

*Р.П. Токинова, Д.С. Любарский, К.И. Абрамова, Д.В. Иванов*  
*Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, r.tokin@rambler.ru*

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ФИТО-ОЧИСТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОЗЕРЕ НИЖНИЙ КАБАН (Г. КАЗАНЬ)

Анализируются результаты эффективности работы фито-очистного сооружения (ФОС) с открытой водной поверхностью, предназначенного для очистки и повышения качества природной воды оз. Нижний Кабан (г. Казань). Динамика показателей обилия растительных сообществ (проективное покрытие, побегообразование, фитомасса) свидетельствует об активном росте и успешной адаптации растений к условиям прудов ФОС после их запуска (июнь 2018 г.). Вместе с тем, неоднозначные по степени и направленности изменения в химических показателях очищаемой воды на входе в ФОС и выходе из неё указывают на низкую эффективность работы сооружения в первые 2 года эксплуатации. Внесение корректировок в технологические процессы работы ФОС (выбор оптимального гидравлического режима, дополнительная аэрация, удаление фосфора) должно положительно сказаться на работе фито-очистной системы.

*Ключевые слова:* фито-очистная система; озеро Нижний Кабан; качество воды; высшая водная растительность.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2021.4.25.33>

### Введение

Озеро Нижний Кабан расположено в центральной, исторической части г. Казани. Площадь его водного зеркала 45.6 га, объем 3820.9 тыс.м<sup>3</sup> (Горшкова и др., 2012). В период становления и роста промышленности города в XIX–XX вв. неограниченное использование водоема для сброса производственных, хозяйственно-бытовых и ливневых сточных вод привело к повышению уровня его эвтрофикации и токсификации до критического, к снижению качества вод до категории «грязных» и «очень грязных» (Мингазова, Котов, 1989). Предпринятые в 1980–х гг. меры по устранению части наиболее токсичных стоков, выемка донных отложений, проведение аэрации и временной проточности позволили существенно оздоровить экосистему озера (Мингазова, 1999). Однако, для стабилизации экологической ситуации в долговременном аспекте этого оказалось недостаточно. В пост-оздоровительный период в водоеме отмечались повышенные концентрации биогенных элементов, фиксировалось превышение ПДК по целому ряду загрязняющих веществ (нефтепродукты, тяжелые металлы), трофический статус озера характеризовался как мезотрофно-эвтрофный (Экология города..., 2005). В некоторые периоды отмечалось повышение трофического статуса водоема до высокоэвтрофного и наблюдалось «цветение воды» синезелеными водорослями планктотрихетового комплекса (Горохова, 2012). В современный период вода оз.

Нижний Кабан по гидрохимическим показателям оценивается как «экстремально загрязненная» (5 класс качества, УКИЗВ=6.5); к критическим показателям загрязненности относятся концентрации в воде нитритов, сульфатов, меди, цинка и фенолов (Мустафина и др., 2019).

Поиск практических путей решения экологических проблем оз. Нижний Кабан, в том числе с использованием современных технологий, является весьма актуальным. В 2007 г. на озере установлен самый большой в городе фонтан для осуществления принудительной аэрации и перемешивания воды. В рамках Программы развития общественных пространств (реализуется в Татарстане с 2016 г.), выполнено обустройство набережных озера с двумя комплексами фито-очистных сооружений (ФОС). Первый из них введен в эксплуатацию в июне 2018 г. и представляет собой каскады каналов-прудов с высшей водной растительностью, встроенные в ландшафтное пространство северо-восточного берега озера (рис. 1).

Использование биоинженерных технологий на основе высших водных растений для очистки хозяйственно-бытовых, ливневых, промышленных, сельскохозяйственных и др. сточных вод имеет широкое применение в мировой практике. Наиболее оно распространено в странах Европы, США, Австралии и др. Опубликованные данные указывают на высокую эффективность подобных сооружений в очистке загрязненных вод от взве-



Рис. 1. ФОС на набережной оз. Нижний Кабан (фото С.В. Бердника)

Fig. 1. Constructed wetland on the embankment of Nizhnyy Kaban Lake (photo by S.V. Berdnik)

шенных и органических веществ, азота, фосфора, нефтепродуктов, тяжелых металлов, патогенной микрофлоры и др. В России опыт использования фито-очистных систем ограничен (Kadlec, Wallace, 2009; Морозов, 2001; Попов, 2016; Рыбка, Щеголькова, 2019б).

Следует отметить, что технология, основанная на биофильтрационных свойствах высшей водной растительности, впервые применена для очистки загрязненных природных вод водоемов

