

УДК 556.555(212)+556.114.2

ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД В СМЕЖНЫЕ ГОДЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ПОГОДНЫМИ УСЛОВИЯМИ¹

© 2024 г. М. Г. Гречушникова^{a,b,c,d,*}, И. Л. Григорьева^c, Д. В. Ломова^b,
Е. Р. Кременецкая^b, А. Б. Комиссаров^c, Л. П. Федорова^c, В. А. Ломов^{a,d}, Е. А. Чекмарева^c

^aМосковский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
ГСП-1, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^bИнститут водных проблем РАН, ул. Губкина, д. 3, Москва, 119333 Россия

^cИнститут водных проблем РАН, Ивановская научно-исследовательская станция,
ул. Белавинская, д. 61-а, Конаково, Тверская область, 171251 Россия

^dИнститут физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

*e-mail: allavis@mail.ru

Поступила в редакцию 17.03.2023 г.

После доработки 25.03.2024 г.

Принята к публикации 10.04.2024 г.

В статье рассмотрены условия формирования гидроэкологического режима Иваньковского водохранилища по данным комплексных гидролого-гидрохимических и гидробиологических съемок, проведенных в августе 2020–2022 гг. Выявленные различия гидроэкологических характеристик связаны с особенностями погодных условий летних сезонов. Несмотря на значительную проточность водохранилища, в его придонном слое при длительном стоянии жаркой погоды возможно формирование бескислородных условий, влияющих на обменные процессы с дном, гидробионтов и эмиссию метана. Усиление биотурбации донных отложений бентосом при дефиците кислорода активизирует обменные процессы на границе “вода–донные отложения”, в том числе выход метана. Сильное “цветение” водоема, характерное для жарких погодных условий 2022 г., привело к сокращению удельного потока метана с поверхности из-за его окисления при избытке кислорода в поверхностном слое.

Ключевые слова: Иваньковское водохранилище, температура воды, гидрохимические показатели, эмиссия метана, фитопланктон, зообентос, продукция, деструкция, обменные процессы

DOI: 10.31857/S0002351524030093 EDN: JHSGXS

ВВЕДЕНИЕ

Водохранилища — это природно-техногенные водоемы, уровень воды в которых регулируется человеком. Водохранилища отличаются друг от друга по своему генезису, т.е. могут быть созданы в результате поднятия уровня естественных озер и сооружения плотин на реках или создания искусственного ложа (наливные). Водохранилища отличаются между собой как морфометрическими характеристиками (объем, площадь акватории, глубина, ширина, площадь мелководий, длина береговой линии), так и гидрологическим, термическим, гидрохимическим и гидробиологическим режимами, совокупность ко-

торых можно назвать гидроэкологическим режимом.

На формирование гидроэкологического режима и гидроэкологической структуры водохранилищ влияет комплекс природных и антропогенных факторов.

Под гидроэкологической структурой водохранилища авторы понимают совокупность взаимосвязанных абиотических и биотических компонентов. К первым относим воду и растворенные в ней химические вещества, минеральные взвеси и первичные грунты, слагающие ложе. Ко вторым — разнообразные организмы от бактерий до рыб и макрофитов (высших водных растений).

¹ Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022–0002 “Исследования геоэкологических процессов в гидрологических системах суши формирования качества поверхностных и подземных вод, проблем управления водными ресурсами и водопользованием в условиях изменений климата и антропогенных воздействий” Государственного задания ИВП РАН. Исследование содержания и эмиссии метана проведено в рамках темы “Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши” (121051400038–1).

Гидроэкологическая структура водохранилищ чутко реагирует на внешние воздействия, такие как изменения внутрисезонных колебаний синоптических условий, уровня режима, притока воды и, как следствие, имеет место изменение проточности водоема, что непосредственно влияет на гидрологическую структуру водной массы.

В водохранилищах постоянно происходят процессы как образования, так и разложения органического вещества с выделением в атмосферу такого важного парникового газа, как метан.

Гидроэкологическая структура водохранилищ сезонного регулирования волжского каскада, таких как Ивановское, Угличское, Горьковское, Чебоксарское, летом формируется при стабильном уровне воды, поэтому существенную роль в этот период играют метеорологические условия и, прежде всего, температура воздуха, которые оказывают влияние на особенности формирования стратификации, температурного и кислородного режимов водоема, первичную продукцию и обменные процессы с донными отложениями [Гречушникова, 2012]. Между донными отложениями (ДО) и придонными слоями водной толщи постоянно протекают процессы массо- и газообмена как в аэробных, так и в анаэробных условиях в зависимости от гидрологической обстановки в водоёме [Мартынова, 2010]. Связь изменений гидроэкологических характеристик под воздействием внешних условий достаточно хорошо изучена. В статье [Гречушникова, 2012] приводятся прогнозы вероятных изменений с учетом возможных климатических перемен на основе данных моделирования. Однако круг освещенных вопросов был ограничен исследованием гидрофизических показателей. Температура воды играет определяющую роль в длительности и интенсивности цветения фитопланктона, влияет на изменение концентраций биогенных веществ [Даценко, 2017]. Так, различные гидрометеорологические условия летом 1992 и 1993 гг. определили различия в химическом составе воды Ивановского водохранилища [Григорьева, Ковалышева, 1995]. В частности, в более жаркое и менее влажное лето 1992 г. концентрации нитратов и фосфатов в воде Ивановского водохранилища были меньше, чем в более дождливое и более прохладное лето 1993 г. Объем притока воды в водохранилище влияет на гидроэкологические характеристики

водохранилища. Ранее проведенное исследование связи минерализации воды и показателей водного режима Ивановского водохранилища выявило взаимосвязь между минерализацией и притоком воды за предшествующий месяц [Григорьева, 1996; Ивановское, 2000].

Актуальным вопросом для водохранилищ питьевого назначения остается самоочищение. Тематика углеродной нейтральности ставит новые вызовы для изучения большего перечня показателей и процессов, в частности элементов круговорота углерода. Проведенные в первой половине августа 2020–2022 гг. комплексные съемки Ивановского водохранилища включали расширенный набор исследуемых показателей, что позволило проанализировать их взаимосвязь.

Роль фитопланктона важна не только как первичного звена в трофической цепи. Это один из факторов биологического самоочищения водоемов. Наличие микроводорослей в экосистеме является основным источником растворенного кислорода и дополнительного ОВ (автохтонная органика), которое в свою очередь либо используется другими организмами, либо отмирает и накапливается в ДО и может приводить к вторичному загрязнению. Если высшую водную растительность можно выкашивать и утилизировать их биомассу после вегетации, то утилизация отмершего фитопланктона происходит в результате деструкции ОВ в толще воды и ДО. Преобладание деструкции над фотосинтезом (первичной продукцией) свидетельствует о высокой способности водоема к биологическому самоочищению [Одум, 1975].

Наличие в донных отложениях роющего макробентоса влияет на интенсивность процессов массообмена на границе “вода–ДО”, так как эти животные в процессе своей жизнедеятельности не только потребляют ОВ в пищу, но и, создавая сеть каналов, могут механически увеличить поверхность осадка в 1.5 раза (при плотности 600 особей на 1 м²), и способствуют проникновению О₂ вглубь осадка, что, в свою очередь, активизирует процесс потребления кислорода грунтами [Гашкина, 2003], что положительно сказывается на самоочищающей способности водоема [Бентос, 1980]. Малощетинковые черви, являясь доминирующей группой в сообществах донных животных иловых биотопов, играют основную роль в процессе биологической утилизации и трансформации органического вещества донных отло-

жений глубоководной зоны водохранилища. При наличии плотностной стратификации в водоеме в гипolimнионе могут формироваться анаэробные условия, приводящие к развитию анаэробных процессов в ДО и к активизации обмена биогенными элементами с водной массой [Мартынова, 2010], которые, в свою очередь, могут усиливать продукционную активность в придонных слоях воды.

Цель исследований — изучение влияния гидрометеорологических факторов на гидроэкологические характеристики (гидроэкологическую структуру) Иваньковского водохранилища в смежные годы в период летней межени.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Иваньковское водохранилище — крупный водоем сезонного регулирования, созданный в 1937 г. Объем водохранилища при НПУ (124 м абс.) составляет 1.12 км³, площадь водного зеркала 327 км². В соответствии с классификацией водохранилищ по размерам [Водохранилища, 1979] к крупным относятся водохранилища объемом 1–10 км³ и площадью водного зеркала 100–500 км².

