

АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ ЗОН АНОКСИИ В МОЖАЙСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ¹

© 2021 г. Ю. С. Даценко^а, *, В. В. Пуклаков^а

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119991 Россия

*e-mail: yuri0548@mail.ru

Поступила в редакцию 05.11.2019 г.

После доработки 17.08.2020 г.

Принята к публикации 28.08.2020 г.

Проанализированы результаты модельных расчетов характеристик зон аноксии в Можайском водохранилище за 57-летний период. Для расчетов использована двумерная боксовая гидрологическая модель водохранилища, позволяющая с суточным шагом по времени рассчитывать изменения значений экологических переменных. Установлены основные закономерности формирования и развития бескислородных условий в различных частях водохранилища. Выявлены факторы, определяющие пространственно-временные особенности распределения зон аноксии в водохранилище в различные годы. Получены эмпирические зависимости объемов зон аноксии от характеристик устойчивости водной массы водохранилища и индекса цветения, характеризующего интенсивность первичного продуцирования в экосистеме водохранилища. Отмеченная тенденция роста объемов зон аноксии за рассматриваемый период характеризует прогрессирующее эвтрофирование Можайского водохранилища.

Ключевые слова: Можайское водохранилище, кислородный режим, зоны аноксии, индекс цветения воды, градиент температуры воды, эвтрофирование.

DOI: 10.31857/S0321059621010132

ВВЕДЕНИЕ

Особое внимание лимнологов к режиму растворенного в воде водоемов кислорода вызвано тем, что изменения его концентрации интегрально отражают особенности сложного круговорота биогенных элементов (БЭ) и органических веществ (ОВ) в экосистеме водоемов, обусловленного комплексом продукционно-деструкционных и динамических процессов.

В глубоких водохранилищах с ярко выраженной плотностной стратификацией в летний период особенности внутриводоемных процессов зависят от вертикальной неоднородности физических (плотность, температура), химических (концентрации БЭ и ОВ) и биологических (водные организмы, растительность) компонентов экосистемы. Процесс фотосинтеза протекает только в верхнем фотическом слое, а деструкция ОВ происходит во всей толще воды.

Задача оценки пространственно-временных изменений растворенного кислорода (РК) чрезвычайно актуальна для таких водохранилищ, особенно для тех из них, что используются в качестве источников водоснабжения крупных городов. Можайское водохранилище, входящее в систему водоснабжения г. Москвы, — типичный пример такого водохранилища. В период летней и зимней стагнации в нем наблюдается резко выраженная стратификация РК, как правило, с возникновением зон аноксии с содержанием в их водной массе РК < 2 мг/л.

Отсутствие РК в воде существенно влияет на характер трансформации многих химических соединений, особенно на границе вода–дно, поэтому анализ формирования зон аноксии представляет особый интерес. Изменение объемов таких зон, глубины их образования и длительности существования служит важным фактором интенсивности и направленности круговорота веществ в экосистеме. Хорошо известно резкое возрастание внутренней биогенной нагрузки при появлении аноксии в придонных слоях водоемов [7]. Аноксия оказывает существенное влияние на

¹ Работа выполнена по плану НИР кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ (государственное задание № АААА–А16–116032810054–3) и при финансовой поддержке РФФИ (проект 18–05–01066).

развитие ихтиофауны водоемов и может приводить к изменению характера трофических взаимодействий в экосистеме.

Наблюдения за режимом РК за время эксплуатации Можайского водохранилища проводились периодически с разной частотой и пространственной дискретностью. По результатам этих наблюдений и анализа структуры водных масс установлены наиболее общие черты кислородного режима в водохранилище, которые сохраняются от года к году — образование и постепенное в течение лета заглублиение термо- и оксиклина, их относительно горизонтальное положение вдоль водоема, формирование и динамика зон аноксии [4–6].

Колебания уровня воды в водохранилище и изменчивость синоптической ситуации в течение вегетационного периода обуславливают разнообразные пространственно-временные особенности распределения РК в водохранилище и динамику зон аноксии в отдельные годы: сроки и места образования таких зон, их объемы, режим развития и исчезновения и т.п. Полевыми наблюдениями, которые всегда дискретны и нерегулярны, установить ведущие факторы закономерностей распределения зон аноксии чрезвычайно сложно. Эффективным инструментом при анализе межгодовых особенностей кислородного режима водохранилища может служить математическое моделирование его гидрологического режима за многолетний период на основе хорошо верифицированной на примере данного водоема математической модели, позволяющей имитировать изменения его гидроэкологического состояния в результате воздействия внешних и внутриводоемных факторов с шагом по времени ≤ 1 сут.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время в литературе описано много экологических моделей водных экосистем разного уровня, сложности и назначения, наиболее подробный обзор которых представлен в [9]. Они используют разнообразный математический аппарат, основаны на научных концепциях, которые допускают различную формализацию. Самым перспективным направлением в области математического моделирования водных экосистем следует считать создание имитационных (нередко называемых портретными) моделей. В этих моделях исследуются по возможности все основные взаимосвязи компонентов конкретной экосистемы в пространстве и времени в сочетании с разнообразными по своей природе внешними воздействиями на водоем [1, 8].

