

ГИДРОХИМИЯ, ГИДРОБИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

УДК 556.555(212)+556.114.2

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ РАЗЛИЧИЯ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ГОДЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ПОГОДНЫМИ УСЛОВИЯМИ¹

© 2023 г. М. Г. Гречушникова^{a, b, *}, Д. В. Ломова^b, В. А. Ломов^a,
Е. Р. Кременецкая^b, И. Л. Григорьева^c, А. Б. Комиссаров^c, Л. П. Федорова^c

^aМГУ им. М.В. Ломоносова, Географический факультет,
Москва, 119991 Россия

^bИнститут водных проблем РАН,
Москва, 119333 Россия

^cИнститут водных проблем РАН, Ивановская научно-исследовательская станция,
Конаково, Тверской обл., 171251 Россия

*e-mail: allavis@mail.ru

Поступила в редакцию 12.01.2022 г.

После доработки 04.04.2022 г.

Принята к публикации 09.06.2022 г.

Приведены результаты исследования гидроэкологических характеристик (температуры воды, растворенного кислорода, химических показателей, продукции, содержания и эмиссии метана, численности фитопланктона и бентоса) в Ивановском водохранилище в августе 2020–2021 гг. По данным комплексных съемок показано, что особенности погодных условий и проточности привели к различиям данных показателей, которые находятся в тесной связи друг с другом. Жаркие погодные условия и меньшая проточность в 2021 г. способствовали увеличению потребления кислорода грунтами дна, активизации обменных процессов на границе вода – донные отложения, увеличению потока минерального фосфора, более активному цветению водоема, разложению отмершей органики при более высоких значениях температуры придонного слоя. Показана роль биотурбации в изменении интенсивности процессов обмена придонного слоя воды с донными отложениями. Результатом изменения комплекса перечисленных внутриводоемных процессов стало увеличение удельного потока метана в атмосферу в 2021 г. по сравнению с предыдущим годом.

Ключевые слова: метан, эмиссия, температура воды, растворенный кислород, главные ионы, биогенные элементы, органическое вещество, продукция, фитопланктон, бентос, водохранилище.

DOI: 10.31857/S0321059623010078, **EDN:** EDQZBO

ВВЕДЕНИЕ

Гидроэкологические характеристики в водоемах тесно связаны между собой, а сама экосистема водохранилища реагирует на внешние воздействия, к которым относятся синоптические изменения и регулирование проточности и уровня режима. Связь изменений гидроэкологических характеристик с изменениями внешних условий доста-

точно хорошо изучена, даже приводятся прогнозы вероятных изменений с учетом возможных климатических перемен на основе данных моделирования [5]. В то же время водохранилища также могут оказывать влияние на климат (как в небольшом пространственном масштабе на прилегающей территории, так и глобально за счет эмиссии метана в атмосферу). Метан – парниковый газ, изучению которого в последнее время уделяется большое внимание. Один из антропогенных источников метана – водохранилища (метан образуется при разложении аллохтонной и автохтонной органики и выделяется в атмосферу диффузионным и пузырьковым переносом). Водохранилища РФ еще относительно мало изучены по этой проблеме. Ивановское водохранилище – часть крупнейшего каскада водохрани-

¹ Полевые и лабораторные работы проведены в рамках темы “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” (FMWZ-2022-0002). Исследование содержания и эмиссии метана проведено в рамках темы “Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши” (121051400038-1).

лиц РФ, поэтому исследования межгодовой эмиссии метана представляются весьма актуальными. Известно, что гидроэкологический режим даже проточных водоемов находится в зависимости от погодных условий и динамики уровня воды, которые оказывают влияние на особенности стратификации, температурного и кислородного режима, первичную продукцию и обменные процессы с донными отложениями. Данное исследование дополняет этот список изучением такого актуального компонента, как метан.

Содержание органического вещества (ОВ) — источника метана в водоемах (в водной массе и в донных отложениях (ДО)) — определяется продукционно-деструкционными процессами, притоком с водосбора, активностью трансформации в водоеме и выносом со стоком. Накопление ОВ в ДО происходит в результате осаждения содержащейся в водной толще органики. Интенсивность потока ОВ ко дну и его преобразование во многом зависят от гидрологической структуры всей водной толщи, от ее устойчивости к перемешиванию, от толщины и длительности существования гипolimниона [9]. При наличии плотностной стратификации в водоеме в гипolimнионе могут формироваться бескислородные условия, приводящие к анаэробным процессам в ДО и к активизации обмена биогенными элементами с водной массой [11], которые могут усиливать продукционную активность в придонных слоях воды.

