

## Математическое моделирование термического режима и динамики растворенного кислорода в Куйбышевском водохранилище

А. В. Рахуба 

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

**Аннотация.** Цель – оценка пространственно-временных закономерностей распределения полей температуры воды и концентрации растворенного в воде кислорода в акватории Куйбышевского водохранилища в условиях жаркого года с использованием математической модели.

**Материалы и методы.** Разработана численная 2D пространственно-неоднородная модель динамики полей температуры воды, первичной продукции и содержания растворенного в воде кислорода. Модель описывает формирование кислородного режима с учетом неустановившегося режима течений и неравномерного прогрева акватории водохранилища с пространственным шагом 200 метров и суточным шагом по времени.

**Результаты и обсуждение.** На основе численных экспериментов исследована конвекция поля температуры, динамика растворенного в воде кислорода и первичной продукции в Куйбышевском водохранилище в безледый период. Выявлены разномасштабные зоны акватории с различным прогревом водной толщи и содержанием кислорода. Показано, что осенью пространственная неоднородность температуры воды примерно в три раза выше, чем в весенний и летний периоды. Отмечается большой вклад (>50 %) фотосинтеза фитопланктона в общий баланс кислорода в период цветения.

**Выводы.** Получены карты пространственного распределения температуры воды, содержания растворенного кислорода и первичной продукции в самый жаркий за последние 10 лет 2016 год. Сопоставление расчетных и натурных значений показателей оценивалось критерием Тейла, который показал удовлетворительную их сходимость. Это позволяет использовать разработанную модель для дальнейших исследований современного состояния Куйбышевского водохранилища.

**Ключевые слова:** Куйбышевское водохранилище, термический режим, растворенный в воде кислород, первичная продукция, экологическое состояние, математическое моделирование.

**Источник финансирования:** Работа выполнена в рамках государственного задания (регистрационный номер 1024032700087-2-1.6.19; 1.6.17).

**Для цитирования:** Рахуба А. В. Математическое моделирование термического режима и динамики растворенного кислорода в Куйбышевском водохранилище // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2025, № 2, с. 102-109. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/102-109>

### ВВЕДЕНИЕ

Климатические изменения на планете приводят к повышению температуры приземного слоя атмосферы, что оказывает влияние на формирование термического режима континентальных водоемов [3, 4, 12]. Термический режим водоемов является важнейшим фактором формирования условий для развития гидробионтов, производства органического вещества и формирования кислородного режима в водной экосистеме. Повышение температуры воды меняет сезонную динамику фитопланктона, увеличивает продолжительность и интенсивность «цветения» воды [11, 12].

Анализ многолетних данных метеонаблюдений показывает, что 2016 год стал одним из наиболее жарких за последние 10 лет, а средняя месячная температура воды летом на Куйбышевском водохранилище превы-

сила норму за исторический период наблюдений на 3,8 °C [12]. По этой причине оценка термического и кислородного режимов в водохранилище в этом году представляет несомненный научный интерес.

Изучение природных процессов только средствами натурных наблюдений всегда недостаточно, а применение современных методов математического моделирования является хорошим инструментарием для решения сложных фундаментальных и прикладных задач в экологии. Существует немало численных моделей, позволяющих описывать термический и кислородный режимы водоемов [2, 3, 5, 6, 11, 13-15]. Главной особенностью подобных моделей является использование нестационарных уравнений гидродинамики, тепло- и массопереноса с пространственно-временной дискретизацией и параметризацией процессов подсеточных масштабов [5].

В данной работе, на основе разработанной 2D плановой имитационной модели Куйбышевского водохранилища особое внимание уделено моделированию пространственно-временных изменений температуры воды и концентрации растворенного в воде кислорода в условиях жаркого вегетационного периода 2016 года. В качестве факторов, влияющих на результаты моделирования, рассматриваются изменения температуры воздуха, влияние фотосинтеза (первичной продукции), биохимического окисления (деструкции), скорости потребления кислорода донными отложениями и атмосферная аэрация на поверхности воды.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки характера прогрева акватории Куйбышевского водохранилища, сезонной динамики первичной продукции и содержания растворенного в воде кислорода была разработана компьютерная 2D пространственная модель, реализованная в программном комплексе «ВОЛНА» [7-10].

Подробное описание расчета гидродинамики для 2016 г. представлены в работах [9, 10]. Для расчета потоков первичной продукции и растворенного в воде кислорода использовались следующие уравнения:

$$\frac{\partial C_j}{\partial t} + u \frac{\partial C_j}{\partial x} + v \frac{\partial C_j}{\partial y} = S, \quad (1)$$

где  $j$  – счетчик для рассматриваемых компонентов модели.

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

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

Для уравнения концентрации минерального фосфора  $j=2 (C_2 \rightarrow DO)$ :

$$S = E_{do} \left( \frac{\partial^2 DO}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 DO}{\partial y^2} \right) + P_{prod} - D_{des} + \frac{R_a}{H} - \frac{R_p}{H}, \quad (3)$$

