

УДК 574.5

МОНИТОРИНГ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ТРОФИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В КУЙБЫШЕВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

© 2025 А.В. Рахуба

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти, Россия

Статья поступила в редакцию 14.10.2025

По данным экспедиционных наблюдений 2016 года и данным 2D математического моделирования рассмотрены особенности гидрохимического режима и пространственно-временного распределения первичной продукции и деструкции органического вещества в Куйбышевском водохранилище. Проведено сезонное моделирование термического режима, как основного фактора, влияющего на развитие фитопланктона, формирующего продукционный потенциал всей экосистемы водохранилища. С использованием разработанной модели Куйбышевского водохранилища выполнены расчеты сезонной динамики полей первичной продукции и деструкции органического вещества. Установлено, что в летний период наибольшие значения этих показателей прослеживаются в нижнем и центральном районах водохранилища, тогда как верхняя часть характеризуется более низким фотосинтезом. Согласно модельным расчетам, за вегетационный период пространственная неоднородность распределения (C_v) первичной продукции в акватории водохранилища изменяется от 19 до 34 %, причем максимум приходится на осень. Соотношение средних по глубине первичной продукции и деструкции органического вещества в Куйбышевском водохранилище больше единицы, что указывает на автотрофный характер внутриводоемных процессов. Сравнение модельных и натурных значений показателей было выполнено с использованием критерия Тейла, который показал приемлемую их сходимость.

Ключевые слова: фитопланктон, хлорофилл «а», первичная продукция, деструкция органического вещества, термический и гидрохимический режимы, биогенные элементы, математическая модель, Куйбышевское водохранилище.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4(2)-356-364

EDN: QZCUFQ

Работа выполнена при финансовом обеспечении за счет средств Федерального бюджета в рамках темы № 1024032700087-2-1.6.19; 1.6.17 (ИЭВБ РАН - филиал СамНЦ РАН).

ВВЕДЕНИЕ

Потепление климата и изменение интенсивности водообмена на водохранилищах привело к замедлению стоковых течений, повышению температуры воды и стимулированию жизнедеятельности организмов, приспособленных к повышенным температурам. Наличие достаточного, а иногда избыточного количества биогенных элементов в воде приводит к интенсивному развитию фитопланктона и повышению процессов первичного продуцирования органического вещества [2, 9]. В результате, в водоемах формируется баланс органических веществ, с которым тесно связаны балансы биогенных и других элементов [1, 6, 7]. От этого зависит экологическое состояние водной экосистемы и биологическая продуктивность, включающая все этапы продукционного процесса в водоеме [1, 4].

Проблемами биопродуктивности водохранилищ занимаются многие учреждения и институты. На Куйбышевском водохранилище наблюдения за динамикой течений, гидрохимическим режимом, развитием фитопланктона, первичной продукцией и деструкцией органического вещества проводятся с 1957 года [3, 8, 11, 13, 14, 18, 19], а в последнее время для решения экологических задач активно стали применяться методы математического моделирования [10, 12, 14-16]. В данной работе анализируются результаты как натурных наблюдений, так и модельных расчетов, цель которых оценить некоторые трофические характеристики Куйбышевского водохранилища в летний период жаркого 2016 года. Кроме того, на основе разработанной плановой 2D математической модели ставилась задача рассчитать сезонный термический режим водохранилища и пространственно-временную динамику первичной продукции и деструкции органического вещества.

Рахуба Александр Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией мониторинга водных объектов. E-mail: rahavim@mail.ru

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наблюдения проводились с 7 по 31 июля 2016 года на исследовательском судне «Биолог» по 24 станциям. Расположение станций наблюдений в Куйбышевском водохранилище представлено на рис. 1. Исследованиями была охвачена акватория восьми плесов Куйбышевского водохранилища: Волжского, Камского, Волжско-Камского, Тетюшского, Ундоровского, Ульяновского, Новодевичьего и Приплотинного. В состав наблюдений входили измерения следующих показателей: температура воды (T), перманганатная окисляемость ($ПО$), фосфор минеральный ($P_{мин}$), растворенный в воде кислород (O_2), хлорофилл ($Хл«a»$), первичная продукция (A) и деструкция органического вещества (R). Отбор проб воды осуществлялся с поверхностного и донного горизонта батометром. Гидрохимические показатели и содержание фотосинтетических пигментов определялись по действующим нормативным документам и методикам [17]. Первичная продукция и деструкция органического вещества определялись кислородной модификацией скляночного метода [5] с экспозицией в течение 24 часов.