Между ДО и придонными слоями воды постоянно протекают процессы массо- и газообмена. Эти процессы могут происходить как в аэробных, так и в анаэробных условиях в зависимости от гидрологической и синоптической ситуации. Без учета бактериальной деструкции ОВ в ДО, а также миграции метана, который служит важной составляющей частью деструкционных процессов, невозможно понимание общих закономерностей функционирования водной экосистемы в целом. При минерализации ОВ в ДО высвобождаются фосфаты, которые поступают в поровый раствор [11]. Выход фосфора из ДО приводит ко вторичному загрязнению водной толщи биогенными веществами. Присутствие в ДО роющего макробентоса влияет на интенсивность массообмена, поскольку эти животные в процессе своей жизнедеятельности не только питаются ОВ, содержащимся в ДО, но и, создавая сеть каналов, могут увеличивать площадь поверхности ДО в 1.5 раза (при плотности 600 особей на 1 м²), чем способствуют проникновению O₂ в ДО, что активизирует процесс потребления O₂ в них [1].

Цель работы — показать различия гидроэкологической структуры водохранилища в одинаковую фазу режима при разных внешних условиях и оценить их количественно.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Иваньковское водохранилище — первое в Волжском каскаде, создано в 1937 г. Это самое мелководное из крупных водохранилищ России — акватория глубиной <2 м составляет около половины всей водной поверхности водоема при наполнении до нормального подпорного уровня (НПУ) 124 м. Водоохранилище имеет среднегодовой коэффициент водообмена (Кв) 10.3 год⁻¹ [7]. Подача воды в канал им. Москвы в среднем за год составляет 1.5 км³. Водные массы водохранилища также используются для охлаждения систем Конковской ГРЭС, что сказывается на тепловом режиме водоема ниже по течению. Также водоем используется для судоходства, добычи строительного материала, в рекреационных целях.

Иваньковское водохранилище относится к водохранилищам долинного типа и имеет довольно сложную конфигурацию. В водохранилище выделены четыре плеса, морфологические особенности которых обуславливают их эколого-биологические различия [13]. Верхневолжский плес — от г. Твери 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. Сожи, Нижневолжский плес — от устья р. Сожи до плотины, Шошинский плес представляет собой затопленную долину р. Шоши и является обособленной частью водоема. Большинство авторов выделяют только три плеса: Волжский (Верхневолжский и Средневолжский), Иваньковский (Нижневолжский) и Шошинский.

ДО в Иваньковском водохранилище представлены грунтами первичными трансформированными (почвы обнаженные, разбухшие, заболоченные) и вторичными (песок (13% дна водохранилища), песок илистый (26), ил песчаный (46), ил торфянистый и отложения из макрофитов (14%)). Содержание ОВ в песках составляет 1.4–2.8, в песках илистых — 3.5–9.8, в илах песчаных серых — 10.2–20, а в илах торфянистых и в отложениях из макрофитов — 42–62% [7].

По характеру залегания и закономерностям распределения ДО выделяются три разнотипных участка: Волжский, Иваньковский и Шошинский плесы, которые различаются морфометрическими характеристиками, режимами скорости течения, волнения [7]. 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 ИССЛЕДОВАНИЯ

Квасисинхронные гидролого-гидрохимические съемки водохранилища были проведены 5–6 ав-