Иваньковское водохранилище является первой ступенью Волжско–Камского каскада водохранилищ и одним из основных источников водоснабжения г. Москвы. Это самое мелководное из крупных водохранилищ России — акватория глубиной менее 2 м составляет около половины от всей водной поверхности водоема при наполнении до НПУ (124 м) из-за обширного мелководного Шошинского плеса.

Водохранилище имеет среднегодовой коэффициент водообмена (Кв) 10.3 год⁻¹ [Иваньковское, 2000].

Подача воды в канал им. Москвы для водоснабжения Москвы в среднем за год составляет 1.7 км³ [Иваньковское, 2000]. Вода водохранилища также используется для охлаждения систем Конаковской ГРЭС, что сказывается на тепловом режиме как Мошковичского залива, куда производится сброс теплых вод, так и самого водоема ниже по течению. Ещё водохранилище используется для судоходства и рекреации.

Иваньковское водохранилище относится к долинному типу и имеет довольно сложную конфигурацию. В нем выделены четыре плеса, морфологические особенности которых обуславливают их эколого-биологические различия

[Никаноров, 1975]. Верхневолжский (Волжский) плес — от г. Тверь до устья Шошинского плеса — представляет собой узкий и проточный участок, Средневолжский плес простирается от места слияния Шошинского и Верхневолжского плесов до широкого разлива в районе устья р. Созь, Нижневолжский плес — от устья р. Созь до плотины Иваньковской ГЭС. В некоторых публикациях эти два плеса объединяют в Иваньковский плес. Шошинский плес представляет собой затопленную долину р. Шоши и является обособленной частью водоема.

Донные отложения в Иваньковском водохранилище представлены первичными трансформированными грунтами (почвы обнаженные, разбухшие, заболоченные) и вторичными грунтами: песок (13% дна водохранилища), песок илистый (26%), ил песчанистый (46%), ил торфянистый и отложения из макрофитов (14%). Содержание органического вещества в песках составляет 1.4–2.8%, в песках илистых — 3.5–9.8%, в илах песчанистых серых — 10.2–20%, а в илах торфянистых и в отложениях из макрофитов — 42–62% [Иваньковское, 2000]. По характеру залегания и закономерностям распределения донных отложений выделяются три разнотипных участка: Волжский, Иваньковский и Шошинский плесы, которые различаются морфометрическими характеристиками, режимами скорости течения, волнения (рис. 1). Илистые грунты занимают большие площади в Иваньковском и Шошинском плесах. В Волжском плесе (особенно в его верхней части) большая часть площади занята песчаными грунтами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Квазисинхронные гидролого–гидрохимические и гидробиологические съемки водохранилища были проведены 5–6 августа 2020 г., 4–5 августа 2021 г. и 4–5 августа 2022 г. Весь комплекс измерений и отбор проб производились на 5 станциях: 1 — с. Городня (Верхневолжский плес), 3 — устье Шошинского плеса, 5 — г. Конаково (Средневолжский плес), 7 — урочище Корчева и 8 — приплотинный участок в районе г. Дубна (Нижневолжский или Иваньковский плес); в створах: 2 — остров Низовка, 4 — д. Плоски, 6 — устье Мошковичского залива дополнительно производился отбор проб воды и проб на фитопланктон (рис. 1). В процессе съемок выполнялись измерения вертикального распределения температуры

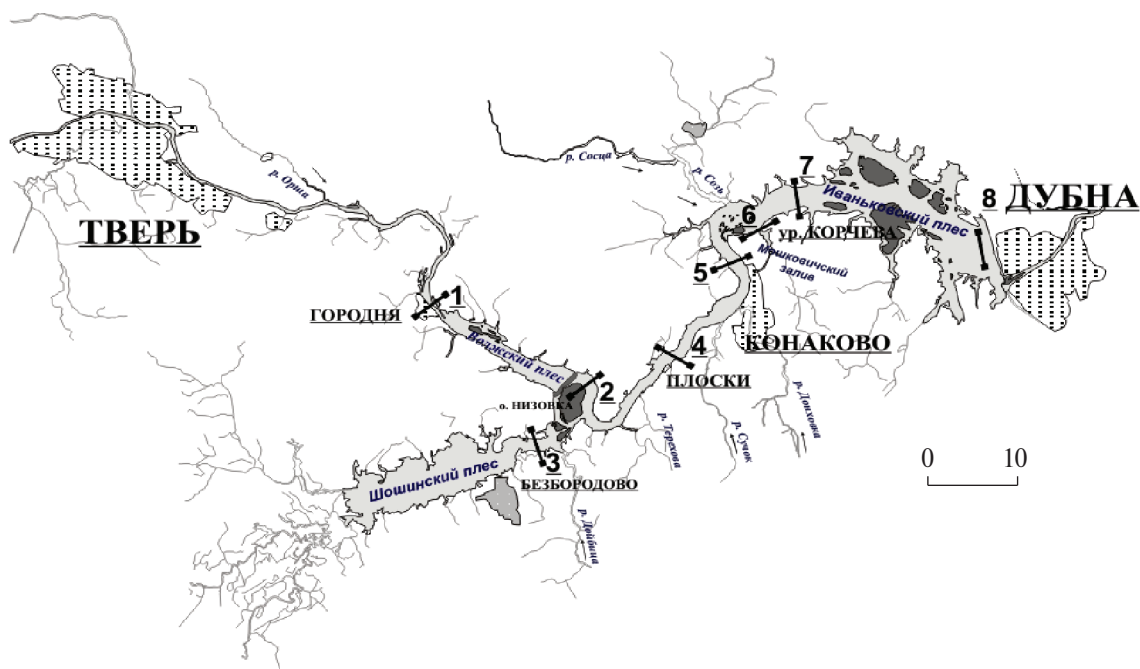


Рис. 1. Схема Иваньковского водохранилища со станциями отбора проб воды, донных отложений и измерений эмиссии метана. 1 — д. Городня, 2 — о-в Низовка, 3 — устье Шошинского плеса, 4 — д. Пlosки, 5 — г. Конаково, 6 — устье Мошковичского залива, 7 — урочище Корчева, 8 — верхний бьеф Иваньковской ГЭС (Дубна).

воды, растворенного кислорода, электропроводности (зонды YSI ProOdo и Pro30 с точностью 0.2°C , 0.1 мг/л , 1 мкСм/см соответственно), прозрачность воды измерялась по диску Секки.

Отбор проб воды производился из поверхностного и придонного горизонта на фарватере и у поверхности у каждого из берегов по ГОСТ 3161–2012. Химический анализ отобранных проб воды был выполнен в аккредитованной химической лаборатории Иваньковской НИС Института водных проблем РАН по аттестованным методикам. В пробах воды определялись следующие показатели и ингредиенты: pH, мутность, главные ионы, минеральные соединения азота и фосфора, фосфор общий растворенный, железо общее, марганец, показатели органического вещества (цветность, перманганатная окисляемость, химическое потребление кислорода, БПК₅), нефтепродукты, СПАВ, микроэлементы (медь, цинк, хром, свинец), метан (CH_4). Пробы донных отложений отбирали на станциях в русловой ложбине дночерпателем Экмана–Берджа.

Содержание метана в отобранных пробах воды определялось на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором Хроматэк-Кристалл 5000.2. Определение концентрации метана в пробах воды производился методом “headspace” [Bastviken et al., 2010]. На станциях проводилось

измерение удельного потока метана в атмосферу методом “плавающих камер” [Bastviken et al., 2004]. По ходу движения судна отбирались пробы воды для определения интенсивности продукционно-деструкционных процессов скляночным методом в кислородной модификации [Винберг, 1960]. Светлая и темная склянки (колбы с притертыми крышками объемом 0.5 л) экспонировались на борту судна в течение 3–4 ч, измерение содержания кислорода производилось оксиметром ProODO непосредственно в склянке, величины валовой продукции и деструкции определялись в пересчете на 1 ч.

Работы включали эксперименты для определения потоков веществ на границе “вода–донные отложения (ДО)” методом трубок [Дзюбан, 2010; Sweerts et al., 1991; Elrod et al., 2004; Мартынова, 2010]. Пробы грунта отбирались дночерпателем Экмана–Берджа. В извлеченный керн вводилась стеклянная трубка диаметром 3.5 см и высотой 45 см для отбора образца. Трубка заливалась под пробку заранее отобранной на станции одновременно с пробой грунта водой с придонного горизонта. Этой же водой заливалась и “холостая” трубка без ила. Все трубки помещались в темные мешочки и ставились на экспозицию при температуре близкой к температуре придонной воды в момент отбора грунта. Затем вода из трубок

сливалась сифоном и в ней определялись: содержание растворённого кислорода, метана, фосфора, и HCO_3^- . Потоки вещества с 1 м^2 площади дна за сутки определялись по разнице концентраций веществ в грунтовой и холостой трубке. Общая деструкция органического вещества в илах определялась по количеству HCO_3^- , выделяемого колонкой грунта за время экспозиции, а по величине поглощения кислорода колонкой грунта оценивалась аэробная деструкция органического вещества (ОВ) в ДО. Содержание ОВ в грунте оценивалось по потерям веса при прокаливании.

