

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА БИОМАССЫ ФИТОПЛАНКТОНА В КУЙБЫШЕВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

© 2018 г. А.В. Рахуба

ФГБУН «Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук», г. Тольятти, Россия

Ключевые слова: математическая модель, верификация модели, экосистема, фитопланктон, эвтрофирование, абиотические факторы, биогенные элементы, хлорофилл «а», «цветение» воды, качество воды, прогноз биомассы водорослей, Куйбышевское водохранилище.



А.В. Рахуба

Исходя из известных представлений о развитии планктонных популяций, разработана одномерная численная модель временной изменчивости вертикального распределения биомассы фитопланктона в приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища. В основу модели заложены физические процессы, в которых удельный темп роста фитопланктона лимитируется параметрами содержания в воде минерального фосфора, температуры воды, освещенности, гидродинамики, отмирания и потребления водорослей зоопланктоном. В ходе натуральных гидрохимических и гидробиологических наблюдений, проведенных в весенне-летний период 2012 г., получена исходная информация, проведена адаптация и оценка адекватности модели конкретным условиям Куйбышевского водохранилища. При анализе данных натуральных наблюдений и вычислительных экспериментов выявлен механизм квазипериодических всплесков биомассы фитопланктона в результате сезонных изменений факторов среды.

В работе представлен модельный расчет развития фитопланктона в Куйбышевском водохранилище в условиях двукратного снижения сброса фосфора в Волжском бассейне. Расчет такого сценария показывает, что ожидаемая реакция фитопланктона будет достаточно чувствительной, приведет к снижению его биомассы и улучшению трофического состояния водохранилищ Волги. Проверка результатов моделирования показала удовлетворительную сходимость с данными натуральных наблюдений, что позволяет использовать разработанную модель в диагностических и прогностических целях.

Во многих пресноводных водоемах мира антропогенное эвтрофирование становится одной из наиболее актуальных проблем охраны водных ресурсов. Усиленный рост первичной продуктивности водоемов в результате обогащения их биогенными элементами, главным образом фосфором, сопровождается ухудшением качества воды, увеличением содержания органических и токсических веществ. Особенно остро проблема «цветения» воды стоит на всех водохранилищах Волжского каскада, а режим регулирования стока становится дополнительным антропогенным фактором, влияющим на процесс первичного продуцирования. В результате зарегулирования стока рек, приближенные к плотине районы водохранилищ превращены в большие озеровидные расширения с замедленными скоростями течения, снижена турбулентность водной толщи, что создает благоприятные условия для прогрева верхнего слоя водной поверхности и, как следствие, интенсивного роста токсичной биомассы синезеленых водорослей.

Необходимость решения проблемы массового «цветения» воды в водоемах стимулирует исследователей использовать методы математического моделирования. Модельные эксперименты дают возможность не только лучше понять функционирование экосистемы в целом, но и прогнозировать аномальное развитие фитопланктона. Даже в краткосрочной перспективе (несколько дней) прогноз биомассы синезеленых водорослей позволяет оптимизировать работу систем водоочистки и улучшить качество питьевой воды.

В настоящее время моделированию развития фитопланктона в пресноводных экосистемах посвящено большое количество работ [1–17]. Единственный содержательный критерий для классификации моделей вытекает из степени детализации физического описания водного объекта [16]. Все множество построенных динамических моделей условно можно разделить на модели с сосредоточенными параметрами (обыкновенные дифференциальные уравнения) и модели с распределенными параметрами (уравнения в частных производных) [18]. При этом принципиально важным моментом в моделировании природных экосистем является соответствие уровня сложности разработанных моделей и имеющейся в наличии достоверной исходной информации.

В данной работе показана одномерная (по вертикали) численная модель весенне-летней динамики фитопланктона приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища. Биомасса фитопланктона в модели представлена концентрацией хлорофилла «а», имеющей с ней хорошую корреляционную связь ($r = 0,88$) [19]. Верификация модели и модельные расчеты осуществлялись на основе данных натуральных наблюдений, полученных в районе левобережной части (г. Тольятти) приплотинной акватории Куйбышевского водохранилища в вегетационный период 2012 г.

