

Пространственно-временное моделирование динамики развития фитопланктона в экосистеме Куйбышевского водохранилища

А. В. Рахуба✉

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт экологии Волжского бассейна РАН, Российская Федерация
(445003, г. Тольятти, ул. Комзина, 10)

Аннотация. Цель – выявление количественных особенностей формирования полей биомассы фитопланктона в акватории Куйбышевского водохранилища с использованием имитационной модели фосфорной системы.

Материалы и методы. Разработана численная 2D модель фосфорной системы с пространственным шагом 200 метров. Модель объясняет перенос и трансформацию фосфора в экосистеме водохранилища и позволяет оценить пространственно-временную динамику развития фитопланктона с учетом неустановившегося режима течений, конвекции поля температуры воды, переноса частиц детрита, развития сообщества бактериопланктона и зоопланктона.

Результаты и обсуждение. Обсуждаются результаты модельных расчетов динамики течений, полей распределения температуры воды, биомассы фитопланктона и концентрации минерального фосфора в Куйбышевском водохранилище на примере вегетационного периода 2016 года. Показано пространственное распределение фитопланктона в разные фазы прогрева водной массы водохранилища. Отмечено двукратное увеличение биомассы фитопланктона и снижение содержания минерального фосфора вдоль главной оси водохранилища от верховьев к плотине Жигулевского гидроузла.

Выводы. Проведенные расчеты удовлетворительно воспроизводят данные натурных наблюдений и качественно правильно описывают сезонный ход развития фитопланктона в водохранилище. Это позволяет использовать разработанную модель для решения задач рационального использования водных ресурсов в условиях влияния антропогенных факторов и климатических изменений.

Ключевые слова: Куйбышевское водохранилище, эвтрофирование, биомасса фитопланктона, биогенные элементы, качество воды, гидродинамика, математическое моделирование.

Источник финансирования: Работа выполнена в рамках государственного задания (регистрационный номер 1021060107175-5-1.6.19).

Для цитирования: Рахуба А.В. Пространственно-временное моделирование динамики развития фитопланктона в экосистеме Куйбышевского водохранилища // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2023, № 4, с. 140-149. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/4/140-149>

ВВЕДЕНИЕ

В водной среде большое количество химических и биологических веществ содержат фосфор, который является основным элементом эвтрофирования водоемов [3, 8, 10]. Куйбышевское водохранилище относится к типу эвтрофных водоемов, и поэтому для него представляется актуальным изучение пространственной неоднородности и сезонной динамики развития фитопланктона. Очевидно, для такого

крупного водохранилища полноценно проанализировать и оценить пространственно-временные закономерности развития фитопланктона только средствами полевых исследований без использования современных методов численного моделирования весьма затруднительно.

В настоящее время моделированию развития фитопланктона в водных экосистемах посвящено немало отечественных и зарубежных работ, кото-



рые используют различные подходы для описания развития фитопланктона в изменяющихся условиях окружающей среды. При этом пространственная детализация моделей может варьировать от нулевой (с 0D-сеткой) до полной трехмерной (с 3D-сеткой). В горизонтальном измерении около 68% 2D- и 3D-моделей используют декартовы прямоугольные сетки, 27% используют криволинейные сетки и только 5% используют треугольные сетки [14]. Исходя из решаемой задачи, структура модели может включать частичное или полное подробное описание взаимодействия между биологическими переменными и потенциально лимитирующими питательными веществами – азотом (N), фосфором (P) и кремнием (Si). Как показывают исследования на моделях озер и водохранилищ, интенсивное развитие фитопланктона, прежде всего, вызвано поступлением в водоемы неорганического фосфора [1, 2, 3, 8, 10, 12, 16], тогда как в морских экосистемах высокая соленость не способствует эффективной фиксации газообразного азота фитопланктоном и лимитирующая роль азота может преобладать над ролью фосфора [4, 8, 9, 13].

Цель данной работы – оценка пространственной неоднородности сезонного развития фитопланктона Куйбышевского водохранилища с учетом фосфор-

ного лимитирования на основе разработанной 2D имитационной модели фосфорной системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Куйбышевское водохранилище образовано двумя крупнейшими водными артериями – Волгой и Камой и является самым крупным долинным водохранилищем в Европе, которое осуществляет сезонное, недельное и суточное регулирование водного стока Жигулевским гидроузлом. Приток Волжских вод в водохранилище регулируется Чебоксарским гидроузлом, а Камских – Нижнекамским гидроузлом. Наиболее крупными боковыми притоками водохранилища являются реки Вятка, Свияга, Казанка, Меша, Шешма, Черемшан, Уса.

Для изучения сезонной динамики фитопланктона в Куйбышевском водохранилище была разработана компьютерная 2D-пространственная модель, реализованная в программном комплексе «ВОЛНА» [11]. Модель состоит из двух блоков: гидродинамического и термобигидрохимического.

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

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

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

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

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/с²; $l = 2\omega \sin(\psi)$ – параметр Кориолиса ($\omega = 2\pi/\text{сут}$ – угловая скорость вращения Земли, рад/сут; ψ – 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; $f_{\text{дно}} = \frac{gn^2}{H^{3/2}}$ – коэффициент придонного

трения, б/р; n – коэффициент шероховатости, б/р; K_L – горизонтальный турбулентный обмен, м²/с; P_a – атмосферное давление, кг/(м·с²).

