

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 574.55

К.К. Эдельштейн¹, М.Г. Гречушникова², А.В. Гончаров³**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОГОДЫ НА БИОПРОДУКТИВНОСТЬ
МОЖАЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА**

Представлены результаты статистического анализа данных автоматической регистрации внутрисуточных колебаний интенсивности фотосинтетически активной радиации (ФАР), температуры воды, содержания в ней кислорода, интенсивности продукционно-деструкционных процессов в поверхностном слое центрального плеса Можайского водохранилища в летний 70-дневный период 2016 и 2017 гг.

Впервые сконструированной автоматической установкой регистрировалось содержание кислорода в прозрачном и зачерненном сосудах при закачке в них воды на горизонте 0,5 м для последующих расчетов первичной продукции органического вещества и его деструкции классическим кислородным методом.

Выделены погодные циклы, состоящие из фаз нагревания и охлаждения воды при смене погоды. Эти наблюдения дополнены автоматической регистрацией колебаний температуры на 7 горизонтах 14-метровой водной толщи. Изменчивость погоды оценивается индексом погодной контрастности (ИПК). Показано, что, чем он больше, тем интенсивнее продукционно-деструкционные процессы в поверхностном слое водохранилища.

Ключевые слова: водохранилище, погодные циклы, автоматизация наблюдений, продукционно-деструкционные процессы, внутренний водообмен

Введение. Основные закономерности сезонных изменений в развитии фитопланктонных сообществ, как и факторы их продуктивности, в водохранилищах умеренных широт достаточно хорошо изучены и обобщены в монографиях [Vollenweider, 1975; Wetzel, 2001; Даченко, 2007; Минеева, 2007; Корнева, 2015]. Главными факторами цветения воды при этом признаны нагрузка водной экосистемы минеральными биогенными веществами, особенно ортофосфатами, и благоприятная температура воды. В то же время особенности изменчивости продуцирования органического вещества (ОВ) и растворенного кислорода (РК) экосистемой водохранилищ со сменой погоды летом известны существенно меньше. Наибольшая часть годовой первичной продукции фитопланктона формируется при летнем цветении воды преимущественно сине-зелеными водорослями, представляющем наибольшую опасность для водоснабжения и бытового водопользования [Шушкевич с соавт., 2010; Гидроэко логический ..., 2015].

Цель этой работы – оценить изменчивость колебаний интенсивности биопродуктивности основной водной массы водохранилища (ОВМ) при сменах погоды для уточнения модельных расчетов гидроэкологического режима водоемов-источников централизованного водоснабжения.

Материалы и методы исследований. Для изучения внутрисуточной изменчивости продуцирования ОВ и РК при постоянно меняющейся погоде лимнологами кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ в вегетационные сезоны 2016 и 2017 гг. выполнены автоматизированные гидрометеобиохимические круглосуточные наблюдения на Можайском водохранилище [Гончаров с соавт., 2018]. Приборный комплекс автоматически регистрируемых данных включал:

- логгер для автоматической регистрации интенсивности ФАР (фотосинтетически активной радиации), поступающей в водоем, в диапазоне длин волн 400–700 нм;

- автоматическую метеостанцию на катамаране в центре акватории;

- автоматический продукцимер – устройство для автоматизированного определения первичной продукции и деструкции органического вещества в водоеме кислородным методом, состоящее из светлого и темного сосудов с оптическими регистраторами растворенного кислорода (модель НОВО U26-001) и насоса, меняющего в них воду через заданный (3 ч) промежуток времени (А.В. Гончаров, патент № 179250, 2017).

Установка была погружена с бушприта в воду на горизонт 0,5 м и регистрировала температуру (T), концентрацию РК, по значениям которой рассчиты-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: emek05@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, вед. науч. с., канд. геогр. н.; ИВП РАН, лаборатория глобальной гидрологии, ст. науч. с.; e-mail: allavis@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, вед. науч. с., канд. биол. н.; e-mail: mama15333@mail.ru

ваются методом Винберга [Винберг, 1960] значения первичной валовой продукции (ППВ) фитопланктона, и деструкции ОВ (Д) каждые 3 часа.

При этом периодически производился отбор проб для определения содержания ортофосфата и состава планктона.

Первый опыт длительной эксплуатации перечисленных гидрометеорологических самописцев показал, что эпизодически возникавшие перебои регистрации были связаны с необходимостью регулярной очистки солнечной батареи метеостанции на судне, загрязняемой осадками и птицами, и мерных сосудов продукцимера от перифитона.

В результате был получен 70-суточный ряд ежечасных наблюдений T в поверхностном слое воды на рейдовой станции в центре Красновидовского плеса Можайского водохранилища. Значения T превышали 16°C в течение всего периода наблюдений и были благоприятны для активного развития летнего фитопланктона. Весь расчетный период (РП) в 2016 г. был разделен нами на фазы нагревания и охлаждения ОВМ, каждая пара из которых образует погодный цикл гидроэкологического режима водоема [Эдельштейн с соавт., 2018] (табл. 1).

Как показал анализ 40-летнего температурного режима Можайского водохранилища, число таких циклов варьирует от 3 (1967, 2000 гг.) до 9 (1986, 1996 гг.) и в среднем составляет 6 циклов за вегетационный сезон. Вся совокупность метеорологических характеристик погоды (температура и влажность воздуха, инсоляция, облачность, скорость и направление ветра) наиболее репрезентативно проявляется в изменчивости температуры поверхностного слоя воды. Фазами погодных циклов нами принято время из дня в день повышающейся или понижающейся температуры не менее чем на 3°C в течение 3 суток и более [Гречушников, 2002]. Это позволяет учесть пространственную неоднородность поля температуры, которая по многолетним наблюдениям в пределах плеса не превышает 3°C и пренебречь внутрисуточной ее изменчивостью при неизменной погоде.

