

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ФИТОПЛАНКТОНА В РАЙОНЕ ПРИПЛОТИННОГО ПЛЕСА КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

© 2013 А.В. Рахуба

Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук, Тольятти.

Поступила в редакцию 08.04.2013

На основе натуральных и вычислительных экспериментов исследуется сезонная динамика фитопланктона в прибрежной акватории г. Тольятти. Анализируется характер продуцирования биомассы фитопланктона Куйбышевского водохранилища в зависимости от режима регулирования стока и влияния гидрофизических факторов. Отмечена значимая роль механизма взаиморегуляции фитопланктона и концентрации фосфатов в формировании многократных вспышек «цветения» в течение вегетационного периода.

Ключевые слова: численная модель, абиотические факторы, фитопланктон, хлорофилл «а», гидродинамический режим.

В последнее время большой экологический интерес вызывает проблема качества поверхностных вод суши, и естественно, что в центре внимания исследователей стоят вопросы, связанные с изучением процессов антропогенного эвтрофирования, т.е. роста первичной продуктивности водных объектов в результате обогащения их биогенными элементами и изменения гидродинамического режима вследствие деятельности человека. Негативные последствия этого проявляются преимущественно в массовом развитии планктонных водорослей, которое сопровождается ухудшением качества воды, увеличением содержания органических и токсических веществ. Особенно остро проблема «цветения» воды стоит на зарегулированных водотоках – водохранилищах питьевого назначения.

Изучению и моделированию антропогенного эвтрофирования водоемов посвящено большое количество работ [1-16]. Однако, несмотря на хорошую изученность закономерностей развития планктонных водорослей, на практике получение приемлемых качественных и количественных модельных оценок сопряжено с известными проблемами. Одна из таких трудностей заключается в соответствии уровня сложности используемых моделей и имеющейся в наличии достоверной исходной информации. Поэтому организация и сбор натурной информации является важной и неотъемлемой частью моделирования.

В данной работе проводится анализ и оценка влияния абиотических факторов на сезонную динамику фитопланктона. Для этих целей была разработана одномерная (по вертикали) численная модель динамики фитопланктона. В качестве моделируемой характеристики использовалась концентрация хлорофилла «а»,

имеющая хорошую связь с биомассой фитопланктона [3]. Верификация модели и модельные расчеты осуществлялись на основе данных экспедиционных наблюдений за температурой воды, содержанием в воде хлорофилла «а» и биогенных элементов, метеорологических и гидрологических параметров, полученных в районе левобережной части (г. Тольятти) приплотинной акватории Куйбышевского водохранилища в период вегетации 2012 г.

Район исследования водохранилища представляет собой обширную акваторию 6-12 км с максимальными глубинами до 40 м. Фотическая зона распространяется до глубины 10 м. Развитие и распределение биомассы фитопланктона в экосистеме водохранилища зависит как от природных условий, связанных с характером освещенности, прогревом и ветровым перемешиванием водной толщи, так и от антропогенных факторов, связанных с режимом регулирования ГЭС и поступлением биогенных элементов со сточными водами. Как показывают наблюдения сезонный ход природных факторов обуславливает многопиковую динамику биомассы фитопланктона (рис. 1), которая усиливается в результате антропогенного влияния.

Для выяснения вклада каждого из совокупности факторов, обуславливающих сезонную динамику биомассы фитопланктона, наряду с натурными наблюдениями будем использовать диагностические расчеты на адаптированной к реальным условиям одномерной численной модели, имеющей следующий вид:

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

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

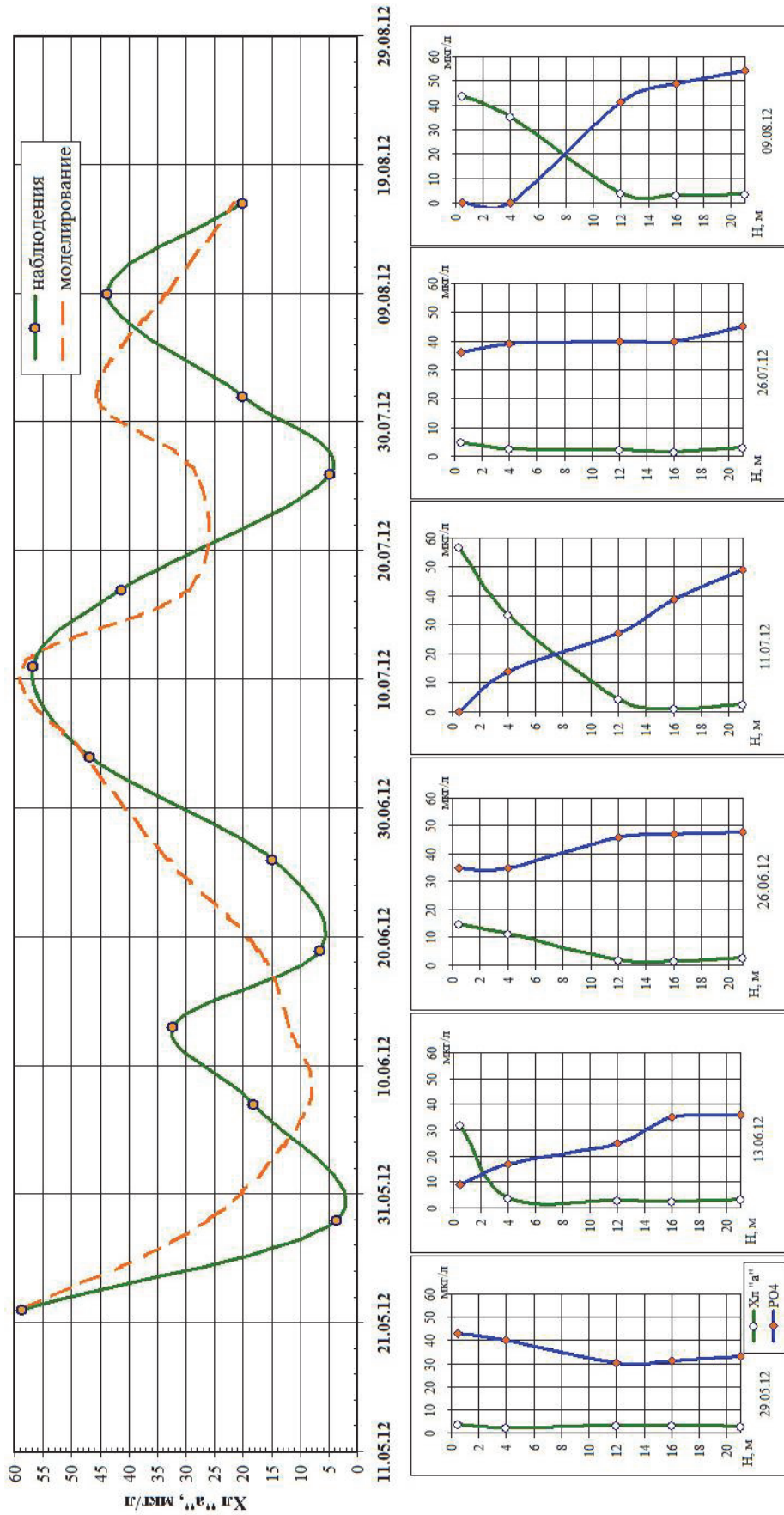


Рис. 1. Сезонная динамика (в слое 0,5 м) и вертикальное распределение хлорофилла «а» и фосфатов в приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища

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

$$I_z = I_0 \exp(-\alpha \cdot z), \quad (4)$$

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

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

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; $w \square B \square$ – пульсационный турбулентный поток фитопланктона, г/(с·м²); I_0 – 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_e – 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, 6, 14] от условий освещенности I , температуры воды T , концентрации биогенных элементов P , а также убыли фитопланктона в результате выноса за пределы водоема k_e , 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-Ментген [2, 14, 16]. С учетом данных натурных наблюдений, полученных на Куйбышевском водохранилище, для модельных расчетов в качестве лимитирующего вещества были использованы фосфаты (P). Температурная зависимость

скорости роста и выедания фитопланктона зоопланктоном определялась согласно формулам, приведенным в [13].

Модельное дифференциальное уравнение (1) решалось способом конечно-разностной аппроксимации по неявной численной схеме [8, 12] 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. 2), фосфатов P_z (рис. 1) и солнечной радиации I_z . Уменьшение солнечной радиации с глубиной I_z рассчитывалось по формуле (4) [5, 13], 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. Значения параметров модели приведены в таблице.

