

УДК 574.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТРОПОГЕННОГО ЭВТРОФИРОВАНИЯ ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ г. ТОЛЬЯТТИ

© 2014 А.В. Рахуба

Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук, г. Тольятти

Поступила 03.09.2014

Представлены результаты натурных и модельных исследований антропогенного эвтрофирования Куйбышевского водохранилища в районе сброса ливневых вод г. Тольятти. Проведена оценка масштабов зон биогенного загрязнения и динамики роста фитопланктонного сообщества. Установлено, что под влиянием источника сброса в прибрежной акватории формируется очаг антропогенного загрязнения, который способствует усилению «цветения» воды в зонах рекреации.

Ключевые слова: численная модель, абиотические факторы, фитопланктон, хлорофилл «а», биогенное загрязнение

¹На сегодняшний день одной из острых проблем больших и малых городов, расположенных в прибрежной зоне водохранилищ, является ухудшение качества поверхностных вод в теплый период года. Зарегулирование стока и избыточное содержание биогенных веществ в воде приводят к многочисленным вспышкам «цветения» воды в водохранилищах и, как следствие, это отражается на качестве питьевого водоснабжения населения и состоянии зон рекреации.

Изучение процессов антропогенного эвтрофирования водных экосистем проводится уже давно и достаточно интенсивно. Однако, мониторинговые наблюдения за изменением динамики фитопланктонного сообщества и гидрохимического режима в постоянно меняющихся условиях среды представляют определенные трудности. В этом случае наряду с натурными исследованиями для оценки антропогенного влияния на водные экосистемы и прогнозирования качества воды целесообразно применение математических моделей.

В данной работе проводится диагностическое моделирование сезонной динамики фитопланктона приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища в районе прибрежной акватории г. Тольятти в период вегетации 2012 г. Для этих целей были разработаны плановая двумерная модель течений и одномерная (по вертикали) численная модель динамики биомассы фитопланктона. Верификация моделей и модельные расчеты осуществлялись на основе данных экспедиционных наблюдений за температурой воды, содержанием в воде хлорофилла «а» и биогенных элементов, метеорологических и гидрологических характеристик.

На начальном этапе рассчитывались характерная скорость течения и распределение фосфатов при различных ветровых условиях на Куйбышевском водохранилище (рис. 1). Расчеты осуществлялись с использованием программного комплекса «ВОЛНА», в котором используются уравнения

«мелкой воды» и адвективно-диффузионное уравнение распространения примеси [2, 3]. В результате моделирования всех возможных сценариев развития ветра (скорость 7-10 м/с) было установлено, что при западном, северном направлениях и в штилевых условиях течение воды в приплотинной части Куйбышевского водохранилища направлено от верховьев (Климовская узость) к плотине Жигулевской ГЭС (рис. 1в). При восточном и южном направлении ветра в мелководной прибрежной зоне г. Тольятти образуется масштабная циркуляция вод, в результате чего создаются благоприятные условия для формирования антропогенного очага загрязнения (рис. 1а и рис. 1б).

Расчет поля концентрации фосфатов производился по источнику сброса ливневых вод г. Тольятти, расположенному в районе пос. Приморский. Средняя мощность выпуска по нашим мониторинговым данным составляет 2,7 м³/с и концентрацией фосфатов в сточной воде 300 мкг/л. Фоновая концентрация была принята равной 40 мкг/л. Согласно проведенным модельным расчетам при среднем расходе воды на водохранилище равном 6000 м³/с и восточном направлении ветра зона распространения фосфатов с концентрацией выше 40 мкг/л составляет 32,5 км², выше 50 мкг/л – 0,1 км². Шлейф сточных вод от выпуска распространяется на 5 км под действием вдольберегового течения, направленного навстречу основному стоковому течению, достигая пояса санитарной зоны водозабора г. Тольятти. Затем сточные воды разворачиваются и выносятся на 6 км в центральную часть приплотинной акватории (рис. 1а). При южном направлении ветра зона с концентрацией фосфатов выше 40 мкг/л составляет 23,7 км², выше 50 мкг/л – 1 км².