Имитационные математические модели экосистем и модели качества воды водоемов строятся

обычно по модульному принципу и всегда содержат как минимум два относительно самостоятельных блока: гидрологический (гидродинамический), определяющий перенос и перемешивание пассивных субстанций в водоеме, и экологический, описывающий кинетику внутриводоемной трансформации неконсервативных переменных состояния экосистемы. Гидрологический блок призван решать задачи теплообмена в водоеме. В этом блоке рассчитываются процессы пространственно-временных изменений концентраций веществ в результате внешнего гидрометеорологического воздействия на водные массы водоема. По способу представления пространственной структуры гидрологические блоки подразделяются на точечные (с сосредоточенными параметрами), резервуарные (боксовые, камерные), непрерывные (с распределенными параметрами).

Непрерывные модели, как правило, формулируются в виде дифференциальных уравнений с частными производными, т.е. массоперенос в них описывается уравнениями адвекции и турбулентной диффузии. При этом решение трехмерной и даже двухмерной задачи сопряжено со значительными математическими и техническими трудностями вычислительного плана. К тому же идентификация и верификация таких моделей требует большого числа экспериментальных данных, которыми редко располагает исследователь [10].

На практике часто применяют упрощенные одномерные (в основном концептуально-детерминированные) имитационные модели [12]. Наиболее известная из таких моделей — одномерная модель качества воды CE-QUAL-R1 [16]. В последнее время в литературе все чаще встречаются работы по моделированию водных экосистем с использованием двухмерной (x, z) -модели CE-QUAL-W2 [17], несмотря на наличие вычислительных сложностей, свойственных многомерным моделям, и необходимости предварительной оценки (“настройки”) многих значений входящих в нее параметров.

Если характер задачи требует более простого учета пространственных неоднородностей, используются боксовые модели. В таких моделях исследуемое пространство водоема разбивается на несколько отсеков в соответствии с морфометрическими особенностями водоема. В реальных водоемах всегда можно выделить достаточно крупные части (отсеки с примерно однородными условиями), динамику состава воды в которых можно описать одномерной по вертикали моделью. Последовательная реализация алгоритмов точечных моделей каждого такого отсека начиная от верховьев водохранилища позволяет объединить одномерные модели в целостную модель

экосистемы водоема. Между отсеками происходит обмен веществом, который по физическому смыслу представляет собой результирующий адвективный перенос и в простейшем случае оценивается по водному балансу. Такой принцип, несмотря на очевидное упрощение динамических явлений, несомненно перспективен не только для формального описания физического фона экосистемы, но и для понимания и объяснения сложного сочетания процессов, определяющих внутренний водообмен водоема. Особенность этого подхода связана с тем, что боксовую модель численно реализовать значительно проще, чем непрерывную, поэтому такой подход во многих случаях вполне оправдан.

К подобному типу моделей относится гидрологическая модель водохранилищ (ГМВ-МГУ), разработанная на географическом факультете МГУ [14, 18]. Она основана на подходах к моделированию, использовавшихся в одномерной модели качества воды CE-QUAL-R1, и по своей структуре представляет собой боксовую квазидвумерную продольно-вертикальную модель водохранилища, включающую в себя блоки расчета теплообмена (гидродинамический блок) и характеристик качества воды (экологический блок). Водоохранилище в модели схематизируется в виде совокупности состыкованных между собой лопастей, представляющих собой затопленные при создании водохранилища долины рек. Каждая лопасть делится в продольном направлении на расчетные отсеки-плесы с учетом их морфометрических и гидродинамических особенностей. Все отсеки разбиваются по вертикали на горизонтальные боксы толщиной 1 м, в пределах которых водная масса на каждом расчетном шаге по времени предполагается однородной. При последовательном выполнении расчетов от отсека к отсеку начиная с верховьев водоема к каждому из них применим алгоритм классической одномерной (по вертикали) модели, детально изложенный в [16].