В качестве граничных условий на твердых боковых границах нормальная компонента скорости u_n задается равной нулю, а для тангенциальной компоненты u_t вводится квадратичный закон трения, аналогичный придонному. На открытых боковых границах, через которые вода поступает в расчетную область, нормальная компонента скорости и уровня воды задается как функция времени: $u_n = f(t)$, $u_t = 0$ и $\zeta = \zeta(t)$. Для границ, через которые вода вытекает из расчетной области, задается линейная зависимость между нормальной компонентой скорости и уровнем $u_n = \pm(g/h)^{1/2} \zeta$, $u_t = 0$.

Термобيوгидрохимический блок модели Куйбышевского водохранилища представлен уравнениями теплопроводности и конвекции поля температуры воды; конвекции, 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).

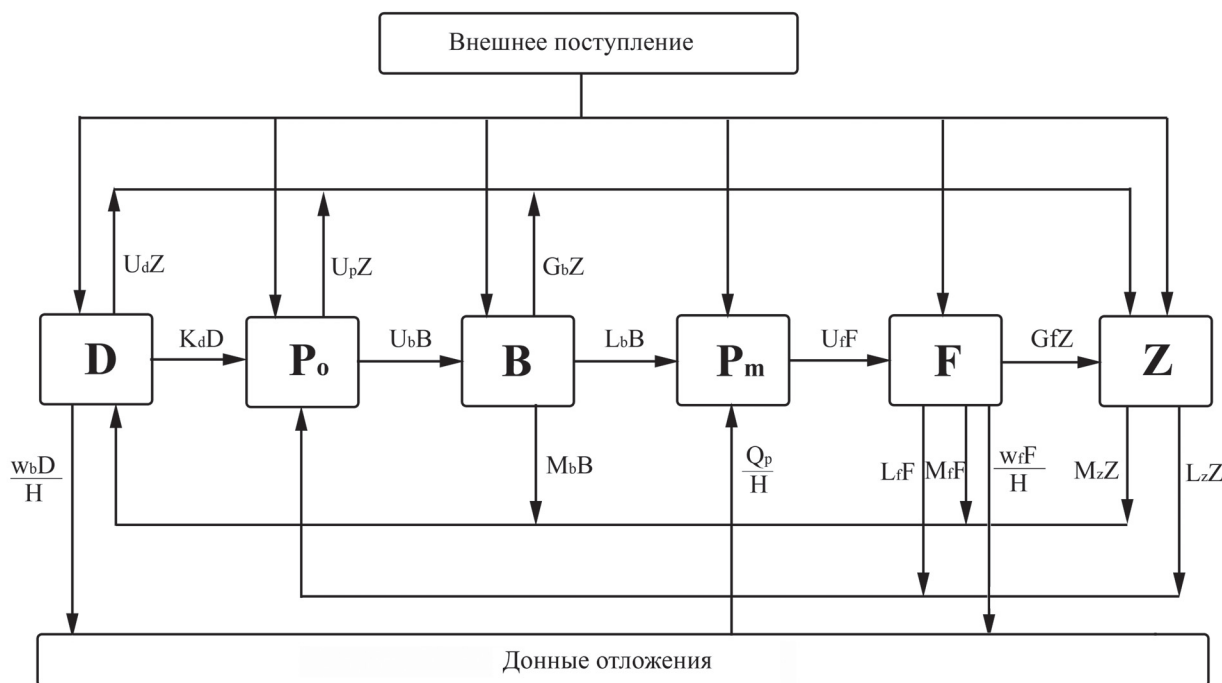


Рис. 1. Схема термобюгидрохимического блока модели
 [Fig. 1. Scheme of the thermobiohydrochemical block of the model]

Уравнения системы имеют следующий вид:

$$\frac{\partial C_j}{\partial t} + u \frac{\partial C_j}{\partial x} + v \frac{\partial C_j}{\partial y} = S, \quad (4)$$

j – счетчик для рассматриваемых компонентов модели.

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

$$S = A_L \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{q_a - q_d}{c_p \rho H}, \quad (5)$$

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

$$S = E_f \left(\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \right) + (U_f - L_f - M_f) F - \frac{w_f F}{H} - G_f Z, \quad (6)$$

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

$$S = E_p \left(\frac{\partial^2 P_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial y^2} \right) + L_b B - U_f F + \frac{Q_p}{H}, \quad (7)$$

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

$$S = E_z \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} \right) + (U_p + U_d + U_z - M_z + G_f + G_b) Z, \quad (8)$$

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

$$S = E_b \left(\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right) + (U_b - L_d - M_b) B - G_b Z, \quad (9)$$

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

$$S = E_o \left(\frac{\partial^2 P_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_o}{\partial y^2} \right) + K_d D + L_f F + L_z Z - U_b B - U_p Z, \quad (10)$$

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

$$S = E_d \left(\frac{\partial^2 D}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} \right) + M_f F + M_b B + M_z Z - K_b D - \frac{w_d D}{H} - U_d Z, \quad (11)$$

