

ГИДРОБИОЛОГИЯ

УДК 574.52

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ ФИТОПЛАНКТОНА В МАЛОПРОТОЧНОМ СТРАТИФИЦИРОВАННОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Ю. С. Даценко, В. В. Пуклаков, К. К. Эдельштейн

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Анализируются результаты моделирования изменений биомассы фитопланктона в Можайском водохранилище за 55-летний период его эксплуатации в качестве источника водоснабжения г. Москвы. Приводятся основные расчетные уравнения фитопланктонного блока гидрологической модели водохранилища и их уточненные параметры. По результатам модельных расчетов многолетних колебаний интенсивности развития фитопланктона в вегетационный период проведен многоплановый корреляционный анализ факторов продуктивности водохранилища. Рассматривается комплекс абиотических факторов, которые разделены на группы по характеру влияния и формам проявления в экосистеме водоема – гидрологические, метеорологические, гидрохимические и факторы режима регулирования стока гидроузлом. Выявлен устойчивый тренд увеличения средней за вегетационный сезон биомассы фитопланктона в Можайском водохранилище. Статистическими расчетами линейных связей установлены наиболее значимые факторы межгодовых изменений продукционных процессов и развития фитопланктона. Показано, что в летний период развитие фитопланктона в водохранилище определяет паводочный сток, формирующий внешнюю биогенную нагрузку на водоем, в то время как характеристики погодных условий слабо скоррелированы с биомассой фитопланктона в вегетационный период. Диатомовые водоросли относятся к наименее предсказуемой группе фитопланктона.

К л ю ч е в ы е с л о в а: диатомовые водоросли; синезеленые водоросли; продукционные процессы; гидрометеорологические факторы; водохранилище; корреляционный анализ; моделирование.

Yu. S. Datsenko, V. V. Puklakov, K. K. Edelstein. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ABIOTIC FACTORS ON PHYTOPLANKTON GROWTH IN A LOW-FLOW STRATIFIED STORAGE RESERVOIR

The results of simulation of changes in the phytoplankton biomass in Mozhaiskoye reservoir during the 55-year period of its operation as a source of water supply for Moscow were analyzed. The principal design equations for the phytoplankton unit of the reser-

voir's hydrological model and their updated parameters are presented. The results of model calculations of multiannual fluctuations of the phytoplankton growth rate during the growing season were used for a multidimensional correlation analysis of the factors for the reservoir's productivity. We consider a set of abiotic factors grouped according to the type of impact and manifestations in the ecosystem of the reservoir into hydrological, meteorological, hydrochemical and factors related to flow regulation by hydropower engineering. A steady long-term upward trend was revealed in the phytoplankton growing-season biomass in Mozhaiskoye reservoir. Statistical calculations of linear relations detected the most important factors for among-year variations in production processes and phytoplankton growth in the reservoir. It was shown that the level of phytoplankton growth in the reservoir in summer is determined by peak flow, which generates the external nutrient loading on the reservoir, while meteorological factors show little correlation with phytoplankton biomass in the growing season. Diatoms are the least predictable group of phytoplankton.

Key words: diatoms; blue-green algae; production processes; hydro-meteorological factors; storage reservoir; correlation analysis; modeling.

Введение

Изучение процессов развития фитопланктона находится в центре большинства комплексных лимнологических исследований внутренних водоемов, так как фитопланктон относится к тем биотическим компонентам экосистемы водоема, которые определяют энергетическую основу круговорота вещества и энергии, оказывая большое влияние на качество воды и интенсивность трофических взаимодействий компонентов экосистемы. Практический интерес к исследованиям фитопланктона обусловлен тем, что его интенсивное развитие в летний период, называемое «цветением воды», приводит к заметному ухудшению качества воды в водоемах и создает проблемы при ее использовании в водоснабжении.

К сожалению, в настоящее время успехи лимнологов на пути познания закономерностей развития фитопланктона и его прогнозирования более чем скромные. Надежных методов прогноза этого явления не существует, несмотря на то что главные факторы развития планктона достаточно хорошо известны. Трудность состоит в том, что эти факторы действуют одновременно, хотя и с разной интенсивностью. Не имея надежных количественных оценок влияния отдельных факторов, невозможно получить результат их сложной комбинации и спрогнозировать явление.

Задача диагностической оценки условий развития цветения воды особенно актуальна для водохранилищ Москворецкой системы водоснабжения г. Москвы, осуществляющих многолетнее регулирование стока. Эти водохранилища относятся к типу эвтрофных водоемов, поэтому обильное развитие фитопланктона в них в летний период явление обычное

[Левшина, 1980]. Колебания первичной продуктивности и особенности круговорота вещества и энергии в водохранилищах характеризуются исключительно большой нестационарностью, связанной с колебаниями гидрологического режима притока воды и внешнего воздействия в виде непредсказуемо меняющихся синоптических условий. При невозможности воспроизвести эти воздействия в природных условиях используются расчеты по математической модели различных сценариев, что позволяет выявить особенности отклика экосистемы на это воздействие.

Задача настоящего исследования – по результатам расчета суточных величин биомассы фитопланктона за все 55 лет эксплуатации самого емкого в Москворецкой водохозяйственной системе Можайского водохранилища [Комплексные исследования..., 1979]:

- выделить периоды ежегодного цветения водохранилища,
- определить тенденцию изменения его интенсивности,
- получить статистические оценки зависимости биомассы фитопланктона от режима регулирования речного стока Можайским гидроузлом и от природных гидрометеорологических и гидрохимических факторов.

Материалы и методы

Для изучения многолетних изменений биомасс фитопланктона в водохранилище использована математическая двумерная боксовая Гидроэкологическая модель водохранилища ГМВ-МГУ. Расчетами по этой модели оцениваются среднесуточные значения физических, химических и биологических характеристик состава воды в отдельных плесах долинных

водохранилищ сезонного и многолетнего регулирования речного стока при меняющихся погодных условиях и расходах воды притоков. Анализ применения модели ГМВ-МГУ для расчетов гидрологического режима различных водохранилищ Московского региона за отдельные годы показал вполне удовлетворительные результаты при условии тщательной подготовки (проверки на репрезентативность и достоверность) необходимых для расчетов исходных данных. Структура этой модели и верификация выполненных по ней гидроэкологических диагностических расчетов детально изложена в монографии [Гидроэкологический режим..., 2015].