Расчет по модели выполняется с шагом по времени 1 сут на основе метода суперпозиции в следующей последовательности для каждого расчетного шага по времени: трансформация метеоданных над водной поверхностью; изменение уровня воды в водохранилище; трансформация характеристик качества воды в боксах в результате внутримассовых процессов; оценка теплового баланса и динамики снежно-ледяного покрова; вертикальное перемешивание в результате воздействия ветра, свободной и вынужденной конвекции (циркуляция Ленгмюра); горизонтальный водообмен между отсеками в результате стоковых, плотностных, ветровых и компенсационных течений. Уравнение состояния воды представлено в

виде зависимости ее плотности от температуры и электропроводности для пресной воды гидрокарбонатного и сульфатного классов [13]. Сток воды из приплотинного плеса водохранилища задается с учетом селективности водозабора по зависимостям Бохена и Грейса [12]. В конце каждого расчетного шага выполняется контроль баланса вещества и энергии в отсеках. Наиболее полное описание алгоритма модели, ее верификации, практического применения для диагностических и прогностических расчетов режима водохранилищ Московского региона представлено в [2].

Выбор этой модели для решения поставленной задачи по оценке многолетних изменений характеристик зон аноксии в Можайском водохранилище определен тем, что в ее алгоритме для описания гидрометеорологических процессов использовались методики, рекомендованные для гидрологических расчетов при проектировании и эксплуатации водохранилищ России [11], реализация которых основана на стандартной гидрометеорологической информации Росгидромета и сети мониторинга загрязнения окружающей среды, а также простотой алгоритма численного решения ее уравнений на основе явной конечно-разностной схемы.

Можайское водохранилище – типичное долинное водохранилище, созданное в 1961 г. и осуществляющее многолетнее регулирование стока верховий р. Москвы. Оно имеет низкий коэффициент водообмена и поэтому постоянно стратифицировано летом. Сравнительно небольшие его размеры (длина 28 км, площадь 30 км², глубина до 22 м) позволяют проводить детальные полевые исследования по всей акватории водохранилища за короткое время методом квазисинхронных гидрологических съемок [13]. По трофическому состоянию это водохранилище относится к слабоэвтрофным водоемам, для которых характерны значительные сезонные колебания концентраций РК.

Водоохранилище достаточно хорошо изучено как с гидрологической, так и с экологической точек зрения [5]. По нему накоплен обширный материал данных наблюдений в Красновидовской лаборатории по изучению водохранилищ МГУ им. М.В. Ломоносова, работающей на водоеме с 1965 г. по настоящее время. Полевые исследования проводятся в виде гидролого-гидрохимических съемок по всему водохранилищу, рейдовых наблюдений в средней части водоема и гидролого-гидрохимических наблюдений на его основных притоках. В годы наиболее детальных наблюдений средняя частота проведения съемок составляла 1 раз в месяц, наблюдений на рейдовой