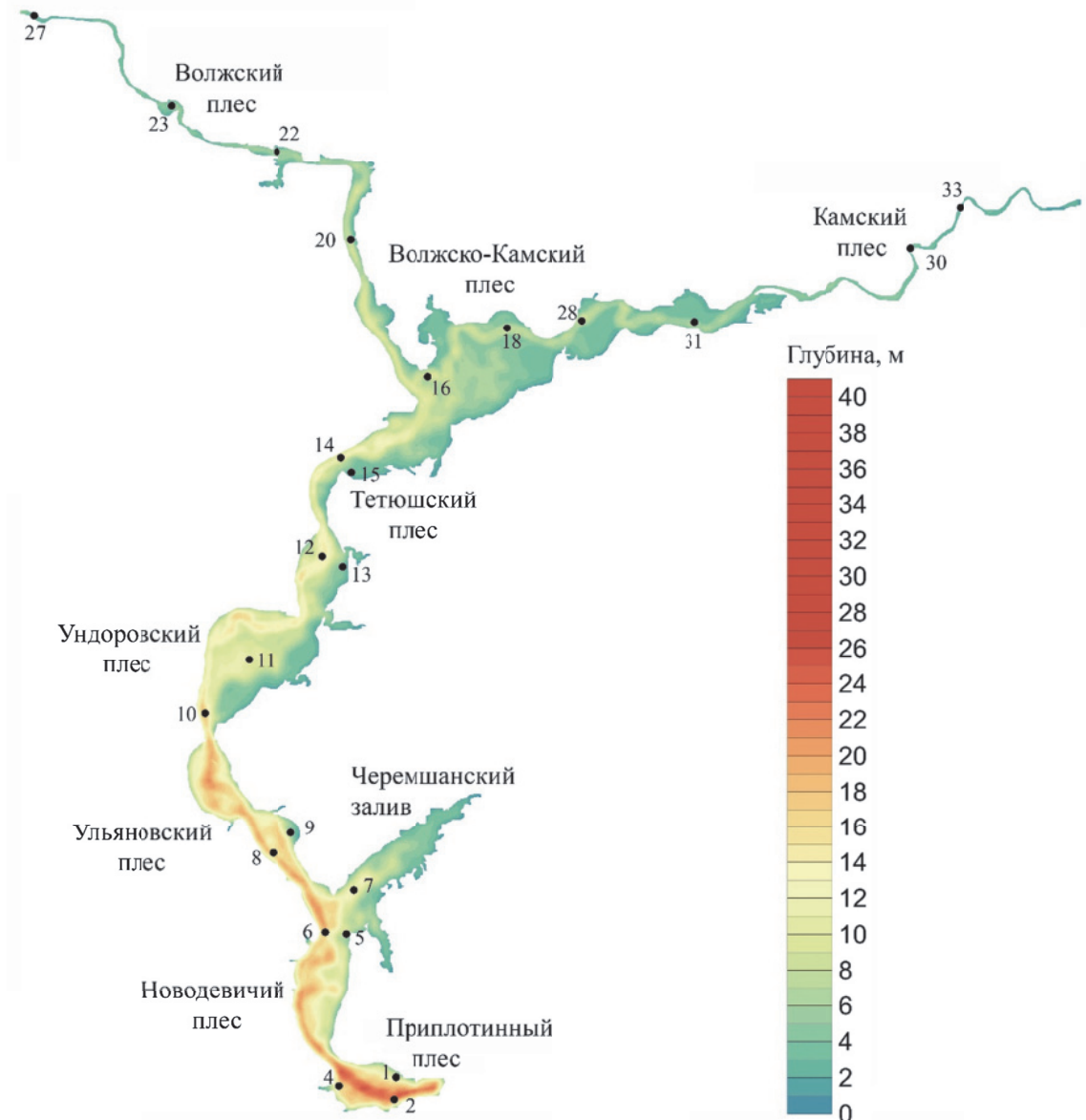


Рис. 1. Карта-схема глубин и расположения станций наблюдений в Куйбышевском водохранилище

Для оценки интенсивности прогрева акватории Куйбышевского водохранилища, сезонной динамики первичной продукции и деструкции органического вещества была разработана компьютерная 2D-пространственная модель, реализованная в программном комплексе «ВОЛНА» [14–16].

Подробное описание расчета гидродинамики для 2016 г. представлено в работе [14]. Для расчета полей температуры воды, первичной продукции и деструкции органического вещества использовались следующие уравнения:

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

j – счетчик для рассматриваемых компонентов модели

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

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

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

$$S = E_f \left(\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \right) + (Uf - Lf - Mf)F - \frac{wfF}{H} - GfZ, \quad (3)$$

Формулы параметров уравнения (3) в модели экосистемы водохранилища полностью представлены в работе [16]. Расчет компоненты биомассы фитопланктона (F) осуществляется в фосфорных единицах.

По данным наших экспедиционных наблюдений связь первичной продукции (A_{cp}) с биомассой фитопланктона (Φ) и деструкцией (R_{cp}) в Куйбышевском водохранилище описывается следующими зависимостями:

$$A_{cp} = 1,0159(k_1 \Phi)^{0,6}, \Phi = k_2 F, \quad (4)$$

$$R_{cp} = 0,177 + 0,245 A_{cp}, \quad (5)$$

где C_j – концентрация рассчитываемых в модели компонентов; T – среднесуточная температура воды, °C; A_{cp} – средняя по глубине первичная продукция в единицах кислорода, гО₂/м³/сут; R_{cp} – средняя по глубине деструкция органического вещества, гО₂/м³/сут; q_a, q_d – кинематические потоки тепла на поверхности водоема и на дне, Вт/м²; c_p – удельная теплопроводность воды, Вт·с/кг/°C; $u(x,y,t)$ и $v(x,y,t)$ – усредненные по глубине продольная и поперечная скорости, м/с; H – полная глубина, м; ρ – плотность воды, г/м³; A_L, E_f – горизонтальный турбулентный обмен для компонентов модели, м²/с; U, L, M – удельные скорости потребления форм фосфора, выделения продуктов метаболизма и отмирания, соответственно, у фитопланктона, сут⁻¹; G_p – удельная скорость потребления фитопланктона зоопланктоном, сут⁻¹; Z – биомасса зоопланктона, мгР/л; w_f – скорость гравитационного оседания фитопланктона, м/сут; F – биомасса фитопланктона, рассчитанная на модели в фосфорных единицах гР/м³; $k_1 = 1,1588e^{-0,0436H}$ – коэффициент для расчета средней биомассы фитопланктона в зависимости от глубины, б/р.

