

Инна Брычаева,

Владимир Лухтанов,

Вадим Кульнев,  
ООО НПО  
«Альгобиотехнология»,  
Воронеж

В статье рассмотрены экологические аспекты проведения биологической реабилитации водоемов и сточных вод методом коррекции альгоценоза. Приведено теоретическое обоснование и описаны примеры применения технологии на водохранилищах и полях фильтрации.

## Водный объект с типичными особенностями экологического состояния

Воронежское водохранилище было создано в 1972 году на реке Воронеж для водоснабжения промышленных предприятий города. Оно представляет собой уникальный природно-техногенный водный объект, так как 4/5 площади водоема находится в пределах селитебной зоны.

Воронежское водохранилище является, по сути, питьевым водоемом, так как водозабор осуществляется с глубин от 20 до 40 метров от его поверхности. В эксплуатируемый водоносный горизонт из водохранилища происходит инфильтрация вод сквозь песчаную толщу. Известно, что все растворенные загрязняющие вещества, в том числе и цианотоксины, песком не задерживаются. Поэтому в целях обеспечения города качественной питьевой водой водоканал Воронежа расходует огромные финансовые средства [4].

В последние годы экологическое состояние Воронежского водохранилища ухудшается, хотя при этом техногенная нагрузка, по сравнению с индустриальными годами советской власти (до 1985 года), уменьшается. Ухудшение выражается во все нарастающем доминировании синезеленых водорослей, как по их численности, так и биомассе. Этот процесс происходит во все более широком временном интервале (с мая по октябрь). В период «цветения» значительно ухудшаются органолептические характеристики воды, снижается рекреационный потенциал.

Помимо этого, экологическое состояние «Воронежского моря» ухудшается поступлением в воду тяжелых металлов (железа, марганца), нефтепродуктов, неорганических форм азота и других поллютантов – классических агентов техногенного загрязнения [3]. Соединения азота обладают канцерогенными реакциями и вызывают онкологические заболевания.

О токсичности синезеленых водорослей (цианобактерий) известно начиная с середины прошлого века. В процессе метаболизма или после отмирания в конце сезона вегетации, синезеленые выделяют цианотоксины (микроцистин, анатоксин и другие), обладающие высокой токсичностью для животных и человека. Они могут вызывать у людей острые отравления с неврологическими симптомами, приводить к некрозам внутренних органов, например, печени и др. К токсичным синезеленым водорослям относятся цианобактерии родов *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Oscillatoria* и *Microcystis* [1].

«Цветение» воды синезелеными водорослями приобретает характер глобальной мировой проблемы, оно не зависит от природно-климатических факторов и степени техногенного влияния на водоемы.

## Методы решения проблемы

В настоящее время существуют десятки методов борьбы с «цветением» водоемов синезелеными водорослями. Условно, их можно разделить на три группы: физические, химические и биологические.

К физическим методам можно отнести облечение воды ультрафиолетовым излучением, механический сбор биомассы специальными ситами, устилание дна водоема зеркалами и др. Эти методы малоэффективны и весьма капиталоемки.

Химические методы представляют собой группу способов борьбы с «цветением», основанных на внесении в воду химических препаратов. Эти методы антиэкологичны, поскольку химические вещества не обладают селективностью воздействия и приводят к гибели всего гидробиоценоза.

В качестве примеров биологических методов борьбы с массовым развитием синезеленых водорослей можно привести использование вирусов синезеленых водорослей, таких как LPP1 и др., но эти вирусы опасны и для человека. В некоторых работах предлагается использование растительноядных рыб – планктофагов (белый и пестрый толстолобики), но как показали исследования, применение этого метода может только усилить «цветение» воды синезелеными водорослями [6].

Среди биологических методов, признанных самими действенными, наиболее дешевым является способ биологической реабилитации водных объектов методом коррекции альгоценоза. Реализуется он в рамках нового научного направления – биологическая реабилитация водоемов. Биологическая реабилитация – это восстановление экосистемы водоема до естественного уровня и безопасного состояния для человека и окружающей среды [1].