Для верификации экологического блока модели при условии ее реализации с учетом всего разнообразия гидрометеорологических условий, наблюдавшихся за время существования Можайского водохранилища, был сформирован файл исходных данных с суточным разрешением за период с 1961 по 2015 г., который включает следующую информацию: расходы сброса воды в нижний бьеф гидроузла, уровень воды в водохранилище, метеоданные (осадки, скорость и направление ветра, упругость водяного пара, облачность общая и нижняя, солнечная радиация, атмосферное давление), расходы воды притоков и их физические и гидрохимические характеристики (температура и электропроводность воды, содержание растворенного кислорода, биогенные элементы (азот, фосфор, кремний, железо), мутность воды, содержание детрита, перманганатная и бихроматная окисляемость, сульфаты, pH). Информация о характеристиках гидрологического режима Можайского водохранилища и его притоков получена по данным о режиме работы Можайского гидроузла и гидрологическим ежегодникам государственного водного кадастра, метеоинформация – по данным Можайской метеостанции. Состав речных вод, поступающих в водохранилище, определяется соотношением генетических типов вод, формирующихся на водосборе. В основном это склоновые, почвенные и грунтовые воды. Их поступление в речную сеть определяется климатом территории, который формирует различные фазы речного стока и водного режима рек. Поэтому характеристики состава водных масс притоков задавались по их эмпирическим зависимостям от расходов воды, полученным по данным наблюдений Красновидавской лаборатории по изучению водохранилищ и материалам гидрологических ежегодников за 1956–2012 гг. для каждой из шести фаз водного стока: подъем весеннего половодья, спад половодья, летне-осенние дождевые

паводки, летне-осенняя межень, зимняя межень и зимние паводки.

Верификационные расчеты показали, что модель вполне адекватно отражает уровенный, термический, ледовый и гидрохимический режим Можайского водохранилища [Гидроэкологический режим..., 2015].

Базовое уравнение для расчета биомассы каждой группы фитопланктона имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta B_a}{\Delta t} = & K_{ag} \cdot B_a - K_{ar} \cdot B_a - K_{ae} \cdot B_a - \\ & - K_{am} \cdot B_a + \omega_a \cdot \frac{\Delta B_a}{\Delta z} - K_z \cdot B_z \cdot \frac{\sigma_{az} \cdot B_a}{\Phi_z} - \\ & - K_f \cdot B_f \cdot \frac{\sigma_{af} \cdot B_a \cdot V}{\Phi_f} \end{aligned} \quad (1)$$

где представлены биомассы, г/м³: B_a – фитопланктона, B_z – зоопланктона, B_f – рыб; скорости процессов, 1/сут: K_{ag} – роста, K_{ar} – дыхания, K_{ae} – экскреции, K_{am} – отмирания фитопланктона; K_z – питания зоопланктона; K_f – питания рыб; ω_a – скорость осаждения фитопланктона, м/сут; коэффициенты предпочтения пищи по фитопланктону: σ_{az} – для зоопланктона, σ_{af} – для рыб; концентрации имеющейся общей весовой пищи в боксе с учетом предпочтений: Φ_z – для зоопланктона, г/м³, Φ_f – для рыб, г; V – объем бокса, м³.

Скорость роста фитопланктона лимитируется светом, температурой и концентрацией биогенных веществ:

$$K_{ag} = Y_{1a} \cdot Y_{2a} \cdot \lambda_{\min} \cdot K_{ag\max} \quad (2)$$

где Y_{1a} – параметр, характеризующий подъем кривой температурного лимитирования; Y_{2a} – параметр, характеризующий спад температурной кривой; λ_{\min} – лимитирующий фактор (минимум из функций светового и биогенного питания); $K_{ag\max}$ – максимальная скорость роста, 1/сут.

Влияние температуры воды на биохимические процессы формализовано в модели в виде аналитического выражения, предложенного в работе [Thornton, Lessem, 1978]:

$$Y(T) = 0 \text{ при } T \leq T_1 \text{ и при } T \geq T_4; \quad (3)$$

$$Y(T) = Y_1 \cdot Y_2 = \frac{K_1 \exp[\lambda_1(T - T_1)]}{1 + K_1 \{\exp[\lambda_1(T - T_1)] - 1\}} \cdot \frac{K_4 \exp[\lambda_2(T_4 - T)]}{1 + K_4 \{\exp[\lambda_2(T_4 - T)] - 1\}} \text{ при } T_1 < T < T_4, \quad (4)$$

где T_1 – минимальная и T_4 – максимальная температура, при которых биохимический процесс прекращается; $\lambda_1 = \frac{1}{T_2 - T_1} \ln \frac{K_2(1 - K_1)}{K_1(1 - K_2)}$ – пара-

Таблица 1. Параметры блока расчета фитопланктона, принятые в модели

Параметры блока «фитопланктон»	диатомовые	прочие	синезеленые
Нижний температурный предел T_1 , °C	0,0	2,0	10,0
Нижний температурный оптимум, T_2 °C	8,0	12,0	15,0
Верхний температурный оптимум, T_3 °C	12,0	20,0	26,0
Верхний температурный предел T_4 , °C	22,0	30,0	35,0
Температурный множитель K_1 и K_4	0,1	0,1	0,1
Температурный множитель K_2 и K_3	0,98	0,98	0,98
Интенсивность света для макс. скорости роста I_s , Вт/м ²	47,80	33,26	20,15
Коэффициент полунасыщения P_b , мг/л по фосфору	0,001	0,001	0,001
по азоту	0,07	0,009	0,006
по CO ₂	0,8	0,1	0,1
по кремнию	0,5	–	–
Максимум скорости роста биомассы $K_{ag\ max}$, 1/сут	3,5	2,0	2,5
дыхания в темноте $K_{ar\ max}$, 1/сут	0,15	0,10	0,08
экскреции $K_{ae\ max}$, 1/сут	0,04	0,04	0,05
естественной смертности $K_{am\ max}$, 1/сут	0,09	0,06	0,07
осаждения ω_a , м/сут	0,45	0,10	0,05
Коэффициент предпочтения в питании зоопланктона σ_{az}	0,4	0,2	0,0
в питании рыб σ_{af}	0,3	0,0	0,0

метр, характеризующий подъем кривой температурного множителя; K_1 , K_2 – значения температурного множителя при лимитирующих значениях температур T_1 и T_2 ;
 $\lambda_2 = \frac{1}{T_4 - T_3} \ln \frac{K_3(1 - K_4)}{K_4(1 - K_3)}$ – параметр, характеризующий спад кривой температурного множителя; K_3 , K_4 – значения температурного множителя при лимитирующих значениях температур T_3 и T_4 ; T_2 – нижний и T_3 – верхний предел интервала оптимальных температур ($T_2 \div T_3$), при которых процесс протекает с максимальной скоростью.

Лимитирующая функция по световым условиям определяется по классической схеме (функция Стила), описанной, например, в монографии [Charpa, Reckhow, 1983]:

$$\lambda_1 = \frac{I}{I_s} \cdot \exp\left(1 - \frac{I}{I_s}\right), \quad (5)$$

где λ_1 – фактор лимитирования роста фитопланктона светом; I – приходящая в бок солнечная радиация, Вт/м²; I_s – оптимальная для развития водорослей солнечная радиация, Вт/м².