где  $C_j$  – концентрация рассчитываемых в модели компонентов;  $T$  – среднесуточная температура воды,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $DO$  – средняя по глубине концентрация растворенного в воде кислорода,  $\text{gO}_2/\text{m}^3$ ;  $DO_n$  – концентрация насыщения растворенного в воде кислорода,  $\text{gO}_2/\text{m}^3$ ;  $P_{prod}$  – средняя по глубине интенсивность выделения кислорода фитопланктоном (или валовая первичная продукция в единицах кислорода),  $\text{gO}_2/\text{m}^3/\text{сут}$ ;  $D_{des}$  – средняя интенсивность потребления кислорода в толще воды (деструкция),  $\text{gO}_2/\text{m}^3/\text{сут}$ ;  $R_a$  – атмосферная реаэрация,  $\text{gO}_2/\text{m}^3/\text{сут}$ ;  $R_p$  – потребление кислорода донными отложениями,  $\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{сут}$ ;  $q_a, q_d$  – кинематические потоки тепла на поверхности водоема и на дне,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $c_p$  – удельная теплоемкость воды,  $\text{Вт}\cdot\text{с}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}$ ;  $u(x, y, t)$  и  $v(x, y, t)$  – усредненные по глубине продольная и поперечная скорости,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $H$  – полная глубина,  $\text{м}$ ;  $\rho$  – плотность воды,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;  $A_L, E_{do}$  – горизонтальный турбулентный обмен для компонентов модели,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

По данным наших экспедиционных наблюдений связь  $P_{prod}$  с биомассой фитопланктона ( $\Phi$ ) на Куйбышевском водохранилище описывается следующей зависимостью:

$$P_{prod} = 1,0159 (k_1 \Phi)^{0.6}, \quad \Phi = k_2 F, \quad (4)$$

где  $F$  – биомасса фитопланктона, рассчитанная на модели в фосфорных единицах  $\text{гР}/\text{м}^3$  [7, 8];  $k_1 = 1,1588e^{-0.0436H}$  – коэффициент для расчета средней биомассы фитопланктона в зависимости от глубины,  $\text{б/р}$ .

Для пересчета модельного компонента фитопланктона  $F(\text{гР}/\text{м}^3)$  из фосфорных единиц в биомассу фитопланктона  $\Phi(\text{г}/\text{м}^3)$  использовалось экспериментально установленное значение переводного коэффициента  $k_2 = \Phi/F$ , которое для фитопланктона Куйбышевского водохранилища составило 98,6.

Изменение содержания растворенного кислорода, связанного с его потреблением в водной толще и атмосферной реаэрацией на поверхности воды, определялись по следующим формулам:

$$D_{des} = 0,177 + 0,245 P_{prod}, \quad (5)$$

$$R_a = k_3 + (DO_n - DO), \quad (6)$$

$$DO_n = 14,314 \exp(-0,0226 T), \quad (7)$$

где  $k_3$  – коэффициент скорости аэрации,  $\text{м}/\text{сут}$ .

Уравнение (1) решается при следующих граничных условиях:

$$\phi C = E \frac{\partial C}{\partial n} = \theta(x, y, t), \quad (8)$$

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

Акватория Куйбышевского водохранилища была разделена на 143562 расчетных узла прямоугольной сетки с шагом 200 м. 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, расположенным в 5 км выше по течению от места впадения реки Казанка, входном створе Камской ветки водохранилища – в 4 км ниже впадения реки Вятка и в местах впадения крупных притоков Свияги, Меша, Большой Черемшан.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Куйбышевское водохранилище образовано двумя крупнейшими водными артериями – Волгой и Камой и является самым крупным долинным водохранилищем в Европе. Вытянутое в меридиональном направлении Куйбышевское водохранилище тянется от лесной ландшафтной зоны на севере и пересекает всю лесостепную зону. Водохранилище является водоемом многоцелевого назначения и осуществляет сезонное, недельное и суточное регулирование водного стока Жигулевским гидроузлом. Приток Волжских вод в водохранилище регулируется Чебоксарским гидроузлом, а Камских – Нижнекамским гидроузлом.

В начале вегетационного периода нагревание Куйбышевского водохранилища идет с разной интенсивностью на разных участках сверху вниз. В мае наиболее быстро прогревается акватория Мещенского и Черемшанского заливов, обширных мелководных акваторий Волжско-Камского, Тетюшинского и Ундоровского плесов (рис. 1а). Максимальная температура нагрева воды в заливах достигает 22  $^{\circ}\text{C}$ . Минимальная темпера-

тура воды отмечается в глубоководном Приплотинном плесе и составляет  $10,8^{\circ}\text{C}$ . Средняя температура воды по всему водохранилищу весной составляет  $16,2^{\circ}\text{C}$ , а коэффициент пространственной неоднородности ( $C_v$ ) не превышает 12 %.

Летний прогрев водохранилища охватывает время с начала июля и до середины августа. В этот период температура воды выравнивается по всей длине водохранилища в среднем до  $22,7^{\circ}\text{C}$ , а пространственная неоднородность уменьшается до 10 % (рис. 1б). В мелководных заливах летом вода прогревается до  $32^{\circ}\text{C}$ , на речных участках и глубоководных плесах – до  $19^{\circ}\text{C}$ .

В сентябре и октябре наиболее четко выражена термическая неоднородность, которая возрастает до 29 %. Охлаждение водохранилища идет с севера на юг, достигая в мелководной левобережной пойме Волжско-Камского и Тетюшинского плесов  $5-9^{\circ}\text{C}$  (рис. 1в). Средняя температура воды в осенний период составляет  $12,1^{\circ}\text{C}$ , а наибольшая отмечается в приплотинной части водохранилища –  $22,3^{\circ}\text{C}$ .

