

УДК 574.52:001.891.573

doi: 10.26907/2542-064X.2020.3.430-444

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НА РАЗВИТИЕ ФИТОПЛАНКТОНА И КАЧЕСТВО ВОДЫ КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

*А.В. Рахуба*

*Самарский федеральный исследовательский центр РАН,  
Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти, 445003, Россия*

### Аннотация

По результатам натуральных гидроэкологических наблюдений в Куйбышевском водохранилище за 2016–2017 гг. и расчетов скоростей течения на двумерной численной гидродинамической модели оценена роль гидродинамического режима в формировании фитопланктона и качества воды. Предложенная модель разработана на основе уравнений «мелкой воды» и реализована для участка водохранилища на прямоугольной пространственной сетке с шагом 200 м. Численное моделирование осуществлялось для осредненных по глубине скоростей течения в водохранилище. Проведена серия модельных расчетов и выявлена зависимость развития фитопланктона от режима регулирования стока. Анализ данных наблюдений и результаты моделирования показали, что удельная скорость роста фитопланктона на порядок выше скорости водообмена в Куйбышевском водохранилище. Установлено, что биомасса фитопланктона меняется по степенному закону с изменением средних скоростей течения в водохранилище, а увеличение точности в период летней межени заметно снижает содержание органических веществ в воде и даже позволяет предотвратить цветение цианобактериями.

**Ключевые слова:** фитопланктон, эвтрофирование, качество воды, гидродинамика, гидрохимия, численная модель, Куйбышевское водохранилище

### Введение

Антропогенное эвтрофирование пресноводных водоемов является одной из наиболее острых современных проблем охраны водных ресурсов. Зарегулирование стока рек изменяет функционирование речных биоценозов, а также приводит к массовому «цветению» воды, связанному с обильным развитием планктонных цианобактерий и эукариотических микроводорослей. Увеличение валовой первичной продукции сопровождается ухудшением качества воды, ростом содержания органических и токсических веществ. По этой причине изучение особенностей водных экосистем в условиях активного антропогенного воздействия остается актуальной задачей для целого ряда исследований [1–19].

Особый интерес для изучения механизмов улучшения экологического состояния водных объектов имеют водохранилища: поскольку они имеют природно-техническое происхождение, то добиться улучшения качества воды в них можно через регулирование скорости течения путем внутригодового перераспределения стока.

Влияние скорости течения воды на продукционные процессы имеет как прямой, так и косвенный характер. Прямое влияние проявляется в механическом воздействии на рост и развитие фитопланктона, а косвенное осуществляется через изменение физических и химических условий вегетирования водорослей [5, 6]. Развитие фитопланктона в водохранилищах обуславливается совокупным воздействием множества факторов, среди которых существенное значение имеют температура воды, концентрация биогенных веществ (преимущественно неорганического фосфора), гидродинамический и гидрологический режимы. Температура воды в водных объектах зависит от природно-климатических условий, поэтому, в принципе, не рассматривается как регулируемый фактор для предотвращения антропогенного эвтрофирования. Уменьшение внешней биогенной нагрузки на водоем – задача, также трудно реализуемая в современных условиях хозяйствования. Лабораторные эксперименты показали, что на благоприятное развитие фитопланктона в большей мере влияет не сама скорость, а гидромеханическое (динамическое) состояние течения – турбулентность, которая может быть оценена, например, числом Рейнольдса [20, 21]. Тем не менее, несмотря на то что скорость течения является одним из важных экологических факторов в водоемах, ее влияние на процессы эвтрофирования не так однозначно – она может как усиливать, так и ослаблять продукционные процессы [22].

Цель настоящей работы – исследование влияния гидродинамического фактора на интенсивность развития фитопланктона и содержание органических веществ в Куйбышевском водохранилище.

## 1. Материалы и методы

В качестве объекта изучения выбрано самое крупное водохранилище Волжского каскада – Куйбышевское, образованное в 1955 г. при зарегулировании реки у г. Жигулевска. Общая длина по затопленному руслу р. Волга составляет 510 км, наибольшая ширина – 27 км, средняя глубина при нормальном подпорном уровне (НПУ) – 9 м, площадь водного зеркала – 5900 км<sup>2</sup>, общая емкость при НПУ – 58.0 км<sup>3</sup> [23]. Наполнение водохранилища происходит весной, в оставшееся время года – сработка водных запасов. Амплитуда годового колебания уровня воды достигает 5–7 м. Многолетнее регулирование стока в водохранилище не производится. На всем протяжении водохранилища озеровидные плесовые расширения чередуются с резкими сужениями [31].

Данное исследование проводилось для нижней части Куйбышевского водохранилища, которая включает в себя Ульяновский, Новодевичий, Приплотинный плесы и обширный мелководный Черемшанский залив. Гидробиологические (фитопланктон) и гидрохимические пробы отобраны на 9 станциях с 7 по 31 июля 2016 г. и на 22 станциях с 25 июля по 3 августа 2017 г. (рис. 1). Пробы отбирали с НИС «Биолог» батометром Рутнера с поверхности до дна с шагом 2 м. Кроме того, в период 2016–2017 гг. ежемесячно в 2.5 км ниже плотины Жигулевской ГЭС отбирали пробы, характеризующие качество воды: содержание растворенного в воде кислорода (O<sub>2</sub>), перманганатной окисляемости (ПО), биохимическое потребление кислорода (БПК<sub>5</sub>) и хлорофилла а (Хл а).