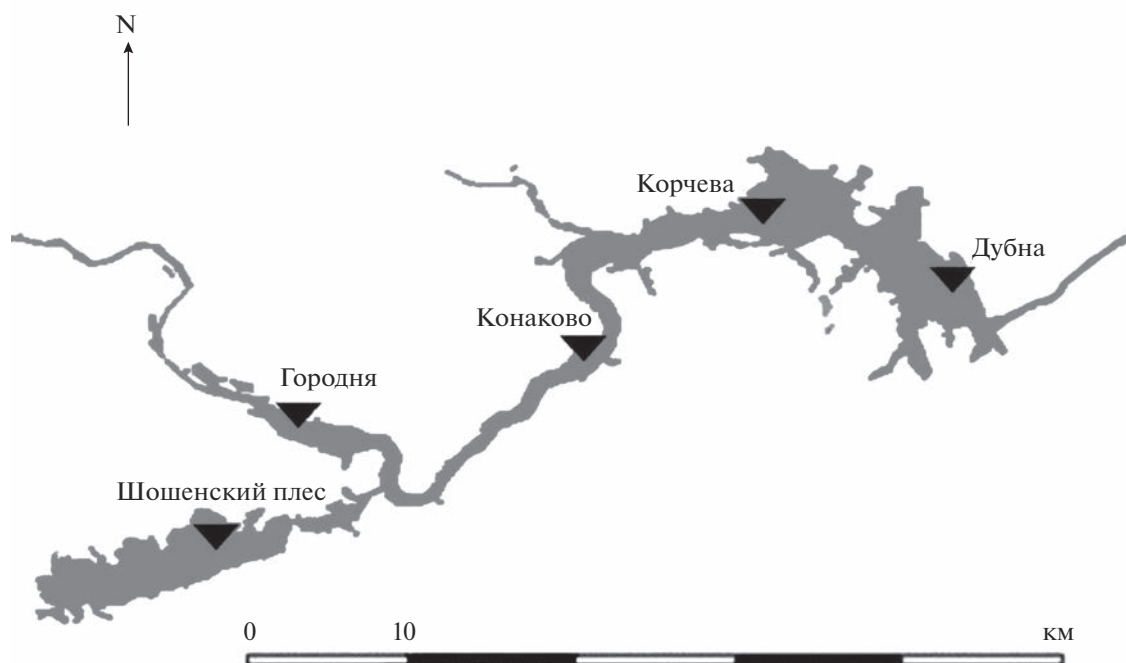


Рис. 1. Картограмма станций отбора проб на Иваньковском водохранилище.

густа 2020 г. и 4–5 августа 2021 г. Отбор проб и измерения проводились на станциях: с. Городня (Верхневолжский плес), комплекс отдыха “Дипкорпус” (Шосинский плес), г. Конаково (Средневолжский плес), створ Корчева и Приплотинный участок в районе г. Дубны (Нижневолжский, или Иваньковский, плес) (рис. 1). В ходе съемок выполнялись измерения вертикального распределения температуры воды, O_2 , электропроводности (кондуктометр “МАРК-601” и оксиметр “YSI ProODO”), измерялась прозрачность воды по диску Секки. Проводился отбор проб воды на химический анализ в каждом створе в придонном и поверхностном горизонтах на русле и у каждого берега.

Содержание метана в отобранных пробах определялось на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором “Хроматэк-Кристалл 5000.2.” Расчет концентрации метана в пробах воды проводился методом “headspace”. На станциях проводилось измерение удельного потока метана в атмосферу методом плавучих камер [14]. По ходу движения судна отбирались пробы воды для определения интенсивности продукционно-деструкционных процессов скляночным методом в кислородной модификации. Светлая и темная склянки экспонировались на борту судна в течение 3–4 ч, величины валовой продукции и деструкции определялись в пересчете на 1 ч.

Работы включали в себя эксперименты по определению потоков веществ на границе во-

да–ДО методом трубок. Дночерпателем Экмана отбирался ненарушенный верхний слой грунта для определения в нем содержания ОВ и гигроскопической влажности, из него же стеклянными трубками вырезались колонки илов для постановки экспериментов по оценке выхода CH_4 , P и HCO_3^- . Одновременно придонной водой заливалась аналогичная трубка, но без грунта (холостая), и эта пара трубок ставилась на 24 ч на экспозицию. По разнице концентраций веществ в грунтовой и холостой трубках определялся выход веществ из ДО, а также определялись скорость потребления O_2 и деструкция ОВ. Кроме того, отбирались пробы придонной воды для определения деструкции ОВ [2]. Определение HCO_3^- в трубках проводилось по стандартной гидрохимической методике [4]. Содержание ОВ в грунте оценивалось по потерям веса при прокаливании.

Во время съемки проведен отбор проб фитопланктона и зообентоса глубоководных участков на станциях Городня, “Дипкорпус” (Шосенский плес), Плоски, Конаково, Корчева и Дубна. Сбор материала и его камеральная обработка осуществлялась по методике [12].

Отбор проб фитопланктона проводился опрокидывающимся батометром 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 был формалин. Про-

бы фитопланктона концентрировались до 5 мл посредством вакуумной фильтрации через фильтры “Владипор” с диаметром пор 1 мкм. Учет численности клеток проводился на световом микроскопе в камере Учинская-2 объемом 0.01 мл при увеличении 400 крат, оценка биомассы — счетно-объемным методом [10].

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. Все пробы фиксировались в 4%-м формалине. В лабораторных условиях организмы отделяли от грунта, просчитывали и взвешивали на торсионных весах с точностью до 0.001 г отдельно по основным группам.

Отбор проб ДО (для оценки содержания ОВ и гигроскопической влажности) и колонок грунта для постановки экспериментов по оценке деградации ОВ в илах (по потреблению O_2 и выделению HCO_3^-), выхода метана и минерального фосфора проводили дночерпателем Экмана-Берджа на станциях Плотина, Корчева (Иваньковский плес), Конаково, Городня (Волжский плес) и на входе в Шошинский плес (ст. “Дипкорпус”).

