

**ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ**

Научная статья

УДК 504.45.058:627.8

doi: 10.17072/2079-7877-2023-2-92-104

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦВЕТЕНИЯ ВОДЫ В КУЙБЫШЕВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ  
В ГОДЫ С РАЗЛИЧНЫМ РЕЖИМОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА****Александр Владимирович Рахуба**Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт экологии Волжского бассейна РАН, г.Тольятти, Россия  
rahavum@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1770-3197>, Scopus Author ID: 57211205017,

Researcher ID: AAM-1020-2021, Author ID: 566048, SPIN-код: 2261-5511, IstinaresearcherID (IRID): 366627625

**Аннотация.** Статья посвящена изучению влияния динамики течений на цветение водорослей Куйбышевского водохранилища в условиях неустановившегося режима стока. Отмечается, что одним из способов улучшения экологического состояния водохранилища является снижение цветения цианобактерий путем увеличения проточности в период максимального прогрева воды. Гидродинамика водной среды рассматривается как регулирующей фактор, позволяющий снизить негативные последствия эвтрофирования и улучшить качество воды в водоеме. В результате проведенных автором натурных гидроэкологических наблюдений в летние периоды 2016 и 2017 гг., а также модельных расчетов динамики течений и пространственного распределения фитопланктона на акватории Куйбышевского водохранилища установлена зависимость показателя хлорофилла «а» (Chl *a*) от режима регулирования стока. Предложенная модель разработана на основе уравнений длинноволновой гидродинамики, известных как уравнения «мелкой воды», уравнений конвективного переноса и развития компонентов экосистемы, которая реализована в авторской программной среде «VOLNA». Модель построена для приплотинной акватории на регулярной прямоугольной сетке с шагом 200 м. По данным натурных наблюдений проведена верификация модели и выполнена оценка качества проведенных расчетов. В результате исследований установлено, что показатель биомассы фитопланктона (Chl *a*) связан со скоростью течения воды нелинейно и меняется по степенному закону. Проведенные исследования дают основания полагать, что интенсивность цветения цианобактерий во многом зависит не от водности года, а от внутригодового перераспределения стока.

**Ключевые слова:** фитопланктон, хлорофилл «а», качество воды, гидродинамика, гидрохимия, численная модель, Куйбышевское водохранилище

**Благодарность:** работа выполнена при финансовом обеспечении за счет средств Федерального бюджета в рамках темы: №1021060107175-5-1.6.19 (Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт экологии Волжского бассейна РАН).

**Для цитирования:** Рахуба А.В. Моделирование цветения воды в Куйбышевском водохранилище в годы с различным режимом регулирования стока // Географический вестник = Geographical bulletin. 2023. № 2(65). С. 92–104. doi: 10.17072/2079-7877-2023-2-92-104.

**ECOLOGY AND NATURE USE**

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2023-2-92-104

**MODELING OF WATER BLOOMS IN THE KUIBYSHEV RESERVOIR IN YEARS  
WITH DIFFERENT FLOW REGULATION REGIME****Alexander V. Rakhuba**

Samara Federal Research Scientific Center RAS

Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS, Togliatti, Russia

rahavum@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1770-3197>, Scopus Author ID: 57211205017,

ResearcherID: AAM-1020-2021, Author ID: 566048, SPIN-code: 2261-5511, IstinaresearcherID (IRID): 366627625

**Abstract.** The article studies the influence that the dynamics of currents have on algal blooms in the Kuibyshev Reservoir in the conditions of an unsteady flow regime. One of the ways to improve the ecological condition of the reservoir is to reduce cyanobacteria blooms by increasing the flow rate during the maximum warming of the water. The hydrodynamics of the aquatic environment is considered as a regulatory factor that reduces the negative effects of eutrophication and improves the quality of water in the reservoir. The author performed full-scale hydroecological observations in the summer periods of 2016 and 2017 and made model calculations of the dynamics of currents and spatial distribution of phytoplankton in the water area of the Kuibyshev Reservoir. As a result, the dependence of the chlorophyll *a* index (Chl *a*) on the flow regulation regime was established. The proposed model is based on the equations of long-wave hydrodynamics, known as the shallow-water equations, the equations of convective transport and development of the components of the ecosystem, which is implemented in the author's software environment VOLNA. The model is constructed for the near-dam water area on a regular rectangular grid with a step of 200 m. The



## Экология и природопользование

Рахуба А.В.

model was verified on the basis of data from field observations, and the quality of the calculations performed was evaluated. It has been found that the phytoplankton biomass index (Chl *a*) is related to the water flow velocity non-linearly and varies according to a power law. The conducted studies give reason to believe that the intensity of cyanobacteria blooms largely depends not on the water content of the year, but on the intra-annual redistribution of runoff.

**Keywords:** phytoplankton, chlorophyll *a*, water quality, hydrodynamics, hydrochemistry, numerical model, Kuibyshev Reservoir

**Acknowledgment.** the research was funded from the federal budget under topic No. 1021060107175-5-1.6.19 (Samara Federal Research Scientific Center RAS, Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS).

**For citation:** Rakhuba A.V. (2023). Modeling of water blooms in the Kuibyshev Reservoir in years with different flow regulation regime. *Geographical Bulletin*. No. 2(65). Pp. 92–104. doi: 10.17072/2079-7877-2023-2-92-104.

**Введение**

Одной из важных проблем пресноводных водоемов в условиях современного потепления климата является массовое цветение фитопланктона, причем токсичного его вида – цианобактерий. До создания Куйбышевского водохранилища, в речных условиях, фитопланктон в основном был представлен диатомовыми и зелеными водорослями. Цианобактерии почти отсутствовали [6; 7]. Последующее зарегулирование стока на Волге привело к серьезным изменениям функционирования речных биоценозов. В период максимального прогрева водохранилища стало наблюдаться значительное увеличение общей биомассы фитопланктона, в том числе обилия цианобактерий, доля которых в составе фитопланктона на сегодняшний день может достигать 90% [14; 21]. Такой неконтролируемый рост биомассы водорослей обусловил ухудшение качества воды, увеличение органических и токсических веществ, снижение растворенного кислорода в водоеме. В условиях современного потепления климата и антропогенного воздействия на водоемы изучение закономерностей развития водорослей является актуальной задачей для целого ряда научных исследований в области экологии и природопользования [6–8; 14; 15; 20–24; 28].

Стоит отметить, что реальных способов оздоровления крупных водоемов, связанных со снижением негативного воздействия цветения цианобактерий на качество воды, не так много, поскольку основные лимитирующие факторы трудно поддаются регулированию либо проблема целенаправленного воздействия на экосистему связана со значительными материальными затратами. Прежде всего, в естественных условиях развитие водорослей лимитируется температурой воды, концентрацией биогенных веществ, гидродинамическим режимом и в меньшей степени другими факторами. Среди них особый интерес для водохранилищ представляет фактор регулирования скорости течения путем внутригодового перераспределения стока, поскольку интенсивность развития цианобактерий снижается при увеличении проточности водоемов.

Куйбышевское водохранилище является крупным проточным водоемом с замедленным водообменом и относится к эвтрофному типу. Очевидно, для количественной оценки действия тех или иных факторов, влияющих на цветение и качество его вод, актуальны не только способы мониторинговых исследований, но и методы математического моделирования, которым посвящено немало теоретических и прикладных научных работ [1–3; 5; 16–18; 25–27; 31]. Важными преимуществами использования численного моделирования являются получение полей пространственного распределения моделируемых компонентов при недостатке данных натурных наблюдений на обширной акватории водоема, выявление общих закономерностей и прогнозирование состояния экосистемы при различных сценариях антропогенных и климатических изменений.

Цель данной работы – оценить влияние динамики течений на процессы цветения воды в годы с различным режимом регулирования стока Куйбышевского водохранилища.