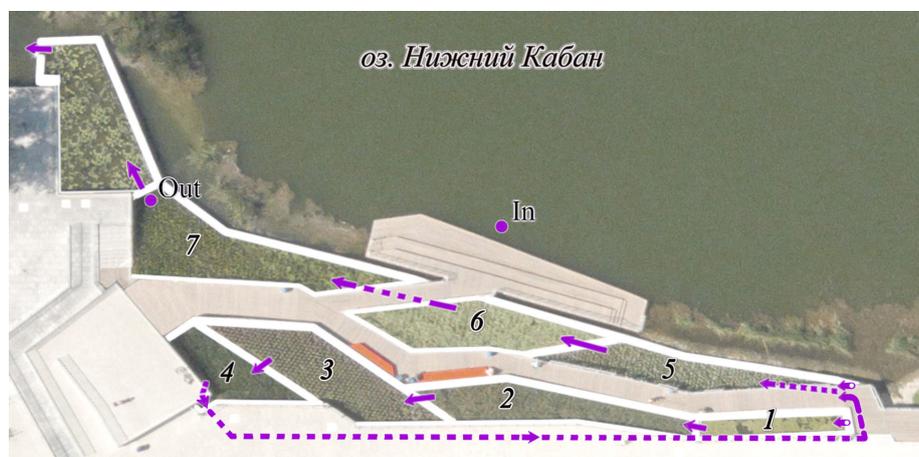


Рис. 2. Схема расположения каскада прудов (1–7) и направления потока воды

Fig. 2. Scheme of the ponds cascade (1–7) and water flow directions

г. Казани. Целью данной статьи является анализ биологических и гидрохимических особенностей функционирования ФОС на набережной оз. Нижний Кабан, включая оценку эффективности ее работы по итогам двух первых лет эксплуатации (2018 и 2019 гг.).

### Материалы и методы исследования

Объектом исследования выбран каскад северного сегмента ФОС, состоящий из 7 каналов-прудов (рис. 2). Последние представляют собой небольшие по площади (26–127 м<sup>2</sup>) секции различной геометрической формы, разделенные габионами с каменной загрузкой. Общая площадь прудов каскада составляет 542 м<sup>2</sup>, длина 130 м, объем воды 155 м<sup>3</sup>. Вода из оз. Нижний Кабан подается в пруды 1 и 5 ФОС в режиме непрерывной закачки с помощью насоса.

К началу исследований в прудах были высажены растения, зарекомендовавшие себя как хорошие очистители воды (эйхорния, камыш, рогоз, манник и аир) и привлекательные своей природно-декоративной ценностью (ирис и дербенник) (табл. 1). Часть пруда 7 на площади 90 м<sup>2</sup> в 2018 г. была засажена аиром, оставшаяся часть – манником. В 2019 г. манник был заменен саженцами аира, которые, однако, не дали устойчиво воспроизводящейся культуры и впоследствии (к 2021 г.) были вновь вытеснены манником. Поэтому при анализе состояния растительности в данном пруду учитывалась только площадь, занятая чистой культурой аира.

В качестве субстрата для корневой системы растений в прудах 2–7 использованы донные отложения из озер пригородной зоны Казани.

Исследования проводились с июля по сентябрь 2018 г. и с мая по сентябрь 2019 г. с частотой наблюдений 1 раз в 10–14 дней.

Изучение растительности ФОС и ее сезонных изменений проводилось по следующим показателям:

– проективное покрытие (ПП) – показатель обилия видов основной культуры и сопутствующей растительности (макроводоросли); в полевых условиях про-

Таблица 1. Характеристика прудов ФОС на набережной оз. Нижний Кабан  
Table 1. Characteristics of ponds of constructed wetland on the embankment of Nizhniy Kaban Lake

№	Вид растений (культура) Plant species (culture)	Глубина воды, см Water depth, cm	Площадь пруда, м <sup>2</sup> Pond area, m <sup>2</sup>	Плотность посадки растений, ед./м <sup>2</sup> Planting density, unit/m <sup>2</sup>
1	Эйхорния отличная <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms	60–70	26	13–16
2	Камыш озерный <i>Schoenoplectus lacustris</i> (L.) Palla	20	75	7
3	Дербенник иволистный <i>Lythrum salicaria</i> L.	10–12	97	14–15
4	Рогоз узколистный <i>Typha angustifolia</i> L.	20–25	64	4–6
5	Ирис ложноаировый <i>Iris pseudacorus</i> L.	12–15	64	9–11
6	Манник большой <i>Glyceria maxima</i> (Hartm.) Holmb.	20	88	5–7
7	Аир болотный <i>Acorus calamus</i> L.	20–23	127	10–12

водилась фиксация наблюдений с помощью фотоаппарата, далее в камеральных условиях расчеты ПП производились в программе TourView ver.3.7.4594, как отношение проекции всех надземных органов растений к площади пруда, выраженного в процентах;

– количество надземных побегов растений основной культуры; подсчеты проводились вручную с помощью рамки 0.5×0.5 м в трех повторностях;

– фитомасса растений основной культуры; учет проводился однократно за сезон, в августе, в период достижения растениями максимального роста (Катанская, 1956; Папченков, 2001).

Для оценки эффективности работы ФОС проводилось сравнение физико-химических показателей воды на входе в систему (In, озеро) и на выходе из нее (Out, пруд 7) (рис. 2); измерялись рН среды, содержание кислорода, органического вещества (по БПК<sub>5</sub>), минеральные формы азота и фосфора. В расчетах использованы средние за сезон значения показателей (M±m). При оценке качества воды использованы значения предельно допустимых концентраций для водоемов рыбохозяйственного значения (Приказ ..., 2016).