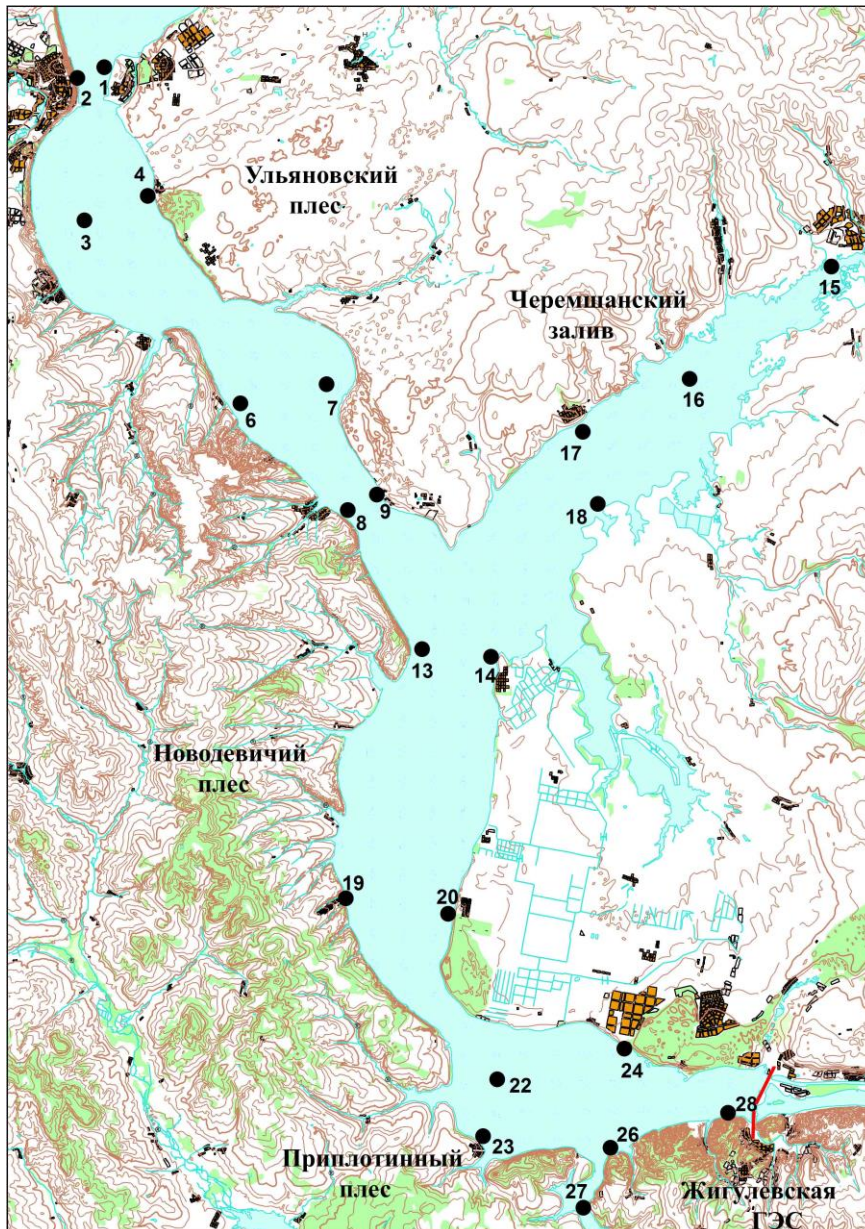


Рис. 1. Расположение станций наблюдений в Куйбышевском водохранилище

Для оценки влияния гидродинамического фактора на развитие фитопланктона были использованы данные по режиму расхода и уровня воды в замыкающем створе гидроузла Жигулевской ГЭС (рис. 2) [24]. Величина средних скоростей течения на выбранном участке рассчитывалась с использованием гидродинамической модели, которая основана на уравнениях «мелкой воды» и численно реализована в авторской программной среде «Волна» [25, 26]. Система уравнений «мелкой воды» имеет следующий вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - lv =$$

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + lv =$$

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

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

где  $u(x, y, t)$  и  $v(x, y, t)$  – усредненные по глубине продольная и поперечная скорости;  $h(x, y, t)$  – невозмущенная глубина;  $\zeta(x, y, t)$  – уровень свободной поверхности;  $x$  и  $y$  – декартовы координаты расчетной сетки;  $H = h + \zeta$  – полная глубина;  $g$  – ускорение свободного падения;  $l = 2\omega \sin \varphi$  – параметр Кориолиса ( $\omega = 2\pi/\text{сут}$  – угловая скорость вращения земли,  $\varphi$  – географическая широта).

Для касательного напряжения ветра:  $c_a$  – безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления водной поверхности,  $\rho_a/\rho = 10^{-3}$  – отношение плотностей воздуха и воды,  $W_{(x)}$  и  $W_{(y)}$  – компоненты составляющей скорости ветра,  $W$  – результирующий вектор скорости ветра. Для касательного напряжения, обусловленного трением о поверхность дна:  $V$  – результирующий вектор скорости течения,  $f_{\text{дно}} = g/C_{\text{ш}}^2$  – безразмерный коэффициент придонного трения,  $C_{\text{ш}}$  – коэффициент Шези. Горизонтальный турбулентный обмен задается коэффициентом  $K_L$ ,  $P_a$  – изменение атмосферного давления.

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

$$u_n = 0: \quad K_L \frac{\partial u_\tau}{\partial n} = -f_b u_\tau |V|, \quad (4)$$

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

На открытых боковых границах одним из граничных условий является равенство нулю касательной к границе составляющей скорости:  $u_\tau = 0$ , второе граничное условие может быть разных типов. Для первого типа задается нормальная компонента скорости как функция времени:  $u_n = f(t)$ . Для второго типа задается уровень воды:  $\zeta = \zeta(t)$ . Для третьего типа задается зависимость между нормальной компонентой скорости и уровнем  $u_n = \pm(g/h)^{1/2} \zeta$ .

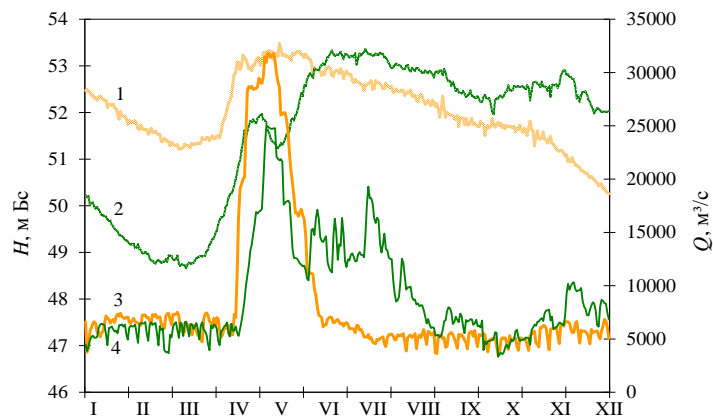


Рис. 2. Внутригодовой ход уровня ( $H$ ; 2016 г. (1) и 2017 г. (2)) и расхода ( $Q$ ; 2016 г. (3) и 2017 г. (4)) воды в створе Жигулевской ГЭС, по [24]

Построенная модель разработана для участка водохранилища от г. Ульяновска до г. Жигулевска и состоит из 47808 узлов пространственной прямоугольной сетки с шагом 200 м. Все расчеты проводились с шагом по времени, равным 4 с.

