенными цилиндрическими поплавками меньшего диаметра, которые предназначены для придания аппарату остойчивости. Аппарат обладает положительной плавучестью и стремится поддерживать горизонтальное положение благодаря хвостовому стабилизатору и системе подвеса. В “мокром” отсеке главного корпуса располагается барабан электрической лебедки, на который намотан кевларовый трос с диаметром 2–3 мм, соединенный другим концом с донным якорем или притопленным бумом. Разматывая трос с барабана, аппарат всплывает под действием собственной положительной плавучести, а наматывая трос на барабан, аппарат опускается. В периоды между циклами погружения/всплытия аппарат базируется в придонном слое для укрытия от вандализма и воздействия волн.

Зонд-профилограф работает в автоматическом режиме, периодически включаясь, чтобы погрузиться под воду и провести измерения вертикальных профилей параметров водной среды. При погружении аппарат доходит до ограничителя, установленного на тросе на расстоянии 1.5 м над донным якорем. Достигнув придонного слоя, аппарат входит в спящий режим до следую-

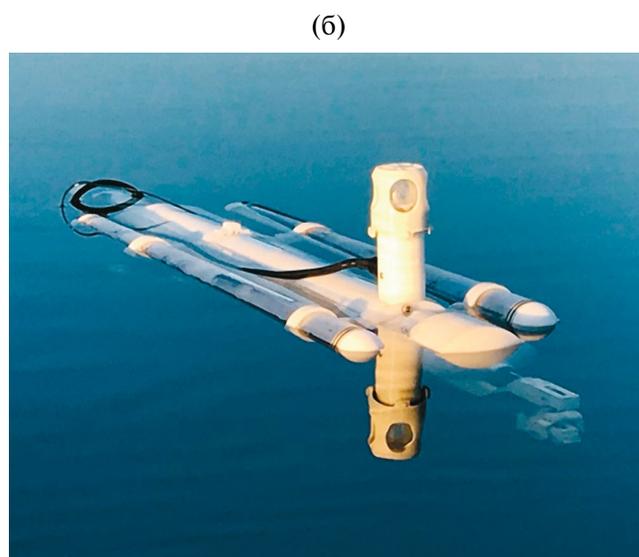
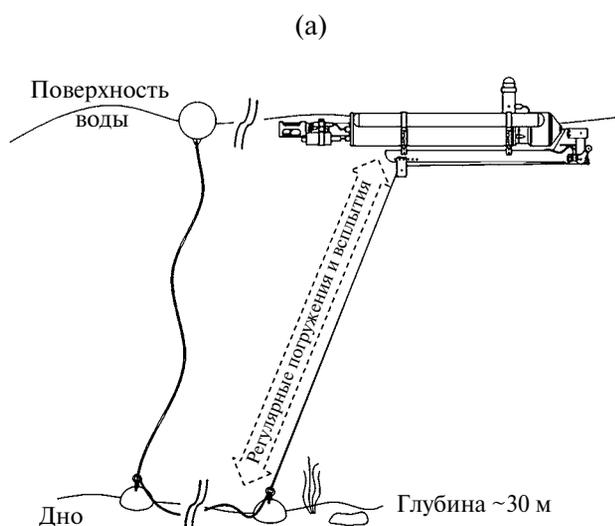


Рис. 1. Слева – схема постановки гидрологической станции с зондом-профилографом “Винчи” в оз. Глубоком, справа – зонд-профилограф в надводном положении перед погружением. Наклон троса может возникать под действием течения.

Таблица 1. Технические характеристики зонда-профилографа “Винчи”

Профилирование	
Скорость погружения/всплытия	0.1–0.3 м/с
Суммарная протяженность хода	25 км
Глубина места постановки	7–60 м
Скорость фонового течения	0.3 м/с
Состояние моря	Морское волнение до 3 баллов
Число циклов погружения / всплытия в сутки	Максимум от 100 циклов в сутки (для глубины постановки 60 м) до 200 циклов в сутки (для глубины постановки 10 м) Минимум 1 цикл/сут
Рабочий диапазон глубин	0–60 м
Измерительные датчики	
Основные	Зонд электропроводности температуры и давления RBRconcerto C.T.D++ Logger (RBR Ltd., Канада) с флуориметром Seapoint Chlorophyll Fluorometer и турбидиметром Turbidity Meter (Seapoint Sensors, США). Датчик растворенного кислорода Oxygen Optode 4831F (Aanderaa Data Instruments AS, Норвегия) или Зонд мультипараметрический EXO2 (YSI Inc. / Xylem Inc., США) с датчиком давления и с центральной системой механической очистки сенсорных элементов, а также с комплектом съемных датчиков: электропроводности и температуры воды, флуоресценции хлорофилла <i>a</i> , фикоэретрина, мутности, FDOM и растворенного кислорода
Опциональные	Датчик фотосинтетически активной радиации
Позиционирование и связь	
Позиционирование	GPS/GLONASS
Связь дальняя	LTE/3G/GSM
Связь ближняя	Bluetooth
Поиск и обнаружение	Светодиодный маяк
Внутренняя память	
Тип	Карта microSD
Массогабаритные и прочностные характеристики	
Плаучность	> 40 Н в пресной воде
Длина × ширина × высота	1620 (с RBRconcerto C.T.D++) × 520 × 360 мм
Масса в сборе в воздухе	39 кг
Максимальное внешнее давление	10 бар
Диаметр, длина и усилие до разрыва троса	2.5–3 мм, 60–70 м, > 5000 Н
Батарея	
Тип	Аккумулятор
Емкость	930 Вт ч
Номинальное напряжение	24 В
Программное обеспечение [6]	
Предустановленное Графический интерфейс с функциями диагностики и программирования	Модульный фреймворк RTOS Кросс-платформенное GUI-приложение

шего запланированного подъема. При всплытии на поверхность, определив свое местоположение по данным спутниковой навигации, аппарат передает по каналу мобильной телефонной связи свои географические координаты и данные измерений, а также принимает команды управления от оператора. Поисково-коммуникационный модуль аппарата имеет в своем составе модем GSM и радиоантенну, модем GPS/Глонасс, светодиодный маяк и датчик поверхности раздела вода–воздух.

