

ЦВЕТЕНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩА МНОГОЛЕТНЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА¹

© 2021 г. К. К. Эдельштейн^а, Ю. С. Даценко^{а, б, *}, В. В. Пуклаков^а

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

^бИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: yuri0548@mail.ru

Поступила в редакцию 11.11.2019 г.

После доработки 18.08.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

На основе многолетних наблюдений и модельных расчетов рассмотрены факторы развития фитопланктона в стратифицированном Можайском водохранилище. Для анализа изменчивости величин биомассы фитопланктона использован индекс погодной контрастности, основанный на выделении синоптических циклов температуры водной поверхности. Сравнительная оценка интенсивности цветения в разные годы проведена на основе индекса цветения воды, рассчитанного как сумма ежесуточных величин биомассы фитопланктона, полученных по модельному расчету. Проанализированы особенности развития диатомовых водорослей и цианобактерий в водохранилище в зависимости от гидрометеорологических условий и многолетние изменения индексов цветения воды и погодной контрастности.

Ключевые слова: водохранилище, фитопланктон, цветение воды, моделирование, индекс погодной контрастности, индекс цветения воды.

DOI: 10.31857/S0321059621020048

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе под цветением водохранилища авторы понимают явление интенсивного развития в нем фитопланктона, при котором биомасса водорослей в поверхностном трофогенном слое достигает величины ≥ 1 г/м³. В этом случае на водопроводных станциях питьевого и промышленного водоснабжения возникает необходимость интенсификации очистки воды [10]. Исследование фитопланктона на Можайском водохранилище, головном водоеме в Москворецкой системе источников водоснабжения столицы, началось в первый год заполнения его ложа водой Верхней Москвы-реки [1]. Площадь водоема 31 км², объем 0.235 км³, длина 28 км, максимальная глубина 22 м. В межень средняя скорость стокового течения составляет несколько сантиметров в секунду [19]. Поэтому ежегодно водохранилище термически и гидрохимически стратифицировано в вегетационный сезон, что типично для слабoproточных водохранилищ.

С 1965 г. регулярные альгологические наблюдения проводятся на 5–10 вертикалях в верхнем, среднем и приплотинном участках водохранилища [12–15, 17, 21]. В России столь продолжительные наблюдения за цветением воды ведутся лишь на двух водохранилищах – Можайском и Рыбинском.

На основе имеющейся базы данных по гидрохимическим и альгологическим показателям разработана математическая модель гидроэкологического режима водохранилища.

На первом этапе ее разработки определялся генетический состав воды в расчетных отсеках. В них в результате смешения речных и водохранилищных вод создавались водные массы, положение которых в водоеме менялось в течение года, что и было представлено в виде одномерной многосекционной воднобалансовой модели СВМ (Состав Водных Масс) [7, 8, 32]. Затем эта модель была трансформирована в двухмерную в вертикальной плоскости боксовую модель термогидродинамических процессов в водохранилище – модель ТМО (тепло- и массообмен) [18], которая модернизирована в многосекционную боксовую гидрологическую модель водохранилища с экологическим блоком – модель ГМВ-МГУ, описание алгоритма и результатов верификации кото-

¹ Расчеты многолетних колебаний гидроэкологических характеристик выполнены по плану НИР кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ (ГЗ АААА-А16-116032810054-3), статистический анализ выполнен при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-01066).

рой опубликованы в [2]. В экологическом блоке этой модели рассчитываются ежедневные гидрологические характеристики, гидрохимические показатели воды и биомасса водорослей разных отделов в метровых боксах 18 секций (отсеков), на которые разделяется вся толща воды Можайского водохранилища.

И по натурным данным, и по модельному расчету в Можайском водохранилище четко выделяются ежегодный весенний пик цветения преимущественно диатомовыми водорослями, следующая за ним фаза “чистой воды” и продолжительный период летне-осеннего интенсивного развития цианобактерий, что характерно для большинства водохранилищ России [26]. В отдельные годы летне-осеннее цветение в водохранилищах Московской системы было настолько интенсивным, что приводило к необходимости переключать подачу воды в Москву с особенно сильно зацветшего водохранилища на водохранилища с наименьшим цветением [24].

Годовые величины рассчитанной по модели суммарной биомассы планктонных водорослей в водохранилище определяются биомассой цианобактерий (коэффициент корреляции между ними $r = 0.96$, $n = 55$ лет, $p = 0.95$) [6]. Поэтому в данной работе предпринята попытка установить причину вариации интенсивности цветения воды в Можайском водохранилище цианобактериями в течение почти 60-летнего его существования (1961–2018 гг.) в зависимости от изменчивости погодных условий. Для этого использованы результаты полевых исследований и модельных расчетов по ГМВ-МГУ ежесуточных величин биомассы цианобактерий и температуры воды верхнего трофогенного слоя центрального плеса Можайского водохранилища.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ИНДЕКСА КонтРАСТНОСТИ ПОГОДЫ И ИНДЕКСА ЦВЕТЕНИЯ ВОДЫ