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ФИТОПЛАНКТОНА В РАЙОНЕ ПРИПЛОТИННОГО ПЛЕСА КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Куйбышевское водохранилище образовано в 1955 г. и является самым крупным в Волжском каскаде. Оно принимает воды двух крупных рек – Волги и Камы, осуществляет сезонное регулирование речного стока и относится к мезотрофно-эвтрофным водоемам долинного типа. В 2012 г. в приплотинном плесе водохранилища проведен комплекс гидробиологических и гидрохимических наблюдений для оценки сезонной динамики роста биомассы фитопланктона. Наблюдения проводили на рейдовой вертикали с 22 мая по 16 августа на пяти горизонтах с периодичностью отбора проб воды, составляющей 7 сут (рис. 1). Результаты наблюдений за вертикальным распределением гидрохимических показателей в водной толще водохранилища представлены на рис. 2 и 3.



Рис. 1. Картограмма приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища с географическими координатами местоположения рейдовой вертикали наблюдений.

Как показывают наблюдения, сезонный ход температуры воды (T), содержание минерального фосфора и ветровые течения в водохранилище являются основными факторами, обуславливающими многопиковую динамику развития фитопланктона. В вегетационный сезон 2012 г. в приплотинном плесе водохранилища

тинном плесе Куйбышевского водохранилища наблюдалось четыре пика «цветения». Из-за теплой погоды весной первый пик был образован диатомовыми водорослями и пришелся на последнюю декаду мая. Максимальное значение хлорофилла «а» было отмечено в пятиметровом слое воды и составило 58,7 мкг/л (рис. 2а). Содержание общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) и минерального фосфора ($P_{\text{мин}}$) снизилось до 30–36 мкг/л и 5–25 мкг/л соответственно (рис. 2в и рис. 2г). Верхний слой воды прогрелся до 19,5 °С, придонный слой – до 10,7 °С (рис. 2б).