На зонде-профилографе устанавливается комплект датчиков, например, “RBRCConcerto” (Канада) или “YSI EXO2” (США). К измеряемым параметрам относятся: температура и электропроводность воды, гидростатическое давление, содержание растворенного кислорода, флуоресценция хлорофилла “а” и содержание взвешенного вещества (мутность). В оз. Глубоком измерения электропроводности и температуры воды проводились с помощью прецизионного зонда “RBRCConcerto C.T.D++” (Канада), точность которого по температуре составляет $\pm 0.002^\circ\text{C}$, разрешение не хуже 0.00005°C , временная постоянная датчика ≤ 0.1 с, дрейф датчика $0.002^\circ\text{C}/\text{год}$. Такие высокие требования к датчику температуры обусловлены тем, что амплитуда колебаний температуры воды очень мала в условиях гомотермии в нижней части гипolimниона. Точность измерений электропроводности составляет ± 0.003 мСм/см, разрешение ≥ 0.001 мСм/см, стабильность датчика 0.01 мСм/см/год. Данные о мутности получены в условных единицах – NTU (Nephelometric Turbidity Unit). В качестве датчика растворенного кислорода использован оптический датчик “Андера 4831F” (“AANDERAA”, Норвегия). По спецификации производителя этот датчик – один из самых стабильных и малоинерционных в своем классе, его время отклика ≤ 8 с.

Аппарат “Винчи” обеспечивает стабилизированное электропитание для датчиков, контроль процесса измерений параметров водной среды, а также прием и запись в память данных измерений и передачу этих данных пользователю в оперативном режиме. Аппарат поставляется с предустановленным программным обеспечением, а также с программным обеспечением опе-

ратора и серверным программным обеспечением на электронных носителях.

ВРЕМЯ И МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данное исследование проведено на базе Гидробиологической станции “Глубокое озеро” им. Н.Ю. Зографа Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова (ИПЭЭ) РАН. Постановки аппарата “Винчи” осуществлялись в центральной части оз. Глубокого в окрестности географической точки $55^\circ 45' 50''$ с.ш., $36^\circ 30' 47''$ в.д. на глубинах 26–30 м. Наиболее длительные постановки были выполнены в 2022 г. с 7 мая по 8 июня (получено 403 набора вертикальных профилей) и с 15 июля по 19 августа (445 профилей). Зонд-профилограф был запрограммирован на работу в режиме погружение/всплытие с интервалом в 1 ч и в 2 ч (также были периоды учащенных измерений в течение суток).

В 2023 г. программное обеспечение аппарата было доработано, главным образом, в целях сокращения времени, затрачиваемого на сеанс связи, когда аппарат находится в надводном положении. Натурный эксперимент с доработанным аппаратом был проведен 4–17 августа 2023 г. (564 профиля). В этот период аппарат был запрограммирован на выполнение циклов с интервалом 0.5 ч.

По данным измерений параметров водной среды (т. е. по временным рядам вертикальных профилей) были построены графики в координатах глубины и времени. Проведена статистическая обработка полученных временных рядов. В частности, вычислены коэффициенты корреляции по временным рядам наблюдений, из которых предварительно были удалены линейные тренды.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Наблюдения 2022 г.

Данные измерений зонда-профилографа “Винчи” в глубоководной центральной части оз. Глубокого позволили в деталях проследить процесс фор-

мирования металимниона в мае 2022 г. Переход от условий гомотермии к прямой термической стратификации начался, по-видимому, еще в апреле. В начале мая температура воды в эпилимнионе составила 7–8°C, что было на 3–4°C выше, чем в гиполимнионе, где оставалась на минимальных значениях в диапазоне 4–5°C после зимы. Гиполимнион был насыщен кислородом (220–240 мкм). Как показали измерения взвеси с помощью турбидиметра, в условиях насыщенности водной толщи кислородом наблюдались интенсивные суточные вертикальные миграции мезозoopланктона от приповерхностного слоя толщиной 2–4 м до придонного слоя воды.

Дневной прогрев за счет поглощения водой коротковолновой солнечной радиации усилился к концу мая. К 11 мая металимнион располагался на горизонтах 7–8 м, а затем по мере прогрева рос перепад между приповерхностным слоем и слоем глубже 8–9 м, в котором оставалась практически неизменной. Таким образом, верхняя граница термоклина поднималась, т. е. металимнион расширялся за счет эпилимниона. Стратификация постепенно усиливалась, и к 30 мая вертикальный перепад температуры достиг 7°C в слое между горизонтами 4 и 9 м. В первую декаду июня сформировался верхний перемешанный слой толщиной ~ 2 м, в котором достигала 18–19°C.

Летний тип термической стратификации установился в начале июня. Кислородная стратификация продолжала быстро меняться. По данным оптодного датчика, в верхней части металимниона на глубинах 2–5 м активно формировался подповерхностный максимум растворенного кислорода [O₂]. Причем в этом слое был отмечен суточный цикл [O₂] с максимумом (до 350 мкмоль л⁻¹ после 1 июня) в дневное время и минимумом ночью, что можно связать с цветением фитопланктона. Весь май количество кислорода в гиполимнионе постепенно уменьшалось; так, к первой декаде июня величина [O₂] на глубине 24 м уменьшилась до 170–180 мкмоль л⁻¹. Однако, по данным турбидиметра, суточные миграции мезозoopланктона все еще продолжались с той же интенсивностью.