где C_j – концентрация рассчитываемых в модели компонентов; T – среднесуточная для роста микроорганизмов температура воды, °C; P_m, P_o, F, B, Z и D – концентрации, соответственно, растворенного минерального и органического фосфора, биомасс фитопланктона, бактерий, зоопланктона и детрита, мгP/л; U_f, L_f, M_f – удельные скорости потребления форм P , выделения продуктов метаболизма и отмирания, соответственно, у фитопланктона, сут⁻¹; U_b, L_b, M_b – удельные скорости потребления форм P , выделения продуктов метаболизма и отмирания, соответственно, у бактерий, сут⁻¹; U_z, L_z, M_z – удельные скорости потребления форм P , выделения продуктов метаболизма и отмирания, соответственно, у зоопланктона, сут⁻¹; $U_{fmax}, U_{bmax}, U_{zmax}$ – максимальные удельные скорости, соответственно, потребления форм P фитопланктоном, бактериями и зоопланктоном, сут⁻¹; U_p, U_d – удельные скорости потребления органического фосфора и детрита зоопланктоном, сут⁻¹; G_f, G_b – удельная скорость потребления фитопланктона и бактерий зоопланктоном, сут⁻¹; w_f^{20}, w_d^{20} – скорость гравитационного разложения детрита до оседания фитопланктона и детрита при температуре воды 20 °C, м/сут; K_d – коэффициент разложения детрита до P_o ; q_a, q_d – кинематические потоки тепла на поверхности водоема и на дне, Вт/м²; c_p – удельная теплопроводность воды, Вт·с/кг·°C; $A_l, E_f, E_b, E_z, E_o, E_d, E_p$ – горизонтальный турбулентный обмен для компонентов модели, м²/с.

Уравнение (4) решается при следующих граничных условиях:

$$\varphi C + E \frac{\partial C}{\partial n} = \Theta(x, y, t), \quad (12)$$

где n – нормаль к боковой поверхности расчетной области.

Акватория Куйбышевского водохранилища была разделена на 143562 расчетных узла прямоугольной сетки с шагом 200 м. Расчет компонентов экосистемы (6) – (11) осуществляется в единицах фосфора с использованием известных зависимостей [1, 2, 9]. Для сопоставления рассчитанного

по модели компонента фитопланктона $F(zP/m^3)$ и измеренного показателя биомассы $\Phi(z/m^3)$ использовалось экспериментально установленное значение переводного коэффициента $k=\Phi/F$, которое для фитопланктона Куйбышевского водохранилища составило 98,6.

Расчеты проводились за вегетационный период с 1 мая по 7 ноября 2016 года при задании среднесуточных расходов воды в Волжской ветке водохранилища на входном створе, расположенном в 5 км выше по течению от места впадения реки Казанка и входном створе Камской ветки водохранилища – в 4 км ниже впадения реки Вятка [5]. На береговой границе водохранилища задавался сезонный ход расхода воды в местах впадения притоков Казанка, Меша, Шешма, Черемшан и Уса.

Начальные поля компонентов экосистемы водохранилища, а также их значения на входных створах и боковых притоках задавались по данным Тольяттинской гидрометеорологической обсерватории и из литературных источников [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов моделирования показывает, что основными факторами, заметно влияющими на скорость продуцирования фитопланктона в Куйбышевском водохранилище, является прогрев водной толщи, скорость течения и концентрация растворенного в воде минерального фосфора.

Скорость стокового течения в разных частях Куйбышевского водохранилища неодинакова и определяется морфометрией ложа и режимом пропусков воды Чебоксарского и Нижнекамского гидроузлов. Средняя скорость течения в Волжской ветке водохранилища на русле и затопленной пойме изменялась в пределах 0,03-0,15 м/с, в Камской ветке – 0,04-0,24 м/с. Ниже по течению на всех плесовых озеровидных расширениях и мелководных заливах значения скоростей течения в среднем были меньше и составляли 0,02-0,07 м/с и лишь в местах сужений водохранилища достигали 0,15-0,25 м/с (рис. 2а).