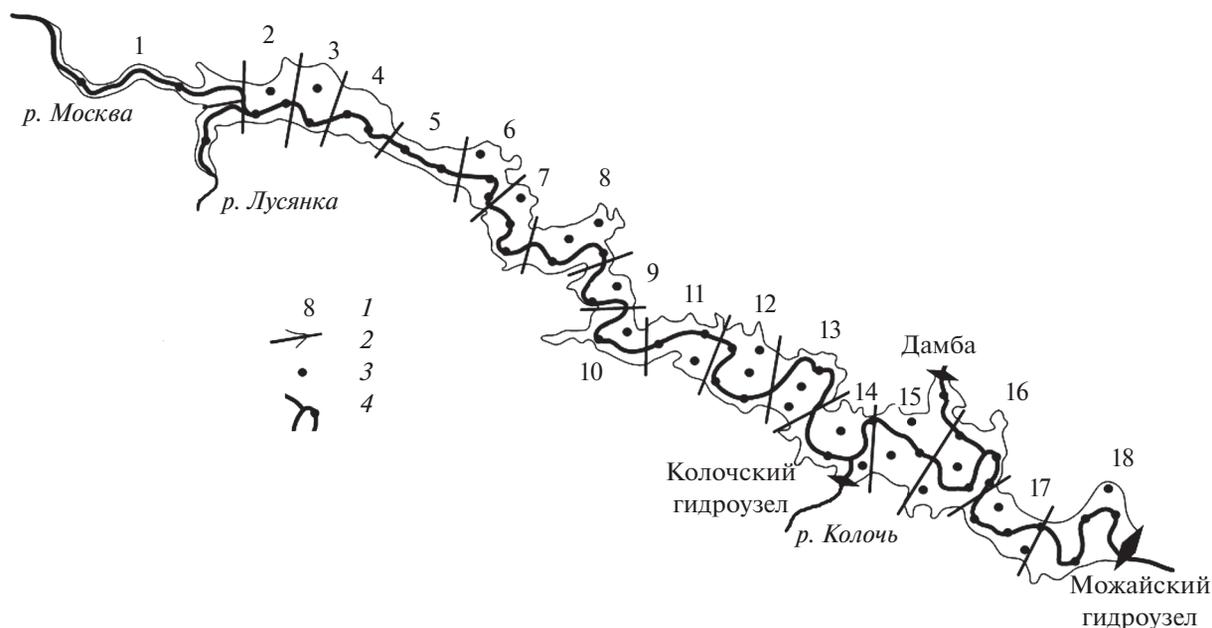


Рис. 1. Схематизация Можайского водохранилища: 1 – номера расчетных отсеков, 2 – границы отсеков, 3 – станции наблюдений, 4 – затопленные русла рек.

вертикали – 1 раз в неделю; количество проб воды, отбиравшихся в реках в разные фазы их водного режима, – до 100 проб на каждом из водохранимых постов.

Пространственная схематизация Можайского водохранилища для модельных расчетов предусматривает деление его по продольной оси на 18 отдельных отсеков от устья р. Москвы до плотинной частью водоема (рис. 1).

Сравнение результатов расчетов гидрологического режима Можайского водохранилища с данными наблюдений за режимом РК в отдельные годы, имеющие наиболее полный объем информации, показало хорошие результаты по статистическим показателям. Средняя квадратическая ошибка расчета содержания РК меняется от 1.57 до 2.22 мг/л при длине рядов сравнения от 286 до 1876, а величина индекса Тейла, широко используемого в моделировании для оценки расхождения реальных и модельных значений [19], – от 0.10 до 0.36 (его значение < 0.4 свидетельствует о хорошем качестве расчета).

При вычислении изменений концентрации РК в результате внутримассовых процессов (фотосинтеза, дыхания гидробионтов, разложения детрита, окисления органических и восстановленных веществ, нитрификации), а также газообмена с атмосферой в модели используется следующее балансовое уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta DO}{\Delta t} = & K_{ag} \delta_{ag} B_a - K_{ar} \delta_{ar} B_a + \\ & + F_{sur} K_L (DO^* - DO) - K_f \delta_f B_f - K_z \delta_z B_z - \\ & - K_{bot} F_{bot} \theta^{T-20} / V - K_D \delta_D \gamma_{1D} C_D - \\ & - K_{DOM} \delta_{DOM} \gamma_{1DO} C_{DOM} - \\ & - K_{RFR} \delta_{RFR} \gamma_{1DO} C_{RFR} - K_S \delta_S C_S - \\ & - K_{Fe} \delta_{Fe} C_{Fe} - K_{Mn} \delta_{Mn} C_{Mn} - K_{NH} \delta_{NH} \gamma_{1N} C_{NH}, \end{aligned} \quad (1)$$

в котором представлены концентрации: DO – растворенного в воде кислорода, C_D – детрита, C_{DOM} – нестойкого ОВ, C_{RFR} – стойкого ОВ, C_S – сульфидов, C_{Fe} – железа, C_{Mn} – марганца, C_{NH} – аммонийного иона, мг/л; биомассы: B_a – фитопланктона, B_z – зоопланктона, B_f – рыб, г С/м³; стехиометрические коэффициенты: δ_{ag} – при фотосинтезе; δ_{ar} , δ_f , δ_z – при дыхании фитопланктона, рыб, зоопланктона; δ_D , δ_{DOM} , δ_{RFR} – при разложении детрита, нестойкого и стойкого ОВ; δ_S , δ_{Fe} , δ_{Mn} – при окислении сульфидов, железа, марганца; δ_{NH} – при нитрификации; скорости процессов: K_{ag} – роста фитопланктона; K_{ar} , K_f , K_z – потери биомассы на дыхание фитопланктона, рыб, зоопланктона; K_D , K_{DOM} , K_{RFR} – при разложении детрита, нестойкого и стойкого ОВ; K_S , K_{Fe} , K_{Mn} – при окислении сульфидов, железа и марганца; K_{NH} – потребления РК при нитрификации, 1/сут; K_L – обмена РК между водой и атмосферой, м/сут; K_{bot} – потребления РК донными отложениями, г/(м² сут); температурные коэффициенты: γ_{1D} – разложения детрита, γ_{1DO} – разложения ОВ,

γ_{IN} – нитрификации; θ – параметр температурной коррекции скорости потребления РК донными отложениями; F_{sur} – площадь поверхности, m^2 ; F_{bot} – площадь донных отложений, m^2 ; V – объем бокса, m^3 ; T – температура, $^{\circ}C$; t – время, сут.