В безледный период на водоемах умеренных широт ежегодно из-за изменчивости погоды наблюдается чередование повышений температуры водной поверхности и ее понижений. Это вызывается совокупным воздействием меняющихся величин поступающей солнечной радиации, облачности, ветра, температуры и влажности воздуха. Два 70-суточных периода автоматизированных гидрометеорологических наблюдений в центре Можайского водохранилища (с 26.06.2016 по 3.09.2016 и в те же даты 2017 г.) разделены на фазы нагревания и охлаждения поверхности воды, каждая пара которых образует погодный цикл гидроэкологического режима водоема. За фазы погодных циклов авторами принят период времени изо дня в день повышающейся или понижающейся температуры поверхностного метрового

слоя воды на $\geq 3^\circ\text{C}$ в течение ≥ 3 сут [4]. Это позволяет при оценке длительности фазы не учитывать пространственную неоднородность поля температуры (по многолетним наблюдениям, в пределах плеса температура $\leq 3^\circ\text{C}$) и пренебречь ее внутрисуточной изменчивостью при неизменной погоде. По данным регистрации температуры в 2016 г. выделено 4 погодных цикла (8 фаз), а в 2017 г. — только 2 (4 фазы). В эти же периоды впервые были проведены автоматизированные наблюдения за интенсивностью фотосинтеза фитопланктона с использованием продукцимера [3]. Регистрация содержания кислорода и температуры воды двумя оксиметрами продукцимера с дискретностью 15 мин в темном и светлом сосудах, вода в которых автоматически обновлялась через каждые 3 ч, велась в течение 70 сут на горизонте 0.5 м над затопленным руслом р. Москвы (глубина 12 м). Одновременно судовой метеостанцией непрерывно регистрировались метеохарактеристики на высоте 2 м над водной поверхностью и термокосой — температура воды на шести горизонтах этой вертикали. Интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР) регистрировалась ФАР-логгером на высоте 10 м над берегом. Наиболее показательна изменчивость метеохарактеристик проявлялась в повышении и понижении температуры воды поверхностного слоя. Вся совокупность выше перечисленных метеохарактеристик определяет тепловой баланс этого слоя и, следовательно, изменение температуры воды с изменением любой из этих характеристик, поэтому именно эта температура использовалась для расчета предложенного индекса погодной контрастности (ИПК) [29]:

$$\text{ИПК} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta T|^i}{[(T_{\max \text{ рп}} - T_{\text{ин рп}}) + (T_{\max \text{ рп}} - T_{f \text{ рп}})]}, \quad (1)$$

i — номер фазы, n — число температурных фаз, ΔT — диапазон изменения температуры фазы, $T_{\max \text{ рп}}$ — максимальная температура воды расчетного периода, $T_{\text{ин рп}}$ и $T_{f \text{ рп}}$ — температура в начале и конце расчетного периода соответственно.

Чем сильнее изменчивость температуры фазы и чем фаз больше в течение расчетного периода, тем контрастнее выражены чередования погодных циклов, что и характеризуется величиной ИПК.

Расчет ИПК для 70-суточных периодов 2016 и 2017 гг. показал, что в 2016 г. ИПК был в 2.2 раза больше, чем в 2017 г. При этом максимальные часовые величины валовой первичной продукции в 2016 г. оказались в 1.6 раза выше, а среднесуточные за фазу — в 1.8 раз выше, чем в 2017 г. Сравнение средних величин продукции за расчетные периоды этих лет показало, что в 2016 г. она была в 1.5 раза выше, чем в 2017 г. [29]. Такое соотношение ИПК и средней за период валовой первичной

продукции свидетельствует о влиянии изменчивости погоды на продуктивность водохранилища. В оба года максимальные величины валовой первичной продукции получены в такие теплые фазы, которым предшествовало наибольшее охлаждение водной толщи плеса.

Различие погодных фаз гидроэкологического режима водохранилища проявляется в том, что в фазы охлаждения и нагревания внутренний водообмен плеса существенно различен. В фазы охлаждения воды в холодную, ветреную и пасмурную погоду возникают вихри Ленгмюра. Эта вихреобразная циркуляция перемешивает водную толщу до большой глубины и может достигать дна. Это перемешивание приводит к выносу в трофогенный слой большого количества бескислородных, но насыщенных продуктами деструкции детрита и органики в илах глубинных вод. В фазы нагревания при штилевой и безоблачной погоде в темное время суток эпилимнион перемешивается ячеистой конвекцией при охлаждении воды вплоть до восхода солнца. В это время в нем образуются цилиндрические ячейки Бенара. По их периферии в охлаждающемся поверхностном слое вода опускается до термоклина в слое температурного скачка, а в центре ячеек возникает восходящий ток воды к водной поверхности. Возникает так называемый малый биогидрохимический круговорот [27]. С восходящими токами из нижних слоев эпилимниона к поверхности выносятся растворенный диоксид углерода (CO_2) и биогенные вещества, в том числе фосфор. В первую же половину светлого времени суток биогенные вещества поглощаются водорослями в процессе фотосинтеза.