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

Уравнение (1) решается при следующих граничных условиях:

$$\phi C + E \frac{\partial C}{\partial n} = \theta(x, y, t), \quad (6)$$

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 Чебоксарской ГЭС и входном створе Камской ветки водохранилища Нижнекамской ГЭС.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным экспедиционных наблюдений в период летней межени в Куйбышевском водохранилище с его сложной морфометрией можно выделить участки воды, которые различаются по ряду трофических характеристик. Анализ пространственного распределения Хл «а», A и R показывает, что на участках Волжского и Камского переменного подпора значения этих показателей ниже, чем в других плесах Куйбышевского водохранилища. Волжский участок наиболее обеднен фитопланктоном. Концентрация Хл «а» здесь варьирует от 1,06 до 5,02 мг/м³, A_{cp} – от 0,38 до 0,53 гО₂/м³/сут и R_{cp} – от 0,24 до 0,68 гО₂/м³/сут. В Камском участке продукционные и деструкционные характеристики выше и для Хл «а» изменяются от 2,97 до 19,72 мг/м³, A_{cp} – от 0,57 до 2,14 гО₂/м³/сут и R_{cp} – от 0,35 до 1,34 гО₂/м³/сут. Наиболее интенсивное развитие фитопланктона отмечено в Новодевичьем плесе. В этом районе концентрация Хл «а» составляет 9,27–71,2 мг/м³, A_{cp} – 1,02–3,02 гО₂/м³/сут и R_{cp} – 0,79–2,38 гО₂/м³/сут (табл. 1). В среднем биомасса фитопланктона увеличивается от верховьев к плотине Жигулевской ГЭС в 4–10 раз.

Таблица 1. Гидроэкологические показатели воды в Куйбышевском водохранилище в 2016 г.

Станции отбора проб	Глубина, м	Прозрачность, м	T_{cp} , °C	$T_{расч}$, °C	O_2 , г/м ³	$Xл$ «А», мг/м ³	Поверхность (Наблюдения)		Среднее по глубине (Наблюдения)		Модельный расчет		$ΠO$, г/м ³	PO_4 , г/м ³
							A , г O_2 /м ³ /сут	R , г O_2 /м ³ /сут	A_{cp} , г O_2 /м ³ /сут	R_{cp} , г O_2 /м ³ /сут	$A_{расч}$, г O_2 /м ³ /сут	$R_{расч}$, г O_2 /м ³ /сут		
Волжский район переменного подпора														
ст. 27	7	2,0	21,6	21,1	7,10	1,06	1,22	0,33	0,38	0,24	0,40	0,30	12,5	0,089
ст. 23	15	1,8	22,2	21,2	7,34	4,36	1,50	0,73	0,47	0,52	0,52	0,45	10,4	0,069
ст. 22	16	2,1	21,9	21,0	7,03	3,34	1,74	0,96	0,55	0,68	0,81	0,53	11,5	0,084
ст. 20	15	2,3	22,7	21,2	7,05	5,02	1,68	0,61	0,53	0,43	0,64	0,52	11,8	0,07
Камский район переменного подпора														
ст. 33	6	1,7	22,8	21,5	7,28	2,97	1,80	0,49	0,57	0,35	0,80	0,38	8,6	0,033
ст. 30	4	0,7	23,9	20,8	8,03	19,20	6,15	1,68	1,94	1,03	1,28	0,49	9,5	0,01
ст. 31	9	1,3	23,4	20,5	8,19	14,41	5,04	1,23	1,59	0,88	1,08	0,71	9,6	0,026
ст. 28	11	0,9	23,4	20,4	10,10	19,72	6,79	2,19	2,14	1,34	1,83	0,75	9,9	0,024
Волжско-Камский плес														
ст. 18	11	0,9	22,7	21,4	7,57	7,63	6,86	0,73	2,16	0,52	2,21	0,51	7,2	0,019
ст. 16	7	1,2	23,4	23,3	8,94	14,02	5,37	1,01	1,69	0,72	1,66	0,63	9,4	0,014
Тетюшский плес														
ст. 14	24	1,2	22,9	22,3	7,52	15,95	5,70	0,62	1,80	0,44	1,77	0,42	11,5	0,054
ст. 15	5	0,6	23,1	22,7	8,71	32,47	8,56	1,17	2,70	0,83	2,19	0,68	10,2	0,015
ст. 12	17	1,3	23,0	22,9	8,04	11,07	2,13	0,62	0,67	0,44	1,34	0,48	8,9	0,033
ст. 13	4	2,0	23,1	23,0	7,45	2,00	0,34	1,39	0,11	0,99	0,39	0,73	9,3	0,039
Ундоровский плес														
ст. 10	23	1,0	23,6	23,5	9,51	39,25	5,92	1,63	1,86	1,00	1,81	0,78	13,0	0,01
ст. 11	9	1,4	22,7	23,2	10,10	30,25	4,45	1,45	1,40	0,89	1,71	0,65	13,1	0,032
Ульяновский плес														
ст. 8	32	1,1	22,3	23,2	9,79	42,73	6,98	2,47	2,20	1,51	1,30	0,64	13,9	0,01
ст. 9	3	1,5	22,7	23,5	10,30	13,64	4,00	1,70	1,26	1,04	1,57	0,72	10,9	0,011
Новодевичий плес														
ст. 7	11	1,5	23,2	23,5	8,96	9,27	3,25	1,11	1,02	0,79	1,87	0,81	9,9	0,019
ст. 6	26	1,0	23,4	23,2	10,80	31,50	6,72	3,42	2,12	2,10	1,72	0,74	17,3	0,006
ст. 5	5	1,0	23,3	23,1	13,20	71,16	9,58	3,88	3,02	2,38	2,23	0,59	16,6	0,004
Приплотинный плес														
ст. 4	14	1,8	23,5	22,1	8,39	9,46	1,50	1,41	0,47	0,86	0,61	0,58	12,8	0,01
ст. 2	43	1,4	23,1	21,7	11,20	25,85	1,83	2,83	0,58	1,73	0,94	0,73	11,8	0,011
ст. 1	10	1,1	22,2	22,0	11,10	13,42	2,35	1,75	0,74	1,07	1,44	0,50	10,6	0,006