Химический анализ отобранных проб воды проводился в аккредитованной химической лаборатории Ивановской НИС Института водных проблем РАН по аттестованным методикам. В пробах воды определялись следующие показатели и ингредиенты: рН, мутность, главные ионы, биогенные элементы, показатели ОВ (цветность, перманганатная окисляемость, химическое потребление O_2 , БПК₅), нефтепродукты, СПАВ, тяжелые металлы (медь, цинк, хром, свинец, марганец).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

К первой декаде августа 2020 г. Ивановское водохранилище оказалось достаточно хорошо перемешано (рис. 2). Четко выраженного слоя температурного скачка не наблюдалось, в водоеме отсутствовала бескислородная зона даже на станциях, близких к плотине. В продольном распределении температуры хорошо заметно ее повышение в поверхностных горизонтах в районе ст. Корчева вследствие работы Конаковской ГРЭС, сбрасывающей подогретую воду в Мошковский залив, расположенный выше по течению. След теплового загрязнения прослеживается и у плотины. Наибольшая разница поверхностной и придонной температуры воды характерна для ст. Корчева (5°C). В 2021 г. температура воды была существенно выше, что обусловлено погодными условиями (жаркая погода в июле) (рис. 3) и меньшей проточностью. По данным м/с Тверь [16], максимальные, минимальные и средние зна-

чения температуры воздуха в 2020 и 2021 гг. оставили 29.3, 33.3, 7.3, 9.9, 17.6 и 20.9°C соответственно, ветровая обстановка значительно не различалась. Поскольку открытых данных по водному балансу Ивановского водохранилища нет, ориентироваться можно на данные ПАО “Русгидро” [8] по притоку из Ивановского в Угличское водохранилище, для которого только 27% площади водосбора приходится на собственную боковую приточность: в 2020 г. в июле приток воды менялся в пределах 60–1770, а в 2021 г. — 10–80 $\text{м}^3/\text{с}$.

Принципиальные различия вертикального распределения O_2 состоят в его уменьшении ко дну на станциях Городня, “Дипкорпус” и Дубна в 2021 г., в большей аэрации придонных горизонтов в Конаково и в меньшем содержании в верхней части водной толщи на станциях Корчева и Дубна (рис. 2). По сравнению с 2020 г. существенно большая валовая продукция в 2021 г. отмечена в Шошинском плесе и на ст. Дубна (0.63 и 0.48 $\text{мгO}_2/\text{л ч}$ против 0.19 и 0.2 $\text{мгO}_2/\text{л ч}$). Для станций Городня и Корчева валовая продукция по съемкам идентична (0.19 и 0.17 $\text{мгO}_2/\text{л ч}$, 0.48 и 0.42 $\text{мгO}_2/\text{л ч}$ соответственно) (табл. 1). В августе 2021 г. общая численность фитопланктона менялась по станциям исследования от 8.777 до 52.238 млн кл/л, а биомасса составляла 0.969–17.468 мг/л , что существенно выше аналогичных данных в августе 2020 г.: тогда общая численность клеток микроводорослей была <17.773 млн кл/л, а биомасса — 0.913–9.281 мг/л .

Сумма главных ионов в августе 2021 г. (207–270 мг/л) превышала величины в августе 2020 г. (198–231 мг/л). Величины рН 8.1–8.6 в августе 2021 г. несколько превышали таковые в 2020 г. — 7.5–8.1, что, очевидно, связано с более интенсивным развитием фитопланктона летом 2021 г. Концентрации железа общего в первую съемку менялись от 0.1 до 0.42, а во вторую — от 0.02 до 0.09 мг/л . Концентрации марганца в обе съемки были примерно одинаковыми и, в основном, менялись соответственно в диапазонах 0.01–0.07 и 0.02–0.10 мг/л . Наиболее высокая концентрация марганца была отмечена в первую съемку у Конаково в придонном горизонте и составила 0.23 мг/л . Концентрации минерального фосфора менялись примерно в одном диапазоне в обе съемки, соответственно 0.011–0.057 и 0.007–0.10 мг/л . Концентрации иона аммония в августе 2020 г. менялись от 0.1 до 0.76 мг/л , а в августе 2021 г. от 0.06 до 2.46 мг/л . Наибольшие концентрации (1.2 мг/л) нитратного иона в августе 2020 г. отмечены во входном створе (ст. Городня), а в августе 2021 г., наоборот, в замыкающем створе (ст. Дубна). В августе 2021 г. отмечены более низкие значения цветности и перманганатной окисляемости. А самые высокие значения химического потребления O_2 (ХПК) (до 40.4 $\text{мгO}_2/\text{л}$ в