## 2. Результаты и их обсуждение

Результаты наблюдений за режимом эксплуатации Куйбышевского водохранилища показывают, что, характеризуясь сезонным периодом регулирования стока воды, водохранилище ежегодно в течение весеннего половодья наполняется до максимальных отметок и затем, к следующему половодью, сбрасывается до минимальных [23]. В основном за весенний период водохранилище наполняется до отметки, близкой к НПУ (53.0 м Бс), а продолжительность и характер наполнения зависят от уровня предполоводной сработки. Так, в 2016 г. наполнение водохранилища началось 2 апреля с отметки уровня 51.46 м Бс, а холостой сброс воды на Жигулевском гидроузле осуществлялся с 13 апреля по 6 июня, то есть около двух месяцев, что вполне соответствует типичному режиму регулирования на водохранилище. В 2017 г. подъем уровня при весеннем наполнении начался 23 марта с отметки 48.92 м Бс и прерывался временным спадом уровня (рис. 2). Холостой сброс воды осуществлялся уже в течение четырех месяцев с 21 апреля по 24 августа, в результате чего расходы воды в летнюю межень значительно выросли.

Сравнительная оценка режимов регулирования стока показывает, что при относительно одинаковых среднегодовых расходах воды в 2016 г. ( $8320 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и 2017 г. ( $8946 \text{ м}^3/\text{с}$ ) внутригодовое распределение стока различается, особенно в весеннее половодье и летнюю межень. В период весеннего половодья (с апреля по май) расход воды в 2016 г. в среднем оказался в 1.6 раза выше, чем в 2017 г., что превосходит многолетнюю норму расхода воды на 30%. В летнюю межень (с июня по август) расход воды 2016 г. соответствовал среднемугодовым значениям в этот период. В 2017 г. средний расход воды за летнюю межень увеличился в 2 раза по сравнению с 2016 г. (с  $5920$  до  $12021 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и превысил многолетнюю норму более чем на 50% (табл. 1). Таких высоких летних расходов

Табл. 1

Гидрологические и гидрохимические показатели Куйбышевского водохранилища на стационарном пункте наблюдений в нижнем бьефе Жигулевской ГЭС

Год	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Хл а, мг/м <sup>3</sup>												
2016	н/о	н/о	н/о	0.13	1.04	3.11	10.90	4.58	2.02	0.60	0.63	н/о
2017	н/о	н/о	0.13	0.63	0.46	0.35	0.72	0.70	0.44	0.37	н/о	н/о
Температура воды, °С												
2016	0.1	0.1	0.1	1.2	11.6	17.2	19.3	22.9	8.0	6.1	4.4	0.1
2017	0.0	0.2	0.1	2.0	9.0	13.6	18.6	22.0	18.8	11.4	5.6	0.6
Расход воды, м <sup>3</sup> /с												
2016	6391	6861	6322	17256	24129	7437	5245	5077	5113	4731	5734	5546
2017	5667	5615	5944	9083	18405	13779	14144	8140	6598	4719	7311	7943
1958–2017	5999	6051	5765	10441	19803	8760	6473	5914	5646	5502	5793	6145
Коэффициент водообмена (Кв), 1/сут												
2016	0.010	0.010	0.009	0.026	0.036	0.011	0.008	0.008	0.008	0.007	0.009	0.008
2017	0.008	0.008	0.009	0.014	0.027	0.021	0.021	0.012	0.010	0.007	0.011	0.012
1958–2017	0.009	0.009	0.009	0.016	0.029	0.013	0.010	0.009	0.008	0.008	0.009	0.009
Период водообмена, сут												
2016	105	98	106	39	28	90	128	132	131	142	117	121
2017	118	120	113	74	36	49	47	82	102	142	92	85
1958–2017	112	111	116	64	34	77	104	114	119	122	116	109
Растворенный кислород, г О <sub>2</sub> /м <sup>3</sup>												
2016	12.30	10.60	8.95	7.99	9.55	7.69	5.92	4.96	7.25	8.96	11.20	12.60
2017	11.61	9.54	6.22	7.21	10.19	8.84	7.60	5.88	7.33	9.20	10.60	12.30
ПО, г О <sub>2</sub> /м <sup>3</sup>												
2016	7.13	7.44	8.36	7.80	10.30	8.65	11.20	10.50	9.20	6.96	6.00	6.00
2017	7.36	6.72	7.60	6.24	6.96	9.12	10.56	8.56	10.40	9.98	9.58	9.03
БПК <sub>5</sub> , г О <sub>2</sub> /м <sup>3</sup>												
2016	0.64	0.52	0.46	0.50	0.56	1.00	2.38	1.14	0.89	0.50	0.65	0.56
2017	1.59	2.70	1.08	0.38	0.90	2.43	1.37	0.43	0.74	0.69	0.23	0.63

Примечание: «н/о» – не обнаружено.

воды, как в 2017 г. (в июле – 14144 м<sup>3</sup>/с), не наблюдалось за все время эксплуатации Куйбышевского водохранилища. Безусловно, столь существенное изменение водного режима не могло не повлиять на развитие фитопланктона.

Оценке зависимости развития фитопланктона от гидродинамического режима посвящено немало работ [3, 5, 6, 12, 13, 16–22, 27–29]. На основе данных многолетних наблюдений авторы показывают, что пороговая величина периода водообмена, выше которой режим стока не оказывает существенного влияния на развитие фитопланктона лежит в пределах 20–100 сут и в среднем составляет 60 сут [3, 13, 17, 19]. Более того, увеличение биомассы водорослей лимитируется гидродинамическим фактором в том случае, если скорость удвоения биомассы оказывается меньше скорости водообмена в водоеме [3, 30]. По результатам наших исследований в приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища удвоение биомассы фитопланктона происходит за 7 сут при средней удельной

скорости роста фитопланктона  $0.1 \text{ сут}^{-1}$  [7]. При этом коэффициент водообмена в водохранилище в период летней межени на порядок ниже, чем скорость роста фитопланктона и составляет  $0.008\text{--}0.021 \text{ сут}^{-1}$ , что соответствует периоду водообмена в 48–125 сут (табл. 1).