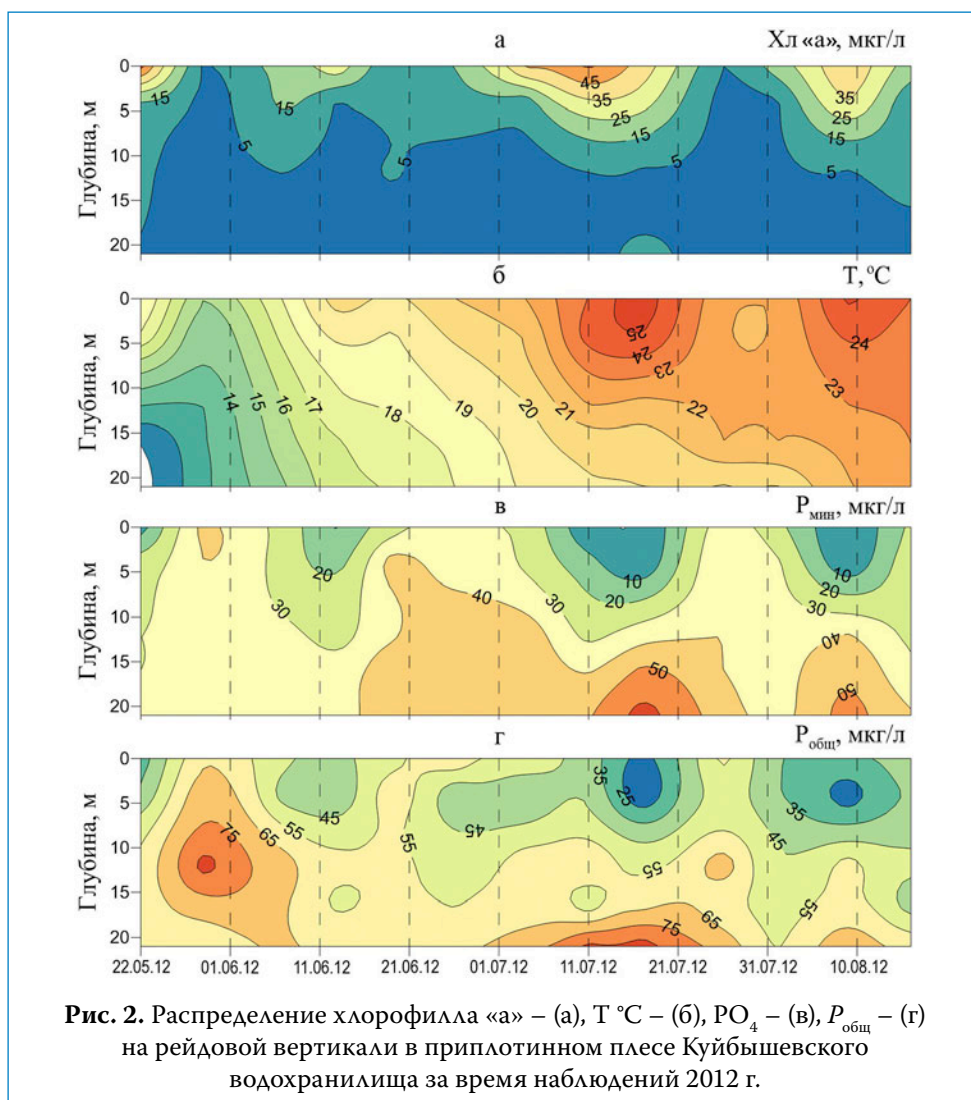


Рис. 2. Распределение хлорофилла «а» – (а), T °С – (б), PO_4 – (в), $P_{\text{общ}}$ – (г) на рейдовой вертикали в приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища за время наблюдений 2012 г.

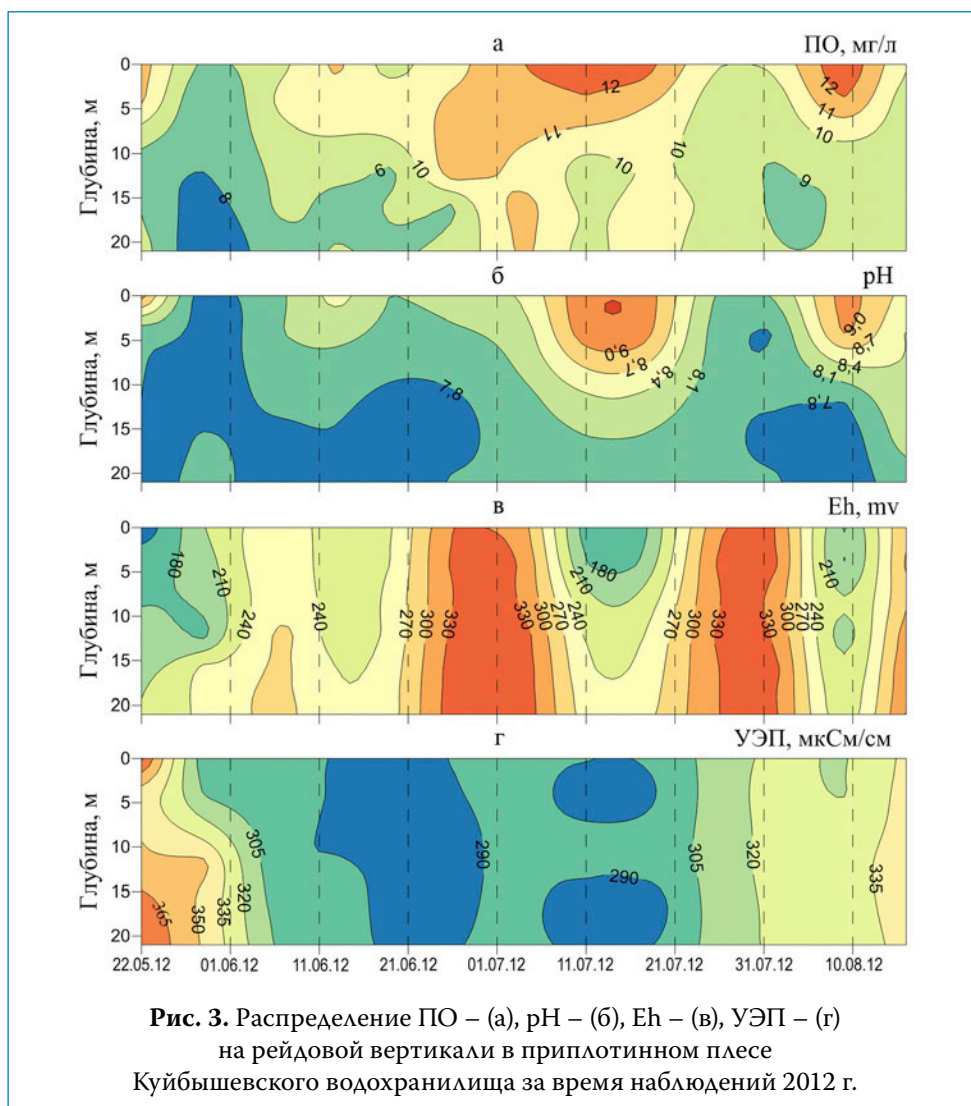
Второй всплеск развития фитопланктона пришелся на первую половину июня. Он был сформирован ростом преимущественно диатомовых и появляющихся синезеленых водорослей. Пиковая величина хлорофилла «а» составила 32,2 мкг/л, температура воды на поверхности и дне – 20,5 °С и 16,7 °С, содержание $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{мин}}$ 36–42 мкг/л и 9–17 мкг/л (рис. 2).