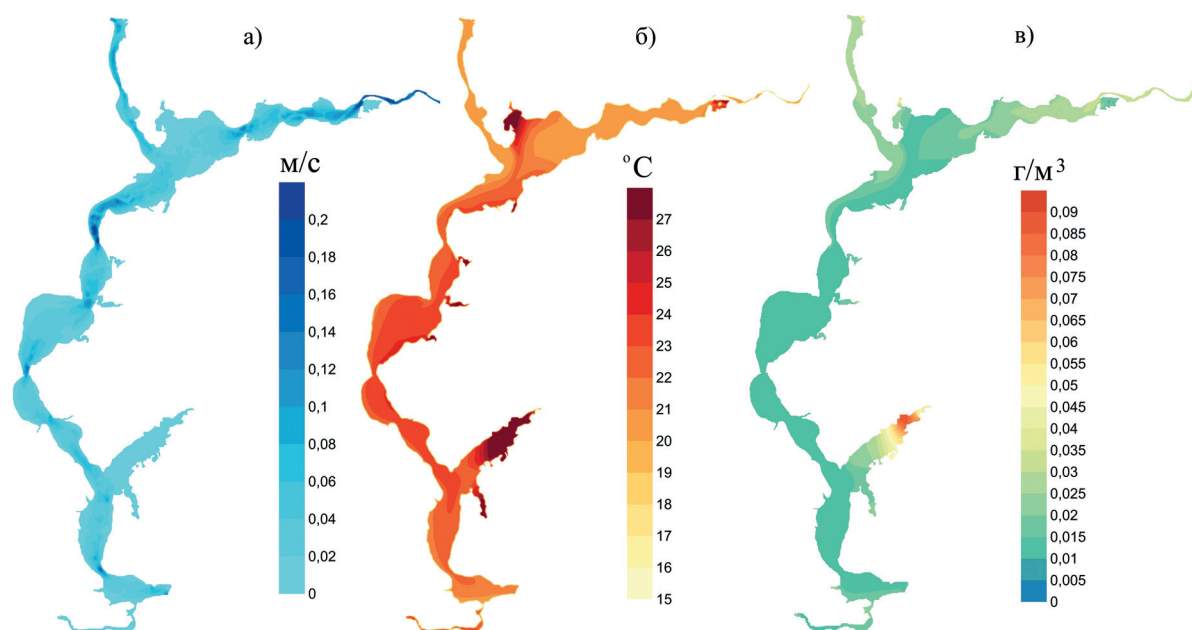


Рис. 2. Модельный расчет пространственного распределения скорости течения (а), температуры воды (б) и минерального фосфора (в) в период максимального прогрева Куйбышевского водохранилища (24.07.2016)
 [Fig. 2. Model calculation of the spatial distribution of the flow velocity (а), water temperature (б) and mineral phosphorus (в) during the maximum warming of the Kuibyshev reservoir (07/24/2016)]

Температура воды в разных частях акватории водохранилища также распределена неравномерно. Наибольшая температура воды (27-28 °С) прослеживается в устьевой области реки Меша Волжско-Камского плеса, левобережной литоральной зоне всех плесов кроме Приплотинного, а также в обширных Черемшанском и Усинском заливах. На гидродинамически активных речных Волжском и Камском участках, вдоль всего глубоководного правого берега и в акватории Новодевичьего и Приплотинного плесов температура воды заметно ниже и составляет 20-23 °С (рис. 2б).

Весной в начале вегетации фитопланктона концентрация P_m в водохранилище максимальна и составляет 0,050-0,130 г/м³. С началом роста биомассы фитопланктона в водохранилище концентрация P_m снижается и к моменту массового цветения водорослей летом достигает 0,01-0,014 г/м³ (рис. 2в).

На рисунке 3 и рисунке 4а показаны результаты модельных расчетов пространственно-временной динамики развития фитопланктона в вегетационный период 2016 года. Заметный рост биомассы фитопланктона (0,5-1,0 г/м³) начинается в первую декаду июня на спаде волны весеннего половодья в районах левобережной литорали Волжско-Камского, Тетюшского и Ундровского плесов (рис. 3а). В течение первого летнего месяца на открытой части водохранилища концентрация биомассы

фитопланктона в среднем достигает 2,0-3,5 г/м³ (рис. 3б). Значение коэффициента вариации (C_v), характеризующего пространственную неоднородность распределения биомассы фитопланктона по акватории водохранилища составляет 23-29%. В период массового развития фитопланктона коэффициент C_v повышается и достигает 38-40%. Наибольшая концентрация фитопланктона отмечаются в конце июля и совпадает с фазой максимального прогрева водохранилища. В это время в Волжском и Камском плесах концентрация биомассы фитопланктона составляет 2,6-3,2 г/м³; в Волжско-Камском плесе – 3,5-4,0 г/м³; в Тетюшском и Ульяновском плесах – 4,0-4,5 г/м³; в Ундровском, Новодевичьем и Приплотинном плесах – 4,5-5,0 г/м³. Максимальная концентрация фитопланктона формируется в заливах рек Меша, Черемшан, Уса и вдоль правого берега Приплотинного плеса достигая 6,9-9,4 г/м³ (рис. 3в).

Предельно неоднородное распределение фитопланктона по акватории водохранилища отмечается в конце августа – начале сентября ($C_v=59-70\%$), которое сопровождается снижением биомассы фитопланктона с 3,5 до 2,1 г/м³ (рис. 3г-д). В сентябре – октябре продолжается снижение биомассы фитопланктона до минимальных значений (рис. 3е-з).

Следует отметить, что наибольшие значения P_m характерны для районов с наименьшим цветением водорослей – верхней части водохранилища

