

Результаты исследования внутриводоемных процессов Иваньковского водохранилища в различные годы и сезоны

М. Г. Гречушникова^{1,2}, И. Л. Григорьева^{3*}, Д. В. Ломова², Е. Р. Кременецкая²,
А. Б. Комиссаров³, Л. П. Федорова³, В. А. Ломов¹, Е. А. Чекмарева³, Н. Ю.
Панкова³, П. Н. Терский²

¹Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

³Институт водных проблем РАН, Ивановская научно-исследовательская станция,
Тверская область, г. Конаково, Россия
Irina_Grigorieva@list.ru

Аннотация. Работа обобщает данные комплексных полевых исследований Иваньковского водохранилища за 2020–2023 г. Выявлены изменения гидрохимических характеристик, связанные как с поступлением воды с водосбора выше г. Тверь, так и обусловленные местными причинами (загрязнение воды в летний период в рекреационных зонах, поступление загрязнений с селитебной территории). Впервые проведенный анализ органического углерода (C_{org}) показал, что его содержание значительно превышает предельные значения для питьевой воды, принятые как в нашей стране, так и за рубежом, что связано с поступлением притока соответствующего состава с его заболоченного водосбора. Продолжительный период жаркой погоды был благоприятен в отношении снижения цветности воды и эмиссии метана с поверхности, активизации деструкционных процессов в донных отложениях.

Ключевые слова: Иваньковское водохранилище, гидрохимический режим, главные ионы, биогенные элементы, тяжелые металлы, общий органический углерод, фитопланктон, зообентос, метан, обменные процессы с дном.

The results of the study of internal processes of the Ivankovskoye reservoir in different years and seasons

M.G. Grechushnikova^{1, 2}, I. L. Grigoryeva^{3*}, D.V. Lomova², E.R. Kremenetskaya²,
A.B. Komissarov³, L.P. Fiodorova³, V.A. Lomov¹, E.A. Chekmareva³, N.U. Pankova³,
P.N. Terskiy²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia

³Water Problems Institute of RAS, Ivankovskaya research station, Tver region, Konakovo, Russia
Irina_Grigorieva@list.ru

Abstract. The work summarizes the data of comprehensive field studies of the Ivankovskoye reservoir in 2020-2023. Changes in hydrochemical characteristics associated both with the inflow of water from the watershed above the city of Tver and due to local causes (water pollution in summer in recreational areas, the inflow of pollution from the residential area) are revealed. The first analysis of Sorg showed that its content significantly exceeds the limit values for drinking water accepted both in our country and abroad, which is due to the inflow of the corresponding composition from its waterlogged catchment. The prolonged period of hot weather was favorable with respect to the reduction of water color and methane emission from the surface, activation of destructive processes in bottom sediments.

Keywords: Ivankovskoye reservoir, hydrochemical regime, main ions, biogenic elements, heavy metals, total organic carbon, phytoplankton, zoobenthos, methane, exchange processes with the bottom sediments.

Введение

Водохранилищам – источникам водоснабжения уделяют пристальное внимание в отношении исследования качества воды и процессов его формирующих. К ним относятся процессы разбавления и перемешивания водных масс, минерализации органического вещества, обмена на границе вода-донные отложения и другие. В зависимости от водности года и гидрометеорологических условий внутриводоемные процессы могут протекать по-разному, что оказывает влияние на состояние водоема. Изучение влияния различных гидрометеорологических условий на гидроэкологическое состояние и особенности внутриводоемных процессов исследовалось авторами в различные годы и сезоны на Иваньковском водохранилище.

Материалы и методы исследования

Комплексные исследования проведены в августе 2020–2022 гг., в мае 2022 и 2023 гг. и в марте 2023 г. В июне 2022 г. выполнена дополнительная гидрохимическая съемка.

Весь комплекс измерений и отбор проб производился на 5 станциях: 1 – с. Городня (Верхневолжский плес), 3 – комплекс отдыха «Дипкорпус» (Шошинский плес), 5 – г. Конаково (Средневолжский плес), 7 – Корчева и 8 – приплотинный участок в районе г. Дубна (Нижневолжский или Иваньковский плес). В створах: 2 – остров Низовка, 4 – Плоски, 6 – устье Мошковицкого залива дополнительно производился отбор проб воды и проб на фитопланктон (Рис.). В процессе съемок выполнялись измерения вертикального распределения температуры воды, растворенного кислорода, электропроводности (зонды YSI ProOdo), прозрачность воды измерялась по диску Секки.

