

## Комплексный подход к регулированию качества воды слабопроточных водоемов (на примере Баландинского пруда Челябинского металлургического комбината)

В. В. Кульнев<sup>1</sup>✉, О. В. Базарский<sup>2</sup>, Ж. Ю. Кочетова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центрально-Черноземное межрегиональное управление Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, Российская Федерация  
(394087, г. Воронеж, ул. Ломоносова, 105)

<sup>2</sup>Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Российская Федерация  
(394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а)

**Аннотация:** Цель исследования состоит в повышении эффективности снижения экологической опасности слабопроточных искусственных водоемов (пруды, водохранилища, технологические водоемы).

**Материалы и методы.** Для решения проблемы известны три подхода. 1. Биологическая очистка водоемов. Данный подход имеет недостаток, который заключается в низкой скорости биологической очистки. 2. Гидромеханическое удаление донных осадков. На первый взгляд, данный метод предполагает быстрое и кардинальное решение проблемы. Но исследования, проведенные отечественными и зарубежными учеными, в том числе и в данной статье, показали все недостатки «революционного» подхода к экологическим проблемам системы «вода – техногенные отложения – донные осадки водных объектов». Доказано, что дноуглубительные работы разрушают эту систему. Они полезны только в случае, если в такой водоем прекратится сброс неочищенных сточных вод, а дальнейшее проведение биологической очистки приведет к появлению новой улучшенной экологической системы. Однако такой подход требует значительных экономических затрат. В противном случае, сочетание сброса неочищенных сточных вод и дноуглубительных работ приводит к увеличению энтропии экологической системы и её разбалансировке с многообразием случайных путей развития системы и невозможностью дальнейшей реабилитации таких водоемов. 3. «Эволюционный» подход с регулированием количества и качества сбрасываемых сточных вод с их регулярной биологической очисткой. Такой подход сохраняет сложившуюся экологическую систему с прогнозируемым уровнем экологической опасности. Однако он неприменим для технологических водоемов с высоким уровнем загрязнения сточных вод и донных отложений.

**Результаты и обсуждение.** Сделан обзор эффективности известных методов очистки сточных вод с выявлением их недостатков. Предлагается комплексный подход, сочетающий параллельное проведение дноуглубительных работ с биологической очисткой последовательно на малых площадях с управлением процессом очистки.

**Выводы.** С помощью разработанного нового подхода становится возможным исключение недостатков, характерных для широко известных подходов к реабилитации слабопроточных водоемов. При этом не требуется дорогостоящей очистки сточных вод, и в результате очистки возникает новое экологическое равновесие, обеспечивающее качество воды, удовлетворяющее нормативным требованиям, утвержденным нормативно-правовыми актами Российской Федерации.

**Ключевые слова:** альгоценоз, биологическая реабилитация, гидромеханическое удаление, донные отложения, качество воды, природоохранные технологии, сточные воды, технологический водоем, энтропия.

**Для цитирования:** Кульнев В. В., Базарский О. В., Кочетова Ж. Ю. Комплексный подход к регулированию качества воды слабопроточных водоемов (на примере Баландинского пруда Челябинского металлургического комбината) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2023, № 1, с. 103-112. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/1/103-112>

© Кульнев В. В., Базарский О. В., Кочетова Ж. Ю., 2023

✉ Кульнев Вадим Вячеславович, e-mail: kulnev@rpn36.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## ВВЕДЕНИЕ

Вода является основой жизни на Земле. Для человеческого сообщества это пресная вода, объем которой, как известно, составляет около 2,5-3 % от всего запаса свободной воды [13].

С точки зрения теории информации [4, 17] человеческое сообщество и запасы пресной воды можно представить как замкнутую систему, энтропия которой в равновесном состоянии есть величина постоянная. Жизнедеятельность человеческого сообщества и его технологическое развитие увеличивают энтропию пресной воды – уровень её загрязнения. При этом качество жизни человеческого сообщества улучшается за счёт уменьшения его энтропии в процессе технологического развития. Задача экологии – найти экологическое равновесие между качеством жизни человечества и деградацией запасов, так необходимой человечеству пресной воды.

Согласно ст. 44 ч.1 Федерального закона от 03.06.2006 №74-ФЗ «Водный кодекс Российской Федерации» использование водных объектов для целей сброса сточных, в том числе дренажных вод, осуществляется с соблюдением требований, предусмотренных настоящим Кодексом и законодательством в области охраны окружающей среды.

Чистая вода, используемая для питьевых нужд, добывается в основном из подземных водозаборов, расположенных вблизи рек, водохранилищ, озёр и прудов. Загрязнение поверхностных вод приводит к ухудшению качества воды в водозаборах и к нарушению энтропийного баланса между качеством жизни человека и качеством потребляемой воды.

В мире, в том числе и в России, существует актуальная геоэкологическая проблема загрязнения донных осадков слабопроточных водоемов искусственного происхождения (пруды, водохранилища, технологические водоемы), приводящая к ухудшению качества питьевой воды.