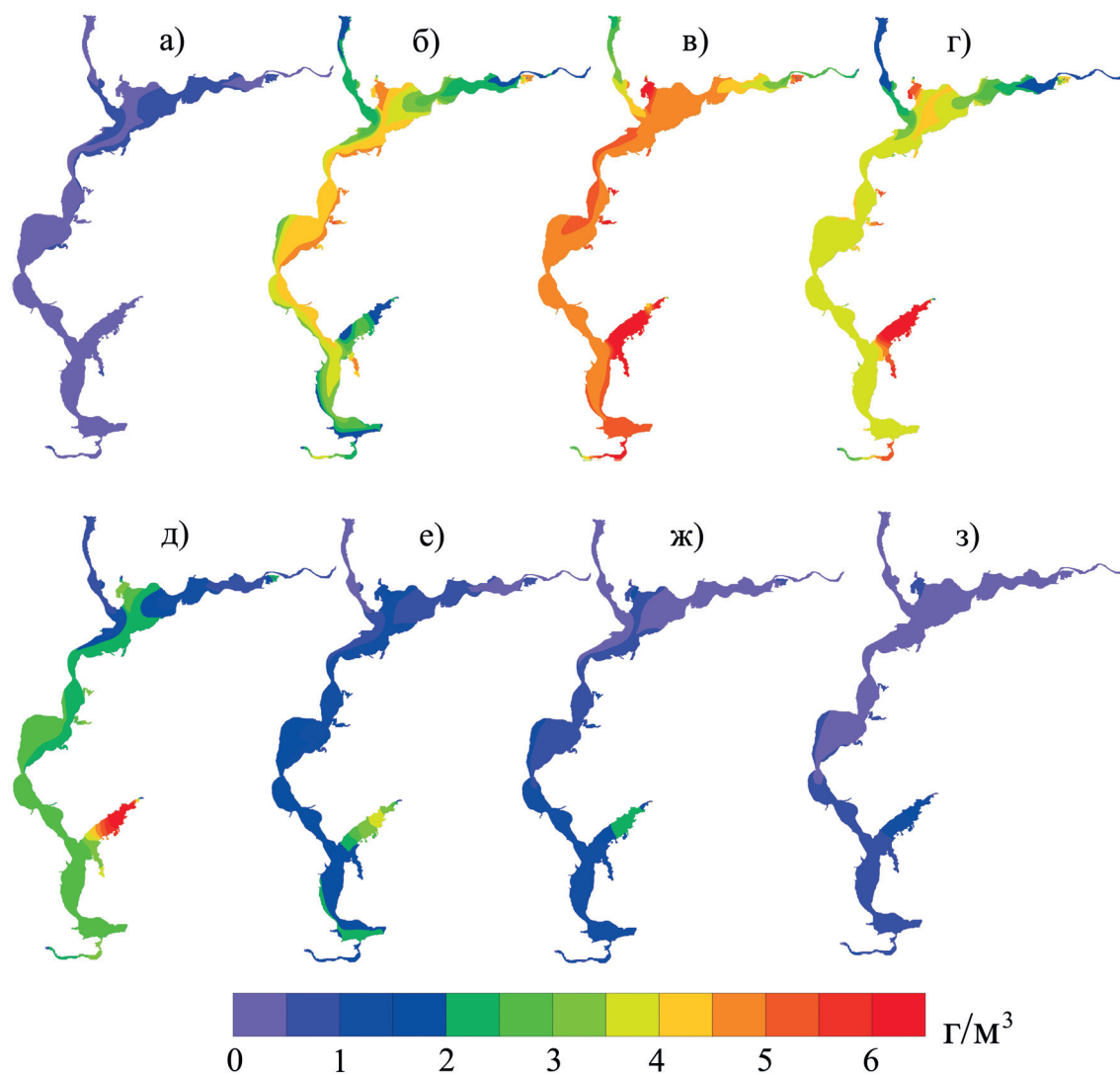


Рис. 3. Модельный расчет пространственного распределения биомассы фитопланктона в Куйбышевском водохранилище в вегетационный период: а) 10.06.16, б) 30.06.16, в) 24.07.16, г) 13.08.16, д) 02.09.16, е) 20.09.16, ж) 10.10.16, з) 01.11.16

[Fig. 3. Model calculation of the spatial distribution of phytoplankton biomass in the Kuibyshev reservoir during the growing season: а) 10.06.16, б) 30.06.16, в) 24.07.16, г) 13.08.16, д) 02.09.16, е) 20.09.16, ж) 10.10.16, з) 01.11.16]

(Волжский и Камский плесы), а также для заливов, в которые реки выносят большое количество P_m . Для центральной и приплотинной части водохранилища характерно наименьшее содержание P_m , где отмечается высокая концентрация фитопланктона (см. рис. 2в и рис. 4б). Пространственная неоднородность P_m в водохранилище высока и связана с динамикой развития фитопланктона. В конце весны в начале лета коэффициент вариации C_v составляет 38%, в середине лета 64% и осенью достигает 92%.

Расчеты показывают, что в результате активного цветения фитопланктона по главной оси водохранилища от верховьев к приплотинному пле-

су отмечается среднее повышение температуры воды на 1,3 °С, увеличение биомассы фитопланктона на 2,6 г/м³ и снижение концентрации фосфатов на 0,010 г/м³. Таким образом, по сравнению с верхними входными участками, только за счет увеличения температуры воды и замедления стокового течения в открытой части водохранилища биомасса фитопланктона возрастает в 2 раза, а в мелководных заливах – в 3,6 раза.

Оценка полученных результатов на модели и проверка ее адекватности проводилась по данным экспедиционных наблюдений в период летнего цветения фитопланктона в 2016 году на 13 станциях, расположенных в акватории Куйбышевско-

