

УДК 519.87

Ю.С. Тучковенко, д.геогр.н., Аль-Субари Али Ахмед Салех, асп.

Одесский государственный экологический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВТРОФИКАЦИИ ОЗЕР ЯЛПУГ-КУГУРЛУЙ

Изложена математическая структура модели эвтрофикации вод озер Ялпуг-Кугурлуй. Описана калибровка химико-биологических параметров модели. Приведены результаты численного моделирования внутригодовой динамики химико-биологических компонент экосистемы озер при различном сочетании определяющих ее факторов.

Ключевые слова: Придунайские озера, эвтрофикация, моделирование

Придунайские озера являются источником водоснабжения прилегающих населенных пунктов и в значительной степени определяют развитие в данном регионе орошаемого земледелия и рыбного хозяйства. Одной из основных экологических проблем Придунайских озер является эвтрофикация вод, вызванная избыточным поступлением биогенных веществ в результате антропогенной деятельности как на водосборе самих озер, так и в бассейне р. Дунай. Поэтому актуальной представляется разработка модели эвтрофикации вод Придунайских озер, которая может быть использована для учета экологической составляющей проблемы разработки режимов их водно-хозяйственного использования. Для решения этой задачи выбрана система двух взаимосвязанных озер Ялпуг-Кугурлуй, которая образует самый крупный водоем Придунайской озерной системы.

Оценка составляющих водно-солевого баланса озер Ялпуг-Кугурлуй была выполнена в [2, 4, 5, 7]. Вопросы моделирования эвтрофикации вод этих озер были рассмотрены ранее в работе [3]. Представляемая работа является ее продолжением, в котором рассматривается модифицированный вариант модели, результаты перекалибровки ее параметров и сценарного моделирования.

Цель работы заключается в описании математической структуры и калибровки параметров модели эвтрофикации озер Ялпуг-Кугурлуй, а также изложение отдельных результатов расчетов внутригодовой динамики химико-биологических компонент экосистемы озер при различном сочетании определяющих ее природных и антропогенных факторов.

Описание математической структуры модели. Рассматривается точечный (нульмерный в пространстве) вариант модели. Модель представлена двумя блоками:

- блок водного баланса системы оз. Ялпуг-Кугурлуй, описывающий внутригодовую изменчивость объема вод и глубины водоема, в зависимости от соотношения между составляющими приходной и расходной частями водного баланса. Этот блок дополняется также уравнением баланса массы консервативного вещества в водоеме, в соответствии с которым рассчитывается средняя по объему концентрация исследуемого вещества в водоеме;
- химико-биологический блок, в котором описаны естественные химико-биологические процессы, определяющие баланс биогенных веществ в экосистеме, степень ее трофности и сапробности.

Уравнение водного баланса исследуемого водоема записывается следующим образом

$$\frac{dW}{dt} = Q_{pr} + Q_{gr} + Q_{dr} + Q_d^{in} + Q_b - Q_{ev} - Q_f - Q_{tr} - Q_{ir} - Q_d^{out}, \quad (1)$$

где W – объем вод озера; t – время; Q_d^{in} , Q_{pr} , Q_{gr} , Q_{dr} , Q_b – приток вод в озеро из р. Дунай, в результате выпадения осадков, поступления грунтовых, дренажных вод, бокового стока малых рек и других водотоков, соответственно; Q_{ev} , Q_f , Q_{tr} , Q_{ir} , Q_d^{out} – потери воды на испарение, фильтрацию по периметру водоема, транспирацию, забор на орошение и сброс в р. Дунай, соответственно.

Уравнение баланса массы компонентов экосистемы имеет вид

$$\frac{dC_i W}{dt} = C_i^{pr} Q_{pr} + C_i^{gr} Q_{gr} + C_i^{dr} Q_{dr} + C_i^d Q_d^{in} + C_i^b Q_b - C_i(Q_{ev} + Q_f + Q_{tr} + Q_{ir} + Q_d^{out}) + F_i W. \quad (2)$$

Здесь C_i – средняя по объему водоема концентрация (биомасса) i -ой переменной модели; C_i^{pr} ; C_i^d ; C_i^{gr} ; C_i^{dr} ; C_i^b – концентрации i -ой переменной в водах приходных составляющих водного баланса: атмосферных осадках, водах р. Дунай, грунтового, дренажного и бокового стока; F_i – функции неконсервативности, представляющие собой составленные на основе балансового подхода алгебраические суммы членов, которые описывают потоки вещества между компонентами модели, обусловленные различными (био)химическими реакциями и биологическими взаимодействиями. Функции неконсервативности описываются и рассчитываются в химико-биологическом блоке модели.

Временной шаг модели составляет 1 сутки. На каждом шаге по времени, с помощью эмпирической зависимости вида $D = f(W)$, вычисляется новая средняя глубина водоема D . В расчетах используются среднемесячные значения составляющих водного баланса, задаваемые на основе [7], которые линейно интерполировались на каждые расчетные сутки. Общая продолжительность расчета - один год.

Химико-биологический блок модели включает в себя восемь основных элементов экосистемы, определяющих продукцию и деструкцию органического вещества, утилизацию и регенерацию биогенных веществ в экосистеме, кислородный режим водоема, а именно: азот аммония C_1 и нитратов C_2 , неорганический фосфор C_3 , фитопланктон C_4 , биохимическое потребление кислорода (БПК) C_5 , растворенный кислород C_6 , органические азот C_7 и фосфор C_8 . Фосфорный и азотный циклы рассматриваются отдельно с целью учета различных скоростей минерализации органического фосфора и азота. Объединение этих циклов в единую модель производится на основе уравнения динамики фитопланктона, описывающего первичное продуцирование органического вещества фитопланктоном в процессе фотосинтеза, а также пополнение запасов косного органического вещества (в единицах органического фосфора и азота) в результате процессов дыхания, естественной смертности и выедания фитопланктона. В модели явно учитывается выедание фитопланктона зоопланктоном на основе задания годового хода биомассы зоопланктона в исследуемом водоеме, известного из данных наблюдений.

Математическая структура химико-биологического блока базируется на частично модифицированных уравнениях и стандартных значениях коэффициентов и параметров, используемых в модели WASP5 (Water Quality Analysis Simulation Program) [10].

Фитопланктон, мгС/дм³. Рост биомассы фитопланктона происходит в процессе фотосинтеза и зависит от условий освещенности, концентрации биогенных элементов, используемых при синтезе органического вещества, температуры воды. Убыль биомассы фитопланктона обусловлена процессами дыхания, естественной

смертности и выедания, а также гравитационного осаждения клеток под действием силы тяжести.