Расчеты показывают, что в результате неравномерности прогрева Куйбышевского водохранилища, связанного с особенностями подводного рельефа, отмечается пространственная неоднородность температуры воды, которая осенью в 2,4-2,9 раза превышает неоднородность в весенний и летний периоды. Наибольший размах изменения температур приходится на осень и составляет  $18,4^{\circ}\text{C}$ , наименьший – на весну и составляет  $11,9^{\circ}\text{C}$ . Следует отметить, что модельный расчет осредненной по всей акватории Куйбышевского водохранилища температуры

воды летом 2016 года оказался на  $2,2^{\circ}\text{C}$  выше, чем норма ( $20,5^{\circ}\text{C}$ ) за весь период наблюдений. При этом в отдельных мелководных районах (Мешенский и Черемшанский заливы) температура воды превышала  $30^{\circ}\text{C}$ , создавая неблагоприятные термические условия для существования многих крупных водных организмов.

Неоднородность распределения температуры воды в акватории водохранилища является определяющим фактором пространственной динамики формирования автохтонного органического вещества и пространственного распределения величины поступления кислорода в водную толщу при фотосинтезе. На рисунке 2 представлены модельные расчеты осредненной по глубине интенсивности выделения кислорода фитопланктоном ( $P_{prod}$ ) в результате фотосинтеза в акватории Куйбышевского водохранилища в единицах кислорода.

В весенний период среднее значение  $P_{prod}$  в водохранилище составляет  $0,35 \text{ мгO}_2/\text{л}/\text{сут}$ , а коэффициент пространственной неоднородности равен 19 %. Размах значений  $P_{prod}$  по всей акватории водохранилища в это время колеблется от  $0,12$  до  $0,51 \text{ гO}_2/\text{м}^3/\text{сут}$  (рис. 2а).

Летом в результате интенсивного цветения фитопланктона среднее значение  $P_{prod}$  выше и составляет  $2,01 \text{ гO}_2/\text{м}^3/\text{сут}$ . В Мешенском, Черемшанском и Усинском заливах ее значения варьируют от  $1,9$  до  $3,6 \text{ гO}_2/\text{м}^3/\text{сут}$ . В Волжской и Камской ветках водохранилища, а также в верхней части левобережной поймы она составляет  $0,9-2,2 \text{ гO}_2/\text{м}^3/\text{сут}$ , в нижней приплотинной части –  $1,3-1,6 \text{ гO}_2/\text{м}^3/\text{сут}$  (рис. 2б). Пространственная неоднородность  $P_{prod}$  летом составляет 21 %.

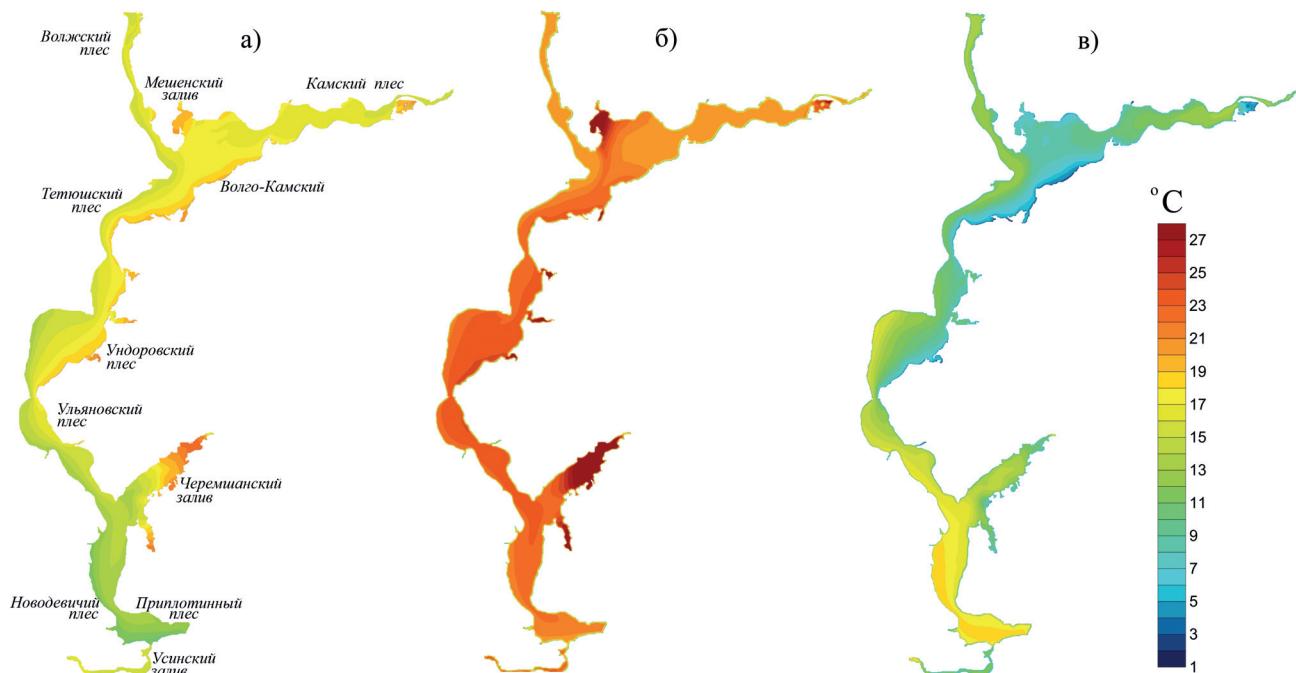


Рис. 1. Модельный расчет пространственного распределения температуры воды весной (а), летом (б) и осенью (в) в Куйбышевском водохранилище 2016 года

[Fig. 2. Model calculation of the spatial distribution of water temperature in spring (a), summer (б) and autumn (в) in the Kuibyshev reservoir in 2016]