Данные мониторинга, полученные на стационарном посту наблюдений показывают, что на фоне значительного отличия объема водного стока в вегетационный период 2016–2017 гг. отмечаются существенные различия в темпах развития фитопланктона. Так, в 2016 г. содержание Хл *a* составило  $3.11 \text{ мг/м}^3$  в июне,  $10.9 \text{ мг/м}^3$  в июле и  $4.58 \text{ мг/м}^3$  в августе, а в 2017 г. снизилось и составило  $0.35 \text{ мг/м}^3$  в июне,  $0.72 \text{ мг/м}^3$  в июле и  $0.70 \text{ мг/м}^3$  в августе. При этом в июле на пике прогрева воды в эти годы различие по температуре воды составило  $0.9 \text{ }^\circ\text{C}$  (табл. 1). Таким образом, в летний период 2017 г. в результате высокого пропуска воды на Жигулевском гидроузле условия для развития фитопланктона сложились более неблагоприятные. При незначительных отличиях температуры концентрация Хл *a* снизилась в 9–15 раз.

Увеличение биомассы фитопланктона сопровождалось ростом ОБ и ухудшением кислородного режима. Концентрация растворенного кислорода летом 2016 г. была ниже нормативных требований к водоемам рыбохозяйственного назначения ( $6.0 \text{ г O}_2/\text{м}^3$ ) и составила  $5.92 \text{ г O}_2/\text{м}^3$  в июле и  $4.96 \text{ г O}_2/\text{м}^3$  в августе. В 2017 г. концентрация кислорода была несколько выше за счет увеличения скоростей течения и аэрации и составила  $7.6 \text{ г O}_2/\text{м}^3$  в июле и  $5.88 \text{ г O}_2/\text{м}^3$  в августе. Результаты ежемесячного мониторинга в вегетационный период показывают, что в 2017 г. возросший водообмен сопровождался снижением содержания ОБ в воде по сравнению с 2016 г. (табл. 1). Величина ПО в июле и августе 2017 г. составила  $10.56 \text{ г O}_2/\text{м}^3$  и  $8.56 \text{ г O}_2/\text{м}^3$ , в 2016 г. –  $11.20 \text{ г O}_2/\text{м}^3$  и  $10.50 \text{ г O}_2/\text{м}^3$ . Величина БПК<sub>5</sub> также была ниже в июле и августе 2017 г. и составила  $1.37 \text{ г O}_2/\text{м}^3$  и  $0.43 \text{ г O}_2/\text{м}^3$ , а в 2016 г. –  $2.38 \text{ г O}_2/\text{м}^3$  и  $1.14 \text{ г O}_2/\text{м}^3$ . Только за счет увеличения проточности летом 2017 г. показатели ПО снизились на 6–18%, а БПК<sub>5</sub> – на 42–62%.

Экспедиционные данные по содержанию ОБ в пределах акватории водохранилища подтверждают результаты ежемесячного мониторинга за 2016–2017 гг. Средняя по станциям наблюдений величина ПО и БПК<sub>5</sub> в 2016 г. была выше, чем в 2017 г. в 1.2 и 1.8 раз соответственно (табл. 2). Таким образом, повышение водообмена в водохранилище не только сдерживает процессы «цветения» ввиду увеличения объема водорослей, но и, как следствие, способствует снижению концентрации в воде ОБ.

Рассмотрим влияние движения воды на развитие водорослей, опираясь на данные экспедиционных исследований пространственного распределения фитопланктона и модельные расчеты скоростей течения в Куйбышевском водохранилище (рис. 1). По данным экспедиционных наблюдений в период максимального прогрева воды в нижней части водохранилища отмечается значительное увеличение обилия цианобактерий, вызывающих «цветение» воды. В 2016 г. доля цианобактерий в общем таксономическом составе фитопланктона составила 99%. В 2017 г. соотношение основных компонентов фитопланктона изменилось. Доля цианобактерий составила 37%, диатомовых водорослей – 48% и зеленых водорослей – 17%. Выявлена достоверная положительная корреляция между содержанием Хл *a* и биомассой фитопланктона ( $k = 0.90$ ,  $p \leq 0.05$ ) (рис. 3).

Табл. 2

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

Номер станции	Максимальная глубина участка, м	Хл <i>a</i> , мг/м <sup>3</sup>		Биомасса фитопланктона, г/м <sup>3</sup>		Расчетная скорость течения, м/с		Температура воды, °С		ПО, г O <sub>2</sub> /м <sup>3</sup>		БПК <sub>5</sub> , г O <sub>2</sub> /м <sup>3</sup>	
		2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017
1	7	–	2.45	–	0.11	–	0.150	–	21.6	–	9.9	–	1.7
2	26	39.25	2.21	12.49	0.03	0.070	0.159	23.6	21.7	13.00	10.2	5.17	1.38
3	22	–	11.86	–	3.28	–	0.068	–	22.4	–	10.9	–	1.93
4	10	–	17.34	–	5.12	–	0.041	–	21.5	–	9.3	–	1.45
6	34	–	4.84	–	0.92	–	0.013	–	21.8	–	11.2	–	3.39
7	5	–	2.80	–	0.23	–	0.101	–	22.6	–	10.2	–	2.04
8	14	42.73	2.93	13.66	0.27	0.038	0.090	22.3	22.1	13.92	10.9	2.17	1.92
9	23	13.64	14.32	3.88	4.11	0.028	0.061	22.7	21.9	10.88	11.2	3.56	3.9
13	30	31.50	4.08	9.89	0.66	0.025	0.062	23.4	21.6	17.28	9.9	5.94	1.36
14	8	71.16	56.96	23.23	18.45	0.002	0.004	23.3	23.0	16.64	14.4	8.01	4.48
15	4	–	33.44	–	10.54	–	0.005	–	25.0	–	13.8	–	6.83
16	3	–	17.28	–	5.10	–	0.001	–	25.2	–	9.4	–	4.39
17	6	–	47.77	–	15.36	–	0.001	–	23.2	–	13.4	–	6.24
18	10	–	59.01	–	19.14	–	0.001	–	23.1	–	16.0	–	7.12
19	24	–	5.98	–	1.30	–	0.011	–	22.0	–	10.6	–	1.69
20	11	–	29.21	–	9.12	–	0.012	–	21.9	–	12.5	–	3.98
22	24	9.46	5.12	2.47	1.01	0.026	0.054	23.5	22.4	12.80	9.9	2.00	2.13
23	17	–	12.18	–	3.39	–	0.023	–	21.6	–	9.9	–	0.94
24	10	13.42	3.20	3.80	0.37	0.006	0.019	22.2	22.0	10.60	10.2	4.19	1.68
26	27	25.85	19.77	7.99	5.94	0.006	0.012	23.1	20.8	11.84	10.9	4.76	3.47
27	21	164.95	15.32	54.78	4.44	0.002	0.013	23.5	20.4	15.04	13.8	7.29	3.35
28	41	–	24.24	–	7.44	–	0.021	–	21.5	–	11.5	–	4.24

Примечание: «–» – нет данных.