**Материалы и методы**

В качестве объекта исследования была выбрана нижняя приплотинная часть Куйбышевского водохранилища, которая включает в себя акватории Ульяновского, Новодевичьего, Приплотинного плесов и акватории Черемшанского и Усинского заливов (рис. 3). Пространственное распределение фитопланктона на акватории этих участков

водохранилища изучалось на 9 станциях в период с 7 по 31 июля 2016 г. и на 22 станциях в период с 25 июля по 3 августа 2017 г. (рис. 4, а). Пробы воды для определения хлорофилла «а» (Chl a), характеризующего величину биомассы фитопланктона, отбирались с НИС «Биолог» батометром «Рутнера».

Для моделирования полей цветения фитопланктона и оценки влияния на его развитие режима стокового течения была разработана компьютерная 2D-пространственная модель экосистемы Куйбышевского водохранилища, реализованная в программном комплексе «ВОЛНА» [17; 18]. Данная математическая модель представляет собой комплекс моделей, в которую входят гидродинамический и термобيوгидрохимический блоки, описывающие динамику течений и взаимодействие между компонентами экосистемы.

**Гидродинамический блок** модели представлен системой уравнений теории длинных волн, так называемых уравнений «мелкой воды» [5]. Система уравнений модели в двумерной постановке имеет следующий вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - lv = c_a \frac{\rho_a}{\rho H} W_{(x)} |W| - \frac{f_{\text{дно}}}{H} u |V| + K_L \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + lu = c_a \frac{\rho_a}{\rho H} W_{(y)} |W| - \frac{f_{\text{дно}}}{H} v |V| + K_L \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y}, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial[(h+\zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(h+\zeta)v]}{\partial y} = 0, \tag{3}$$

где  $u(x,y,t)$  и  $v(x,y,t)$  – усредненные по глубине продольная и поперечная скорости течения, м/с;  $h(x,y,t)$  – невозмущенная глубина, м;  $\zeta(x,y,t)$  – уровень свободной поверхности, м;  $x$  и  $y$  – декартовы координаты расчетной сетки, м;  $H=(h+\zeta)$  – полная глубина, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $l = 2\omega \sin(\psi)$  – параметр Кориолиса ( $\omega = 2\pi/\text{сут}$  – угловая скорость вращения Земли, рад/сут;  $\psi$  – географическая широта, рад);  $c_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления водной поверхности, б/р;  $W_{(x)}$  и  $W_{(y)}$  – компоненты составляющей скорости ветра, м/с;  $W$  – результирующий вектор скорости ветра, м/с;  $V$  – результирующий вектор скорости течения, м/с;  $f_{\text{дно}} = \frac{gn^2}{H^3}$  – коэффициент придонного трения, б/р;  $n$  – коэффициент шероховатости, б/р;  $K_L$  – горизонтальный турбулентный обмен, м<sup>2</sup>/с;  $P_a$  – атмосферное давление, кг/(м·с<sup>2</sup>).

Уравнения гидродинамики (1), (2) и (3) решались при задании следующих граничных условий для  $u$ ,  $v$ ,  $\zeta$ . На твердых боковых границах нормальная компонента скорости  $u_n$  равна нулю. Для тангенциальной компоненты  $u_\tau$  вводится квадратичный закон трения, аналогичный придонному. Таким образом, граничное условие на твердых боковых границах имеет вид:

$$u_n = 0, K_L \frac{\partial u_\tau}{\partial n} = -f_b u_\tau |V|, \tag{4}$$

где  $f_b$  – безразмерный коэффициент бокового трения, который рассчитывается аналогично  $f_{\text{дно}}$ .

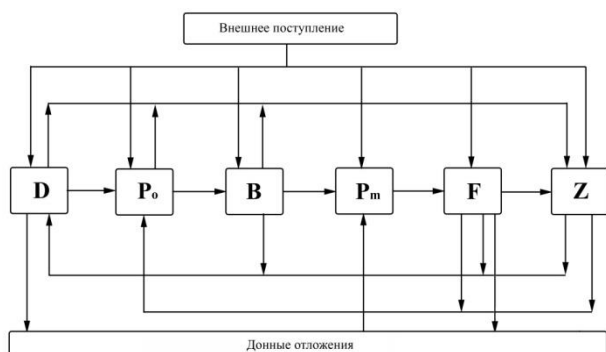


Рис. 1. Схема термобيوгидрохимического блока модели  
Fig. 1. Diagram of the thermobiohydrochemical block of the model

На открытых боковых границах задаются граничные условия разных типов. Для границ, через которые вода поступает в расчетную область, задается нормальная компонента скорости и уровня воды как функция времени:  $u_n = f(t)$ ,  $u_\tau = 0$  и  $\zeta = \zeta(t)$ . Для границ, через которые вода вытекает из расчетной области, задается линейная зависимость между нормальной компонентой скорости и уровнем  $u_n = \pm(g/h)^{1/2} \zeta$ ,  $u_\tau = 0$  [5].

**Термобιοгидрохимический блок** модели Куйбышевского водохранилища представлен уравнениями теплопроводности и конвекции поля температуры воды; конвекции и турбулентного переноса и роста клеток фитопланктона, бактериопланктона, зоопланктона; конвекции и турбулентного переноса частиц детрита; конвективно-диффузионного переноса и трансформации растворенного органического и минерального фосфора (рис. 1).

Система уравнений имеет следующий вид:

$$\frac{\partial C_j}{\partial t} + u \frac{\partial C_j}{\partial x} + v \frac{\partial C_j}{\partial y} = S, \quad (5)$$

где  $j$  – счетчик для рассматриваемых компонентов модели.

Для уравнения теплопроводности  $j=1$  ( $C_1 \rightarrow T$ ):

$$S = A \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{q_a - q_d}{c_p \rho H}, \quad (6)$$

Для уравнения биомассы фитопланктона  $j=2$  ( $C_2 \rightarrow F$ ):

$$S = E_f \left( \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \right) + (U_f - L_f - M_f)F - \frac{w_f F}{H} - G_f Z, \quad (7)$$

Для уравнения концентрации минерального фосфора  $j=3$  ( $C_3 \rightarrow P_m$ ):

$$S = E_p \left( \frac{\partial^2 P_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial y^2} \right) + L_b B - U_f F + \frac{Q_p}{H}, \quad (8)$$

Для уравнения биомассы зоопланктона  $j=4$  ( $C_4 \rightarrow Z$ ):

$$S = E_z \left( \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} \right) + (U_z - L_z - M_z)Z, \quad (9)$$

Для уравнения биомассы бактериопланктона  $j=5$  ( $C_5 \rightarrow B$ ):

$$S = E_b \left( \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right) + (U_b - L_b - M_b)B - G_b Z, \quad (10)$$

Для уравнения концентрации органического фосфора  $j=6$  ( $C_6 \rightarrow P_o$ ):

$$S = E_o \left( \frac{\partial^2 P_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_o}{\partial y^2} \right) + K_d D + L_f F + L_z Z - U_b B - U_p Z, \quad (11)$$

Для уравнения концентрации детрита  $j=7$  ( $C_7 \rightarrow D$ ):

$$S = E_d \left( \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} \right) + M_f F + M_b B + M_z Z - K_d D - \frac{w_d D}{H} - U_d Z. \quad (12)$$

Параметры и коэффициенты модели:

$$U_f = U_f \max f(T, I, NP) \left( 1 + \frac{F}{d_1 P_m} \right), \quad (13) \quad L_f = R_f U_f, \quad (14)$$

$$R_f = g_1 \left( 1 + \frac{F}{d_1 P_m} \right), \quad (15) \quad M_f = v_1 + v_2 F / U_f, \quad (16)$$

$$f(T)_f = \exp(-a_f (T - T_{opt})^2), \quad (17) \quad f(I) = \frac{I}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right), \quad (18)$$

$$f(NP) = 1 - \exp(-a_n N_m / P_m), \quad (19) \quad G_f = U_z \max f(T)_z \left( 1 + \frac{Z}{d_3 F} \right), \quad (20)$$

$$U_b = U_b \max f(T)_b \left( 1 + \frac{B}{d_2 P_o} \right), \quad (21) \quad f(T)_b = \exp(-a_b (T - T_{opt})^2), \quad (22)$$

$$L_b = R_b U_b, \quad (23) \quad R_b = \frac{a_3 U_b}{(1 + a_4 U_b)} + (1 - a_3 / a_4), \quad (24)$$

$$M_b = v_3 + v_4 B / U_b, \quad (25) \quad G_b = U_z \max f(T)_z \left( 1 + \frac{Z}{d_4 B} \right), \quad (26)$$

$$U_z = U_z \max f(T)_z \left( 1 + \frac{Z}{poolZ} \right), \quad (27) \quad poolZ = d_3 F + d_4 B + d_5 D + d_6 P_o, \quad (28)$$