¹ Рахуба Александр Владимирович, канд. тех. наук, e-mail: rahavum@mail.ru

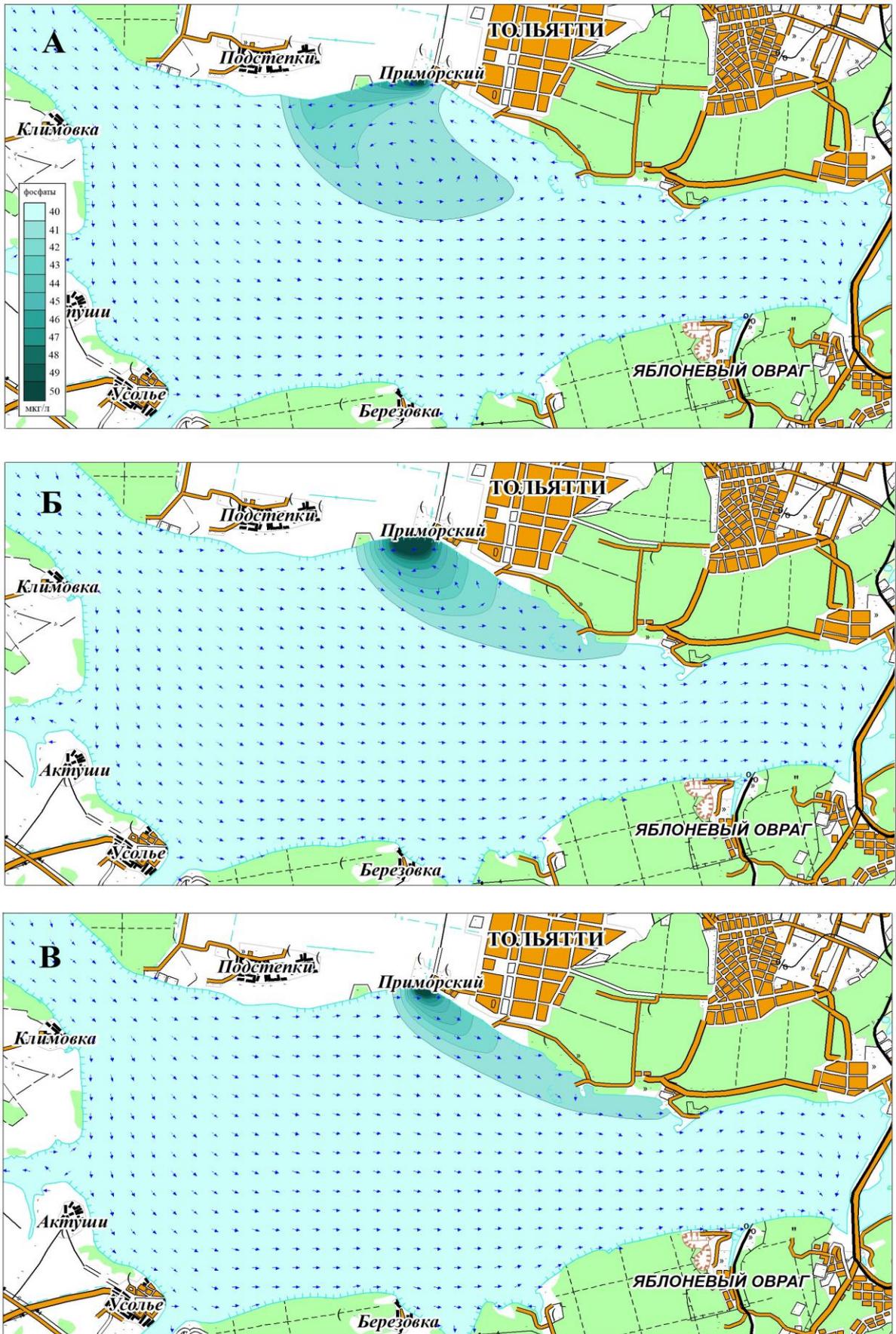


Рис. 1. Численное моделирование поля течения и распределения фосфатов в прибрежной акватории г. Тольятти Куйбышевского водохранилища: А – при восточном, Б – при южном ветрах (7 м/с) и В – при штилевых условиях

Сточные воды от источника сброса вытягиваются на 9,5 км в сторону плотины Жигулевской ГЭС (рис. 1б). В штилевых условиях направление движения сточных вод определяется только стоковым течением, вытягиваясь узкой полосой вдоль прибрежной акватории на 11 км. Зона распространения сточных вод с концентрацией фосфатов выше 40 мкг/л составляет 16,8 км², выше 50 мкг/л – 0,1 км² (рис. 1в). Очевидно, что повышение фосфатов в прибрежной акватории будет способствовать развитию фитопланктонного сообщества, поскольку количество фосфора в воде является одним из главных лимитирующих факторов «цветения» воды на Куйбышевском водохранилище.