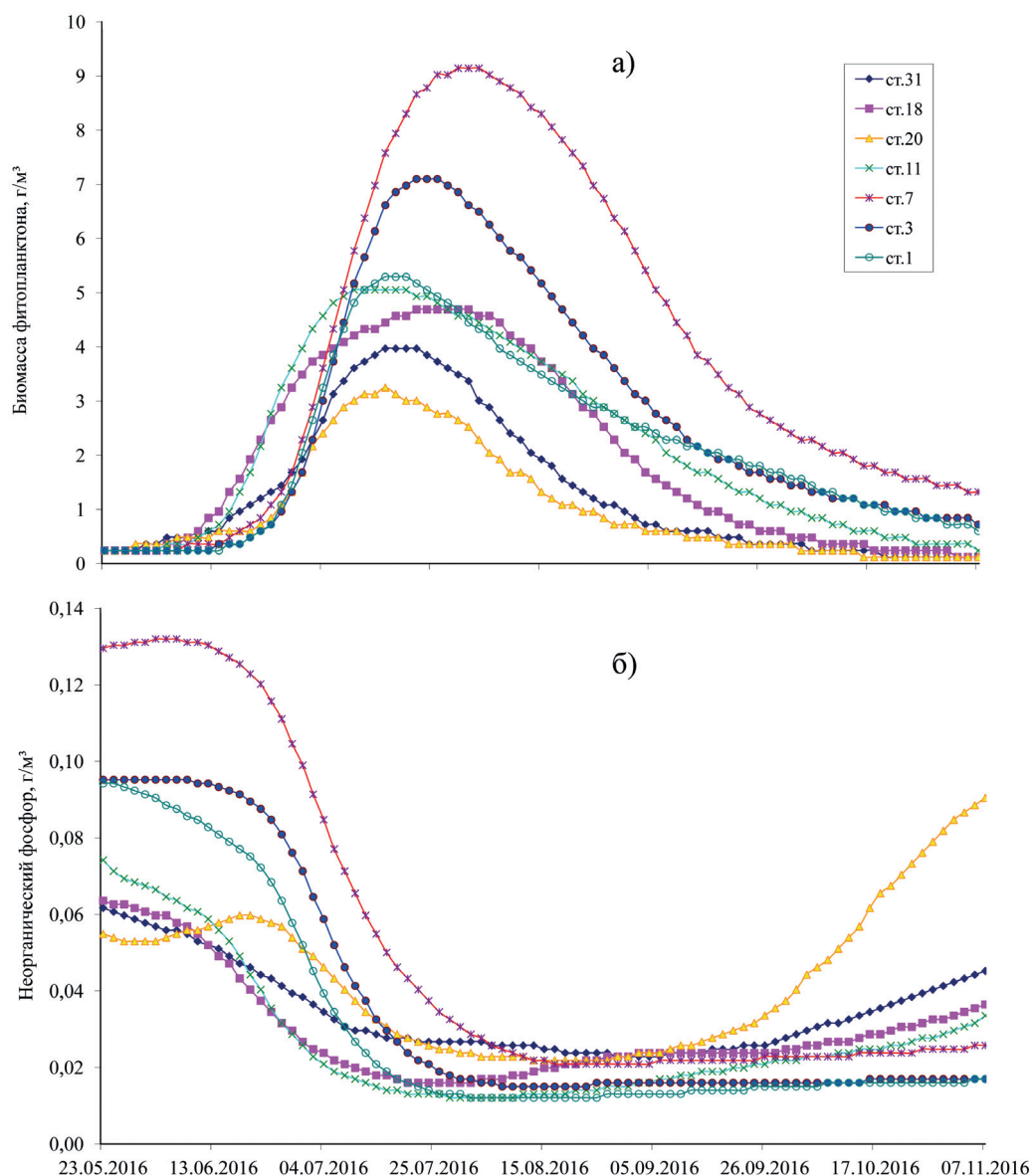


Рис. 4. Модельный расчет сезонного хода биомассы фитопланктона (а) и неорганического фосфора (б) в плесах Куйбышевского водохранилища: ст. 1 – Приплотинный плес, ст. 3 – Усинский залив, ст. 7 – Черемшанский залив, ст. 11 – Ундровский плес, ст. 18 – Волжско-Камский плес, ст. 20 – Волжский плес, ст. 31 – Камский плес

[Fig. 4. Model calculation of the seasonal variation in the biomass of phytoplankton (a) and inorganic phosphorus (b) in the reaches of the Kuibyshev reservoir: st. 1 – Priplotinny reach, st. 3 – Usinsky Bay, st. 7 – Cheremshansky Bay, st. 11 – Undorovsky reach, st. 18 – Volzhsko-Kamsky reach, st. 20 – Volzhsky reach, st. 31 – Kamsky reach]

го водохранилища. Адекватность разработанной модели оценивалась критерием Тейла (Th) [12, 15] и σ/s -критерием [2]. Значение Th -критерия изменяется от 0 до 1. При полном совпадении расчетных и измеренных значений $Th=0$. Модельные расчеты считаются удовлетворительными, если $Th < 0,4$ и $\sigma/s < 0,8$ (табл.).

Наибольшие расхождения между расчетами и наблюдениями для фитопланктона составляет $5,5 \text{ г/м}^3$ и отмечаются в Ульяновском плесе (стан-

ция 8), для минерального фосфора – $0,017 \text{ г/м}^3$ и отмечаются в Тетюшском плесе (станция 14) и для температуры воды – $2 \text{ }^\circ\text{C}$ и отмечаются в Приплотинном плесе (станция 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным расчетов на модели подтверждена приоритетная значимость температуры воды и содержания растворенного минерального фосфора в формировании полей фитопланктона.

Значения характеристик температуры воды, минерального фосфора, фитопланктона и критериев оценки качества расчетов в Куйбышевском водохранилище по данным расчетов на модели и натурных наблюдений [Table. Values of characteristics of water temperature, mineral phosphorus, phytoplankton and criteria for assessing the quality of calculations in the Kuibyshev reservoir based on model calculations and field observations]

Дата / Date	Номер станции / Station number	Температура воды, °C / Water temperature, °C		Фосфаты, г/м ³ / Phosphates, g/m ³		Фитопланктон, г/м ³ / Phytoplankton, g/m ³	
		$T_{изм}$	$T_{расч}$	$P_{изм}$	$P_{расч}$	$\Phi_{изм}$	$\Phi_{расч}$
07.07.16	1	22,2	21,3	0,006	0,014	3,8	5,1
17.07.16	20	22,8	21,0	0,041	0,026	3,0	3,1
19.07.16	18	22,7	22,4	0,019	0,014	1,9	4,5
19.07.16	16	23,8	24,1	0,014	0,015	4,0	4,3
23.07.16	31	23,4	21,5	0,026	0,027	5,7	4,0
23.07.16	28	23,0	21,7	0,024	0,021	5,9	4,8
25.07.16	14	22,8	21,6	0,035	0,018	4,7	4,9
26.07.16	12	23,0	22,3	0,028	0,015	3,0	4,6
27.07.16	11	22,9	23,0	0,019	0,013	6,5	5,1
28.07.16	8	23,9	23,0	0,010	0,011	10,2	4,7
29.07.16	6	24,5	23,2	0,006	0,012	7,1	5,1
30.07.16	4	24,0	22,0	0,010	0,014	2,5	5,0
30.07.16	2	23,1	21,4	0,011	0,014	8,0	5,2
Th – критерий		0,03		0,21		0,22	
σ/s – критерий		0,55		0,24		0,27	