Уравнение баланса массы фитопланктона записывается следующим образом

$$\frac{\partial C_4}{\partial t} = G_{p1}C_4 - D_{p1}C_4 - \frac{v_{s4}}{H}C_4, \quad (3)$$

где G_{p1} – удельная скорость роста фитопланктона, 1/сут; D_{p1} – удельная скорость смертности и дыхания, 1/сут; v_{s4} – гравитационная скорость оседания водорослей, м/сут; H – средняя глубина водоема, м.

$$G_{p1} = k_{1c}X_{RT}X_{RI}X_{RN}, \quad (3.a)$$

$$X_{RT} = \begin{cases} e^{-b_1(T-T_{opt})^2}, & \text{если } T \leq T_{opt} \\ e^{-b_2(T_{opt}-T)^2}, & \text{если } T > T_{opt} \end{cases},$$

$$X_{RI} = \frac{e}{K_e D} f \left[\exp \left\{ -\frac{I_a}{I_s} \exp(-K_e D) \right\} - \exp \left\{ -\frac{I_a}{I_s} \right\} \right],$$

$$X_{RN} = \min \left(\frac{DIN}{K_{mN} + DIN}; \frac{C_3}{K_{mP} + C_3} \right), \quad DIN = C_1 + C_2;$$

$$D_{p1} = k_{1R}(T) + k_{1D} + k_{1G}Z(t), \quad (3.б)$$

$$k_{1R}(T) = k_{1R}(T_R) e^{b_R(T-T_R)},$$

$$v_{s4} = v_{s4}^{20} \theta_{ph}^{(T-20)}. \quad (3.в)$$

Здесь, k_{1c} – максимально возможная удельная скорость роста фитопланктона, 1/сут, при оптимальной температуре воды T_{opt} , °C; b_1, b_2 – коэффициенты, описывающие влияние температуры воды на рост фитопланктона; T – температура воды, °C; I_a – средний в течение дня поток фотосинтетически активной солнечной радиации, проникающей через поверхность моря, Вт/м²; I_s – оптимальная для фотосинтеза освещенность, Вт/м²; f – доля светового дня в течение суток ($0 < f < 1$); DIN – концентрация минеральных форм азота, мгN/дм³; K_{mN}, K_{mP} – константы полунасыщения (Михаэлиса-Ментен), характеризующие лимитирующее влияние концентраций минеральных форм азота и фосфора на скорость роста фитопланктона, в мгN/дм³ и мгP/дм³, соответственно; k_{1R} – удельная скорость дыхания фитопланктона, 1/сут, при температуре T ; b_R – коэффициент, описывающий влияние температуры воды на дыхание фитопланктона; k_{1D} – удельная скорость естественной смертности фитопланктона, 1/сут; k_{1G} – скорость выедания фитопланктона единицей биомассы зоопланктона, л/мгС·сут; $Z(t)$ – годовой ход биомассы зоопланктона, мгC/дм³; K_e – интегральный коэффициент ослабления освещенности с глубиной, представляемый в виде суммы двух слагаемых, одно из которых описывает эффект самозатемнения фитопланктона $K_{eshd} = 0.0088P_{Chl} + 0.054P_{Chl}^{0.67}$ (где P_{Chl} – концентрация хлорофилла «а», мкг/дм³), а второе – K_{ef} , учитывает вклад в ослабление освещенности и прозрачность вод других факторов, таких как содержание минеральной взвеси, детрита и т.д.; $K_e = 2.3/Z_s$, где Z_s – прозрачность по диску Секки, м; v_{s4}^{20} – гравитационная

скорость оседания водорослей при температуре воды 20°C, м/с; θ_{ph} – температурная поправка.

Органический фосфор, мгР/дм³. Его концентрация в водной среде определяется балансом между поступлением в результате дыхания и смертности фитопланктона, а также убылью в процессе минерализации (бактериального разложения) и осаждения на дно

$$\frac{\partial C_8}{\partial t} = D_{p1} a_{pc} f_{op} C_4 - k_{83} \theta_{83}^{T-20} \left(\frac{C_4}{K_{mPc} + C_4} \right) C_8 - \frac{v_{s3}(1-f_{D8})}{H} C_8 \pm Q_{Porg}, \quad (4)$$

где a_{pc} – коэффициент, выражающий стехиометрическое соотношение между углеродом и фосфором в органическом веществе, мгР/мгС; f_{op} – доля органического фосфора в метаболических выделениях и отмерших остатках фитопланктона; k_{83} – удельная скорость минерализации растворенного органического фосфора при 20°C; θ_{83} – температурная поправка; K_{mPc} – константа полунасыщения, определяющая лимитирующее влияние биомассы фитопланктона на регенерацию минерального фосфора, мгС/дм³; $v_{s3} = v_{s3}^{20} \theta_{s3}^{(T-20)}$ – скорость осаждения детритных частиц органического вещества, м/сут; f_{D8} – доля, приходящаяся на растворенный органический фосфор; Q_{Porg} – изменение концентрации за счет водообмена.

Неорганический фосфор (фосфаты), мгР/дм³. Его запасы в воде пополняются частично за счет прямых выделений в результате смертности и дыхания фитопланктона, а также в результате минерализации органического вещества при участии бактерий. Неорганический фосфор потребляется фитопланктоном при продуцировании органического вещества в процессе фотосинтеза

$$\frac{\partial C_3}{\partial t} = D_{p1} a_{pc} (1 - f_{op}) C_4 + k_{83} \theta_{83}^{T-20} \left(\frac{C_4}{K_{mPc} + C_4} \right) C_8 - G_{p1} a_{pc} C_4 \pm Q_{po4} \pm \frac{Q_{po4}^{sed}}{H}, \quad (5)$$

где Q_{po4} , Q_{po4}^{sed} – изменения концентрации за счет водообмена и взаимодействия с донными отложениями, соответственно.

Органический азот, мгN/дм³. Концентрация в воде определяется теми же процессами, что и для органического фосфора. Главное отличие заключается в том, что скорости процессов фосфатофикации и аммонификации косного органического вещества в общем случае не равны между собой.

$$\frac{\partial C_7}{\partial t} = D_{p1} a_{nc} f_{on} C_4 - k_{71} \theta_{71}^{T-20} \left(\frac{C_4}{K_{mPc} + C_4} \right) C_7 - \frac{v_{s3}(1-f_{D7})}{H} C_7 \pm Q_{Norg}, \quad (6)$$

где a_{nc} – стехиометрическое соотношение между углеродом и азотом в составе органического вещества, мгР/мгС; k_{71} – удельная скорость минерализации органического азота при температуре воды 20°C; θ_{71} – температурная поправка; f_{D7} – доля органического фосфора, присутствующего в растворенной фазе; Q_{Norg} – изменение концентрации за счет водообмена.