Автоматизированные наблюдения показали, что одним из факторов межгодовой изменчивости продукции цианобактерий в летне-осенний сезон разных лет могут быть частота и контрастность изменчивости погоды в сезон цветения. По данным многолетних наблюдений за температурным режимом водохранилища (1961–2001 гг.), число погодных циклов в среднем за вегетационный сезон составляло 6 и варьировало от 3 до 9 в отдельные годы [4].

Чтобы проверить реальность гипотезы о влиянии контрастности погоды на интенсивность цветения воды в водохранилище, по модели ГМВ-МГУ выполнен расчет ежедневных величин биомассы цианобактерий и диатомовых водорослей для 58 лет существования водохранилища. Примеры модельного воспроизведения режима цветения водорослей в приплотинном плесе Можайского водохранилища в годы, близкие к средним по притоку воды летом при жаркой либо прохладной погоде, приведены на рис. 1. По результатам расчетов для каждого года был выделен сезон цветения цианобактерий, который начи-

нался с момента достижения их биомассы 1 мг/л ранним летом и заканчивался при уменьшении этой величины до 1 мг/л осенью. Для сравнительной оценки интенсивности цветения в разные годы предложен индекс цветения воды (ИЦВ), равный сумме ежедневных величин биомассы фитопланктона за весь период их цветения [25]:

$$\text{ИЦВ} = \sum_{\tau_1}^{\tau_2} B_{\text{phyt}}^i (\text{г м}^{-3}), \quad (2)$$

τ_1 – первые сутки цветения, τ_2 – последние сутки цветения, B_{phyt} – биомасса фитопланктона.

Расчетный период (РП) для оценки изменчивости погоды по полученным в гидродинамическом блоке той же модели среднесуточным значениям температуры воды на горизонте 1 м начинался с момента достижения температуры поверхностного слоя воды 15°C , после которой в водоеме, как правило, формируется устойчивый слой температурного скачка. Заканчивался этот период, когда среднесуточная температура поверхностного слоя снижалась до 10°C . Весь этот период подразделялся на фазы нагревания и фазы охлаждения воды так же, как это было сделано ранее для расчета ИПК за 70-суточные периоды 2016 и 2017 гг. Для всех лет существования водохранилища для каждого расчетного периода получен интегральный индекс погодной контрастности (ИИПК):

$$\text{ИИПК} = \frac{\sum_1^n |\Delta T|^i}{[(T_{\text{max рп}} - 15) + (T_{\text{max рп}} - 10)]}. \quad (3)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Весеннее цветение водохранилища

Весеннее цветение Можайского водохранилища связано с обильным развитием диатомовых водорослей. Оно начинается обычно в апреле, наиболее ранняя дата начала цветения – 7 апреля, наиболее поздняя – 16 мая. Минимальная продолжительность периода этого цветения – 4, максимальная – 28 сут. По длине водохранилища четко прослеживается неодновременность начала цветения, а затем и его окончания – от верховий водохранилища к плотине с отставанием в 3–4 дня. Например, если на верхнем участке водохранилища цветение наступает 26 апреля, то в центральной части (Красновидовский плес) – 29 апреля, а в приплотинном плесе – 3 мая. Окончание цветения происходит в той же последовательности. Более раннее цветение верхних участков водохранилища связано с тем, что в них поступают биогенные вещества с речными водами, они мелководны, хорошо прогреваются и перемешиваются.

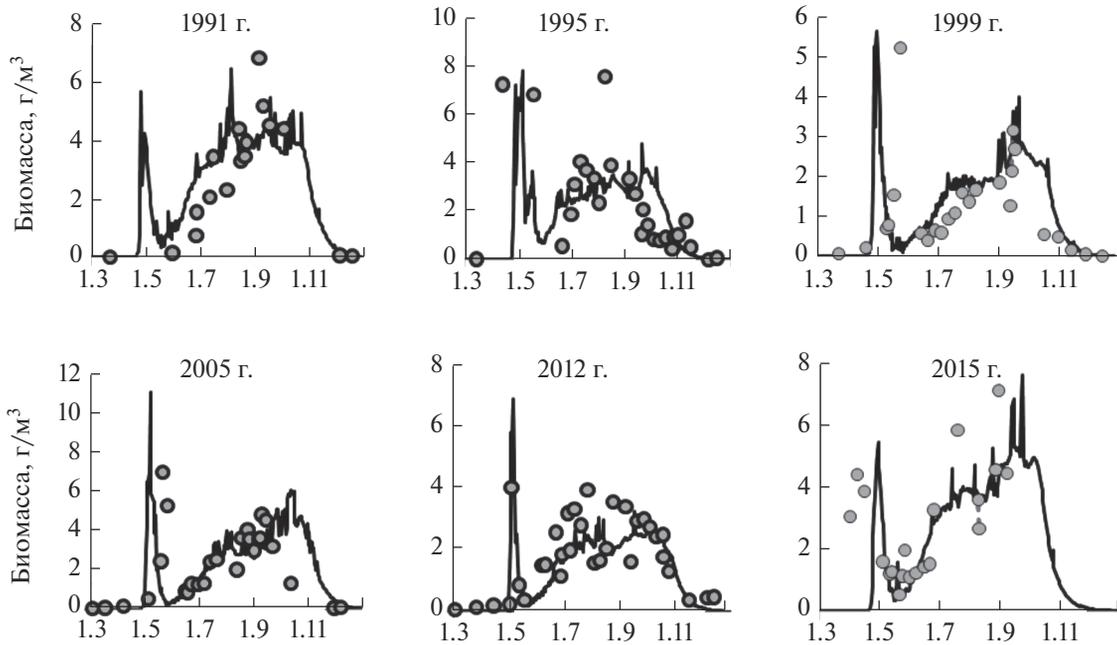


Рис. 1. Рассчитанные по модели (черная линия) и наблюдаемые (точки) величины биомассы фитопланктона в поверхностном слое приплотинного плеса Можайского водохранилища.