## Экология и природопользование

Рахуба А.В.

$$L_z = R_z U_z, \quad (29)$$

$$R_z = \frac{a_5 U_z}{(1+a_6 U_z)} + (1 - a_5/a_6), \quad (30)$$

$$M_z = v_5 + v_6 Z / U_z, \quad (31)$$

$$f(T)_z = tz_1 + tz_2(\exp(tz_3 T) - 1) / (1 + tz_4 \exp(tz_3 T)) \quad (32)$$

$$U_p = U_z \max f(T)_z / \left(1 + \frac{Z}{d_6 P_o}\right), \quad (33)$$

$$U_d = U_z \max f(T)_z / \left(1 + \frac{Z}{d_5 D}\right), \quad (34)$$

Поток минерального фосфора из донных отложений полагается зависящим от температуры воды [32]:

$$Q_p = Q_p^{22} \exp(a_p(T - 22)), \quad (35)$$

где  $Q_p^{22}$  – поток минерального фосфора, экспериментально определенный на Куйбышевском водохранилище при температуре воды 22 °С [19]. Значение температурного коэффициента  $a_p$  подбиралось исходя из величины среднего потока за вегетационный сезон, равного 0,0028 гР/(м<sup>2</sup>·сут) [4]. Зависимость (35) обусловлена тем, что при прогреве воды на границе вода-дно снижается содержание кислорода и возрастает поступление минерального фосфора из донных отложений в водную толщу.

Скорость гравитационного оседания фитопланктона  $w_f$  и частиц детрита  $w_d$  полагается зависящей от температуры воды [32]:

$$w_f = w_f^{20} a_e^{(T - 20)}, \quad (36)$$

$$w_d = w_d^{20} a_d^{(T - 20)}. \quad (37)$$

где  $T$ ,  $T_{opt}$  – среднесуточная и оптимальная для роста микроорганизмов соответственно температуры воды, °С;  $I$ ,  $I_{opt}$  – средний за день и оптимальный для фотосинтеза фитопланктона световой поток на поверхности воды, Вт/м<sup>2</sup>;  $P_m$ ,  $P_o$ ,  $F$ ,  $B$ ,  $Z$  и  $D$  – концентрации, соответственно, растворенного минерального и органического фосфора, биомасс фитопланктона, бактерий, зоопланктона и детрита, мгР/л;  $C_j$  – концентрация рассчитываемых в модели компонентов ( $j=1, 2, 3, 4, 5, 6$  и  $7$  для  $T$ ,  $F$ ,  $P_m$ ,  $Z$ ,  $B$ ,  $P_o$  и  $D$ );  $U_f$ ,  $L_f$ ,  $M_f$  – удельные скорости потребления форм  $P$ , выделения продуктов метаболизма и отмирания, соответственно, у фитопланктона, сут<sup>-1</sup>;  $U_b$ ,  $L_b$ ,  $M_b$  – удельные скорости потребления форм  $P$ , выделения продуктов метаболизма и отмирания, соответственно, у бактерий, сут<sup>-1</sup>;  $U_z$ ,  $L_z$ ,  $M_z$  – удельные скорости потребления форм  $P$ , выделения продуктов метаболизма и отмирания, соответственно, у зоопланктона, сут<sup>-1</sup>;  $U_{fmax}$ ,  $U_{bmax}$ ,  $U_{zmax}$  – максимальные удельные скорости, соответственно, потребления форм  $P$  фитопланктоном, бактериями и зоопланктоном, сут<sup>-1</sup>;  $f(T)_f$ ,  $f(T)_b$ ,  $f(T)_z$ ,  $f(I)$  – функции коррекции значений скорости потребления  $U$  на температуру и освещенность;  $f(NP)$  – функция отношения растворенного неорганического азота к минеральному фосфору и  $a_n$  – коэффициент этой функции, б/р;  $U_p$ ,  $U_d$  – удельные скорости потребления органического фосфора и детрита зоопланктоном, сут<sup>-1</sup>;  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$  – коэффициенты предпочтения в потреблении питания, б/р;  $a_3, a_4, a_5, a_6, g_1$  – коэффициенты выделительной активности, б/р;  $a_d, a_e, a_p, a_f, a_b, tz_1, tz_2, tz_3, tz_4$  – температурные коэффициенты, б/р;  $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6$  – коэффициенты для описания потерь фитопланктона на отмирание, сут<sup>-1</sup>;  $G_f, G_b$  – удельная скорость потребления фитопланктона и бактерий зоопланктоном, сут<sup>-1</sup>;  $w_f^{20}$ ,  $w_d^{20}$  – скорость гравитационного оседания фитопланктона и детрита при температуре воды 20 °С, м/сут;  $q_a, q_d$  – кинематические потоки тепла на поверхности водоема и на дне, Вт/м<sup>2</sup>;  $c_p$  – удельная теплопроводность воды, Вт·с/кг·°С;  $A_L, E_f, E_b, E_z, E_o, E_d, E_p$  – горизонтальный турбулентный обмен для компонентов модели, м<sup>2</sup>/с.

Уравнение (5) решается при граничных условиях на боковой поверхности типа:

$$\varphi C + E \frac{\partial C}{\partial n} = \theta(x, y, t), \quad (38)$$

где  $n$  – нормаль к боковой поверхности расчетной области.

При этом  $\varphi=\theta=0$  соответствует случаям для непроницаемых границ и открытых границ, через которые вода вытекает из расчетной области. На открытых боковых границах, через которые вода втекает в расчетную область, задается функция времени  $C=f(t)$ .

Расчет компонентов экосистемы в модели осуществляется в единицах фосфора с использованием известных зависимостей (14) – (34) [1–3; 12]. Для сопоставления рассчитанного по модели компонента фитопланктона ( $F$ ) и измеренного показателя биомассы –  $Chl\ a$  использовалось экспериментально установленное значение переводного коэффициента  $Chl\ a/F$ , которое для фитопланктона Куйбышевского водохранилища составило 1,43. Значения параметров модели были получены в ходе процедуры калибровки и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели  
The model parameters