Аммонийный азот, мгN/дм³. В водной среде приходная часть баланса азота аммония формируется процессами минерализации органического азота, а также прямыми выделениями при дыхании, отмирании и выедании фитопланктона. Расходная часть баланса определяется интенсивностью процессов утилизации аммония в процессе

продуціювання органічного речовини фітопланктоном і зменшення концентрації аммонію в результаті процесу нітрифікації.

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = D_{p1} a_{nc} (1 - f_{on}) C_4 + k_{71} \theta_{71}^{T-20} \left(\frac{C_4}{K_{mPc} + C_4} \right) C_7 - G_{p1} a_{nc} P_{NH4} C_4 - k_{12} \theta_{12}^{T-20} \left(\frac{C_6}{K_{NIT} + C_6} \right) C_1 \pm Q_{NH4} + \frac{Q_{NH4}^{SED}}{H}. \quad (7)$$

Здесь, k_{12} – удельная скорость нитрификации при температуре 20°C, 1/сут; θ_{12} – температурный коэффициент; K_{NIT} – константа полунасыщения для описания влияния содержания растворенного кислорода на процесс нитрификации, мгО₂/дм³; $P_{NH4} = C_1 \phi / [\phi C_1 + (1 - \phi) C_2]$ – доля минерального азота, потребляемая фитопланктоном в форме аммония; ϕ – коэффициент предпочтительности усвоения фитопланктоном аммония по отношению к нитратам; Q_{NH4} , Q_{NH4}^{SED} – изменения концентрации аммония за счет водообмена и взаимодействия с донными отложениями, соответственно.

Нитратный азот, мгN/дм³. Потребляется фитопланктоном в процессе фотосинтеза, а также убывает в процессе денитрификации, при условии дефицита кислорода. Образуется в процессе нитрификации или же поступает от антропогенных источников.

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = k_{12} \theta_{12}^{T-20} \left(\frac{C_6}{K_{NIT} + C_6} \right) C_1 - G_{p1} a_{nc} (1 - P_{NH4}) C_4 - k_{2D} \theta_{2D}^{T-20} \left(\frac{K_{NO3}}{K_{NO3} + C_6} \right) C_2 \pm Q_{NO3} + \frac{Q_{NO3}^{SED}}{H}, \quad (8)$$

где k_{2D} – удельная скорость денитрификации при температуре 20°C, 1/сут; θ_{2D} – температурный коэффициент; K_{NO3} – константа Михаэлиса-Мэнтен, характеризующая влияние концентрации кислорода на скорость процесса денитрификации, мгО₂/дм³; Q_{NO3} – изменение концентрации нитратов за счет водообмена.

Биохимическое потребление кислорода, мгО₂/дм³. Показатель, характеризующий суммарное содержание лабильного органического вещества в водной среде. Определяется смертностью фитопланктона, интенсивностью биохимического окисления органического вещества, разложением органического вещества при денитрификации и скоростью гравитационного осаждения детритной части органического вещества.

$$\frac{\partial C_5}{\partial t} = a_{oc} D_{p1} C_4 - k_D \theta_D^{T-20} \left(\frac{C_6}{K_{BOD} + C_6} \right) C_5 - \frac{v_{s3} (1 - f_{D5})}{H} C_5 - \frac{5}{4} \frac{32}{14} k_{2D} \theta_{2D}^{T-20} \left(\frac{K_{NO3}}{K_{NO3} + C_6} \right) C_2 \pm Q_{BOD}. \quad (9)$$

Здесь, a_{oc} – стехиометрическое соотношение между углеродом и кислородом для органического вещества, мгО₂/мгС; k_D – скорость биохимического окисления органического вещества при температуре 20°C, 1/сут; θ_D – температурный коэффициент; K_{BOD} – константа полунасыщения при лимитировании кислородом процесса биохимического окисления, мгО₂/дм³; f_{D5} – доля растворенной фракции БПК; Q_{BOD} – изменение концентрации за счет водообмена.

Поскольку, как правило, в ходе мониторинга определяется величина БПК₅, то при верификации модели используется именно эта характеристика, которая помимо углеродного БПК, который является эквивалентом косного органического вещества доступного биохимическому окислению, включает в себя также эффект дыхания фитопланктона и потребление кислорода при нитрификации

$$BOD_5 = C_5(1 - e^{-5k_D}) + \frac{64}{14} C_1(1 - e^{-5k_{12}}) + a_{oc} C_4(1 - e^{-5k_{1R}(20)}). \quad (9.a)$$

Растворенный кислород, мгО₂/дм³. Выделяется в процессе фотосинтеза и расходуется при дыхании фитопланктона, биохимическом окислении органического вещества в воде и донных осадках, нитрификации. Имеет место газообмен кислородом между водной средой и атмосферой.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_6}{\partial t} = & k_2(C_s - C_6) - k_D \theta_D^{T-20} \left(\frac{C_6}{K_{BOD} + C_6} \right) C_5 - \frac{64}{14} k_{12} \theta_{12}^{T-20} \left(\frac{C_6}{K_{NIT} + C_6} \right) C_1 - \\ & - \frac{SOD}{D} \theta_{sO}^{T-25} + G_{p1} \left(\frac{32}{12} + \frac{48}{14} \frac{14}{12} (1 - P_{NH4}) \right) C_4, \end{aligned} \quad (10)$$

где k_2 – скорость газообмена, 1/сут; SOD – потребление кислорода донными осадками, гО₂/сут·м²; C_s – насыщающая концентрация кислорода.

Скорость газообмена полагается равной

$$k_2 = \frac{86400}{100D} \left(\frac{D_{ow}}{v_w} \right)^{2/3} \left(\frac{\rho_a}{\rho_w} \right)^{1/2} \frac{\kappa^{1/3}}{\Gamma} \sqrt{C_d} (100 * W),$$

где W – скорость ветра, м/с; D_{ow} – коэффициент диффузии кислорода в воде, см²/с; $\kappa = 0.4$ – постоянная Кармана; v_w – вязкость воды, см²/с; ρ_a, ρ_w – плотность воды и воздуха, соответственно, кг/м³; $\Gamma = 6.5$ – безразмерный коэффициент; C_d – коэффициент сопротивления.

Описание исходных данных. В работе использовались данные комплексного экологического мониторинга озерной системы Ялпуг-Кугурлуй, полученные в период с марта по декабрь 2001 года. Наблюдения выполнялись подекадно в четырех точках водоема в придонном и поверхностном слоях. Комплекс наблюдений включал в себя определение всех моделируемых компонент экосистемы в водной толще. Недостатком в организации мониторинга следует признать отсутствие информации об интенсивности и направленности потоков биогенных веществ в системе вода - донные отложения в течение года, а также об интенсивности поглощения кислорода донными осадками. Кроме того, за исключением р. Дунай, недостаточно освещена информацией изменчивость гидрохимического состава вод приходящих составляющих водного баланса (табл. 1).