Модельные расчеты показали, что между биомассой диатомовых водорослей и факторами окружающей среды немного статистически значимых связей. Из 18 рассмотренных авторами гидрометеорологических, гидрохимических и водохозяйственных показателей, которые могли бы оказывать влияние на цветение диатомовых водорослей, высоко значимая корреляция индекса цветения диатомовых водорослей (ИЦВ_д) обнаружена только с коэффициентом замедленности весеннего наполнения: $K_{\tau} = \tau/\tau_0$ (τ и τ_0 – длительность половодья данного года и средняя многолетняя его длительность, сут ($r = 0.45, p = 0.95$)). Эта связь показывает, что чем медленнее происходит весеннее наполнение водохранилища, тем выше средняя биомасса диатомовых. Связано это, вероятно, с тем, что при слабом развитии весенних процессов на водосборе большая часть весенних вод поступает в водоем в виде богатого биогенами почвенного, а не склонового стока, характерного для бурной весны. Кроме того, при длительной холодной весне в водоеме дольше поддерживаются благоприятные для холоднлюбивых диатомовых водорослей температурные условия.

Рассчитанный ход изменений биомассы диатомовых водорослей характеризуется острыми пиками. При этом ее максимальные величины имеют более тесную статистическую связь с рассматриваемыми предикторами, чем ее средние значения в поверхностном слое.

ИЦВ_д очень слабо коррелирует с количеством штилевых дней и рассчитанным по модели притоком фосфора и азота с водосбора водохранилища за время цветения воды диатомовыми водорослями. Со всеми остальными факторами связь ИЦВ_д статистически незначима. Также незначительно зависит от абиотических факторов и продолжительность периода цветения диатомовых водорослей, что еще раз подтверждает малую предсказуемость цветения воды этой группой фитопланктона.

Оценка зависимости ИЦВ_д от концентрации кремния не анализировалась, поскольку по многократным наблюдениям, например в 2018 г. по данным шести съемок (с февраля по сентябрь), его содержание в основной водной массе водохранилища варьировало в диапазоне 0.8–3.0 мг/л весной и летом, а в зимней водной массе увеличивалось до 6 мг/л. В другие годы содержание в воде кремния весной достигало даже 10–12 мг/л и выше.

Подсчеты ИЦВ_д для диатомовых водорослей в приплотинном плесе водохранилища показали исключительно большую межгодовую изменчивость этого показателя за рассматриваемый многолетний период. Коэффициент вариации ИЦВ_д = 37%, продолжительности периода цветения – 31%.

Если уменьшать интенсивность наполнения водохранилища увеличением сброса воды из него в весенний период, то увеличатся продольный водообмен в период половодья и вынос из водохра-