Обозначения	Единица измерения	Значение	Обозначения	Единица измерения	Значение
$U_{fmax}$	сут <sup>-1</sup>	0,8	$tz_1$	б/р	0,019
$U_{bmax}$	сут <sup>-1</sup>	0,9	$v_1$	сут <sup>-1</sup>	0
$U_{zmax}$	сут <sup>-1</sup>	0,8	$v_2$	м <sup>3</sup> /гР/сут <sup>2</sup>	0,00001515
$d_1$	б/р	0,18	$v_3$	сут <sup>-1</sup>	0
$d_2$	б/р	0,4	$v_4$	м <sup>3</sup> /гР/сут <sup>2</sup>	0,0000045
$d_3$	б/р	0,11	$v_5$	сут <sup>-1</sup>	0
$d_4$	б/р	0,4	$v_6$	м <sup>3</sup> /гР/сут <sup>2</sup>	0,0000045
$d_5$	б/р	0,15	$q_a$	Вт/м <sup>2</sup>	700
$d_6$	б/р	0,15	$q_d$	Вт/м <sup>2</sup>	100
$a_3$	б/р	0,02	$c_p$	Вт·с/кг·°С	4183
$a_4$	б/р	0,1	$n$	б/р	0,02
$a_5$	б/р	0,05	$w_f^{20}$	м/сут	0,05
$a_6$	б/р	0,10	$w_d^{20}$	м/сут	0,1
$g_1$	б/р	0,98	$K_L$	м <sup>2</sup> /с	300
$a_f$	°С <sup>-2</sup>	0,01	$A_L$	м <sup>2</sup> /с	5
$a_b$	°С <sup>-2</sup>	0,01	$E_b$	м <sup>2</sup> /с	5
$a_n$	б/р	0,05	$E_f$	м <sup>2</sup> /с	5
$a_d$	б/р	1,08	$E_z$	м <sup>2</sup> /с	5
$a_e$	б/р	1,05	$E_o$	м <sup>2</sup> /с	5
$a_p$	°С <sup>-1</sup>	0,11	$E_p$	м <sup>2</sup> /с	5
$tz_1$	б/р	0	$T_{opt}$	°С	25
$tz_2$	б/р	0,019	$I_{opt}$	Вт/м <sup>2</sup>	600
$tz_3$	°С <sup>-1</sup>	0,587	$Q_p^{22}$	гР/м <sup>2</sup> /сут	0,006

Акватория Куйбышевского водохранилища была разделена на 47808 расчетных узла прямоугольной сетки с шагом 200 м. Модельный шаг по времени задавался равным 5 с. Расчет полей сезонной динамики переменных модели  $u$ ,  $v$ ,  $\zeta$ ,  $T$ ,  $F$ ,  $P_m$ ,  $P_o$ ,  $Z$ ,  $D$  осуществлялся после выхода модели гидродинамики (1) – (3) на стационарный режим расчета спустя 300 тыс. сек расчетного времени. Начальные значения полей  $T$ ,  $F$ ,  $P_m$ ,  $P_o$ ,  $Z$ ,  $D$  характеризовались фоном  $T=T_0(x,y)$ ,  $F=F_0(x,y)$ ,  $P_m=P_{m0}(x,y)$ ,  $P_o=P_{o0}(x,y)$ ,  $Z=Z_0(x,y)$ ,  $D=D_0(x,y)$  при  $t=0$ .

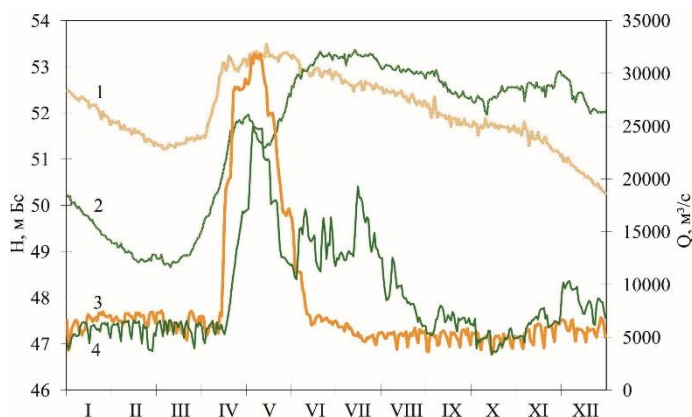


Рис. 2. Внутригодовой ход уровня воды (H): 2016 г. (1), 2017 г. (2) и расхода воды (Q): 2016 г. (3), 2017 г. (4) в приплотинной части Куйбышевского водохранилища

Fig. 2. Intra-annual variations of the water level (H): 2016 (1), 2017 (2) and water consumption (Q): 2016 (3), 2017 (4) in the river in the dam part of the Kuibyshev Reservoir

## Экология и природопользование

Рахуба А.В.

Расчеты проводились при задании среднесуточных расходов воды на открытой границе поступления Волжских вод в створе г. Ульяновск (рис. 2) [10] и открытых береговых границах притоков Черемшан и Уса [13].

Исходные концентрации растворенного органического и неорганического фосфора, биомасс фитопланктона, бактерий, зоопланктона и детрита в акватории, на входном Волжском створе (г. Ульяновск) и боковых границах впадения притоков Черемшан и Уса задавались по данным экспедиционных исследований и из литературных источников [9; 11]. В табл. 2 представлены средние за сезон значения переменных модели термобигидрохимического блока на открытых границах расчетной области.

Таблица 2

Значения исходных переменных модели экосистемы, задаваемые на входном створе потока Волжских вод и в притоках Куйбышевского водохранилища

The initial variables of the ecosystem model set at the inlet of the Volga water flow and in the tributaries of the Kuibyshev Reservoir

Сезон	$P_{мин}$ , гР/м <sup>3</sup>	$P_{орг}$ , гР/м <sup>3</sup>	Биомасса фито- планктона, гР/м <sup>3</sup>	Биомасса бактерий, гР/м <sup>3</sup>	Биомасса зоопланктона, гР/м <sup>3</sup>	Детрит, гР/м <sup>3</sup>
<i>Входной створ потока Волжских вод (г. Ульяновск)</i>						
Весна	0,039	0,048	0,010	0,008	0,004	0,030
Лето	0,043	0,033	0,035	0,005	0,010	0,042
Осень	0,065	0,028	0,001	0,004	0,001	0,035
<i>Притоки: Черемшан и Уса</i>						
Весна	0,060	0,008	0,001	0,003	0,002	0,032
Лето	0,020	0,021	0,020	0,006	0,015	0,038
Осень	0,035	0,005	0,001	0,003	0,002	0,022

Расчет притока тепла на водное зеркало и начальные значения температуры воды водохранилища задавались на основе данных Тольяттинской ГМО и результатов наблюдений в период водной экспедиции.

### Результаты и обсуждение

В Волжско-Камском каскаде ГЭС режим эксплуатации Куйбышевского водохранилища характеризуется сезонным регулированием суммарного стока Волги и Камы. За весенний период водохранилище наполняется до отметки нормального подпорного уровня (НПУ) и затем, в период летне-осенней и зимней межени, сбрасывается до минимальных отметок (рис. 2). В зависимости от интенсивности сработки водохранилища в разные годы режим течений на акватории может значительно различаться. Сравнение расходов воды на Жигулевской ГЭС в 2016 и 2017 гг. показывает, что при приблизительно одинаковом объеме среднегодового стока (270 км<sup>3</sup>/год) за период летней межени (с июня по август) средний расход воды в 2017 г. был в 2 раза выше, чем в 2016 г. (рис. 2). Среднемесячный расход воды в июле 2016 г. составил 5245 м<sup>3</sup>/с, а в 2017 г. – 14144 м<sup>3</sup>/с (табл. 3). В результате, столь существенное перераспределение водного стока внутри года привело к изменению динамики течений и повлияло на развитие фитопланктонного сообщества.

В летний период, когда наступает пик прогрева водной толщи, в Куйбышевском водохранилище отмечается обилие цианобактерий, вызывающих “цветение” воды. По данным экспедиционных исследований, проведенных в июле-августе 2016 г., доля цианобактерий в фитопланктонном сообществе составляла более 90%. В 2017 года на фоне двукратного увеличения стока в этот же период доля цианобактерий снизилась и составила 37%. При этом средняя концентрация Chl *a* в 2017 г. по сравнению с 2016 г. уменьшилась в 4 раза (табл. 3). Следует отметить, что до зарегулирования Волги скорость течения в летний период изменялась от 0,8 до 1,2 м/с, а фитопланктон был представлен в основном диатомовыми и зелеными водорослями [6]. В период эксплуатации Куйбышевского водохранилища скорость течения снизилась до 0,001–0,3 м/с и в составе фитопланктона появилось значительное количество цианобактерий. В работах К.А. Гусевой и А.Д. Приймаченко [6; 7] отмечается,

## Экология и природопользование

Рахуба А.В.

что преобладание цианобактерий в планктоне Куйбышевского водохранилища наблюдается при скоростях течения, не превышающих 0,1 м/с.