Аналогично по данным измеренной температуры воды в поверхностном горизонте в 70-суточном РП 2017 года были выделены погодные циклы. Их оказалось только 2. Даты начала и конца 4 фаз этих циклов приведены в табл. 2.

Освещенность солнцем верхнего слоя воды летом в безоблачный день быстро увеличивается с

Таблица 1

Погодная цикличность режима водохранилища, ФАР и валовая первичная продукция (ППВ) фитопланктона летом 2016 г.

Циклы	Фазы	Даты фаз	Диапазон T_0	n	ΔT	ФАР, $\mu\text{моль}/(\text{м}^2\text{с})$		ППВ, $\text{мгO}_2/\text{л}$ сутки	
						n_d	Средняя	n_d	Средняя
I погодный цикл	Ф1	26.06–3.07	23,3–27,8	8	+4,5	8	766	7	3,3
	Ф2	4.07–9.07	27,8–19,8	6	–8,0	6	567	3	3,6
II погодный цикл	Ф3	10.07–14.07	19,8–24,3	5	+4,5	–	–	–	–
	Ф4	15.07–23.07	24,3–21,1	9	–3,2	–	–	–	–
III погодный цикл	Ф5	24.07–26.07	21,1–26,2	3	+5,1	3	726	3	2,3
	Ф6	27.07–16.08	26,2–19,9	21	–6,3	21	581	18	5,8
IV погодный цикл	Ф7	17.08–22.08	19,9–23,7	6	+3,8	4	418	5	10,1
	Ф8	23.08–3.09	23,7–19,1	12	–4,6	–	–	11	8,4

Примечание: T – температура воды на горизонте 0,5 м, ΔT – диапазон изменения температуры воды, n – число суток для расчета среднесуточной температуры воды, n_d – число дней для расчета ФАР и ППВ.

Таблица 2

Погодная цикличность режима водохранилища, ФАР и валовая первичная продукция (ППВ) фитопланктона летом 2017 г.

Циклы	Фазы	Даты фаз	Диапазон T_0	n	ΔT	ФАР, $\mu\text{моль}/(\text{м}^2\text{с})$		ППВ, $\text{мгO}_2/\text{л}$ сутки	
						n_d	Средняя	n_d	Средняя
I погодный цикл	Ф1	26.06–3.07	17,3–20,0	8	+2,7	8	574	5	3,54
	Ф2	4.07–10.07	20,0–16,9	7	–3,1	3	496	5	3,00
II погодный цикл	Ф3	11.07–12.08	17,0–25,6	33	+8,6	31	620	13	5,25
	Ф4	13.08–03.09	25,6–18,3	22	–7,3	8	692	22	3,60

Примечание: T – температура воды на горизонте 0,5 м, ΔT – диапазон изменения температуры воды, n – число суток для расчета среднесуточной температуры воды, n_d – число дней для расчета ФАР и ППВ.

Число дней регистрации ФАР и ППВ было меньше числа дней в расчетном периоде по техническим причинам. Данные летом 2016 г. по ФАР отсутствуют в 3, 4 и 8 фазах и их меньше в 7 фазе, а по ППВ – отсутствуют в 3 и 4 фазах и их меньше в 1 и 2 фазе, а летом 2017 г. данных по ФАР меньше во 2, 3 и 4 фазах, а по ППВ – в 1, 2 и 3. При расчете ФАР и ППВ суммировались и осреднялись данные 5 трехчасовых экспозиций светлого времени суток (с 6 до 21 час).

шести часов утра к полудню, наступающему на долготу Можайска в 13:00 по московскому времени. Поэтому в таблицах 1 и 2 приводятся значения ФАР ($\mu\text{моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$), осредненной за 15 часов светлого дневного времени (6–21) и значения среднедневной валовой первичной продукции (ППВ, $\text{мгO}_2/(\text{л сут})$), рассчитанной за тот же период дневного времени (n_d).

Конструкция продукцимера и методика расчета ППВ как суммы первичной продукции чистой, оцениваемой по изменению за три часа содержания кислорода в светлом сосуде, и величины деструкции по изменению содержания кислорода в непрозрачном сосуде детально описана в работе [Гончаров с соавт., 2018]. Расчет среднедневных величин ППВ за отдельные фазы погодных циклов 2016 г. выполнен дважды: сначала как суммы часовых значений, полученных из суммирования 15-минутных разностей зарегистрированных значений РК синхронно в обоих сосудах, и затем как суммы разностей регистрации РК в начале и конце каждой из 180 трехчасовых экспозиций. Различие среднедневных значений ППВ за все фазы получилось равным 2%. Такого контроля расчета для 2017 г. не потребовалось из-за отсутствия подобных недостатков регистрации во второй год полевого эксперимента.

Результаты исследований и их обсуждение.

Решению поставленной задачи способствовал относительно устойчивый в летние сезоны 2016 и 2017 гг. водный режим Можайского водохранилища. В мае водоем заполнялся водой половодья до отметки уровня 182,5 в 2016 г. (рис. 1) и 182,8 м в 2017 г. (НПУ = 183,0 м абс.). Расходы сбрасываемой воды Можайским гидроузлом были примерно равными паводковым, и водоем оставался практически неизменно наполненным в оба года до конца августа. Небольшие паводки (до $15 \text{ м}^3/\text{с}$) во второй половине летнего периода почти не нарушали плавности медленного снижения уровня воды в водохранилище в среднем

на 1 см в 2–3 дня. Они не повлияли на ежесуточную изменчивость показателей экологического состояния ОВМ из-за малости и неизменности скорости стокового транзитного течения.