После перерыва в ~ 40 сут измерения возобновились 15 июля и продолжались до 19 августа

2022 г. Уже в начале повторной постановки датчики зафиксировали формирование промежуточного минимума содержания растворенного кислорода в слое между горизонтами 10 и 12 м. На горизонтах 22 м и глубже величина [O₂] была ниже 70 мкмоль л⁻¹, возникли условия для развития гипоксии (рис. 2). В третьей декаде июля значение [O₂] в придонном слое в среднем упало ниже 50 мкмоль л⁻¹. К концу постановки после 15 августа на горизонте 24 м среднее значение [O₂] составило 35.6 мкмоль л⁻¹, а стандартное отклонение – 12.5 мкмоль л⁻¹.

Наиболее интересны внутрисуточные колебания [O₂] и в нижней части водной толщи глубже 10–15 м в центральной котловине. Вплоть до 9 августа периоды падения [O₂] ниже 50 мкмоль л⁻¹ на горизонте 23 м перемежались с периодами, во время которых концентрация кислорода была выше порогового для гипоксии значения. Вариации [O₂] происходили каждые 5–12 ч и на глубине 23–24 м достигали весьма значительных амплитуд (до 50 мкмоль л⁻¹) (рис. 3). Важно отметить, что увеличение [O₂] наблюдалось при росте *T* (рис. 3), что подтверждается расчетами коэффициентов корреляции (табл. 2). Характерно, что отрицательные значения корреляции наблюдались в верхней части столба воды между горизонтами 4 и 14 м. Под металимнионом отрицательная корреляция полностью соответствует фундаментальной зависимости растворимости кислорода от температуры воды. Однако в нижнем слое глубже 15 м в глубоководной котловине эта зависимость не выполнялась: повышенным величинам [O₂] соответствовали повышенные значения.

К сожалению, во время второй постановки данные о мутности получены не были.

Наблюдения 2023 г.

Третья длительная постановка зонда-профилографа “Винчи” была выполнена через год, 5–17 августа 2023 г., когда удалось получить профили до глубины 27 м. Температура в нижней части гиполимниона глубже 14 м практически не отличалась от значений в августе 2022 г. и составила 4.57–4.73°C. Граница зоны гипоксии располагалась в среднем на 16 м, существенно выше,