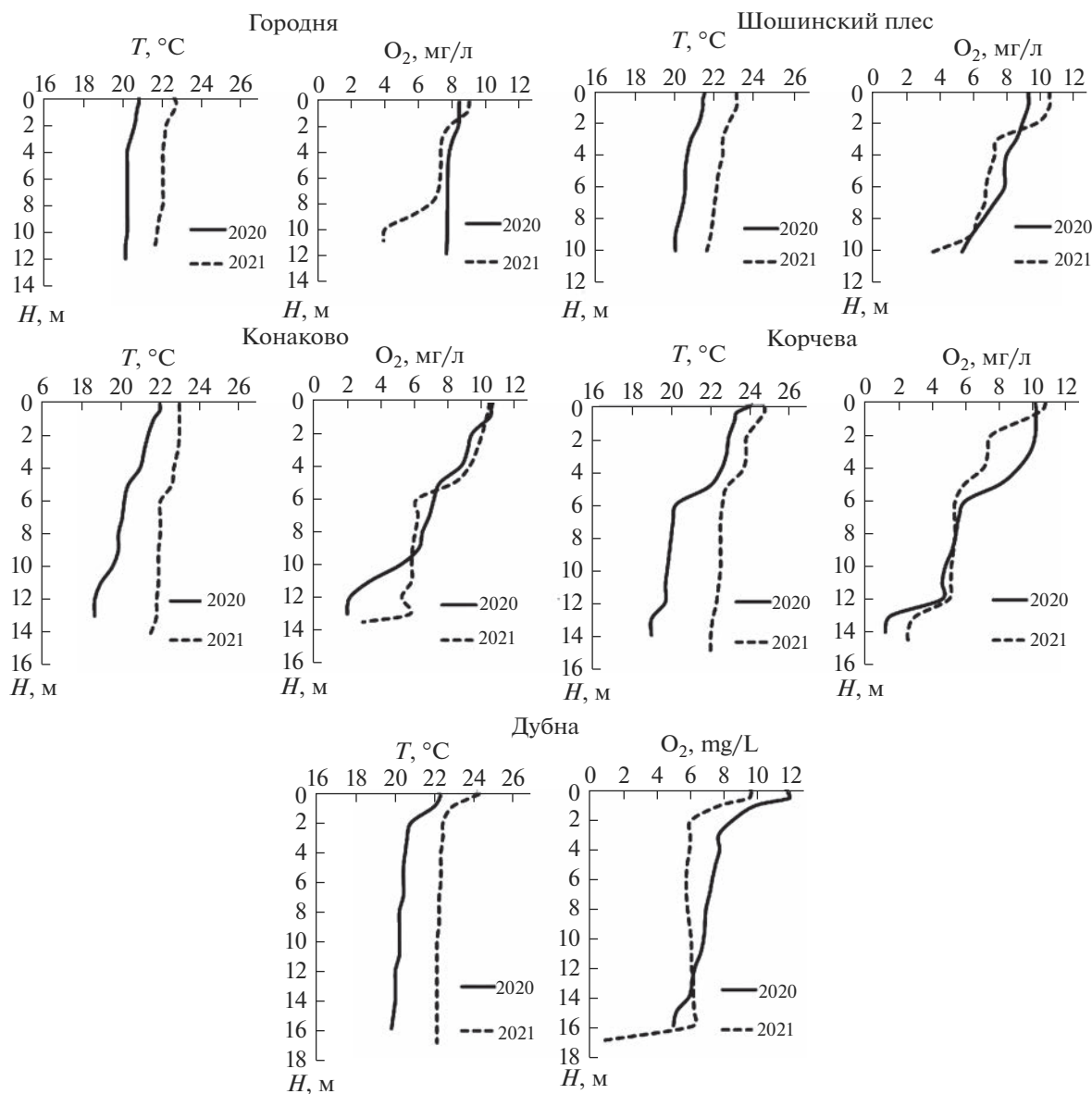


Рис. 2. Изменение температуры воды и растворенного кислорода по глубине на станциях измерений 5–6 августа 2020 г. и 4–5 августа 2021 г.

створе Корчева на русле у поверхности) и биохимического потребления O_2 (БПК₅) (до 5.4 мгО₂/л в створе Конаково у поверхности) зафиксированы в августе 2021 г.

Данные по содержанию метана и характерные величины эмиссии приведены в табл. 2. Для обеих съемок на всех станциях, кроме Городни, находящейся в проточном Верхневолжском плесе, содержание метана у дна выше, чем у поверхности, однако в 2021 г. его концентрации значительно выше, особенно в приплотинной части.

Это могло быть связано с активным цветением водоема в середине лета (рис. 3), чему могла способствовать жаркая, преимущественно штилевая

погода. Наибольшее содержание метана отмечено на приплотинном участке; тем не менее его содержание на порядок меньше, чем, к примеру, для слабопроточного Можайского водохранилища, где к концу лета у дна оно может достигать 2000–3000 мкл/л [6].