Для оценки многолетних изменений режима РК в Можайском водохранилище выполнены расчеты с суточным разрешением за период с 1961 по 2017 г. Гидрометеорологическая информация, необходимая для расчетов, задавалась по данным метеостанции г. Можайск, расположенной в 3 км ниже плотины водохранилища и гидрометрических постов р. Москва – Барски, р. Лусянка – Черники, расположенных, соответственно, в 3 и 2 км от мест впадения этих рек в водохранилище, а также по данным перекачки воды из р. Колочи Колочским гидроузлом. В результате выполненных расчетов получены 57-летние ряды среднесуточных значений следующих показателей:

объемы зон аноксии в каждом из 18-ти расчетных отсеков водохранилища, млн m^3 ;

доля зон аноксии в общем объеме отсека водохранилища, %;

длительность существования зон аноксии в течение года в каждом отсеке, сут;

средние за год градиенты температуры воды в слое температурного скачка, град/м.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчеты по модели показали, что в Можайском водохранилище аноксидные зоны отмечаются ежегодно. Длительность их существования зависит от глубины и увеличивается от верхних мелководных отсеков водохранилища к глубоководному приплотинному. На рис. 2 показано распределение зон аноксии в Можайском водохранилище на примере среднего по гидрометеорологическим условиям 1999 г.

В начале зимы аноксия наблюдается в придонных слоях нижней части водохранилища (от 15-го до 18-го приплотинного отсека). В апреле с началом весеннего наполнения водохранилища аноксидные зоны исчезают вследствие полного конвективного перемешивания его водной массы. С наступлением вегетационного периода появившиеся зоны аноксии в июне распространяются уже по всему водохранилищу. Однако, если в приплотинном отсеке аноксия существует постоянно в течение всего лета, то в верхних отсеках она периодически исчезает вследствие ветрового перемешивания водных масс. В результате сработки водохранилища и уменьшения глубин дальности распространения такой периодической аноксии к концу лета смещается к средней части водохранилища, а в конце сентября при наступлении осеннего перемешивания водной толщи она исчезает везде, в том числе и в приплотинном

отсеке. В период осеннего перемешивания водные массы всех районов водохранилища содержат близкое к полному насыщению количество РК. Лишь в декабре в водохранилище вновь появляется аноксия в придонных слоях его нижних отсеков.

Такое распределение достаточно типично для всех лет, но под влиянием гидрометеорологических условий сроки появления зон аноксии и количество отсеков, в которых они наблюдаются, меняется. Эти условия определяют среднюю длительность существования зон аноксии в водохранилище, заметно меняющуюся в различные годы. Многолетние колебания длительности существования зон аноксии в водохранилище в различных частях водохранилища показаны на рис. 3.

Средняя длительность существования аноксидных зон в водохранилище нарастает от верховьев к плотине, однако в межгодовой изменчивости сохраняется синхронность колебаний этого показателя. Наиболее похожи колебания длительности зон аноксии на приплотинном и среднем участках водохранилища, в которых из-за больших глубин не происходит полного перемешивания, в отличие от верхнего района водохранилища, где ветровое перемешивание нередко достигает дна.

Зоны аноксии почти всегда занимают придонные слои, этим и обусловлена большая длительность их существования в приплотинной части, чем в других частях водохранилища. При этом средний за год объем воды в зонах аноксии невелик и составляет небольшую долю от общего объема водохранилища. Рассчитанные величины среднего объема воды в зонах аноксии колебались за рассматриваемый период от 1.5 до 12 млн m^3 , по отношению к среднему годовому объему водохранилища это составляет 1–7%. Однако при многолетних изменениях кислородного режима водохранилища отмечается явно выраженная тенденция увеличения объемов воды в этих зонах (рис. 4).

Максимальные в течение года аноксидные зоны в Можайском водохранилище формировались в основном в июле–августе, их объемы колебались от 8 до 84 млн m^3 (5–40% общего объема водоема), что хорошо согласуется с данными наблюдений во время многолетних гидролого-гидрохимических съемок в водоеме [4]. Причем результаты расчетов показали, что аноксидные зоны с объемом вод >30% объема водохранилища стали формироваться лишь с начала 2000-х гг., средняя длительность существования аноксидных зон с объемом вод >20% объема водохранилища в 2000–2018 гг. достигла 30 сут (максимальная – 62), тогда как в 1970–1990-х гг. она составляла 13 сут и не превышала 27 сут.