## Результаты и их обсуждение

### Гидравлический режим

Каскад прудов ФОС на оз. Нижний Кабан относится к сооружениям поверхностного типа, с открытой водной поверхностью. Последовательная подача воды из одного пруда в другой осуществляется посредством перелива и фильтрации через верхнюю часть габионов. Из пруда 4 в пруд

5 вода перетекает по длинному возвратному желобу, скрытому в парапете набережной (рис. 2). Конструктивной особенностью ФОС является наличие в пределах каскада двух гидравлических потоков, что обусловлено распределением закачиваемой из озера воды на два неравнозначных по объему входа в ФОС. Выделяется верхний поток, пруды 1–4 (линия I) и ниж-

ний – пруды 5–7 (линия II). Согласно ориентировочным расчетам, в 2019 г. суточный расход воды на линии I составил 72 м<sup>3</sup>/сут., на линии II – 720 м<sup>3</sup>/сут. Время пребывания воды в прудах линии I составило около 19 часов, линии II – чуть более 3 часов. Для 2018 г. такие данные отсутствуют, предположительно, расход воды на линии II был существенно (в 2 раза) выше, чем в 2019 г.

### Растительность

К началу наблюдений (3 июля 2018 г.) во всех прудах ФОС, кроме пруда 1, отмечен интенсивный рост растений основных культур (табл. 2). В прудах 2–4, 6 и 7 проективное покрытие устойчиво возросло весь период наблюдений и достигло почти полного покрытия у камыша и манника уже к концу первого года вегетации (94–99%), а у дербенника, рогоза и аира – к началу июля второго года (94–99%). Меньшей интенсивностью роста отличался ирис (пруд 5), причем в разных зонах пруда темп роста его обилия был неравномерным. В пруду 1 с эйхорнией в первый год наблюдалось угнетенное состояние растений и слабый их прирост, ПП не превышало 12–21%. В августе была проведена посадка новой партии растений, благодаря чему ПП сразу увеличилось до 39%. В последующий год ПП эйхорнии последовательно возросло с 18 до 90%.

Суммарное ПП высших растений во всех прудах ФОС к концу первого года достигло 77%, а к концу второго – 94% (рис. 3).

Помимо растений основной культуры, в прудах встречены сопутствующие виды, случайно занесенные в ФОС: *Alisma plantago-aquatica*

Таблица 2. Динамика ПП (%) высших водных растений в прудах ФОС в 2018–2019 гг.  
Table 2. Dynamics of the projective cover (%) of higher aquatic plants in ponds of the constructed wetland in 2018–2019

Дата наблюдений Date of observation	Номера прудов, виды растений Pond numbers, plant species						
	1 <i>E. crassipes</i>	2 <i>S. lacustris</i>	3 <i>L. salicaria</i>	4 <i>T. angustifolia</i>	5 <i>I. pseudacorus</i>	6 <i>G. maxima</i>	7 <i>A. calamus</i>
2018 г.							
3.07.18	17	28	17	8	16	15	21
13.07.18	21	45	32	17	21	31	20
23.07.18	19	62	39	40	26	63	30
2.08.18	21	68	44	57	32	84	43
13.08.18	12	75	50	75	41	96	57
22.08.18	39	83	54	82	44	99	63
10.09.18	36	94	71	83	55	99	70
2019 г.							
14.05.19	0	16	2	16	12	6	15
28.05.19	0	63	9	57	33	20	42
13.06.19	18	96	60	90	46	50	73
1.07.19	37	99	94	99	51	78	94
15.07.19	74	98	96	99	60	90	96
29.07.19	79	98	99	99	58	100	96
12.08.19	81	99	97	99	64	100	98
26.08.19	90	99	97	99	66	99	98
9.09.19	90	99	97	99	66	100	98
23.09.19	90	100	95	99	67	100	97

*L.*, *Sparganium emersum* Rehmman, *Utricularia vulgaris* L. и *Lemna minor* L. Во всех прудах отмечено присутствие зеленых макроводорослей (*Cladophora*, *Enteromorpha*), занимающих в отдельные периоды времени значительную долю площади прудов. Наиболее массовое развитие

макроводорослей наблюдалось в августе 2018 г. в пруду 1, где их ПП достигло 100%, что могло послужить одним из угнетающих факторов для развития эйхорнии. В мае-июне следующего года обильный рост *Cladophora* и *Enteromorpha* отмечен в прудах 3–7 (до 90–95% ПП), при этом для ФОС в целом ПП водорослей достигло свыше 80%. Последующее увеличение ПП высших растений и затенение ими нижнего яруса прудов препятствовало активному развитию макроводорослей, обилие которых в начале июля 2019 г. пошло на спад.

Увеличение числа побегов у вегетативно-подвижных растений основных культур ФОС отражено на рисунке 4. Относительно других видов, наиболее интенсивным побегообразованием выделяется камыш, число побегов которого к концу второго года наблюдений достигло 1450 ед./м<sup>2</sup>. В условиях естественного произрастания такая высокая плотность зарослей камыша обычно не отмечается и, вероятно, близка к порогу физической вместимости среды. Меньшие темпы побегообразования отмечены у манника, к концу наблюдений – 920 ед./м<sup>2</sup>. У других видов этот показатель не превышает 330 ед./м<sup>2</sup>.