К середине июля вода на поверхности прогрелась до 25,6 °С, на дне – до 20,0 °С, что спровоцировало продолжительный рост синезеленых водорослей. Максимальное значение хлорофилла «а» на третьем пике «цветения» составило 56,8 мкг/л, содержание $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{мин}}$ снизилось до минимальных значений 15–22 мкг/л и 0–14 мкг/л (рис. 2).

Последний пик «цветения» фитопланктона пришелся на начало августа. На этот момент водная толща максимально прогрелась на поверхности до 25,2 °С, на дне – до 21,9 °С. Концентрация хлорофилла «а» достигла значения 43,7 мкг/л, содержание $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{мин}}$ 18–35 мкг/л и 0–5 мкг/л (рис. 2).

По мере прохождения волны весеннего половодья электропроводность воды (УЭП) к началу июля снизилась с 365 до 290 мкСм/см и держалась на этом уровне в течение месяца до конца июля, а затем стала повышаться. Каждая фаза роста фитопланктона сопровождалась повышением содержания органического вещества по показателю перманганатной окисляемости (ПО) до 11,2–12,8 мгО₂/л, увеличением рН до 8,52–9,23 и снижением окислительно-восстановительного потенциала (Еh) до 127–165 mV (рис. 3). Следует отметить, что в июле и августе заметно активизировались внутриводоемные процессы и, в результате, в периоды вспышек роста фитопланктона наблюдалось неоднородное распределение форм фосфора по глубине – значительное снижение в фотической зоне и увеличение в придонных слоях.

В течение всего вегетационного периода стояла теплая и практически безветренная погода. Максимальная температура воды наблюдалась в июле и августе (25,6 °С). Значения ветрового и стокового течения по наблюдениям на рейдовой вертикали изменялись в пределах 0,06–0,30 м/с на поверхности и 0,007–0,06 м/с на дне, значение скорости вертикального перемешивания – в пределах 0,001–0,02 м/с. Очевидно, что при сложившихся благоприятных гидрометеорологических условиях в весенне-летний период 2012 г. уровень продуктивности фитопланктона лимитировался, прежде всего, концентрацией в воде $P_{\text{мин}}$, дефицит которого наблюдался лишь в верхних слоях водохранилища. При этом, наряду с колебаниями $P_{\text{мин}}$, вариации температуры воды, освещенности и гидродинамики также влияли на формирование периодических вспышек роста фитопланктона.