Таблица 3

Среднемесячные значения показателя Chl *a*, температуры воды, водообмена и расхода воды на стационарном пункте наблюдений Жигулевского гидроузла (“н/о” – не обнаружено)

The average monthly values of the Chl *a* concentration, water temperature, water exchange and water consumption at the stationary observation point of the Zhiguli Hydroelectric Power Plant (“н/о” – not found)

Год	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<i>Chl a, мг/м³</i>												
2016	н/о	н/о	н/о	0,13	1,04	3,11	10,90	4,58	2,02	0,60	0,63	н/о
2017	н/о	н/о	0,13	0,63	0,46	0,35	0,72	0,70	0,44	0,37	н/о	н/о
<i>Температура воды, °C</i>												
2016	0,1	0,1	0,1	1,2	11,6	17,2	19,3	22,9	8,0	6,1	4,4	0,1
2017	0,0	0,2	0,1	2,0	9,0	13,6	18,6	22,0	18,8	11,4	5,6	0,6
<i>Расход воды, м³/с</i>												
2016	6391	6861	6322	17256	24129	7437	5245	5077	5113	4731	5734	5546
2017	5667	5615	5944	9083	18405	13779	14144	8140	6598	4719	7311	7943
1958-2017	5999	6051	5765	10441	19803	8760	6473	5914	5646	5502	5793	6145
<i>Период водообмена, сут</i>												
2016	105	98	106	39	28	90	128	132	131	142	117	121
2017	118	120	113	74	36	49	47	82	102	142	92	85
1958-2017	112	111	116	64	34	77	104	114	119	122	116	109

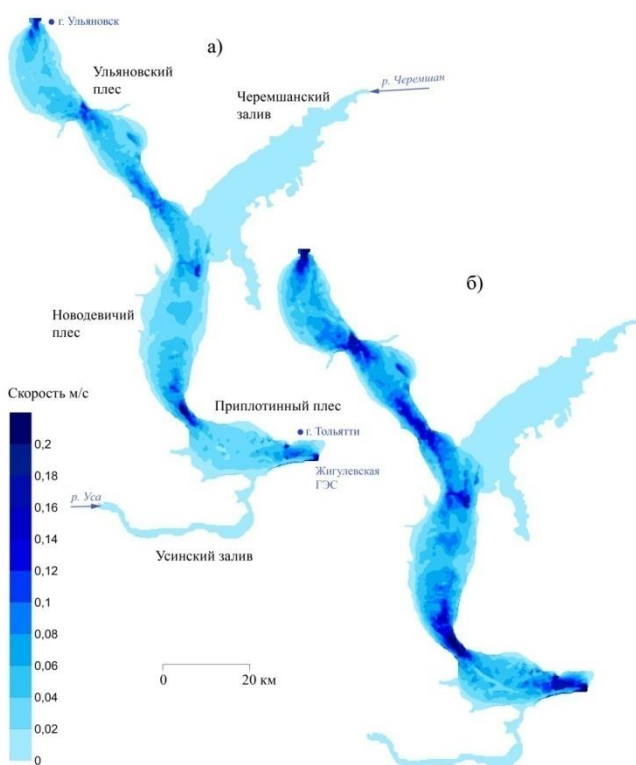


Рис. 3. Модельный расчет распределения скорости течения в приплотинной акватории Куйбышевского водохранилища в период летней межени: а – 2016 г., б – 2017 г.

Fig. 3. Model calculation of the flow velocity distribution in the near-dam water area of the Kuibyshev Reservoir during the summer low water: a – 2016, b – 2017

скорость стокового течения в летнюю межень 2017 г. вдвое выше, чем в 2016 г. (табл. 4).

Модельные расчеты скоростей течения (рис. 3) и концентрации Chl *a* (рис. 4) на акватории водохранилища так же, как и данные натуральных наблюдений, показывают, что увеличение гидродинамической активности водной среды способствует снижению биомассы фитопланктона. Скорость стокового течения в разных частях Куйбышевского водохранилища неодинакова и определяется морфометрией ложа и режимом попусков воды с гидроузлов. Для сравнения на рис. 3, а и рис. 3, б показаны расчеты полей скоростей стокового течения в летний период (24 июля) 2016 и 2017 гг. Расчетная скорость течений в акваториях Ульяновского, Новодевичьего и Приплотинного плесов в 2017 г. составила 0,04–0,09 м/с, в 2016 г. – 0,02–0,05 м/с. В сужениях между плесами скорость течения возрастает на порядок до 0,30–0,50 м/с в 2017 г. и до 0,10–0,30 м/с в 2016 г. В Черемшанском и Усинском заливах стоковые скорости слишком малы и составляют 0,0001–0,002 м/с. Таким образом, можно видеть, что в среднем



## Экология и природопользование

Рахуба А.В.

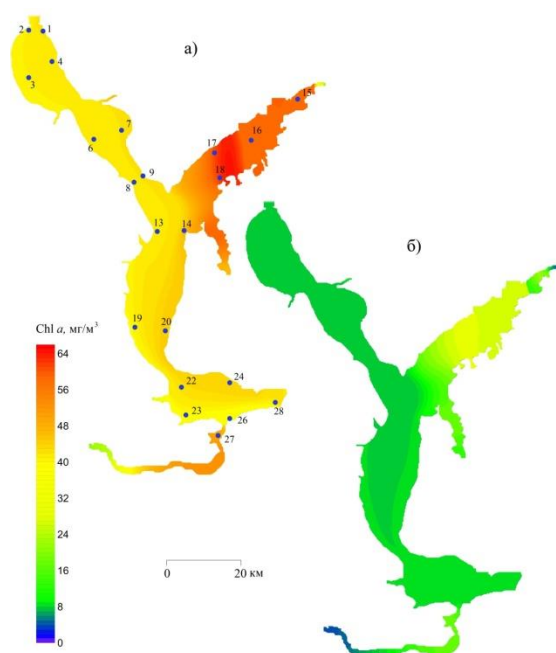


Рис. 4. Распределение концентрации хлорофилла «а» (Chl *a*) в приплотинной акватории Куйбышевского водохранилища и расположение станций наблюдений в период летней межени: а – 2016 г., б – 2017 г.

Fig. 4. Distribution of the chlorophyll *a* (Chl *a*) concentration in the near-dam water area of the Kuibyshev Reservoir and the location of observation stations during the summer low-water: *a* – 2016, *b* – 2017

На пике прогрева Куйбышевского водохранилища различие по температуре воды в 2016 и 2017 гг. составило 1,3°C (табл. 3 и 4). В условиях такого незначительного отличия температуры дополнительные холостые сбросы воды на Жигулевском гидроузле в июне-августе 2017 г. привели к существенному снижению концентрации Chl *a* в Куйбышевском водохранилище (табл. 4). На рис. 4 показаны результаты модельных расчетов концентрации Chl *a* в акватории водохранилища, которая характеризуется как межгодовой изменчивостью, так и пространственной неоднородностью распределения биомассы фитопланктона в летний период.

Таблица 4

Характеристика станций наблюдения Куйбышевского водохранилища в период 2016–2017 гг.