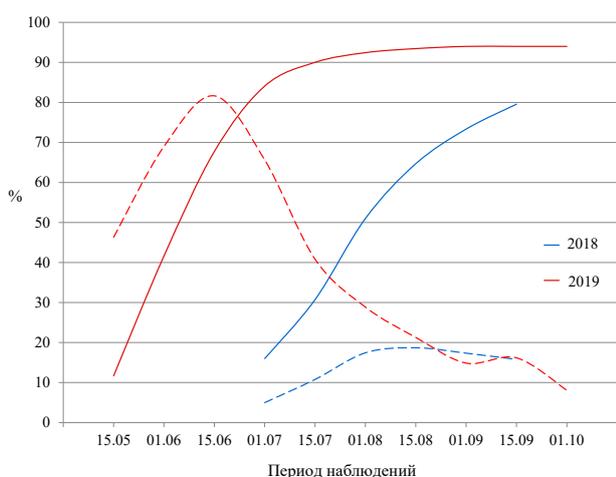


Рис. 3. Динамика суммарного ПП высших растений (сплошная линия) и макроводорослей (пунктирная линия) в ФОС

Fig. 3. Dynamics of the total projective cover of higher plants (solid line) and macroalgae (dashed line) in constructed wetland

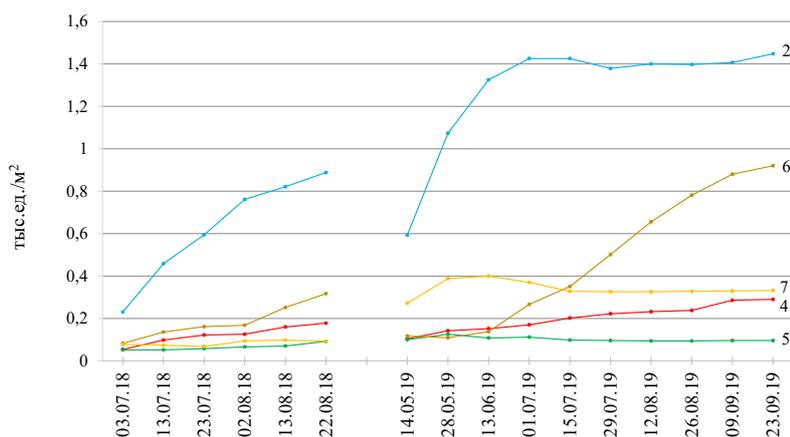


Рис. 4. Динамика увеличения числа побегов высших растений в ФОС: 2, 4–7 – номера прудов

Fig. 4. Dynamics of the increase in the number of shoots of higher plants in constructed wetland: 2, 4–7 – ponds number

Общая фитомасса культивируемых растений, включая надземную и подземную части, в первый год работы ФОС составила 0.26 т в сухом весе, в следующем году – 1.71 т (табл. 3). Как видно, в первый год она была обеспечена в значительной степени за счет камыша (32%), во второй год – за счет камыша (24%), рогоза и аира (по 20%).

#### Физико-химические показатели воды

Вода в оз. Нижний Кабан в районе расположения водозаборного устройства ФОС в период наблюдений имела слабощелочную реакцию, находясь в диапазоне 7.7–8.4 ед. рН ( $8.1 \pm 0.1$ ), и не превышала пределы нормативных значений (рис. 5). На выходе из ФОС в первый год наблюдений значение водородного показателя составило  $7.9 \pm 0.1$ , в следующем году –  $7.6 \pm 0.1$ . Эффект от действия ФОС на кислотно-основные свойства озерной воды проявился в снижении рН к нейтральным значениям и стал более значимым на второй год работы сооружения.

Содержание растворенного кислорода в озере в течение вегетационного периода изменялось в широком диапазоне значений, не опускавшихся

ниже  $8.1 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ , за единичным исключением (рис. 5). На выходе из ФОС отмечалось относительное снижение его концентраций, более интенсивное в 2019 г. – на 50%. При этом в воде прудов в отдельные месяцы (август, сентябрь) наблюдался его дефицит, когда содержание кислорода опускалось ниже нормы, до  $1.7\text{--}3.0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ .

Присутствие в воде органических веществ оценивалось по показателю биохимического потребления кислорода (БПК<sub>5</sub>). В северо-восточной части оз. Нижний Кабан он составил  $4.8 \pm 0.9 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$  (2018 г.) и  $4.2 \pm 0.7 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$  (2019 г.) (рис. 5). Таким образом, ПДК легкоокисляемых органических веществ ( $2.1 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ ) в воде озера и прудов в среднем была

превышена более чем в 2 раза, а в отдельные периоды наблюдений – в 3.7–4.2 раза. Динамика БПК<sub>5</sub> на выходе из ФОС показывает тенденцию к его снижению, более выраженную во второй год, когда этот показатель упал до  $2.1 \pm 0.3 \text{ мг}/\text{дм}^3$ . Эффективность очистки при этом составила 40%.

Содержание общего (растворимого) фосфора в подаваемой в ФОС воде озера находилось на уровне  $0.034 \pm 0.010 \text{ мгP}/\text{дм}^3$  (2018 г.) и  $0.022 \pm 0.004 \text{ мгP}/\text{дм}^3$  (2019 г.). По сравнению с исходной водой на выходе из каскада прудов отмечена устойчивая тенденция к росту концентраций фосфора. Наиболее выраженный характер она имела в 2019 г. – повышение до  $0.056 \pm 0.009 \text{ мгP}/\text{дм}^3$  (эффект 200%). При этом, средние за сезон концентрации в воде фосфора фосфатов, как в озере ( $0.016 \text{ мгP}/\text{дм}^3$ ), так и на выходе из ФОС ( $0.043 \text{ мгP}/\text{дм}^3$ ), находились в пределах ПДК.