Для летней межени в разные годы значения концентраций гидрохимических показателей могут различаться в несколько раз. Например, в теплый 2016 г. среднее значение концентрации органического вещества (ОВ) было в 1,5-2 раза выше, а содержание минерального фосфора – в 2 раза ниже, чем в предшествующем прохладном 2015 году. Это связано с интенсивным цветением фитопланктона в более прогретой воде водохранилища в 2016 г. Характерно, что по длине водохранилища в 2016 г. концентрация PO_4 от верховьев к плотине снижалась в 9 раз, а величина ЛО – увеличивалась в 1,8 раза. В нижней части водохранилища, наряду с изменениями ОВ и PO_4 , прослеживалось повышение O_2 в поверхностном слое водной толщи до 13,2 г/м³ и снижение в придонном слое до 4,33 г/м³. При этом разница температуры воды на период съемки между водной поверхностью и дном в среднем со-

ставляла 4 °С, а осредненная по глубине температура воды (T_{cp}) между верхним и нижним участками водохранилища – около 0,5–0,8 °С (табл. 1). Для всех гидрохимических показателей в летнюю межень 2016 года коэффициенты пространственной вариации (C_v) колебались от 3,2 до 84,7 %.

Наряду с натурными наблюдениями были проведены модельные расчеты сезонной пространственно-временной динамики температуры воды, первичной продукции и деструкции ОВ (рис. 2, рис. 3 и рис. 4). Как показывают расчеты, весной нагревание Куйбышевского водохранилища идет с разной интенсивностью на разных участках сверху вниз. В мае наиболее быстро прогревается акватория Мешенского и Черемшанского заливов, обширных мелководных акваторий Волжско-Камского, Тетюшинского и Ундоровского плесов (рис. 2а). Максимальная температура нагрева воды в заливах достигает 22 °С. Минимальная температура воды отмечается в глубоководном Приплотинном плесе и составляет 10,8 °С. Средняя температура воды по всему водохранилищу весной составляет 16,2 °С, а коэффициент пространственной неоднородности (C_v) не превышает 12 %.

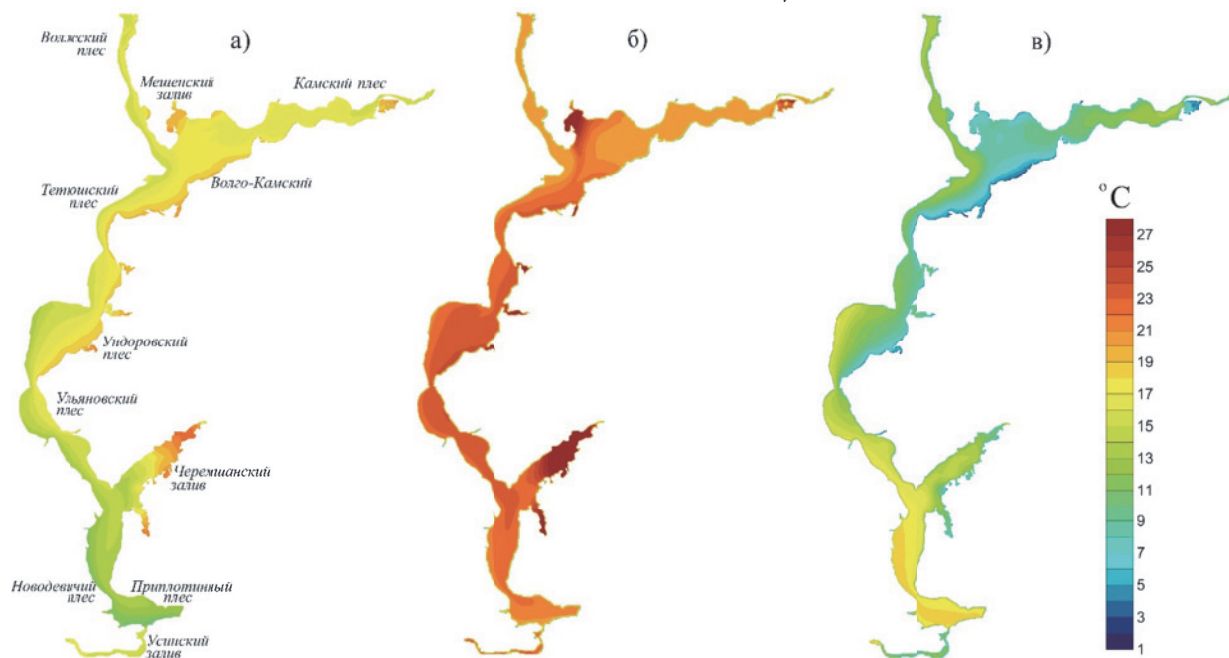


Рис. 2. Модельный расчет температуры воды весной (а), летом (б) и осенью (в) в Куйбышевском водохранилище 2016 года

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 °С, а пространственная неоднородность уменьшается до 10 % (рис. 2б). В мелководных заливах летом вода прогревается до 32 °С, на речных участках и глубоководных плесах – до 19 °С.