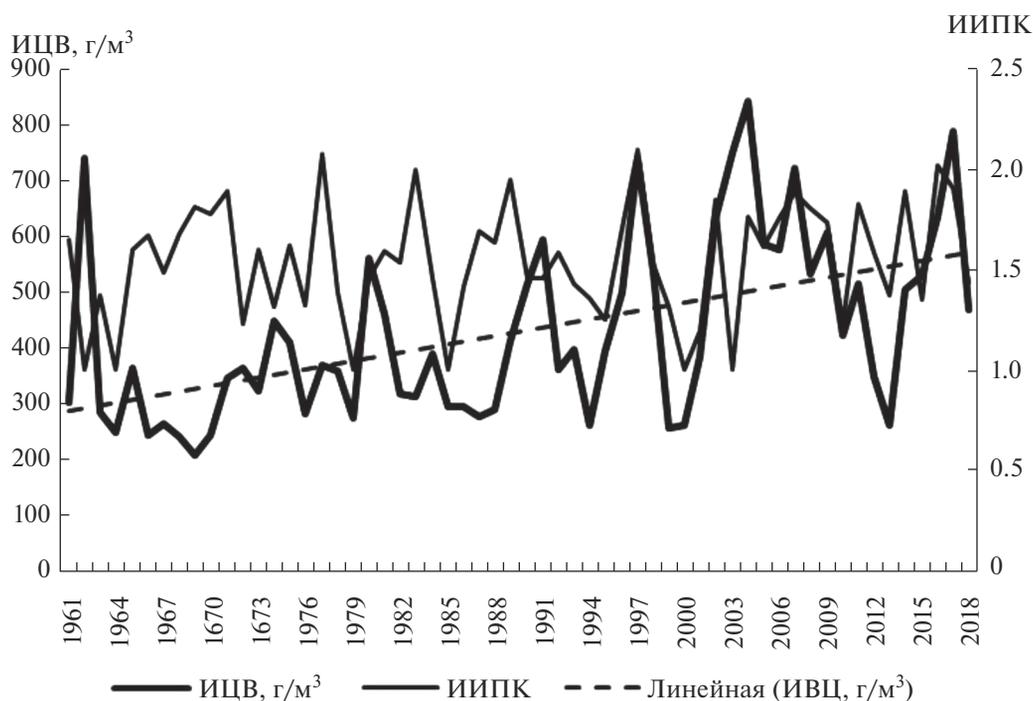


Рис. 2. Изменение от года к году ИЦВ_{цб}, ИИПК в центральном плесе Можайского водохранилища и линейный тренд ИЦВ_{цб}.

нилища насыщающих водную толщу биогенных веществ и развивающегося фитопланктона, что может привести к ослаблению весеннего цветения.

Летне-осеннее цветение водохранилища

Индекс цветения цианобактериями (ИЦВ_{цб}) более тесно связан с большинством анализируемых факторов. Высоко значима корреляционная связь ИЦВ_{цб} со следующими факторами: четырьмя гидрологическими – объемами притока воды в половодье ($r = -0.49$) и во время летне-осенних паводков ($r = 0.42$), коэффициентом водообмена водохранилища в половодье ($r = -0.37$), скоростью переноса водных масс ($r = 0.44$); двумя метеорологическими – скоростью ветра ($r = -0.40$) и количеством штилевых дней ($r = 0.45$); четырьмя гидрохимическими – притоком с водосбора фосфора ($r = 0.93$) и азота ($r = 0.92$), поступлением из донных отложений фосфора ($r = 0.36$) и азота ($r = 0.34$); двумя водохозяйственными – соотношением объема воды в водохранилище в конце его зимней сработки и объема вод половодья ($r = 0.50$), предвесенней сработкой водохранилища ($r = -0.36$).

Менее значима корреляционная связь ИЦВ_{цб} с еще четырьмя факторами: с поступлением солнечной радиации, температурой воды в период летнего цветения, слоем атмосферных осадков и интенсивностью наполнения водохранилища.

Разнообразие факторов и их совместное влияние на экосистему водохранилища, нередко противоречивое, не позволяет объяснить значительную межгодовую изменчивость цветения в летне-осенний сезон [25].

Цветение воды в водохранилище цианобактериями многократно продолжительнее, чем весеннее цветение, и поэтому ИЦВ_{цб} составляет большую величину в суммарном индексе цветения водохранилища водорослями всех отделов планктона во все годы существования водохранилища. Межгодовая изменчивость интенсивности летне-осеннего цветения, рассчитанная по результатам моделирования режима биомассы фитопланктона за 1961–2018 гг. (рис. 2), и частота чередования теплой и холодной погоды в сезон цветения этих водорослей, характеризуемая ИИПК (табл. 1), послужили основой для проверки гипотезы хорошей связи между этими двумя показателями.

Межгодовая изменчивость и линия тренда ИЦВ_{цб} в центральном плесе (рис. 2) мало отличаются от таковых для ИЦВ_{цб} в приплотинном плесе [25], что свидетельствует о единых причинах изменчивости интенсивности цветения для большей части акватории Можайского водохранилища. Как и в приплотинном плесе, в центральном районе водохранилища в первые годы его существования диапазон изменчивости ИЦВ от года к году был в 3 раза меньше, чем в последние годы рассматриваемого многолетнего перио-

Таблица 1. Продолжительность сезона цветения синезеленых водорослей t , сут, число погодных фаз N_{ϕ} , ИИПК и ИЦВ, г/м³, в центральном плесе Можайского водохранилища (по данным модельных расчетов)

Год	t	N_{ϕ}	ИИПК	ИЦВ	Год	t	N_{ϕ}	ИИПК	ИЦВ
1961	144	6	1.64	301	1990	102	4	1.45	514
1962	133	2	1.00	737	1991	152	4	1.45	591
1963	174	4	1.36	282	1992	120	4	1.58	359
1964	124	2	1.00	247	1993	108	4	1.43	395
1965	125	10	1.59	361	1994	130	4	1.36	259
1966	97	6	1.67	241	1995	150	4	1.25	393
1967	132	4	1.48	263	1996	145	6	1.70	498
1968	119	4	1.67	239	1997	123	8	2.09	734
1969	108	4	1.81	206	1998	128	4	1.52	535
1970	132	6	1.77	242	1999	184	4	1.31	254
1971	129	6	1.89	343	2000	114	2	1.00	260
1972	163	4	1.23	363	2001	120	4	1.19	382
1973	116	6	1.59	321	2002	108	8	1.84	631
1974	134	4	1.31	446	2003	139	2	1.00	749
1975	136	6	1.62	409	2004	145	8	1.76	840
1976	91	4	1.32	280	2005	156	6	1.61	585
1977	110	8	2.07	367	2006	132	6	1.75	573
1978	100	4	1.38	358	2007	152	8	1.88	720
1979	133	2	1.00	272	2008	128	6	1.80	531
1980	121	4	1.46	560	2009	145	8	1.73	605
1981	153	6	1.58	459	2010	156	4	1.23	422
1982	110	6	1.53	317	2011	149	8	1.82	512
1983	96	6	1.99	312	2012	132	6	1.58	347
1984	137	8	1.45	388	2013	156	4	1.37	259
1985	118	2	1.00	294	2014	154	8	1.89	503
1986	120	6	2.09	293	2015	141	4	1.34	527
1987	133	6	1.69	275	2016	144	8	2.02	632
1988	148	6	1.63	289	2017	117	8	1.90	787
1989	134	10	2.18	411	2018	171	4	1.43	466