Содержание минерального азота в воде оз. Нижний Кабан в сезоне 2018 г. составило  $5.3 \pm 0.2 \text{ мгN}/\text{дм}^3$ , в 2019 г. –  $7.6 \pm 0.6 \text{ мгN}/\text{дм}^3$ . Устойчивое снижение концентраций его соединений на выхо-

Таблица 3. Сухой вес ( $\text{г}/\text{м}^2$ ) растений (надземная и подземная части) основных культур в ФОС  
Table 3. Dry weight ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) of plants (aboveground and underground parts) of the main culture in constructed wetland

Период наблюдений Observation period	Номера прудов, виды растений Pond numbers, plant species						
	1 <i>E. crassipes</i>	2 <i>S. lacustris</i>	3 <i>L. salicaria</i>	4 <i>T. angustifolia</i>	5 <i>I. pseudacorus</i>	6 <i>G. maxima</i>	7 <i>A. calamus</i>
08.2018	97.3	1082.0	233.0	583.4	726.8	415.1	346.4
08.2019	519.0	5475.0	2124.0	5324.5	2088.4	2925.8	3831.5

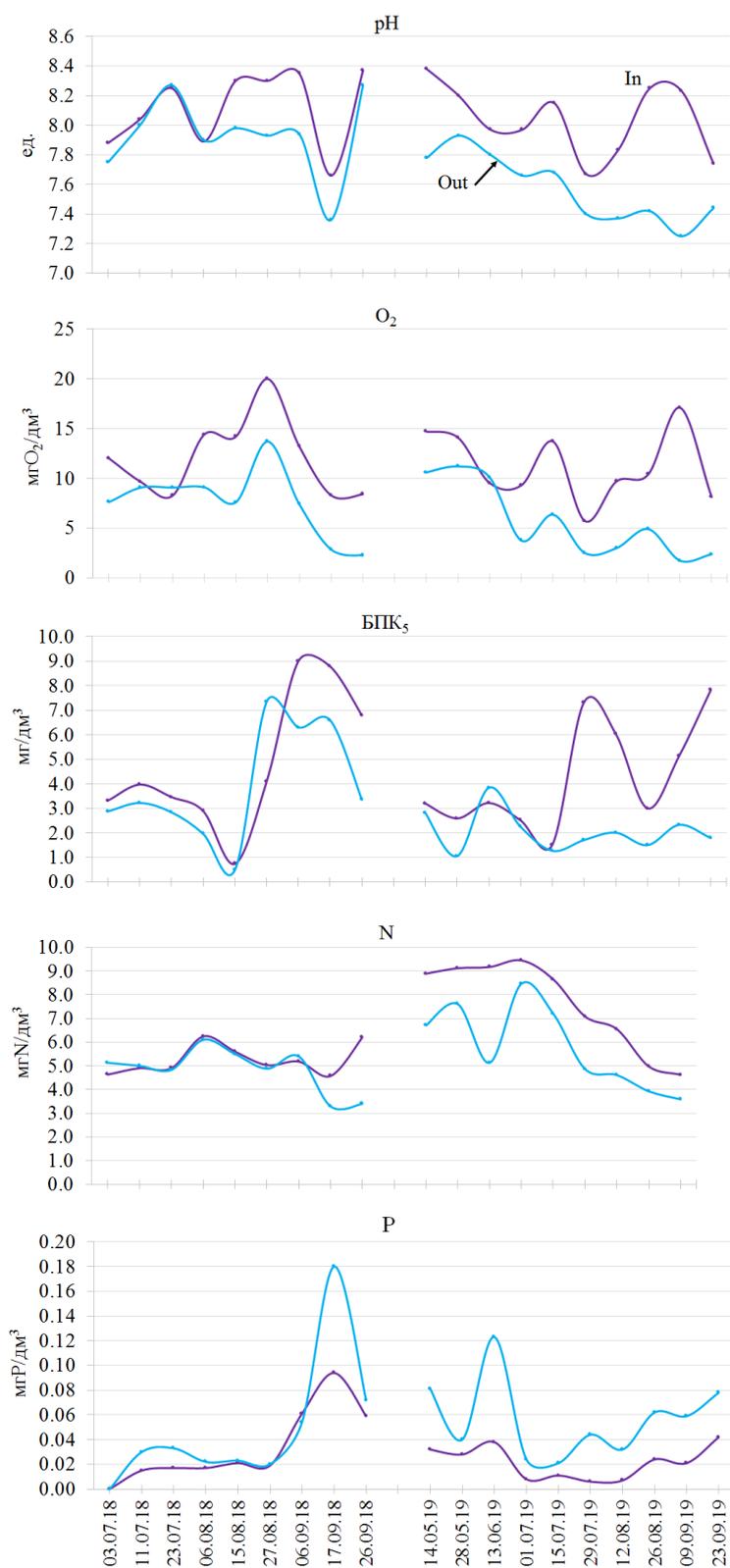


Рис. 5. Динамика показателей качества воды на входе (In) и на выходе (Out) из ФОС

Fig. 5. Dynamics of indicators of water quality at the inlet to the constructed wetland (In) and outlet from it (Out)

де из ФОС отмечено лишь во второй год наблюдений –  $5.8 \pm 0.6$  мгN/дм<sup>3</sup>. В количественном выражении эффект можно оценить в 24%.