Во время съёмок проводился отбор проб фитопланктона и зообентоса. Сбор материала и его камеральная обработка осуществлялась по методике [Методические, 1983]. Отбор проб фитопланктона производился опрокидывающимся батометром и погружным электрическим насосом из поверхностного (0–1 м) и придонного слоев воды, объем проб составлял 0.5 дм^3 . Фиксация водорослей осуществлялась модифицированным раствором Люголя, составной частью которого является формалин. Пробы фитопланктона концентрировались до 5 мл посредством вакуумной фильтрации через фильтры “Владипор” с диаметром пор 1 мкм. Учёт численности клеток проводился на световом микроскопе в камере Учинская-2 объемом 0.01 мл при увеличении 400 крат, оценка биомассы – счетно-объемным методом [Кузьмин, 1975]. Бентос отбирался дночерпателем Петерсена с площадью захвата $1/40 \text{ м}^2$, по 2 выемки грунта на каждой станции с дальнейшим промыванием через газ-сито № 23. Стандартные пробы зообентоса – на разрезах, охватывающих русловую и мелководную (до 3 м) зоны, пробы для изучения биотурбации – только на глубоководных участках в иловых биотопах. Моллюсков,

в зоне их обитания на глубине 3–4 м [Денисов, Мейснер, 1961], отбирали при помощи драги. Лабораторную и камеральную обработку проб зообентоса проводили по общепринятой методике [Методические, 1983].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрометеорологические условия в предшествующий период и в дни проведения съёмок в июле и в августе 2020–2022 гг. были различными (табл. 1).

Самый низкий уровень воды (примерно на 0.5 м ниже НПУ) наблюдался в 2022 г. Наибольший приток воды, обусловленный дождевыми паводками, отмечен в июле 2020 г. Максимальная дневная температура воздуха в период проведения съёмки была наиболее высокой в 2022 г. Различия гидрометеорологических условий в период, предшествовавший съёмкам, обусловили особенности внутриводоемных процессов в исследуемые годы. Съёмка в 2020 г. проводилась при относительно теплой антициклональной погоде, однако в предшествующий период времени была прохладная, ветреная погода и в водохранилище еще не сформировался устойчивый термоклин. При этом обильные осадки в июле привели к тому, что электропроводность воды в августе 2020 г. была наименьшей за все три исследуемых года, а насыщение придонных слоев воды кислородом, наоборот, наибольшим (до 4.8 мг/дм^3 в створе Дубна, при 0.5 мг/дм^3 в 2021 и 2022 гг.). Устойчивый антициклон в июле 2022 г. привел к прогреву водной массы водохранилища (температура придонного слоя воды у плотины достигала 21.2°C) и формированию устойчивого слоя температурного скачка по всему водоему. В 2020 и 2021 гг. содержание растворенного кислорода снижалось до величин

Таблица 1. Гидрометеорологические условия, определившие различие гидроэкологической структуры водохранилища летом 2020–2022 гг. и некоторые гидрохимические показатели

Характеристика	2020	2021	2022
Уровень воды 5 августа, м абс.	124.09	123.83	123.46
Приток воды в водохранилище за июль, млн м^3	1315.8	242.3	291.95
Осадки за июль, мм (г. Тверь)	161	22	81
Максимальная дневная температура воздуха в период проведения съёмки, $^\circ\text{C}$	22	26.8	29.9
Фосфат-ион, мг/дм^3	0.05–0.18	0.02–0.12	0.01–0.04
Минеральный азот, мг N/дм^3	0.32–0.75	0.35–1.87	0.19–0.72
Цветность, град. Pt-Co шкалы	60–80	30–40	20–30
Перманганатная окисляемость, мг O/дм^3	14.4–20.4	7.3–14.0	7.3–14.0
Железо общее, мг/дм^3	0.09–0.42	0.02–0.11	0.02–0.11

Примечание: Приток воды за месяц рассчитывали как сумму ежедневных значений. Данные взяты с сайта gis.vodinfo.ru.

менее 2 мг/дм³ только в придонных горизонтах наиболее глубоководных станций, а в жарком 2022 г. зона с дефицитом кислорода достигала горизонтов 9–10 м (рис. 2–4).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

От величины водородного показателя зависит развитие и жизнедеятельность водных растений и гидробионтов, в свою очередь последние могут влиять на величину рН. Погодные условия во время трех полевых кампаний определили разные величины рН. Наибольшие значения наблюдались в более жаркий август 2022 г. и составили 8.4–9.2 ед. рН.

Фосфаты являются лимитирующим фактором развития фитопланктона. В соответствии с [Дебольский и др., 2009] для того, чтобы биомасса фитопланктона не превышала фоновых значений, концентрация фосфора в воде водохранилища не должна превышать 0.07 мг/дм³, а азота – 1.5 мг/дм³. Источником биогенных элементов в водоеме может быть, как их приток с водосбора, так и автохтонное поступление. Дефицит кислорода в придонных горизонтах приводит к высвобождению фосфатов и марганца из донных отложений и увеличению их концентраций в придонных горизонтах, по сравнению с поверхностными. А в результате перемешивания минеральные формы фосфора, попадая в фотическую зону, являются причиной всплеск цветения при благоприятных условиях (солнечная штилевая погода).

Исследования в августе 2020–2022 гг. показали, что в большинстве случаев концентрации фосфат-иона и минерального азота превышали указанные выше величины, что способствовало интенсивному развитию фитопланктона в водохранилище. Наименьшие концентрации фосфа-

тов в большинстве случаев наблюдались в августе 2022 г. (табл. 1), когда численность и биомасса фитопланктона, как будет показано ниже, была наибольшей, что говорит о потреблении биогенных элементов во время активного продолжительного цветения.

Наибольшие величины цветности воды водохранилища отмечались в августе 2020 г. и были обусловлены притоком высоко цветной воды с водосбора в предшествующие измерениям дни. В наиболее жаркое лето 2022 г. с наименьшим притоком цветность воды наилучшим образом соответствовала требованиям качества воды для питьевого водоснабжения. Повышенный приток высоко цветных вод с водосбора в июле 2020 г. определил в начале августа более высокие, чем в два последующих года, величины перманганатной окисляемости (ПО), а также концентрации железа общего (табл. 1).

Максимальные концентрации марганца отмечались в августе 2022 г. в придонных горизонтах как входного, так и замыкающего створов и достигали 20–27 ПДК (рыбохозяйственного). В августе 2022 г. при значительном дефиците кислорода у дна увеличилась концентрация минерального фосфора. В прохладном августе 2020 г. наблюдались самые низкие (в диапазоне от 1.6 до 2.8 мг О₂/дм³) значения БПК₅, тогда как в августе 2021 и 2022 гг. они возрастали до 5.4 мг О₂/дм³.

ГИДРОБИОНТЫ

Различные гидрометеорологические условия трех последних лет сказались не только на гидрохимическом режиме, но и на развитии гидробионтов, в частности фитопланктона. В 2022 г. в составе альгофлоры Иваньковского водохранилища было обнаружено всего 194 вида и разновидности водорослей из 9-ти отделов, что более чем в два

Таблица 2. Общая численность (млн кл/л) и общая биомасса (мг/л) фитопланктона в поверхностном слое в Иваньковском водохранилище в августе 2020–2022 гг.