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ФИТОПЛАНКТОНА

Для определения вклада каждого из совокупности факторов, обуславливающих сезонную динамику биомассы фитопланктона, будем использовать диагностические расчеты на адаптированной к реальным условиям одномерной по глубине численной модели, имеющей следующий вид:

$$\frac{\partial B}{\partial t} + (w \pm v) \frac{\partial B}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial B}{\partial z} + B\mu, \quad (1)$$

$$K_z \frac{\partial B}{\partial z} = -w'B', \quad (2)$$

$$\mu = \mu_{max} \left[\left(\frac{I_z}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I_z}{I_{opt}}\right) \right) \cdot \frac{P_z}{P_z + P_{II}} \cdot \exp(-a_p(T_z - T_{opt})^2) \right] - \phi - k_b, \quad (3)$$

$$I_z = I_o \exp(-\alpha \cdot z), \quad (4)$$

$$\phi = \phi_m \cdot \exp(a_c(T_z - T_{opt})), \quad (5)$$

$$k_b = \frac{Q}{V}, \quad (6)$$

где B – концентрация хлорофилла «а» (биомасса фитопланктона), мкг/л;

t – координата по времени, сут;

μ – удельная скорость роста фитопланктона, сут⁻¹;

μ_{max} – максимальная удельная скорость роста фитопланктона, сут⁻¹;

w – вертикальная составляющая скорости потока, м/с;

v – скорость опускания (поднятия) клеток фитопланктона, м/с;

K_z – коэффициент турбулентной вязкости воды, м²/с;

$w'B'$ – пульсационный турбулентный поток фитопланктона, г/(с·м²);

I_o – средний за день световой поток на поверхности воды, Вт/м²;

I_{opt} – оптимальная для фотосинтеза освещенность, Вт/м²;

I_z – освещенность на глубине z , Вт/м²;

α – коэффициент ослабления освещенности с глубиной, м⁻¹;

P_z – концентрация фосфатов в воде, мг/л;

P_{II} – константа полунасыщения для фосфатов, мг/л;

T_z – температура воды на глубине z , °С;

T_{opt} – оптимальная для роста водорослей температура, °С;

a_c, a_p – эмпирические коэффициенты;

ϕ – убыль клеток фитопланктона, сут⁻¹;

ϕ_m – удельная скорость выедания и смертности фитопланктона, сут⁻¹;

k_b – коэффициент выноса фитопланктона за пределы водоема в результате водообмена, сут⁻¹;

Q – расход воды в замыкающем створе (на ГЭС), м³/сут;

V – объем водохранилища, м³.

В представленной модели сезонный ход динамики биомассы фитопланктона рассчитывается с использованием зависимости удельной скорости роста μ (3) [1, 2, 4, 8] от условий освещенности I , температуры воды T , концентрации биогенных элементов P , а также убыли фитопланктона в результате выноса за пределы водоема k_b , естественного отмирания и выедания зоопланктоном ϕ . В зависимостях подобного рода одним из известных способов

учета влияния концентрации минеральных веществ на скорость фотосинтеза является концепция лимитирующего компонента (принцип «минимума Либиха»), которая описывается известной формулой Михаэлиса-Ментен [2, 8, 10]. С учетом данных натурных наблюдений, полученных на Куйбышевском водохранилище, для модельных расчетов в качестве лимитирующего вещества использовалась концентрация в воде минерального фосфора. Температурная зависимость скорости роста и выедания фитопланктона зоопланктоном определялась согласно формулам, приведенным в [7].

Модельное дифференциальное уравнение (1) решалось способом конечно-разностной аппроксимации по неявной численной схеме [6] с временным шагом $\Delta t = 1$ сут и шагом по глубине $\Delta z = 1$ м. Ось z направлена вертикально вниз с началом координат на поверхности воды. Изменения условий среды в выражениях (3) и (5) задавались вертикальными распределениями температуры воды T_z (рис. 2б), минерального фосфора P_z (рис. 2в) и солнечной радиации I_z . Уменьшение солнечной радиации I_z с глубиной рассчитывалось по формуле (4) [3, 7], где I_0 задавалось, исходя из ежедневных наблюдений. Вертикальная компонента скорости w задавалась в пределах 0,01–0,04 м/с в зависимости от ветровых условий. В результате адаптации модели к реальным условиям приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища были определены оптимальные параметры модели (табл. 1).