Целью работы является разработка комплексного подхода, позволяющего стабилизировать деградацию вод слабопроточных водоемов на примере Баландинского пруда Челябинского металлургического комбината, который в дальнейшем может быть распространен на другие слабопроточные водоемы.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ научных исследований отечественных и зарубежных экологов, а также практика природоохранной деятельности показывают, что

в настоящее время известны три подхода по обеспечению экологической безопасности водопользования. Рассмотрим их на примере слабопроточных водоемов.

### *Биологические методы очистки водоемов*

Среди биологических методов ремедиации, которые были предложены С.А. Остроумовым [14] в отношении улучшения экологического состояния водных объектов, нарушенного в результате антропогенной нагрузки, получившими наибольшее распространение являются три направления – фиторемедиация, бактериоремедиация и альгоремедиация.

Фиторемедиация представляет собой улучшение качества воды с помощью высшей водной растительности [14]. У подхода существует недостаток – с увеличением площади водного зеркала эффективность метода снижается.

Бактериоремедиация (активный ил, сухие препараты бактерий) получила сравнительно более широкое применение, однако данный метод имеет два существенных недостатка. Во-первых, не существует ни одного штамма бактерий, способного улучшать качество воды, загрязненной большим количеством органических, неорганических и металлоорганических поллютантов. Во-вторых, по своим биологическим особенностям бактерии являются потребителями кислорода и продуцентами углекислого газа, увеличивающего парниковый эффект.

Альгоремедиация заключается в использовании хлорококковых микроводорослей и лишена вышеуказанных недостатков [9, 10]. Недостатком альгоремедиации является сильное угнетение хлореллы тяжелыми металлами [8]. Однако этот лимитирующий фактор выявлен в лабораторных условиях. И неясно, как будет проходить процесс в сильно загрязненных тяжелыми металлами слабопроточных водоемах.

К числу наиболее опасных экотоксикантов в слабопроточных водоемах относятся тяжелые металлы [2], триада азота, фенолы и нефтепродукты, которые способны мигрировать между ее взаимодействующими составляющими (вода – техногенные отложения – донные осадки водных объектов), накапливаться в депонирующих средах, к которым, в нашем случае, относятся донные отложения.

Белорусскими исследователями [16] установлено, что качество вод в слабопроточных водоемах обусловлено не только техногенной нагрузкой, но и геоморфологическими особенностями их водосборов, составом вод, поступающих на очистку, поверхностным стоком, качеством грунтовых вод.

Выявлено, что атмосферные осадки не оказывают существенного влияния на формирование состава вод водоемов рекреационного назначения.

Еще одной экологической проблемой является «цветение» водоемов-приемников сточных вод синезелеными водорослями (цианобактериями). При массовом развитии цианопрокариотической альгофлоры ухудшается химический состав и санитарные показатели воды. Разложение биомассы цианобактерий приводит к возникновению неприятного запаха от воды и к расходу значительного количества растворенного в воде кислорода [10]. В ходе вегетации цианеи продуцируют цианотоксины, такие как микроцистин и анатоксин, антитодов к которым не существует [6]. Токсичное «цветение» вод при современном уровне техногенной нагрузки на поверхностные воды распространено повсеместно [11].

Среди органических токсикантов в последние годы особое внимание привлекают цианотоксины, образующиеся в водоёмах в результате быстрой утилизации синезелёными водорослями неорганического азота (катионы аммония, нитрат- и нитрит-анионы). Инновационным подходом, позволяющим значительно снизить уровень загрязнения водоемов цианотоксинами и другими поллютантами, является коррекция альгоценозов этих водоемов планктонными штаммами зеленой микроводоросли *Chlorella vulgaris*.

Гидробиоценозы, и, в частности, альгоценозы являются открытыми системами с эффектами самоорганизации. Их многокомпонентность и сложная интеграция вписывается в концепцию ассоциативного симбиоза. Используя симбиотические особенности цианобактерий, можно предотвратить их массовое развитие. Предложены биотехнологии, основанные на конкуренции цианобактерий и водорослей за ресурсы в водоеме. Показано, что искусственная альголизация, то есть обогащение водоемов зеленой водорослью хлореллой в весенний период предотвращает последующее развитие синезеленых водорослей [10].

Проведение биологической реабилитации водного объекта методом коррекции альгоценоза приводит к снижению содержания таких органических, неорганических и металлоорганических токсикантов как фенолы, нефтепродукты, триада азота, и, в незначительной степени, тяжелые металлы [1, 10, 11].

Дополнительным положительным эффектом проведения биологической реабилитации методом коррекции альгоценоза является тот факт, что

происходит перестройка фитопланктонного сообщества, при которой доминирующее положение в альгоценозе занимают хлорококковые микроводоросли. В свою очередь, это приводит к интенсификации процессов самоочищения [10].