Лимитирование по биогенному питанию выполняется по функции Моно:

$$\lambda_n = \frac{C_b}{C_b + P_b}, \quad (6)$$

где C_b – концентрация биогенного элемента, мг/л; P_b – коэффициент полунасыщения функции Моно для биогенного элемента, мг/л.

Потери биомассы фитопланктона при дыхании (экскреции) и смертности оценивались произведением зависящих от температуры коэффициентов на параметры максимальных значений скорости этих процессов:

- на дыхание $K_{ar} = \gamma_{1a} \cdot K_{ar\ max}$,
где $K_{ar\ max}$ – максимальная скорость дыхания фитопланктона, 1/сут;
- на метаболические выделения (фотодыхание) $K_{ae} = (1 - \lambda_1) \cdot K_{ae\ max}$,
где $K_{ae\ max}$ – максимальная скорость выделения, 1/сут;
- на смертность $K_{am} = \gamma_{1a} \cdot \gamma_{2a} \cdot K_{am\ max}$,
где $K_{am\ max}$ – максимальная скорость отмирания фитопланктона, 1/сут.

На основании сопоставления результатов имитации развития фитопланктона и данных наблюдений были уточнены некоторые параметры фитопланктонного блока модели (табл. 1) и внесены изменения в алгоритм расчета, отражающий потери биомассы фитопланктона в результате его смертности:

$$K_{am} = (1 - \gamma_{1a}) \cdot K_{am\ max}. \quad (7)$$

Результаты и обсуждение

Валидация расчета режима биомассы фитопланктона в Можайском водохранилище проводилась по обобщенным нами многолетним данным наблюдений Красновидовской лаборатории по изучению водохранилищ географического

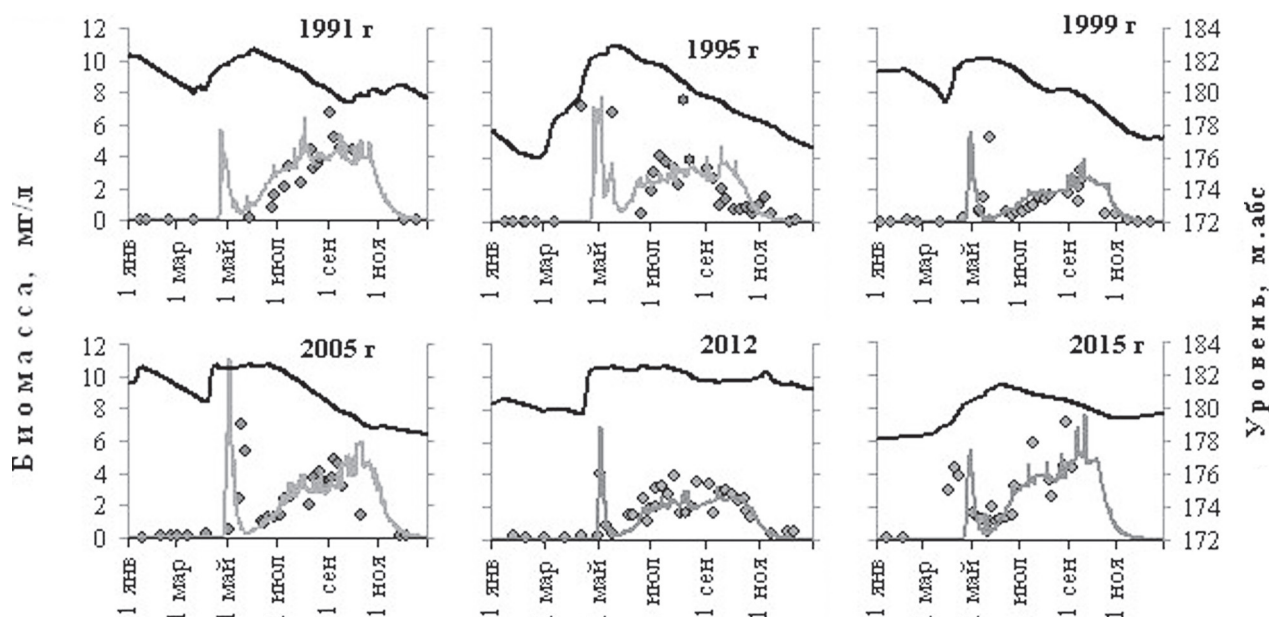


Рис. 1. Результаты расчета уровня воды (черная линия), биомассы фитопланктона (мг/л) (серая линия) и наблюдаемых величин биомассы фитопланктона (точки) в поверхностном слое Приплотинного плеса водохранилища

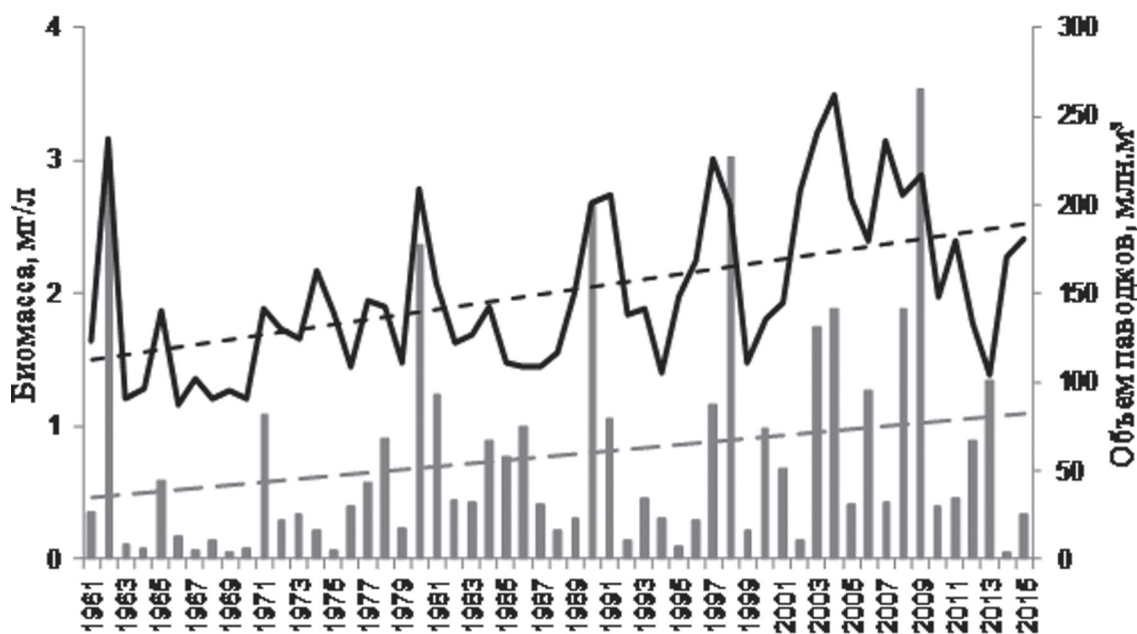


Рис. 2. Результаты расчета общей биомассы фитопланктона (линия) в поверхностном слое Приплотинного плеса Можайского водохранилища и объема притока летних паводков (гистограмма) за период 1961–2015 гг.