Величина ППВ, характеризующая интенсивность процесса фотосинтеза летнего фитопланктона, в РП 2016 г. в большинстве погодных фаз больше, чем в РП 2017 г. (см. табл. 1 и 2). Наибольшие значения фотосинтетически активной радиации летом 2016 г. зарегистрированы в последний день первой фазы потепления 3.07.2016 г. в 12 ч ($1774 \mu\text{моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ или $390 \text{ Вт}/\text{м}^2$). Средняя величина ФАР за светлое время этой фазы составляла $766 \mu\text{моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. В этой фазе преобладала ясная солнечная погода с кучевой облачностью, увеличивающейся обычно во второй половине дня, слабым ветром переменных направлений или штилевой антициклонической погодой. Она сменилась на пасмурную, холодную и ветреную циклоническую погоду, в которую средняя за фазу 2 интенсивность ФАР снизилась на 35 % (см. табл. 1, рис. 2А). На этом рисунке показаны внутрисуточные колебания гидроэкологических характеристик: ФАР, температуры поверхностного слоя воды, валовой первичной продукции в среднем за трехчасовые интервалы экспозиции и содержания кислорода в воде, летом 2016 и 2017 гг. Число дней регистрации ФАР и ППВ было меньше числа дней в РП по техническим причинам, что объясняет пропуски их на рисунках. При расчете среднедневных значений ФАР и ППВ суммировались данные 5 трехчасовых экспозиций светлого времени суток (с 6 до 21 час) и осреднялись.

К концу РП вследствие уменьшающейся высоты солнца и увеличивающейся облачности на рис. 2А видно уменьшение максимальных суточных значений ФАР во вторую декаду августа, а в последнем 4 цикле в его теплую фазу средняя величина ФАР была значительно ниже, чем в холодные фазы 1 и 3 циклов (см. табл. 1).

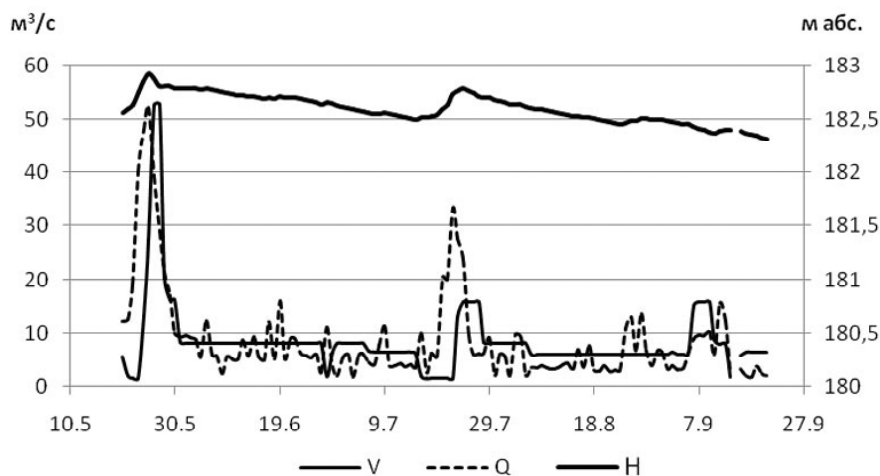


Рис. 1. Среднесуточный расход суммарного речного притока воды в водохранилище (Q) и ее сброса (V , $\text{м}^3/\text{с}$) Можайским гидроузлом в Москва-реку и снижение уровня воды (H , м абс.) в водохранилище с 15 мая по 24 сентября 2016 г.

Fig. 1 Average total daily river water inflow to the reservoir (Q) and its discharge by the Mozhaik hydrosystem to the Moscow River (V , m^3/s), and the water level decrease (H , m abs.) in the reservoir from May 15 till September 24, 2016