В качестве входных «возмущающих» экосистему переменных рассматривается годовой ход температуры и прозрачности воды, потока фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР). Расчет потока коротковолновой радиации, проникающей сквозь водную поверхность, проводился по методике [9] на основе среднесуточных данных наблюдений за относительной влажностью воздуха и облачностью на ГМС «Болград» в 2001 г. Предполагалось, что ФАР составляет 50 % от полного потока радиации.

При калибровке параметров модели на основе данных экологического мониторинга использовались расчеты составляющих водного баланса оз. Ялпуг-Кугурлуй для 2001 года [7], который можно отнести к средневодным (обеспеченность $p=50\%$). Заметим, что в данной работе понятие водности года, в общем случае, не включает в себя характеристику стока реки Дунай.

Калибровка химико-биологического блока модели. В качестве базовых, в модели были использованы коэффициенты и параметры модели WASP5. Коррекция

этих параметров в рамках допустимого интервала их изменчивости [6, 8, 10, 11, 12] производилась путем сравнения кривых внутригодовой изменчивости элементов экосистемы, получаемых с помощью модели, и установленных из наблюдений в 2001 году.

Калибровка проводилась по следующей схеме. Первоначально внутригодовой ход минеральных форм азота и фосфора, а также растворенного кислорода задавался из данных наблюдений. Ежесуточные значения определялись путем линейной интерполяции между ближайшими точками наблюдений. Варьировались параметры и коэффициенты уравнений для фитопланктона, органического азота и фосфора, БПК с целью достижения максимально возможного соответствия между модельными кривыми и данными наблюдений. Затем последовательно включались в систему уравнения для минеральных форм азота и фосфора. Последним включалось уравнение баланса растворенного кислорода.

В ходе калибровки были приняты следующие решения, направленные на улучшение сходимости модельных результатов с данными натурных наблюдений. Модифицировано уравнение динамики биомассы фитопланктона введением зависимостей скорости роста и дыхания фитопланктона от температуры по типу использованному в [8]. Скорость гравитационного осаждения фитопланктона полагалась зависящей от температуры воды [12]. Вводились потоки аммонийного и нитратного азота из донных отложений и поток поглощения кислорода донными отложениями, изменяющиеся в течение года в зависимости от температуры воды, в соответствии с зависимостями: $Q_{NH_4}^{SED} = Q_{NH_4}^S \exp(0.1T)$, $Q_{NO_3}^{SED} = Q_{NO_3}^S \exp(0.1T)$, $SOD = Q_{O_2}^S \theta_{O_2}^{(T-20)}$, θ_{O_2} – температурный коэффициент.

Задавался переменный по знаку обмен фосфатами между водой и донными отложениями. Со 180 по 270 день года, когда в донных отложениях за счет интенсивного поступления органического вещества из водной колонки развиваются анаксийные условия, поток фосфатов полагался зависящим от температуры воды, согласно зависимости $Q_{PO_4}^{SED} = Q_{PO_4}^S \exp(0.1T)$, и направленным из донных отложений в водную колонку, а в остальное время года – из воды в донные отложения с интенсивностью $0,0005 \text{ гP/м}^2\text{сут}$, в результате образования нерастворимых гидроокисных соединений с железом и марганцем и увеличением сорбционной способности взвеси и донных отложений.

Таблица 1 – Концентрация биогенных веществ в водах составляющих приходной части водного баланса («внешних» источниках), используемая при расчетах

Гидрохимич. показатель	Осадки	Дренаж	Грунт сток	Боковой сток	р.Ялпуг	р. Дунай	к.Тоба-челло
$NH_4, \text{мгN/дм}^3$	0,00	0,69	0,65	0,62	0,36	0,35	0,20
$NO_3, \text{мгN/ дм}^3$	0,00	5,20	5,20	3,80	0,85	0,50	0,27
$PO_4, \text{мгP/ дм}^3$	0,00	1,80	1,80	0,30	0,045	0,05	0,43
$БПК_5, \text{мгO}_2/\text{дм}^3$	0,00	5,00	5,00	4,50	5,00	4,00	2,60
$O_2, \text{мгO}_2/\text{дм}^3$	10,0	6,00	2,00	6,00	6,00	8,00	8,00
$P_{org}, \text{мгP/дм}^3$	-	-	-	-	-	0,03	-
$N_{org}, \text{мгN/дм}^3$	-	-	-	-	-	1,00	-

Параметры и коэффициенты модели, принятые в результате калибровки по данным мониторинга 2001 года, приведены в табл. 2.

Результаты расчетов. Численные эксперименты с моделью проводились с целью исследования ее чувствительности и поведения при задании возмущающих систему факторов, отличных от использованных при калибровке модели.

Очевидно, что получить новое состояние или динамику исследуемой экосистемы можно лишь изменяя факторы, влияющие на ее функционирование. К числу таких факторов, в частности, относятся изменение составляющих водного баланса водоема; изменение качества вод составляющих приходной части водного баланса водоема.

Основным климатическим показателем, определяющим изменчивость составляющих водного баланса водоема и, в какой-то степени, концентрации в их водах биогенных и органических веществ, является водность года. Поэтому исследованию влияния именно этого фактора на качество вод экосистемы оз.Ялпуг-Кугурлуй и было уделено основное внимание в численных экспериментах.

Таблица 2 – Значения параметров и коэффициентов модели принятые в результате калибровки

Параметры	Значения	Единицы измерения	Параметры	Значения	Единицы измерения
k_{1c}	2.400	1/сут	k_{71}	0.100	1/сут
b_1	0.008	1/°C ²	θ_{71}	1.100	–
b_2	0.010	1/°C ²	f_{on}	0.800	–
T_{opt}	25.000	1/°C	k_{12}	0.075	1/сут
I_s	75.000	Вт/м ²	θ_{12}	1.080	–
K_{mN}	0.035	мгN/дм ³	K_{NIT}	2.000	мгO ₂ /дм ³
K_{mP}	0.005	мгP/дм ³	ϕ	0.500	–
k_{1R}	0.200	1/сут	k_{2D}	0.200	1/сут
T_R	25.000	°C	K_{NO3}	1.000	мгO ₂ /дм ³
b_R	0.069	1/°C	a_{oc}	2.670	мгO ₂ /мгC
k_{1D}	0.080	1/сут	k_D	0.170	1/сут
k_{1G}	0.100	дм ³ /мгC·сут	θ_D	1.047	–
v_{s4}^{20}	0.100	м/сут	K_{BOD}	1.000	мгO ₂ /дм ³
a_{pc}	0.025	мгP/мгC	f_{D5}	0.900	–
f_{op}	0.800	–	SOD	0.200	гO ₂ /м ² ·сут
k_{83}	0.170	1/сут	θ_{o2}	1.047	–
θ_{83}	1.080	–	Q_{NH4}^S	0.0017	гN/м ² ·сут
K_{mPc}	1.000	мгC/дм ³	Q_{PO4}^S	0.0004, -0.0005	гP/м ² ·сут
v_{s3}^{20}	0.100	м/сут	Q_{NO3}^S	0.0008	гN/м ² ·сут
f_{D8}	0.700	–	f_{D7}	0.900	–
a_{nc}	0.250	мгN/мгC	a_{c-chl}	40.000	мгC/мг-хл «а»