В результате, на фоне двукратного увеличения водообмена в 2017 г. по сравнению с 2016 г. в 4 раза уменьшились средняя концентрация Хл *a* и содержание цианобактерий (табл. 2).

Важно отметить, что исследования, проведенные на волжском каскаде К.А. Гусевой и А.Д. Приймаченко [2, 5], показали появление в планктоне значительных количеств цианобактерий при скорости течения не превышающей 0.1 м/с, преобладание же их в планктоне отмечалось лишь при скоростях не более 0.04 м/с. Согласно расчетам средней по глубине скорости течения (табл. 2), в открытых частях озеровидных плесов даже при высоких расходах летней межени в 2017 г. скорость стокового течения остается достаточно слабой и только в местах сужения водохранилища может превышать 0.1 м/с. Влияние скорости течения на развитие фитопланктона Куйбышевского водохранилища представлено на рис. 4. Максимальное «цветение» цианобактерий наблюдается в Приплотинном плесе, скорость течения воды в котором минимальна по сравнению с другими плесам (0.002–0.006 м/с).



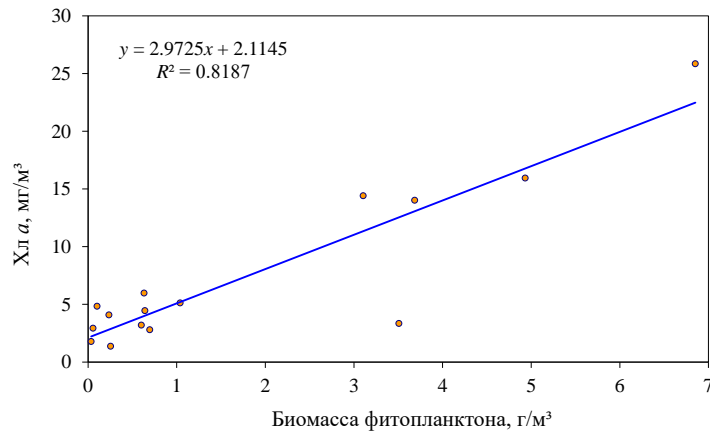


Рис. 3. Линейная зависимость между Хл *a* и биомассой фитопланктона в Куйбышевском водохранилище

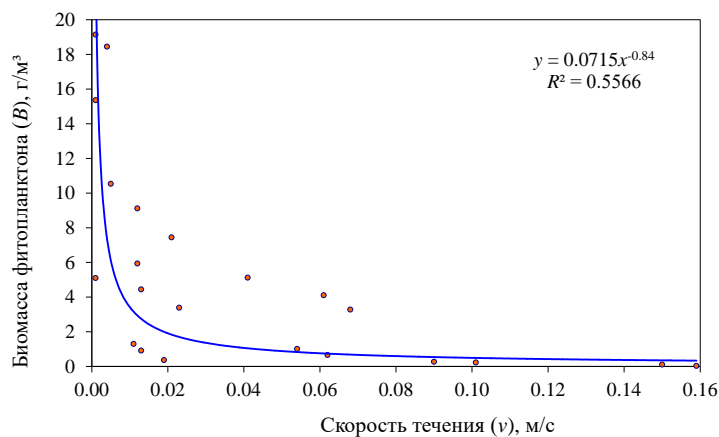


Рис. 4. Нелинейная регрессионная зависимость между биомассой фитопланктона и расчетной скоростью течения в Куйбышевском водохранилище

Полученные результаты подтверждаются литературными данными. До зарегулирования Волги величина скорости течения в летне-осенний период варьировала на исследуемом участке от 0.8 до 1.2 м/с. Фитопланктон был представлен диатомовыми и зелеными водорослями. Цианобактерии почти отсутствовали [2]. Их появление связано с наполнением водохранилища и замедлением течений.

Данные, представленные в табл. 2 и на рис. 4, позволяют сделать вывод о том, что с изменением средних скоростей течения ( $v$ ) в Куйбышевском водохранилище биомасса фитопланктона ( $B$ ) меняется по степенному закону

$$B = 0.0715v^{-0.84}. \quad (6)$$

Значение коэффициента детерминации ( $R^2$ ) для зависимости (6) равно 0.56. Корреляционный анализ показывает, что при увеличении проточности водохранилища биомасса фитопланктона сначала стремительно падает, а затем при дальнейшем повышении скорости течения темп ее снижения уже не так высок.

### Заключение

Формирование фитопланктона Куйбышевского водохранилища происходит в условиях скорости внешнего водообмена ( $0.008\text{--}0.021\text{ сут}^{-1}$ ) гораздо более слабой, чем удельная скорость роста фитопланктона ( $0.1\text{ сут}^{-1}$ ).

Выявлена зависимость развития фитопланктона от режима регулирования стока на ГЭС: концентрация Хл *a* в летнюю межень снизилась в 9–15 раз в результате двукратного увеличения водообмена (с  $0.011$  в 2016 г. до  $0.021\text{ сут}^{-1}$  в 2017 г.).

При этом в 2016 г. при низкой проточности водохранилища доля цианобактерий в фитопланктоне составила 99%, в то время как в 2017 г. при более высокой проточности – 37%. Таким образом, увеличение скорости течения воды в водохранилище способствовало снижению интенсивности «цветения» цианобактерий и изменению соотношения таксономических групп фитопланктона.

На основе двумерной численной гидродинамической модели, разработанной с использованием системы уравнений «мелкой воды», получена степенная зависимость между средней скоростью течения и биомассой фитопланктона. Согласно модели, на мелководьях и глубоководных расширениях водохранилища скорость стокового течения составляет  $0.001\text{--}0.07\text{ м/с}$ . В озеровидных плесах скорость стокового течения остается незначительной даже при высоких расходах летней межени (как в 2017 г.), и только в местах сужения превышает  $0.1\text{ м/с}$ .