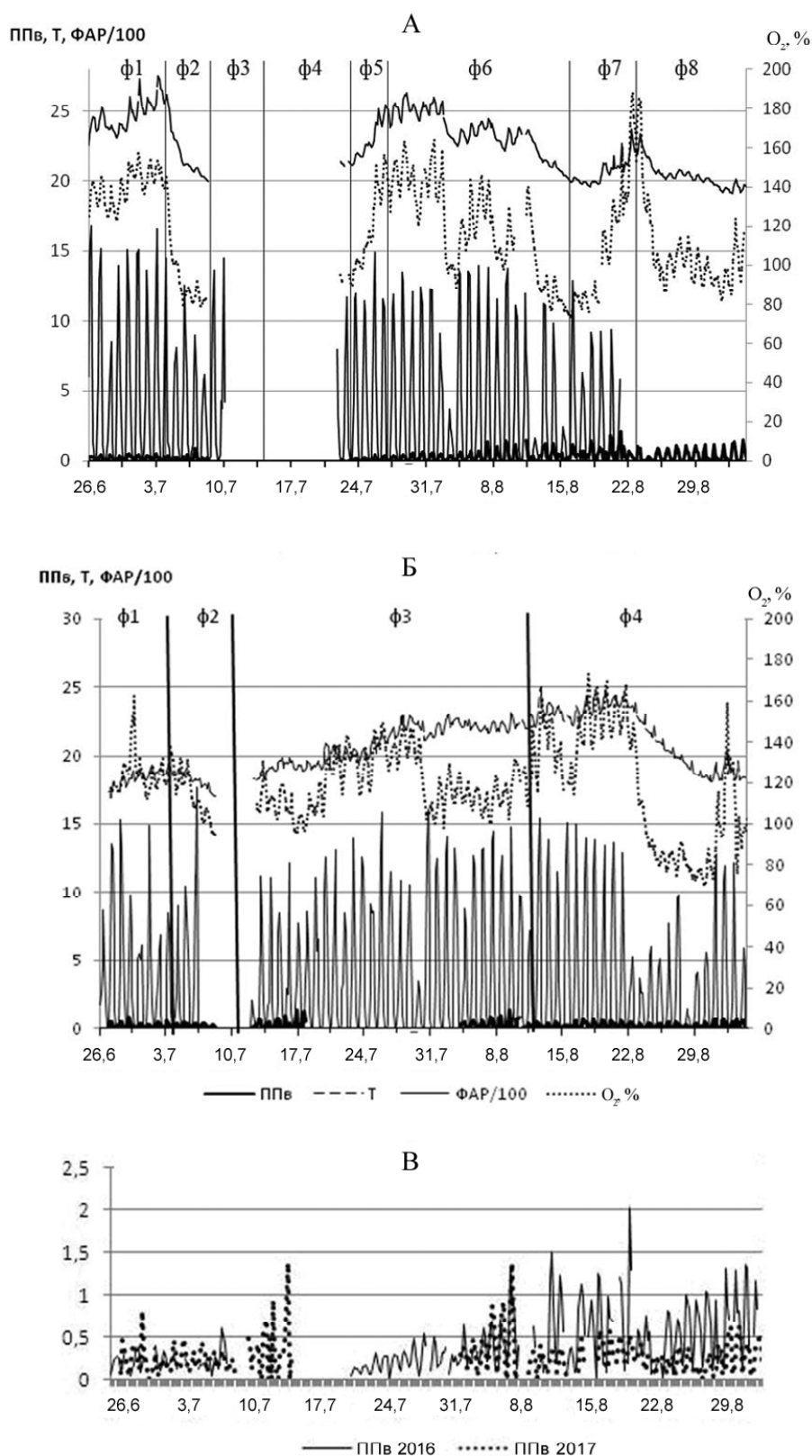


Рис. 2. Изменчивость внутрисуточных колебаний валовой продукции ППв, $\text{mg O}_2/(\text{л час})$, температуры воды, $T^\circ\text{C}$, $\text{PPFD} \cdot 10^2$, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{с})$ и содержания O_2 , %: А – 2016 г., Б – 2017 г.; В – сравнение величин ППв в эти годы

Fig.2 Variability of intraday fluctuations of the gross production GP, $\text{mg O}_2/(\text{l hour})$, water temperature $T^\circ\text{C}$, $\text{PPFD} \cdot 10^2$, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and O_2 concentration in water, %: А – in 2016, Б – in 2017; В – comparison of GP values in 2016 and 2017

Как и в РП 2016 г., в 2017 г. максимальное значение ФАР наблюдалось в конце 1 фазы, 1.07, и составляло в полдень 1715 $\mu\text{моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Соотношение средних значений ФАР в теплую и холодную фазы цикла I было подобно первому циклу 2016 г. (см. табл. 2, 2017 г.). Во втором очень продолжительном цикле эти соотношения оказались иными. В фазу охлаждения (4) среднее значение ФАР получилось на 9% больше, чем в предшествующую 3 фазу, что, по-видимому, связано с меньшей облачностью и более ясной погодой после 12 августа 2017 г.

Из данных табл. 3 следует, что, несмотря на меняющуюся год от года облачность летних погодных фаз, суммарный приход фотосинтетически ак-

тивной радиации на водную поверхность водохранилища в РП рассматриваемых двух лет различается всего на 6%. Вряд ли столь малое различие интенсивности ФАР служит причиной большей на 1,8° средней за РП температуры воды поверхностного слоя в 2016 году, чем в 2017, так как эта температура одновременно сильно зависит от внутриводоемного вертикального и горизонтального водообмена плеса. При этом коэффициент вариации восьмисрочных значений температуры верхнего слоя воды за РП обоих лет был практически одинаков ($C_v=9\%$ в 2016 г. и 10% в 2017 г.).

Максимальная часовая величина ППв в 2016 г. – 2,1 мг $\text{O}_2/\text{л час}$, зарегистрирована 21 августа в 12–

Таблица 3

Средние за РП 2016 и 2017 гг. величины интенсивности ФАР ($\mu\text{моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$), интенсивности валовой первичной продукции (ППв, мг $\text{O}_2/(\text{л сут})$), температуры поверхности воды (T °С) и индексы погодной контрастности (ИПК)

Гидроэкологические характеристики и индекс погодной контрастности	Годы		Соотношение средних за летний период величин 2016/2017
	2016 г.	2017 г.	
ФАР _{РП}	605	568	1,06
ППв _{РП}	6,11	4,00	1,53
$T_{РП}$	22,4	20,6	1,09
ИПК _{РП}	3,03	1,39	2,18