да. Причем значения ИЦВ в наименее продуктивные годы увеличились незначительно, тогда как в наиболее продуктивные годы они возросли вдвое, что и определило хорошо выраженный положительный тренд ИЦВ в Можайском водохранилище.

Как видно из приведенных в табл. 1 данных, продолжительность летне-осеннего цветения сильно меняется: от 91 сут в 1976 г. до 184 сут в 1999 г. и в среднем составляет 132 сут. Тем не менее связь продолжительности сезона цветения и ИИПК статистически не значима ($r = -0.12$), что свидетельствует об асинхронности межгодовой изменчивости этих характеристик.

Весь ряд рассчитанных за 58 лет значений ИИПК и ИЦВ был разбит на два периода: 1961–

1971 гг. – интенсивного переформирования ложа водохранилища в первые годы после его образования, 1972–2018 гг. – относительной стабилизации сформированного илистыми отложениями покрова дна глубинных участков.

В начальный период формирования экосистемы водохранилища особенно сильное цветение было отмечено в 1962 г. (табл. 1) – второй год затопления поймы, когда происходило активное выделение в придонный слой воды продуктов бактериального разложения органических веществ в затопленном почвенном покрове дна. Экспериментально было показано, что через год после затопления лугово-болотной почвы, отобранной со дна Можайского водохранилища, концентрация ортофосфатов в воде над ней воз-

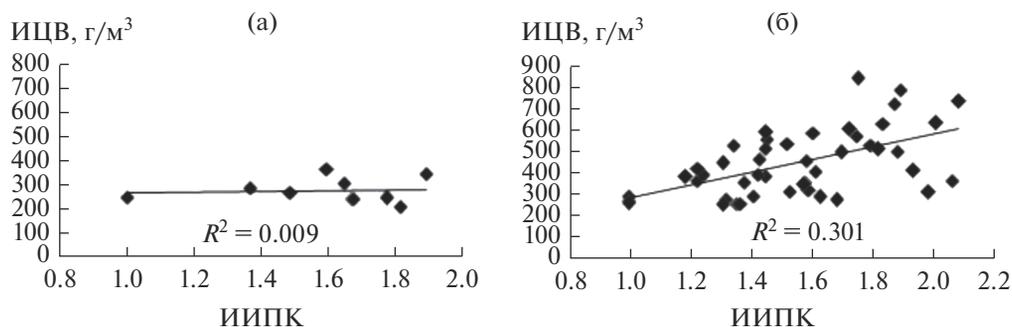


Рис. 3. Корреляционная связь между ИЦВ_{цв} и ИИПК в 1961–1971 гг. (а) и 1972–2018 гг. (б).

растает до 7.18 мг/л [9]. В первые годы существования водохранилища происходит активная переработка абразионных участков берегов, при которой глинисто-песчаные продукты абразии доминируют при формировании донных отложений и образующийся детрит частично перекрывается минеральными веществами, что препятствует обогащению трофогенного поверхностного слоя воды биогенными продуктами разложения оседающего детрита при штормовом взмучивании [5]. В эти годы в придонных слоях очень медленно формировалась зона аноксии и не наблюдалось ее повсеместное существование. После исключения из первого периода аномального по сильному цветению 1962 г. корреляционная связь между ИИПК и ИЦВ в это десятилетие отсутствовала (рис. 3а).

В последующий период (1972–2018 гг.) с уже сформированным покровом дна глубинных участков из илистых отложений выявленная ранее зависимость продуктивности от контрастности погоды [29] стала весьма вероятной благодаря полученной статистически высоко значимой связи ИЦВ с ИИПК (рис. 3б). Коэффициент корреляции этих индексов равен 0.55 (при $n = 46$ значимый $r_{\beta=1\%} = 0.384$ [22]). Из этого периода исключен 2003 г., ИЦВ которого не соответствует его ИИПК. Особенностью этого года было очень высокое значение ИЦВ при всего лишь двухфазной изменчивости температуры поверхностного слоя (фаза нагревания с 6 июня до 28 июля при максимальной среднесуточной температуре воды 27.20°C и последовавшая за ней фаза охлаждения до 22 октября). Двухфазными были также термические режимы в 1979, 1985 и 2000 гг., но интенсивность цветения в 2003 г. была в 2–3 раза выше, чем в эти годы (табл. 1). Причиной этого был аномально большой приток биогенных веществ, поступивших в водоем с водами многоводных июльских паводков, вследствие чего биомасса цианобактерий в июле–августе возросла до 4–6 мг/л. Температура речных вод превышала температуру трофогенного слоя, поэтому воды паводков поступали в основном в поверхностный слой, так