Снижение величин ПО (на 6–18%) и БПК<sub>5</sub> (на 42–62%), которые отражают содержание органических веществ в воде, также можно связать с увеличением проточности водохранилища в 2017 г. по сравнению с 2016 г. При этом концентрация растворенного кислорода в воде летом 2016 г. ( $4.96\text{--}5.92\text{ г O}_2/\text{м}^3$ ) была ниже, чем в 2017 г. ( $5.88\text{--}7.60\text{ г O}_2/\text{м}^3$ ).

Развитие фитопланктона в период открытой воды зависело не столько от водности года, сколько от внутригодового перераспределения стока. Поэтому для уменьшения интенсивности «цветения» цианобактерий Куйбышевского водохранилища и улучшения качества воды необходимо к периоду максимального прогрева мелководий создать достаточно высокий уровень воды, чтобы ее запас обеспечивал повышенную проточность.

В решении вопроса оздоровления крупных водохранилищ и рационального водопользования изменение водного режима может играть не менее существенную роль, чем снижение внешней органической нагрузки. Необходимы дальнейшие мониторинговые исследования для подтверждения полученных результатов как на Куйбышевском, так и на других водохранилищах для объективного научного обоснования при разработке мероприятий федерального уровня.

**Благодарности.** Автор благодарит сотрудников ИЭВБ РАН Л.Г. Тихонову, Н.Г. Тарасову и Е.С. Кривину, участвовавших в экспедиционных исследованиях Куйбышевского водохранилища и оказавших большую помощь в обработке данных.

## Литература

1. Гусева К.А. Цветение воды, его причины, прогноз и меры борьбы с ним // Тр. Всесоюз. гидробиол. о-ва. – 1952. – Т. 4. – С. 3–92.
2. Гусева К.А., Приймаченко А.Д. Фитопланктон Волги от верховьев до Волгограда // ВОЛГА-I. Проблемы изучения и рационального использования биологических ресурсов водоемов: материалы первой конф. по изучению водоемов бассейна Волги. – Куйбышев, 1971. – С. 98–107.
3. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ: гидролого-гидрохимические аспекты. – М.: ГЕОС, 2007. – 252 с.
4. Картушинский А.В. Численное моделирование влияния гидрофизических условий на формирование пространственных неоднородностей фитопланктона. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Красноярск, 1998. – 22 с.
5. Приймаченко А.Д. Течение как фактор, определяющий развитие фитопланктона в водотоках // Первичная продукция морей и внутренних вод. – Минск: М-во высш., сред. спец. и проф. образования БССР, 1961. – С. 314–318.
6. Приймаченко А.Д. Фитопланктон и первичная продукция Днепра и днепровских водохранилищ. – Киев: Наукова думка, 1981. – 278 с.
7. Рахуба А.В. Имитационное моделирование роста биомассы фитопланктона в Куйбышевском водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2018. – № 1. – С. 76–87.
8. Рахуба А.В., Тихонова Л.Г. Оценка пространственно-временного распределения трофических характеристик Куйбышевского водохранилища // Изв. СамНЦ РАН. – 2016. – Т. 18, № 5-2. – С. 349–355.
9. Россолимо Л.Л. Загрязнение вод и антропогенное эвтрофирование внутренних водоемов // Гидробиол. журн. – 1975 – Т. 11, № 1. – С. 5–11.
10. Сиренко Л.А., Гавриленко М.Я. «Цветение» воды и эвтрофирование. – Киев: Наукова думка, 1978. – 232 с.
11. Топачевский А.В., Сиренко Л.А., Цеев Я.Я. Антропогенное эвтрофирование водохранилищ, «цветение» воды и методы его регулирования // Водн. ресурсы. – 1975. – № 1. – С. 48–60.
12. Шпет Г.И., Кубышкин Г.П. О зависимости «цветения» воды от интенсивности водообмена // Гидробиол. журн. – 1968. – Т. 4, № 5. – С. 55–57.
13. Dillon P.J. The phosphorus budget of Cameron Lake, Ontario: The importance of flushing rate to the degree of eutrophy of lakes // Limnol. Oceanogr. – 1975. – V. 20, No 1. – P. 28–39. – doi: 10.4319/lo.1975.20.1.0028.
14. Hammer U.T. The succession of “bloom” species of blue-green algae and some causal factors // Verh. Int. Limnol. – 1964. – V. 15, No 2. – P. 829–836. – doi: 10.1080/03680770.1962.11895611.
15. Harper D. Eutrophication of Freshwaters. – London: Chapman & Hall, 1992. – viii + 327 p. – doi: 10.1007/978-94-011-3082-0.
16. Vollenweider R.A. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology // Schweiz. Z. Hydrol. – 1975. – V. 37, No 1. – P. 53–84. – doi: 10.1007/BF02505178.
17. Straškraba M., Tundisi J.G., Duncan A. (Eds.) Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management. – Dordrecht: Springer, 1993. – x, 294 p.
18. Straškraba M., Gnauck A. Freshwater ecosystems. Modelling and simulation // Developments in Environmental Modelling. V. 8. – Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier, 1985. – 309 p.