факультета МГУ им. М. В. Ломоносова и данным режимных наблюдений лаборатории контроля качества воды Можайского гидроузла. Результаты выполненной за отдельные годы валидации опубликованы в работах [Гидроэкологический режим..., 2015; Пуклаков, Замана, 2015]. Расчет режима биомассы фитопланктона за 55-летний период существования водохранилища показал вполне адекватный результат для большинства расчетных лет (за исключением

нескольких вегетационных сезонов с массовым развитием пиррофитовых водорослей). Пример графической интерпретации результатов расчета биомассы фитопланктона в поверхностном слое Приплотинного плеса водохранилища за различные годы представлен на рисунке 1.

В многолетней изменчивости обилия фитопланктона в водохранилище выявлен устойчивый тренд увеличения средней за вегетационный сезон биомассы фитопланктона

в Можайском водохранилище на фоне климатического увеличения паводкового стока (рис. 2).

Проведенные расчеты позволяют статистическим анализом линейных связей выявить наиболее значимые факторы межгодовых изменений продукционных процессов и развития фитопланктона в водохранилище. В качестве характеристик режима фитопланктона рассматривались:

- среднее за вегетационный сезон (апрель–ноябрь) значение общей биомассы фитопланктона в водоеме в верхнем слое, мг/л;
- средняя и максимальная концентрации диатомовых и синезеленых водорослей в поверхностном слое верховьев, центрального и нижнего районов водохранилища за период цветения их вод (при среднесуточных значениях в поверхностном слое более 1 мг/л);
- дата начала цветения (количество суток от начала календарного года);
- продолжительность периода цветения воды, сут.

Комплекс абиотических факторов при рассмотрении их роли в формировании условий развития фитопланктона целесообразно разделить на группы по характеру влияния и формам проявления в экосистеме водоема:

Гидрологические факторы

- объем годового притока воды с водосбора, $W_{год}$, млн м³;
- приток воды за весеннее половодье, $W_{пол}$, млн м³;
- приток воды дождевых паводков вегетационного периода, $W_{пав}$, млн м³;
- коэффициент водообмена водохранилища за период весеннего половодья $K_{вн} = (W_{пол} + W_{ст}) / (2W_{сп})$;
- интенсивность весеннего заполнения водохранилища $K_{инт} = \Delta t_{пол} / t_{сп}$; t – число суток;
- средняя скорость продольного переноса водных масс водохранилища в периоды половодья и цветения водорослей $V = L * K_{вн} / t$, км/сут.

Метеорологические факторы

- количество атмосферных осадков за рассматриваемые периоды времени, мм;
- средняя скорость ветра за периоды цветения, м/с;
- количество штилевых дней (со средней скоростью ветра менее 1 м/с);
- среднее значение температуры воздуха, °С.

Гидрофизические факторы

- поступление в водоем солнечной радиации, Вт/м²;

- среднее значение температуры воды поверхностного слоя, °С.

Гидрохимические факторы

- внешняя (поступление с водосбора) биогенная нагрузка (азота и фосфора), мг/л;
- внутренняя (поступление из донных отложений) биогенная нагрузка, мг/л.

Факторы антропогенного регулирования стока

- соотношение объема зимних вод водохранилища с объемом вод половодья (коэффициент обновления водных масс $K_{обм} = W_{зим} / W_{пол}$);
 - коэффициент предвесенней сработки водохранилища $K_{срб} = (W_{нпу} - W_{зим}) / W_{нпу}$;
 - коэффициент наполнения водохранилища в период цветения $K_{нап} = W_{сп} / W_{нпу}$.
- Здесь $W_{ст}$, $W_{сп}$ – объем стока и средний объем водохранилища за рассматриваемый период времени, млн м³; $W_{пол}$, $W_{зим}$, $W_{нпу}$ – объем половодья, объем зимних вод водохранилища и его объем при НПУ, млн м³; $\Delta t_{пол}$, $t_{сп}$ – длительность половодья данного года и средняя многолетняя (50 % обеспеченности) длительность половодья, сут; L – длина водохранилища при НПУ, км.

Результаты расчета коэффициентов корреляции всего комплекса факторов с характеристиками фитопланктона за многолетний период помещены в таблицах 2–5.

Можайское водохранилище расположено в верховьях р. Москвы (55°36' с. ш., 35°49' в. д.) и входит в систему водоснабжения московского мегаполиса [Комплексные исследования..., 1979; Гидроэкологический режим..., 2015]. Это относительно глубоководный морфологически простой водоем долинного типа (объем при НПУ 0,24 км³, площадь 31 км², максимальная глубина 22 м), многолетнего регулирования, имеющий вытянутую в плане акваторию и замедленный водообмен. В модели ГМВ-МГУ пространственная схематизация Можайского водохранилища представлена в виде 19 отсеков (рис. 3), выделенных по его отдельным плесам с учетом их морфометрических и гидродинамических особенностей по методике, предложенной Ю. М. Матарзиным [Матарзин, Мацкевич, 1970]. В данной работе цветение воды в каждом районе водохранилища характеризуется величиной средней биомассы фитопланктона, рассчитанной для наиболее крупных в них плесов: в верховом районе – обширный мелководный Бычковский плес с глубинами $h \leq 6$ м (расчетный отсек № 4), в центральном районе – Красновидовский