Годы	Станции отбора проб					
	Городня	Безбородово	Плоски	Конаково	Корчева	ГЭС
Численность						
2020	2.831	5.839	5.208	5.523	8.777	7.698
2021	15.178	49.381	38.998	31.342	65.218	23.592
2022	44.116	51.580	301.790	134.248	111.668	84.720
Биомасса						
2020	1.081	3.098	1.633	1.793	3.709	3.737
2021	7.436	15.363	8.321	12.469	12.053	1.597
2022	14.305	13.155	65.891	22.042	24.278	18.766

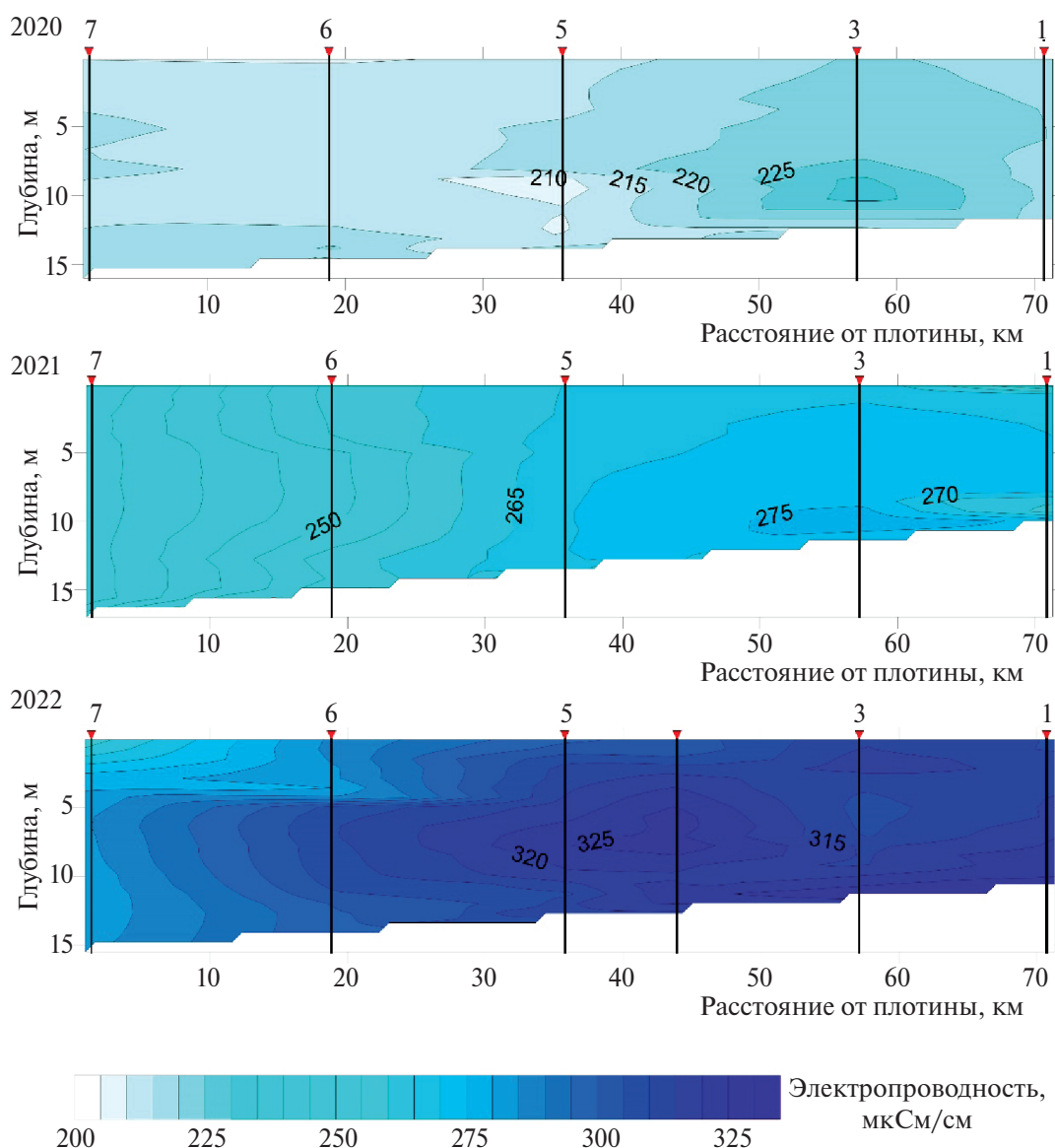


Рис. 2. Электропроводность воды (Э25, мкСм/см) на русловых станциях от входного к замыкающему створу Иваньковского водохранилища в августе 2020–2022 гг. Станции: 1 – Городня, 3 – устье Шошинского плеса, 4 – Плоски, 5 – Конаково, 7 – Корчева, 8 – Дубна.

раза ниже таксономического разнообразия в 2020 и 2021 гг. Значительное снижение видового разнообразия наблюдалось во всех отделах водорослей, кроме сине-зеленых, которые практически полностью сохранили свой состав в альгофлоре планктона, и их доля в формировании разнообразия увеличилась почти в два раза. В августе 2022 г. были зарегистрированы самые высокие значения численности и биомассы фитопланктона за период исследований с 2010 г. Общая численность микроводорослей изменялась в поверхностном слое от 44.116 до максимальных 301.790 млн кл./л. (табл. 2).

Практически на всех станциях наблюдалось увеличение роли сине-зеленых водорослей в форми-

ровании общей численности в августе 2022 г. по сравнению с тем же периодом в 2020 и 2021 гг., что связано с малой водностью года и жаркой погодой летом. Основу биомассы в августе 2020 и 2021 гг. формировали диатомовые, зеленые и динофитовые водоросли, при этом на долю диатомовых приходилось от 30 до 90%. Общая биомасса фитопланктона в августе 2022 г. изменялась в поверхностном слое от 13.155 до 65.891 мг/л, что значительно выше аналогичных показателей в 2020 и 2021 гг.

Индекс биологического разнообразия Шеннона изменялся по акватории водохранилища в августе 2022 г. от 3.43 до 4.29, что значительно выше

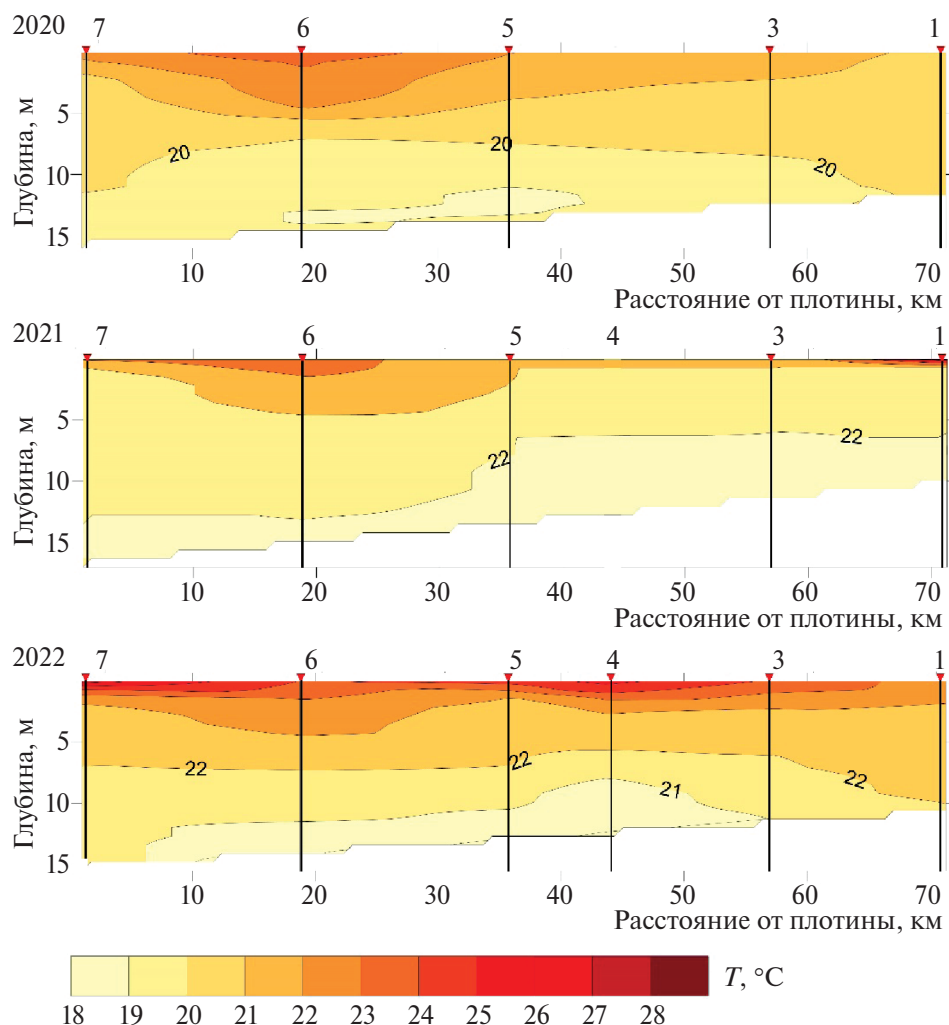


Рис. 3. Температура воды (°C) на русловых станциях от входного к замыкающему створу Ивановского водохранилища в августе 2020–2022 гг. Станции: 1 – Городня, 3 – устье Шошинского плеса, 4 – Плоски, 5 – Конаково, 7 – Корчева, 8 – Дубна.