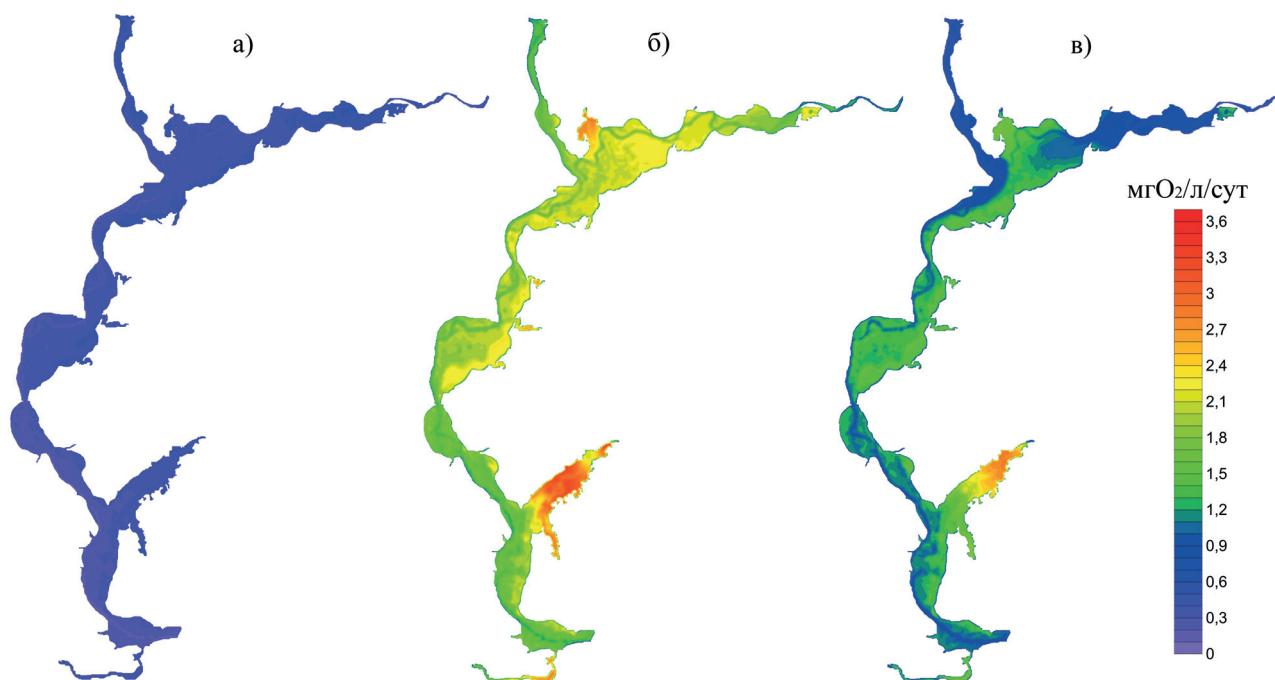


Рис. 2. Модельный расчет пространственного распределения интенсивности выделения кислорода фитопланктоном весной (а), летом (б) и осенью (в) в Куйбышевском водохранилище 2016 года

[Fig. 2. Model calculation of the spatial distribution of the intensity of oxygen release by phytoplankton in spring (a), summer (б) and autumn (в) in the Kuibyshev reservoir in 2016]

В период осеннего охлаждения среднее значение  $P_{prod}$  в водохранилище составляет  $1,25 \text{ гO}_2/\text{м}^3/\text{сут}$ . При этом в заливах еще остается высокий уровень выделения кислорода фитопланктоном, равный  $2,9 \text{ гO}_2/\text{м}^3/\text{сут}$ . Наименьшая  $P_{prod}$  отмечается на речных участках Волжской

и Камской веток, а также вдоль глубоководной части водохранилища, направленной к замыкающему Приплютинному плесу, и составляет  $0,43 \text{ гO}_2/\text{м}^3/\text{сут}$  (рис. 2в). Неоднородность распределения  $P_{prod}$  осенью становится выше, чем в летний период, и составляет 34 %.