(«-» – нет данных)

Characteristics of observation stations of the Kuibyshev Reservoir in the period of 2016-2017 («-» – no data)

№ верли	Глубина	Хл-л "а" измер., мг/м <sup>3</sup>		Хл-л "а" расчет., мг/м <sup>3</sup>		Течение расчет., м/с		Т <sub>воды</sub> , °С	
		2016 г.	2017 г.	2016 г.	2017 г.	2016 г.	2017 г.	2016 г.	2017 г.
1	7	-	2,45	42,34	11,34	0,077	0,150	-	21,6
2	26	39,25	2,21	40,75	11,26	0,070	0,159	23,6	21,7
3	22	-	11,86	40,90	11,21	0,027	0,068	-	22,4
4	10	-	17,34	41,86	11,20	0,016	0,041	-	21,5
6	34	-	4,84	41,23	11,24	0,010	0,021	-	21,8
7	5	-	2,80	42,05	11,19	0,059	0,101	-	22,6
8	14	42,73	2,93	41,49	11,28	0,038	0,090	22,3	22,1
9	23	13,64	14,32	42,14	11,21	0,028	0,061	22,7	21,9
13	30	31,50	4,08	41,83	11,42	0,025	0,062	23,4	21,6
14	8	71,16	36,96	47,89	12,98	0,002	0,004	23,3	23,0
15	4	-	33,44	52,94	16,15	0,002	0,005	-	25,0
16	3	-	17,28	47,26	18,24	0,0002	0,001	-	25,2
17	6	-	47,77	62,73	18,87	0,0002	0,001	-	23,2
18	10	-	39,01	64,35	20,76	0,0003	0,001	-	23,1
19	24	-	5,98	40,10	11,97	0,005	0,011	-	22,0
20	11	-	29,21	44,66	12,47	0,006	0,012	-	21,9
22	24	9,46	5,12	42,35	12,18	0,026	0,054	23,5	22,4
23	17	-	12,18	38,12	12,63	0,012	0,023	-	21,6
24	10	13,42	3,20	43,50	12,56	0,006	0,019	22,2	22,0
26	27	25,85	19,77	38,01	12,85	0,006	0,012	23,1	20,8
27	21	64,95	15,32	50,62	17,39	0,002	0,013	23,5	20,4
28	41	-	24,24	39,85	12,62	0,230	0,021	-	21,5

Средняя расчетная концентрация Chl *a* летом 2016 г. составила 43,20 мг/м<sup>3</sup>, в 2017 г. снизилась в 3,5 раза и составила 12,57 мг/м<sup>3</sup>. Максимум концентрации Chl *a* отмечается

в Черемшанском и Усинском заливах, достигая 50–65 мг/м<sup>3</sup> в 2016 г. и 15–40 мг/м<sup>3</sup> в 2017 г. В основной части водохранилища наибольшая концентрация Chl *a* в 2016 г. прослеживается вдоль левобережной мелководной части Новодевичьего и Приплотинного плесов и составляет 37–42 мг/м<sup>3</sup>, тогда как в русловой правобережной части она несколько ниже – 30–35 мг/м<sup>3</sup> (рис. 4, а). В 2017 г. во всех плесах водохранилища распределение концентрации Chl *a* в основном однородно и составляет 8–10 мг/м<sup>3</sup> (рис. 4, б).

Результаты расчетов показывают, что при схожих температурных условиях рассматриваемых летних периодов 2016 и 2017 гг. внутригодовое перераспределение стока в Куйбышевском водохранилище заметно влияет на степень цветения фитопланктона. При усиленной динамике течений в 2017 г. средняя величина Chl *a* падает с 43 мг/м<sup>3</sup> до 13 мг/м<sup>3</sup>. Ряд авторов [8; 24; 28; 29], проводивших исследования на проточных водоемах, отмечают, что пороговая величина периода водообмена, выше которой режим стока не оказывает существенного влияния на развитие фитопланктона, в среднем составляет 60–100 сут. За время эксплуатации Куйбышевского водохранилища (1958–2017 гг.) средний период водообмена в летнюю межень составляет 77–114 сут. (табл. 3), что соответствует этому пороговому диапазону. При этом в 2016 г. интенсивность водообмена была ниже среднемноголетних значений (90–132 сут.), тогда как в 2017 г. была существенно увеличена (47–82 сут.). Таким образом, на примере 2017 г. можно видеть, что перераспределение части стока с половодья в летнюю межень (рис. 2) в разы позволяет уменьшить биомассу фитопланктона и снизить негативные эффекты цветения цианобактерий.

Проведенные экспедиционные наблюдения за содержанием Chl *a* и расчеты скоростей течения на модели Куйбышевского водохранилища позволяют сделать вывод о нелинейной зависимости показателя биомассы фитопланктона от величины динамики течений (рис. 5). Корреляционный анализ показывает, что связь средних скоростей течения (*v*) и концентрации Chl *a* лучше всего описывается степенной зависимостью вида:  $Chla = 1.206v^{-0.58}$  ( $R^2 = 0,6$ ). При увеличении проточности водохранилища биомасса фитопланктона сначала стремительно падает, а затем при дальнейшем повышении скорости течения темп ее снижения уже не так высок. Согласно особенностям пространственной структуры стокового течения на акватории водохранилища, прежде всего определяемой подводным рельефом дна и конфигурацией береговой линии, можно выделить характерные зоны с различной интенсивностью цветения: первая зона (обширные мелководные заливы) – с наибольшим массовым цветением водорослей и динамикой течений 0,0001–0,001 м/с; вторая зона (обширные мелководные прибрежные акватории) – с повышенным цветением и динамикой течений 0,01–0,005 м/с; третья зона (центральная глубоководная часть плесов) – с умеренным цветением и динамикой течений 0,05–0,1 м/с и четвертая зона (приплотинная русловая часть с сильным течением) – со сниженным цветением и динамикой течений выше 0,1–0,2 м/с.

Оценка полученных результатов на модели и проверка ее адекватности проводились по данным экспедиционных наблюдений за Chl *a* в период летнего цветения фитопланктона 2016 и 2017 гг. на станциях, расположенных в акватории Куйбышевского водохранилища (рис. 4, а и табл. 4). Адекватность разработанной модели оценивалась критерием Тейла (*Th*) [30]:

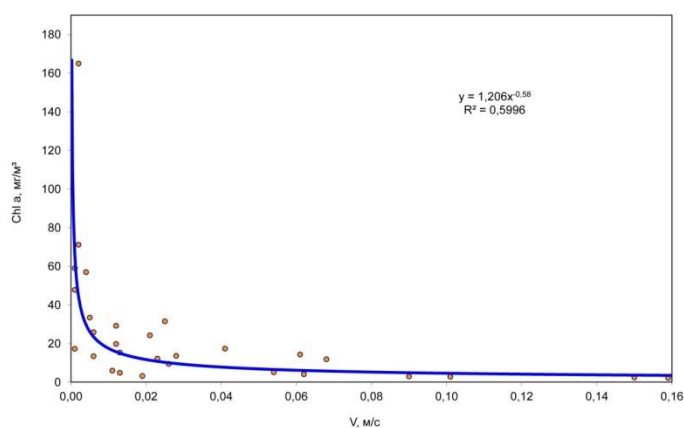


Рис. 5. График связи значений хлорофилла «а» (Chl *a*) и скорости течения (*v*) в Куйбышевском водохранилище

Fig. 5. Graph of the relationship between the chlorophyll *a* (Chl *a*) concentration and the flow velocity (*v*) in the Kuibyshev Reservoir

Экология и природопользование  
Рахуба А.В.

$$Th = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{наб} - X_{расч})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_{наб}^2 + \sum_{i=1}^n X_{расч}^2}}, \quad (23)$$

где  $X_{наб}$  – наблюдаемые и  $X_{расч}$  – расчетные значения характеристик.

Значение  $Th$ -критерия (23) изменяется от 0 до 1. При полном совпадении расчетных и измеренных значений  $Th=0$ . Модельные расчеты считаются удовлетворительными, если  $Th < 0,4$ . Для 2016 г. значение критерия составило 0,25 и для 2017 г. – 0,35. Оценка адекватности модельных расчетов показывает удовлетворительное воспроизведение пространственного распределения биомассы фитопланктона в вегетационный период. Наибольшие расхождения между расчетами и наблюдениями отмечается в 2017 г. при повышенной гидродинамике и малой интенсивности цветения фитопланктона.