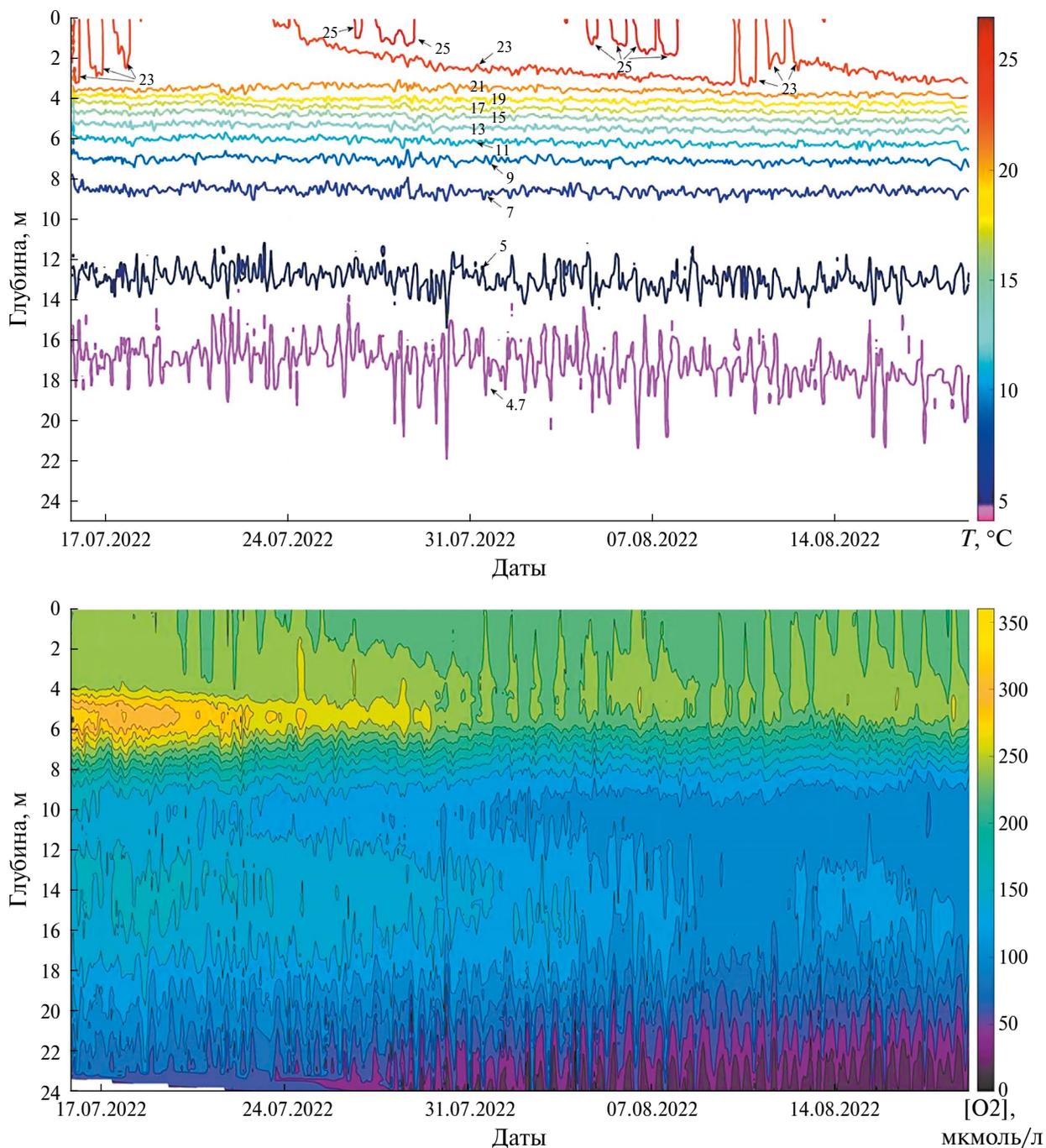


Рис. 2. Вверху – временной ход температуры воды, T ; внизу – динамика содержания растворенного кислорода $[O_2]$ в центре оз. Глубокого за период с 15 июля по 19 августа 2022 г., по данным измерений зондом-профилографом Винчи.

чем в августе 2022 г. Изоксигена 20 мкмоль л⁻¹ залегала в среднем на глубине 19.2 м. В придонном слое 25–28 м величина $[O_2]$ стабильно держалась у отметки 10 мкмоль л⁻¹. При этом коэффициент корреляции между температурой воды и содержанием растворенного кислорода был не

очень большим по абсолютной величине, принимая значения немногим больше 0.5 на глубинах 14–17 м, в более глубоких слоях корреляция убывала, становясь незначимой в придонном слое. В целом в гипolimнионе колебания $[O_2]$ были сильно зашумлены.

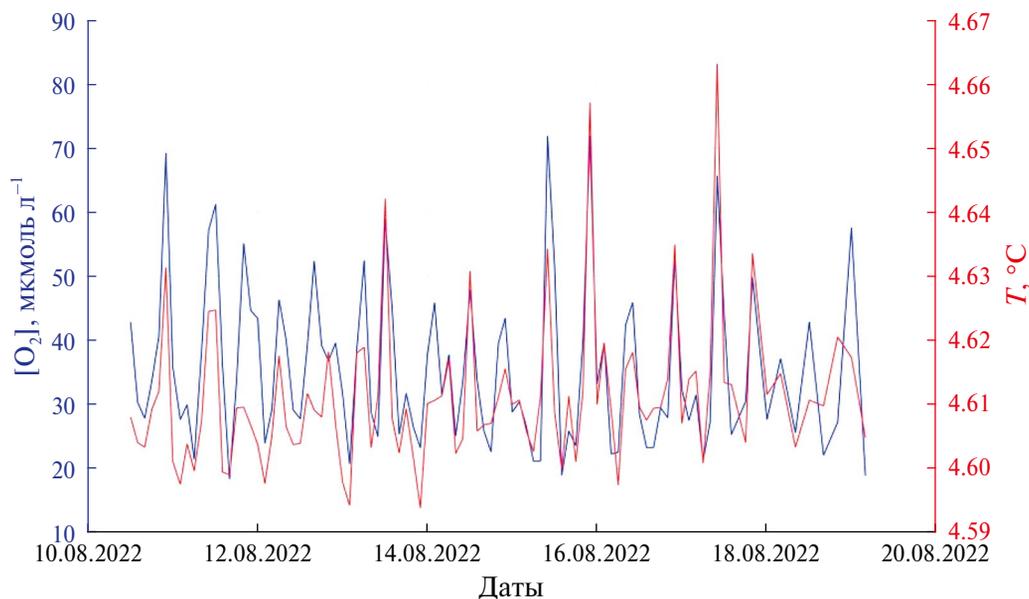


Рис. 3. Выборки за 10–19 августа 2022 г. из временных рядов данных измерений $[O_2]$ и в слое 23–24 м.

Таблица 2. Корреляция между T и $[O_2]$ по однометровым слоям воды по данным измерений зондом-профилографом “Винчи” с 18.07.2022 по 09.08.2022

Глубина, м	Температура воды, °С	Содержание растворенного кислорода, $[O_2]$ мкмоль л ⁻¹		Коэффициент корреляции	Доверительный интервал (уровень значимости 95%)	
	среднее ± стандартное отклонение	среднее ± стандартное отклонение	линейный тренд в сутки	$R(T, [O_2])$	R_L	R_U
3–4	21.23 ±0.57	244.7 ±6.9	-0.2	0.10	0.00	0.20
4–5	17.17 ±0.75	250.9 ±11.9	-0.8	-0.18	-0.28	-0.08
5–6	13.03 ±0.53	250.3 ±21.8	-1.9	-0.14	-0.24	-0.04
6–7	10.24 ±0.38	216.5 ±24.0	-2.1	-0.09	-0.19	0.02
7–8	8.37 ±0.25	174.1 ±21.0	-1.9	-0.12	-0.22	-0.03
8–9	7.13 ±0.22	141.5 ±16.2	-1.6	-0.17	-0.27	-0.07
9–10	6.29 ±0.19	124.2 ±12.9	-1.3	-0.29	-0.38	-0.20
10–11	5.70 ±0.18	120.2 ±12.4	-1.3	-0.42	-0.50	-0.33
11–12	5.34 ±0.15	124.6 ±14.7	-1.5	-0.51	-0.57	-0.42
12–13	5.09 ±0.12	130.7 ±16.6	-1.7	-0.42	-0.50	-0.33
13–14	4.93 ±0.09	135.0 ±17.3	-1.8	-0.23	-0.32	-0.13
14–15	4.83 ±0.07	136.3 ±16.7	-1.7	0.02	-0.08	0.13
15–16	4.77 ±0.05	133.9 ±15.9	-1.5	0.19	0.09	0.28
16–17	4.73 ±0.04	128.4 ±15.7	-1.4	0.35	0.25	0.44
17–18	4.69 ±0.04	120.6 ±15.9	-1.4	0.54	0.46	0.51
18–19	4.66 ±0.04	109.5 ±16.8	-1.4	0.67	0.61	0.72
19–20	4.64 ±0.03	96.0 ±18.9	-1.5	0.78	0.74	0.82
20–21	4.63 ±0.03	83.5 ±20.9	-1.6	0.82	0.79	0.85
21–22	4.62 ±0.02	71.9 ±21.7	-1.6	0.81	0.77	0.85
22–23	4.61 ±0.02	60.8 ±21.6	-1.6	0.79	0.75	0.83
23–24	4.60 ±0.02	48.6 ±20.6	-1.5	0.81	0.77	0.84