Таким образом, доказана достаточно высокая эффективность метода альгоремедиации, однако не ясны уровни загрязнения слабопроточных водоемов, при которых метод ещё работает, и время, в течение которого устанавливается новое экологическое равновесие.

#### *Гидромеханические методы очистки водоемов*

Технологические отстойники, которые являются частью системы водоотведения металлургических предприятий, представляют собой гидротехнические сооружения, предназначенные для частичного осветления сточных вод. Часть воды, находящейся в отстойниках, используется в оборотном водоснабжении металлургического предприятия, а остальные воды сбрасываются в поверхностные водные объекты.

Практика природоохранной деятельности показывает, что на большинстве металлургических предприятий мира проблему улучшения качества сточных вод и снижения степени негативного воздействия на водные объекты пытаются решить путем механической очистки отстойников от донных отложений.

Краснодарскими учеными дана комплексная оценка воздействия дноуглубительных работ методом гидромеханизации на различные систематические группы водных биологических ресурсов Новотроицкого водохранилища Ставропольского края. Приведена гидролого-гидробиологическая характеристика биоты Новотроицкого водохранилища, детально описаны применяемые при дноуглубительных работах технологические решения, рассмотрено влияние проводимых работ на состояние различных систематических групп гидробионтов водохранилища. В соответствии с действующими нормативными правовыми актами РФ в области рыболовства и сохранения водных биологических ресурсов (ВБР) проведен расчет вреда ВБР. По результатам проведенных работ выявлены основные виды негативного воздействия и рассчитан общий размер вреда, наносимого водным биологическим ресурсам Новотроицкого водохранилища в натуральном выражении. Проведено имитационное математическое моделирование распространения и седиментации дополнительной мутности. Рассчитаны величины вариабельности изменений концентраций взвеси

в зависимости от расстояния, интегральные объемы шлейфов взвеси и площади переотложения зон мутности на дне Новотроицкого водохранилища в зависимости от месяца проведения работ и объема изымаемого грунта. Разработаны компенсационные мероприятия, направленные на восстановление потерь биоресурсов [7].

Специалистами Института водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН проведена оценка влияния дноуглубительных работ на экологическое состояние Манжерокского озера, являющегося памятником природы. Показано, что в результате проведения очистки дна от отложений качество воды не соответствовало требованиям, предъявляемым к водным объектам, используемым для рекреационного водопользования, а именно: по величинам рН (7,4) и ХПК, содержанию фосфатов (17,5 ПДК) и нефтепродуктов (от 2 до 6 ПДК). Норматив ХПК ( $30 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ ) за счет взвешенных органических частиц превышен на порядок – от 11,4 до  $126,4 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$  [5].

Учеными из Соединенных Штатов Америки показано, что регулярные дноуглубительные работы полезны для быстрого удаления загрязненного осадка в технологических прудах, но они слишком дороги, чтобы быть практичной стратегией как для борьбы с «цветением», и, как следствие, загрязнением для большинства искусственных водоемов, так и для улучшения качества питьевой воды. Эффективность такого способа очистки зависит от геометрии водного объекта и характера поступления поллютантов из внешних источников [18].

Таким образом, встает вопрос о целесообразности проведения работ по удалению донных отложений с целью улучшения экологического состояния водоемов-приемников сточных вод.

#### *Регулирование количества и качества сточных вод*

Третий подход базируется на той точке зрения, что для снижения негативного воздействия на поверхностные водные объекты необходимо регулирование количества и качества сбрасываемых сточных вод при условии непроведения работ по очистке дна водоемов [10]. Но он не решает вопрос о длительном загрязнении водоемов – приемников сточных вод.

Наибольшую опасность для поверхностных и подземных вод представляют слабопроточные водоемы, в которых происходит многолетнее накопление загрязняющих веществ в донных отложениях при относительно малой площади водного зеркала. Суть подхода заключается в комплек-

сировании процессов механического удаления донных осадков с параллельной биологической очисткой от оставшихся загрязняющих веществ.

#### *Работы по улучшению качества воды технологического пруда металлургического комбината*

Весь Баландинский пруд – водоем-приемник сточных вод Челябинского металлургического комбината, был разбит на четыре участка, равных по площади. С августа по ноябрь 2020 года были проведены работы по очистке дна пруда от донных отложений с помощью земснаряда. Параллельно с очисткой одного участка от донных отложений производилась его реабилитация методом коррекции альгоценоза путём вселения планктонного штамма микроводоросли хлореллы. После очистки каждого участка проводился отбор гидрохимических проб и сбор проб фитопланктона [6], причём по результатам измерений производилась коррекция последующей биологической очистки.

Гидрохимический анализ проводился согласно общепринятым методикам с целью определения содержания компонентов и значений следующих показателей: запах, цветность, взвешенные вещества, сухой остаток, гидросульфаты, химическое потребление кислорода, биохимическое потребление кислорода (за пять суток), аммонийный, нитритный и нитратный азот, общее железо, медь, цинк, никель, марганец, фториды, хром, фенолы, сероводород, нефтепродукты.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С целью осуществления сравнительного анализа качества воды технологического пруда в процессе очистки от стоков металлургического комбината были получены сведения о химическом составе воды в августе-ноябре 2019 года, то есть до проведения комплексной очистки Баландинского пруда.