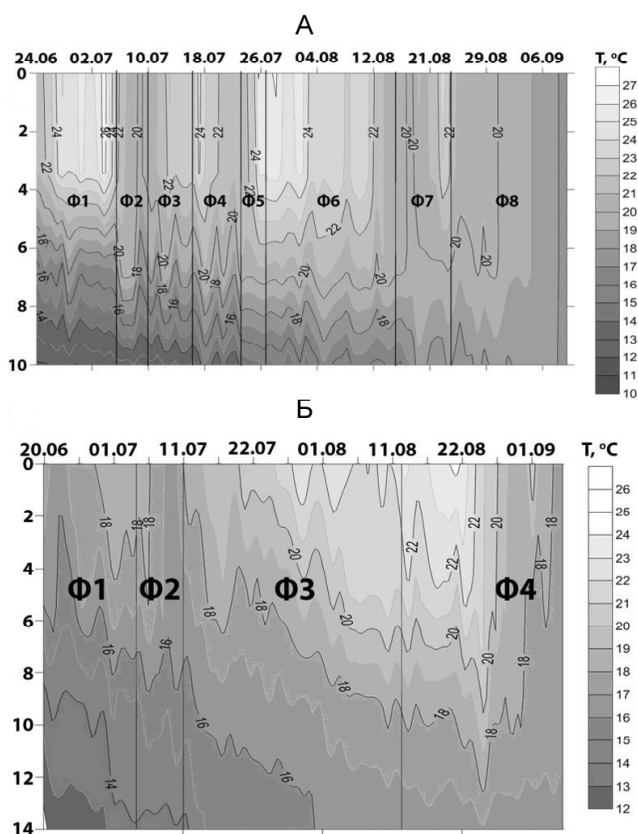


Рис. 3. Изменение термической структуры водной толщи в течение РП в центре Кrasновидовского плеса по часовым данным в 2016 (А) и в 2017 гг. (Б)

Fig. 3. Changes in the thermal structure of water column during the calculation period in the center of the Krasnovidovo stretch basing on hourly data in 2016 (А) and in 2017 (Б)

14 час в 7 теплой фазе, в этой же фазе оказалась максимальной и рассчитанная за фазу среднесуточная величина ППв (см. табл. 1). Средняя за эту фазу величина ФАР была наименьшей по сравнению с предшествующими погодными циклами. В РП 2017 г. максимальная величина ППв – 1,4 мг $\text{O}_2/\text{л час}$, зарегистрирована 17 июля в 12–14 час и этой же теплой 3 фазе соответствовала максимальная за весь РП среднесуточная величина ППв (см. табл. 2). Таким образом, максимальные часовые значения ППв в 2017 г. оказались в 1,5 раза ниже, а среднесуточные вдвое ниже, чем в 2016 г. Сравнение средней интенсивности биопродуктивности за РП двух лет показало, что в 2016 г. она была в 1,5 раза выше, чем в 2017 г. (см. табл. 3). Обращает внимание, что в оба года максимальные величины ППв получены в такие теплые фазы, которым предшествовало наибольшее охлаждение водной толщи плеса (рис. 3).

Этот вывод наталкивает на мысль о том, что биопродуктивность Можайского водохранилища тем больше, чем чаще меняется погода и чем более контрастны ее смены. В табл. 1 и 2 видно, что резкая смена погоды в 2016 г. была вдвое чаще, чем в 2017 г. Чем сильнее изменчивость температуры воды в каждую фазу и чем больше таких погодных фаз в течение расчетного периода, тем больше выражена контрастность при чередовании погодных циклов гидроэкологического режима, что можно оценить величиной индекса погодной контрастности (ИПК). Величина ИПК принята равной:

$$\Sigma |\Delta T_i| / (T_{\text{макс рп}} - T_{\text{нач рп}}) + (T_{\text{макс рп}} - T_{\text{кон рп}}),$$

где ΔT_i – диапазон изменения температуры поверхностного слоя воды в каждую i -ю погодную фазу, $T_{\text{макс рп}}$ – максимальная температура расчетного периода, $T_{\text{нач рп}}$ и $T_{\text{кон рп}}$ – ее значение в начале и конце периода. ИПК летом 2016 г. более чем вдвое превышает ИПК летом 2017 г. (см. табл. 3). Такое соотношение достаточно убедительно иллюстрирует влияние изменчивости погоды на интенсивность биопродуктивности водохранилища.

Во всех 6 фазах нагревания расчетных периодов содержание растворенного кислорода возрастает до 100–120 и более процентов в дневные и ночные часы (см. рис. 2). В 2016 г. максимум в 185% достигается в начале восьмой фазы (охлаждение), через сутки после регистрации максимальной ППв в седьмой фазе (нагревание). В 2017 г. с менее четко выраженными фазами максимальный процент РК – 173% зарегистрирован в четвертой фазе (на 4 день остывания воды) 17 августа в 18 ч., хотя в этот день ППв была небольшой, варьируя от 0,04 до 0,6 мг O_2 /л·ч при высоком значении ФАР в полуденные часы (1400 $\mu\text{моль}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$). Эта дата еще менее совпадает с днем максимальной биопродуктивности в РП этого года. В фазах охлаждения воды по мере понижения температуры начиналось уменьшение содержания кислорода до дефицита РК около 20%, но такие дни чередовались с днями повышения содержания кислорода иногда до 140–150% при небольших изменениях температуры поверхностного слоя. Отмеченное различие в изменении режима РК в теплую и холодную фазы гидроэкологического режима подтверждается расчетом коэффициента вариации РК. Наиболее контрастно выражено различие в концентрации РК в поверхностном слое воды в первую и вторую погодные фазы 2016 г.: в первую из них C_v ряда восьмисрочных ежесуточных регистраций РК равнялось 6% ($n = 64$), тогда как во вторую холодную фазу оно было более чем втрое больше ($C_v = 21\%$ при $n = 48$) [Эдельштейн с соавт., 2018].

В 2016 г. дефицит кислорода в придонном горизонте на рейдовой вертикали наблюдался уже с 14 июня, в то время как из-за существенно более холодной и ветреной погоды в июне 2017 г. бескислородные условия в придонном слое образовались только к середине июля. Это повлияло на процессы обмена с донными отложениями, в частности проявилось в меньшем поступлении минерального фосфора из донных отложений в придонный слой гипolimниона, в котором концентрация ортофосфатов в августе 2017 г. оказалась значительно меньше, чем в августе 2016 г. (табл. 4).

