



ГЕОГРАФИЯ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 22, вып. 1. С. 4–12

Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 4–12

<https://geo.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-1-4-12>

Научная статья

УДК 504.064.36(470.322):(470:55)

Геоэкологическая оценка состояния искусственных водоемов зоны влияния металлургических предприятий

Г. А. Анциферова¹, В. В. Кульнев²✉, С. Л. Шевырев³, Е. Е. Биломар⁴, Л. А. Межова⁵, Н. И. Русова⁶, М. Ю. Хотак¹

¹ Воронежский государственный университет, Россия, 394018, г. Воронеж, пл. Университетская, д. 1

² Отдел государственного экологического надзора по Воронежской области Центрально-Черноземного межрегионального управления Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Ломоносова, д. 105

³ ФГБУН «Дальневосточный геологический институт» ДВО РАН, Россия, 690022, г. Владивосток, просп. 100-летия Владивостоку, д. 159

⁴ ООО «Донтрейд», Россия, 394026, г. Воронеж, ул. Электросигнальная, д. 20

⁵ Воронежский государственный педагогический университет, Россия, 394043, г. Воронеж, ул. Ленина, д. 86

⁶ Военно-морской политехнический институт «Военно-морская академия», Россия, 197045, г. Санкт-Петербург, Ушаковская наб., д. 17/1

Анциферова Галина Аркадьевна¹, доктор географических наук, профессор, g_antsiferova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0040-6564>

Кульнев Вадим Вячеславович², кандидат географических наук, ведущий специалист-эксперт, kulnev@rpn36.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1646-9183>

Шевырев Сергей Леонидович³, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, shevyrev.sl@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6649-7492>

Биломар Елена Евгеньевна⁴, кандидат биологических наук, технолог, elena.bilomar@agrostrazh.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5663-6874>

Межова Лидия Александровна⁵, кандидат географических наук, доцент, lidia09mezhova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6652-5120>

Русова Надежда Ивановна⁶, кандидат географических наук, доцент, nadezhda_minnikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9232-8059>

Хотак Мохаммед Юсаф¹, аспирант, mohammadyousafhotaki@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-1240-3520>

Аннотация. На основе интерпретации результатов динамики изменения гидрохимических показателей и применения метода биоиндикации по сообществам фитопланктона дана оценка геоэкологического состояния двух искусственных водоемов, находящихся в зонах влияния объектов металлургического производства и испытывавших реабилитацию путем вселения двух штаммов водоросли хлореллы: Матырского водохранилища (*Chlorella vulgaris* ИФР №С-111) и Баландинского пруда (*Chlorella kessleri* ВКПМ А1-11 АRW). Показана положительная роль использования метода коррекции альгоценоза. В водоемах изучены изменения эколого-биологического качества вод.

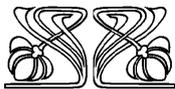
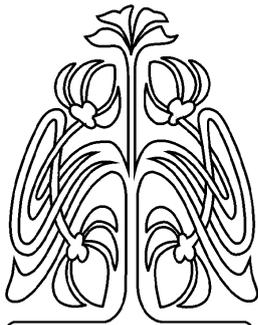
Ключевые слова: альголизация, биоиндикация, водные экосистемы, «цветение» вод, сточные воды металлургического производства, фитопланктон, эколого-биологическое качество

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00779.

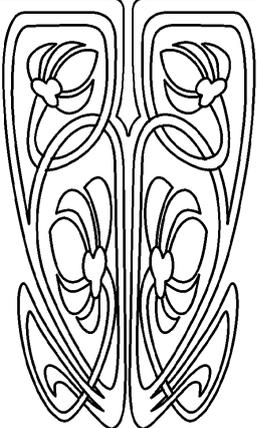
Для цитирования: Анциферова Г. А., Кульнев В. В., Шевырев С. Л., Биломар Е. Е., Межова Л. А., Русова Н. И., Хотак М. Ю. Геоэкологическая оценка состояния искусственных водоемов зоны влияния металлургических предприятий // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 22, вып. 1. С. 4–12. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-1-4-12>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

© Анциферова Г. А., Кульнев В. В., Шевырев С. Л., Биломар Е. Е., Межова Л. А., Русова Н. И., Хотак М. Ю., 2022



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





Article

Geological assessing artificial water bodies of the influence zone of metallurgical plants

G. A. Antsiferova¹, V. V. Kul'nev²✉, S. L. Shevyrev³, E. E. Bilomar⁴, L. A. Mezkhova⁵, N. I. Rusova⁶, M. Yu. Khotak¹

¹Voronezh State University, 1 Universitetskaya St., Voronezh 394018, Russia

²Central Black Earth Interregional Administration of the Federal Service for Supervision of Natural Resources, 105 Lomonosov St., Voronezh 394087, Russia

³FGBUN "Far Eastern Geological Institute" FEB RAS, Prosp. 100th anniversary of Vladivostok, Vladivostok 690922, Russia