Таблица 1. Параметры модели

Обозначения	Единица измерения	Значение
α	м ⁻¹	0,001
I_{opt}	Вт/м ²	600
K_z	м ² /с	0,05
μ_{max}	сут ⁻¹	0,66
P_{fl}	мг/л	0,02
T_{opt}	°С	21,1
a_p	–	0,06
a_c	–	0,001
ϕ_m	сут ⁻¹	0,2
v	м/с	0,001–0,02
k_b	сут ⁻¹	0,003–0,014

Модельный анализ изменчивости скорости роста водорослей в водохранилище показывает, что темп прироста биомассы фитопланктона определяется температурными колебаниями в фотической зоне, которые связаны

со сменой погодных условий. Вместе с этим, сезонные вспышки «цветения» воды регулируются уменьшением и последующим восстановлением концентрации в воде $P_{\text{мин}}$ вследствие жизнедеятельности фитопланктона. При благоприятных условиях рост биомассы водорослей сопровождается снижением концентрации $P_{\text{мин}}$ в верхних слоях воды практически до нуля. Это, в свою очередь, вызывает его острую нехватку для дальнейшего роста фитопланктона и приводит к последующему спаду его численности. Далее в результате горизонтальной и вертикальной конвекции предшествующий уровень концентрации $P_{\text{мин}}$ в водной толще восстанавливается и начинается следующий пик развития фитопланктона (рис. 2а и 2в).

С другой стороны, интенсивность роста фитопланктона также зависит от режима регулирования стока на ГЭС, которое в модели задается соотношением (6). Так, в периоды малой сработки водохранилища происходит снижение скоростей течений и замедление водообмена, что создает благоприятные условия для развития, в основном, синезеленых водорослей. В выходные дни расходы воды через гидроузлы могут снижаться до уровня санитарных пусковок, в результате чего водохранилища на время превращаются в озера с практически стоячей водой. В этих условиях при ясной погоде и отсутствии ветра в течение 2–3 дней скорость роста фитопланктона резко возрастает.

Результаты имитационного моделирования роста биомассы фитопланктона в приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища представлены на рис. 4. Адекватность разработанной модели оценивалась критерием Тейла (T) [20, 21]:

$$T = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{\text{наб}} - X_{\text{расч}})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_{\text{наб}}^2 + \sum_{i=1}^n X_{\text{расч}}^2}}, \quad (7)$$

где $X_{\text{наб}}$ – наблюдаемые и $X_{\text{расч}}$ – расчетные значения хлорофилла «а».

Значение критерия Тейла (7) изменяется от 0 до 1. При полном совпадении расчетных и измеренных значений $T=0$. Модельные расчеты считаются удовлетворительными, если $T < 0,4$. Оценка модели по данному критерию показывает, что для верхнего полуметрового слоя $T=0,27$, для вертикального распределения – $T=0,32$. Модель удовлетворительно воспроизводит многопиковую динамику развития фитопланктона в течение вегетационного сезона. Исключение составляет второй пик «цветения» – период смены холодолюбивых диатомовых водорослей на теплолюбивые синезеленые водоросли.