В ходе исследований установлено, что значимыми поллютантами являются следующие компоненты и показатели: сухой остаток, гидросульфаты, биохимическое потребление кислорода (за пять суток), химическое потребление кислорода, аммонийный и нитритный азот, общее железо, медь, цинк, никель, марганец, хром, фториды, фенолы, нефтепродукты, водородный показатель и содержание растворенного в воде кислорода.

Общее железо, медь, цинк, никель и марганец входят в состав рудных концентратов, которые используются для производства продукции на металлургическом комбинате. Нефтепродукты, фенолы, гидросульфаты, хром и фториды образуются в ходе

технологических процессов производства продукции на металлургическом комбинате. Остальные компоненты являются показателями качества воды.

Для оценки эффективности предложенного комплексного подхода при параллельном проведении дноуглубительных работ гидромеханическим способом и биологической очистки воды в 2020 году была определена кратность изменения концентрации различных компонентов сравнительно с аналогичным периодом 2019 года (таблица).

В результате проведения работ по очистке дна пруда гидромеханическим способом с па-

раллельной биологической очисткой воды в 2020 году произошло существенное увеличение содержания таких экотоксикантов как гидросульфаты, медь и цинк. Увеличились сухой остаток, аммонийный и нитритный азот, общее железо, никель, марганец и хром. Гидросульфаты достигают максимальной кратности превышения по причинам: поднятием донных отложений, в которых в анаэробных условиях происходило гниение органического материала; высокой растворимости солей серной кислоты в поднятых донных отложениях.

Таблица

Кратность изменения концентрации основных компонентов воды  
[Table. The rate of change in concentration of the main components of water]

| Компоненты / Components                | 2019 <sub>ср.</sub> / 2019 <sub>ср.</sub> | 2020 <sub>ср.</sub> / 2020 <sub>ср.</sub> | Кратность / Multiplicity |
|--|---|---|--------------------------|
| Токсиканты рудных концентратов (сырьё) |   |   |                          |
| Железо                                 | 0,03                                      | 0,06                                      | 2,00                     |
| Медь                                   | 0,0004                                    | 0,01                                      | 25,00                    |
| Цинк                                   | 0,03                                      | 0,30                                      | 10,00                    |
| Никель                                 | 0,01                                      | 0,02                                      | 2,00                     |
| Марганец                               | 0,02                                      | 0,05                                      | 2,50                     |
| Технологические токсиканты             |   |   |                          |
| Фторид*                                | 2,05                                      | 0,93                                      | 0,45                     |
| Фенолы*                                | 0,02                                      | 0,002                                     | 0,10                     |
| Нефтепродукты*                         | 0,06                                      | 0,04                                      | 0,67                     |
| Сульфаты                               | 1,30                                      | 213,60                                    | 164,31                   |
| Хром                                   | 0,004                                     | 0,01                                      | 2,50                     |
| Показатели качества воды               |   |   |                          |
| ХПК                                    | 11,00                                     | 32,96                                     | 2,99                     |
| БПК <sub>5</sub>                       | 1,83                                      | 3,20                                      | 1,75                     |
| Аммоний                                | 0,52                                      | 1,88                                      | 3,62                     |
| Нитриты                                | 0,18                                      | 0,97                                      | 5,39                     |
| Сухой остаток                          | 63,67                                     | 496,80                                    | 7,80                     |
| pH                                     | 7,90                                      | 8,40                                      | 1,06                     |
| Кислород                               | 6,30                                      | 6,50                                      | 1,03                     |

\*Примечание: по указанным веществам отмечено снижение концентрации  
[Remark: There has been a decrease in the concentrations of the above substances]

Более высокое значение кратности химического потребления кислорода относительно биохимического потребления кислорода обусловлено работой земснаряда, поскольку содержащийся в воде кислород расходовался в первую очередь на окисление трудно окисляемой органики, представленной взвешенным в толще воды

сапропелем. Поэтому содержание растворенного в воде кислорода находилось примерно на уровне 2019 года. Проведение альголизации привело к незначительному подщелачиванию среды, и, как следствие, к замедлению гидрохимических процессов в части миграционной активности экотоксикантов.

Снижение содержания фторидов, фенолов и нефтепродуктов обусловлено параллельным проведением биологической реабилитации пруда методом коррекции альгоценоза. В работах [11, 12] показано, что альголизация приводит к улучшению качества воды в гидрохимическом отношении по содержанию нефтепродуктов, фенолов, фторидов, что подтверждено и при их значительной начальной концентрации. Соответственно незначительно снижаются значения таких важных показателей качества воды как химическое и биохимическое потребление кислорода, и большей части тяжелых металлов. Причем, в работе [5] авторы связывают увеличение химического потребления кислорода с наличием взвешенных органических частиц, которое обусловлено проведением очистки дна гидромеханическим способом.