Это объясняет существенные различия в интенсивности продуцирования фитопланктона и максимальных значений ППв за РП. Наибольших величин в августе 2016 г. ППв достигла в 7-ю погодную фазу (см. рис. 2А, табл. 1) после похолодания 11–16.08 в погодную фазу 6, поскольку при похолодании и усилении скорости ветра с порывами до 10–11 м/с конвективно-ветровое перемешивание достигло глубины 10 м (см. рис. 3 А) при том, что

Таблица 4

Концентрация минерального фосфора (мкг/л) в августе 2016 и 2017 гг. в центре Красновидовского плеса

Слой отбора проб	2016 г.	2017 г.	
	19.08 (ф7)	11.08 (ф3)	20.08 (ф4)
Поверхностный слой	16	4	5
Придонный слой	585	240	390

бескислородные условия распространялись от дна до горизонта 8,5 м. Такая ситуация способствовала поступлению ортофосфатов в вышележащие слои. В 2017 г. холодная фаза, предшествующая теплой с максимальной ППв, была значительно короче аналогичной фазы 2016 г., что обусловило меньший обмен с придонным слоем воды и меньшую интенсивность биопродуцирования (в последнюю фазу потепления 2017 г., как указано выше, продукция была вдвое ниже, чем в аналогичную фазу 2016 г.).

ФАР и валовая первичная продукция по техническим причинам не были измерены в 3 и 4 погодные фазы 2016 г., первого года эксплуатации продукцимера. Но, судя по регистрации температуры поверхности воды в эти фазы (см. табл. 1), значительных изменений погоды, снижающих интенсивность цветения в июле 2016 г., которое могло бы существенно уменьшить среднюю величину ППв за весь РП 2016 г., не было. Поэтому считаем возможным опубликовать приведенную гипотезу, учитывая, что фазы с максимальными значениями ППв вошли в расчет средней биопродуктивности РП 2016 и 2017 гг.

Выделение погодных фаз гидроэкологического режима водохранилища целесообразно потому, что в фазы нагревания и фазы охлаждения вид внутреннего водообмена плеса существенно различен. В первых из них при штиле или слабом ветре, солнечной летней погоде лимнодинамика подобна меромиктическим озерам: эпилимнион как и миксолимнион почти еженощно перемешивается свободной ячеистой конвекцией при охлаждении воды вечером и ночью вплоть до восхода солнца. В это время в эпилимнионе образуются цилиндрические ячейки Бенара. По их периферии в охлаждающемся поверхностном слое вода опускается до термоклина, а в центре ячеек возникает восходящий ток воды к водной поверхности. Это и есть так называемый малый биогидрохимический круговорот растворенных и взвешенных в воде веществ [Эдельштейн, 2017]. С восходящими токами из нижних слоев эпилимниона выносятся к поверхности растворенный CO_2 и минеральные биогенные вещества, образующиеся за счет регенерации погружившихся органических веществ в процессе их деструкции. А с поглощением ФАР в первую половину светлого времени суток биогенные вещества питают процесс фотосинтеза фитопланктона, при котором в воду выделяется кислород. В результате этого процесса

увеличивается рН воды до 8,2 и более единиц. При этом полностью исчерпывается CO_2 в трофогенном слое и в фотосинтезе начинают использоваться гидрокарбонатные ионы. Возникающие излишки кальция кристаллизуются в микрокристаллы кальцита, которые служат сорбентом для растворенного фосфора и интенсифицируют его осаждение в вечерние и ночные часы [Ершова с соавт., 2001; Эдельштейн с соавт., 2005]. Вынос в трофогенный слой фосфора поддерживает интенсивный фотосинтез летнего фитопланктона. Поэтому нередко в первые дни фазы охлаждения возможны все еще высокие значения ППв за счет малого биогидрохимического круговорота. Например, утром первого дня 8 фазы охлаждения 2016 г. зафиксирована величина ППв 0,9 мг O_2 /л час, хотя в последний день теплой фазы максимальная ППв была равна 0,7 мг O_2 /(л час). На рис. 3 периоды нагрева видны по появлению изотерм все более высоких значений температуры поверхностного слоя воды во всех 6 фазах обоих РП 2016 и 2017 гг.

В фазу охлаждения воды, в пасмурную, ветреную и холодную погоду господствует другой вид конвективно-ветрового перемешивания – вихри Ленгмюра. На поверхности возникают направленные по ветру пенные полосы конвергенции, в которых остывшая на поверхности вода опускается, а между ними – полоса дивергенции, в которой на поверхность поднимаются более теплые глубинные воды. Эти энергичные вихри перемешивают водную толщу на существенно большую глубину, чем ячейчатая конвекция. Это видно (см. рис. 3) по подъему к поверхности одних изотерм и погружению других до глубины от 7–8 м во 2-ю фазу до 8–10 м в 8-ю фазу 2016 г., то есть до поверхности дна на затопленной водохранилищем бывшей пойме Красновидовского плеса. В РП 2017 г. это явление также хорошо прослеживается на том же рисунке.