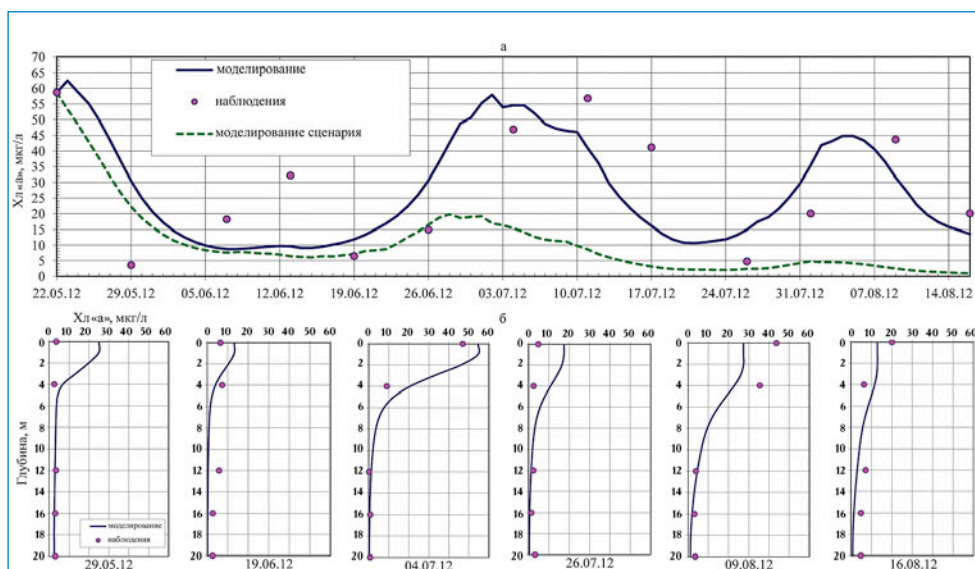


Рис. 4. Сезонная динамика в верхнем полуметровом слое (а) и вертикальное распределение хлорофилла «а» (б) в приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища в 2012 г.: точки – данные наблюдений; линия – рассчитанные значения; пунктирная линия – моделирование сценария развития фитопланктона в условиях 50 % снижения сброса фосфора в Волжский бассейн.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ФИТОПЛАНКТОНА НА СНИЖЕНИЕ ФОСФОРНОЙ НАГРУЗКИ

Ежемесячные данные многолетних гидрохимических наблюдений, полученные в лаборатории мониторинга водных объектов Института экологии Волжского бассейна Российской академии наук, показывают, что среднегодовая концентрация $P_{\text{мин}}$ составляет 0,07 мг/л [22]. По нашим оценкам и данным 2-ТП (водхоз), фосфорная нагрузка на Волгу не превышает 9863 тР/год, а доля фосфора от антропогенных источников в Волжском стоке составляет 55 %. При возможном благоприятном сценарии снижения сброса фосфора хотя бы на 50 % (4932 тР/год) концентрация $P_{\text{мин}}$ в Волге снизится на 27 % с 0,07 до 0,05 мг/л. Модельный расчет такого сценария показывает, что реакция фитопланктона Куйбышевского водохранилища на изменение фосфорной нагрузки будет достаточно чувствительной и приведет к сглаживанию пиков «цветения» воды и трехкратному снижению биомассы фитопланктона в летний период (рис. 4).

ВЫВОДЫ

Анализ данных натурных наблюдений и модельных расчетов позволил выявить некоторые особенности сезонного развития фитопланктона исследуемого района Куйбышевского водохранилища. Установлено, что появление вспышек «цветения» воды, прежде всего, связано с прогревом воды, ветровым перемешиванием и колебаниями концентрации $P_{\text{мин}}$ в результате роста и отмирания фитопланктона. Увеличение биомассы фитопланктона сопровождается снижением концентрации $P_{\text{мин}}$ в фотическом слое, что, в свою очередь, вызывает его дефицит для дальнейшего развития фитопланктона и приводит к последующему спаду его численности. Поскольку запасы $P_{\text{мин}}$ в нижних слоях водной толщи намного выше, чем в фотическом, то в результате вертикального перемешивания концентрация $P_{\text{мин}}$ в верхних слоях восстанавливается и начинается очередной пик цветения. На наш взгляд, этот механизм является ключевым для формирования периодических всплесков биомассы в течение вегетационного периода.