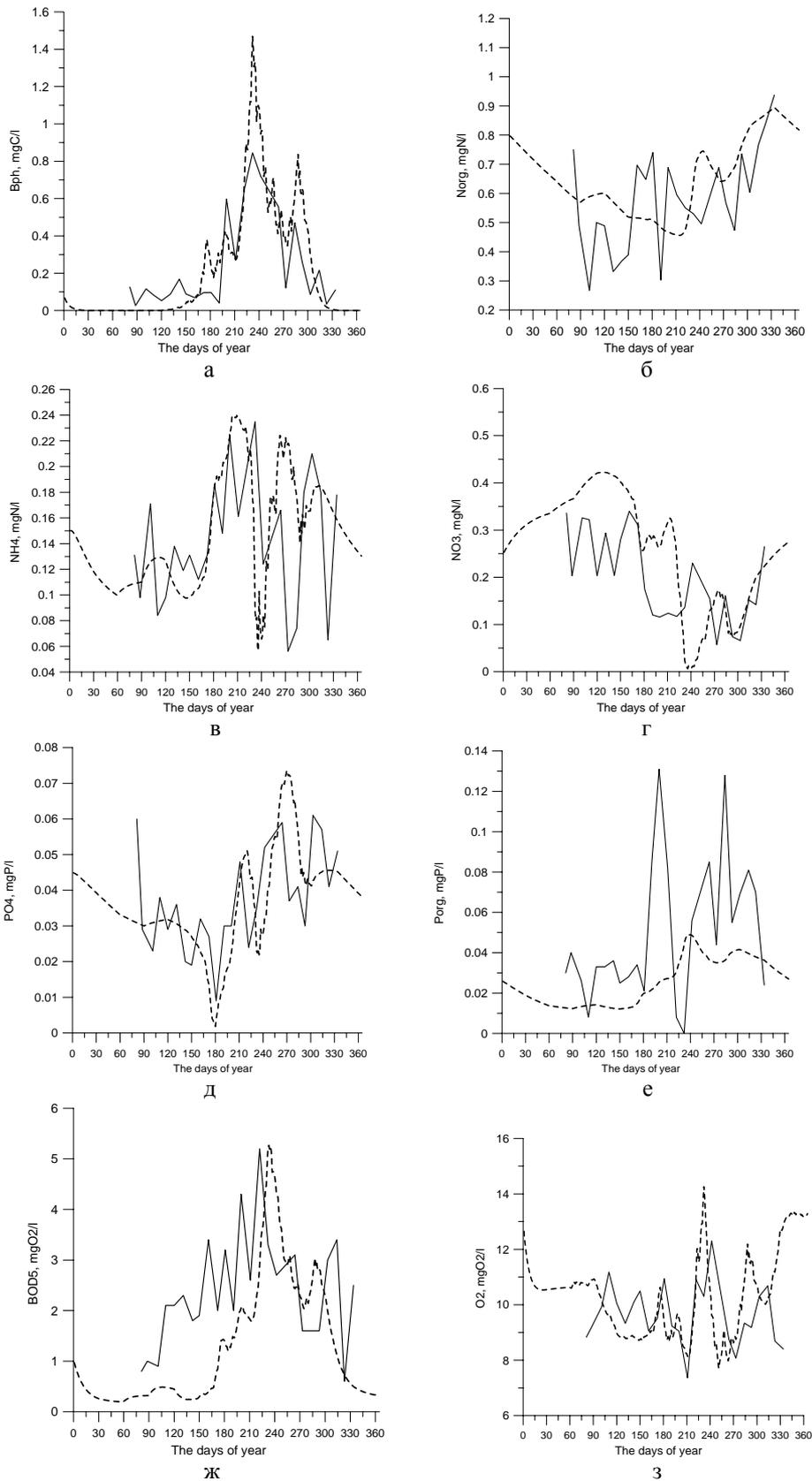


Рис.1 – Измеренные в 2001 году (сплошные кривые) и рассчитанные по модели (пунктирные) кривые годового хода биомассы фитопланктона (а), мгС/дм^3 , органических азота (б), мгN/дм^3 , и фосфора (е), мгP/дм^3 , аммонийного (в) и нитратного (г) азота, мгN/дм^3 , фосфатов (д), мгP/дм^3 , содержания БПК₅ (ж) и растворенного кислорода (з), $\text{мгO}_2/\text{дм}^3$.

Были проведены модельные расчеты для следующих сценариев водопользования: многоводный ($p=1\%$), средневодный ($p=50\%$) и маловодный ($p=75\%$) годы, с различными объемами ирригации и без нее, при отсутствии водообмена с р. Дунай, при различной степени загрязнения вод р. Дунай биогенными веществами.

На рис. 2 приведен годовой ход отдельных моделируемых компонент экосистемы для условий маловодного и средневодного годов. Видно, что в маловодный год, по сравнению с многоводным, значительно возрастает биомасса фитопланктона и косного органического вещества (по БПК₅). Рост первичной продукции и увеличение биомассы фитопланктона в вегетационный период маловодного года сопровождаются уменьшением концентрации минерального фосфора. Концентрация аммонийного азота возрастает на стадии роста биомассы фитопланктона и уменьшается в период ее максимума и спада.

Годовой ход отдельных переменных экосистемы оз. Ялпуг-Кугурлуй, полученный по модели с коэффициентами и параметрами приведенными в табл. 1, показан на рис. 1.