Таблица. Параметры модели

Обозначение	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	0,45
P_{II}	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	0,01-0,02
k_e	сут ⁻¹	0,003-0,014

Модельный анализ гидрофизических факторов показывает, что при достаточном уровне концентрации биогенных элементов в воде темп прироста популяции водорослей определяется преимущественно прогревом водной толщи и интенсивностью солнечной радиации, которые связаны с циклоническим или антициклоническим типом погоды. Как правило, рост и развитие тех или иных видов водорослей сопровождается неоднократными всплесками биомассы в течение вегетационного периода. Весенний и осенний пик обуславливается цветением холодолюбивых диатомовых водорослей. В период максимального летнего прогрева пики биомассы формируются в основном за счет развития теплолюбивых сине-зеленых водорослей. Согласно проведенной адаптации модели к реальным условиям Куйбышевского водохранилища оптимальная

температура для комфортного роста сине-зеленых водорослей составила 21 °С. Так, на рис.1 и рис. 2 максимумы биомассы летнего фитопланктона 11.07.12 и 09.08.12 соответствуют времени прогрева водной толщи до оптимальной температуры и штилевым условиям на водохранилище. Причем, такие условия способствуют высокой продуктивности водорослей не только в поверхностном слое воды, но и в пределах глубины 10-12 м (рис. 3). При усилении ветра наблюдается снижение и вертикальное выравнивание концентрации клеток фитопланктона.

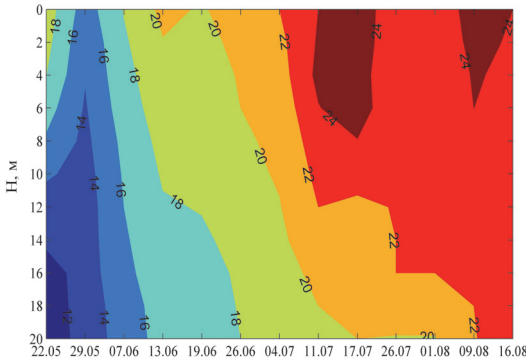


Рис. 2. Прогрев водной толщи (Т°С) Куйбышевского водохранилища в период вегетации 2012 г.

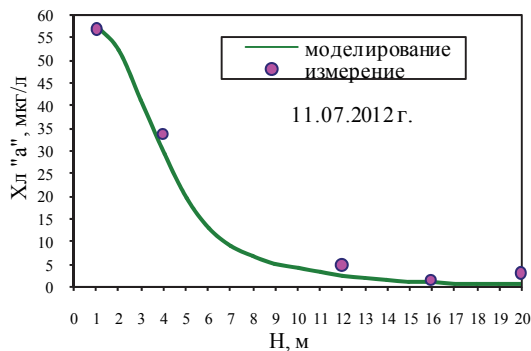


Рис. 3. Модельный расчет вертикального распределения хлорофилла «а» в районе приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища в период интенсивного «цветения»

Следует особо отметить, что сезонные вспышки «цветения» воды на водохранилище обостряются при антропогенном влиянии режима регулирования стока на ГЭС, которое в модели задается соотношением (6). Так, в периоды малой сработки водохранилища происходит снижение скоростей течений и замедление скорости водообмена, что создает благоприятные условия для развития фитопланктона. В выходные дни расходы воды через гидроузлы могут снижаться до уровня санитарных пусков, в результате чего водохранилища на время превращаются в

озера практически со стоячей водой. В этих условиях при ясной погоде и отсутствии ветра в течение 2-3 дней скорость роста фитопланктона резко возрастает.

Результаты численного моделирования показывают, что другим не менее важным механизмом, влияющим на многократный рост и снижение биомассы фитопланктона, является колебательный процесс выедания и последующего восстановления концентрации в воде фосфатов вследствие жизнедеятельности фитопланктона (рис. 4). При благоприятных условиях рост биомассы фитопланктона сопровождается снижением концентрации фосфатов в фотическом слое практически до аналитического нуля. Это, в свою очередь, вызывает острую нехватку фосфатов для дальнейшего роста фитопланктона и приводит к последующему спаду биомассы. Далее в результате горизонтальной и вертикальной конвекции предшествующий уровень концентрации фосфатов в водной толще восстанавливается и начинается следующий пик развития фитопланктона. Таким образом, в течение вегетационного сезона свой вклад в многопиковую динамику фитопланктона вносит механизм циклического изменения концентрации фосфатов в водной среде.

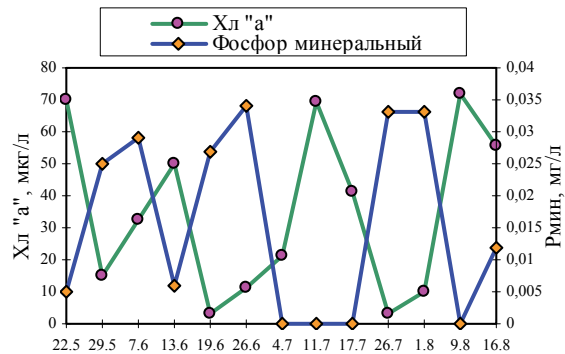


Рис. 4. Сезонная динамика хлорофилла «а» и фосфатов в поверхностном слое воды по данным наблюдений в приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища 2012 г.