### Выводы

В работе проведена сравнительная оценка формирования биомассы фитопланктона Куйбышевского водохранилища в периоды летней межени 2016–2017 гг. при различных режимах регулирования стока. Для изучения и анализа поставленной задачи предложена численная модель экосистемы приплотинного участка Куйбышевского водохранилища. Согласно проведенным расчетам на модели и полученным данным натурных наблюдений показано, что при схожих температурных условиях сравниваемых лет в результате двукратного увеличения динамики течений концентрация хлорофилла «а» снижается в 3,5 раза (с 43 мг/м<sup>3</sup> в 2016 г. до 13 мг/м<sup>3</sup> в 2017 г.). Полученные расчеты полей концентрации хлорофилла «а» удовлетворительно согласуются с данными экспедиционных наблюдений.

Модельные расчеты показывают, что добиться снижения цветения воды и, как следствие, улучшить ее качество возможно благодаря повышению проточности водохранилища путем перераспределения части стока с половодья на летнюю межень. Было установлено, что изменение биомассы фитопланктона в водохранилище связано с режимом течений степенной зависимостью, а формирование участков акваторий с различной интенсивностью цветения фитопланктона во многом определяется пространственной структурой течений. Данная зависимость может быть использована при оптимизации режима регулирования стока на Куйбышевском водохранилище в решении проблемы улучшения экологического состояния водохранилища при разработке мероприятий федерального уровня.

### Список источников

1. Булдовская О.Р., Леонов А.В. Формализация метаболических функций фитопланктона и моделирование динамики форм фосфора в пресноводных экосистемах // Водные ресурсы. 1997. Т. 24. № 1. С. 97–110.
2. Булдовская О.Р., Леонов А.В. Динамика и круговорот соединений фосфора в Учинском водохранилище: исследование с помощью имитационной математической модели фосфорной системы // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 2. С. 176–182.
3. Булдовская О.Р. Трансформация соединений фосфора в пресноводных экосистемах: дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.07, МГУ. М., 1998. 240 с.
4. Варламова О.Е. Роль донных отложений в евтрофировании Куйбышевского водохранилища // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2001. Т. 3. № 2. С. 351–357.
5. Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. Теория мелкой воды. Океанологические задачи и численные методы. Л.: Гидрометиздат, 1977. 207 с.
6. Гусева К.А., Приймаченко А.Д. Фитопланктон Волги от верховьев до Волгограда // ВОЛГА – I. Проблемы изучения и рационального использования биологических ресурсов водоемов: мат. первой конф. по изучению водоемов бассейна Волги. Куйбышев, 1971. С. 98–107.
7. Гусева К.А. Цветение воды, его причины, прогноз и меры борьбы с ним // Труды ВБГО. 1952. Вып. 4. С. 84–112.
8. Даценко Ю.С. Евтрофирование водохранилищ: гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
9. Заключительный отчет по теме: «Доработка проекта нормативов допустимого воздействия в бассейне р. Волга от верховой Куйбышевского водохранилища до впадения в Каспийское море»: руководитель проекта по госконтракту № 23-ФБ от 25.11.2009 г. А.В.Селезнева. Тольятти, 2010. Книга 5. 188 с.
10. Изменения уровней водохранилищ ГЭС РусГидро [Электронный ресурс], URL: <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/> (дата обращения: 01.06.2022).
11. Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник). Тольятти: ИЭВБ РАН, 2008. 123 с.

*Экология и природопользование*  
*Рахуба А.В.*

12. Леонов А.В. Моделирование природных процессов на основе имитационной гидроэкологической модели трансформации соединений С, N, P, Si: учеб. пособие. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2012. 148 с.
13. Научно-прикладной справочник: Многолетние характеристики притока воды в крупнейшие водохранилища РФ / ред. В.Ю. Георгиевского. М.: ООО «РПЦ Офорт», 2017. 132 с.
14. Рахуба А.В. Оценка влияния гидродинамического режима на развитие фитопланктона и качество воды Куйбышевского водохранилища // Учен. зап. Казан. ун-та. Серия: Естественные науки. 2020. Т. 162. № 3. С. 430–444.
15. Рахуба А.В. Изменчивость качества вод на Саратовском водохранилище под влиянием гидродинамических процессов // Географический вестник. 2011. № 3(18). С. 43–45.
16. Рахуба А.В. Имитационное моделирование роста биомассы фитопланктона в Куйбышевском водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 1. С. 76–87.
17. Рахуба А.В. Динамика водных масс Саратовского водохранилища под влиянием попусков ГЭС // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2008. № 2. С. 55–67.
18. Рахуба А.В., Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Численное моделирование массопереноса в проточном водоеме // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14. № 2. С. 89–97.
19. Рахуба А.В., Тихонова Л.Г. Формирование внутренней фосфорной нагрузки в Куйбышевском водохранилище // Волга и ее жизнь: сб. тез. докл. Всерос. конф. Борок. 2018, С. 109.
20. Топачевский А.В., Сиренко Л.А., Цеб Я.Я. Антропогенное эвтрофирование водохранилищ, “цветение” воды и методы его регулирования // Водные ресурсы. 1975. № 1. С. 48–60.
21. Халиуллина Л. Ю., Мухаметшин Ф.Ф. Проблема «цветения» воды Куйбышевского водохранилища: мониторинг в пределах 1988–2016 гг. // Глобальное распределение процессов антропогенного эвтрофирования водных объектов: проблемы и пути решения: мат. межд. науч.-практ. конф. Казань: ОТ Принт, 2017. С. 168–182.
22. Цыденов Б.О. Математическая модель для воспроизведения биогеохимических процессов в пресноводном озере // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2020. № 65. С. 53–67.
23. Шнет Г.И., Кубышкин Г.П. О зависимости “цветения” воды от интенсивности водообмена // Гидробиологический журнал. 1968. Т. 4. № 5. С. 55–57.
24. Dillon P.J. The phosphorus budget of Cameron Lake, Ontario: The importance of flushing rate to the degree of eutrophy of lakes // Limnology and oceanography. 1975. V. 20. No. 1. P. 28–39.
25. Kiirikil M., Valipakka P., Korpinen P., Koponen J., Sarkkula J. 3D Ecosystem Models as Decision Support Tools in the Gulf of Finland – the Kotka Archipelago as an Example // Baltic Coastal Ecosystems. Central and Eastern European Development Studies. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002. Pp. 293–309.
26. Korpinen P., Kiirikki M., Rantanen P., Inkala A., Sarkkula J. High resolution 3D-ecosystem model for the Neva Bay and Estuary – model validation and future scenarios, Oceanologia, 2003. No. 45(1). Pp. 67–80.
27. Reynolds C.S., & Irish A.E. Modeling phytoplankton dynamics in lakes and reservoirs: the problem of in-situ growth rates // Hydrobiology, 1997. Vol. 349. Pp. 5–17.
28. Straskraba M., Tundisi J.G., Duncan A. Comparative reservoir limnology and water quality management. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers, 1993. 293 p.
29. Straskraba M. Coupling of hydrobiology and hydrodynamics: Lakes and Reservoirs // Coastal and Estuarine Studies. 1998. V. 288. No. 3. P. 601–622.
30. Theil H. Applied economic forecasting. Amsterdam. 1971. 256 p.
31. Thoman R.V., Di Toro D.M., Winfield R.P., O'Connor D.J. Mathematical modeling of phytoplankton in Lake Ontario. New York: Manhattan College, 1975. 124 p.
32. User's Guide for RCA (Release 3.0). Appendix A – HydroQual, Mahwah, New Jersey, 2004. Pp. 93.