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 °С (рис. 2в). Средняя температура воды в осенний период составляет 12,1 °С, а наибольшая отмечается в приплотинной части водохранилища – 22,3 °С.

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 °С, наименьший – на весну и составляет 11,9 °С. Модельный расчет осредненной по всей акватории Куйбышевского водохранилища температуры воды летом 2016 года оказался на 2,2 °С выше, чем норма (20,5 °С) за весь период наблюдений. При этом в отдельных мелководных районах (Мешенский и Черемшанский заливы) температура воды превышала 30 °С, создавая неблагоприятные термические условия для существования многих крупных водных организмов.

Неоднородность распределения температуры воды в акватории водохранилища влияет на пространственную динамику формирования автохтонного органического вещества и пространственное распределение первичной продукции в водной толще. На рисунке 3 представлены модельные расчеты осредненной по глубине первичной продукции ($A_{расч}$) в акватории Куйбышевского водохранилища в единицах кислорода в сутки.

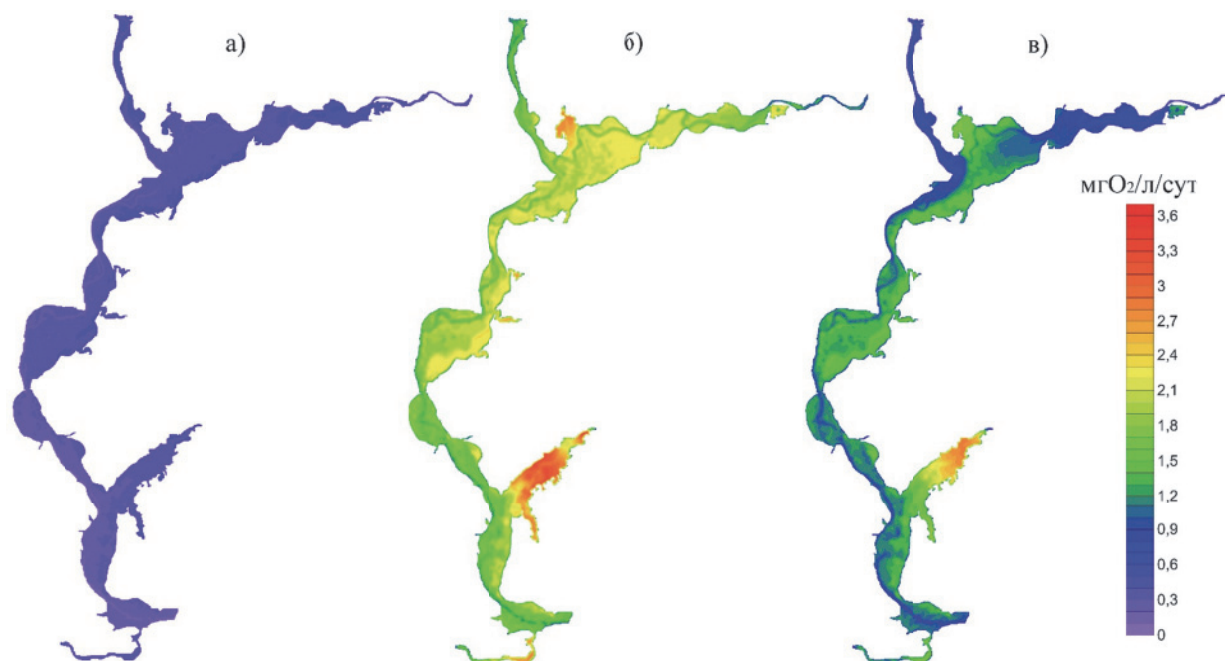


Рис. 3. Модельный расчет пространственного распределения первичной продукции ($A_{\text{расч}}$) весной (а), летом (б) и осенью (в) в Куйбышевском водохранилище 2016 года

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

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

В период осеннего охлаждения среднее значение $A_{\text{расч}}$ в водохранилище составляет $1,25 \text{ гО}_2/\text{м}^3/\text{сут}$. При этом в заливах еще остается высокий уровень первичного продуцирования, равного $2,9 \text{ гО}_2/\text{м}^3/\text{сут}$. Наименьшая $A_{\text{расч}}$ отмечается на речных участках Волжской и Камской веток, а также вдоль глубоководной части водохранилища, направленной к замыкающему Приплотинному плесу, и составляет $0,43 \text{ гО}_2/\text{м}^3/\text{сут}$ (рис. 3в). Неоднородность распределения $A_{\text{расч}}$ осенью становится выше, чем в летний период, и составляет 34 %.