В нижнем слое глубже 18 м был отмечен резкий рост содержания взвешенного вещества, регистрировавшегося турбидиметром. На осредненном по времени вертикальном профиле (рис. 4) величина мутности, измеряемая в условных единицах, по мере приближения к придонному слою выросла на порядок по

сравнению со значениями в верхней части гипolimниона. Стоит отметить, что датчик электропроводности в составе зонда “RBR Concerto C.T.D++”, который стоял на подводном аппарате, показал, что вертикальный профиль электропроводности воды имел локальный минимум на горизонтах 5–15 м, ко дну значения

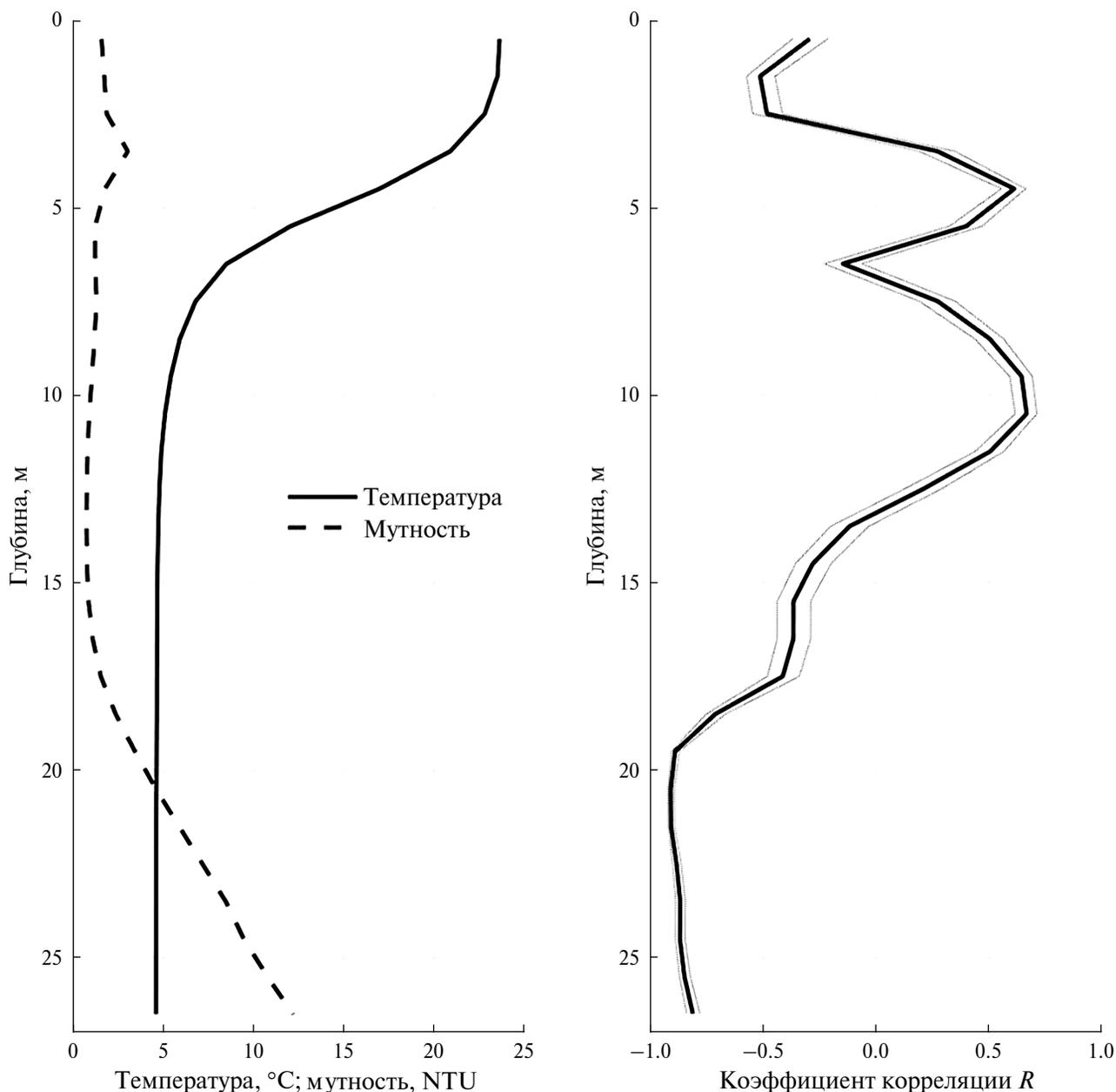


Рис. 4. Слева – средние на период с 5 по 17 августа 2023 г. вертикальные профили содержания взвешенного вещества (NTU) и температуры воды в центре оз. Глубокого, по данным измерений зондом-профилографом “Винчи”. Справа – вертикальный профиль значений коэффициента корреляции температуры воды и мутности, тонкими пунктирными линиями показаны доверительные интервалы оценок коэффициента корреляции при 95%-м уровне значимости.