В более жарком 2021 г. с меньшей проточностью величины потока метана оказались выше, чем в 2020 г. Наибольшая величина потока для Шошинского плеса может быть связана с его относительной мелководностью [15] и наибольшей продуктивностью. Относительно небольшой поток в районе Конаково и у плотины (ст. Дубна) может быть связан с большим содержанием

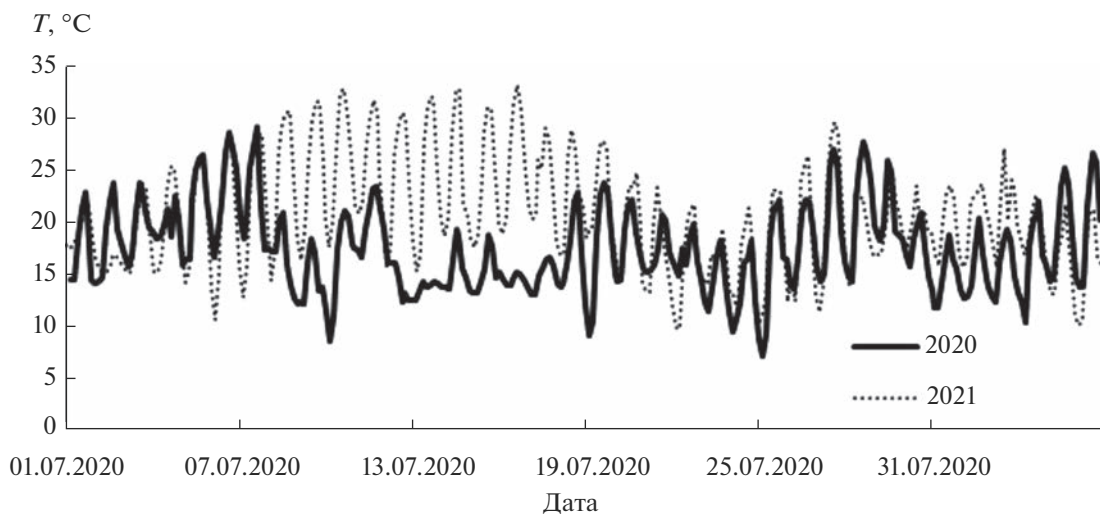


Рис. 3. Температура воздуха по данным м/с Тверь в летний период 2020 и 2021 гг.

O_2 в придонных горизонтах, чем, например, на ст. Корчева (рис. 1). Особенности содержания и эмиссии метана тесно связаны с комплексом гидроэкологических характеристик. Так, жаркая погода в июле 2021 г. привела к более значительному повышению температуры в придонных горизонтах и к снижению содержания O_2 у поверхности ДО. Возможно, в июле 2021 г. содержание O_2 у дна

было еще меньше, чем в августе, что повлияло на численность бентоса и его роющую активность. Из-за условий, близких к бескислородным, в 2021 г. численность зообентоса в приплотинном районе существенно ниже, чем в 2020 г. (табл. 2). Роющая активность бентоса может способствовать аэрации верхних слоев ДО, окислению метана и сокращению его потока в придонный слой воды,

Таблица 1. Характеристики обменных процессов на границе вода – донные отложения и их предикторов на Иваньковском водохранилище (H – глубина станции, $T_{\text{дно}}$ – температура придонного слоя, ППВ – потребление кислорода придонной водой, SOD – потребление кислорода грунтами дна, $D_{\text{аэр}}$ – аэробная деструкция, $D_{\text{общ}}$ – общая деструкция, FluxCH_4 – поток метана из грунта, FluxP – поток минерального фосфора из грунта, N – численность бентоса, d – гигроскопическая влажность, $ОВ$ – содержание органического вещества, D – деструкция в поверхностном слое, P_v и P_c – валовая и чистая продукция фитопланктона)

Характеристика	H	$T_{\text{дно}}$	$O_{2\text{дно}}$	ППВ	SOD	$D_{\text{аэр}}$	$D_{\text{общ}}$	FluxCH_4	FluxP	N	d	ОВ	D	P_v	P_c
Размерность	м	°C	мг/л	мг O_2 /м ² сут	мгС/м ² сут	мгС/м ² сут	мг/м ² сут	мг/м ² сут	экз/м ²	%	%	мг O_2 /(л ч)			
2020 г.															
Шошинский плес	10	19.9	5.25	310	74	28	914	0.04	59.1	1980	4.5	10.9	0.05	0.19	0.26
Конаково	13	18.7	1.96	237	136	51	1454	0.75	12.2	1280	7.4	15.5	0.04	0.12	0.07
Корчева	14	18.9	1.12	6	136	51	241	0.08	10.3	4800	6.3	14.5	0.1	0.48	0.39
Дубна	16	19.7	4.84	124	119	45	310	0.03	29.9	9360	6.9	14.3	0.06	0.2	0.17
2021 г.															
Шошинский плес	9.5	21.5	3.5	360	199	75	1608	1.74	8.4	960	5.5	12.3	0.13	0.63	0.53
Конаково	13.5	21.5	2.9	557	347	130	1768	0.11	14	1040	7.2	15.9	0.06	0.04	–0.01
Корчева	14.4	21.9	2.5	1251	333	125	1919	12.48	81	2180	6.5	14.5	0.06	0.42	0.36
Дубна	17	22	0.5	201	264	99	2316	53.15	107	2120	8	17.1	0.01	0.48	0.49

Таблица 2. Содержание и эмиссия метана по данным съемок 2020 и 2021 гг.