Выявлено, что медь и цинк угнетают вегетацию хлореллы, и для эффективной очистки сточных вод от этих загрязняющих веществ необходимо увеличивать количество альголизанта относительно предварительных расчетных значений [6].

#### ВЫВОДЫ

1. Результаты анализа качества воды технологического водоема металлургического комбината, в процессе дноуглубительных работ показали существенное ухудшение её качества по большинству показателей, что согласуется с результатами отечественных и зарубежных исследователей. Однако за счёт параллельной биологической очистки улучшилось качество воды по содержанию фторидов, фенолов и нефтепродуктов, а также незначительно увеличилась концентрация большинства тяжелых металлов.

2. Поскольку показатели численности фитопланктона после комплексной очистки были невысокие [6], можно сделать вывод, что в агрессивной среде, когда со дна пруда оказались подняты загрязняющие вещества и их концентрация в воде значительно увеличилась, расчетная численность клеток хлореллы оказалась недостаточной, и она только частично справилась с задачей очистки взмученной воды пруда.

3. Существенное увеличение концентрации гидросульфатов и увеличение значений меди, цинка и сухого остатка со временем исчезнет за счет естественного оседания в батиаля пруда.

4. В течение длительного времени в слабопроточных водоемах и технологических прудах формируется своя устойчивая экологическая система, механическое нарушение которой приводит к разрушению экологического баланса системы «вода –

техногенные отложения – донные осадки водных объектов». В целом эта система на первом этапе неустойчива и возможны два пути её развития: а) в случае длительного сброса сточных вод в сочетании только с механическим удалением донных отложений разбалансированная экосистема водоема приходит в хаотическое состояние с высоким уровнем экологической опасности. Динамическое ухудшение экологического состояния водоема за счет увеличения энтропии экологической системы при сочетании неочищенных сбросов и механического удаления донных осадков приводит к многообразию случайных путей развития экологической системы (бифуркациям) [3], и к дальнейшей невозможности реабилитации таких водоемов в течение длительного времени; б) в случае сокращения сброса неочищенных сточных вод или комплексной очистки водоема в течение нескольких лет установится новое экологическое равновесие с улучшением качества воды. Время установления нового экологического равновесия зависит от множества случайных факторов и требует дальнейшего экспериментального исследования.

5. При проведении кардинальных экологических мероприятий нужно помнить классический принцип – «не навреди». То есть, с нашей точки зрения, наиболее перспективным является новый комплексный подход с удалением донных отложений и параллельной биологической очисткой, так как прекращение сброса сточных вод невозможно по технологическим причинам. При накоплении «критической» величины донных осадков нужно производить их механическое удаление с параллельной биологической очисткой взмученной воды водоема при концентрации альголизанта, превышающей расчетную [6], используемую нами при биологической очистке. Процесс комплексной очистки должен осуществляться последовательно, на малых площадях с целью сохранения работоспособности планктонной хлореллы в агрессивной среде и управления процессом очистки [15]. Данный новый подход позволяет сохранить существующую экологическую систему водного объекта. При циклическом применении комплексного подхода возможно улучшение качества вод сильно загрязненных слабопроточных водоемов до уровня, предусмотренного действующими требованиями природоохранного законодательства Российской Федерации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альголизация как метод очистки сточных вод металлургического производства (на примере Баландинско-