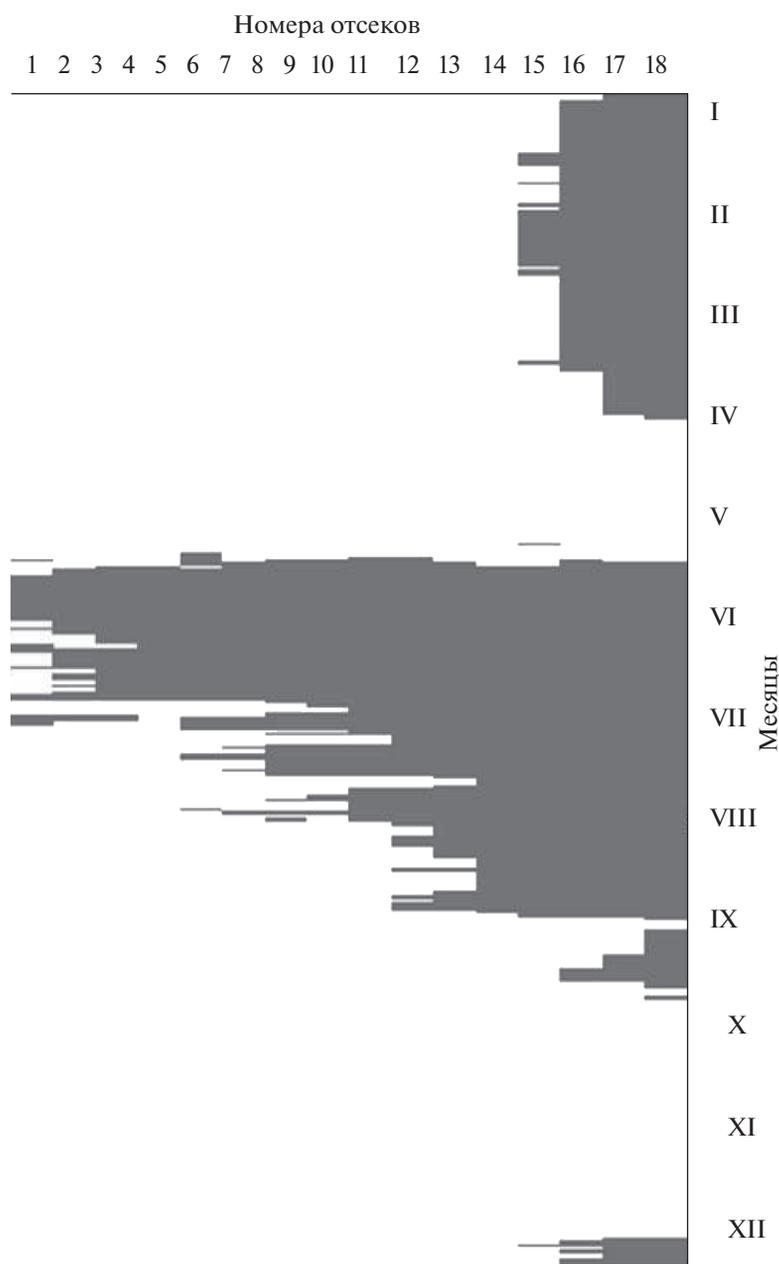


Рис. 2. Распределение зон аноксии в отсеках Можайского водохранилища в 1999 г.

Формирование аноксидных условий в водохранилищах происходит в результате интенсивного потребления РК на окисление оседающего на дно ОВ и резкого снижения интенсивности вертикального обмена придонных и насыщенных РК поверхностных слоев воды в результате возникновения плотностной стратификации в водохранилище. Косвенным показателем интенсивности вертикального обмена в водохранилище может служить среднегодовая величина вертикального градиента температуры воды. Этот градиент зависит, главным образом, от гидрометеорологических условий в летний период и в Мо-

жайском водохранилище колеблется от 0.4 до 1 град/м. Доминирующая роль градиента температуры в слое скачка в формировании зон аноксии в водохранилище подтверждается статистически значимой зависимостью длительности существования аноксии от среднего температурного градиента в слое скачка с коэффициентом корреляции 0.74 (рис. 5а).