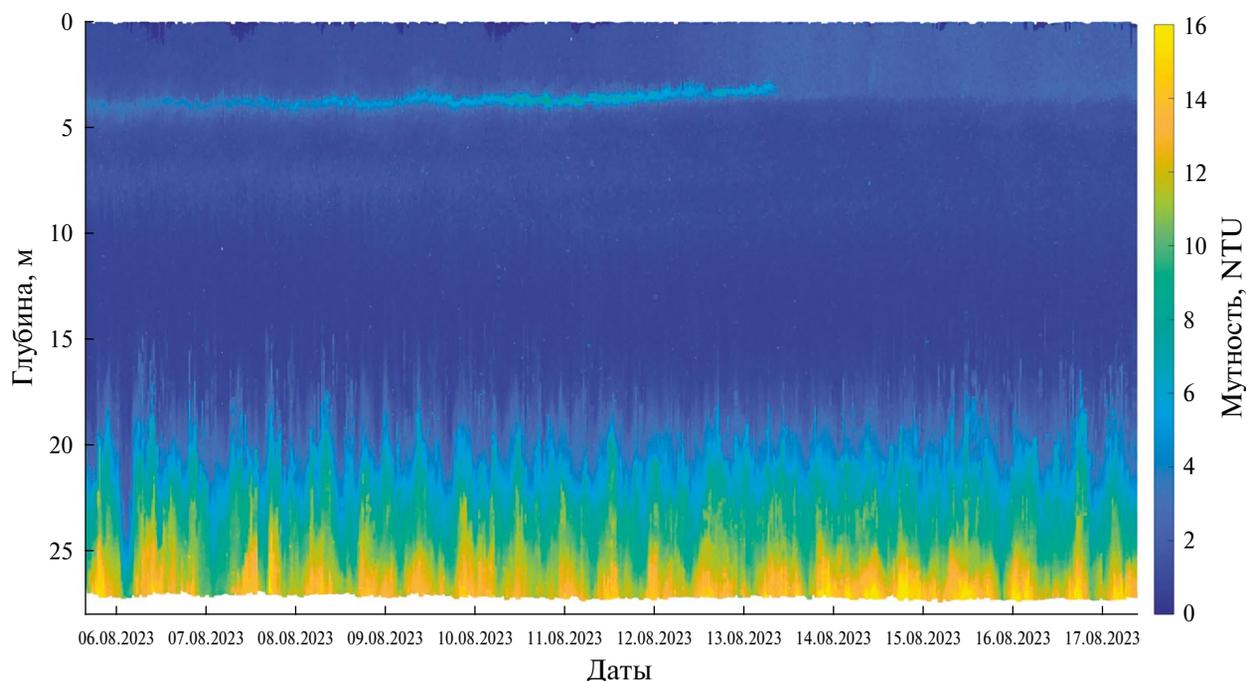


Рис. 5. Временной ход содержания взвешенного вещества (NTU) в водной толще в центре оз. Глубокого, по данным измерений 5–17 августа 2023 г.

электропроводности в среднем увеличивались на 0.002–0.003 мСм/см.

В нижнем слое наблюдались интенсивные колебания мутности с характерным временным масштабом от нескольких часов до полусуток (рис. 5). При этом колебания мутности происходили в противофазе с колебаниями температуры воды: вода с пониженной температурой содержала больше взвеси. Наиболее сильная корреляция между температурой воды и мутностью наблюдалась на глубинах 20–22 м.

ОБСУЖДЕНИЕ

Общие закономерности кислородного режима оз. Глубокого в теплое полугодие хорошо известны по работам [4, 8, 10, 11]. По мнению [9], эти закономерности обусловлены плотностной структурой водной толщии озера, подверженной межгодовым колебаниям. В работе [8] показана зависимость процесса развития придонного анаэробного слоя от погодных условий, наблюдавшихся непосредственно после вскрытия ледового покрова озера. К сожалению, более детальную картину динамики кислорода было

невозможно составить, поскольку указанные работы были основаны на данных эпизодических исследований, включая отбор проб воды, которые проводились, как правило, 1 раз в месяц.

Продолжая изучение водной среды оз. Глубокого, авторам статьи удалось провести длительные мультипараметрические синхронные измерения с помощью гидрологических и оптических датчиков автономного подводного зонда-профилографа “Винчи” практически во всем столбе воды от поверхности до придонного слоя в центральной глубоководной котловине озера. В ходе трех постановок аппарата было получено свыше 1400 наборов вертикальных профилей. Измерения проводились 1 раз в 0.5–2.0 ч в конце весны 2022 г. и в летнее время в 2022 и 2023 гг. Благодаря частым измерениям вертикальных профилей удалось получить новые данные о короткопериодной изменчивости процессов формирования гипоксии в гиполимнионе озера. Полученные данные не только подтвердили некоторые основные выводы предшествующих работ, но и позволили более детально описать внутрисезонную изменчивость, а также обнаружить новые процессы, влияющие на формирование гипоксии в гиполимнионе озера.

Во время первой постановки зонда-профилографа “Винчи” в весенний период 2022 г. наблюдался постепенный переход от состояния гомотермии к прямой термической стратификации озера. В период второй постановки в июле–августе 2022 г. происходило формирование гипоксии в нижней части гипоплимниона глубже горизонта 20 м. Третья постановка в августе 2023 г. характеризовалась условиями хорошо развитой гипоксии в гипоплимнионе на глубинах > 16 м.