На рисунке 3 можно видеть, что в летний и осенний периоды в водохранилище четко выделяются разномасштабные зоны акватории горизонтальной неоднородности $A_{\text{расч}}$. Акватория Мешенского, Черемшанского и частично Усинского заливов характеризуются наибольшими значениями $A_{\text{расч}}$, центральная части водохранилища – средними значениями $A_{\text{расч}}$, а участки нижних плесов водохранилища и акватории Волжской и Камской веток – низкими значениями $A_{\text{расч}}$, что в свою очередь влияет на динамику пространственного распределения деструкции ОВ.

Сезонные изменения деструкции ОВ в Куйбышевском водохранилище хорошо коррелируют с изменениями первичной продукции ОВ, что свидетельствует о преобладании в биотическом круговороте автохтонного ОВ.

На рисунке 4 показаны модельные расчеты пространственного распределения деструкции ($R_{\text{расч}}$) органического вещества в акватории Куйбышевского водохранилища весной, летом и осенью.

Согласно расчетам, весной среднее значение $R_{\text{расч}}$ в водохранилище невысокое и составляет $0,26 \text{ гО}_2/\text{м}^3/\text{сут}$. Летом, с накоплением в водной массе автохтонного ОВ, деструкция возрастает до $0,71 \text{ гО}_2/\text{м}^3/\text{сут}$ в среднем по всей акватории водохранилища. Наибольшие значения деструкции ОВ наблюдаются в заливах и литорали, достигая $1,12 \text{ гО}_2/\text{м}^3/\text{сут}$, наименьшие – в Волжской и Камской ветках водохранилища – $0,52 - 0,55 \text{ гО}_2/\text{м}^3/\text{сут}$. Осенью $R_{\text{расч}}$ снижается до $0,45 \text{ гО}_2/\text{м}^3/\text{сут}$ в русловой части водохранилища и до $0,74 \text{ гО}_2/\text{м}^3/\text{сут}$ – в литорали.

В Куйбышевском водохранилище деструкция ОВ хорошо связана с биомассой фитопланктона. Самые высокие значения деструкции ОВ приходятся на период интенсивного «цветения» водохранилища. Соотношение $A_{\text{расч}}/R_{\text{расч}}$ в Куйбышевском водохранилище на протяжении всего вегетационного периода больше единицы, что указывает на автотрофный характер внутриводоемных процес-

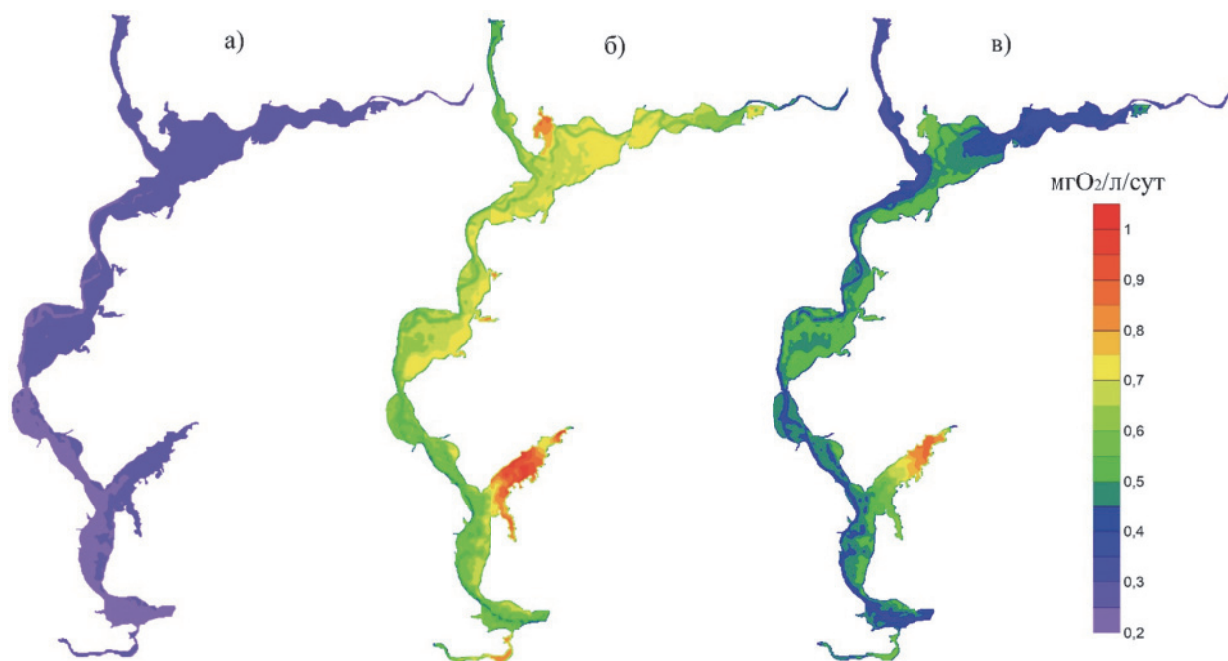


Рис. 4. Модельный расчет пространственного распределения деструкции ОВ ($R_{расч}$) весной (а), летом (б) и осенью (в) в Куйбышевском водохранилище 2016 года

сов. Исключение составляют лишь ранняя весна и поздняя осень, когда $R_{расч}$ больше $A_{расч}$. В период летнего прогрева первичная продукция в разы превышает деструкцию ОВ.