Качественная и количественная оценка сезонной динамики «цветения» воды при действии разных факторов среды проводилась на модели, имеющей следующий вид:

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

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

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

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

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

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

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; $\overline{w'B'}$ – 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_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 [1, 4, 5] от условий освещенности I , температуры воды T , концентрации фосфатов 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-Ментен [1, 5]. Температурная зависимость скорости роста и выедания фитопланктона зоопланктоном определялась согласно формулам, приведенным в [4].

Модельный анализ гидрофизических факторов показывает, что при достаточном уровне концентрации фосфатов в воде темп прироста популяции водорослей определяется преимущественно прогревом водной толщи и интенсивностью солнечной радиации, которые связаны с циклоническим или антициклоническим типом погоды. При меньших концентрациях фосфатов в воде следует ожидать снижение пиков «цветения». Согласно модельным расчетам оптимальная температура воды для комфортного роста летнего фитопланктона составляет 21°С. Так, на рис. 2 максимумы биомассы 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. Следует особо отметить, что сезонные вспышки «цветения» воды в районе прибрежной акватории г. Тольятти обостряются как при антропогенном влиянии режима регулирования стока на ГЭС, так и при сбросах ливневых вод. В периоды малой сработки водохранилища происходит снижение скоростей течений и замедление скорости водообмена, что создает благоприятные условия для развития фитопланктона. В этих условиях при ясной погоде и отсутствии ветра в течение 2-3 дней скорость роста фитопланктона резко возрастает.

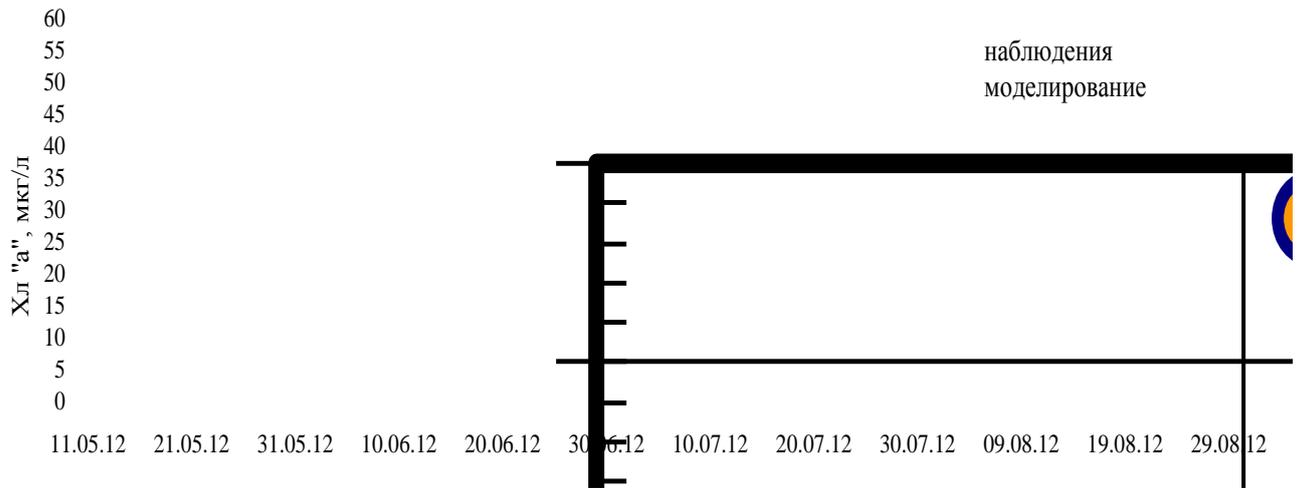


Рис. 2. Модельный расчет динамики хлорофилла «а» в прибрежной акватории г. Тольятти за период вегетации 2012 г.