Главным результатом настоящих исследований стало обнаружение сильных внутрисуточных колебаний содержания растворенного кислорода в процессе формирования гипоксии в летний период в 2022 г. В августе в придонном слое диапазон колебаний был $20\text{--}70$ мкмоль л^{-1} на горизонтах $23\text{--}24$ м. Колебания концентрации кислорода сопровождались вариациями температуры воды в пределах $4.6\text{--}4.7^\circ\text{C}$. Такие малые по порядку величины колебания температуры удалось зафиксировать благодаря применению высокоточного датчика температуры в составе зонда “RBRConcerto C.T.D++”. Важно отметить, что наблюдались когерентные синфазные колебания температуры и содержания растворенного кислорода, что было неожиданно, поскольку растворимость газов в жидкостях обратно пропорциональна температуре, точнее – растворимость газа прямо пропорциональна его давлению (закон Генри), которое, в свою очередь, пропорционально температуре. Через год, к началу третьей постановки зонда-профилографа “Винчи”, 4 августа 2023 г., нижняя часть водной толщи под горизонтом 17 м уже прошла стадию сезонного формирования гипоксии, и глубже 20 м содержание $[\text{O}_2]$ было < 20 мкм л^{-1} . На фоне крайне низких значений $[\text{O}_2]$ регистрировались слабые колебания на пределе точности инструментальных измерений. При этом наблюдались сильные колебания мутности на временных масштабах от нескольких часов до 1 сут. Отмечена очень высокая отрицательная корреляция мутности и температуры воды.

Таким образом, результаты наблюдений в 2022 и 2023 гг. позволяют выдвинуть гипотезу о том, что в весенне-летний период в центральной глубоководной котловине озера на формирование гипоксии влияют выходы аномально

холодных подземных вод. Концентрация кислорода в подземных водах, видимо, близка к нулю из-за микробиологического окисления органических веществ за счет восстановления сульфатов при просачивании поверхностных вод через грунты в водосборе озера. Струи бескислородных подземных вод при выходе в озеро смешиваются с озерной водой и вовлекают донные осадки (илы), поднимая взвесь на несколько метров над дном. В донных осадках содержится много детрита, который окисляется, будучи вовлеченным в турбулизированную водную среду над дном. Поэтому в этих облаках понижается содержание растворенного кислорода при сильно повышенных величинах взвеси и слегка пониженных значениях температуры. Если в глубокой части озера перекрывающие отложения на дне озера оказывают сопротивление потоку подземных вод, то очаги разгрузки подземных вод могут быть локализованы, разгрузка может происходить в виде грифонов, а также могут возникать колебания разгрузки. Струи разгружающихся подземных вод могут на некоторое время взмучивать ил на отдельных участках дна озера. По данным авторов статьи, колебания мутности происходят на временных масштабах от нескольких часов до суток, приводя к повторяющимся событиям деоксигенации в нижнем слое воды толщиной в несколько метров в центральной глубоководной котловине озера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе продемонстрированы возможности принципиально новой технологии автоматизированного мониторинга состояния природной среды в озерах и водохранилищах глубиной до 50 м. Технология основана на применении оригинального привязного подводного аппарата “Винчи”, который по заданной программе в автоматическом режиме выполняет регулярные погружения с поверхности водоема до придонного слоя, проводя измерения параметров водной среды, и передает данные измерений потребителю при каждом всплытии аппарата к поверхности водоема. Передача данных и дистанционное управление аппаратом осуществляются по каналу мобильной телефонной связи GSM.

На аппарат “Винчи” может быть установлен многопараметрический зонд для измерений температуры воды, мутности, электропроводности, фикоэретрина, флуоресценций хлорофилла *a* и растворенного органического вещества, а также предусмотрена возможность монтажа дополнительных датчиков, например растворенного кислорода, в зависимости от задачи исследования.

Частота профилирования аппарата может быть задана в диапазоне от получаса до нескольких суток. Учащенное профилирование позволяет детализировать процессы, а более редкое – исследовать сезонную эволюцию. Частоту профилирования можно менять по ходу постановки с помощью дистанционно передаваемых команд.

Безопасность постановки обеспечивается соединением аппарата прочным тросом с донным якорем, а также базированием в придонном слое в периоды между циклами погружения/всплытия для укрытия от траления и воздействия волн. При всплытии местоположение аппарата определяется с помощью модема спутниковой навигации GPS/Глонасс. Для поиска аппарата включается светодиодный маяк.

Данная технология как совокупность методов и аппаратно-программных средств экспериментального исследования была апробирована авторами статьи на базе подмосковной Гидробиологической станции “Глубокое озеро” ИПЭЭ РАН. В 2022–2023 гг. проведено несколько постановок аппарата и собраны уникальные данные о переходных процессах в водной толще, прежде всего о динамике кислорода в гипolimнионе.

Длительные постановки аппарата в оз. Глубоком позволили получить новые данные о разномасштабной изменчивости кислородного режима. Ранее авторы статьи полагали, что гипоксия в гипolimнионе озера развивается в летний период из-за формирования устойчивой температурной стратификации (сезонного термоклина), которая ограничивает вертикальное перемешивание (вентиляцию вод) эпилимнионом. Изучение полученных авторами длительных временных рядов данных позволяет выдвинуть гипотезу, что существуют ледниково-карстовые

озера, в которых процесс формирования гипоксии в придонном слое может ускоряться в очагах разгрузки подземного стока в гипolimнион за счет воздействий струй подземных вод, которые взмучивают заиленные донные осадки, что приводит к увеличению потребления кислорода на микробиологическое окисление детрита. Из-за пульсирующего характера этого процесса может наблюдаться повторяющаяся гипоксия (в оз. Глубоком на временных масштабах от нескольких часов до суток).