⁴LLC "Dontreid", 20 Elektrosignal'naya St., Voronezh 394026, Russia

⁵Voronezh State Pedagogical University, 86 Lenina St., Voronezh 394043, Russia

⁶The Naval Polytechnic Institute "Naval Academy", 17/1 Ushakovskaya nab., Saint-Petersburg 197045, Russia

Galina A. Antsiferova¹, g_antsiferova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0040-6564>

Vadim V. Kul'nev², kulnev@rpn36.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1646-9183>

Sergey L. Shevyrev³, shevyrev.sl@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6649-7492>

Elena E. Bilomar⁴, elena.bilomar@agrostrazh.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5663-6874>

Lidiya A. Mezkhova⁵, lidiya09mezkhova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6652-5120>

Nadezhda I. Rusova⁶, nadezhda_minnikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9232-8059>

Mokhammad Yu. Khotak¹, mohammadyousafhotaki@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-1646-9183>

Abstract. On the basis of the results interpretation of hydrochemical indicators change dynamics and the application of bioindication method by phytoplankton communities the geocological state of two artificial reservoirs located in the zones of influence of metallurgical works objects and tested rehabilitation by introducing two strains of algae chlorella: the Matyrsky reservoir (*Chlorella vulgaris* ИФР No. C-111) and Balandinsky pond (*Chlorella kessleri* ВКПМ А1-11 АRW) is given. The positive role of using the method of correction of algocenosis is shown. Changes in the ecologo-biological quality of waters were studied in water bodies.

Keywords: algolisation, bioindication, aquatic ecosystems, water blooms, metallurgical wastewater, phytoplankton, ecological and biological quality

Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR, project number 20-05-00779.

For citation: Antsiferova G. A., Kul'nev V. V., Shevyrev S. L., Bilomar E. E., Mezkhova L. A., Rusova N. I., Khotak M. Yu. Geological assessing artificial water bodies of the influence zone of metallurgical plants. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 4–12 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-1-4-12>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Геоэкологический анализ состояния искусственных водоемов, расположенных на техногенно нагруженных территориях, является задачей, которой занимаются многие исследователи. Примером активного интереса к экологическим аспектам функционирования металлургической промышленности за пределами России могут служить работы, посвященные исследованиям Самаркандского водохранилища (Узбекистан) [1], водохранилища Entrepénas (Испания) [2], водохранилищ на реках Ныса, Салона, Быстшица, Стшегомка (Польша) [3].

Насколько значительным фактором изменения состояния водоемов может служить альголизация, можно судить по работам, посвященным описанию применения указанного метода на крупных водных объектах разного назначения и географического положения [4–11].

Тематике эффективности альголизации сточных вод посвящены следующие работы [12–16]. В работах [17–20] даны теоретические основы описываемого метода улучшения экологического состояния водоемов, находящихся в зоне влияния объектов металлургического производства.

На территории Российской Федерации наиболее исследованными являются искусственные водоемы, расположенные рядом с металлургическими предприятиями Южного Урала и европейской части нашей страны. В частности, некоторые из указанных работ посвящены изучению состояния Магнитогорского [21] и Шершневского водохранилищ (Челябинская область) [22], Матырского водохранилища (Липецкая область) [23–29].

Однако для осуществления анализа геоэкологического состояния водного объекта необходим комплексный подход, который был реализован рядом российских исследователей при создании мультифрактальной концепции обработки результатов гидрохимических и гидробиологических исследований [30–40]. В качестве исходных данных при мультифрактальном моделировании авторами использовались ряды данных химического состава и таксономических характеристик водорослевых сообществ [34–36].

Попытка совместной интерпретации результатов гидрохимических и гидробиологических данных двух водоемов, находящихся в зоне влияния металлургических комбинатов, представлена в настоящей статье.



Материалы и методы

Объектами исследования послужили два искусственных водоема: Матырское водохранилище (Липецкая область) и Баландинский пруд (Челябинская область). Общими характеристиками указанных водных объектов является изменение гидрохимического состава, обусловленное выпадением метеорных осадков и плоскостным стоком с прилегающих территорий, а также альголизация, проводимая в течение одного года. Отличия наблюдаются в степени деградации сточных вод: Матырское водохранилище, расположенное на реке Матыра в бассейне верхнего Дона, находится в зоне влияния Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК) [29]. Сточные воды котельной НЛМК после очистки попадают в Матырское водохранилище, в районе левобережья, в 10 м от сброса котельной указанного комбината (рис. 1, точка наблюдения 4). Основной же сброс сточных вод НЛМК

осуществляется в реку Матыра ниже плотины водохранилища (см. рис. 1, ниже точки 6).

Баландинский пруд (рис. 2) является техническим водоемом и принимает в себя сточные воды Челябинского металлургического комбината. Поэтому количество загрязняющих веществ априори выше в Баландинском пруду (площадь водного зеркала 56 га; средняя глубина 2,5 м) по сравнению с Матырским водохранилищем (площадь водного зеркала 4600 га; средняя глубина 2,9 м) (по сведениям государственного водного реестра). Скорость депонирования поллютантов, в частности в илах, значительно выше в Баландинском пруду. Дополнительным фактором, имеющим характерное влияние на все показатели геоэкологического состояния Баландинского пруда, служило проведение дноуглубительных работ в 2019–2020 гг.