как их плотность была наименьшая и препятствовала конвективному перемешиванию. К тому же в фазу нагревания и в августе скорость ветра ≤ 2 м/с при среднем значении 1.1 м/с, что исключало глубокое ветровое перемешивание поверхностных слоев воды в водоеме. В сентябре произошел всплеск цветения цианобактерий (до 12.7 мг/л в центральной части водохранилища), связанный с поступлением в водоем большого объема паводковых вод (расходы воды сентябрьского паводка в р. Москве превышали ее расходы во время весеннего половодья) и, соответственно, большого количества биогенных веществ, что продлило цветение водорослей до 22 октября. На фоне медленного осеннего охлаждения речных вод и трофогенного слоя в водохранилище конвективное перемешивание усиливалось в ветреную погоду (средняя скорость ветра в сентябре составляла 2.4 м/с при среднесуточной в некоторые сутки до 6 м/с). Это сопровождалось выносом большого количества биогенных веществ (дополнительно к их поступлению с речным притоком), накопленных в гипolimнионе за предшествующий длительный период безветренной погоды. Эти особенности погодных условий привели к тому, что 2003 г. оказался одним из наиболее продуктивных за время существования водохранилища, хотя значение его ИИПК было минимальным.

Влияние контрастности изменчивости погоды на продуктивность, по-видимому, характерна и для водоемов Европы, для которых лимнологом В. Оле установлено [31], как напоминает С.И. Кузнецов [11], что особенность структуры их биоактивности состоит в том, что вероятность цветения в них в 1.5 раза выше, чем в экваториальных озерах. Доля оседающего на дно органического вещества в структуре биоактивности озер умеренных широт – самая высокая среди озер мира, а скорость деструкции органического вещества в илах – в 1.5–2 раза превышает седиментацию легко минерализуемого бактериями детрита. Это указывает на заметный вклад внутренней биогенной нагрузки в цветение водоемов замедленного водообмена.

ВЫВОДЫ

Весеннее цветение водохранилища определяется диатомовыми водорослями, имеет непродолжительный характер (от 4 до 28 сут) и зависит, во-первых, от интенсивности наполнения водохранилища водой половодья и количества приносимых ею растворенных биогенных веществ; во-вторых – от длительности интенсивного конвективного перемешивания при штилевой погоде во время прогрева поверхностного слоя воды от 0 до 10–15°C – температуры, благоприятной для развития холодолюбивых диатомовых водорослей. Возникающий в период весеннего цветения большой биогидрохимический круговорот распространяется в водоеме повсеместно до дна пойменных участков, а нередко и до дна русловой ложбины, что интенсифицирует весеннее цветение дополнительным выносом в трофогенный слой воды, обогащенной биогенами.

Особенность слабопроточного водохранилища многолетнего регулирования стока с замедленным водообменом – большая продолжительность летне-осеннего цветения – до 180 сут. Оно вызвано цианобактериями и связано, как правило, с контрастностью погоды. Чем продолжительней фаза охлаждения, тем сильнее снижается температура поверхности воды в эту фазу; и чем больше таких фаз, тем интенсивнее вспышки цветения цианобактериями. Они возникают при смене погоды холодной фазы солнечной и штилевой погодой теплой фазы. В фазу холодной и пасмурной погоды с возникающими конвективно-ветровыми вихрями происходит смена малого биогидрохимического круговорота веществ в эпилимнионе большим круговоротом биогенных веществ вследствие разрушения стратификации и вовлечения в перемешивание вод гипolimниона, насыщенных регенерируемыми биогенными веществами в илах и в придонном анаэробном слое воды. Эту закономерность показывает статистически высоко значимая связь между интегральным индексом контрастности погоды и индексом цветения цианобактериями в почти полувековом ряду колеблющейся от года к году продуктивности слабопроточного стратифицированного в летне-осенний период водохранилища. Однако из этой закономерности бывают исключения, например двухфазный летне-осенний сезон 2003 г., отличавшийся аномально теплой и исключительно дождливой погодой с многоводными летне-осенними паводками с большим содержанием в воде биогенных веществ.

Контрастность изменчивости летне-осенней погоды особенно характерна для климата умеренных широт. Изменчивость погодных условий в значительной мере способствует формированию ярко выраженной внутрисезонной и годовой из-

менчивости продуктивности водохранилищ многолетнего регулирования стока, в том числе и водохранилищ системы водоснабжения г. Москвы.