#### References

1. Buldovskaya, O.R., Leonov, A.V. (1997), Formalization of metabolic functions of phytoplankton and modeling the dynamics of phosphorus forms in freshwater ecosystems, *Water resources*, vol. 24, no. 1, pp. 97–110.
2. Buldovskaya, O.R., Leonov, A.V. (1996), Dynamics and circulation of phosphorus compounds in the Uchinskoye reservoir: research using a simulation mathematical model of the phosphorus system, *Water resources*, vol. 23, no. 2, pp. 176–182.
3. Buldovskaya, O.R. (1998), Transformation of phosphorus compounds in freshwater ecosystems, Abstract of D. Sc. Thesis dissertation, Hydrology of land, water resources, hydrochemistry (Earth sciences), Moscow State University, Moscow, Russian.
4. Varlamova, O.E. (2001), The role of bottom sediments in the eutrophication of the Kuibyshev reservoir, *Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 351–357.
5. Volzinger, N.E., Pyaskovsky, R.V. (1977), *Teoriya melkoj vody. Okeanologicheskie zadachi i chislennye metody* [Shallow water theory. Oceanological problems and numerical methods], Leningrad, Gidrometizdat, Russia.
6. Guseva, K.A., Priimachenko A.D. (1971), Phytoplankton of the Volga from the headwaters to Volgograd, *VOLGA – I. Problemy izuchenii i ratsional'nogo ispol'zovaniia biologicheskikh resursov vodoemov: materialy pervoi konf. po izucheniiu vodoemov basseina Volgi* [VOLGA – I. Problems of the study and rational use of biological resources of water bodies: materials of the first Conf. on the study of the Volga basin], pp. 98–107.
7. Guseva, K.A. (1952), Water bloom, its causes, prognosis and measures to combat it, *Tr.Vses. Gidrobiol. o-va*, vol. 4, pp. 84–112.
8. Datsenko, I.S. (2007), *Evtrofirovaniye vodohranilishch: Gidrologo-gidrohimicheskie aspekty* [Reservoir Eutrophication: Hydrological and Hydrochemical Aspects], Moscow, GEOS, Russia
9. *Zaklyuchitel'nyy otechet po teme: «Dorabotka proekta normativov dopustimogo vozdeystviya v bassejne r. Volga ot verhovij Kujbyshevskogo vodohranilishcha do vpadeniya v Kaspijskoe more»* (2010) [Final report on the topic: “Finalization of the draft standards of permissible impact in the Volga basin from the upper reaches of the Kuibyshev reservoir to the confluence with the Caspian Sea”]: Project manager under the state contract No. 23-FB dated 25.11.2009, *Togliatti*, Russia.

Экология и природопользование  
Рахуба А.В.

10. Changes in the reservoir levels of the RusHydro HPP, available at: <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/> (Accessed 11 June 2022).
11. *Kuibyshevskoe vodohranilishche (nauchno-informacionnyj spravochnik)* [Kuibyshev reservoir (scientific information reference book)] (2008), IEVB RAN, Togliatti, Russia.
12. Leonov, A.V. (2012), *Modelirovanie prirodnyh processov na osnove imitacionnoj gidroekologicheskoy modeli transformacii soedinenij C, N, P, Si* [Modeling of natural processes on the basis of a hydroecological simulation model of the transformation of compounds C, N, P, Si], Yuzhno-Sakhalinsk, SakhGU, Russia
13. *Nauchno-prikladnoj spravochnik: Mnogoletnie harakteristiki pritoka vody v krupnejshie vodohranilishcha RF* (2017) [Scientific and applied reference book: Long-term characteristics of water inflow into the largest reservoirs of the Russian Federation], ООО "RPC Ofort", Moscow, Russia.
14. Rakhuba, A.V. (2020), Assessment of the influence exercised by the hydrodynamic regime on the phytoplankton development and the water quality of the Kuibyshev Reservoir, *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, vol. 162, no. 3, pp. 430–444.
15. Rakhuba, A.V. (2011), Variability of water quality at the Saratov reservoir under the influence of hydrodynamic processes, *Geographical Bulletin*, no. 3(18), pp. 43–45.
16. Rakhuba, A.V. (2018), Simulation modeling of phytoplankton biomass growth in the Kuibyshev reservoir, *Water management of Russia: problems, technologies, management*, no. 1, pp. 76–87.
17. Rakhuba, A.V. (2008), Dynamics of water masses of the Saratov reservoir under the influence of HPP releases, *Water management in Russia: problems, technologies, management*, no. 2, pp. 55–67.
18. Rakhuba, A.V., Shmakova, M.V., Kondratiev, S.A. (2021), Numerical modeling of mass transfer in a flowing reservoir, *Fundamental and applied hydrophysics*, vol. 14, no. 2, pp. 89–97.
19. Rakhuba, A.V., Tikhonova, L.G. (2018), Formation of internal phosphorus load in the Kuibyshev reservoir, [Volga and its life. Collection of abstracts of reports of the All-Russian Conference], Togliatti.
20. Topachevskii, A.V., Sirenko, L.A., Tseeb, Ia.Ia. (1975), Anthropogenic eutrophication of reservoirs, "blooming" of water and methods of its regulation, *Vodnye resursy*, no. 1, pp. 48–60.
21. Khaliullina, L.Y., Mukhametshin, F.F. (2017), The problem of water bloom in the Kuibyshev reservoir: monitoring within 1988–2016", *Global'noe raspredelenie processov antropogenogo evtrofirovaniya vodnyh ob"ektov: problemy i puti resheniya: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Global distribution of processes of anthropogenic eutrophication of water bodies: problems and solutions: materials of the international scientific-practical conference], pp. 168–182.
22. Tsydenov, B.O. (2020), Mathematical model for reproducing biogeochemical processes in a freshwater lake, *Bulletin of the Tomsk State University. Mathematics and Mechanics*, no. 65, pp. 53–67.
23. Shpet, G.I., Kubyshekin, G.P. (1968), On the dependence of the "bloom" of water on the intensity of water exchange", *Gidrobiologicheskij zhurnal*, vol. 4, no. 5, pp. 55–57.
24. Dillon, P.J. (1975), The phosphorus budget of Cameron Lake, Ontario: The importance of flushing rate to the degree of eutrophy of lakes, *Limnology and oceanography*, vol. 20, no. 1, pp. 28–39.
25. Kiirikil, M., Valipakka, P., Korpinen, P., Koponen, J., Sarkkula, J. (2002), 3D Ecosystem Models as Decision Support Tools in the Gulf of Finland – the Kotka Archipelago as an Example, *Baltic Coastal Ecosystems. Central and Eastern European Development Studies*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 293–309.
26. Korpinen, P., Kiirikki, M., Rantanen, P., Inkala, A., Sarkkula, J. (2003), High resolution 3D-ecosystem model for the Neva Bay and Estuary – model validation and future scenarios, *Oceanologia*, no. 45(1), pp. 67–80.
27. Reynolds, C.S., Irish, A.E. (1997), Modeling phytoplankton dynamics in lakes and reservoirs: the problem of in-situ growth rates, *Hydrobiology*, vol. 349, pp. 5–17.
28. Straskraba, M., Tundisi, J.G., Duncan, A. (1993), *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
29. Straskraba, M. (1998), Coupling of hydrobiology and hydrodynamics: Lakes and Reservoirs, *Coastal and Estuarine Studies*, vol. 288, no 3, pp. 601–622.
30. Theil, H. (1971), *Applied economic forecasting*. Amsterdam, 256 p.
31. Thoman, R.V., Di Toro, D.M., Winfield, R.P., O'Connor, D.J. (1975), *Mathematical modeling of phytoplankton in Lake Ontario*, New York, Manhattan College.
32. User's Guide for RCA (Release 3.0). Appendix A – HydroQual (2004), Mahwah, New Jersey.

Статья поступила в редакцию: 10.06.2022; одобрена после рецензирования: 17.02.2023; принята к опубликованию: 23.05.2023.

The article was submitted: 10 June 2022; approved after review: 17 February 2023; accepted for publication: 23 May 2023.

## Информация об авторе

**Александр Владимирович Рахуба**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
и.о. заведующего лабораторией мониторинга водных объектов,  
Самарский федеральный исследовательский центр РАН,  
Институт экологии Волжского бассейна РАН;  
445003, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Комзина, д. 10

## Information about the author

**Alexander V. Rakhuba**

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the  
Laboratory for Monitoring of Water Bodies, Samara Federal  
Research Scientific Center RAS, Institute of Ecology of the  
Volga River Basin RAS;  
10, Komzina st., Togliatti, 445003, Russia

e-mail: rahavum@mail.ru