Оценка современного эколого-биологического состояния указанных водоемов основана



Рис. 1. Карта-схема Матырского водохранилища. Описание точек наблюдения: 1 – левобережье, примерно в 20 м по течению р. Матыра от автомобильного моста в г. Грязи Грязинского муниципального района Липецкой области; 2 – правобережье, западная окраина с. Ярлуково Грязинского муниципального района Липецкой области; 3 – левобережье, район расположения птицефабрики в с. Казинка Грязинского муниципального района Липецкой области; 4 – левобережье, в 10 м от сброса котельной Новолипецкого металлургического комбината; 5 – левобережье, приплотинная зона водохранилища в северо-восточной части искусственно намытой песчаной косы; 6 – правобережье, приплотинная зона водохранилища в районе детских оздоровительных лагерей; 7 – левобережье, искусственный пруд, который дамбой отделен от водохранилища (контрольный водоем) (цвет online)

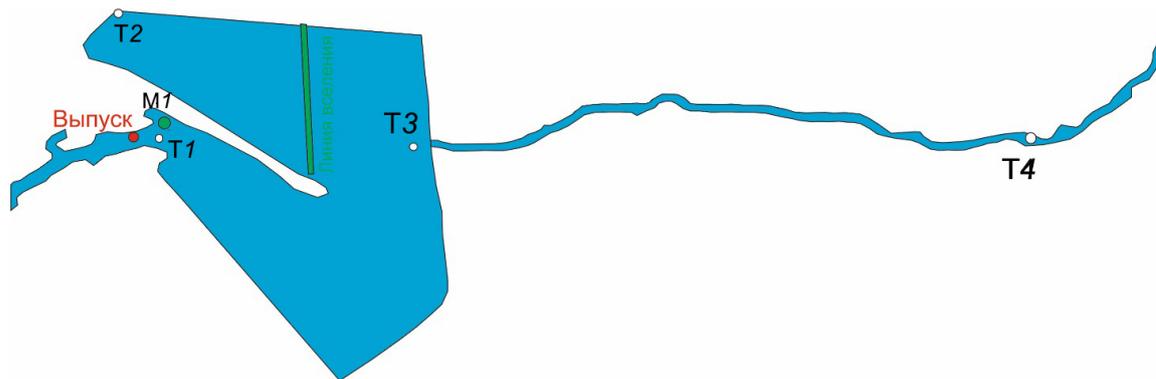


Рис. 2. Карта-схема Баландинского пруда. Описание точек наблюдения: T1 – поступающая вода в Баландинский пруд; T2 – водозабор технической воды (насосная станция № 55); T3 – Баландинский выпуск в р. Черная (перед узлом учета); T4 – устье р. Черная (при впадении в р. Миасс); M1 – поступающая вода в Баландинский пруд, место вселения 2/3 объема альголизанта; M2 – левая доля Баландинского пруда, линия вселения 1/3 объема альголизанта; выпуск – место сброса сточных вод в Баландинский пруд (цвет online)

на данных, полученных методами биоиндикации по сообществам фитопланктона.

Для определения геоэкологического состояния водоемов использовался ряд показателей:

- сапробиологический анализ Пантле и Букка в модификации Сладечека (S), который использовался для оценки качества вод по показателям фитопланктона;
- показателями, описывающими видовое богатство и устойчивость сообществ фитопланктона.

Гидрохимические и гидробиологические (по фитопланктону) пробы отбирались в Матырском водохранилище (см. рис. 1) с апреля по октябрь 2009–2011 гг. на семи точках наблюдения. Итого за период мониторинга было отобрано 294 пробы. С целью определения экологического состояния Матырского водохранилища нами однократно в июне 2014–2016 гг. и в 2019 г. в точке наблюдения 6 проводился сбор проб фитопланктона.

В Баландинском пруду отбор проб проводился с июля по ноябрь 2020 г. в четырех основных точках (см. рис. 2). Всего было отобрано 22 пробы фитопланктона и 20 проб для анализа гидрохимического состава.

Результаты и их обсуждение

По большинству нормируемых компонентов химического состава воды Матырского водохранилища минимальные значения зафиксированы в 2008–2009 гг. По майским пробам 2010 г. отмечается дальнейшее улучшение эколого-гидрохимической обстановки по ряду показателей (тяжелые металлы, ХПК, БПК₅, аммонийный и нитритный азот), особенно в верховьях водохранилища.

Однако проведение дноуглубительных работ на акватории водохранилища в летний период 2010 г., в течение которого стояла аномально

жаркая погода, привело к повышению концентрации нормируемых компонентов. В 2011 г. ситуация стабилизировалась, а по концентрации металлов (железо, медь, цинк) произошло значительное улучшение. Содержание железа и меди в верховьях составило соответственно 0,03 мг/дм³ и 0,001 мг/дм³, в приплотинной части водохранилища – соответственно 0,06 мг/дм³ и 0,001 мг/дм³, полученные значения являются минимальными за период с 2006 по 2011 г.