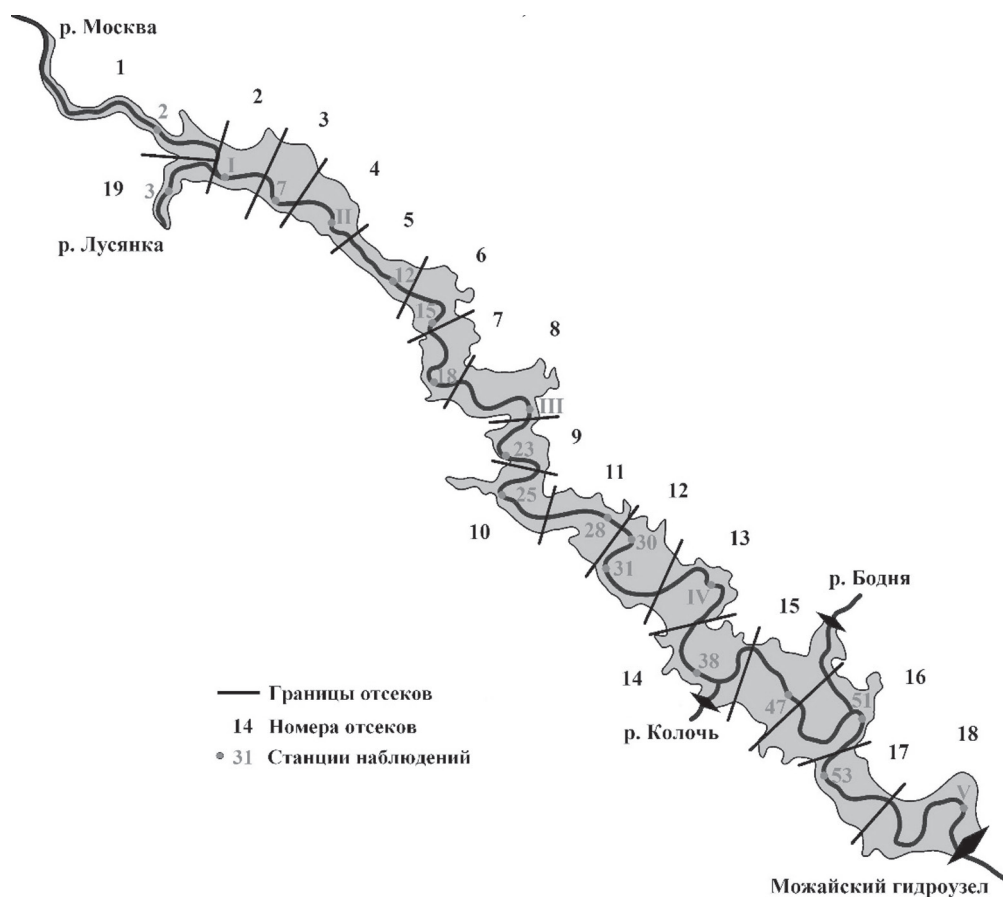


Рис. 3. Схема деления Можайского водохранилища на расчетные отсеки

плес с $h \leq 15$ м (отсек № 13) и в нижнем районе – самый глубоководный Приплотинный плес с $h \leq 22$ м (отсек № 18). При длине рядов расчетных значений $n = 55$ и при 1%-й доверительной вероятности коэффициенты корреляции статистически значимы при величине $R \geq 0,345$, при 5%-й вероятности они значимы при $R \geq 0,266$, а при $0,225 \leq R < 0,266$ статистически значимы лишь как тенденции [Урбах, 1964].

Исключительно высокое многообразие действующих факторов и сложная опосредованность их влияния на развитие растительных клеток фитопланктона обусловили относительно низкие значения большинства рассматриваемых парных линейных связей предикторов и характеристик фитопланктона. Фактически лишь колебание притока биогенных веществ в отдельные годы может в существенной степени контролировать уровень продукционных процессов. Ни один из других факторов-предикторов не может считаться доминирующим при оценке биомассы фитопланктона в водохранилище в отдельные годы. При такой сложной совокупности абиотических воздействий статистическим анализом можно выявить только относительную роль межгодовых колебаний

отдельных факторов в развитии фитопланктона в водохранилище.

Первичная продуктивность экосистемы Можайского водохранилища, оцениваемая по средневегетационной биомассе всего фитопланктона (табл. 2), наиболее тесно связана с притоком биогенных веществ в водохранилище и объемом дождевых паводков (коэффициенты корреляции находятся в пределах 0,5–0,7). На уровне значимой положительной корреляционной связи она связана с температурой воды, осадками, приходящей солнечной радиацией, количеством штилевых дней, коэффициентом соотношения зимних вод и вод половодья, объемом годового стока и интенсивностью весеннего наполнения водохранилища. Отрицательные корреляционные связи для средних за вегетационный период значений биомассы фитопланктона получены со скоростью ветра, притоком биогенов и скоростью продольного перемещения воды по водохранилищу в половодье, с объемом половодья и коэффициентом предвесенней сработки водохранилища. На уровне значимой тенденции (доверительная вероятность $0,5 < p \leq 0,1$) получена связь средней биомассы фитопланктона с притоком биогенов из донных отложений.

Таблица 2. Коэффициенты линейной корреляции средней биомассы всего фитопланктона (ФП), диатомовых и синезеленых водорослей с абиотическими факторами окружающей среды

Вероятные факторы цветения	Весь ФП	Диатомовые водоросли			Синезеленые водоросли		
	Весь водоем	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18
Годовой сток, млн м ³	0,328	0,390	0,213	0,042	0,420	0,320	0,159
Половодье, млн м ³	-0,364	0,246	-0,098	-0,105	-0,235	-0,344	-0,449
Паводки, млн м ³	0,625	-0,102	-0,134	-0,208	0,621	0,642	0,505
Коэффициент водообмена	-0,185	0,342	-0,013	-0,007	-0,124	-0,197	-0,342
Интенсивность заполнения	0,295	0,263	0,326	0,327	0,016	0,190	0,222
Скорость переноса воды в половодье, км/сут	-0,405	0,065	-0,317	-0,336	-0,126	-0,344	-0,497
Скорость переноса воды в период цветения, км/сут	0,216	0,508	0,199	0,036	0,559	0,633	0,498
Осадки, мм	0,437	0,089	0,069	-0,020	0,437	0,432	0,360
Ветер, м/с	-0,449	0,306	-0,115	-0,058	-0,421	-0,225	-0,233
Количество штилевых дней	0,375	-0,054	0,169	-0,033	0,631	0,350	0,315
Радиация, Вт/м ²	0,410	-0,207	-0,208	-0,096	0,055	0,142	0,184
Температура воздуха, °С	0,158	-0,029	-0,132	0,001	0,115	0,002	0,011
Температура воды, °С	0,439	-0,332	-0,177	0,025	0,140	0,028	0,099
Приток Р за половодье, мг/м ² сут	-0,428	0,124	-0,140	-0,170	-0,226	-0,397	-0,525
Приток N за половодье, мг/м ² сут	-0,401	0,157	-0,177	-0,185	-0,219	-0,366	-0,510
Приток Р, мг/м ² сут	0,592	0,374	0,158	-0,028	0,822	0,891	0,878
Приток N, мг/м ² сут	0,613	0,363	0,164	-0,027	0,820	0,907	0,888
Регенерация Р, мг/м ² сут	0,216	-0,170	-0,015	-0,127	0,352	0,154	0,191
Регенерация N, мг/м ² сут	0,239	0,038	0,064	-0,118	0,366	0,153	0,169
$K_{\text{овм}} = W_{\text{зим}} / W_{\text{пол}}$	0,351	-0,036	0,153	0,064	0,167	0,317	0,431
$K_{\text{срб}} = (W_{\text{нпу}} - W_{\text{зим}}) / W_{\text{нпу}}$	-0,333	-0,377	-0,312	-0,097	-0,254	-0,258	-0,297
$K_{\text{нап}} = W_{\text{срл}} / W_{\text{нпу}}$	-0,031	0,173	0,054	-0,044	0,029	-0,038	-0,028

Примечание. Здесь и в таблицах 3–5 жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, значимые на уровне 5 %.