Станция	Горизонт	2020 г.	2021 г.	2020 г.	2021 г.
		CH ₄ , мкл/л		мгС/(м ² сут)	
Городня	Поверхность	16.63	4.72	63.4	10.5
	Дно	16.75	4.59	—	—
Шошинский плес	Поверхность	8.71	10.78	14.4	334
	Дно	12.58	17.21	—	—
Конаково	Поверхность	1.94	9.85	9.4	31.9
	Дно	7.70	16.02	—	—
Корчева	Поверхность	3.04	7.82	9.6	223.8
	Дно	13.31	68.48	—	—
Дубна	Поверхность	4.09	14.09	2.9	68.9
	Дно	7.79	132.27	—	—

что и было зафиксировано на станциях Корчева и Дубна в 2020 г.

По сравнению с другими водохранилищами в схожих ландшафтно-климатических условиях удельный поток с поверхности Иваньковского водохранилища имеет тот же порядок. Так, в августе 2019 г. на Озернинском водохранилище наибольший измеренный авторами поток составил 301 мгС/м² сут, в августе 2019–2020 гг. на Можайском водохранилище — 400 и 244 мгС/м² сут соответственно.

В табл. 1 приведены характеристики придонного слоя воды, верхнего слоя ДО и интенсивность обменных процессов на границе вода–ДО на исследуемых станциях Иваньковского водохранилища в 2020–2021 гг. Можно отметить, что в 2021 г. наблюдался более существенный прогрев придонных слоев воды относительно 2020 г. (температура придонной воды на всех станциях была выше на 2–3°C). Содержание O₂ у дна на всех станциях в 2020 г. было >1 мг/л, а на станциях “Дипкорпус” и Дубна достигало 5 мг/л. В 2021 г. содержание O₂ в придонных слоях, в целом, было ниже, однако бескислородные условия наблюдались только в приплотинном плесе.

В 2021 г. в средней части Иваньковского водохранилища (ст. Корчева) наблюдалось активное цветение водорослей. В результате в придонном слое на этой станции было отмечено максимальное за все время наблюдений потребление O₂ в придонных слоях воды (ППВ) — 1251 мг/м² сут при средних значениях этого показателя по всему водоему 270 мг/м² сут.

Влажность грунта и содержание в нем ОВ и в 2020, и в 2021 гг. примерно одинаковые. Минимальные значения наблюдались на ст. “Дипкорпус”, максимальные — в приплотинном плесе, в районе Дубны. На ст. Дубна в 2021 г. и гигроскопическая влажность грунта, и содержание в нем ОВ оказались несколько выше (влажность на 1.3%, содержание ОВ на 2.7%).

Общая деструкция (D_{общ}) ОВ в грунтах в 2021 г. оказалась значительно выше практически на всех станциях (за исключением ст. Конаково). В верховьях в 2021 г. D_{общ} превышала таковую за 2020 г. почти в 1.5 раза, а в приплотинном плесе она увеличилась почти в 6.3 раза. При этом вклад аэробной деструкции в общую невелик. В 2020 г. в среднем по водохранилищу аэробная деструкция составляла 8% общей, а в 2021 г. — 11%.

Выход метана из ДО в 2020 г. на всех исследуемых станциях <0.57 мгС/м² сут, а в среднем по водохранилищу — 0.17 мгС/м² сут. В 2021 г. в приплотинном районе Иваньковского водохранилища при наличии бескислородных условий у дна выход метана из ДО достигал 39.9 мгС/м² сут. При этом на других станциях средняя величина потока метана из ДО составляла только 3.5 мгС/м² сут.

Максимальные значения выхода фосфора (Р) из ДО в 2020 г. наблюдались в верхнем районе (устье Шоши) и достигали 60 мгР/м² сут. В среднем и нижнем районах величины выхода Р из ДО варьировали от 12 до 30 мгС/м² сут. Существенно отличная ситуация наблюдалась в 2021 г.: минимальные значения потока (8.4 мгС/м² сут) получены в верхнем районе; максимальные (107 мгС/м² сут) — в приплотинном плесе. Такой

высокой интенсивности выхода Р из ДО также способствовали бескислородные условия в районе Дубны.

Анализ изменения интенсивности анаэробной деструкции ОВ в ДО в зависимости от содержания ОВ в грунте показал, что увеличение содержания ОВ в ДО полимиктического Иваньковского водохранилища приводит к интенсификации анаэробной деструкции, кроме станций, где наблюдалась высокая (>4000 экз/м²) численность роющего зообентоса (хинономид и олигохет). На этих станциях также отмечался значительный ($>50\%$) вклад аэробной деструкции в суммарный выход С из ДО, тогда как на остальных станциях вклад аэробной деструкции ($D_{\text{аэр}}$) в суммарную деструкцию ОВ $\leq 16\%$.