значений, полученных в 2020 и в 2021 гг. (0.99–3.43 в 2020 г. и 3.24–3.75 в 2021 г.).

По данным измерений активности продукционно-деструкционных процессов (табл. 3), только в жарком 2022 г. величина деструкции превышала величину продукции ($P_{\text{вал}}$ – валовая продукция, $P_{\text{чист}}$ – чистая продукция). Следовательно, гидроэкологические условия конкретного года обуславливают различную интенсивность самоочищения водоема.

Было установлено, что для участков глубоководной зоны характерны стабильный состав и структура донного сообщества, а именно – олигохетно-хируномидный комплекс с небольшим (3–5) числом видов. Песчаные и песчано-илистые биотопы мелководной зоны водоема (без учета зоны зарастания) отличались большим видовым разнообразием донной фауны, особенно в группе

хируномид (до 15 видов), а также массовым развитием моллюсков и “прочих” организмов (пиявки, личинки насекомых) [Определитель, 1977; Определитель, 2004]. За период исследования определено, что в глубоководных участках волжских плесов, а также в устьевой зоне Шошинского плеса в сообществе донных организмов по относительной доле в численности устойчиво доминировали олигохеты (81–98%). При этом уровень их развития не всегда соответствовал пригодным для жизни условиям среды. Например, в Нижневолжском и Средневолжском плесах в условиях гипо- и аноксии численность олигохет была достаточно высокой, а в Верхневолжском плесе (у д. Городня), при большем содержании кислорода, плотность червей на 1 м² была ниже, чем на других участках, что, очевидно, связано с дефицитом органических веществ на песчаных грунтах.

Таблица 3. Характеристики продукционно-деструкционных процессов в районах Иваньковского водохранилища по данным съемок в августе 2020–2022 гг.

Станция	Дестр, мг О/л × ч			П _{вал} , мг О/л × ч			П _{чист} , мг О/л × ч		
	2020	2021	2022	2020	2021	2022	2020	2021	2022
Городня	0.01	0.04	0.11	0.19	0.17	0.36	0.15	0.15	0.28
Шоша	0.05	0.13	0.44	0.19	0.63	0.27	0.26	0.53	0.07
Корчева	0.10	0.06	0.23	0.48	0.42	0.05	0.39	0.36	–0.04
Дубна	0.06	0.01	0.28	0.20	0.48	0.19	0.17	0.49	–0.19

Таблица 4. Расчет объемов воды, профильтрованной *Dreissena polymorpha*

Показатели	2020	2021	2022
Средний вес 1 особи, г	0.809 ± 0.007	0.804 ± 0.08	1.149 ± 0.10
Сред. численность, экз/м ²	328	360	282
V _{ф.в.} за сутки с 1 м ² , л	272.3	297.0	332.0
V _{ф.в.} за сезон с 1 м ² , л	40021	43654	48869
V _{ф.в.} за сутки с S _{мелк.зоны} , млн м ³	9.26	10.1	11.3
V _{ф.в.} за сезон с S _{мелк.зоны} , млн м ³	1361	1484	1662
От объема водохранилища	1.2	1.3	1.5

Наши наблюдения подтверждают результаты других исследований [Воробьев и др., 2009; Цветкова, 1972], в которых установлено, что содержание растворенного кислорода в придонной воде не является лимитирующим фактором в развитии олигохет. Плотность их популяций и пространственное расположение не зависят от его концентрации, что, вероятно, обусловлено вертикальным или горизонтальным перемещением червей, связанным как с особенностями их питания, так и с процессом их размножения [Попченко, Попченко, 2013]. При недостатке растворенного кислорода в воде иловых биотопов олигохеты реагируют более активными “дыхательными” движениями и увеличением части тела, участвующей в этих движениях, что способствует биологическому перемешиванию (биотурбации) субстрата. Результатом биотурбации является изменение структуры ДО и их метаболизма, перенос растворенного кислорода, метана, усиление активности бентических микроорганизмов. Также олигохеты занимают ведущую позицию в минерализации ОВ.

По результатам исследований была дана оценка вклада фильтрационной деятельности *Dreissena polymorpha* (Palas) в процессы самоочищения и снижения эвтрофирования водоема. Выполнен расчет общего объема воды, профильтрованного моллюсками, с использованием данных по средней численности моллюсков на единицу

площади (1 м²), среднему весу одной особи (г), интенсивности фильтрации воды моллюском на единицу веса (мл/ч × г), фильтрационной активности моллюска (ч/сут), длительности активной фильтрации моллюсков (вегетационный период), площади мелководной зоны водохранилища с глубинами 3–4 м [Алимов, 1981; Набеева, 2010]. Объем воды, профильтрованный моллюсками, рассчитывался за вегетационный период (май–октябрь). Расчеты показали, что фильтрационная активность *Dreissena polymorpha* по значениям численности с единицы площади увеличилась в сутки с 272.251 л в 2020 г. до 332.442 л в 2022 г. За вегетационный период 2022 г. (май–октябрь) моллюски профильтровали 1.66 км³ воды, что соответствует 1.5 объема воды водохранилища (табл. 4).

Объем воды, профильтрованный дрейссеной за сезон 2022 г., превышающий таковые за предыдущие годы, можно объяснить значительной долей в популяции крупных моллюсков старшей возрастной группы (от 3-х лет и старше), обладающих более интенсивной фильтрационной активностью. Доля крупных моллюсков составила: 84% весной, более 50% летом, осенью соотношение взрослых моллюсков и годовиков, включая весеннюю генерацию, было приблизительно одинаково 48 и 52% соответственно. Существует мнение [Лазарева и др., 2018], что в последние годы во

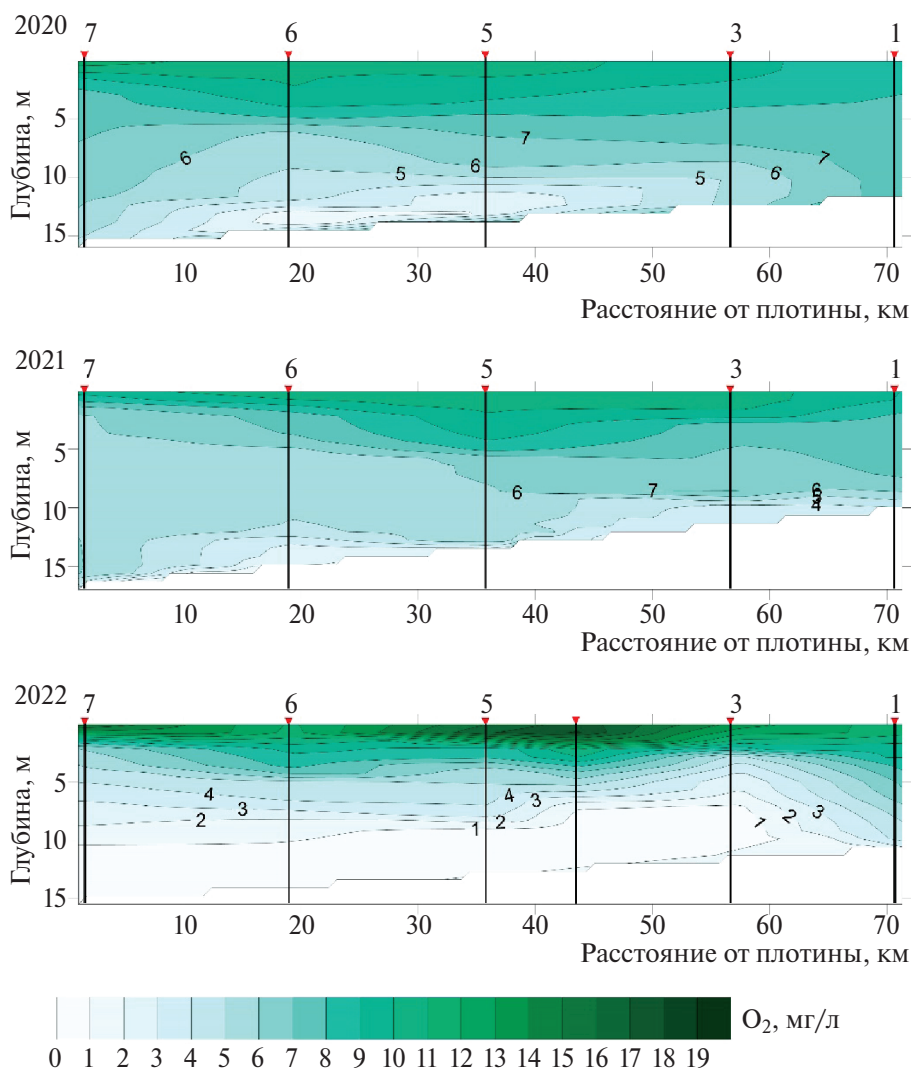


Рис. 4. Растворенный кислород (мг/л) на русловых станциях от входного к замыкающему створу Ивановского водохранилища в августе 2020–2022 гг. Станции: 1 – Городня, 3 – устье Шошинского плеса, 4 – Плоски, 5 – Конаково, 7 – Корчева, 8 – Дубна.