Авторы благодарны М.Г. Ершовой (МГУ им. М.В. Ломоносова) за активное участие в лимнологических расчетах и анализе полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виленина М.Н., Сахарова М.И.* Химизм воды, бактериальное население и фитопланктон Можайского водохранилища и изменения их в реке Москве (наблюдения с апреля 1960 г. по июль 1961 г.) // Учинское и Можайское водохранилища. М.: Изд-во МГУ, 1963. С. 389–406.
2. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / Под ред. *К.К. Эдельштейна*. М.: Перо, 2015. 286 с.
3. *Гончаров А.В., Гречушникова М.Г., Пуклаков В.В.* Новые возможности классического метода: автоматизированное определение первичной продукции и деструкции органического вещества в водоеме // Биология внутр. вод. 2018. № 4. С. 107–110.
4. *Гречушникова М.Г.* Изменчивость термического состояния Можайского водохранилища в вегетационный период. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2002. М.: 23 с.
5. *Даценко Ю.С.* Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
6. *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. 2017. № 10. С. 75–85.
7. *Ершова М.Г.* Моделирование генетической структуры Можайского водохранилища // Вод. ресурсы. 2003. Т. 30. № 2. С. 142–153.
8. *Ершова М.Г.* Результаты расчета состава вод отдельных участков водохранилища с помощью балансовой модели // География и природ. ресурсы. 1984. № 2. С. 135–141.
9. *Зайдельман Ф.Р., Гаджиев Я.М., Рожкова Л.С.* Опыт моделирования процессов взаимодействия затопленных почв и грунтов с водами водохранилища // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1978. Вып. 4. С. 127–136.
10. *Костоусова М.Н.* Особенности очистки воды от фитопланктона // Вод. ресурсы. 1984. № 3. С. 97–104.
11. *Кузнецов С.И.* Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л.: Наука, 1970. 440 с.
12. *Лебедев Ю.М., Широкова Е.Л.* Некоторые факторы среды, определяющие продукцию Можайского водохранилища // Биол. науки. 1972. № 6. С. 116–118.
13. *Левшина Н.А.* Структурные особенности фитопланктона Можайского водохранилища // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1980. Вып. 5. С. 149–154.

14. *Левшина Н.А.* Фитопланктон Можайского водохранилища // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1973. Вып. 2. С. 50–55.
15. *Левшина Н.А., Сахарова М.И.* Планктон и бентос // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1979. Вып. 3. С. 262–274.
16. Моделирование режима фосфора в долинном водохранилище. М.: Изд-во МГУ, 1995. 80 с.
17. *Орлеанская О.Б.* Зимний фитопланктон Можайского водохранилища // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1978. Вып. 4. С. 189–191.
18. *Пуклаков В.В.* Гидрологическая модель водохранилища. М.: ГЕОС, 1999. 95 с.
19. *Пуклаков В.В., Эдельштейн К.К.* Расчеты плотностных течений в Можайском водохранилище // Метеорология и гидрология. 2001. № 5. С. 94–104.
20. *Соколов Д.И.* Снижение стока органических веществ р. Москвы в Можайском водохранилище // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. II. Тр. Междунар. науч.-практ. конф. Пермь: ПГУ, 2013. С. 175–180.
21. *Телитченко М.М., Цыцарин Г.В., Широкова Е.Л.* Микроэлементы и “цветение” воды // Гидробиол. журн. 1970. № 6. С. 241–250.
22. *Урбах В.Ю.* Биометрические методы. М.: Наука, 1964. 415 с.
23. *Чернега С.С., Эдельштейн К.К.* Принципы гидроэкологической реконструкции долинных водохранилищ // Эколого-гидрологические проблемы изучения и использования водных ресурсов. Казань: АН РТ, 2006. С. 452–455.
24. *Шушкевич Е.В., Карпушенко А.В., Полянин В.О., Столярова Е.А.* Водоподготовка и управление качеством воды в условиях развития фитопланктона на примере московского водоисточника // Водоснабжение и сан. техника. 2010. № 10. Ч. 1. С. 13–15.
25. *Эдельштейн К.К., Пуклаков В.В., Даценко Ю.С.* Экспериментально-теоретические основы диагноза и прогноза формирования цветения в водохранилищах – источниках муниципального водоснабжения // ВОДА MAGAZINE. 2017. № 4 (116). С. 34–40.
26. *Эдельштейн К.К.* Водохранилища России, экологические проблемы и пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
27. *Эдельштейн К.К.* Гидрология озер и водохранилищ. М.: Перо, 2014. 398 с.
28. *Эдельштейн К.К.* Экологическое благоустройство московских водохранилищ // Природа. 1997. № 9. С. 92–97.
29. *Эдельштейн К.К., Гречушников М.Г., Гончаров А.В.* Влияние изменчивости погоды на биопродуктивность водохранилища // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2020. № 2. С. 36–44.
30. *Эдельштейн К.К., Пуклаков В.В., Даценко Ю.С., Ерина О.Н., Соколов Д.И.* Интенсивность поступления кислорода из пресных водоемов // Вод. ресурсы. 2018. № 3. С. 309–318.
31. *Ohle W.* Beitrage zur Productionsbiologie der Gewasser // Archiv fur Hydrobiol. 1955. Suppl. V. 22 (3–4). P. 456–479.
32. *Yershova M.G.* Modelling of the Genetic Composition of Water Masses in Two Valley Reservoirs in the Volga Basin // Int. Revue gesamtent Hydrobiol. V. 81. 1996. № 2. P. 293–313.