Поток Р из ДО формируется вследствие следующих процессов: деструкции фосфоросодержащей части ОВ на непрерывно обновляющейся поверхности дна; поступления Р из более глубоких слоев ДО; десорбции Р из илов, происходящей преимущественно при аноксидных условиях; конвективного потока Р с выделяющимися из ДО пузырьками газа (в водоемах с активным газоотделением). Согласно исследованиям [3], наиболее значимые факторы, влияющие на интенсивность потока Р из ДО в воду, — десорбция фосфатов и деструкция ОВ.

Совместный анализ интенсивности $D_{\text{общ}}$ в ДО, выхода Р, содержания ОВ в ДО и численности роющего зообентоса на станциях Иваньковского водохранилища показал, что при численности бентоса <1300 экз/м² даже при высокой интенсивности деструкции ОВ в ДО выход минерального Р в аэробных условиях <14 мг/м²сут. При высокой (>1300 экз/м²) численности роющего бентоса увеличение деструкции ОВ в илах сопровождается ростом потока минерального Р из ДО. Возможно, это связано с биотурбацией, способствующей в том числе выносу поровых вод ДО к границе раздела вода—ДО.

ВЫВОДЫ

Различия гидроэкологических показателей Иваньковского водохранилища в августе смежных лет (2020 и 2021 гг.) были обусловлены более жаркой погодой в июле 2021 г., которая привела к большему прогреву придонных горизонтов воды и снижению содержания в них О₂ по сравнению с 2020 г. Это выразилось в увеличении $D_{\text{общ}}$ и $D_{\text{аэр}}$, потреблении О₂ грунтами на дне и увеличении потока метана и Р из ДО в придонный слой воды при снижении количества роющего и аэрирующего грунта зообентоса. Различия гидрометеорологических условий в исследуемые годы привели также к изменению химических и гидробиологических (фитопланктон) показателей воды.

Содержание ОВ в верхнем слое грунта в 2021 г. было несколько выше, чем в 2020 г., из-за более активного продуцирования ОВ в трофогенной зоне. Но из-за условий, близких к бескислородным, в 2021 г. численность зообентоса, его роющая активность в приплотинном районе существенно ниже, что выразилось в менее активном окислении метана в грунтах и в увеличении его потока в придонный слой воды на станциях Корчева и Дубна. Величины удельного потока метана в атмосферу могут существенно различаться из-за разницы погодных условий и проточности в конкретном сезоне, определяющих формирование гидроэкологической структуры и продуктивность водоема. В 2020 г. общий поток метана с поверхности водоема менялся от 2.9 до 63.4 мгС/м² сут при убывании его величин от верховьев к плотине, а в 2021 г. он составлял от 10.5 до 334 мгС/м² сут с максимумами на станциях Корчева и в Шошинском плесе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бентос Учинского водохранилища // Тр. зоологического ин-та АН СССР. Т. XXII. М.: Наука, 1980. 180 с.
2. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.
3. 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.
4. ГОСТ 31957-2012. ВОДА Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов. М.: Стандартинформ, 2019.
5. Гречушникова М.Г. Возможные климатические изменения гидрологического режима в долинных // Метеорология и гидрология. 2012. № 10. С. 71–80.
6. Гречушникова М.Г., Репина И.А., Степаненко В.М., Казанцев В.С., Артамонов А.Ю., Ломов В.А. Эмиссия метана с поверхности долинного водохранилища // География и природ. ресурсы. 2019. № 3. С. 77–85.
7. Иваньковское водохранилище современное состояние и проблемы охраны / Отв. ред. М.Г. Хублярян. М.: Наука, 2000. 344 с.
8. Изменения уровней водохранилищ ГЭС РусГидро. www.rushydro.ru/hydrology/informer (дата обращения: 10.11.2021)
9. 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.
10. Кузьмин Г.В. Фитопланктон: видовой состав и обилие // Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. С. 73–87.

11. *Мартынова М.В.* Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М.: Наука, 2010. 243 с.
12. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция. Л.: ГосНИОРХ, 1983. 33 с.
13. *Никаноров Ю.И.* Иваньковское водохранилище. Л.: Изв. ГосНИОРХ, 1975. Т. 102. С. 5–25.
14. *Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L.* Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // *Global Biochem. Cycles*. 2004. V. 18. 12 p.
15. *Miller B., Arntzen E., Goldman A., Richmond M.* Methane Ebullition in Temperate Hydropower Reservoirs and Implications for US Policy on Greenhouse Gas Emissions // *USA: Environ. Management*. 2017. V. 60. 1–15 p.
16. www.rp5.ru