Не обнаружено статистически значимой связи продуктивности водохранилища с наполненностью водохранилища водой во время цветения и средним за вегетационный период значением температуры воздуха.

Наличие значимой корреляционной связи с метеорологическими и гидрофизическими факторами, которые относятся к факторам прямого воздействия на фитопланктон, подтверждает их важное значение в формировании условий развития фитопланктона и изменчивости биомассы водорослей в летний период. В то же время невысокие значения коэффициентов корреляции показывают, что они не играют доминирующей роли в формировании средневегетационной продуктивности экосистемы водохранилища. Это косвенно подтверждается данными наблюдений за развитием фитопланктона в московских водохранилищах и водохранилищах водораздельного бьефа канала им. Москвы, в которых в аномально жаркие годы (1972, 2010) биомасса фитопланктона не достигала экстремальных величин. Модельный анализ влияния жарких периодов летом на развитие фитопланктона, выполненный

нами по сценарным расчетам аномалий жары 2010 года, показал сравнительно небольшое увеличение биомасс фитопланктона (не более 30 %) [Даценко, Пуклаков, 2016].

В целом величина средней за вегетационный сезон биомассы фитопланктона в водохранилище определяется биомассой синезеленых водорослей, с которой она связана с коэффициентом корреляции 0,957, в то время как ее коэффициент корреляции с диатомовыми водорослями равен 0,346.

Развитие синезеленых водорослей, как и фитопланктона в целом, в значительной мере определяется величиной биогенного притока, при этом здесь доминирует летняя биогенная нагрузка и отмечается тесная значимая связь фитопланктона с величиной водного притока в паводки. Действие этого фактора характеризуется пространственной однородностью – высокие коэффициенты корреляции характерны для всех участков водохранилища. Для синезеленых водорослей отмечены значимые связи с такими метеорологическими факторами, как количество штилей и осадки. Количество штилей в летний период связано

Таблица 3. Коэффициенты линейной корреляции длительности цветения фитопланктона (сутки) с абиотическими факторами окружающей среды

Вероятные факторы цветения	Диатомовые водоросли			Синезеленые водоросли		
	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18
Годовой сток, млн м ³	0,033	0,224	0,173	-0,195	-0,024	-0,056
Половодье, млн м ³	-0,094	0,120	0,051	-0,137	-0,390	-0,403
Паводки, млн м ³	0,492	0,172	0,010	-0,216	0,151	0,125
Интенсивность заполнения	0,336	0,109	0,278	0,103	0,309	0,297
Скорость переноса воды в половодье, км/сут	-0,198	0,239	-0,043	-0,336	-0,484	-0,483
Скорость переноса воды в период цветения, км/сут	0,317	0,399	0,191	-0,240	0,204	0,185
Осадки, мм	0,317	0,163	0,109	-0,104	0,139	0,137
Ветер, м/с	-0,030	0,325	0,241	-0,281	-0,572	-0,600
Количество штилевых дней	0,089	0,471	0,406	0,397	0,572	0,553
Радиация, Вт/м ²	-0,191	-0,235	-0,237	0,215	0,381	0,421
Температура воздуха, °С	-0,363	-0,229	-0,269	0,413	0,526	0,557
Температура воды, °С	0,050	0,141	-0,063	0,105	0,484	0,582
Приток Р за половодье, мг/м ² сут	-0,158	0,134	0,039	-0,217	-0,458	-0,473
Приток N за половодье, мг/м ² сут	-0,135	0,209	0,030	-0,263	-0,444	-0,455
Приток Р, мг/м ² сут	0,197	0,632	0,377	0,446	0,747	0,708
Приток N, мг/м ² сут	0,192	0,631	0,377	0,421	0,707	0,665
Регенерация Р, мг/м ² сут	0,073	0,426	0,179	0,402	0,599	0,616
Регенерация N, мг/м ² сут	-0,025	0,544	0,255	0,424	0,583	0,597
$K_{\text{овм}} = W_{\text{зим}} / W_{\text{пол}}$	0,037	-0,195	-0,149	0,328	0,442	0,459
$K_{\text{срб}} = (W_{\text{нпу}} - W_{\text{зим}}) / W_{\text{нпу}}$	0,083	0,274	0,185	-0,412	-0,423	-0,404
$K_{\text{нап}} = W_{\text{срл}} / W_{\text{нпу}}$	-0,421	-0,334	-0,215	0,353	-0,071	-0,110

с преобладанием антициклональной погоды, при которой усиливается внутрисуточная конвекция и возрастает вероятность вспышек развития этой группы водорослей. Эта связь наиболее ярко выражена в верхнем мелководном участке водохранилища, богатый биогенами гиполимнион которого более доступен воздействию внутрисуточной конвекции, чем гиполимнион остальной глубоководной части водоема. Летние осадки влияют на фитопланктон косвенно, поскольку определяют повышенный приток паводковых вод, роль которых уже отмечалась. Внутренняя нагрузка в результате диффузии биогенов из донных отложений значима только в верхней части водохранилища. Вероятно, это связано с более частыми перемешиваниями насыщенных биогенами придонных слоев в мелководной части водохранилища.

Для биомассы синезеленых водорослей не обнаружено значимой корреляционной связи с температурой воды и приходящей солнечной радиацией. Однако температура воды и температура воздуха могут быть хорошими предикторами продолжительности цветения водоема (табл. 3). Для большинства участков водохранилища отмечена положительная значимая связь температуры воды с длительностью сохранения

средней биомассы в поверхностном слое выше 1 мг/л. На продолжительность цветения по всему водоему оказывает существенное влияние и интенсивность внутренней биогенной нагрузки. Коэффициент предвесенней сработки водохранилища, на первый взгляд, не имеющий отношения к позднелетнему цветению синезеленых, значимо проявляет обратное влияние на эту группу водорослей. Этот коэффициент характеризует долю богатых биогенами зимних вод, остающихся в водохранилище к концу его заполнения, поэтому может косвенно влиять на формирование запаса биогенных веществ в водохранилище в вегетационный период.

Максимальные значения цветения синезеленых водорослей (табл. 4) лучше всего коррелируют с объемом паводков, поступлением с водосбора биогенных веществ за вегетационный сезон и количеством штилевых дней в период цветения водорослей. Высокие значения коэффициентов корреляции с другими факторами, такими как скорость продольного перемещения воды в водохранилище, количество атмосферных осадков, объясняется их непосредственной связью с поступлением в водоем паводковых вод.