Проблемными поллютантами являются аммонийный азот и полифосфаты. На протяжении всего наблюдаемого периода по сентябрьским пробам зафиксировано 5 годовых ухудшений ситуации. Данный процесс сопровождался снижением содержания растворенного в воде кислорода. Следует также отметить неблагоприятную динамику по показателям ХПК. Это свидетельствует о химическом характере загрязнения водохранилища. Однако по анализируемым тяжелым металлам превышений не выявлено.

Положительные сдвиги были отмечены по содержанию нитритного и нитратного азота. Следует отметить, что концентрация нитритного азота в приплотинной части водохранилища на сентябрь 2011 г. составила 0,006 мг/дм³, что является минимумом за период 2006–2011 гг.

В качестве положительного момента необходимо отметить уменьшение в 2010–2011 гг. содержания нефтепродуктов в водоеме. Если в 2006 г. мы имели двукратное превышение ПДК, то в сентябре 2011 г. нефтепродукты в пробах не обнаружены.

Развитие микроводорослей и цианобактерий во многом определяет качество вод. При этом некоторые виды микроводорослей и цианобактерий активно участвуют в переработке органического вещества и ряда загрязняющих веществ. В то же время под влиянием качества вод формируется таксономический состав фитопланктона.



Диатомовые водоросли Матырского водохранилища в исследуемый период представлены 89 видами, разновидностями и формами, принадлежащими 29 родам. Сине-зеленые водоросли насчитывали 4 таксона, принадлежащих 4 родам. Другие низшие микроскопические водоросли представлены 8 таксонами, относящимися к 7 родам.

Гидробиологические исследования Матырского водохранилища в 2014–2016 гг. показали, что в составе фитопланктона продолжают доминировать диатомовые водоросли. Среди цианобактерий оценок обилия «в массе» и «очень часто» достигают виды *Anabaena flos-aquae* (Lyngb.) Bréb. и *Anabaena spiroides* Kleb. Вид *Microcystis pulvereae* (Wood.) Forti emend. Elenk. имеет оценки обилия «часто» и «нередко». Особое внимание привлекает повсеместное распространение полисапробного вида *Ostillatoria lautenbornii* Schmidle, имеющего оценку обилия «часто», а также *Microcystis aeruginosa* Kütz. Emend. Elenk. – «нередко». Эти виды, характерные для загрязненных местообитаний, в процессе метаболизма выделяют цианотоксины [41].

Анализ фитопланктона Матырского водохранилища в июне 2019 г. показал, что средние значения его численности составляют около 0,98 млн кл./л, а биомассы – около 1,09 мг/л. Подобные значения численности и биомассы, наряду с достаточно высокими значениями оценок обилия таких видов цианобактерий, как *Aphanothece clatrata* W. Et G. S. West («часто») и *Rhabdoderma lineare* Schmidle et Laut. Emend. Hollerb. («нередко»), доказывают высокую интенсивность процессов самоочищения.

Вычисленный для Матырского водохранилища индекс сапробности показывает, что водная экосистема по качеству и санитарно-биологическому показателю воды относится к классу III – «умеренно загрязненные»: в 2011 г. индекс сапробности $S = 1,61$, в 2010 г. он был равен 1,79. Данные проб за последующие годы не позволили достоверно вычислить указанный коэффициент (число видов-индикаторов менее 12, сумма баллов их видового обилия менее 30). В целом экосистема по степени кризисности находится на стадии обратимых изменений.

Проведенные исследования показали, что в результате длительной эксплуатации Матырского водохранилища химический состав его вод достаточно стабилен. К основным факторам, определяющим изменение химического состава вод водохранилища, можно отнести питающую его р. Матыра и ряд более мелких притоков, климат, а также промышленную и хозяйственно-бытовую деятельность в пределах СЭЗ «Липецк», промзон г. Грязи и с. Казинка, а также альголизацию.

Альголизация, проведенная в 2009–2011 гг., привела к интенсификации процессов самоочищения и реабилитации Матырского водохра-

нилища в гидробиологическом отношении. Содержание тяжелых металлов и нефтепродуктов, которые являются типичными агентами техногенного загрязнения, возникающего в результате эксплуатации объектов металлургического производства, имело тенденцию к снижению, а к окончанию проведения альголизации показатели значения, не превышающие ПДК.

При проведении альголизации вод водоема-приемника сточных вод Челябинского металлургического комбината (ЧМК) осуществлялись контроль их эколого-биологического качества методом биоиндикации по фитопланктону и гидрохимический анализ по ряду компонентов и показателей. Это запах, цветность, взвешенные вещества, сухой остаток, гидросульфаты, химическое и биохимическое потребление кислорода, аммонийный, нитритный и нитратный азот, общее железо, медь, цинк, никель, марганец, фториды, хром, фенолы, сероводород, нефтепродукты, мышьяк и ртуть. Ведущими загрязняющими веществами Баландинского водоема-приемника сточных вод ЧМК являются взвешенные вещества, фториды, медь, цинк и нитриты.