Отбор проб воды осуществлялся из поверхностного и придонного горизонта на фарватере и у каждого из берегов по ГОСТ 3161-2012. Химический анализ отобранных проб воды был выполнен в аккредитованной химической лаборатории Иваньковской НИС ИВП РАН (аттестат аккредитации RA.RU.21АН96). Микроэлементный состав (медь, цинк, свинец, хром, никель) определялся на атомно-абсорбционном спектрометре AA-6800F фирмы Shimadzu. Органический (C_{org}) и неорганический углерод определяли с помощью анализатора общего органического углерода TOC-2000 с 2023 г. Отбор проб и определение фитопланктона и зообентоса производилось по стандартным гидробиологическим методикам [2,4,5]. Удельный поток из воды в атмосферу определялся методом «плавающих камер» [6]. Определение содержания метана в воде производилось методом «headspace» [7]. Определение концентрации метана производилось на газовом хроматографе Хроматэк-Кристалл 5000.2 с пламенно-ионизационным детектором. Содержание органического вещества в грунте оценивалось по потерям веса при прокаливании. Определение потоков веществ на границе «вода – донные отложения (ДО)» производили методом трубок [1; 3; 8; 9]. Потоки вещества 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.

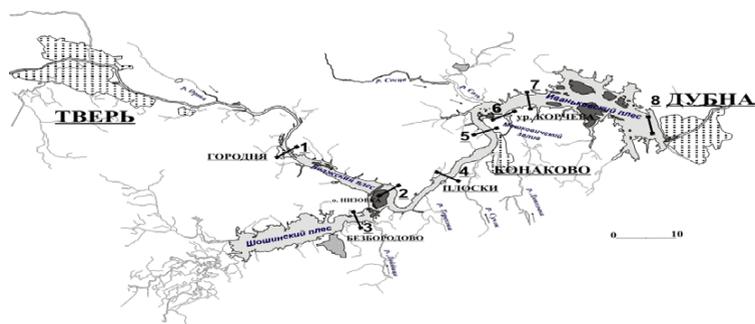


Рис. Схема Иваньковского водохранилища со станциями отбора проб воды, фитопланктона, зообентоса, грунта и измерений эмиссии метана

Результаты и выводы

Комплексные исследования в августе трех последних лет показали, что разные гидрометеорологические условия обуславливают различия в протекании внутриводоемных процессов. Из-за жаркого маловодного лета 2022 г. выявлено увеличение минерализации воды и уменьшение цветности, перманганатной окисляемости, концентраций железа общего и прозрачности воды от мая к августу. Большая проточность водохранилища способствует разбавлению поступающих локальных загрязнений, но, с другой стороны, в значительной степени качество воды на входном створе определяется влиянием г. Тверь. В зимний период изменение параметров качества воды по длине водоема незначительно. В мае наблюдалось значительное различие удельной электропроводности в поверхностном слое воды во входном (Городня) (250 мкСм/см) и в замыкающем створе (Дубна) (167 мкСм/см), поскольку в мае в Иваньковском плесе еще оставались мало минерализованные воды весеннего половодья, а в августе уже преобладали меженные воды. В мае изменение по глубине не наблюдалось, в августе более высокие концентрации отмечались в придонном горизонте. По содержанию минерального фосфора ($P_{мин}$) качество воды водохранилища в мае 2022 г. и июне 2022 г. можно было отнести к «олиготрофным» (концентрации менее 0.05 мгР/дм^3). В августе 2022 г. при отсутствии кислорода у дна концентрации $P_{мин}$ увеличились до $0.10\text{-}0.15 \text{ мгР/дм}^3$ из-за обменных процессов с ДО, что соответствует статусу водоема «мезотрофный».

Концентрации иона аммония в мае 2022 г. не превышали 0.15 мг/дм^3 , в июне они были еще ниже и увеличились в августе 2022 г. Концентрации нитрит-иона были наиболее низкими в мае 2022 г. и значительно (до 3 ПДК_{рыб.}) увеличились в августе 2022 г. в районе пляжей, что свидетельствует о свежем фекальном загрязнении. Диапазон изменения концентраций нитрат-иона составил $0.2\text{-}3.5 \text{ мг/дм}^3$. Наибольшие концентрации наблюдались, как правило, у дна, а низкие на участках интенсивного развития фитопланктона (при его активном потреблении). Содержание нефтепродуктов в мае 2022 г. во всех точках отбора проб воды в поверхностном горизонте было ниже 0.05 мг/дм^3 (ПДК_{рыб.}). Небольшое превышение ПДК_{рыб.} отмечалось в июне и августе 2022 г. в поверхностном горизонте на русле и до 2-4 ПДК_{рыб.} на рекреационных участках. Во все периоды наблюдений концентрации хрома в воде были ниже ПДК_{рыб.}, а концентрации меди – выше в 2–40 раз. Наибольшие ее концентрации отмечены в придонном горизонте в марте 2023 г. Известно, что концентрации меди в поверхностных водах имеет сезонные колебания: в зимний период показатели наивысшие, а летом из-за значительного роста биомассы они снижаются.