Начало цветения синезеленых водорослей в водоеме тесным образом связано со средней

Таблица 4. Коэффициенты линейной корреляции максимальных значений биомассы фитопланктона (мг/л) с абиотическими факторами окружающей среды

Вероятные факторы цветения	Диатомовые водоросли			Синезеленые водоросли		
	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18
Годовой сток, млн м ³	0,210	0,255	0,123	0,332	0,354	0,230
Половодье, млн м ³	0,265	-0,149	0,060	-0,165	-0,251	-0,346
Паводки, млн м ³	0,022	0,238	-0,078	0,432	0,634	0,540
Интенсивность заполнения	0,240	0,153	0,299	0,001	0,155	0,204
Скорость переноса воды в половодье, км/сут	0,023	-0,124	-0,211	-0,096	-0,299	-0,461
Скорость переноса воды в период цветения, км/сут	0,321	0,345	-0,035	0,403	0,621	0,527
Осадки, мм	0,035	0,178	-0,025	0,248	0,470	0,453
Ветер, м/с	0,180	-0,336	-0,210	-0,406	-0,223	-0,177
Количество штилевых дней	-0,007	0,519	0,270	0,662	0,387	0,281
Радиация, Вт/м ²	-0,092	-0,017	-0,144	0,040	0,076	0,087
Температура воздуха, °С	-0,151	-0,227	-0,140	0,132	0,039	0,012
Температура воды, °С	-0,310	0,160	0,142	0,094	0,001	0,048
Приток Р за половодье, мг/м ² сут	0,159	-0,103	0,064	-0,183	-0,310	-0,437
Приток N за половодье, мг/м ² сут	0,187	-0,098	0,003	-0,185	-0,305	-0,445
Приток Р, мг/м ² сут	0,215	0,442	-0,034	0,716	0,882	0,836
Приток N, мг/м ² сут	0,202	0,450	-0,034	0,709	0,896	0,848
Регенерация Р, мг/м ² сут	-0,298	0,386	-0,014	0,357	0,164	0,145
Регенерация N, мг/м ² сут	-0,035	0,434	-0,047	0,374	0,159	0,122
$K_{овм} = W_{зим} / W_{пол}$	-0,024	-0,056	-0,117	0,141	0,236	0,357
$K_{срб} = (W_{нпу} - W_{зим}) / W_{нпу}$	-0,298	0,075	-0,006	-0,300	-0,261	-0,326
$K_{нап} = W_{срп} / W_{нпу}$	0,171	-0,293	0,031	0,022	0,075	0,126

Таблица 5. Коэффициенты линейной корреляции даты начала цветения фитопланктона (сут от начала календарного года) с абиотическими факторами окружающей среды

Вероятные факторы цветения	Диатомовые водоросли			Синезеленые водоросли		
	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18	Отсек 4	Отсек 13	Отсек 18
Половодье, млн м ³	0,142	0,099	0,047	0,133	0,292	0,278
Интенсивность заполнения	-0,351	-0,389	-0,391	-0,222	-0,247	-0,217
Скорость переноса воды в половодье, км/сут	0,330	0,265	0,222	0,342	0,390	0,362
Температура воздуха в мае, °С	-0,021	-0,004	0,016	-0,414	-0,480	-0,568
Приток Р за половодье, мг/м ² сут	0,160	0,103	0,049	0,186	0,344	0,337
Приток N за половодье, мг/м ² сут	0,172	0,102	0,050	0,225	0,332	0,324
$K_{овм} = W_{зим} / W_{пол}$	-0,398	-0,302	-0,270	-0,381	-0,447	-0,463
$K_{срб} = (W_{нпу} - W_{зим}) / W_{нпу}$	0,522	0,443	0,438	0,463	0,427	0,414

температурой воздуха в мае (табл. 5): чем она выше, тем раньше следует ожидать начала цветения водорослей. Более раннему началу цветения синезеленых способствует также и более высокое значение соотношения объемов зимних вод водохранилища и водных масс поступившего половодья. Кроме этого, начало цветения синезеленых водорослей имеет значимую положительную корреляционную связь с коэффициентом предвесенней сработки водохранилища, скоростью продвижения весенних вод в водоеме и притоком биогенов.

Наименее предсказуемой по результатам статистического анализа следует считать

группу диатомовых водорослей. Для этой группы отмечено наименьшее количество значимых связей с факторами окружающей среды. Для диатомовых водорослей характерна большая пространственная неоднородность по акватории водоема в проявлении многочисленных косвенных абиотических воздействий. Значение средней биомассы цветения этой группы водорослей по всему водоему положительно коррелирует на значимом уровне только с интенсивностью весеннего половодья: чем медленнее происходит наполнение водохранилища, тем вероятнее более высокое значение средней биомассы цветения диатомовых

водорослей. Связано это, вероятно, с тем, что при слабом развитии весенних процессов на водосборе большая часть весенних вод поступает в водоем в виде более богатого биогенами почвенного, а не склонового стока, характерного для бурной весны. Кроме того, при длительной холодной весне в водоеме дольше поддерживаются благоприятные для холодолюбивых диатомовых водорослей температурные условия. Поступление биогенных элементов (и внешней и внутренней нагрузки) значимо коррелирует только с длительностью цветения и максимальными значениями биомасс диатомовых водорослей, причем только в средней части водохранилища. Следует заметить, что модельное воспроизведение режима биомассы диатомовых водорослей, в отличие от синезеленых, характеризуется острыми короткими пиками. При таком развитии цветения максимальные биомассы диатомовых водорослей в отдельные периоды могут быть более чувствительными к рассматриваемым предикторам, чем их средние значения в поверхностном слое. Выбранные нами показатели режима заполнения водохранилища в период половодья заметно влияют на развитие диатомовых водорослей только в верхнем участке водохранилища, где при высоком значении коэффициента водообмена влияние притока наиболее ощутимо. В центральном и нижнем районах водохранилища особенности пропуска половодья Можайским гидроузлом уже затушевываются погодными условиями. Слабо связана с абиотическими факторами и продолжительность развития диатомовых водорослей, что еще раз подтверждает крайнюю непредсказуемость цветения воды этой группой фитопланктона.

Заключение

Модельные расчеты многолетних колебаний интенсивности развития фитопланктона в вегетационный период предоставляют возможность многопланового корреляционного анализа факторов продуктивности водохранилища. В результате статистического анализа корреляционных связей характеристик цветения основных видов фитопланктона и комплекса выделенных абиотических факторов, включающего характеристики гидрологического режима водохранилища, гидрометеорологических условий в период вегетационного сезона, величину биогенной нагрузки на водоем, сделан ряд выводов относительно средней за вегетационный сезон продуктивности Можайского водохранилища:

- В водохранилище выявлен устойчивый тренд увеличения средней за вегетационный сезон биомассы фитопланктона.
- При большом объеме весеннего половодья следует ожидать снижения средней продуктивности водохранилища при условии отсутствия или незначительности летне-осенних дождевых паводков. При большом объеме летних паводков первичная продуктивность водоема резко возрастает. Таким образом, именно паводочный сток, формирующий внешнюю биогенную нагрузку на водоем в вегетационный сезон, определяет уровень развития фитопланктона водохранилища.
- Чем больше объем оставшихся в период заполнения водохранилища зимних вод по сравнению с объемом половодья, тем больше будет средняя продуктивность водохранилища.
- Величина предвесенней сработки водохранилища способствует понижению продуктивности водохранилища в вегетационный период.
- Температура воды и температура воздуха оказывают существенное влияние на продолжительность цветения водоема. Начало цветения синезеленых водорослей в водоеме тесно связано со средней температурой воздуха в мае.
- Наименее предсказуемо весеннее цветение воды в водоеме диатомовыми водорослями, которое наиболее слабо связано с основными абиотическими факторами.