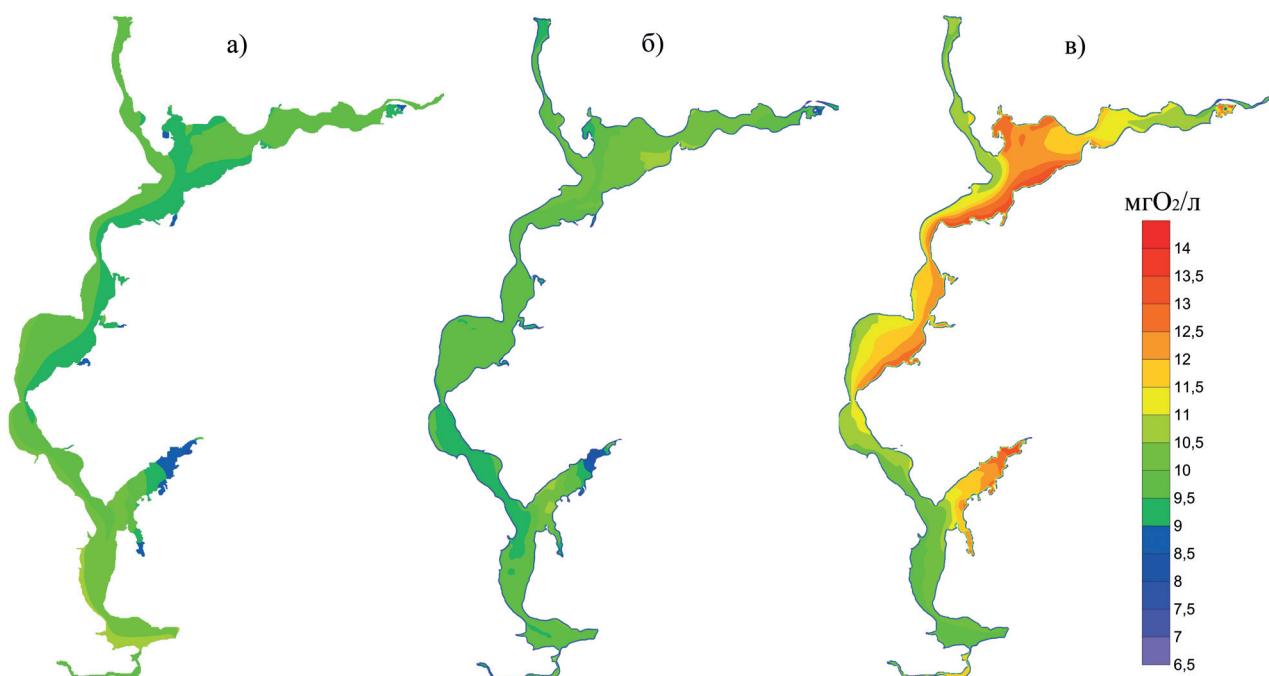


Рис. 3. Модельный расчет пространственного распределения растворенного в воде кислорода весной (а), летом (б) и осенью (в) в Куйбышевском водохранилище 2016 года

[Fig. 2. Model calculation of the spatial distribution of oxygen dissolved in water in spring (a), summer (б) and autumn (в) in the Kuibyshev reservoir in 2016]

На рисунке 2 можно видеть, что в летний и осенний периоды в водохранилище четко выделяются разномасштабные зоны акватории горизонтальной неоднородности  $P_{prod}$ . Акватория Мешенского, Черемшанского и частично Усинского заливов характеризуются наибольшими значениями  $P_{prod}$ , верхняя и центральная части водохранилища – средними значениями  $P_{prod}$ , а участки нижних плесов водохранилища и акватории Волжской и Камской веток – низкими значениями  $P_{prod}$ . Это в свою очередь влияет на пространственно-временную динамику растворенного в воде кислорода в водохранилище.

С использованием модели Куйбышевского водохранилища была исследована сезонная пространственно-временная динамика осредненной по глубине концентрации растворенного в воде кислорода ( $O_2$ ). В безледный период наибольшие концентрации  $O_2$  отмечаются весной и осенью, а наименьшие – летом. В весенний период, следуя за прогревом водной массы водохранилища, концентрация  $O_2$  плавно снижается с 11,02 мг  $O_2$ /л до 9,22 г  $O_2$ /м<sup>3</sup> к лету (рис. 3а и рис. 3б). Далее в период массового цветения фитопланктона начинается постепенный рост концентрации  $O_2$  в воде, который продолжается по мере охлаждения водохранилища в осенний период и на мелководье достигает 13,64 г  $O_2$ /м<sup>3</sup> (рис. 3в).

За рассматриваемый расчетный сезон 2016 года размах пространственных колебаний концентраций  $O_2$  в разные периоды составил 2,41-4,95 г  $O_2$ /м<sup>3</sup>. Величина пространственной неоднородности содержания в

воде  $O_2$  не так велика и весной составляет 4 %, летом – 3,0 % и осенью – 8,4 % (см. рис. 3).

Изменение концентрации  $O_2$  в экосистеме Куйбышевского водохранилища существенно зависит от сезонного хода температуры воды, интенсивности производственно-деструкционных процессов в толще воды, величины газообмена на границе с атмосферой (инвазии и эвазии  $O_2$  на поверхности воды) и поглощения  $O_2$  донными отложениями вследствие окисления дегрита микроорганизмами. В таблице представлены средние концентрации  $O_2$  и его процентное насыщение в воде, а также суточные значения потоков кислорода в характерных районах водохранилища: 1 – Приплотинном плесе, 2 – Черемшанском заливе и 3 – Волжско-Камском плесе.

Модельные расчеты в этих районах водохранилища показывают, что весной производственно-деструкционная активность не высока, а среднее по глубине насыщение  $O_2$  в воде колеблется в пределах 90-98 %. Пополнение кислорода в водной толще в основном происходит из атмосферы (0,130-0,375 г  $O_2$ /м<sup>3</sup>/сут). Летом выделение  $O_2$  фитопланктоном в процессе фотосинтеза возрастает в 8 раз, а деструкция – в 4 раза. В результате на мелководных участках 2 и 3 отмечается перенасыщение кислорода 115-129 %, а на глубоководном участке 1-108 %. В этот период избыточный кислород выделяется из водоема в атмосферу в количестве 0,519-1,666 г  $O_2$ /м<sup>3</sup>/сут. Осенью производственно-деструкционные процессы снижаются, и насыщение кислорода в воде падает

Таблица

Средняя по глубине  $O_2$  (г/м<sup>3</sup>) и потоки  $O_2$  (г  $O_2$ /м<sup>3</sup>/сут) в разных районах Куйбышевского водохранилища по данным расчетов на модели

[Table. The average depth of  $O_2$  (g/m<sup>3</sup>) and  $O_2$  flows (g  $O_2$ /m<sup>3</sup>/day) in different areas of the Kuibyshev reservoir according to calculations on the model]