Для проверки адекватности модели по температуре воды, первичной продукции и деструкции ОВ на момент проведения летних экспедиционных съемок в 2016 г. в Куйбышевском водохранилище проводился расчет критерия Тейла (Th) [20]. Модельные расчеты считаются удовлетворительными, если $Th < 0,4$. Наименьшие расхождения между расчетами и наблюдениями пришлись на температуру ($Th=0,03$). Для первичной продукции и деструкции ОВ Th -критерий составил 0,15 и 0,25. Таким образом, можно говорить о приемлемом соответствии расчетных и наблюдаемых значений исследуемых характеристик экосистемы водохранилища.

ВЫВОДЫ

Для одного из жарких за последние десять лет летних периодов проведена качественная и количественная оценка пространственной гидрохимической неоднородности и динамики первичной продукции фитопланктона и деструкции ОВ в акватории Куйбышевского водохранилища. Установлено, что в период максимального прогрева воды на водохранилище интенсивное развитие фитопланктона наблюдается в центральных и приплотинных плесах водохранилища, тогда как верхняя русловая часть Волжской и Камской веток переменного подпора характеризуются низкой биомассой фитопланктона, первичной продукцией и деструкцией ОВ.

На пространственной численной 2D-модели выполнены расчеты термического режима, пространственного распределения и сезонной изменчивости первичной продукции и деструкции ОВ. В целом для акватории Куйбышевского водохранилища за вегетационный период величина пространственной неоднородности биомассы и первичной продукции фитопланктона изменялась в пределах 19-34%. Согласно модельным расчетам, соотношение средних по глубине первичной продукции и деструкции в Куйбышевском водохранилище больше единицы, что указывает на автоτροφный характер внутриводоемных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов А.Ф., Богатов В.В., Голубков С.М. Продукционная гидробиология. СПб.: Наука, 2013. 342 с.
2. Буторин Н.В., Поддубный А.Г. Биология внутренних вод. М.: Знание, 1979. 64 с.
3. Буторин Н.В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 323с.
4. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.
5. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.

6. Минеева Н.М. Первичная продукция планктона в Водохранилищах Волги. Ярославль: Принтхаус, 2009. 279 с.
7. Никаноров А.М., Хоружая Т.А. Роль биотической и абиотической компонент водной экосистемы в формировании экологического неблагополучия Цимлянского и Маньчжунских водохранилищ // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 5. С. 544-554.
8. Номоконова В.И., Паутова В.Н. Первичная продукция фитопланктона в Куйбышевском и Саратовском водохранилищах в летние сезоны 2009–2011 гг. // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 3. С. 185–193.
9. Приймаченко А.Д. Фитопланктон и первичная продукция Днепра и днепровских водохранилищ. Киев: Наукова думка, 1981. 278 с.
10. Пуклаков В.В., Даценко Ю.С. Оценка влияния Нижнекамского гидроузла на экологическое состояние Куйбышевского водохранилища // В сборнике: Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. труды VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Пермь, 2021. С. 344-348.
11. Пырина И.Л. Первичная продукция фитопланктона в Ивановском, Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах в зависимости от некоторых факторов // Продуцирование и круговорот органического вещества во внутренних водоемах: Тр. ИБВВ АН СССР. М.-Л.: Наука, 1966. Вып. 13(16). С. 249-269.
12. 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.
13. Рахуба А.В., Тихонова Л.Г. Оценка пространственно-временного распределения трофических характеристик Куйбышевского водохранилища // Известия Самарского научного центра РАН, 2016. Т. 18. № 5(2). С. 349-355.
14. Рахуба А.В. Оценка влияния гидродинамического режима на развитие фитопланктона и качество воды Куйбышевского водохранилища // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2020. – Т. 162, кн. 3. – С. 430-444.
15. 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.
16. 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.
17. Руководство по химическому анализу морских и пресноводных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
18. Салманов М.А., Сорокин Ю.И. Первичная продукция Куйбышевского водохранилища // Изв. АН СССР. Сер. Биол., 1962. №4. С. 603-615.
19. Экология фитопланктона Куйбышевского водохранилища. Л.: Наука, 1989. 304 с.
20. Theil H. Applied economic forecasting. Amsterdam, 1971. 256 p.

MONITORING AND MATHEMATICAL MODELING OF THE DYNAMICS OF DISTRIBUTION OF SOME TROPHIC CHARACTERISTICS IN THE KUYBYSHEV RESERVOIR

© 2025 A.V. Rakhuba

Samara Federal Research Scientific Center RAS,
Institute of Ecology of Volga River Basin RAS, Togliatti, Russia

Based on 2016 expedition observations and 2D mathematical modeling data, the features of the hydrochemical regime and the spatio-temporal distribution of primary production and organic matter degradation in the Kuibyshev Reservoir were examined. Seasonal modeling of the thermal regime as the main factor influencing the development of phytoplankton, which forms the productive potential of the entire ecosystem of the reservoir, has been carried out. Using the developed model of the Kuibyshev reservoir, calculations of the seasonal dynamics of fields of primary production and destruction of organic matter were performed. It has been established that in summer, the highest values of these indicators can be traced in the lower and central regions of the reservoir, while the upper part is characterized by lower photosynthesis. According to model calculations, during the growing season, the spatial heterogeneity of the distribution (C_v) of primary products in the reservoir area varies from 19 to 34%, with the maximum occurring in autumn. The ratio of the average depth of primary production and destruction of organic matter in the Kuibyshev reservoir is more than one, which indicates the autotrophic nature of intra-water processes. A comparison of the model and field values of the indicators was performed using the Theil criterion, which showed acceptable convergence.