В фазу охлаждения намного интенсивнее перемешивание всей водной толщи и поэтому происходит значительно более сильный вынос глубинных вод в трофогенный слой подобно ранневесеннему и осеннему перемешиванию вод в димиктических озерах с вентилицией (насыщением) придонных слоев воды кислородом и насыщением поверхностных слоев CO_2 и регенерированными биогенными минераль-

ными веществами. Это вызывает вспышки цветения сине-зеленых и других летних водорослей в начале, а иногда и в течение многих дней последующей фазы нагревания системы. Примером может служить максимально интенсивное развитие биопродуктивности в 7 фазе 2016 г. после 6 фазы охлаждения, в которой особенно интенсивное перемешивание глубинных и поверхностных вод внесло к поверхности большое количество CO_2 , биогенных минеральных веществ, в том числе и ортофосфатов, и при этом в наибольшей степени за весь РП снизило концентрацию кислорода до 73% насыщения.

Таким образом, в Можайском водохранилище, относимом к димиктическим водоемам по классификации Хатчинсона [Хатчинсон, 1969], Красновидовский плес в 2016–2017 гг. можно было бы считать подобным полимиктическим водоемам, подобно мелководным обширным эвтрофным озерам умеренных широт. В нем большой химический круговорот биогидрохимических веществ совершается тем многократно, чем больше значение индекса погодной контрастности (ИПК). Однако необходимо учитывать, что на описанные виды внутреннего водообмена в долинном водохранилище кроме изменчивости погоды оказывают влияние медленные транзитные течения: стоковое и придонное плотностное. Оно заполняет извилистую и узкую русловую ложбину смесью вод гипolimниона ОВМ с холодными, бескислородными и более минерализованными и плотными подземными водами, препятствующими перемешиванию до дна в русловой ложбине.

Выводы:

Биопродуктивность в стратифицированном водохранилище тем больше, чем больше погодных циклов и чем контрастнее они выражены. Эта гипотеза возникла на основании анализа изменчивости погодных условий с помощью разработанного индекса погодной контрастности (ИПК), влияющих на изменение гидроэкологических процессов в водохранилище и его летнего цветения. Показано, что биопродуктивность летом 2016 г. в Можайском водохранилище была в полтора раза выше, чем в такой же период 2017 г., контрастность погоды в который оказалась вдвое меньше.

Благодарности. М.Г. Ершовой за участие в подготовке статьи к публикации. Разработка продукционной установки и сбор полевых материалов проведены по теме 1.10 «Гидрологический режим водных объектов суши в условиях изменения климата и антропогенного воздействия» (ГЗ, номер ЦИТИС: АААА–А16–116032810054–3), анализ полученных данных и подготовка статьи – при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18–05–01066 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.
- Гидрологический режим водохранилищ Подмосковья. М.: Перо, 2015. 286 с.
- Гончаров А.В., Гречушникова М.Г., Пуклаков В.В. Новые возможности классического метода: автоматизированное определение первичной продукции и деструкции органического вещества в водоеме // Биология внутренних вод. 2018. № 4. С. 107–110.
- Гречушникова М.Г. Изменчивость термического состояния Можайского водохранилища в вегетационный период: автореф. ... дис. канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2002. 23 с.
- Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
- Ершова М.Г., Заславская М.Б., Эдельштейн К.К. Динамические явления разномасштабного круговорота химических веществ в экосистеме стратифицированного водохранилища // Физические проблемы экологии (экологическая физика). № 6. М.: Физфак МГУ, 2001. С. 43–50.
- Корнева Л.Г. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромской печатный дом, 2015. 284 с.
- Минеева Н.М. Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги. Ярославль, 2007. 277 с.
- Хатчинсон Д. Лимнология / Сокр. пер. с англ. М.: Прогресс, 1969. 592 с.
- Шушкевич Е.В., Карпушенко А.В., Полянин В.О., Столярова Е.А. Водоподготовка и управление качеством воды в условиях развития фитопланктона на примере москворецкого водосточника // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 10. Часть 1. С. 13–15.
- Эдельштейн К.К. Лимнология. Изд. 2. М.: Юрайт, 2017.
- Эдельштейн К.К., Даценко Ю.С., Гончаров А.В., Гречушникова М.Г., Пуклаков В.В. Параметризация внутрисуточных, внутригодовых и межгодовых колебаний характеристик гидроэкологического и экологического режима долинного водохранилища // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2018. С. 50–59.
- Эдельштейн К.К., Ершова М.Г., Заславская М.Б. Биогенный кальцит – важный компонент круговорота веществ в эвтрофном Можайском водохранилище // Водные ресурсы. 2005. Том 32. № 4. С. 477–488.
- Эдельштейн К.К., Пуклаков В.В., Даценко Ю.С., Ерина О.Н., Соколов Д.И. Интенсивность поступления кислорода из пресных водоемов // Водные ресурсы. 2018. Том 45. № 3. С. 309–318.
- Vollenweider R.A. Input–output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, 1975, vol. 37, p. 53–84.
- Wetzel R.G. Limnology Lake and River Ecosystems. 3 ed. New York: Academic Press, 2001, 1006 p.

Поступила в редакцию 07.02.2019

После доработки 05.10.2019

Принята к публикации 01.11.2019

K.K. Edelshtein¹, M.G. Grechushnikova²,
A.V. Goncharov³

INFLUENCE OF WEATHER VARIABILITY ON THE PRODUCTIVITY MOZHAISK OF WATER RESERVOIR

The paper presents the results of statistical analysis of the data received by automatic registration of intraday fluctuations in the PPFD intensity, water temperature, dissolved oxygen, intensity of production and destruction processes in the surface layer of the central part of the Mozhaisk reservoir during 70-day summer periods of 2016 and 2017.

The oxygen content in transparent and blackened vessels was recorded by original automatic unit designed for injection of water at the depth of 0,5 m. Subsequently the primary production and destruction of organic matter were calculated by the classical oxygen method.