Район / Region	$O_2$ , г/м <sup>3</sup> / $O_2$ , g/m <sup>3</sup>	Насыщение $O_2$ , % / Saturation of $O_2$ , %	Составляющие баланса кислорода в воде / Components of the oxygen balance in water				
			$P_{prod}$ , г $O_2$ /м <sup>3</sup> /сут / $P_{prod}$ , g $O_2$ /m <sup>3</sup> /day	$D_{des}$ , г $O_2$ /м <sup>3</sup> /сут / $D_{des}$ , g $O_2$ /m <sup>3</sup> /day	Инвазия $O_2$ , г $O_2$ /м <sup>3</sup> /сут / Invasion $O_2$ , g $O_2$ /m <sup>3</sup> /day	Эвазия $O_2$ , г $O_2$ /м <sup>3</sup> /сут / Evasia $O_2$ , g $O_2$ /m <sup>3</sup> /day	Поглощение $O_2$ дном, г $O_2$ /м <sup>3</sup> /сут / Oxygen absorption by the bottom, g $O_2$ /m <sup>3</sup> /day
Весна / Spring							
1	10,68	96	0,268	0,218	0,375		0,120
2	9,27	97	0,349	0,262	0,197		0,330
3	9,36	98	0,377	0,269	0,13		0,420
Лето / Summer							
1	9,58	108	1,057	0,436		0,519	0,120
2	9,6	129	2,97	0,905		1,666	0,330
3	10,04	115	2,208	0,718		1,029	0,420
Осень / Autumn							
1	9,85	101	0,647	0,336		0,081	0,120
2	12,54	112	2,009	0,669		1,058	0,330
3	13,46	103	1,106	0,448		0,292	0,420

до 98-112 %. Поступление  $O_2$  в атмосферу также снижается до 0,081-1,058 г $O_2$ /м<sup>3</sup>/сут. Потребление  $O_2$ , донными отложениями в расчетах определялось на основе экспериментально полученных данных на разных участках Куйбышевского водохранилища и варьировало в пределах 1-3 г $O_2$ /м<sup>3</sup>/сут донной поверхности, что в единицах потока составило 0,120-0,420 г $O_2$ /м<sup>3</sup>/сут (см. табл.).

Данные расчетов показывают, что после освобождения водоема ото льда (апрель) и во второй половине весны (май) происходит динамичный прогрев водной толщи Куйбышевского водохранилища и отмечаются первые признаки цветения фитопланктона. В этот период в суммарном балансе потоков кислорода в водохранилище выделение  $O_2$  в процессе фотосинтеза ( $P_{prod}$ ) составляет 19-32 %, деструкция – 23-25 %, инвазия  $O_2$  из атмосферы в воду – 9-34 % и поглощение  $O_2$  донными отложениями – 12-32 %. Летом происходит наибольший прогрев воды и отмечается многократное увеличение потоков  $O_2$ . Так, в период массового развития фитопланктона выделение  $O_2$  в процессе фотосинтеза достигает 50-51 %, деструкция – 16-21 %, эвазия  $O_2$  из воды в атмосферу – 24-28 % и поглощение донными отложениями – 5-9 %. В период осеннего охлаждения водохранилища поток  $O_2$ , выделяемый в процессе фотосинтеза, колеблется в пределах 40-56 %, деструкция – 16-29 %, эвазия кислорода в атмосферу – 7-13 %, поглощение донными отложениями – 9-18 %. Очевидно, что вклад фотосинтеза фитопланктона в общий баланс кислорода Куйбышевского водохранилища многократно превышает газообмен с атмосферой и деструкционные процессы в толще воды и на дне.

Для проверки адекватности модели по температуре воды, первичной продукции и растворенному кислороду на момент проведения летних экспедиционных съемок в 2016 г. в Куйбышевском водохранилище проводился расчет критерия Тейла ( $Th$ ) [16]. Модельные расчеты считаются удовлетворительными, если  $Th < 0,4$ . Наибольшие расхождения между расчетами и наблюдениями пришлись на температуру ( $Th = 0,03$ ). Для первичной продукции и растворенного в воде кислорода  $Th$ -критерий получился примерно одинаковым, соответственно 0,23 и 0,27. Таким образом, можно говорить о приемлемом соответствии расчетных и наблюдаемых значений исследуемых характеристик экосистемы водохранилища.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием разработанной 2D пространственной модели Куйбышевского водохранилища исследована пространственно-временная динамика температура воды, содержание растворенного в воде кислорода и активность его поступления в воду в процессе фотосинтеза. Расчеты показывают, что пространственная неоднородность распределения температуры воды в период осеннего охлаждения Куйбышевского водохранилища почти в три раза выше, чем в период весеннего и летнего прогрева. Установлено, что в 2016 году средняя температура воды летом превысила на 2,2 °C