многих волжских водохранилищах наблюдается снижение численности дрейссенид, обусловленное плохой выживаемостью велигеров (планктонных личинок дрейссены), которая в свою очередь связана с дефицитом растворенного кислорода в придонных водах. Помимо благоприятного кислородного режима для успешного размножения и расселения дрейссены требуется относительно плотный субстрат. Поэтому на больших глубинах в зоне распространения иловых отложений она не встречается. Для массового развития дрейссены также необходима высокая минерализация и содержание кальция не менее 8.5 мг/дм^3 [Мартемьянов, 2013; Hincks, Mackie, 1997], а водные массы Ивановского водохранилища имеют малую или среднюю минерализацию в зависимости от сезона с содержанием кальция порядка $30\text{--}50 \text{ мг/дм}^3$.

Уровень pH является одним из наиболее важных факторов влияющих на состояние *D. polymorpha*. Установлено, что pH менее 7.4 может ограничивать распространение дрейссены [Ludyanskiy et al., 1993]. В маловодные годы с небольшим притоком в водохранилище повышение минерализации может быть благоприятным для велигеров. В холодный период при отсутствии активного фотосинтеза pH может снижаться (по данным измерений авторов) до критической величины.

ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ, ОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЭМИССИЯ МЕТАНА

Характеристики придонного слоя воды, верхнего слоя донных отложений и интенсивность обменных процессов на границе “вода–ДО”, полу-

Таблица 5. Характеристики придонного горизонта воды и верхнего слоя донных отложений Иваньковского водохранилища (ППВ – потребление O_2 придонной водой, d – гигроскопическая влажность грунта)

Год	Станция	Глубина, м	$T_{\text{дно}}, ^\circ\text{C}$	$O_{2\text{дно}}, \text{мг/л}$	ППВ, $\text{мг } O/\text{м}^2 \times \text{сут}$	$d, \%$	ОВ, %
2020	устье Шоши	10	19.9	5.25	310	4.5	10.9
	Плоски	—	—	—	—	—	—
	Конаково	13	18.7	1.96	237	7.4	15.5
	Корчева	14	18.9	1.12	62	6.3	14.5
	Дубна	16	19.7	4.84	124	6.9	14.3
2021	устье Шоши	9.5	21.5	3.5	360	5.5	12.3
	Плоски	—	—	—	—	—	—
	Конаково	13.5	21.5	2.9	557	7.2	15.9
	Корчева	14.4	21.9	2.5	1251	6.5	14.5
	Дубна	17	22	0.5	201	8	17.1
2022	устье Шоши	9.5	21.6	0.5	26	4.3	12.5
	Плоски	12	20.2	0.5	79	4.2	
	Конаково	12	20.7	0.5	86	5.3	14.4
	Корчева	14.5	20.5	0.4	81	4.4	12.4
	Дубна	16.2	21.2	0.5	112	3.7	10.6

ченные по результатам экспериментов на исследуемых станциях Иваньковского водохранилища, приведены в табл. 5 и 6.

Продолжительный период существования в водохранилище устойчивой стратификации в 2022 г. привел к истощению в придонных слоях воды лабильного органического вещества, что способствовало снижению интенсивности деструкционных процессов как в придонных слоях воды, так и в верхнем слое ДО (табл. 6). Так, среднее значение потребления кислорода в придонной воде (ППВ) по длине всего водохранилища в 2022 г. составило $77 \text{ мг } C/\text{м}^2 \times \text{сут}$, в то время как в 2020 и 2021 гг. — 183 и $592 \text{ мг } C/\text{м}^2 \times \text{сут}$ соответственно. Средняя величина общей деструкции ОВ в ДО в 2022 г. также была наименьшей ($481 \text{ мг } C/\text{м}^2 \times \text{сут}$), при 772 и $1651 \text{ мг } C/\text{м}^2 \times \text{сут}$ в 2020 и 2021 гг.

Различным был и характер распределения величин деструкции ОВ в ДО и придонном слое воды по длине водохранилища. В 2022 г. наблюдалось увеличение деструкции от верховьев к плотине. Этот же год отличается наименьшими величинами содержания ОВ в грунтах (12.5% в среднем по водоёму при 14–15% в 2020 и 2021 гг.). Величина аэробной деструкции ОВ в донных отложениях в приплотинном плёсе не превышала 15% от общей за все три года наблюдений.

Источником метана в водоёмах является ОВ, содержащиеся как в водной массе, так и в ДО. Интенсивность потока CH_4 определяется продукционно-деструкционными процессами, происходящими в водной толще, притоком ОВ с водосбора, активностью трансформации его в водоеме. Накопление ОВ в ДО происходит в результате осаждения содержащегося в водной толще ОВ аллохтонного и автохтонного происхождения. Поступление ОВ на дно и его преобразование зависит от скорости седиментации, гидрологической структуры всей водной толщи, от ее устойчивости к перемешиванию, от толщины и длительности существования гипоплимниона [Кременецкая и др., 2018].

Величина потока метана из донных отложений зависит от величины и продолжительности существования аноксидной зоны и уровня воды, поэтому в жарком и маловодном 2022 г. выход метана из ДО был существенно выше, чем в другие годы исследований (в среднем $67 \text{ мг } C/\text{м}^2 \times \text{сут}$ при 0.71 и $12.8 \text{ мг } C/\text{м}^2 \times \text{сут}$ в 2020 и 2021 гг., соответственно).

Анализ изменения интенсивности анаэробной деструкции ОВ в ДО в зависимости от содержания ОВ в грунте (рис. 5) показал, что увеличение содержания ОВ в ДО Иваньковского водохранилища в аэробных условиях приводит к интенсификации анаэробной деструкции, кроме станций,

Таблица 6. Интенсивность обменных процессов на станциях Иваньковского водохранилища (SOD – потребление кислорода ДО; $D_{\text{аэр}}$ – аэробная деструкция; $D_{\text{анаэр}}$ – анаэробная деструкция; $D_{\text{общ}}$ – общая деструкция; $P_{\text{мин}}$ – минеральный фосфор)

Год	Станция	SOD	$D_{\text{аэр}}$	$D_{\text{общ}}$	$D_{\text{анаэр}}$	выход CH_4	выход $P_{\text{мин}}$
		мг $\text{O}/\text{м}^2 \times \text{сут}$	мг $\text{C}/\text{м}^2 \times \text{сут}$				мг $\text{P}/\text{м}^2 \times \text{сут}$
2020	устье Шоши	74	28	914	886	0.03	59
	Плоски	—	—	—	—	—	—
	Конаково	149	56	1599	1543	0.6	12
	Корчева	150	56	265	209	0.06	10
	Дубна	119	45	310	265	0.02	30
2021	устье Шоши	177	67	1432	1365	1.3	8
	Плоски	—	—	—	—	—	—
	Конаково	309	116	1574	1458	0.01	14
	Корчева	283	106	1631	1525	9	81
	Дубна	225	84	1968	1884	40	107
2022	устье Шоши	16	6	148	142	84	52
	Плоски	10	4	254	250	87	17
	Конаково	12	4	463	459	2	24
	Корчева	86	32	639	607	62	45
	Дубна	122	46	899	853	109	61

где наблюдалась очень высокая (более 4000 экз м^2) численность роющего зообентоса. На этих станциях отмечался также значительный (более 50%) вклад аэробной деструкции в суммарный выход углерода из ДО. На остальных станциях вклад $D_{\text{аэр}}$ в суммарную деструкцию ОВ не превышал 16%. Возможно при такой высокой численности бентоса ассимиляция ОВ в ДО происходит, в основном, роющими организмами бентофауны, и снижается микробиальная деструкция ОВ в ДО.

На график А рис. 5 были добавлены ранее полученные данные по интенсивности $D_{\text{анаэр}}$ Можайского водохранилища для пойменных станций (получены авторами работы) с похожими на исследованные на Иваньковском водохранилище грунтами при аэробных условиях. Численность роющего бентоса на этих станциях была менее 4000 экз/ м^2 . Эти точки дополняют зависимость $D_{\text{анаэр}}$ от ОВ при соответствующей численности бентоса. При аэробных условиях в придонном горизонте для грунтов Иваньковского водохранилища отмечается тенденция увеличения интенсивности анаэробной деструкции при увеличении численности роющего зообентоса (рис. 5, график Б).