Все определяемые загрязняющие вещества по значению коэффициента концентрации условно разделяются на группы – доминантные, субдоминантные и акцессорные. Это деление весьма условно, поскольку загрязняющие вещества могут совершать переходы из одной группы в другую в зависимости от времени года, залповых сбросов и других факторов.

В 2019 г. доминантными загрязнителями представлялись фториды и фенолы. В субдоминантную группу входили нитриты и цинк.

В 2020 г. по значениям коэффициента концентрации доминантным поллютантом во всех точках опробования и в течение всего периода наблюдений являются взвешенные вещества. Наличие повышенного содержания взвешенных веществ обусловливается проведением дноуглубительных работ.

Субдоминантными поллютантами признаются фториды и цинк. В отличие от доминанты, в эту группу время от времени входят загрязняющие вещества из третьей группы. Источником значимых концентраций фторидов является используемый при доменной выплавке плавиковый шпат. Цинк выступает как сопутствующий компонент в концентратах, получаемых из железных и медно-колчеданных руд.

И наконец, третью группу составляют акцессорные, т. е. сопутствующие, загрязняющие вещества. Наивысшие значения коэффициента концентрации имеют принадлежащие к данной группе медь и нитриты. Медь является сопутствующим компонентом в концентратах, получаемых из железных и медно-колчеданных руд. Нитриты попадают в стоки в результате сброса промышленных вод, источник которых, в свою очередь,



связан с их выбросом из систем выведения доменного газа.

Покомпонентная оценка позволяет сделать ряд выводов. В 2020 г. по причине проведения дноуглубительных работ ведущими поллютантами признаны взвешенные вещества. В результате альголизации вод произошло снижение содержания фенолов, нефтепродуктов, причем в части последних концентрации не достигают фоновых и предельно допустимых значений.

Сравнительно большая концентрация сульфатов в 2020 г. объясняется окислением сульфидов. Об этом свидетельствуют относительно большие значения биохимического потребления кислорода. Соответственно и содержание растворенного в воде кислорода держится на уровне 2019 г. Значение водородного показателя в 2020 г. возросло на 0,6 единиц.

Интегральная оценка качества вод пруда Баландинский в 2020 г. указывает на повышение класса качества вод во всех точках отбора проб в течение всего времени проведения экологического мониторинга с IV–V в 2019 г. до V–VI, иногда VII класса качества. При этом в 2020 г. воды характеризовались от «грязных» до «чрезвычайно грязных». В качестве ведущих загрязняющих веществ Баландинского водоема-приемника сточных вод ЧМК выступают взвешенные вещества, фториды, медь, цинк и нитриты.

Кроме того, альголизация вод способствовала значительному снижению концентрации общего железа, общего хрома, фенолов и нефтепродуктов, что подтвердило вышеизложенные закономерности.

Сравнительно большая концентрация сульфатов в 2020 г. объясняется окислением сульфидов сточных вод ЧМК. Об этом же говорят относительно большие значения биохимического потребления кислорода, поэтому и содержание растворенного в воде кислорода держится на уровне 2019 г.

Обращает на себя внимание также тот факт, что в целом одновременно с сохранением в течение всего вегетационного сезона III класса качества вод в составе сообществ цианобактерий происходит уменьшение оценок обилия видов загрязненных местообитаний по сравнению с их распространением в фитопланктоне июля (до начала альголизации Баландинского пруда). В экосистеме Баландинского пруда положительный эффект альголизации вод четко проявляется как в отношении качества водной среды, так и уровня химического загрязнения вод.

Фитопланктон Баландинского пруда насчитывает 86 видов, разновидностей и форм водорослей из 7 отделов, из которых по значениям количества видов и суммарной биомассы преобладают зеленые водоросли (24,4% от общего числа видов численности и 38,8% от суммарной биомассы) и цианеи (25,6% от общего числа

видов и 54,9% от суммарной биомассы). Диатомовые водоросли при достаточно высокой видовой представленности (31,4% от общего числа видов) не осуществляют обычного для района исследований существенного вклада в общую биомассу (1,2% от суммарной биомассы). Это косвенно свидетельствует о значительном техногенном загрязнении водоема. Большое снижение доли диатомовых водорослей по численности и биомассе может объясняться недостаточным количеством биогенных соединений (нитратов), низким содержанием ионов железа и высоким содержанием сероводорода.

В целом показатели биомассы фитопланктона пруда невысокие (1,36–1,59 мг/л), что обусловлено значительными превышениями ПДК рядом тяжелых металлов (цинком, марганцем, медью), но достаточные для осуществления процессов самоочищения воды и создания кормовой базы для зоопланктона.

Среди фитопланктонных сообществ достаточно благополучным (наибольшее число видов и значение биомассы) следует считать альгоценоз р. Черной (в месте впадения в р. Миасс) (см. рис. 2, Т4), средние показатели биомассы равны 1,88 мг/л, что обусловлено более развитыми процессами самоочищения в условиях меньшего количества взвешенных веществ.