Минеральные формы азота в воде озера и

ФОС представлены ионами аммония (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), нитритами (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) и нитратами (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Концентрация последних в озере не превышала пороговых значений и находилась в пределах 15.5–39.5 мг/дм<sup>3</sup>. Концентрации аммония испытывали колебания в диапазоне значений 0.14–1.94 мг/дм<sup>3</sup>, с периодическим превышением ПДК до 3.8 раз. Наиболее неблагоприятная ситуация наблюдалась по нитритам, концентрация которых в 2018 г. составила  $0.14 \pm 0.01$  мг/дм<sup>3</sup> и в 2019 г. –  $0.99 \pm 0.16$  мг/дм<sup>3</sup>. При этом превышения ПДК составили, соответственно, 1.8 и 12.4 раза, максимальные концентрации нитритов достигали 30 ПДК (29.07.2019 г.).

После прохождения каскада прудов, на выходе из ФОС, концентрация аммония в воде снижается на 30%, что позволяет в среднем за сезон достичь значений, соответствующих рыбохозяйственным нормативам. По нитритам в первый год эффект отсутствовал ( $0.15 \pm 0.02$  мг/дм<sup>3</sup>), значимое снижение отмечено в 2019 г. – до  $0.50 \pm 0.08$  мг/дм<sup>3</sup>. Эффективность при этом достигла 46%, однако, качество очистки все еще оставалось недостаточным и весь период содержание нитритов на выходе из ФОС превышало предельно допустимые значения, при максимумах достигая 12 ПДК (29.07.2019 г.).

Одной из основных задач ФОС является очистка загрязненных вод оз. Нижний Кабан от избытка органических веществ и эвтрофирующих элементов, тяжелых металлов, нефтепродуктов, фенолов и др. до нормативных значений. В первые два года работы сооружения, динамика основных показателей (ПП и побегообразования) указывала на интенсивно идущие процессы роста растений (особенно у камыша, рогоза и манника), не испытывающих недостатка в питательных веществах. Значительный прирост биомассы культивируемых растений (в 6 раз по сухому весу) и увеличение проективного покрытия до почти полного (94%) на второй год позволяло ожидать первых значимых результатов в водоочистке. Однако, анализ качества воды на выходе из ФОС показал, что достижение целевого показателя (ПДК<sub>рх</sub>) по биохимическому

потреблению кислорода имеет неустойчивый эффект (рис. 5). Величина БПК<sub>5</sub> является основным ориентиром очистительной способности ФОС

при проектировании. Исходя из требуемой степени очистки по БПК<sub>5</sub> выбирается тип сооружения и рассчитываются основные технологические параметры: площадь, время пребывания воды в системе, выбор фильтрующей среды и т.д. (Пособие ..., 1998; Рыбка, Щеголькова, 2019а). Полнота протекания процессов очистки в значительной мере зависит от времени пребывания воды в ФОС. Из литературы известно, что минимальное рекомендуемое время пребывания воды в ФОС составляет 24–36 часов, а на практике достигает 10 суток и более (А Handbook ..., 1994; Попов, 2016; Рыбка, Щеголькова, 2019а). Время нахождения воды в ФОС оз. Нижний Кабан исчисляется сравнительно меньшими величинами – 18.9 часа (линия I) и 3.3 часа (линия II). Как видно по колебаниям значений БПК<sub>5</sub> на выходе из ФОС, этого времени оказывается недостаточно для полного завершения процессов очистки.

Особого внимания требует контроль соединений азота из-за их роли в эвтрофикации, влияния на содержание кислорода в водоприемниках и токсичности для гидробионтов. Основная доля процессов очистки от азота в ФОС открытого типа – это микробиологическая трансформация растворенных форм азота в процессе их нитрификации и денитрификации (Рыбка, Щеголькова, 2019б). Ключевую роль при этом играет содержание в воде растворенного кислорода, значительное количество которого расходуется на окислительные процессы, что может приводить к возникновению его дефицита. Концентрации аммония и нитритов на выходе из ФОС не достигают нормативов, что, по нашему мнению, обусловлено как очень высоким их содержанием в воде озера, так и незавершенностью процессов окисления соединений азота в фито-системе из-за недостаточного времени пребывания и низкой концентрации кислорода.

Неоднозначная ситуация складывается по фосфору, содержание которого на выходе из ФОС значительно (в два раза) превышает таковое в озере. Вынос фосфора из ФОС, фиксируемый в течение всего периода наблюдений (рис. 5), указывает на то, что основные механизмы удаления фосфора, такие как сорбция, химическое и гравитационное осаждение, в ФОС оказываются неэффективными. Предположительно, причина заключается в природе субстрата для корней растений, из которого, в условиях более низких концентраций фосфора в воде, может происходить его высвобождение. Такое наблюдается, например, на начальной стадии функционирования ФОС, в которых в качестве загрузки используются богатые фосфором почвы (Рыбка, Щеголькова, 2019б).

Таким образом, неоднозначные по степени и направленности изменения в физико-химических показателях очищаемой озерной воды указывают на низкую эффективность работы ФОС в первые два года его эксплуатации. Основной причиной, по нашему мнению, является недостаточное для полного протекания процессов очистки время пребывания воды в фито-очистной системе. Увеличение времени пребывания воды в каскаде прудов (в режиме минимальной мощности работы водозаборного устройства или в режиме переменной проточности) должно положительно отразиться на работе сооружения. Эффективность очистки воды в ФОС можно повысить выделением в каскаде прудов зон для дополнительной аэрации, например, засадка одного из прудов погруженными в воду растениями (элодеей канадской или др.), обеспечивающими значительную фотосинтетическую аэрацию. Для наладки в фито-системе механизмов удаления фосфора необходимо более детально исследовать процессы обмена этим элементом в системе грунт-вода. При необходимости, можно провести замену грунта на более пористую загрузку (гравий или смесь гравия с песком и др.), или использовать специальную загрузку с высокой сорбционной емкостью по фосфору. Целесообразно также проведение периодического изъятия растительной биомассы из ФОС с ассимилированным в ней фосфором.