The weather cycles were revealed which incorporate water heating and cooling phases related to weather changes. Observations were supplemented by the automatic registration of temperature fluctuations at seven levels of the 14-meter water column. Weather variability is estimated by the weather contrast index (IPC). It is shown that the higher it is the more intensive are the production and destruction processes in the surface layer of the reservoir.

Key words: reservoir, weather cycles, automation of observations, production and destruction processes, internal water exchange

Acknowledgements. The authors are grateful to M.G. Ershova for her assistance in preparing the article for publication. Development of a production installation and collection of field materials was carried out on topic 1.10, «The hydrological regime of land water bodies under conditions of climate change and anthropogenic impact» (GZ, CITIS number: AAAA – A16–116032810054–3), analysis of the data and preparation of an article supported by a grant Russian Foundation for Basic Research No. 18–05–01066 A.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: emek05@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geography; IWP RAS, Laboratory of Global Hydrology, Senior Scientific Researcher; e-mail: allavis@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Leading Scientific Researcher, PhD. in Biology; e-mail: mama15333@mail.ru

REFERENCES

- Datsenko Yu.S.* Evtrofirovaniye vodoshranilishh. Gidrologo-gidroshimicheskie aspekt [Eutrophication of reservoirs. Hydrological and hydrochemical aspects]. Moscow, GEOS Publ., 2007, 252 p. (In Russian)
- Edelshtein K.K.* Limnologiya [Limnology]. Moscow, Urite Publ., 2017. (In Russian)
- Edelshtein K.K., Datsenko Yu.S., Goncharov A.V., Grechushnikova M.G., Puklakov V.V.* Parametrizatsiy vnutrisutochnish, vnutrigodobish i meygodovish kolebani sharakteristik gidroekologicheskogo i ekologicheskogo rejima dolinnogo vodokhranilisha [Parametrization of intraday, intra-annual, and interannual fluctuations of hydrological and ecological regime parameters of a valley reservoir]. *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii* [Current trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia]. Proc. of the Russian Scientific and Practical Conference, Irkutsk, Irkutsk State Univ. Publ., 2018, p. 50–59. (In Russian)
- Edelshtein K.K., Ershova M.G., Zaslavskaya M.B.* Biochemogenic calcite as an important component of matter turnover in the eutrophic Mozhaisk reservoir. *Water Resources*, 2005, vol. 32, no. 4, p. 434–444.
- Edelshtein K.K., Puklakov V.V., Datsenko Y.S., Erina O.N., Sokolov D.I.* The rate of oxygen release from freshwater bodies. *Water Resources*, 2018, vol. 45, no. 3, p. 399–408.
- Gidroekologicheskii rejim vodoshranilish Podmoskovia [The hydrological regime of reservoirs near Moscow]. Moscow: Pero Publ., 2015, 286 p. (In Russian)
- Goncharov A.V., Grechushnikova M.G., Puklakov V.V.* Novie vozmozhnosti klassicheskogo metoda: avtomatizirovannoe opredelenie pervichnoy produktsii i destruktii organicheskogo veshchestva v vodoeme [New Possibilities of a Classical Method: Automated Determination of Primary Production and Destruction of Organic Substance in a Reservoir]. *Biologiya vnutrennish vod*, 2018, no. 4, p. 107–110. (In Russian)
- Grechushnikova M.G.* Izmenchivost termicheskogo sostoyaniya Mozhaiskogo vodokhranilisha v vegetatsionny period [Variability of the thermal state of the Mozhaisk reservoir during the growing season], PhD Thesis in Geography, Moscow, Moscow State Univ. Publ. 2002, 23 p. (In Russian)
- Hatchinson D.* Limnologiya [Limnology]. Moscow, Progress Publ., 1969, 592 p. (In Russian)
- Korneva L.G.* Fitoplankton vodokhranilish basseyna Volgi [Phytoplankton in the reservoirs of the Volga River basin]. Kostroma, Kostroma Printing House, 2015, 284 p. (In Russian)
- Mineeva N.M.* Pervichnaya produkcija plankton v vodokhranilishakh Volgi [Primary plankton production in the Volga River reservoirs]. Yaroslavl, 2007, 277 p. (In Russian)
- Shushkevich E.V., Karpushenko A.V., Polyagin V.O., Stolyarova E.A.* Vodopodgotovka i upravlenie kachestvom vody v usloviykh razvitiya fitoplanktona na primere moskvoretskogo vodoistochnika [Water treatment and water quality management under phytoplankton development: case study of the Moskvoretsky water source] *Vodosnabzhenie i sanitarnay tekhnika*, 2010, no. 10, part 1, p. 13–15. (In Russian)
- Vinberg G.G.* Pervichnaya produkcija vodoemov [Primary production of water bodies]. Minsk, Publ. of the BSSR Academy of Sciences, 1961. 329 p. (In Russian)
- Vollenweider R.A.* Input–output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweizerische Zeitschrift fur Hydrologie*, 1975, vol. 37, p. 53–84.
- Wetzel R.G.* Limnology Lake and River Ecosystems. 3 ed. New York: Academic Pres, 2001, 1006 p.
- Ershova M.G., Zaslavskaya M.B., Edelshtein K.K.* Dinamicheskie yavleniya raznomasshtabnogo krugovorota shimicheskikh veshchestv v ekosisteme stratificirovannogo vodoshranilisha [Dynamic phenomena of a multiscale chemical cycle in the ecosystem of a stratified reservoir]. *Fizicheskie problemy ekologii (ekologicheskaya fizika)*, no. 6, Moscow, Faculty of Physics Publ., Moscow State University, 2001, 284 p. (In Russian)

Received 07.02.2019

Revised 05.10.2019

Accepted 01.11.2019