Суммарная биомасса и численность фитопланктона Баландинского пруда испытывала небольшую зависимость от загрязнения только в теплый период года, до октября. Причем при повышении загрязнения обычно отмечалось понижение численности фитопланктона при повышении его биомассы. Начиная с октября более значительным фактором в определении суммарной численности и биомассы микроводорослей являются климатические факторы, в частности понижение температуры поверхностного фотического слоя воды.

Следует отметить, что повышение численности альгофлоры наблюдалось при увеличении в воде содержания мышьяка (коэффициент корреляции $P = 0,61$). Это объясняется небольшим содержанием соединений с данным химическим элементом в воде, значительно ниже ПДК, и возможным его дефицитом для водорослей, которым он необходим для регуляции углеводного обмена.

В периоды наибольших значений биомассы фитопланктона наблюдалось снижение таких веществ, как аммоний ($P = -0,52$) и нитраты ($P = -0,57$).

Лимит варьирования среднего арифметического индекса Пантле – Букка S находится в подавляющем большинстве случаев в пределах III класса качества вод «умеренно (слабо) загрязненные воды», т. е. $S = 1,61–2,245$. Исключением являются показатели качества вод в р. Черной (см. рис. 2, Т4): $S = 1,49$ и соответствует II классу качества вод – «чистые». Следует отметить,



что с конца августа величина индекса стабильно снижается и переходит из подкласса Зб («умеренно загрязненные») в подкласс За («достаточно чистые»), что совпадает с периодом внесения суспензии хлореллы с большей частотой – раз в 10 суток.

Заключение

Таким образом, основными факторами ($P > 0,5$), которые вызывали увеличение уровня сапробности Баландинского пруда, служили сухой остаток ($P = 0,67$), ртуть ($P = 0,57$), марганец ($P = 0,56$) и цинк ($P = 0,55$). Возможно, сходным действием на фитопланктон обладали никель ($P = 0,49$) и медь ($P = 0,47$). Экосистемы Матырского водохранилища, Баландинского пруда и р. Черной г. Челябинска по степени кризисности находятся на стадии обратимых изменений. Поскольку снижение содержания тяжелых металлов в воде требует насыщения воды кислородом, то, возможно, одной из причин отсутствия превышения ПДК по ним в Матырском водохранилище вызвано более длительной (трехлетней) альголизацией, по сравнению с однократным опытом проведения данных работ на Баландинском пруду.

Библиографический список

1. Rakhmetova A. A., Beisenova R. R., Akpambetova K. M. Geocological assessment of the dynamics of pollution of the Nura river and Samarkand reservoir // Bulletin of the Karaganda university. Biology. Medicine. Geography Series. 2020. Vol. 98, № 2. P. 53–59.
2. Argüelles R., Toledo M., Martín M. A. Study of the Tagus River and Entrepeñas reservoir ecosystem around the Trillo nuclear power plant using chemometric analysis : Influence on water, sediments, algae and fish // Chemosphere. 2021. Vol. 279. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130532>
3. Senze M., Kowalska-Góralaska M., Czyż K. Availability of aluminum in river water supplying dam reservoirs in Lower Silesia considering the hydrochemical conditions // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2021. Vol. 16. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100535>
4. Петросян В. С. Альголизация водоемов и проблемы химической безопасности // Чистая вода : проблемы и решения. 2012. № 3–4. С. 85–88.
5. Биломар Е. Е., Кульнев В. В. Биологическая реабилитация Белоярского водохранилища методом коррекции альгоценоза // Самарская Лука : проблемы региональной и глобальной экологии. 2014. Т. 23, № 2. С. 22–32.
6. Мелихов В. В., Московец М. В., Торопов А. Ю. Мониторинг экологического состояния водохранилищ ВДСК при альголизации штаммом хлореллы ИФР №С-111 // Орошаемое земледелие. 2014. № 1. С. 6–7.
7. Кульнев В. В., Почечун В. А. Применение альголизации питьевых водоемов Нижнетагильского промышленного узла // Медицина труда и промышленная экология. 2016. № 1. С. 20–21.

8. Кульнев В. В. О результатах проведения биологической реабилитации Большого Васильевского озера методом коррекции альгоценоза в 2014–2015 году (гидрохимический аспект) // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов : труды IV Международной научно-практической конференции / Свердловское областное отделение общественной организации международной академии наук экологии, безопасности человека и природы ; Министерство образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» ; Институт экономики УрО РАН. Екатеринбург : Издательство Уральского государственного горного университета, 2016. С. 159–165.

9. Кульнев В. В., Брычаева И. Е. Оценка сезонной динамики изменения экологического состояния рекреационных водоемов Балашихи вследствие их искусственной альголизации // Современные проблемы географии и геологии. К 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете : материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Томск : Издательство Национального исследовательского Томского государственного университета, 2017. С. 503–507.