Вторым важным фактором развития аноксидных условий в водохранилище следует считать величину первичной продуктивности его экосистемы. Интенсивность образования автохтонного ОВ в вегетационный период в водохранилище можно

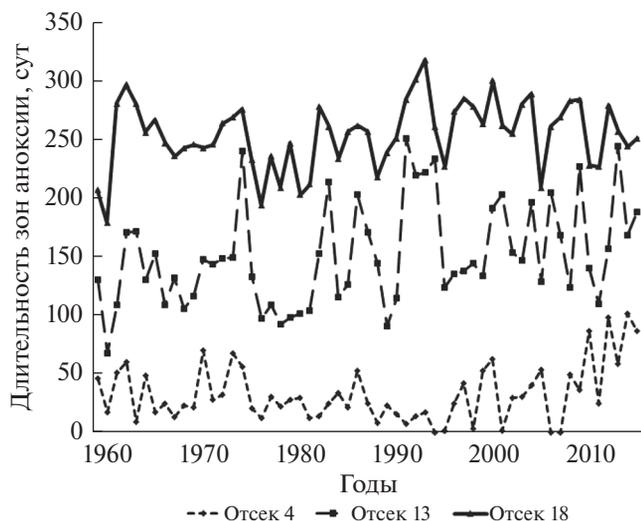


Рис. 3. Многолетние изменения длительности существования зон аноksии в верхнем (4), среднем (13) и приплотинном (18) отсеках Можайского водохранилища.

характеризовать предложенным в работе [15] индексом цветения воды (ИЦВ), представляющим собой сумму среднесуточных величин биомассы различных групп фитопланктона в период цветения водохранилища:

$$\text{ИЦВ} = \sum_{i=\tau_1}^{i=\tau_2} B_i, \quad (2)$$

τ_1 и τ_2 – первые и последние сутки цветения; B_i – биомасса всего фитопланктона в i -тые сутки цветения, $\text{г}/\text{м}^3$.

Прогрессирующее эвтрофирование Можайского водохранилища обусловило устойчивую тенденцию роста биомассы фитопланктона и

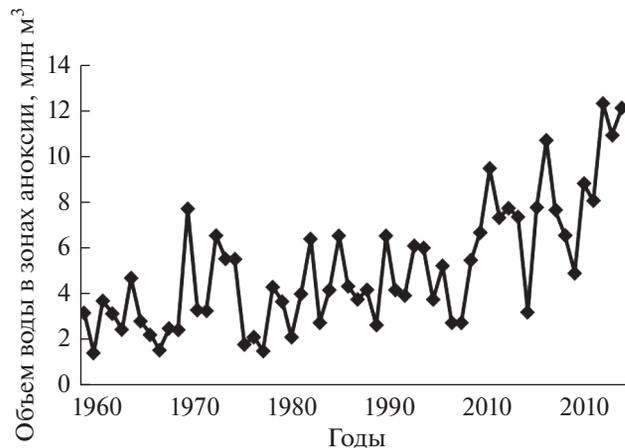
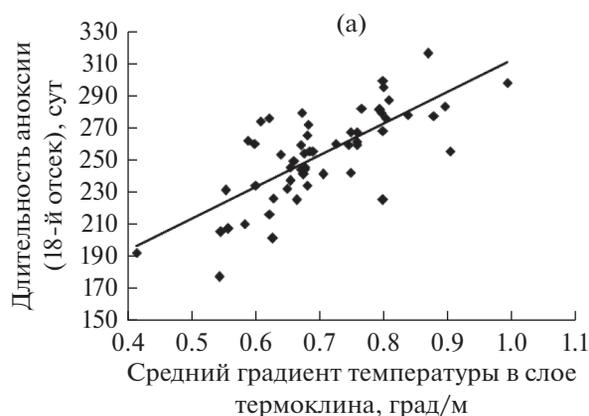


Рис. 4. Многолетние изменения среднегодовых объемов воды в зонах аноksии в Можайском водохранилище.

ИЦВ, установленную как по данным наблюдений на водохранилище, так и по результатам моделирования его гидрологического режима [3, 15]. Многолетние значения ИЦВ и объемы вод в зонах аноksии показывают статистически значимую корреляционную связь между ними (рис. 5б).

Несомненно, что именно этот фактор роста продуктивности водохранилища определяет отмеченную авторами тенденцию роста объемов вод в зонах аноksии Можайского водохранилища за многолетний период.