### Заключение

Использование ФОС для очистки воды природных водоемов, загрязняемых ливневыми и промышленными сточными водами, диффузным стоком с городских территорий, является первым подобным опытом для городов Республики Татарстан. Анализ результатов первых двух лет эксплуатации ФОС на оз. Нижний Кабан указывает на важность вопросов, связанных с необходимостью тщательной наладки технологических процессов работы системы биопрудов (выбор оптимального гидравлического режима, дополнительная аэрация, удаление фосфора) с учетом наблюдаемых эффектов. Это позволит в большей мере оценить возможности использования данной технологии на других загрязненных водоемах промышленно-урбанизированных территорий.

### Список литературы

1. Горохова О.Г. Фитопланктон озерной системы Кабан в 2011 году // Георесурсы. 2012. №7. С. 24–28.
2. Горшкова А.Т., Урбанова О.Н., Минуллина А.А., Семанов Д.А., Валетдинов А.Р., Ионова Ю.С. Характеристика современного состояния озер Кабан по данным батиметрических съемок // Георесурсы. 2012. №7. С. 3–6.
3. Катанская В.М. Методика исследования высшей

водной растительности // Жизнь пресных вод СССР. Т. 4. Ч. 1. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 160–182.

4. Мингазова Н.М. Антропогенные изменения и восстановление экосистем малых озер (на примере Среднего Поволжья): Дис. ... докт. биол. наук. Казань, 1999. 710 с.

5. Мингазова Н.М., Котов Ю.С. Казанские озера (исторический обзор). Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1989. 175 с.

6. Морозов Н.В. Экологическая биотехнология: очистка природных и сточных вод макрофитами. Казань: Изд-во КГПУ, 2001. 396 с.

7. Мустафина Л.К., Иванов Д.В., Шурмина Н.В., Богданова О.А. Оценка качества воды озера Нижний Кабан // Сборн. трудов X конгресса «Чистая вода. Казань», Казань: НП РЦОК ЖКХ РТ, 2019. С. 154–156.

8. Папченков В.Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: МУБиНТ, 2001. 213 с.

9. Попов А.Н. К вопросу о защите поверхностных питьевых водосточников от загрязнений, поступающих с рассеянным стоком. Сообщение 4 «Функционирование биоинженерного сооружения на основе растительного сообщества, организованного для защиты водных объектов от соединений металлов» // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2016. №2. С. 26–37.

10. Пособие к ВНТП 01-98 «Оросительные системы с использованием сточных вод и животноводческих стоков». М., 1998. 168 с.

11. Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 г. №552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

12. Рыбка К.Ю., Щеголькова Н.М. Принципы проектирования фито-очистных систем // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2019а. Т. 27, № 4. С. 255–263.

13. Рыбка К.Ю., Щеголькова Н.М. Фито-очистные системы как природно-техногенные барьеры для загрязняющих веществ. М.: Вода: химия и экология, 2019б. 256 с.

14. Экология города Казани. Казань: Изд-во «Фэн», 2005. 573 с.

15. A Handbook of constructed wetlands. A guide for creating wetlands for: agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, stormwater in the Mid-Atlantic region. Philadelphia, 1994. V. 1. 53 p.

16. Kadlec R.H., Wallace S.D. Treatment wetlands. Boca Raton, Florida: CRC Press. 2009. 1046 p.

## References

1. Gorokhova O.G. Fitoplankton ozernoj sistemy Kaban v 2011 godu [Phytoplankton of the Kaban lake system in 2011] // Georesursy [Georesursy]. 2012. No 7. P. 24–28.

2. Gorshkova A.T., Urbanova O.N., Minullina A.A., Semanov D.A., Valetdinov A. R., Ionova Yu.S. Charakteristika sovremennogo sostoyaniya ozer Kaban po dannym batimetricheskikh s'emok [The current state characteristics of the Kaban lakes according to bathymetric survey] // Georesursy [Georesursy]. 2012. No 7. P. 3–6.

3. Katanskaya V.M. Metodika issledovaniya vysshej vodnoj rastitel'nosti [Methods of research of higher aquatic vegetation] // Zhizn' presnyh vod SSSR. [The life of fresh waters of the USSR]. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1956. Vol. 4, p. 1. P. 160–182.

4. Mingazova N.M. Antropogennye izmeneniya i vostanovlenie ekosistem malyh ozer (na primere Srednego Povolzh'ya): dis. ... dokt. biol. nauk. [Anthropogenic changes and restoration of ecosystems of small lakes (on the example of the

Middle Volga region): DSc (Dr. of biol.) thesis. Kazan, 1999. 710 p.

5. Mingazova N.M., Kotov Yu.S. Kazanskije ozera (istoricheskij obzor) [Kazan Lakes (historical overview)]. Kazan: Izd-vo Kazan. Un-ta, 1989. 175 p.