19. *Straškraba M.* Coupling of hydrobiology and hydrodynamics: Lakes and reservoirs // Coastal and Estuarine Studies. V. 54: Physical Processes in Lakes and Oceans / Ed. by J. Imberger. – Am. Geophys. Union, 1998. – P. 623–644. – doi: 10.1029/CE054.
20. *Быковский В.И.* Движение водных потоков и фитопланктона // Гидробиол. журн. – 1978. – Т. 14, № 2. – С. 40–47.
21. *Быковский В.И.* Характеристики движения воды и размножение водорослей // Гидробиол. журн. – 1984. – Т. 20, № 4. – С. 39–44.
22. *Крейман К.Д., Голосов С.Д., Сквородова Е.П.* Влияние турбулентного перемешивания на фитопланктон // Водн. ресурсы. – 1992. – Т. 19, № 3. – С. 92–97.
23. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР: Куйбышевское и Саратовское водохранилища / Под ред. В.А. Знаменского, В.М. Гейтенко – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 269 с.
24. Изменения уровней водохранилищ ГЭС РусГидро. – URL: <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/>.
25. *Рахуба А.В.* Пространственно-временная изменчивость качества вод Саратовского водохранилища в условиях неустановившегося гидродинамического режима (натурные эксперименты и численное моделирование): Дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2007. – 188 с.
26. *Рахуба А.В.* Опыт использования измерительно-вычислительной системы «Хитон-Волна» в гидроэкологических исследованиях прибрежной акватории г. Тольятти // Экологические проблемы промышленных городов: Сб. 8-й Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2017. – С. 484–488.
27. *Лунд Д.В.* Значение турбулентности воды в периодичности развития некоторых пресноводных видов рода *Melosira (Algae)* // Ботан. журн. – 1966. – Т. 51, № 2. – С. 176–187.
28. *Петрова Н.А.* Роль гидрологических факторов в развитии фитопланктона крупных озер Северо-Запада СССР // Биология озер: Тр. Всесоюз. симпозиума по основным проблемам пресноводных озер. – Вильнюс, 1970. – Т. 3. – С. 46–54.
29. *Петряхина Е.В., Селезнев В.А.* Влияние недельного режима регулирования водного стока Волги на массовое развитие фитопланктона // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2016. – Т. 25, № 1. – С. 170–175.
30. *Садчиков А.П.* Продуцирование и трансформация органического вещества размерными группами фито- и бактериопланктона (на примере водоемов Подмосковья): Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – М., 1997. – 53 с.
31. *Ступишин А.В., Трофимов А.М., Широков В.М.* Географические особенности формирования берегов и ложа Куйбышевского водохранилища. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1981. – 184 с.

Поступила в редакцию  
03.03.2020

---

**Рахуба Александр Владимирович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт экологии Волжского бассейна РАН

ул. Комзина, д. 10, г. Тольятти, 445003, Россия

E-mail: [rahavum@mail.ru](mailto:rahavum@mail.ru)

doi: 10.26907/2542-064X.2020.3.430-444

**Assessment of the Influence Exercised by the Hydrodynamic Regime  
on the Phytoplankton Development and the Water Quality of the Kuibyshev Reservoir**

A.V. Rakhuba

*Samara Federal Research Scientific Center RAS, Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS,  
Togliatti, 445003 Russia  
E-mail: rahavum@mail.ru*

Received March 3, 2020

**Abstract**

This paper presents the results of the field hydroecological observations performed within the Kuibyshev Reservoir during the period of 2016–2017. The high relevance of the research stems from the need to reduce the cyanobacterial bloom and to improve the water quality by increasing the flow rate during the summer low-water period. Among a number of climatic and anthropogenic factors that define the production processes in the reservoir, the flow rate was considered as adjustable, which is of certain value for preventing the negative consequences of eutrophication. The flow rate in the reservoir was determined using a two-dimensional numerical hydrodynamic model developed on the basis of the shallow water equations and implemented for the reservoir section on a rectangular spatial grid at 200 m intervals. The numerical modeling was performed for the depth-averaged flow rates in the reservoir. A series of model calculations was carried out, and the dependence of phytoplankton development on the flow control regime was analyzed. The impact of the hydrodynamic regime on phytoplankton development and water quality was assessed. The analysis of the observational data and the simulation results showed that the specific growth rate of phytoplankton is by an order of magnitude higher than the rate of water exchange in the reservoir. It was found that the phytoplankton biomass changes as a power function along with changes in the average flow rates of the reservoir. The data obtained confirm that an increased flow rate during the summer low-water period significantly reduces the amount of organic matter in the water and even prevents cyanobacterial bloom. The conclusion was made that phytoplankton development during the growing season is determined more by the intra-annual redistribution of the runoff than by the dryness of the year. The change of the water regime can play a no less important role in the healing of large reservoirs than the external organic load reduction.

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

**Acknowledgments.** The invaluable assistance of my colleagues from Institute of Ecology of the Volga River Basin, Russian Academy of Sciences (L.V. Tikhonova, N.G. Tarasova, and E.S. Krivina), who took part in the field study of the Kuibyshev Reservoir and assisted with the subsequent data handling, is gratefully acknowledged.

**Figure Captions**

- Fig. 1. Schematic location of stations in the Kuibyshev, where the observations were performed.  
Fig. 2. Intra-annual changes of the water height ( $H$ ; 2016 (1) and 2017 (2)) and the flow quantity ( $Q$ ; 2016 (3) and 2017 (4)) at the Zhiguli HPP site, according to [24].  
Fig. 3. Linear dependence of Chl  $a$  on the phytoplankton biomass in the Kuibyshev Reservoir.  
Fig. 4. Non-linear regression dependence of the phytoplankton biomass and the calculated flow rate in the Kuibyshev Reservoir.