- го технологического пруда г. Челябинск) / Г. А. Анциферова, Н. И. Русова, М. Ю. Хотак, В. В. Кульнев // *Материалы VI Международной научно-практической конференции «Комплексные проблемы техносферной безопасности»*, 2021, с. 436-441.
2. Анализ влияния предприятий медно-никелевого комплекса на состояние водных ресурсов ближайших объектов / А. П. Зосин, Т. И. Приймак, Л. П. Сулименко, Т. А. Мингалева // *Водные ресурсы*, 2012, т. 39, № 5, с. 558-568.
3. Базарский О. В., Кочетова Ж. Ю. Энтропия абиотических геосфер и модель для оценки и прогноза их состояния // *Биосфера*, 2021, т. 13, № 1-2, с. 9-14.
4. Берже П., Помо И., Видал К. *Порядок в хаосе*. Москва: Издательство «Мир», 1991. 231 с.
5. Влияние дноуглубительных работ на морфометрические характеристики, показатели качества воды и донных отложений озера Манжерокское (Республика Алтай) / Д. М. Безматерных, В. В. Кириллов, С. Н. Балыкин и др. // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, 2020, № 1, с. 6-18.
6. Геоэкологическая оценка состояния искусственных водоемов зоны влияния металлургических предприятий / Г. А. Анциферова, В. В. Кульнев, С. Л. Шевырев и др. // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле*, 2022, т. 22, № 1, с. 4-12.
7. Денисенко О. С. К вопросу комплексной оценки воздействия дноуглубительных работ методом гидромеханизации на различные систематические группы водных биологических ресурсов Новотроицкого водохранилища Ставропольского края // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство*, 2019, № 2, с. 33-43.
8. К вопросу об эвтрофикации водоемов / Е. А. Бутакова, Т. Е. Павлюк, О. С. Ушакова и др. // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, 2013, № 5, с. 75-84.
9. Кульнев В. В., Базарский О. В. Механизмы изменения концентрации тяжелых металлов при биологической реабилитации Матерского водохранилища методом коррекции эвтрофикации // *Сборник материалов XII Международного научно-практического симпозиума и выставки «Чистая вода России»*, 2013, с. 181-184.
10. Кульнев В. В., Богданов Н. И., Лухтанов В. Т. Биологическая реабилитация водоемов путем структурной перестройки фитопланктонного сообщества // *Материалы конференции молодых ученых и специалистов «Аквакультура России: вклад молодых»*, 2012, с. 51-56.
11. Лухтанов В. Т., Кульнев В. В. Биологическая реабилитация водоемов посредством структурной перестройки фитопланктонного сообщества // *Труды Географического общества Республики Дагестан*, № 41, с. 140-143.
12. Мелихов В. В., Московец М. В., Топоров А. Ю. Мониторинг экологического состояния водохранилищ ВДСК при эвтрофикации штаммом хлореллы ИФР № С-111 // *Орошаемое земледелие*, 2014, № 1, с. 6-7.
13. Москаленко А. П., Москаленко С. А., Ревунов Р. В. *Управление природопользованием. Механизмы и методы*. Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2019. 392 с.
14. Остроумов С. А. Биоконтроль загрязнения водной среды: проблемы реабилитации и ремедиации, включая фиторемедиацию и зооремедиацию // *Токсикологический вестник*, 2009, № 6 (99), с. 31-38.
15. Патент №2755309 С1 Российская Федерация, МПК C02F 3/32, C02F 9/14, C02F 11/02. Способ управления альгоремедиацией водных объектов: № 2020137318: заявл. 13.11.2020: опубл. 15.09.2021 / В. Е. Грабарник, И. В. Цветков, В. В. Кульнев [и др.]: заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Альготек Грин Технолоджи».
16. Романкевич Ю. А. Эколого-геохимическая оценка технологических водоемов в малых городах Беларуси // *Природопользование*, 2014, № 25, с. 98-108.
17. Хакен Г. *Информация и самоорганизация*. Москва: Издательство «Мир», 1991. 687 с.
18. Faith A. Kibuye, Arash Zamyadi, Eric C. Wert. A critical review on operation and performance of source water control strategies for cyanobacterial blooms: Part II-mechanical and biological control methods // *Harmful Algae*, 2021, vol. 109.
- Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 23.08.2022

Принята к публикации 27.02.2023

## The Integrated Approach to Regulating the Water Quality of Low Flow Water Bodies (the Balandinsky Pond of the Chelyabinsk Metallurgical Plant is an Example)

V. V. Kulnev<sup>1</sup>✉, O. V. Bazarskiy<sup>2</sup>, Zh. Yu. Kochetova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Central Black Earth Interregional Department Federal Service  
for Supervision of the Use of Natural Resources, Russian Federation  
(105, Lomonosov Str., Voronezh, 394087)

<sup>2</sup>Air Force Academy named after Prof. N. Ye. Zhukovskiy and Yu. A. Gagarin, Russia Federation  
(54a, Starykh Bol'shevikov Str., Voronezh, 394064)

**Abstract:** The purpose of the study is to improve the effectiveness of reducing the environmental hazards of low-flow artificial reservoirs (ponds, reservoirs, technological ponds).

**Materials and methods.** Three approaches are known for its solution. 1. Biological treatment of reservoirs. This approach has a disadvantage, which is the low rate of biological treatment. 2. Hydro-mechanical removal of bottom sediments. At first glance, this method suggests a quick and cardinal solution to the problem. But the researches carried out by domestic and foreign scientists, including in this article, have shown all the shortcomings of the "revolutionary" approach to the ecological problems of the system "water – man-made sediments – bottom sediments of water bodies". It has been proved that dredging works destroy this system. It is only useful if the discharge of untreated wastewater into such a body of water stops and further biological treatment results in a new and improved ecological system. However, such an approach requires significant economic costs. Otherwise, the combination of untreated wastewater discharge and dredging results in increased entropy of the ecological system and its imbalance with a variety of random system pathways and the impossibility of further rehabilitation of such water bodies. 3. «Evolutionary» approach with regulation of quantity and quality of discharged wastewater with its regular biological treatment. This approach preserves the existing ecological system with a predicted level of ecological hazard. However, it is not applicable for technological water bodies with high level of wastewater and bottom sediment pollution.