Исследования показали, что наибольший выход фосфора из ДО наблюдался в 2021 г. в ство-

рах Корчева и Дубна и достигал 107 мг $\text{P}/\text{м}^2 \times \text{сут}$. Максимальные значения потока фосфора, измеренные в 2020 и 2022 гг., были почти в два раза ниже и не превышали 60 мг $\text{P}/\text{м}^2 \times \text{сут}$. В 2020 г. это было связано с менее активными процессами деструкции при более низкой температуре и более благоприятных кислородных условиях, а в 2022 г. из-за истощения в придонных слоях воды лабильного ОВ ко дню проведения съемки, как отмечалось выше.

Совместный анализ интенсивности суммарной деструкции в ДО ($D_{\text{сумм}} = D_{\text{аэр}} + D_{\text{анаэр}} + \text{выход } \text{CH}_4$), выхода P и численности роющего зообентоса на станциях Иваньковского водохранилища (рис. 6), показал, что при численности бентоса менее 1300 экз/ м^2 даже при высокой интенсивности деструкции ОВ в ДО, выход $P_{\text{мин}}$ в аэробных условиях не превышал 14 мг/ $\text{м}^2 \times \text{сут}$. При высокой (более 1300 экз/ $\text{м}^2 \times \text{сут}$) численности роющего бентоса увеличение деструкции ОВ в илах сопровождается ростом потока $P_{\text{мин}}$ из ДО. Это связано с роющей деятельностью бентоса, способствующей, в том числе, выносу поровых вод донных отложений к границе раздела “вода–ДО”. Привлечение ранее полученных на Можайском водохранилище данных не противоречит полученным связям.

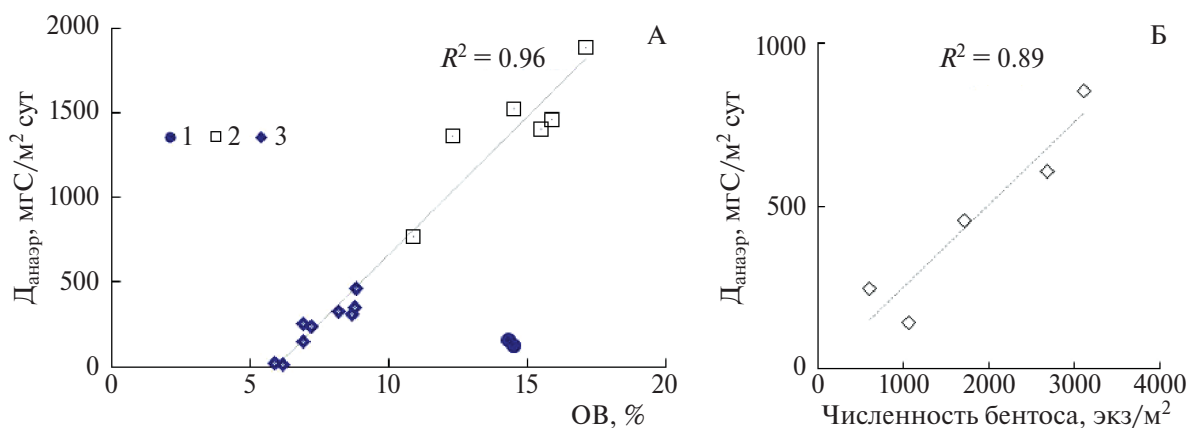


Рис. 5. (а) — связь $D_{\text{анаэр}}$ ОВ в ДО в аэробных условиях с содержанием ОВ в ДО в Ивановском вдхр. при численности роющего зообентоса $N > 4000$ экз/м² (1), при $N < 4000$ экз/м² (2) и в Можайском вдхр. при $N < 4000$ экз/м² (3); (б) — связь интенсивности $D_{\text{анаэр}}$ и численности роющего зообентоса в грунтах Ивановского водохранилища в аэробных условиях.

Эмиссия метана с поверхности водохранилища в рассмотренные три года также значительно различалась. В жарком 2022 г. при более низком уровне воды содержание метана в придонных горизонтах было на порядок больше, чем в 2020 и в 2021 гг. (табл. 7).

Это могло быть связано не только с наибольшим прогревом ДО, но и с активизацией биотурбации, которая подробно рассмотрена выше. Однако бурное развитие фитопланктона и высокое содержание кислорода в поверхностном слое (до 11.3–17.6 мг/дм³ в 2022 г. против 9–10.7 мг/дм³ в 2021 г.) привело к окислению метана, что в результате снизило значения его удельного потока, особенно в нижней глубоководной части водохранилища. Шошинский плес является наиболее неблагоприятным районом в отношении эмиссии метана из-за его мелководности, малой проточности и сильного цветения.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили выявить ряд особенностей формирования гидроэкологического режима и гидрологической структуры Ивановского водохранилища. Несмотря на сравнительно большую проточность Ивановского водохранилища, продолжительная жаркая погода, особенно в маловодный год, способствовала образованию дефицита кислорода в придонных слоях и выходу марганца и фосфатов из донных отложений. Поступление автохтонных биогенных элементов в толщу воды усилило вспышки цветения.

В жаркий август 2022 г. доминирующими видами в составе фитопланктона на большей части водоема от ст. Плоски до ст. Дубна были сине-зеленые водоросли, тогда как в предшествующие годы — диатомовые. Активное развитие фито-

Таблица 7. Содержание и эмиссия метана с поверхности Ивановского водохранилища в 2020–2022 гг.

Станция	Горизонт	CH ₄ , мкл/л			Удельный поток CH ₄ , мг C/(м² × сут)		
		2020	2021	2022	2020	2021	2022
Городня	пов.	16.6	4.7	13.5	63.4	10.5	23.4
	дно	16.8	4.6	72.6			
Шошинский плес	пов.	8.7	10.8	12.3	14.4	334.0	182.2
	дно	12.6	17.2	435.0			
Конаково	пов.	1.9	9.9	11.2	9.4	31.9	13.8
	дно	7.7	16.0	444.0			
Корчева	пов.	3.0	7.8	11.3	9.6	223.8	23.0
	дно	13.3	68.5	517.8			
Дубна	пов.	4.1	14.1	2.3	2.9	68.9	2.1
	дно	7.8	132.3	89.4			

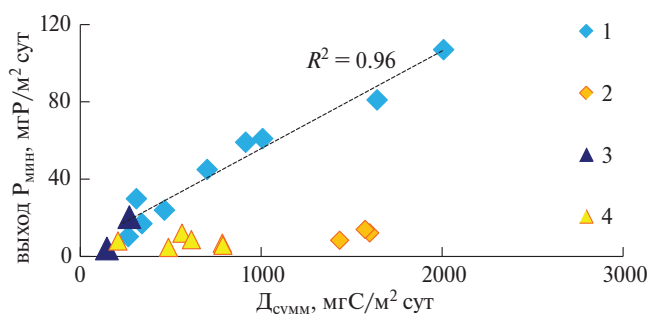


Рис. 6. Связь выхода $P_{\min}$ с $D_{\text{сумм}}$ при численности роющего зообентоса $N > 1300$ экз/м² и $N < 1300$ экз/м² в илах в Ивановского (1, 2) и Можайского (3, 4) водохранилищах.

планктона было причиной уменьшения концентрации фосфатов, увеличению значений БПК₅ и pH воды. В маловодный 2022 г. отмечены низкие значения цветности воды, что весьма благоприятно для задач питьевого водоснабжения.

Потребление кислорода в придонных горизонтах усугубляется всплесками цветения фитопланктона, его отмиранием и седиментацией. Разлагающееся органическое вещество является источником метана. Бескислородные условия способствуют активизации биотурбации, что увеличивает интенсивность выхода веществ, в том числе метана из донных отложений. Однако перенасыщение кислородом поверхностных горизонтов при избыточном цветении сокращает эмиссию метана, что является элементом саморегуляции экосистемы.

Гидроэкологические условия конкретного года обуславливают различную интенсивность самоочищения водоема. Жаркая погода способствует более активной деструкции, превышающей продукцию, при более высоких значениях температуры воды. Дефицит кислорода в придонном слое активизирует биотурбацию и усиливает потребление кислорода грунтами, что положительно сказывается на самоочищающей способности водоема.

Значимым фактором в изменении интенсивности обменных процессов на границе “вода–дно” является численность роющего макробентоса.

Шошинский плес является наиболее неблагоприятным районом Ивановского водохранилища в отношении эмиссии метана из-за его мелководности, малой проточности и сильного цветения.