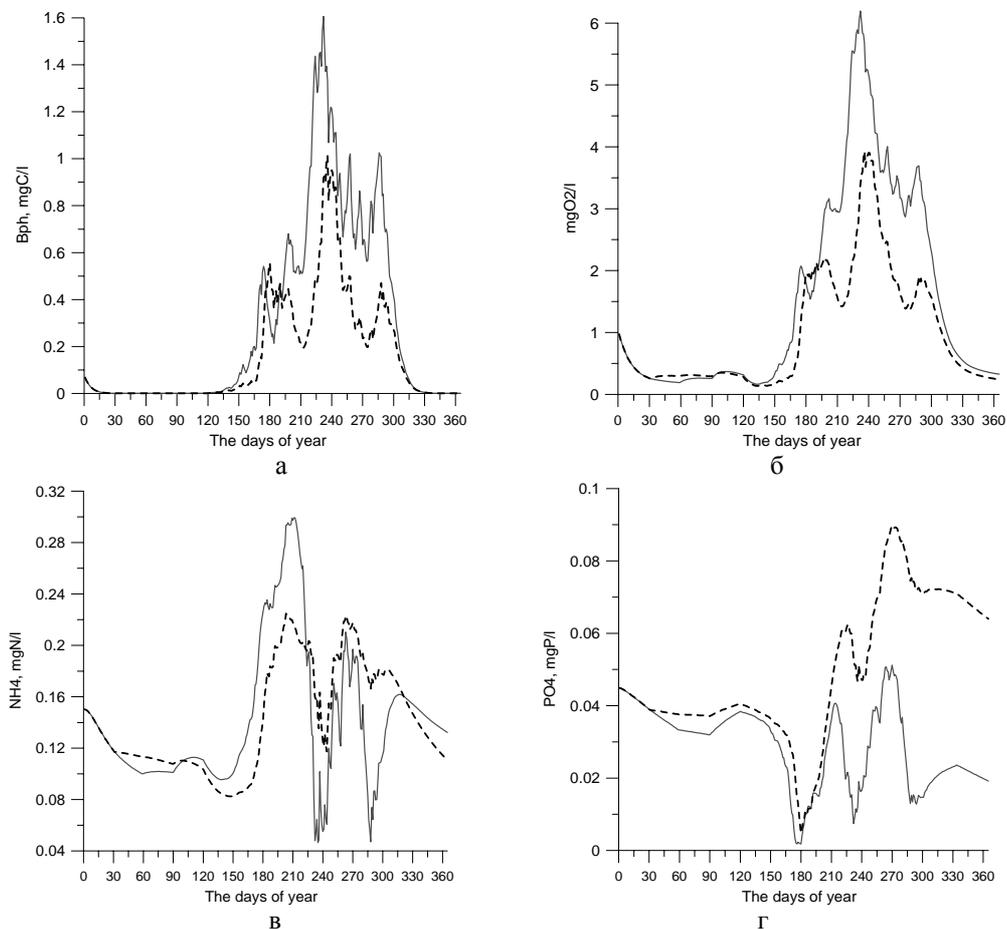


Рис. 2 – Рассчитанный по модели годовой ход биомассы фитопланктона (а), величины БПК₅ (б), содержания аммонийного азота (в) и фосфатов (г) для условий маловодного ($p=75\%$, сплошная кривая) и многоводного ($p=1\%$, пунктир) годов.

Динамика компонент экосистемы в условиях маловодного года не только для территории водосбора озер, но и для стока р. Дунай, когда из-за низкого уровня воды в реке невозможно наполнение водоема в весенний период (аналог 1990 г.), показана на рис. 3. Обращает на себя внимание скачкообразный рост биомассы фитопланктона и величины БПК₅ в июле. При этом исчерпывается весь запас минеральных форм азота и фосфора в водной толще. В дальнейшем, продукция фитопланктона поддерживается

только за счет регенерации минеральных форм азота и фосфора при биохимическом окислении органического вещества в воде и донных отложениях, скорость которой зависит от температуры воды. Поскольку удельная скорость минерализации органического фосфора существенно превышает удельную скорость минерализации органического азота, то минеральные формы азота становятся основным фактором лимитирующим первичную продукцию фитопланктона.

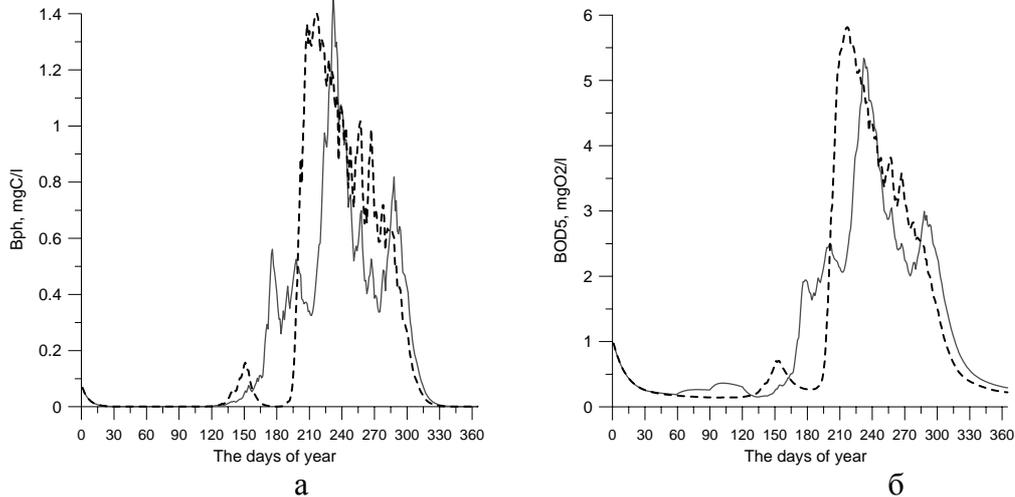


Рис. 3 – Рассчитанный по модели годовой ход биомассы фитопланктона (а) и БПК₅ (б) для условий маловодного 1990 года (пунктир), при отсутствии наполнения озера из р. Дунай в весенний период, и средневодного 2001 года (сплошная кривая).

На рис. 4 приведен годовой ход биомассы фитопланктона и показателя БПК₅ для условий 1985 года (средневодный) с учетом забора воды на орошение и при его отсутствии. Видно, что в первом случае концентрация органического вещества в водоеме достигает больших значений, чем во втором. Объясняется это тем, что при заборе воды из озер на орошение уменьшается объем и уровень воды в озере. В результате, поступающая дунайская вода, с повышенным содержанием биогенным веществ, в большей степени определяет их среднюю концентрацию в водоеме, что способствует увеличению первичной продукции органического вещества.