**Results and discussion.** A review of the efficiency of the known methods of wastewater treatment with the identification of their disadvantages is made. A comprehensive approach combining parallel dredging and biological treatment in a sequentially small area with control of the treatment process is proposed.

**Conclusions.** With the help of the developed new approach, it becomes possible to eliminate disadvantages of the widely known approaches to rehabilitation of low flowing water bodies. It doesn't require costly wastewater treatment, and the treatment results in a new ecological equilibrium, providing water quality that meets the regulatory requirements approved by the regulatory acts of the Russian Federation.

**Key words:** algocoenosis, biological rehabilitation, hydromechanical removal, sediments, water quality, environmental technologies, wastewater, process pond, entropy.

**For citation:** Kulnev V. V., Bazarskiy O. V., Kochetova Zh. Yu. The integrated approach to regulating the water quality of low flow water bodies (the Balandinsky pond of the Chelyabinsk Metallurgical Plant is an example). *Vestnik Voronezskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografya. Geoekologiya*, 2023, no. 1, p. 103-112 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/1/103-112>

### REFERENCES

1. Al'golizaciya kak metod ochistki stochnyh vod metallurgicheskogo proizvodstva (na primere Balandinskogo tekhnologicheskogo pruda g. Chelyabinsk) [Algolisation

as a method of metallurgical wastewater treatment (using the example of the Balandinsky process pond in Chelyabinsk)] / G.A. Anciferova, N.I. Rusova, M.Yu. Hotak, V.V. Kul'nev. *Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-prak-*



ticheskoy konferencii «Kompleksnyye problemy tekhnosfernoj bezopasnosti», 2021, pp. 436-441. (In Russ.)

2. Analiz vliyaniya predpriyatij medno-nikelevogo kompleksa na sostoyanie vodnykh resursov blizhayskh ob'ektov [Analysis of the impact of the copper and nickel operations on the water resources of nearby sites] / A. P. Zosin, T. I. Prijmak, L. P. Sulimenko, T. A. Mingaleva. *Vodnye resursy*, 2012, vol. 39, no. 5, pp. 558-568. (In Russ.)

3. Bazarskiy O. V., Kochetova Zh. Yu. Entropiya abioticheskikh geosfer i model' dlya ocenki i prognoza ih sostoyaniya [Entropy of abiotic geospheres and a model for assessing and predicting their condition] / O. V. Bazarskiy, Zh. Yu. Kochetova. *Biosfera*, 2021, vol. 13, no. 1-2, pp. 9-14. (In Russ.)

4. Berzhe P., Pomo I., Vidal' K. *Poryadok v haose* [Order in chaos]. Moscow: Izdatel'stvo «Mir», 1991. 231 p. (In Russ.)

5. Vliyanie dnouglubitel'nykh rabot na morfometricheskie harakteristiki, pokazateli kachestva vody i donnykh otlozhenij ozera Manzherokskoe (Respublika Altaj) [Impact of dredging on morphometric characteristics, water quality indicators and bottom sediments of Lake Mangerokskoe (Altai Republic)] / D. M. Bezmaternykh, V. V. Kirillov, S. N. Balykin i dr. *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2020, no. 1, pp. 6-18. (In Russ.)

6. Geoekologicheskaya ocenka sostoyaniya iskusstvennykh vodoemov zony vliyaniya metallurgicheskikh predpriyatij [Geo-ecological assessment of man-made water bodies in the impact zone of metallurgical plants] / G. A. Anciferova, V. V. Kul'nev, S. L. Shevryev, E. E. Bilomar i dr. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Nauki o Zemle*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 4-12. (In Russ.)

7. Denisenko O. S. K voprosu kompleksnoj ocenki vozdeystviya dnouglubitel'nykh rabot metodom gidromekhanizatsii na razlichnye sistemacheskije gruppy vodnykh biologicheskikh resursov Novotroitskogo vodohranilishcha Stavropol'skogo kraja [Towards a comprehensive assessment of the impact of hydro-mechanised dredging on different systematic groups of aquatic biological resources in the Novotroitskoye Reservoir, Stavropol Territory]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe hozyajstvo. Astrahan'*, 2019, no. 2, pp. 33-43. (In Russ.)

8. K voprosu ob al'golizatsii vodoemov [On the algalisation of water bodies] / E. A. Butakova, T. E. Pavlyuk, O. S. Ushakova i dr. *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2013, no. 5, pp. 75-84. (In Russ.)

9. Kul'nev V. V., Bazarskiy O. V. Mekhanizmy izmeneniya koncentracii tyazhelykh metallov pri biologicheskoy rehabilitatsii Matyrskogo vodohranilishcha metodom korrekcii al'gocenoza [Mechanisms of changes in heavy metal concentrations during biological rehabilitation of the Matyr Reservoir by the method of algocoenosis correction]. *Sbornik materialov XII Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma i vystavki «CHistaya voda Rossii»*, 2013, pp. 181-184. (In Russ.)