норму, рассчитанную за весь период наблюдений на Куйбышевском водохранилище. В отдельных мелководных районах водохранилища вода прогревалась до 32 °C. Эти районы представляют собой зоны акватории водохранилища с высокой концентрацией первичной продукции и содержанием кислорода (среднее насыщение >120 %), при этом пространственная неоднородность распределения концентрации в воде кислорода остается незначительной и не превышает 8,4 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние аномально высокой температуры воды на развитие планктонного сообщества водохранилищ средней Волги летом 2010 г. / А. И. Копылов, В. И. Лазарева, Н. М. Минева, Т. С. Масленникова, Я. В. Стойнов // Доклады Академии наук, 2012, т. 442, №1, с. 133-135.
2. Даценко Ю. С., Пуклаков В. В. Анализ многолетних изменений зон аноксии в Можайском водохранилище по результатам модельных расчетов // Водные ресурсы, 2021, т. 48, № 1, с. 34-41.
3. Ерина О. Н. Прогностические оценки изменения кислородного режима и качества воды в Можайском водохранилище в экстремально жаркую погоду // Вестник Московского университета. Серия 5: География, 2014, № 6, с. 10-15.
4. Кислородный режим водохранилищ Волги и Камы в период потепления климата: последствия для зоопланктона и зообентоса / В. И. Лазарева, И. Э. Степанова, А. И. Цветков, Е. Г. Пряничникова, С. Н. Перова // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, 2018, № 81 (84), с. 47-84.
5. Перекальский В. М., Кременецкая Е. Р. Математическое моделирование термогидродинамического и кислородного режимов водоема // Метеорология и гидрология, 2007, № 6, с. 60-72.
6. Подгорный К. А., Леонов А. В. Использование пространственно-неоднородной имитационной модели для изучения процессов трансформации соединений азота, фосфора и динамики кислорода в экосистеме Невской губы Финского залива. 1. Описание модели // Водные ресурсы, 2013, т. 40, № 2, с. 179-191.
7. 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.
8. 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.
9. Рахуба А. В., Шмакова М. В. Нестационарный режим водохранилища: опыт моделирования русловых процессов с подвижным дном // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2022, т. 15, № 2, с. 138-149.
10. Рахуба А. В. Оценка влияния гидродинамического режима на развитие фитопланктона и качество воды Куйбышевского водохранилища // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки, 2020, т. 162, № 3, с. 430-444.
11. Саминский Г. А. Моделирование термогидродинамического режима Иваньковского водохранилища // Вестник РУДН, секция Инженерные исследования, Издательство РУДН, № 4, 2013, с. 40-47.
12. Селезнева К. В., Селезнева А. В., Селезнев В. А. Трансформация термического режима Куйбышевского водохранилища на фоне глобального потепления климата // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2023, № 3, с. 57-67.

13. Хендерсон-Селлерс Б. *Инженерная лимнология*. Ленинград, 1987. 335 с.
14. Цхай А. А. Математическое моделирование качества воды в проектируемом водохранилище на основе модели РК-БПК // *Известия Алтайского государственного университета*, 2012, № 1-2 (73), с. 123-126.
15. Modeling dissolved oxygen dynamics and hypoxia / M.A. Pen, S. Kartsev, T. Oguz, D. Gilbert // *Biogeosciences*, 2010, vol. 7, pp. 933-957.
16. Theil H. *Applied economic forecasting*. Amsterdam, 1971. 256 p.

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

Поступила в редакцию: 26.03.2024  
Принята к публикации: 02.06.2025

UDC 556.555:001.891.57

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/102-109>

## Mathematical Modeling of Thermal Regime and Dissolved Oxygen Dynamics in the Kuibyshev Reservoir

A. V. Rakhuba 

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

**Abstract.** The purpose is to estimate spatial and temporal patterns of distribution of water temperature fields and dissolved oxygen concentration in the water area of the Kuibyshev reservoir under conditions of a hot year using a mathematical model.

**Materials and methods.** A numerical 2D spatially inhomogeneous model of the dynamics of water temperature fields, primary production and dissolved oxygen content has been developed. The model describes the formation of the oxygen regime taking into account the unsteady flow regime and uneven warming of the reservoir water area with a spatial step of 200 meters and a daily time step.

**Results and discussion.** On the basis of numerical experiments, the convection of the temperature field, the dynamics of oxygen dissolved in water and primary production in the Kuibyshev reservoir during the ice-free period are studied. Different-scale zones of the water area with different warming of the water column and oxygen content have been identified. It is shown that in autumn the spatial heterogeneity of water temperature is about three times higher than in spring and summer periods. There is a large contribution (>50 %) of phytoplankton photosynthesis to the overall oxygen balance during the flowering period.

**Conclusion.** Maps of the spatial distribution of water temperature, dissolved oxygen content and primary production in the hottest year of 2016 in the last 10 years have been obtained. The comparison of the calculated and full-scale values of the indicators was evaluated by the Tail criterion, which showed satisfactory convergence. This makes it possible to use the developed model for further studies of the current state of the Kuibyshev reservoir.

**Key words:** Kuibyshev reservoir, thermal regime, dissolved oxygen in water, primary production, ecological state, mathematical modelling.

**Funding:** The work was carried out within the framework of the state assignment (registration number 1024032700087-2-1.6.19;1.6.17).

**For citation:** Rakhuba A.V. Mathematical Modeling of Thermal Regime and Dissolved Oxygen Dynamics in the Kuibyshev Reservoir. *Vestnik Voronezskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologiya*, 2025, no. 2, pp. 102-109 (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/102-109>

### REFERENCES

1. Dacenko Ju. S., Puklakov V. V. Analiz mnogoletnih izmenenij zon anoksii v Mozhaiskom vodohranilishhe po rezul'tatam model'nyh raschetov [Analysis of long-term changes in anoxia zones in Mozhaisk reservoir based on the results of model calculations]. *Vodnye resursy*, 2021, vol. 48, no. 1, pp. 34-41. (In Russ.)
2. Erina O. N. Prognosticheskie ocenki izmenenija kislorodnogo rezhima i kachestva vody v Mozhaiskom vodohranili-  
shhe v jekstremal'no zharkuju pogodu [Prognostic estimates of changes in oxygen regime and water quality in Mozhaisk reservoir in extremely hot weather]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5: Geografija*, 2014, no. 6, pp. 10-15. (In Russ.)
3. Vlijanie anomal'no vysokoj temperatury vody na razvitiye planktonnogo soobshhestva vodohranilishh srednej Volgi letom 2010 g. [The influence of abnormally high water temperature on the development of the plankton community of the reservoirs of

the Middle Volga in the summer of 2010] / A. I. Kopylov, V. I. Lazareva, N. M. Mineeva, T. S. Maslennikova, Ja. V. Strojnov. *Doklady Akademii nauk*, 2012, vol. 442, no. 1, pp. 133-135. (In Russ.)