## References

1. Guseva K.A. Water "bloom", its causes, forecast, and measures to combat it. *Tr. Vses. Gidrobiol. O-va.*, 1952, vol. 4, pp. 3–92. (In Russian)
2. Guseva K.A., Priimachenko A.D. Phytoplankton from the headwaters of the Volga River to Volgograd. In: *VOLGA-I. Problemy izucheniya i ratsional'nogo ispol'zovaniya biologicheskikh resursov vodoemov: materialy pervoi konf. po izucheniyu vodoemov basseina Volgi* [VOLGA-I. Problems of the Study and Sustainable Use of Aquatic Biological Resources: Proc. 1st Conf. on the Study of Water Bodies in the Volga River Basin]. Kuibyshev, 1971, pp. 98–107. (In Russian)
3. Datsenko Yu.S. *Evtrofirovaniye vodokhranilishch: gidrologo-gidrokhimicheskie aspekty* [Reservoir Eutrophication: Hydrological and Hydrochemical Aspects]. Moscow, GEOS, 2007. 252 p. (In Russian)
4. Kartushinskii A.V. Numerical modeling of the influence exercised by hydrophysical conditions over the development of spatial heterogeneities in phytoplankton. *Extended Abstract of Cand. Phys.-Math. Sci. Diss.* Krasnoyarsk, 1998. 22 p. (In Russian)
5. Priimachenko A.D. Water flow as a factor determining phytoplankton development in water courses. In: *Pervichnaya produktsiya morei i vnutrennikh vod* [Primary Production of the Seas and Inland Waters]. Minsk, Minist. Vyssh., Sredn., Spets. Prof. Obraz. BSSR, 1961, pp. 314–318. (In Russian)
6. Priimachenko A.D. *Fitoplankton i pervichnaya produktsiya Dnepra i dneprovskikh vodokhranilishch* [Phytoplankton and Primary Production of the Dnieper and Dnieper Reservoirs]. Kiev, Naukova Dumka, 1981. 278 p. (In Russian)
7. Rakhuba A.V. Simulation of the phytoplankton biomass growth in the Kuibyshev Reservoir. *Vodn. Khoz. Ross.: Probl., Tekhnol, Upr.*, 2018, no. 1, pp. 76–87. (In Russian)
8. Rakhuba A.V., Tikhonova L.G. Assessment of spatial and temporal distribution of trophic characteristics in the Kuibyshev Reservoir. *Izv. Samar. Nauchn. Tsentra Ross. Akad. Nauk.*, 2016, vol. 18, no. 5–2, pp. 349–355. (In Russian)
9. Rossolimo L.L. Water pollution and anthropogenic eutrophication of inland waters. *Gidrobiol. Zh.*, 1975, vol. 11, no. 1, pp. 5–11. (In Russian)
10. Sirenko L.A., Gavrilenko M.Ya. "Tsvetenie" vody i evtrofirovaniye ["Water Bloom" and Eutrophication]. Kiev, Naukova Dumka, 1978. 232 p. (In Russian)
11. Topachevskii A.V., Sirenko L.A., Tseeb Ya.Ya. Anthropogenic eutrophication of water reservoirs, "blooming" and ways to control it. *Vodn. Resur.*, 1975, no. 1, pp. 48–60. (In Russian)
12. Shpet G.I., Kubyshkin G.P. Dependence of water "bloom" on the intensity of water exchange. *Gidrobiol. Zh.*, 1968, vol. 4, no. 5, pp. 55–57. (In Russian)
13. Dillon P.J. The phosphorus budget of Cameron Lake, Ontario: The importance of flushing rate to the degree of eutrophy of lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 1975, vol. 20, no. 1, pp. 28–39. doi: 10.4319/lm.1975.20.1.0028.
14. Hammer U.T. The succession of "bloom" species of blue-green algae and some causal factors. *Verh. Int. Limnol.*, 1964, vol. 15, no. 2, pp. 829–836. doi: 10.1080/03680770.1962.11895611.
15. Harper D. *Eutrophication of Freshwaters*. London, Chapman & Hall, 1992. viii + 327 p. doi: 10.1007/978-94-011-3082-0.
16. Vollenwaider R.A. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweiz. Z. Hydrol.*, 1975, vol. 37, no. 1, pp. 53–84. doi: 10.1007/BF02505178.
17. Straškraba M., Tundisi J.G., Duncan A. (Eds.) *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management*. Dordrecht, Springer, 1993. x, 294 p.
18. Straškraba M., Gnauck A. Freshwater ecosystems. Modelling and simulation. In: *Developments in Environmental Modelling*. Vol. 8. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, Elsevier, 1985. 309 p.
19. Straškraba M. Coupling of hydrobiology and hydrodynamics: Lakes and Reservoirs. In: *Coastal and Estuarine Studies*. Vol. 54: Physical processes in lakes and oceans. Imberger J. (Ed.). Am. Geophys. Union, 1998, pp. 623–644. doi: 10.1029/CE054.
20. Bykovskii V.I. The movement of water courses and phytoplankton. *Gidrobiol. Zh.*, 1978, vol. 14, no. 2, pp. 40–47. (In Russian)
21. Bykovskii V.I. Water movement characteristics and algae propagation. *Gidrobiol. Zh.*, 1984, vol. 20, no. 4, pp. 39–44. (In Russian)

22. Kreiman K.D., Golosov S.D. Skovorodova E.P. The effect of turbulent exchange on phytoplankton. *Vodn. Resur.*, 1992, vol. 19, no. 3, pp. 92–97. (In Russian)
23. *Gidrometeorologicheskii rezhim ozer i vodokhranilishch SSSR: Kuibyshevskoe i Saratovskoe vodokhranilishcha* [Hydrometeorological Regime of the USSR Lakes and Water Reservoirs: Kuibyshev and Saratov Reservoirs]. Znamenskii V.A., Geitenko V.M. (Eds.). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1978. 269 p. (In Russian)
24. Changes in reservoir levels of the RusHydro HPP. Available at: <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/>. (In Russian)
25. Rakhuba A.V. 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. *Cand. Tech. Sci. Diss.* Yekaterinburg, RosNIIVKh, 2007. 188 p. (In Russian)
26. Rakhuba A.V. Using the “Hiton-Volna” measuring and computing system in hydroecological studies of the coastal waters of Togliatti. In: *Ekologicheskie problemy promyshlennykh gorodov: Sb. 8-i Mezhdunar. nauch.-prak. konf.* [Environmental Problems of Industrial Cities: Proc. 8th Int. Sci.-Pract. Conf.]. Saratov, Izd. SGTU, 2017, pp. 484–488. (In Russian)
27. Lund D.V. The role of water turbulence in the development cycles of some freshwater species of the genus *Melosira* (Algae). *Bot. Zh.*, 1966, vol. 51, no. 2, pp. 176–187. (In Russian)
28. Petrova N.A. The role of hydrological factors in the development of phytoplankton of large lakes in the northwest of the USSR. *Biologiya ozer, Tr. Vsesoyuzn. simpoziuma po osnovnym problemam presnovodnykh ozer* [Lake Biology. Proc. All-Union Symp. on Major Problems of Freshwater Lakes]. Vol. 3. Vilnius, 1970, pp. 46–54. (In Russian)
29. Petryakhina E.V., Seleznev V.A. Influence of the weekly regime for regulating the Volga water course on the mass development of phytoplankton. *Samar. Luka: Probl. Reg. Global'noi Ekol.*, 2016, vol. 25, no. 1, pp. 170–175. (In Russian)
30. Sadchikov A.P. Production and transformation of the organic matter by size groups of phyto- and bacterioplankton (using reservoirs of the Moscow region as an example). *Extended Abstract of Doct. Biol. Sci. Diss.* Moscow, 1997. 53 p. (In Russian)
31. Stupishin A.V., Trofimov A.M., Shirokov V.M. *Geograficheskie osobennosti formirovaniya beregov i lozha Kuibyshevskogo vodokhranilishcha* [Geographic Features of Shoreline and Bed Formation in the Kuibyshev Reservoir]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 1981. 184 p. (In Russian)

**Для цитирования:** Пахуба 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. – doi: 10.26907/2542-064X.2020.3.430-444.

**For citation:** 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. doi: 10.26907/2542-064X.2020.3.430-444. (In Russian)