ВЫВОДЫ

В результате модельных расчетов многолетних пространственно-временных изменений содер-

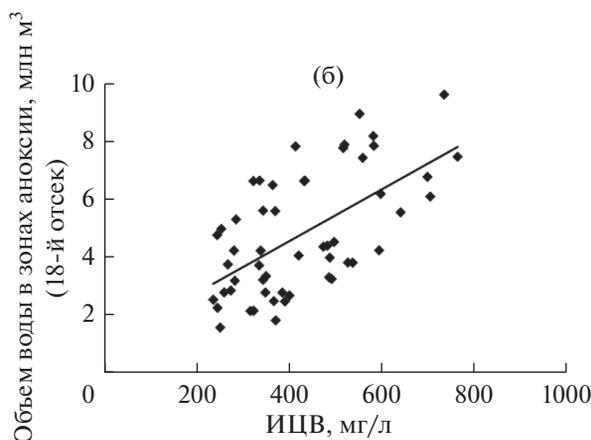


Рис. 5. Зависимости длительности существования зон аноksии в Можайском водохранилище от среднего градиента температуры в слое скачка (а) и объема воды в зонах аноksии в его приплотинном отсеке от индекса цветения воды (б).

жания РК и объемов вод в зонах аноксии установлены закономерности формирования и распространения аноксидных условий в типичном долинном стратифицированном Можайском водохранилище. К главным факторам, определяющим динамику аноксидных зон, следует отнести плотностную стратификацию водной толщи водохранилища и интенсивность первичного продуцирования. В многолетнем аспекте отмечено ярко выраженное увеличение объемов вод в зонах аноксии, обусловленное прогрессирующим эвтрофированием водохранилища и ростом его первичной продуктивности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воинов А.А.* Имитационное моделирование в экологии: озера, пруды, водохранилища // Математическое моделирование: Методы описания и исследования сложных систем / Под ред. *А.А. Самарского*. М.: Наука, 1989. С. 99–120.
2. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / Под ред. *К.К. Эдельштейна*. М.: Перо, 2015. 286 с.
3. *Даценко Ю.С., Пуклаков В.В., Эдельштейн К.К.* Анализ влияния абиотических факторов на развитие фитопланктона в малопроточном стратифицированном водохранилище // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Лимнология. №10. 2017. С. 75–85.
4. *Ерина О.Н.* Режим растворенного кислорода в стратифицированных водохранилищах московской системы водоснабжения г. Москвы. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2015. 26 с.
5. Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 3. Можайское водохранилище. М.: Изд-во МГУ, 1979. 400 с.
6. *Майоров А.Б.* Внутригодовое изменение содержания кислорода в эвтрофном водохранилище // Вод. ресурсы. 2000. Т. 27. № 5. С. 600–608.
7. *Мартынова М.В.* Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М.: Наука, 2010. 242 с.
8. *Менишуткин В.В.* Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Петрозаводск; СПб., 2010. 416 с.
9. *Менишуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н.* Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 2. Модели экосистем пресноводных озер // Вод. ресурсы. 2014. Т. 41. № 1. С. 24–38.
10. *Подгорный К.А.* Математическое моделирование пресноводных экосистем нестратифицированных водоемов (алгоритмы и численные методы). Рыбинск: Рыбин. дом печати, 2003. 328 с.
11. Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 368 с.
12. *Хендерсон-Селлерс Б.* Инженерная лимнология. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 336 с.
13. *Эдельштейн К.К.* Водные массы долинных водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1991. 176 с.
14. *Эдельштейн К.К., Гречушникова М.Г., Даценко Ю.С., Пуклаков В.В.* Диагностическое моделирование внутриводоемных процессов в водохранилищах // Вод. ресурсы. 2012. Т. 39. № 4. С. 437–451.
15. *Эдельштейн К.К., Пуклаков В.В., Даценко Ю.С.* Экспериментально-теоретические основы диагноза и прогноза цветения в водохранилищах источниках муниципального водоснабжения // Вода MAGAZINE. 2017. № 4 (116). С. 34–40.
16. CE-QUAL-R1. A Numerical One-Dimensional Model of Reservoir Water Quality. User's manual. Report E-82-1. US Army Engineer Waterways Experiment Station Environmental Laboratory. Vicksburg, Mississippi, 1982. 508 p.
17. *Cole T.M., Wels S.A.* CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.6. User Manual. Portland: Department of Civil and Environ. Engineering. Portland State Univ., 2011. 736 p.
18. *Puklakov V.* Mathematical Model of the Heat and Mass Transfer Processes in a Stratified Reservoir // Int. Reviews. Hydrobiol. 80. 1995. № 1. P. 49–59.
19. *Theil H.* Economics and Information Theory. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1967. 488 p.