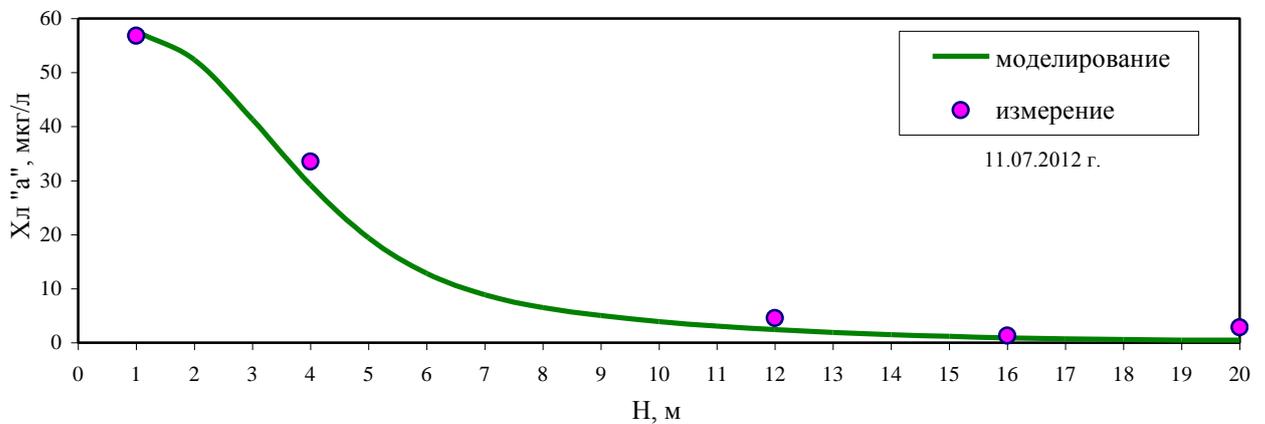


Рис. 3. Модельный расчет вертикального распределения хлорофилла «а» в районе приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища в период интенсивного «цветения»

Модельный расчет пространственных масштабов зон биогенного загрязнения показывает, что влияние источника сброса распространяется на большую часть береговой линии, где сосредоточены все пляжи г. Тольятти. С учетом среднего диапазона изменения концентрации хлорофилла «а» в Волжской воде (10-120 мкг/л) увеличение фосфатов на 10 мкг/л после сбросов ливневых вод повышает удельную скорость роста фитопланктона на 7-60%. В этом случае, при благоприятных метеорологических гидрологических условиях прирост хлорофилла «а» за сутки может колебаться от 2 до 34 мкг/л, т.е. 30% от максимально возможной концентрации хлорофилла «а» в водохранилище.

Таким образом, в прибрежной акватории г. Тольятти формируется локальная зона биогенного загрязнения, пространственная геометрия которой меняется и зависит от скорости и направления ветра. Наиболее неблагоприятные условия складываются при южном ветре. При фоновом уровне фосфатов в 40 мкг/л площадь зоны загрязнения от источника сброса ливневых вод с концентрацией фосфатов выше 50 мкг/л может по-

крывать площадь акватории в 1 км² и больше. В результате отклика экосистемы на повышение фосфатов в очаге загрязнения будет усиление «цветения» воды на пляжах и других местах отдыха горожан. Расчеты показывают, что суточный прирост биомассы фитопланктона, в основном сине-зеленых водорослей, в зоне рекреации города Тольятти может достигать 30% от максимально возможного уровня «цветения» воды в Куйбышевском водохранилище.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.В., Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Физическое и математическое моделирование экосистем. СПб.: Гидрометиздат, 1992. 368 с.
2. Рахуба А.В. Оценка качества вод Саратовского водохранилища в районе питьевого водозабора г. Самара // Водное хозяйство России, 2005. Т. 7, № 6. С. 601-611.
3. Рахуба А.В. Моделирование динамики примеси в нижнем бьефе водохранилища при экстремальных попусках ГЭС // Водное хозяйство России, 2010, № 4. С. 28-40.
4. 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.
5. Страшкраба М., Гнаук А. Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование. М.: Мир, 1989. 376 с.

MODELING ANTHROPOGENIC EUTROPHICATION COASTAL WATERS TOGLIATTI

© 2014 **A.V. Rakhuba**

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

Results of field and modeling studies of anthropogenic eutrophication of the Kuibyshev Reservoir near discharge stormwater Togliatti are presented. The estimation of the size of the zones of biogenic pollution and the growth dynamics of the phytoplankton community was performed. It was established that under the influence of the source of discharge into coastal waters formed hotbed of anthropogenic pollution, which contributes to the «flowering» of water in the areas of recreation.

Key words: numerical model, abiotic factors, phytoplankton, chlorophyll «a», biogenic pollution