10. Kul'nev V. V., Bogdanov N. I., Luhtanov V. T. Biologicheskaya rehabilitatsiya vodoemov putem strukturnoy

perestrojki fitoplanktonnogo soobshchestva [Biological rehabilitation of water bodies through structural modification of the phytoplankton community]. *Materialy konferencii molodykh uchennykh i specialistov «Akvakul'tura Rossii: vklad molodykh»*, 2012, pp. 51-56. (In Russ.)

11. Luhtanov V. T., Kul'nev V. V. Biologicheskaya rehabilitatsiya vodoemov posredstvom strukturnoy perestrojki fitoplanktonnogo soobshchestva [Biological rehabilitation of water bodies through structural modification of the phytoplankton community]. *Trudy Geograficheskogo obshchestva Respubliki Dagestan*, 2013, no. 41, pp. 140-143. (In Russ.)

12. Melihov V. V., Moskovec M. V., Toporov A. Yu. Monitoring ekologicheskogo sostoyaniya vodohranilishch VDSK pri al'golizatsii shtammom hlorelly IFR №S-111 [Monitoring of the ecological condition of WDSK water reservoirs under algalisation with chlorella strain ИФР № С-111]. *Orosheniye zemledelie*, 2014, no. 1, pp. 6-7. (In Russ.)

13. Moskalenko A. P., Moskalenko S. A., Revunov R. V. Upravlenie prirodopol'zovaniem. Mekhanizmy i metody [Environmental management. Mechanisms and methods]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo «Lan'», 2019, 392 p. (In Russ.)

14. Ostroumov S. A. Biokontrol' zagryazneniya vodnoj sredy: problemy rehabilitatsii i remediatsii, vkluychaya fitoremediatsiyu i zooremediatsiyu [Biocontrol of aquatic pollution: problems of remediation and remediation, including phytoremediation and zooremediation]. *Toksikologicheskij vestnik*, 2009, no. 6 (99), pp. 31-38. (In Russ.)

15. Patent №2755309 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK C02F 3/32, C02F 9/14, C02F 11/02. Sposob upravleniya al'goremediatsiyey vodnykh ob'ektov: №2020137318: zayavl. 13.11.2020: opubl. 15.09.2021 / V. E. Grabarnik, I. V. Tsvetkov, V. V. Kul'nev [i dr.]; zayavitel' Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu «Algotek Grin Tekhnologiya» [Patent No. 2755309 C1 Russian Federation, IPC C02F 3/32, C02F 9/14, C02F 11/02. Method of managing the algoremediation of water bodies: No. 2020137318: application 13.11.2020: publ. 15.09.2021 / V. E. Grabarnik, I. V. Tsvetkov, V. V. Kul'nev [et al.]; the applicant is a limited liability company "Algotek Green Technology"]. (In Russ.)

16. Romankevich Yu. A. Ekologo-geohimicheskaya ocenka tekhnologicheskikh vodoemov v malyyh gorodakh Belarusi [Ecological and geochemical assessment of technological water bodies in small towns in Belarus]. *Prirodopol'zovanie*, 2014, no. 25, pp. 98-108. (In Russ.)

17. Haken G. *Informatsiya i samoorganizatsiya* [Information and self-organisation]. Moscow: Izdatel'stvo «Mir», 1991. 687 p. (In Russ.)

18. Faith A. Kibuye, Arash Zamyadi, Eric C. Wert. A critical review on operation and performance of source water control strategies for cyanobacterial blooms: Part II-mechanical and biological control methods. *Harmful Algae*, 2021, vol. 109.

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

Received: 23.08.2022

Accepted: 27.02.2023

Кульнев Вадим Вячеславович

ведущий специалист-эксперт отдела государственного экологического надзора по Воронежской области Центрально-Черноземного межрегионального управления Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, кандидат географических наук, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-1646-9183, e-mail: kulnev@rpn36.ru

Базарский Олег Владимирович

доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики и химии Военно-воздушной академии им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-2851-716X

Кочетова Жанна Юрьевна

доктор географических наук, доцент кафедры физики и химии Военно-воздушной академии им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-8838-9548, e-mail: zk\_yva@mail.ru

Vadim V. Kulnev

Leading specialist-expert of the Voronezh Region State Environmental Supervision Department of the Central Black Earth Interregional Directorate of the Federal Service for Supervision of Natural Resources, Cand. Sci. (Geogr.), ORCID: 0000-0002-1646-9183, e-mail: kulnev@rpn36.ru

Oleg V. BazarSKIY

Dr. Sci. (Physic. and Math.), Professor at the Department of Physics and Chemistry, Air Force Academy named after Prof. N. Ye. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin, Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-2851-716X

Zhanna Yu. Kochetova

Dr. Sci. (Geogr.), Associate Professor at the Department of Physics and Chemistry, Air Force Academy named after Prof. N. Ye. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin, ORCID: 0000-0001-8838-9548, e-mail: zk\_yva@mail.ru