4. Kislorodnyj rezhim vodohranilishh Volgi i Kamy v period potepleniya klimata: posledstvija dlja zooplanktona i zoobentosa [Oxygen regime of Volga and Kama reservoirs during the period of climate warming: consequences for zooplankton and zoobenthos] / V. I. Lazareva, I. Je. Stepanova, A. I. Cvetkov, E. G. Prjaničnikova, S. N. Perova [ ]. *Trudy Instituta biologii vnutrennih vod im. I.D. Papanina RAN*, 2018, no. 81 (84), pp. 47-84. (In Russ.)

5. Perekal'skij V. M., Kremeneckaja E. R. Matematicheskoe modelirovanie termogidrodinamicheskogo i kislorodnogo rezhimov vodoema [Mathematical modeling of thermohydrodynamic and oxygen regimes of a reservoir]. *Meteorologija i gidrologija*, 2007, no. 6, pp. 60-72. (In Russ.)

6. Podgornyj K. A., Leonov A. V. Ispol'zovanie prostranstvenno-neodnorodnoj imitacionnoj modeli dlja izuchenija processov transformacii soedinenij azota, fosfora i dinamiki kisloroda v jekosisteme Nevsкоj guby Finskogo zaliva. 1. Opisanie modeli [Using a spatially heterogeneous simulation model to study the processes of transformation of nitrogen, phosphorus compounds and oxygen dynamics in the ecosystem of the Neva Bay of the Gulf of Finland. 1. Description of the model]. *Vodnye resursy*, 2013, vol. 40, no. 2, pp. 179-191. (In Russ.)

7. Rahuba A. V. Prostranstvenno-vremennoe modelirovanie dinamiki razvitiya fitoplanktona v jekosisteme Kuibyshevskogo vodohranilishha [Spatial and temporal modeling of the dynamics of phytoplankton development in the ecosystem of the Kuibyshev reservoir]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geografija. Geojekologija*, 2023, no. 4, pp. 140-149. (In Russ.)

8. Rahuba A. V. Modelirovanie cvetenija vody v Kuibyshevskom vodohranilishhe v gody s razlichnym rezhimom regulirovaniya stoka [Modeling of water blooming in the Kuibyshev reservoir in years with different flow regulation regime]. *Geograficheskiy vestnik = Geographical bulletin*, 2023, no. 2 (65), pp. 92-104. (In Russ.)

9. Rahuba A. V., Shmakova M. V. Nestacionarnyj rezhim vodohranilishha: opyt modelirovaniya ruslovyh processov s podvizhnym

dnom [Unsteady reservoir regime: experience in modeling riverbed processes with a movable bottom]. *Fundamental'naja i prikladnaja gidrofizika*, 2022, vol. 15, no. 2, pp. 138-149. (In Russ.)

10. Rahuba A. V. Ocenka vlijanija hidrodinamicheskogo rezhma na razvitiye fitoplanktona i kachestvo vody Kuibyshevskogo vodohranilishha [Assessment of the influence of the hydrodynamic regime on the development of phytoplankton and water quality of the Kuibyshev reservoir]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Serija: Estestvennye nauki*, 2020, vol. 162, no. 3, pp. 430-444.

11. Saminskij G. A. Modelirovanie termogidrodinamicheskogo rezhma Ivan'kovskogo vodohranilishha [Modeling of the thermohydrodynamic regime of the Ivankovo reservoir]. *Vestnik RUDN, sektsija Inzhenernye issledovaniya, Izdatel'stvo RUDN*, no. 4, 2013, pp. 40-47. (In Russ.)

12. Selezneva K. V., Selezneva A. V., Seleznev V. A. Transformacija termicheskogo rezhma Kuibyshevskogo vodohranilishha na fone global'nogo potepleniya klimata [Transformation of the thermal regime of the Kuibyshev reservoir against the background of global climate warming]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografija. Geojekologija*, 2023, no. 3, pp. 57-67. (In Russ.)

13. Henderson-Sellers B. *Inzhenernaja limnologija* [Engineering limnology]. Leningrad, 1987. 335 p. (In Russ.)

14. Chaj A. A. Matematicheskoe modelirovanie kachestva vody v proektiruemom vodohranilishhe na osnove modeli RK-BPK [Mathematical modeling of water quality in the projected reservoir based on the RC-BOD model]. *Izvestija Altajskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 1-2 (73), pp. 123-126. (In Russ.)

15. Modeling dissolved oxygen dynamics and hypoxia / M. A. Pen, S. Kartsev, T. Oguz, D. Gilbert. *Biogeosciences*, 2010, vol. 7, pp. 933-957.

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

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

Received: 26.03.2024

Accepted: 02.06.2025

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, Российской Федерации, ORCID: 0000-0002-1770-3197, e-mail: rahavum@mail.ru

Alexsandr V. Rahuba

Cand. Sci. (Tech.), 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 Centre of the Russian Academy of Sciences, Togliatti, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-1770-3197, e-mail: rahavum@mail.ru