Впервые проведенные измерения содержания органического углерода ($C_{орг}$) показали, что значения его концентрации в водохранилище сравнительно высоки из-за притока с заболоченного водосбора. В воде, поступающей в канал имени Москвы, концентрация растворенного $C_{орг}$ в марте 2023 г. составила 17 мг/л, в мае – 15 мг/л. В международной практике для питьевой воды средние значения органического углерода установлены в пределах от 2 до 4 мг/л. В РФ $C_{орг}$ является одним из показателей качества бутилированной воды согласно СанПиН 2.1.4.1116А 2002. Для воды высшей категории предельное значение $C_{орг}$ составляет 5 мг/л, для первой категории — 10 мг/л. Таким образом, в воде водохранилища и канала им. Москвы зафиксированы концентрации растворенного $C_{орг}$ превышающие предельные значения для питьевой воды, принятые как в нашей стране, так и за рубежом, и свидетельствующие о высокой органической нагрузке на Иваньковское водохранилище даже в зимний период.

В жарком августе 2022 г. в Иваньковском водохранилище были зарегистрированы самые высокие значения численности и биомассы фитопланктона за период наших исследований с 2010 г., но таксономическое разнообразие было в 2 раза меньше. Бурное размножение фитопланктона при жаркой погоде способствовало перенасыщению кислородом поверхностного слоя и значительному снижению эмиссии метана, несмотря на его активную генерацию в донных отложениях при более высокой температуре. Общая численность микроводорослей изменялась в поверхностном слое от 44.116 до максимальных 301.790 млн.кл/л, а общая биомасса фитопланктона изменялась от 13.155 до 65.891 мг/л. Однако, индекс сапробности изменялся в августе 2022 г. от 1.91 до 2.14, что практически не отличается от результатов прошлогодних исследований (в августе 2021 г. — 1.74-2.13, в августе 2020 г. — 1.91-2.10). Вода в водохранилище по индексу сапробности по-прежнему характеризуется как «умеренно-загрязнённая» и относится к 3-му классу качества. Зимой разнообразие фитопланктона формировали представители зелёных и диатомовых. Общая численность микроводорослей изменялась по акватории исследования от 944 тыс.кл/л до 2.1 млн.кл/л, общая биомасса — от 0.271 до 1.786 мг/л. Наибольшие количественные показатели фитопланктона были зарегистрированы в центральной части водохранилища в районе д. Плоски как августе 2022 г., так и в марте 2023 г.

За период наблюдений в 2022-23 гг. и по материалам предыдущих исследований установлено, что бентофауна глубоководной зоны водохранилища стабильно представлена олигохетно-хиროномидным комплексом. При этом структурообразующими участниками донного сообщества являются малоцетинковые черви (pp. Tubifex, Limnodrilus, Potamothrix), доля которых в разные годы и сезоны достигала 70-94 % за исключением Городни весной и летом 2022 г. (43-56 %). В летний период значительная концентрация ОВ в глубоководной зоне водоема и высокие показатели температуры придонного слоя воды способствовали возникновению анаэробных условий, приводящих к упрощению структуры донного сообщества и увеличению доли олигохет до 81-98 % в его составе. Олигохеты играют основную роль в процессе биологической утилизации и трансформации органического вещества иловых биотопов. Являясь основными биотурбантами, они способствуют переносу растворенного кислорода и усилению активности бентических микроорганизмов и активизации обменных процессов, что положительно сказывается на самоочищающей способности водоема. Повышение минерализации воды летом маловодного 2022 г. по сравнению с предыдущими летними сезонами способствовало увеличению численности *Dreissena polymorpha* и объему профильтрованной ими воды.

Деструкция в придонном слое воды в летний период увеличивается от верховьев к плотине (от 26 мгО₂/м²сут до 112 мгО₂/м²сут). Зимой потребление кислорода у дна практически отсутствует. Весной максимальные значения наблюдались в верхнем районе (на станциях Шошинский плёс и Плоски – 47 и 79 мгО₂/м²сут, соответственно), что, возможно, связано с поступлением на дно автохтонного ОРВ. Характер распределения общей деструкции ОВ в верхнем слое ДО совпадает с распределением деструкции в придонном слое воды: летом наблюдается увеличение интенсивности деструкции в ДО от верховьев к плотине (от 148 мгС/м²сут в Шошинском плёсе до 900 мгС/м²сут в районе Дубны); зимой – минимальные значения по всему водохранилищу (80-148 мгС/м²сут); весной наибольшие значения отмечаются в верхнем районе (600-625 мгС/м²сут), а минимальные (140 мгС/м²сут) – на станции Конаково.