6. Morozov N.V. Ekologicheskaya biotekhnologiya: ochistka prirodnyh i stochnyh vod makrofitami [Ecological biotechnology: treatment of natural and wastewater by macrophytes]. Kazan: Izd-vo KGPU, 2001. 396 p.

7. Mustafina L.K., Ivanov D.V., Shurmina N.V., Bogdanova O.A. Ocenka kachestva vody ozera Nizhnij Kaban [Assessment of the water quality of Lake Nizhny Kaban] // Sborn. trudov X kongressa «Chistaya voda. Kазань» [Proceedings of the X Congress «Clean water. Kazan»]. Kazan: NP RCOK ZHKKH RT, 2019. P. 154–156.

8. Papchenkov V.G. Rastitel'nyj pokrov vodoemov i vodotokov Srednego Povolzh'ya [Vegetation cover of reservoirs and watercourses of the Middle Volga region]. Yaroslavl: MUBiNT, 2001. 213 p.

9. Popov A.N. K voprosu o zashchite poverhnostnyh pit'evykh vodoistochnikov ot zagryaznenij, postupayushchih s rasseyannym stokom. Soobshchenie 4 «Funkcionirovanie bioinzhenernogo sooruzheniya na osnove rastitel'nogo soobshchestva, organizovannogo dlya zashchity vodnyh ob'ektov ot soedinenij metallov» [On the issue of protection of surface drinking water sources from pollution coming from scattered runoff. Message 4 «Functioning of a bioengineering facility based on a plant community organized to protect water bodies from metal compounds»] // Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie [Water treatment. Water conditioning. Water supply]. 2016. No 2. P. 26–37.

10. Posobie k VNTP 01-98 «Orositel'nye sistemy s ispol'zovaniem stochnyh vod i zhivotnovodcheskih stokov» [Manual for VNTP 01-98 «Irrigation systems using wastewater and livestock effluents». Moscow, 1998. 168 p.

11. Prikaz Ministerstva sel'skogo hoz'yajstva Rossijskoj Federacii ot 13.12.2016 g. №552 «Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnyh ob'ektov rybohozyajstvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimyh koncentracij vrednyh veshchestv v vodah vodnyh ob'ektov rybohozyajstvennogo znacheniya» [Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of 13.12.2016 No. 552 «On approval of water quality standards for fishery water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fishery water bodies»].

12. Rybka K.Yu., Shchegolkova N.M. Principy proektirovaniya fito-ochistnyh sistem [Principles of constructed wetlands designing] // Vestnik RUDN. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti [RUDN Journal of Ecology and Life Safety]. 2019а. Vol. 27, No 4. P. 255–263.

13. Rybka K.Yu., Shchegolkova N.M. Fito-ochistnye sistemy kak prirodno-tekhnogennye bar'ery dlya zagryaznyayushchih veshchestv [Constructed wetlands as natural and man-made barriers for pollutants] Moscow: Water: chemistry and ecology, 2019b. 256 p.

14. Ekologiya goroda Kazani [Ecology of the city of Kazan]. Kazan: FEN, 2005. 573 с.

15. A Handbook of Constructed wetlands. A guide to creating wetlands for: agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, stormwater in the Mid-Atlantic region. Philadelphia, 1994. Vol. 1. 53 p.

16. Kadlec R.H., Wallace S.D. Treatment wetlands. Boca Raton: CRC Press, 2009. 1046 p.

Tokinova R.P., Lyubarsky D.S., Abramova K.I., Ivanov D.V. **Efficiency of constructed wetlands for water purification at the Nizhniy Kaban Lake (Kazan city).**

The article deals with the results of the operation efficiency of the constructed wetland designed to treatment and improve Nizhny Kaban Lake water quality. The dynamics of the plant communities' abundance indicators (projective covering, shoot formation, phytomass) testifies to the active growth and successful adaptation of plants to the conditions of the constructed wetland ponds after their launch (June 2018). At the same time, ambiguous in the degree and direction of changes in treated water's chemical parameters at the entrance to the constructed wetland and exit from it indicate a low efficiency of the structure's operation in the first two years. Adjusting technological processes (choosing the optimal hydraulic mode, additional aeration, phosphorus removal) should have a positive effect on the constructed wetland operation.

*Keywords:* constructed wetlands; Nizhniy Kaban Lake; water quality; higher aquatic vegetation.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

#### **Информация о статье / Information about the article.**

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 11.11.2021

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 25.11.2021

Принята к публикации / Accepted for publication: 10.12.2021

#### **Информация об авторах**

Токинова Римма Петровна, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: r.tokin@rambler.ru.

Любарский Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: lds57@mail.ru.

Абрамова Ксения Ивановна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: kseniaiv@yandex.ru.

Иванов Дмитрий Владимирович, кандидат биологических наук, зам. директора по научной работе, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: water-rf@mail.ru.

#### **Information about the authors**

Rimma P. Tokinova, Ph.D. in Biology, Head of Laboratory, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: r.tokin@rambler.ru.

Dmitrii S. Lyubarsky, Junior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya St., Kazan, 420087, Russia, E-mail: lds57@mail.ru.

Ksenia I. Abramova, Ph.D. in Biology, Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: kseniaiv@yandex.ru.

Dmitrii V. Ivanov, Ph.D. in Biology, Deputy Director, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: water-rf@mail.ru.