Keywords: phytoplankton, chlorophyll “a”, primary production, destruction of organic matter, thermal and hydrochemical regimes, biogenic elements, mathematical model, Kuibyshev reservoir.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4(2)-356-364

EDN: QZCUFQ

REFERENCES

1. Alimov A.F., Bogatov V.V., Golubkov S.M. *Produkcionnaja gidrobiologija* [Production hydrobiology]. SPb.: Nauka, 2013. 342 p.
2. Butorin N.V., Poddubny A.G. *Biologija vnutrennih vod* [Biology of Inland Waters]. M.: Znanie, 1979. 64 p.
3. Butorin N.V. *Gidrologicheskie processy i dinamika vodnyh mass v vodohranilishhah Volzhskogo kaskada* [Hydrological processes and dynamics of water masses in the reservoirs of the Volga cascade]. L.: Nauka, 1969. 323 p.
4. Vinberg G.G. *Pervichnaja produkcija vodoemov* [Primary products of water bodies]. Minsk: Izd-vo AN BSSR, 1960. 329 p.
5. *Metodika izuchenija biogeocinozov vnutrennih vodoemov* [Methodology for the study of biogeocinosis of inland waters]. M.: Nauka, 1975. 240 p.
6. Mineeva N.M. *Pervichnaja produkcija planktona v Vodohranilishhah Volgi* [Primary plankton production in the Volga Reservoirs]. Jaroslavl': Prinhaus, 2009. 279 p.
7. Nikanorov A.M., Horuzhaja T.A. Rol' bioticheskoj i abioticheskoj komponent vodnoj jekosistemy v formirovanii jekologicheskogo neblagopoluchija Cimljanskogo i Manychskih vodohranilishh [The role of the biotic and abiotic components of the aquatic ecosystem in the formation of the ecological disadvantage of the Tsimlyansk and Manych reservoirs] // *Vodnye resursy*. 2019. Vol. 46. № 5. P. 544-554.
8. Nomokonova V.I., Pautova V.N. *Pervichnaja produkcija fitoplanktona v Kujbyshevskom i Saratovskom vodohranilishhah v letnie sezony 2009–2011 gg.* [Primary phytoplankton production in the Kuibyshev and Saratov reservoirs during the summer seasons of 2009–2011] // *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN*. 2013. Vol. 15. № 3. P. 185–193.
9. Prijmachenko A.D. *Fitoplankton i pervichnaja produkcija Dnepra i dneprovskih vodohranilishh* [Phytoplankton and primary production of the Dnieper and Dnieper reservoirs]. Kiev: Naukova dumka, 1981. 278 p.
10. Puklakov V.V., Datsenko Yu.S. Assessment of the Influence of the Nizhnekamsk Hydroelectric Complex on the Ecological State of the Kuibyshev Reservoir // In the Collection: *Modern Problems of Reservoirs and Their Catchments. Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation*. Perm, 2021. Pp. 344-348.
11. Pyrina I.L. *Pervichnaja produkcija fitoplanktona v Ivan'kovskom, Rybinskom i Kujbyshevskom vodohranilishhah v zavisimosti ot nekotoryh faktorov* [Primary phytoplankton production in Ivankovsky, Rybinsk and Kuibyshev reservoirs depending on some factors] // *Producirovanie ikrugovorot organicheskogo veshhestva vo vnutrennih vodoemah*: Tr. IBVV AN SSSR. M.-L.: Nauka, 1966. Vol. 13(16). P. 249-269.
12. 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 and applied hydrophysics*, 2022. Vol. 15. No. 2. P. 138-149.
13. Rahuba A.V., Tihonova L.G. *Ocenka prostranstvenno-vremennogo raspredelenija troficheskikh harakteristik Kujbyshevskogo vodohranilishha* [Estimation of the spatio-temporal distribution of trophic characteristics of the Kuibyshev reservoir] // *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN*, 2016. Vol. 18. № 5(2). P. 349-355.
14. Rakhuba A.V. 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*, 2020, vol. 162, no. 3, pp. 430–444.
15. Rakhuba A. V. Spatial-time Modelling of the Dynamics of Phytoplankton Development in the Ecosystem of the Kuibyshev Reservoir // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*, 2023, no. 4, pp. 140-149. (In Russ.)
16. 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.
17. *Rukovodstvo po himicheskomu analizu morskikh i presnovodnyh vod pri jekologicheskom monitoringe rybohozajajstvennyh vodoemov i perspektivnyh dlja promysla rajonov Mirovogo okeana* [Guidelines for the chemical analysis of marine and freshwater in the environmental monitoring of fisheries and promising areas of the oceans for fishing]. M.: Izd-vo VNIRO, 2003. 202 p.
18. Salmanov M.A., Sorokin Ju.I. *Pervichnaja produkcija Kujbyshevskogo vodohranilishha* [Primary production of the Kuibyshev reservoir] // *Izv. AN SSSR. Ser. Biol.*, 1962. №4. P. 603-613.
19. *Jekologija fitoplanktona Kujbyshevskogo vodohranilishha* [Ecology of phytoplankton of the Kuibyshev reservoir]. L.: Nauka, 1989. 304 p.
20. Theil H. *Applied economic forecasting*. Amsterdam, 1971. 256 p.