Использование разработанной модели позволило оценить влияние факторов среды на сезонную динамику и рассчитать возможный отклик фитопланктона на снижение фосфорной нагрузки от импактных источников в Волжском бассейне. Вычислительные эксперименты показали, что при двукратном снижении антропогенных сбросов фосфора, можно ожидать трехкратное снижение биомассы синезеленых водорослей и, как следствие, улучшение экологического состояния водохранилищ Волги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абакумов А.И., Израильский Ю.Г.* Влияние условий среды на распределение фитопланктона в водоеме // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т. 7. № 1. С. 274–283.
2. *Алексеев В.В., Крышев И.И., Сазыкина Т.Г.* Физическое и математическое моделирование экосистем. СПб.: Гидрометиздат, 1992. 368 с.
3. *Домбровский Ю.А., Ильичев В.Г., Селютин В.В., Сурков Ф.А.* Теоретические и прикладные аспекты моделирования первичной продуктивности водоемов. Ростов-на-Дону: Изд. Ростовского ун-та, 1990. 176 с.
4. *Йоргенсен С.Е.* Управление озерными экосистемами. М.: Агропромиздат, 1985. 160 с.
5. *Картушинский А.В.* Численное моделирование эффектов гидрофизического воздействия на распределение фитопланктона // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т. 7. № 1. С. 112–124.
6. *Марчук Г.И.* Методы вычислительной математики: учеб. пос. М.: Наука, 1989. 608 с.
7. Северо-Западная часть Черного моря: биология и экология / под ред. Зайцева Ю.П., Александрова Б.Г., Миничевой Г.Г. Киев: Наукова думка, 2006. 633 с.
8. *Страшкраба М., Гнаук А.* Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование. М.: Мир, 1989. 376 с.

9. Умнов А.А. Математическое моделирование биотических потоков вещества и энергии в водных экосистемах. СПб.: Наука, 1997. 133 с.
10. Фурсова П.В., Левич А.П. Математическое моделирование в экологии сообществ // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов (обзорная информация ВИНИТИ). Режим доступа: URL:http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/fursova_matematiceskoe/fursova_matematiceskoe.
11. Багоцкий С.В., Вавилин В.А., Даценко Ю.С., Овчинникова Л.С. Модель развития фитопланктона в Учинском водохранилище // Водные ресурсы. 1983. № 2. С. 124–131.
12. Даценко Ю.С., Пуклаков В.В. Моделирование развития фитопланктона в Можайском водохранилище // Вестник МГУ. Сер. География. 2010. № 3. С. 43–47.
13. Murray J.D. *Mathematical Biology: I. An Introduction*. New York. Springer, 2002. 576 p.
14. Менишуткин В.В., Приходько Т.И. Модельное исследование вертикального распределения и продукция фитопланктона // Гидробиологический журнал. Т. VII. № 2. 1971. С. 5–10.
15. Подгорный К.А. Пространственно-неоднородная имитационная модель экосистемы Невской губы Финского залива // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. № 1(7). С. 1554–1558.
16. Комилов Ф.С. Имитационное моделирование динамики экосистем искусственных водоемов: автореф. дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Душанбе, 2004. 220 с.
17. Рахуба А.В. Моделирование антропогенного эвтрофирования в прибрежной акватории г. Тольятти // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 5. С. 230–234.
18. Коваленко В.В. Моделирование гидрологических процессов. СПб.: Гидрометиздат, 1993. 256 с.
19. Буркова Т.Р., Горбунов М.Ю., Краснова Е.С., Мухортова О.В., Тарасова Н.Г., Уманская М.В. Некоторые гидрохимические и гидробиологические характеристики современного состояния Куйбышевского водохранилища в летний период // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: в 4 т. Т. II: Химический состав и качество воды: труды междунар. науч.-практ. конф. / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2011. С. 23–28.
20. Цхай А.А. Математическое моделирование качества воды в проектируемом водохранилище на основе модели РК-БПК // Известия Алтайского государственного университета. 2012. Т. 2. №1 (73). С. 123–126.
21. Theil H. *Applied economic forecasting*. Amsterdam. 1971. 256 p.
22. Селезнев В.А., Селезнева А.В., Беспалова К.В. Нормирование сброса биогенных веществ в поверхностные водные объекты // Градостроительство и архитектура. 2014. № 2(15). С. 49–53.

Сведения об авторе:

Рахуба Александр Владимирович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт экологии Волжского бассейна Российской Академии наук» (ИЭВБ РАН), Россия, 445003, г. Тольятти, Самарская обл., ул. Комзина, д. 10; e-mail: rahavum@mail.ru