Содержание ОВ в верхнем слое ДО в летний период максимально на станции Плоски (23 %). В остальных районах водохранилища от 11 до 14 %. Зимой содержание ОВ в грунтах одинаково по длине всего водоёма (17-19 %). Весной более высокое содержание ОВ в грунте наблюдалось на станциях Корчева – Дубна и составляло 18-21 %, в остальных районах водохранилища ОВ в ДО было несколько ниже – 14 %.

Максимальные величины выхода фосфора из донных отложений были измерены в августе 2022 г. и составили 40 мгР/м²сут на всех участках водохранилища. Минимальные величины отмечались в зимний период (8 мгР/м²сут). Весной по длине всего водоёма величина потока фосфора составила 16 мгР/м²сут.

При хорошей аэрации придонных горизонтов выход метана из донных отложений, определяемый методом трубок, ничтожный. При содержании кислорода в придонном горизонте более 2 мг/л выход метана не превышает 2 мгС/м²сут. Следует оговорить, что метод трубок не улавливает пузырьковую эмиссию, которая имеет большой вклад в выход метана в атмосферу. В периоды с дефицитом кислорода в придонном слое (август 2022 г.) выход метана из ДО увеличивался и достиг 200 мгС/м²сут. Более точную оценку выхода метана из ДО можно получить только с использованием донной камеры. Содержание метана в воде в створе Городня имеет наименьшую внутригодовую изменчивость и составляет от 9.8 до 14 мкл/л, что может быть обусловлено поступлением загрязнений выше по течению. В жарком августе 2022 г. при снижении содержания кислорода у дна до 2 мг/л концентрация метана возросла до 72.6 мкл/л. На остальной акватории в мае 2022 и 2023 г. получены значения концентрации метана одного порядка с максимумом в придонном горизонте в районе станций Плоски-Конаково (14-27 мкл/л у дна) и выраженным снижением в сторону плотины (до 6.1-6.7 мкл/л у дна).

В летний период при наличии бескислородных условий в придонном горизонте всех станций, кроме Городни, наибольшее содержание метана (1000 мкл/л) характерно для створа Плоски. Вдвое меньше в устье Шоши, на створах Конаково и Корчева и менее 90 у Плотины, что обусловлено глубиной на участках (наибольшая у плотины), содержанием ОВ в грунте. Створ Плоски, по-видимому, испытывает загрязнение от населенных пунктов, расположенных на берегу, ниже устья Шоши. Эмиссия метана в мае 2023 г. была в 2-3 раза ниже, чем в мае 2022 г. из-за более прогретого и насыщенного кислородом поверхностного слоя (7.7-8.1 мг/л против 12.6-15.8 мг/л). Наблюдается закономерное снижение удельного потока по направлению к плотине в соответствии с глубиной. В августе удельный поток на 2-3 порядка больше с максимумом на станции Плоски и минимумом у плотины.

Полученные закономерности указывают на тесную связь качества воды и внутриводоёмных процессов в Ивановском водохранилище, несмотря на его значительную проточность. Погодные условия с продолжительной жарой

неблагоприятны в отношении избыточного развития фитопланктона, но в условиях жаркого маловодного лета имеет место снижение цветности воды, увеличение численности дрейссены и объема профильтрованной воды, активизация процессов деструкции и снижение потока метана на поверхности водохранилища. В весенний период при хорошей аэрации водной толщи поток метана не превышает 5 мгС/(м²·сут), в летний период имеет место значительная вариативность его значений по продольной оси и межгодовые различия (до 334 мгС/(м²·сут) в Шошинском плесе), обусловленные синоптическими и гидрологическими условиями.

Благодарности

Авторы благодарят Казанцева В.С. за предоставленную возможность обработки проб на метан в лаборатории парниковых газов ИФА РАН.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0002 Государственного задания ИВП РАН.

Acknowledgments

The authors thank V.S. Kazantsev for the opportunity to process samples for methane in the greenhouse gas laboratory of IAP RAS.

This study was carried out under Governmental Order to Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, subject no FMWZ-2022-0002».

Список литературы

1. 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.

2. Кузьмин Г.В. Фитопланктон: видовой состав и обилие // Методика изучения биогеоценозов внутренних водоёмов. М.: Наука, 1975. С. 73-87.

3. Мартынова М.В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. Москва: Наука, 2010. 243 с.

4. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция. Л.: ГосНИОРХ, 1983. 33 с.

5. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. СПб: Наука, 2004. Т. 6. 527 с.

6. 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

7. Bastviken D. et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. Global Biochemical Cycles. 2004. 18. doi:10.1029/2004GB002238

8. Elrod V.A., Berelson 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 12307/1-12037/4.

9. 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.