10. Орел А. С., Хальметов А. А. Биологический метод очистки водоемов // Инновационные технологии в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении : материалы V Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении». Саратов : Амирит, 2017. С. 158–161.

11. Мелихов В. В., Медведева Л. Н., Фролова М. В. Развитие биомелиорации пресноводных водоемов на основе природосберегающей технологии – альголизации // Мелиорация и водное хозяйство. 2020. № 6. С. 13–19.

12. Полубяринов П. А., Андреев С. Ю., Гарькина И. А., Давыдов Г. П. Оценка химического состава биомасс хлореллы, используемой в процессах естественной биологической очистки сточных вод // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 3. С. 75–81.

13. Субботина Ю. М. Характеристика санитарно-гидрохимических показателей самоочищения птицеводческих стоков в условиях различного разбавления их биологически очищенными сточными водами и альголизацией водорослями // Пресноводная аквакультура : мобилизация ресурсного потенциала : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Москва : Издательство «Перо», 2017. С. 476–481.

14. Субботина Ю. М., Смирнова И. Р., Павлова Е. В. Микробиологическая очистка и санация сточных вод в биологических оксидационных контактных стабилизационных прудах // Наука и мир. 2016. Т. 2, № 1 (29). С. 106–109.

15. Кульнев В. В., Ступин В. И., Борзенков А. А. Биологическая реабилитация сточных вод сахарных заводов методом коррекции альгоценоза // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21, № 3. С. 16–20.

16. Анциферова Г. А., Когаров В. В. Формирование экологического качества вод очистных сооружений сахарного производства в условиях альголизации // Региональные эколого-географические исследования : сборник научных



- статей. Воронеж : Издательство Воронежского государственного университета, 2020. С. 23–28.
17. Кульнев В. В., Богданов Н. И., Лухтанов В. Т. Биологическая реабилитация водоемов путем структурной перестройки фитопланктонного сообщества // Аквакультура России : вклад молодых : материалы конференции молодых ученых и специалистов. Тюмень : Издательство Государственного научно-производственного центра рыбного хозяйства, 2012. С. 51–56.
18. К вопросу о таксономическом составе фитопланктона и качестве воды Леневого водохранилища и Нижнетагильского городского пруда (Свердловская область) / Е. Е. Марченко, В. В. Кульнев, Г. А. Анциферова [и др.] // Экологическая безопасность промышленных регионов : III Уральский международный экологический конгресс / редакционная коллегия : А. И. Семячков, М. Н. Игнатъева. Екатеринбург ; Пермь : Издательство Института экономики Уральского отделения РАН, 2015. С. 73–82.
19. Кульнев В. В. Эколого-гидрохимический аспект проведения биологической реабилитации Нижнетагильского городского пруда методом коррекции альгоценоза // Экологическая геология : теория, практика и региональные проблемы : V Международная научно-практическая конференция (Посвящается Году экологии в России ; Третьей годовщине присоединения Крыма к России ; Столетию Воронежского Государственного университета ; 10-летию кафедры экологической геологии геологического факультета Воронежского государственного университета). Севастополь ; Воронеж ; Ханой : Издательство «Научная книга», 2017. С. 198–201.
20. Санитарно-биологическое качество поверхностных вод на урбанизированных территориях / Г. А. Анциферова, Л. М. Акимов, Е. С. Галкина [и др.] // Теоретические и прикладные проблемы географической науки : демографический, социальный, правовой, экономический и экологический аспекты : материалы Международной научно-практической конференции : в 2 томах. Воронеж : Издательство Воронежского государственного педагогического университета, 2019. С. 369–374.
21. Черчинцев В. Д., Волкова Е. А., Серова А. А., Романова Е. Ю. Оценка экологического состояния Магнитогорского водохранилища и динамика изменения основных показателей его загрязнения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2014. № 3 (47). С. 63–65.
22. Ходоровская Н. И., Дерябина Л. В., Ячменев В. А., Кравцова А. В. Экологическое состояние речного плеса Шершневского водохранилища // Экология XXI века : синтез образования и науки : материалы VI Международной научно-практической конференции / под научной редакцией Н. Н. Назаренко. Челябинск : Издательство Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета, 2020. С. 299–306.
23. Гречушников М. Г., Киреева М. Б. Гидроэкологическое состояние Матырского водохранилища : современное состояние и перспективы изменения // Степи Северной Евразии : материалы Девятого Международного симпозиума. Оренбург : Издательство Оренбургского государственного университета, 2021. С. 216–222.
24. Беспалова Е. В. Трансформации качества вод Матырского водохранилища в течение вегетационных сезонов 2010–2016 годов // Комплексные проблемы техносферной безопасности : материалы Международной научно-практической конференции. Воронеж : Издательство Воронежского государственного технического университета, 2017. С. 84–88.
25. Кульнев В. В., Базарский О. В. Механизмы изменения концентрации тяжелых металлов при биологической реабилитации Матырского водохранилища методом коррекции альгоценоза // Чистая вода России : сборник материалов XII Международного научно-практического симпозиума и выставки. Екатеринбург : Издательство ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», 2013. С. 181–184.
26. Здрок А. В. Экологическое состояние Матырского водохранилища и особенности накопления тяжелых металлов в воде, донных отложениях и мышцах рыб // Доклады Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А. С. Попова : материалы Международного симпозиума. / под редакцией Ф. А. Мкртчяна. Москва : Издательство Московского научно-технического объединения радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова, 2019. С. 251–254. Серия «Научные международные симпозиумы. Инженерная экология».
27. Анчикина Н. В. Экологическое состояние Матырского водохранилища и его влияние на вмещающий ландшафт Окско-Донской низменности // Успехи современного естествознания. 2017. № 10. С. 60–64.
28. Петросян В. С., Анциферова Г. А., Акимов Л. М., Кульнев В. В., Шевырев С. Л., Акимов Е. Л. Оценка и прогноз эколого-санитарного состояния Воронежского водохранилища на 2018–2019 гг. // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23, № 7. С. 52–56.
29. Валяльщикова А. А., Силкин К. Ю., Кульнев В. В. Анализ экологического состояния Матырского водохранилища по данным эколого-гидрохимического и спутникового мониторинга // Вестник Воронежского государственного университета. Серия : Геология. 2014. № 1. С. 110–117.
30. Анциферова Г. А., Кульнев В. В., Шевырев С. Л., Беспалова Е. В., Русова Н. И., Скосарь А. Е. Искусственные водные объекты бассейна реки Воронеж и альгобиотехнология в управлении качеством вод // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22, № 8. С. 50–54.
31. Кульнев В. В., Насонов А. Н., Цветков И. В., Мезгова Л. А., Ларионов А. Н. Фрактальный подход к оценке управляемости экологическими рисками // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2019. Т. 13, № 4. С. 101–111.
32. Кульнев В. В., Насонов А. Н., Цветков И. В. Управление качеством поверхностных вод на основе мультифрактального анализа // Закономерности трансформации экологических функций геосфер крупных горнопромышленных регионов : материалы Международной научно-практической конференции. Воронеж : Издательство «Истоки», 2020. С. 218–222.
33. Кульнев В. В., Цветков И. В., Насонов А. Н. Об улучшении экологического состояния водоема через управление развитием альгоценоза // Территориальная