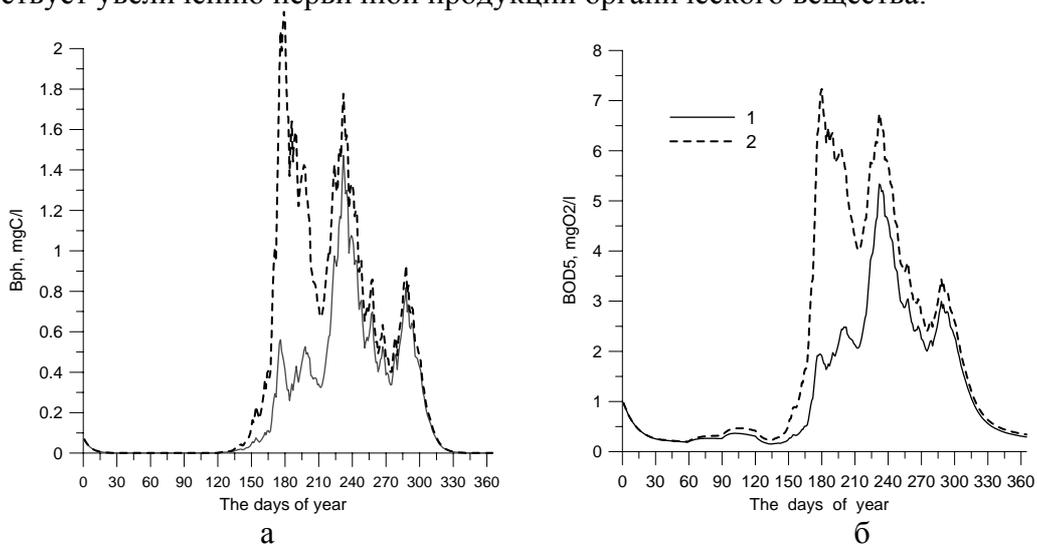


Рис. 4 – Рассчитанный по модели годовой ход биомассы фитопланктона (а), мгС/дм³, и величины БПК₅ (б), мгО₂/дм³ для условий средневодного 1985 г. с учетом ирригации (2) и без нее (1).

В численных экспериментах, результаты которых приведены выше, гидрохимический состав дунайских вод, поступающих в водоем в весенний период, в отношении моделируемых характеристик задавался неизменным и соответствовал данным мониторинга в период 2000 – 2007 гг. (табл.1). С целью исследования влияния качества вод р.Дунай на трофический статус оз.Ялпуг-Кугурлуй, дополнительно были проведены расчеты с использованием данных о содержании биогенных веществ в водах р.Дунай [1], осредненных за период 1988 – 2000 г. (табл.3).

Таблица 3 – Средние за период 1988 – 2000 гг. гидрохимические характеристики вод р.Дунай весной, в годы с различной величиной водного стока р.Дунай [1]

Гидрохимич. показатель	Маловодные	Средневодные	Многоводные
$\text{NH}_4, \text{мгN/дм}^3$	0,404	0,612	0,100
$\text{NO}_3, \text{мгN/дм}^3$	2,187	2,324	0,962
$\text{PO}_4, \text{мгP/дм}^3$	0,193	0,312	0,087
$\text{ПО}, \text{мгO}_2/\text{дм}^3$	9,17	4,09	9,43
$\text{O}_2, \text{мгO}_2/\text{дм}^3$	9,38	10,0	13,03
$\text{Porg}, \text{мгP/дм}^3$	0,132	0,031	0,028
$\text{Norg}, \text{мгN/м}^3$	0,354	1,713	3,484

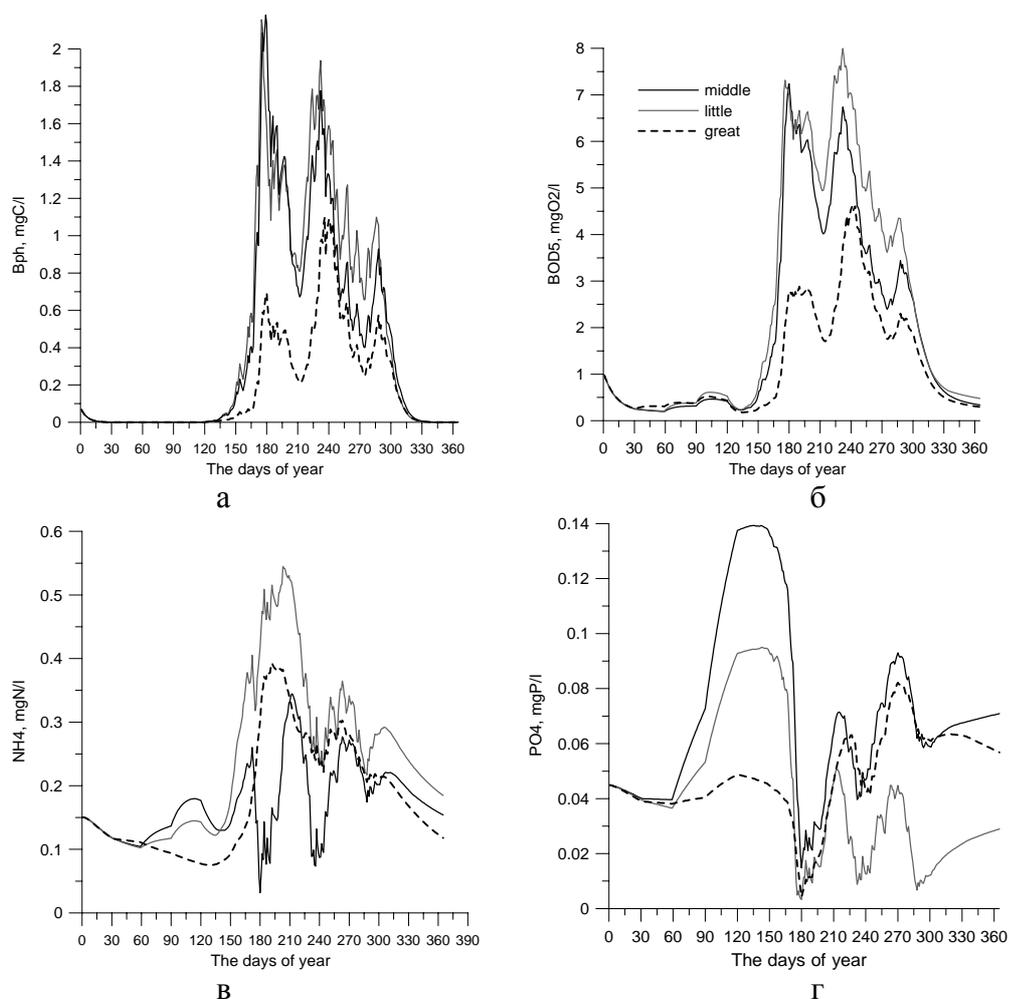


Рис. 5 – Рассчитанный по модели годовой ход биомассы фитопланктона (а), величины БПК₅ (б), содержания аммонийного азота (в) и фосфатов (г) для условий средневодного (p=75 %), маловодного (p=75 %) и многоводного (p=1 %) годов при повышенном содержании биогенных веществ в водах р.Дунай в период 1988 – 2000 гг.