Установлено, что в период летней межени вдоль главной оси водохранилища с постепенным повышением температуры воды от верховьев к Приплотинному плесу водохранилища идет двукратное увеличение биомассы фитопланктона и снижение концентрации растворенного минерального фосфора до низких значений. Наибольшая интенсивность развития фитопланктонного сообщества отмечается на мелководье и в устьевых областях рек Меша, Черемшан и Уса. Пространственно-временная картина распределения фитопланктона в Куйбышевском водохранилище связана с формированием обширных зон «цветения» и, как следствие, определяет тенденции пространственной неоднородности содержания минерального фосфора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. *Трансформация соединений фосфора в пресноводных экосистемах*: дисс. ... канд.

геогр. наук. Москва: Московский государственный университет, 1998. 240 с.

3. Даценко Ю.С., Пуклаков В.В. Моделирование развития фитопланктона в Можайском водохранилище // *Вестник МГУ. Серия География*, 2010, № 3, с. 43-47.

4. Дорофеев В.Л., Сухих Л.И. Изучение долговременной изменчивости экосистемы Черного моря на основе ассимиляции данных дистанционных измерений в численной модели // *Водные ресурсы*, 2019, т. 46, № 1, с. 58-69.

5. *Изменения уровней водохранилищ ГЭС РусГидро*. – URL: <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/> (дата обращения: 25.07.2022). – Текст: электронный.

6. Корнева Л.Г. *Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги*. Кострома: Костромской печатный дом, 2015. 284 с.

7. *Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник)*. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2008. 123 с.

8. Леонов А.В. *Моделирование природных процессов на основе имитационной гидроэкологической модели трансформации соединений C, N, P, Si*. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2012. 148 с.

9. Моделирование сезонной изменчивости морской экосистемы в районе центрально-восточной

Атлантики / В. А. Горчаков, В. А. Рябченко, Н. А. Дианский, А. В. Гусев // *Океанология*, 2012, т. 52, № 3, с. 348-361.

10. Рахуба А. В. Имитационное моделирование роста биомассы фитопланктона в Куйбышевском водохранилище // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, 2018, № 1, с. 76-87.

11. Рахуба А. В. *Пространственно-временная изменчивость качества вод Саратовского водохранилища в условиях неустановившегося гидродинамического режима (Натурные эксперименты и численное моделирование)*: дисс. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2007. 188 с.

12. Цхай А. А., Агейков В. Ю. Моделирование изменения уровня эвтрофирования водохранилища на основе воспроизведения биогеохимических циклов // *Водные ресурсы*, 2020, т. 47, № 1, с. 105-113.

13. 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.

14. Ménesguen A., Lacroix G. Modelling the marine eutrophication: A review // *Science of The Total Environment*, September 2018, v. 636, pp. 339-354

15. Theil H. *Applied economic forecasting*. Amsterdam, 1971. 256 p.

16. 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.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 18.10.2022

Принята к публикации: 28.11.2023

UDC 504.45.058:001. 891.57

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/4/140-149>

Spatial-time Modelling of the Dynamics of Phytoplankton Development in the Ecosystem of the Kuibyshev Reservoir

A. V. Rakhuba ✉

*Samara Federal Research Scientific Center RAS,
Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS, Russian Federation
(10, Komzina st., Togliatti, Samara region, 445003)*

Abstract. The purpose is to identify quantitative features of the formation of phytoplankton biomass fields in the water area of the Kuibyshev reservoir using a simulation model of the phosphorus system.

Materials and methods. The numerical 2D model of the phosphorus system was developed with a spatial step of 200 meters. The model explains the transport and transformation of phosphorus in the reservoir ecosystem and allows us to evaluate the spatiotemporal dynamics of phytoplankton development, taking into account the unsteady flow regime, water temperature field convection, detritus particle transport, and the development of bacterioplankton and zooplankton communities.

Results and discussion. Results are discussed of model calculations of the dynamics of currents, distribution fields of water temperature, phytoplankton biomass and concentration of mineral phosphorus in the Kuibyshev reservoir using the example of the growing season of 2016. The spatial distribution of phytoplankton in different phases of the reservoir water mass warming is shown. A twofold increase in phytoplankton biomass and a decrease in mineral phosphorus content along the main axis of the reservoir from the headwaters to the dam of the Zhiguli hydroelectric were noted.

Conclusion. The calculations satisfactorily reproduce the data of field observations and qualitatively correctly describe the seasonal course of phytoplankton development in the reservoir. This allows the developed model to be used to solving problems of rational use of natural resources under the influence of anthropogenic factors and climate change.

Key words: Kuibyshev reservoir, eutrophication, phytoplankton biomass, biogenic elements, water quality, hydrodynamics, mathematical modeling.

Funding: The work was carried out under the state task (registration number 1021060107175-5-1.6.19).