Авторы выражают признательность сотрудникам Мосводоканала В. О. Полянину и Г. Т. Замане за предоставленную информацию по режиму работы Можайского гидроузла и качеству воды Приплотинного плеса Можайского водохранилища, а также всем коллегам, участвовавшим в сборе информации по гидрологическому режиму Можайского водохранилища.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-05-06108).

Литература

- Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / Ред. К. К. Эдельштейн. М.: Перо, 2015. 286 с.*
- Даценко Ю. С., Пуклаков В. В. Температурный фактор интенсивности продукционных процессов в водохранилищах // Ледовые и термические процессы на водных объектах России: Материалы V Всерос. конф. (Владимир, 11–14 октября 2016 г.). Владимир, 2016. С. 119–125.*

Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 3. Можайское водохранилище / Ред. В. Д. Быков, К. К. Эдельштейн. М.: Изд-во МГУ, 1979. 467 с.

Левшина Н. А. Структурные особенности фитопланктона Можайского водохранилища // *Комплексные исследования водохранилищ.* Вып. 5 / Ред. В. Д. Быков, И. М. Кисин, К. К. Эдельштейн. М.: Изд-во МГУ, 1980. С. 149–154.

Матарзин Ю. М., Мацкевич И. К. Вопросы морфометрии и районирования водохранилищ // Вопросы формирования водохранилищ и их влияния на природу и хозяйство. Вып. 1. Пермь, 1970. С. 27–45.

Пуклаков В. В., Замана Г. Т. Оценка оправдаемости модельного прогноза характеристик качества воды в Можайском водохранилище

в условиях аномальной жары // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Тр. V Междунар. науч.-практ. конф. (29–31 мая 2015 г., Пермь), т. 2. Пермь, 2015. С. 144–149.

Урбах В. Ю. Биометрические методы. М.: Наука, 1964. 415 с.

Chapra S. C., Reckhow K. H. Engineering Approaches for Lake Management. Vol. 1, 2. Boston: Butterworths, 1983. 492 p.

Thornton K. W., Lessem A. S. A Temperature Algorithm for Modifying Biological Rates // Transactions of the American Fisheries Society. 1978. Vol. 107, no. 2. P. 284–287.

Поступила в редакцию 13.03.2017

References

Gydroecologicheskii regim vodokhranilishch Podmoskov'ya (nablyudeniya, diagnoz, prognoz) [Hydroecological regime of the reservoirs in Moscow Oblast (observations, diagnosis, forecasts)]. Ed. K. K. Edelstein. Moscow: Pero, 2015. 286 p.

Datsenko Yu. S., Puklakov V. V. Temperaturnyi faktor intensivnosti produktsyonnykh protsessov v vodokhranilishchakh [The temperature factor of production processes intensity in reservoirs]. Ledovye i termicheskie protsessy na vodnykh ob'ektakh Rossii. Materialy V vseross. konf. (Vladimir, 11–14 oktyabrya 2016 g.) [Ice and Thermal Processes in Water Bodies in Russia: Proceed. of the V All-Russ. Conf. (Vladimir, October 11–14, 2016)]. Vladimir, 2016. P. 119–125.

Kompleksnye issledovaniya vodokhranilishch. Vyp. 3. Mozhaiskoe vodokhranilishche [Integrated research of reservoirs. Iss. 3. The Mozhaisk reservoir]. Eds. V. D. Bykov, K. K. Edelstein. Moscow: MSU, 1979. 467 p.

Levshina N. A. Strukturnye osobennosti fitoplanktona Mozhaiskogo vodokhranilishcha [Structural features of phytoplankton in the Mozhaisk reservoir]. Kompleksnye issledovaniya vodokhranilishch. Vyp. 5 [Integrated Research of Reservoirs. Iss. 5]. Eds. V. D. Bykov, I. M. Kisin, K. K. Edel'shtein. Moscow: Izd-vo MGU, 1980. P. 149–154.

Matarzin Yu. M., Matskevich I. K. Voprosy morfometrii i raionirovaniya vodokhranilishch [Issues of morphometry and zonation of reservoirs]. Voprosy

formirovaniya vodokhranilishch i ikh vliyania na prirodu i khozyaistvo [Issues of Reservoirs Formation and their Impact on Nature and Economy]. Vol. 1. Perm', 1970. P. 27–45.

Puklakov V. V., Zamana G. T. Otsenka opravdyvaemosti model'nogo prognoza kharakteristik kachestva vody v Mozhaiskom vodokhranilishche v usloviyakh anomal'noi zhary [Assessment of model forecast accuracy of water quality characteristics in the Mozhaisk reservoir under anomalous heat conditions]. Sovremennye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov. Trudy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakt. konf. (Perm', 29–31 maya 2015 g.) [Modern Problems of Reservoirs and their Catchments. Proceed. of the V Int. Sci. and Pract. Conf. (Perm, May 29–31, 2015)]. Perm', 2015. P. 144–149.

Urbakh V. Yu. Biometricheskie metody [Biometric methods]. Moscow: Nauka, 1964. 415 p.

Chapra S. C., Reckhow K. H. Engineering Approaches for Lake Management. Vol. 1, 2. Boston: Butterworths, 1983. 492 p.

Thornton K. W., Lessem A. S. A Temperature Algorithm for Modifying Biological Rates. *Transactions of the American Fisheries Society.* 1978. Vol. 107, no. 2. P. 284–287.

Received March 13, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Даценко Юрий Сергеевич

доцент, д. г. н.
Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: yuri0548@mail.ru
тел.: (495) 9395470

CONTRIBUTORS:

Datsenko, Yuri

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: yuri0548@mail.ru
tel.: (495) 9395470

Пуклаков Валерий Владимирович

старший научный сотрудник, к. г. н.
Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: puklakov@mail.ru
тел.: (495) 9395470

Эдельштейн Константин Константинович

профессор, д. г. н.
Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: emek05@mail.ru
тел.: (495) 9395470

Puklakov, Valery

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: puklakov@mail.ru
tel.: (495) 9395470

Edelstein, Konstantin

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: emek05@mail.ru
tel.: (495) 9395470