На рис. 5 видно, что повышенное содержание биогенных веществ в дунайских водах приводит к значительному усилению пика биомассы фитопланктона и косного органического вещества в ранне-летний период года, который превышает позднее-летний пик, характерный для предыдущих расчетов. Причем динамика указанных характеристик в маловодный и средневодный год отличается незначительно, в отличие от многоводного года. Объясняется это тем, что количество биогенных веществ, поступающих с дунайскими водами, настолько велико, что их концентрация в водах озер не лимитирует первичную продукцию фитопланктона в маловодные и средневодные годы.

Выводы. Представленный модифицированный вариант точечной (0-мерной) в пространстве модели эвтрофикации вод достоверно отражает динамику моделируемых показателей качества вод экосистемы оз.Ялпуг-Кугурлуй в период летнего цветения фитопланктона.

Расчеты для различных сценариев водопользования показали, что при падении уровня и уменьшении объема вод озер в летний период маловодных лет увеличивается содержание органического вещества (живого и косного). При этом опасность заключается в том, что это органическое вещество вследствие гравитационного осаждения депонируется в донных отложениях и на его биохимическое разложение расходуется содержащийся в воде кислород. При неблагоприятном стечении обстоятельств потребление кислорода на биохимическое разложение этого органического вещества может превысить его поступление за счет фотосинтеза и газообмена с атмосферой в течении достаточно длительного отрезка времени, что приведет к развитию гипоксии в придонных слоях воды. Такие условия могут сложиться, например, при отсутствии ветров в августе – сентябре, когда деструкция органического вещества фитопланктона превышает его продукцию, а в донных отложениях в течении лета накоплен большой запас косного органического вещества.

Забор воды из озер в целях ирригации или сброс в р.Дунай способствуют уменьшению глубин и объема вод в водоеме, что приводит к усилению эвтрофирующей роли внешних источников биогенных веществ (составляющих приходной части водного баланса), увеличению средней в столбе воды биомассы фитопланктона и концентрации косного органического вещества.

Концентрация органического вещества, образующегося в оз.Ялпуг-Кугурлуй в летний период года, зависит также от концентрации биогенных веществ в водах реки Дунай в весенние месяцы, когда имеет место их поступление в водоем в больших объемах. Численные эксперименты с моделью показали, что высокое содержание биогенных веществ в водах р.Дунай в период наполнения водоема влечет за собой более раннее цветение фитопланктона и усиление пика его биомассы в начале лета, когда биомасса зоопланктона еще не достигла тех значений, чтобы сдерживать рост фитопланктона.

Максимальный уровень развития биомассы фитопланктона и косного органического вещества в водах озер в вегетационный период зависит от запасов минеральных форм биогенных элементов в водоеме, которые в значительной степени определяются количеством биогенных веществ, поступивших с дунайскими водами в период наполнения водоема. Важную роль играет также соотношение запасов минеральных форм азота и фосфора, от которого зависит какой биогенный элемент, в конечном итоге, будет лимитировать первичную продукцию органического вещества.

Список литературы

1. *Богатова Ю.И.* Закономерности формирования стока биогенных веществ реки Дунай (украинская часть) и его роль в евтрофировании северо-западной части Черного моря: Дис... канд. геогр. наук: 11.00.007/ Одес.гос.экол.ун-т.- Одесса, 2004. – 176 с.
2. *Гопченко Е.Д., Кузниченко С.Д.* О моделировании водно – солевого режима системы озер Кугурлуй-Ялпуг // Метеорологія, кліматологія та гідрологія.-2002.- № 46.- С.338 – 345.
3. *Гопченко Е. Д., Тучковенко Ю. С.* Математическая модель эвтрофикации Придунайских озер // Гидробиологический журнал. – Киев: НАН Украины, Ин-т гидробиологии.– 2005.– Т. 41, № 1. – С. 92 - 105.
4. *Кузниченко С.Д.* Водный и солевой режим системы озер Кугурлуй-Ялпуг в условиях их зарегулирования: Дис... канд. геогр. наук: 11.00.007/ Одес.гос.экол.ун-т.- Одесса, 2005. – 294 с.
5. *Лаврик В.И., Билык А.Н., Никифорович Н.А.* Определение оптимального водно-солевого режима озер Ялпуг и Кугурлуй с помощью математического моделирования // Гидробиологический журнал.- 1996.- Т.32, № 4.- С.103-109.
6. *Моделирование* процессов переноса и трансформации вещества в море/ Под ред. Ю.Н. Сергеева.-Л.: ЛГУ, 1979.-291 с.
7. *Придунайские озера: устойчивое восстановление и сохранение естественного состояния и экосистем.* Раздел: Модель водно-солевого режима и качества воды в озере Ялпуг-Кугурлуй // Отчет по проекту ЕС-ТАСИС WW/SCRE1 / No.1.- Одесса, 2002. – 134 с.
8. *Cerco C.F., Cole T.* User's Guide to the CE-QUAL-ICM. Three - Dimensional Eutrophication Model.-US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station.1995.- 150 p.
9. *Hess K.W.* MECCA Programs Documentation.-NOAA Technical Report NESDIS 46, Washington D.C., 1989, P.18-20.
10. *The water quality analysis simulation program, WASP5.* Part A: Model documentation.-USA, Environmental Research Laboratory, Athens, Georgia, 1993.-P.49-140.
11. *Tufford D.L., McKellar N.H.* Spatial and temporal hydrodynamic and water quality modeling analysis of a large reservoir on the South Carolina (USA) coastal plain. –Ecological modelling, N 114, 1999, P.137-173.
12. *User's Guide for RCA (Release 3.0).* Appendix A –HydroQual, Mahwah, New Jersey . – 2004. – P. 3 – 46.

Моделювання евтрофікації озер Ялпуг-Кугурлуй. Ю.С. Тучковенко, Аль-Субарі Алі Ахмед Салех.

Викладено математичну структуру моделі евтрофікації вод озер Ялпуг-Кугурлуй. Описано калібрування хіміко-біологічних параметрів моделі. Приведено результати числового моделювання внутрішньорічної динаміки хіміко-біологічних компонент екосистеми озер при різному поєднанні чинників, які її визначають.

Ключові слова: Придунайські озера, евтрофікація, моделювання

Modelling of eutrophication of Yalpug-Kugurluy lakes. Y.S. Tuchkovenko, Al-Subary Ali Ahmed Saleh

The mathematical structure of eutrophication model for Yalpug-Kugurluy lakes is stated. It is described calibration of the chemical and biological parameters of model. Results of verification and numerical simulations with model are given. Results of numerical modelling of intraannual dynamics of chemical and biological components of lakes ecosystem are given at a various combination of factors defining it.

Keywords: lakes of near-Dunay system, eutrophication, modelling