© Rakhuba A. V., 2023

✉ Alexsandr V. Rakhuba, e-mail: rahavum@mail.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

For citation: Rakhuba A. V. Spatial-time Modelling of the Dynamics of Phytoplankton Development in the Ecosystem of the Kuibyshev Reservoir // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografia. Geoekologiya*, 2023, no. 4, pp. 140-149. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/4/140-149>

REFERENCES

1. Buldovskaya O. R., Leonov A. V. Formalizatsiya metabolicheskikh funktsiy fitoplanktona i modelirovanie dinamiki form fosfora v presnovodnykh ekosistemah [Formalization of metabolic functions of phytoplankton and modeling the dynamics of phosphorus forms in freshwater ecosystems]. *Vodnyye resursy*, 1997, vol. 24, no. 1, pp. 97-110. (in Russ)
2. Buldovskaya O. R. *Transformatsiya soedinenij fosfora v presnovodnykh ekosistemah* [Transformation of phosphorus compounds in freshwater ecosystems]: *and. geo. sci. diss.* Moscow: Moscow State University, 1998. 240 p. (in Russ)
3. Datsenko Yu. S., Puklakov V. V. Modelirovanie razvitiya fitoplanktona v Mozhajskom vodohranilishche [Modeling the development of phytoplankton in the Mozhaisk reservoir]. *Vestnik MGU. Serya Geography*, 2010, no. 3, pp. 43-47. (in Russ)
4. Dorofeev V. L., Sukhikh L. I. Izuchenie dolgovremennoj izmenchivosti ekosistemy Chernogo morya na osnove assilyatsii dannykh distantsionnykh izmerenij v chislennoj modeli [Study of long-term variability of the Black Sea ecosystem based on the assimilation of remote sensing data in a numerical model]. *Vodnyye resursy*, 2019, vol. 46, no. 1, pp. 58-69. (in Russ)
5. *Changes in reservoir levels of the RusHydro HPP*. Available at. – URL: <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/> (accessed 25.07.2022). – Text: electronic. (In Russ.)
6. Korneva L. G. *Fitoplankton vodohranilishch bassejna Volgi* [Phytoplankton of reservoirs in the Volga basin]. Kostroma: Kostroma Printing House, 2015. 284 p. (in Russ.)
7. *Kuibyshevskoe vodohranilishche (nauchno-informacionnyj spravochnik)* [Kuibyshev reservoir (scientific information reference book)]. Togliatti: IEVB RAN, 2008. 123 p. (in Russ)
8. Leonov A. V. *Modelirovanie prirodnykh processov na osnove imitacionnoj gidroekologicheskoy modeli transformatsii 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*, 2012. 148 p. (in Russ)
9. Modelirovanie sezonnoj izmenchivosti morskoy ekosistemy v rajone central'no-vostochnoj Atlantiki [Modeling the seasonal variability of the marine ecosystem in the region of the Central-East Atlantic] / V. A. Gorchakov, V. A. Ryabchenko, N. A. Diansky, A. V. Gusev. *Oceanology*, 2012, vol. 52, no. 3, pp. 348-361. (in Russ)
10. Rakhuba A. V. Imitatsionnoe modelirovanie rosta biomassy fitoplanktona v Kuibyshevskom vodohranilishche [Simulation of the phytoplankton biomass growth in the Kuibyshev Reservoir]. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye*, 2018, no. 1, pp. 76-87. (In Russ)
11. Rakhuba A. V. *Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' kachestva vod Saratovskogo vodohranilishcha v usloviyah neustanovivshegosya gidrodinamicheskogo rezhima (Naturnye eksperimenty i chislennoe modelirovanie)* [Spatial and temporal variations in the water quality of the Saratov Reservoir under the conditions of an unsteady hydrodynamic regime: Field experiments and numerical modeling]: *and. tech. sci. diss.* Yekaterinburg: RosNIIVKh, 2007. 188 p. (In Russ)
12. Tskhai A. A., Ageikov V. Yu. Modelirovanie izmeneniya urovnya evtrofirovaniya vodohranilishcha na osnove vosproizvedeniya biogeoimicheskikh ciklov [Modeling the change in the level of eutrophication of the reservoir based on the reproduction of biogeochemical cycles]. *Vodnyye resursy*, 2020, vol. 47, no. 1, pp. 105-113. (in Russ)
13. 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.
14. Ménesguen A., Lacroix G. Modelling the marine eutrophication: A review. *Science of The Total Environment*, September 2018, v. 636, pp. 339-354
15. Theil H. *Applied economic forecasting*. Amsterdam, 1971. 256p.
16. 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.

Conflict of interests: The author declares no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 18.10.2022

Accepted: 28.11.2023

Рахуба Александр Владимирович
кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
заведующий лабораторией мониторинга водных объектов
Института экологии Волжского бассейна Российской
академии наук – филиала Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Самарского федерального
исследовательского центра Российской академии наук,
г. Тольятти, Самарская обл., Российская Федерация,
ORCID: 0000-0002-1770-3197, e-mail: rahavum@mail.ru

Alexsandr V. Rakhuba
Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Head of the Water
Monitoring Laboratory of the Institute of Ecology of the
Volga Basin of the Russian Academy of Sciences – Branch
of the Federal State Budgetary Institution of Science
of the Samara Federal Research Center of the Russian
Academy of Sciences, Togliatti, Samara Region, Russian
Federation, ORCID: 0000-0002-1770-3197, e-mail: rahavum@mail.ru