Полученные результаты представляются важными для разработки и верификации гидроэкологических моделей водоемов. Параметры обменных процессов с дном не являются константами

и в значительной степени зависят от характеристик придонной воды и гидробионтов. Колебания численности бентоса чрезвычайно трудно прогнозировать из-за многофакторности. На нее оказывают влияние синоптические условия, уровенный и кислородный режим, а также выедание бентосоядными рыбами. Вспышки “цветения” воды могут существенно сокращать величину удельного потока метана, что необходимо отражать при моделировании этого процесса и учитывать при расчетах вклада водоемов в суммарную эмиссию.

Несмотря на очевидную взаимосвязь всех рассмотренных процессов, основным триггером их изменчивости в летний период являются особенности погодных условий, определяющие режим и состав притока, и гидрофизические характеристики, которые в свою очередь определяют интенсивность и особенности внутриводоемных процессов. Согласно работе [Экологические, 2001] период водообмена в среднем составляет 1.13 мес., а в маловодную фазу до 1.4 мес., поэтому характеристики притока воды в половодье практически не влияют на состояние водоема во вторую половину лета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алимов А. Ф. Функциональная экология пресноводных двустворчатых моллюсков. Л.: Наука, 1981. 248 с.
- Бентос Учинского водохранилища // Труды зоологического ин-та АН СССР. Т. XXII. М.: Наука, 1980. 180 с.
- Винберг Г. Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.
- Водоохранилища мира. М.: Наука, 1979. 287 с.
- Воробьев Д. С., Франк Ю. А., Залозный Н. А., Лушников С. В., Носков Ю. А. К вопросу о роли тубифицид в потреблении кислорода в донных отложениях, загрязненных нефтью // Известия Самарского НЦ РАН. Т. 11. № 1 (4). 2009. С. 702–706.
- Гашкина Н. А. Закономерности и оценка круговорота фосфора в системе вода–донные отложения в эвтрофном водохранилище // Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: ИВП РАН, 2003. 20 с.
- ГОСТ 31861–2012. Межгосударственный стандарт. Вода. Общие требования к отбору проб. Москва: Стандартинформ, 2013. 32 с.
- Гречушникова М. Г. Возможные климатические изменения гидрологического режима в долинных водохранилищах // Метеорология и гидрология. 2012. № 10. С. 71–80.
- Григорьева И. Л., Ковалышева Г. В. Влияние гидрометеорологических факторов на формирование качества воды Ивановского водохранилища в летний период // Метеорология и гидрология. 1995. № 6. С. 107–114.

- Григорьева И. Л. Исследование взаимосвязей минерализации воды водохранилищ различных морфологических типов с показателями их водного режима // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 1. С. 73–77.
- Даценко Ю. С., Пуклаков В. В., Эдельштейн К. К. Анализ влияния абиотических факторов на развитие фитопланктона в малопроточном стратифицированном водохранилище // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 10. С. 73–85.
- Дебольский В. К., Кочарян А. Г., Григорьева И. Л., Лебедева И. П., Толкачев Г. Ю. Проблемы формирования качества воды в поверхностных источниках водоснабжения и пути их решения на примере Ивановского водохранилища // Вода: химия и экология. 2009. № 7 (13). С. 2–11.
- Денисов Л. И., Мейснер Е. В. Ивановское водохранилище. Л.: Изв. ГосНИОРХ. 1961. Т. 50. С. 10–30.
- Дзюбан А. Н. Опыт оценки эмиссии метана на водных объектах урбанизированных территорий в бассейне Рыбинского водохранилища // Водные ресурсы. 2010. Том 37. № 4. С. 502–504.
- Иваньковское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344 с.
- Кременецкая Е. Р., Ломова Д. В., Соколов Д. И., Ломов В. А. Количественная оценка потоков органического вещества в донные отложения стратифицированного водохранилища долинного типа // Вода: химия и экология. 2018. № 7 (9). С. 39–46.
- Кузьмин Г. В. Фитопланктон: видовой состав и обилие // Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. С. 73–87.
- Лазарева В. И., Степанова И. Э., Цветков А. И., Пряничникова Е. Г., Перова С. Н. Кислородный режим водохранилищ Волги и Камы в период потепления климата: последствия для зоопланктона и зообентоса // Труды ИБВВ РАН. 2018. Вып. 81 (84). С. 46–83.
- Мартемьянов В. И. Пороговые концентрации катионов во внешней среде, определяющие границы распространения *Dreissena polymorpha* и *Dreissena bugensis* в пресных водоемах // Дрейссениды: эволюция, систематика, экология. Борок, 2013. С. 80–83.
- Мартинова М. В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. Москва: Наука, 2010. 243 с.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция. Л.: ГосНИОРХ, 1983. 33 с.
- Набеева Э. Г. Оценка восстановления и самоочищения разнотипных водных экосистем по показателям макрозообентоса // Автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. биол. наук. Нижний Новгород, 2010. 24 с.
- Никаноров Ю. И. Ивановское водохранилище. Л.: Изв. ГосНИОРХ, 1975. Т. 102. С. 5–25.
- Одум Ю. П. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.
- Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 511 с.
- Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 2. СПб: Наука, 2004. 527 с.
- Попченко В. И., Попченко Т. В. Пространственное размещение малощетинковых червей в водных экосистемах // Известия Самарского НЦ РАН. 2013. Т. 15. № 3 (7). С. 2246–2249.
- Цветкова Л. И. О роли тубифицид в кислородном балансе водоемов. Водные малощетинковые черви (систематика, экология, исследования фауны СССР) // Труды ВГБО, Т. 17. 1972. С. 118–125.
- Экологические проблемы Верхней Волги: Коллективная монография. Ярославль: ЯГТУ, 2001. 427 с.
- Bastviken D. et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // Global Biogeochemical Cycles. 2004. V. 18. P. 1–12.
- Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // Environmental Science and Technology. 2010. № 44 (14). P. 5450–5455.
- Elrod V. A., Berels; on W. M., Coale K. N., Johnson K. S. The flux of iron from continental shelf sediments: a missing source of global budgets // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. P. L 12307/1–12307/4.
- Hincks S. S., Mackie G. L. Effects of pH, calcium, alkalinity, hardness, and chlorophyll on the survival, growth, and reproductive success of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) in Ontario Lakes // Canadian journal of fisheries and aquatic sciences. 1997. V. 54. № 9. P. 2049–2057.
- Ludyanskiy M. L., McDonald D., MacNeill D. Impact of the zebra mussel, a bivalve invader // Bioscience. 1993. T. 43. № 8. P. 533–544.
- Sweerts J., Bar-Gilissen M., Cornelse A., Cappenberg T. E. Oxygen-consuming processes at the profundal and littoral sediment-water interface of a small meso-eutrophic lake // Limnol. Oceanogr. 1991. V. 36. № 6. P. 1124–1133.

FORMATION OF THE HYDROECOLOGICAL STRUCTURE OF THE IVANKOVSKY RESERVOIR IN THE SUMMER PERIOD IN ADJACENT YEARS WITH DIFFERENT WEATHER CONDITIONS

M. G. Grechushnikova^{1,2,3,4,*}, I. L. Grigoryeva³, D. V. Lomova²,
E. R. Kremenetskaya², A. B. Komissarov³, L. P. Fedorova³, V. A. Lomov^{1,4}, E. A. Chekmareva³

¹Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, GSP-1, Moscow, 199991 Russia

²Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Gubkina str., 3, Moscow, 119333 Russia

³Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Ivankovo Research Station, 61-a,
Belavinskay, Konakovo, Tverskay region, 171251 Russia

⁴Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia

*e-mail: allavis@mail.ru

The article examines the conditions for the formation of the hydroecological regime of the Ivankovo Reservoir according to data from complex hydrological, hydrochemical and hydrobiological surveys carried out in August 2020–2022. The identified differences in hydroecological characteristics are associated with the peculiarities of weather conditions in the summer seasons. Despite the significant flow of the reservoir, in its bottom layer during prolonged hot weather the formation of oxygen-free conditions is possible, affecting exchange processes with the bottom, hydrobionts and methane emissions. Increased bioturbation of bottom sediments by benthos under oxygen deficiency activates metabolic processes at the water-bottom sediments boundary, including the release of methane. A strong “bloom” of the reservoir, characteristic of hot weather conditions in 2022, led to a reduction in the specific flux of methane from the surface due to its oxidation with an excess of oxygen in the surface layer.

Keywords: Ivankovskoye reservoir, water temperature, hydrochemical indicators, methane emissions, phytoplankton, zoobenthos, production, destruction, metabolic processes