В дальнейшем сравнительные исследования в оз. Глубоком и других озерах со схожими природными условиями в водосборах могли бы подтвердить эту гипотезу и помочь обнаружить новые факторы, влияющие на развитие придонной гипоксии в озерах. При проведении таких исследований целесообразно использовать разработанную авторами новую технологию, основанную на применении роботизированного подводного зонда-профилографа “Винчи”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гавриленко Г.Г., Здоровеннова Г.Э., Волков С.Ю., Богданов С.Р., Здоровеннов Р.Э.* Устойчивость водной массы и ее влияние на кислородный режим полимиктического озера // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. Т. 3 (13). Вып. 4. 2018. С. 57–71.
2. *Глухова С.А., Пинигин О.В., Расторгуев А.В.* Роль присдвиговых структур растяжения в субвертикальной фильтрации водонапорной системы Московского артезианского бассейна // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4, Геология*. 2023. № 1. С. 97–109. doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-97-109
3. *Коровчинский Н.М.* Пелагический рачковый зоопланктон озера Глубокого в 2017–2021 годах // *Гидробиологическая станция на Глубоком озере: Тр. / Под ред. Н.М. Коровчинского*. Т. 12. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2022. С. 64–77.
4. *Садчиков А.П.* Температурный режим, прозрачность и распределение кислорода // *Биоценозы мезотрофного озера Глубокого*. М.: Наука, 1983. С. 181–188.
5. *Сапелко Т.В., Гузиватый В.В., Кузнецов Д.Д.* Комплексные палеолимнологические исследования на озере Глубоком // *Гидробиологическая станция на Глубоком озере. Тр. / Под ред. Н.М. Коров-*

- чинского. Т. 11. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2027. С. 139–148.
6. Соколов Д.И., Ерина О.Н., Терёшина М.А., Вилимович Е.А. Современный гидроэкологический режим озера Глубокое // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития. Тр. II Всерос. конф. СПб.: Химиздат, 2018. С. 590–593.
 7. Шапоренко С.И. Влияние метеорологических условий на развитие анаэробных процессов в димиктических водоемах в зимний период (на примере оз. Глубокое Рузского района Московской области) // Метеорология и гидрология. 2005. С. 84–92.
 8. Шапоренко С.И., Киосе С.И. Влияние метеорологических условий на развитие анаэробных процессов в димиктических водоемах в летний период (на примере оз. Глубокое Рузского района Московской области) // Метеорология и гидрология. 2004. С. 89–104.
 9. Шапоренко С.И., Шилькрот Г.С. Многолетняя изменчивость гидрохимических параметров озера Глубокое / Под ред. Н.М. Коровчинского, Н.Н. Смирнова // Тр. Гидробиологической станции на Глубоком озере им. Н.Ю. Зюграфа. Т. 9. М.: Ин-т проблем экологии и эволюции РАН, Изд-во ИПП “Гриф и К”, 2005. С. 24–48. EDN VNBCRA
 10. Щербаков А.П. Гидрохимическая характеристика Глубокое озера // Тр. Всесоюз. гидробиол. о-ва. 1962. Т. XII. С. 5–41.
 11. Щербаков А.П. Озеро Глубокое. Гидробиологический очерк. М.: Наука, 1967. 379 с.
 12. Engelhardt C., Kirillin G. Criteria for the onset and breakup of summer lake stratification based on routine temperature measurements // Fundam. Appl. Limnol. 2014. V.184 (3). P. 183–194. DOI: 10.1127/1863-9135/2014/05824
 13. Ostrovskii A.G., Emelianov M.V., Kochetov O.Y., Kremetskiy V.V., Shvoev D.A., Volkov S.V., Zatsepin A.G., Korovchinsky N.M., Olshanskiy V.M., Olchev A.V. Automated tethered profiler for hydrophysical and bio-optical measurements in the Black Sea carbon observational site // J. Marine Sci. Engineering. 2022. V. 10. P. 322. DOI:10.3390/jmse10030322

Application of a robotic underwater probe for limnological research. A case study of Lake Glubokoe, Ruzsky district, Moscow region

A. G. Ostrovskii^{a,*}, A. G. Zatsepin^a, O. Yu. Kochetov, D. A. Shvoev^a, A. N. Drozdova^a,
N. M. Korovchinsky^b

^a*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

^b*A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia*

*e-mail: osasha@ocean.ru

The paper deals with a new approach to conducting experimental limnologic observations by using the automatic moored profiler Winchi. The autonomous underwater profiler is designed for regular multiparametric measurements of vertical profiles from the lake bottom (maximum depth of 60 m) upward to air-sea interface during an extended deployment (more than 1 month) at a hydrological station. Trial operation of the device was carried out in the lake Glubokoe near Moscow in 2022–2023. Observations made it possible to describe in detail the seasonal evolution of the underwater environment, including the transition from a state of homothermy to a direct thermal stratification with the formation of hypoxia in the hypolimnion in the deep central part of the lake. Intense intraday fluctuations of dissolved oxygen, temperature and water turbidity were found in the near-bottom layer. It has been hypothesized that in the spring-summer period, hypoxia is formed not only due to the barrier effect of the metalimnion, but also due to an increase in oxygen consumption for the microbial oxidation of detritus particles stirred up bottom sediments due to pulsating flows of groundwater discharge.

Keywords: Underwater tethered profiler, the Glubokoe lake, hypolimnion, oxygen stratification, hypoxia, temporal variation