- организация общества и управление в регионах : материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Воронеж : Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2021. С. 86–92.
34. Кульнев В. В., Насонов А. Н., Цветков И. В. Применение методов мультифрактальной динамики при проведении экологического мониторинга водоемов // Глобальные экологические проблемы : локальное решение : материалы II Международной научной конференции. Москва : Издательство «Перо», 2019. С. 69–80.
35. Кульнев В. В., Насонов А. Н., Цветков И. В., Мезгова Л. А. Оценка техногенной нагруженности Нижнетагильского городского пруда и управление геоэкологическими рисками на основе мультифрактальной динамики // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Науки о Земле. 2021. Т. 21, вып. 1. С. 4–11. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-1-4-11>
36. Кульнев В. В., Насонов А. Н., Цветков И. В. О проведении экологического мониторинга водных объектов с применением методов мультифрактальной динамики // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов : труды VII Международной научно-практической конференции / ответственный редактор А. И. Семячков. Екатеринбург : Издательство Уральского государственного горного университета, 2019. С. 130–136.
37. Фракталы в науках о Земле : учебное пособие / А. Н. Насонов, И. В. Цветков, И. М. Жогин [и др.]. Воронеж : Издательство «Ковчег», 2018. 82 с.
38. Насонов А. Н., Кульнев В. В., Цветков И. В. Фрактальные модели нормирования техногенной нагрузки по показателям устойчивости экосистем // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2019 : материалы Двенадцатой Международной конференции / под общей редакцией С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. Москва : Издательство Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2019. С. 1058–1059.
39. Кульнев В. В., Насонов А. Н., Жогин И. М., Цветков И. В., Грабарник В. Е., Карелин Н. В. Об опыте проведения управляемой альгоремедиации рекреационного водоема // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24, № 3. С. 58–64.
40. Кульнев В. В., Анциферова Г. А., Насонов А. Н., Цветков И. В., Суздалева А. Л., Графкина М. В. Моделирование и анализ процесса альголизации технологического водоема Новолипецкого металлургического комбината на основе мультифрактальной динамики // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23, № 10. С. 66–71.
41. Davis T. W., Berry D. L., Boyer G. L., C. Gobler J. The effects of temperature and nutrients on the growth and dynamics of toxic and non-toxic strains of *Microcystis* during cyanobacteria blooms // Harmful Algae. 2009. Vol. 8. P. 715–725.
42. Богданов Н. И. Биологическая реабилитация водоемов. 3-е издание, дополненное и переработанное. Пенза : Издательство РИО ПГСХА, 2008. 126 с.

Поступила в редакцию 04.11.2021; одобрена после рецензирования 10.12.2021; принята к публикации 20.12.2021
The article was submitted 04.11.2021; approved after reviewing 10.12.2021; accepted for publication 20.12.2021