ВЫВОДЫ

Проведенные натурные и модельные эксперименты по оценке влияния абиотических факторов на сезонную динамику и вертикальное распределение биомассы фитопланктона позволили выявить некоторые особенности антропогенного эвтрофирования исследуемого района Куйбышевского водохранилища. Так, наряду с температурой воды и световыми условиями, как основными факторами лимитирования, важную роль в регуляции развития фитопланктонного сообщества играют гидродинамические факторы природного и антропогенного характера. Учет в модели параметров ветрового перемешивания вод и

режима регулирования стока позволяет уточнить амплитуду и время наступления пиков «цветения» на водохранилище, а также эпюру вертикального распределения фитопланктона. Отдельно необходимо отметить исключительную важность механизма взаимного влияния жизнедеятельности фитопланктона и концентрации лимитирующего биогенного вещества (фосфатов) в воде. На наш взгляд этот механизм является ключевым для формирования всплесков биомассы в течение вегетационного периода.

Приемлемое сходство результатов натуральных наблюдений и модельных расчетов позволяет успешно использовать разработанную модель в диагностических расчетах применительно к рассматриваемому району Куйбышевского водохранилища. Разумеется, для использования модели в решении практических задач прогнозирования и оптимального управления антропогенным эвтрофированием водохранилища потребуются уточнение параметров модели и более надежный объем необходимой исходной информации.

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. *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. С 568 Т. II: Химический состав и качество воды: труды Междунар. науч.-практ. конф./ Перм. Гос. Ун-т. Пермь, 2011. С. 23-28.
4. *Винберг Г.Г.* Первичная продукция водоемов. Минск, 1960. 328 с.
5. *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.
6. *Йоргенсен С.Е.* Управление озерными экосистемами. М.: Агропромиздат, 1985. 160с.
7. *Карпушинский А.В.* Численное моделирование эффектов гидрофизического воздействия на распределение фитопланктона // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т. 7, № 1. С. 112-124.
8. *Марчук Г.И.* Методы вычислительной математики: Учеб. Пособие. – М.: Наука, 1989. 608 с.
9. *Менишуткин В.В.* Имитационное моделирование водных экологических систем. СПб.: Наука, 1993. 160 с.
10. *Петрова Н.А.* Сукцессии фитопланктона при антропогенном эвтрофировании больших озер. Л.: Наука, 1990. 200 с.
11. *Розниченко Г.Ю., Рубин А.Б.* Математические модели биологических продукционных процессов: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 1993 г. 302 с.
12. *Самарский А.А.* Введение в численные методы. М.: Наука, 1982. 269 с.
13. Северо-Западная часть Черного моря: биология и экология. Ответственные ред. *Зайцев Ю.П., Александров Б.Г., Миничева Г.Г.* Киев: Наукова думка, 2006 г. 633 с.
14. *Страшкраба М., Гнаук А.* Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование. М.: Мир, 1989. 376 с.
15. *Умнов А.А.* Математическое моделирование биотических потоков вещества и энергии в водных экосистемах. СПб.: Наука, 1997. 133 с.
16. *Фурсова П.В., Левич А.П.* Математическое моделирование в экологии сообществ // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов (обзорная информация ВИНТИ). Эл. ресурс. URL: http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/fursova_matematicheskoe/furcova_matematicheskoe

NUMERICAL SIMULATION OF THE SEASONAL DYNAMICS OF PHYTOPLANKTON IN THE KUIBYSHEV RESERVOIR IN THE DEEP-WATER AREA NEAR THE DAM

© 2013 A.V. Rakhuba

Institute of Ecology of Volga River Basin of Russian Academy of Sciences, Togliatti

Based on monitoring and computational experiments investigated the seasonal dynamics of phytoplankton in the coastal waters of Togliatti. Is analyzed nature of the growth of phytoplankton of the Kuibyshev Reservoir, depending on the mode of regulation of the flow and the impact of hydro-physical factors. The article shows a significant contribution to the formation of several outbreaks of "bloom" of the mechanism of mutual regulation of phytoplankton and phosphate during the growing season.

Keywords: numerical model, abiotic factors, phytoplankton, chlorophyll «a», hydrodynamic regime.