Метод коррекции альгоценоза является научно обоснованным и многократно практически подтвержденным способом улучшения экологического состояния любого континентального водоема. В основе данного метода лежит постулат о том, что между синезелеными и зелеными водорослями в фитопланктонном сообществе складываются антагонистические отношения. Хлорелла борется с

«цветением» воды посредством прямой конкуренции, а не только аллелопатии, как предполагалось ранее [6].

Многочисленные исследования показали, что проведение альголизации способствует доминированию зеленых водорослей в фитопланктонном сообществе (рис. 1).

Известно, что при доминировании в структуре альгоценоза лентического водоема хлорококковых водорослей происходит интенсификация процессов самоочищения. На это было указано группой авторов [5] из Института клеточного и внутриклеточного симбиоза Оренбургского научного центра Уральского отделения Российской академии наук.

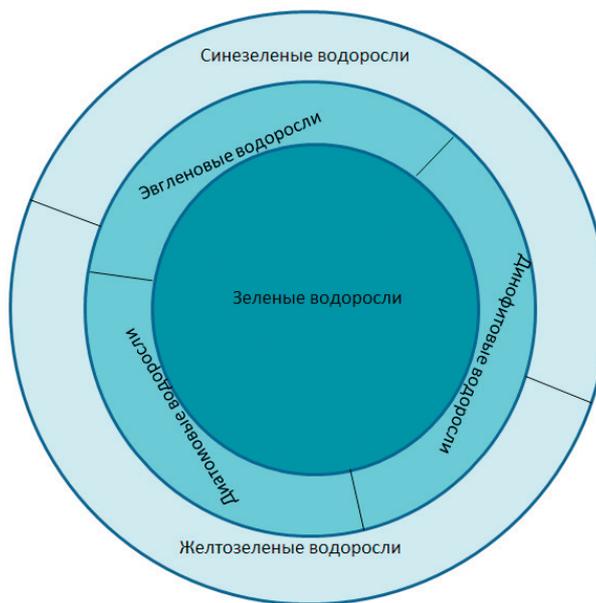
«Гидробиоценозы и, в частности, альгоценозы, являются открытыми системами с эффектами самоорганизации, а их многокомпонентность и сложная интеграция вписывается в концепцию ассоциативного симбиоза.

Одним из центральных аспектов проблемы ассоциативного симбиоза является управление или искусственное воссоздание микробиоценоза при микрoэкологических нарушениях. Решение этой проблемы позволит не только определить ряд теоретических позиций по раскрытию механизмов формирования микробиоценозов, но и достичь прогресса в прикладном аспекте. Так явление преобладания и массового развития синезеленых водорослей широко известно и наблюдается в периоды их «цветения», приводя к неблагоприятным изменениям качества вод.

Используя симбиотические особенности цианобактерий, можно предотвратить их массовое развитие. Предлагаются биотехнологии, основанные на конкуренции цианобактерий и водорослей за места обитания в водоеме»

В данной работе показано, что альголизация, то есть обогащение водоемов зеленой водорослью хлореллы, в весенний период предотвращает последующее развитие синезеленых водорослей.

Также показано, что «с позиций представленных нами данных (рисунок 1), демонстрирующих влияние компонентов ассоциативного симбиоза водорослевого сообщества на хозяина, можно объяснить результаты Н.И. Богданова [1], который подошел эмпирически к решению проблемы цветения водоемов путем усиления зеленых водорослей для восстановления структуры водорослевого сообщества. Это открывает перспективы для использования симбиотического подхода в экологической практике» [5].



Помимо существенного снижения степени «цветения» водоема, хлорелла насыщает воду кислородом (до 17 мг/дм<sup>3</sup>) и обеспечивает улучшение качества воды по содержанию загрязняющих веществ, в числе которых: тяжелые металлы (железо, медь, марганец, свинец, цинк...), фенолы, нефтепродукты, неорганические формы азота и полифосфаты. Также происходит снижение значений таких важных показателей качества воды, как химическое и биохимическое потребление кислорода, и улучшение ее органолептических показателей, вследствие чего восстанавливается рекреационный потенциал водоема.

#### Практические аспекты применения альголизации водоемов

Практика показала, что при отсутствии «цветения» в предыдущем сезоне вегетативные формы и споры синезеленых водорослей уменьшаются в своем количестве за каждый год проведения биологической реабилитации методом коррекции альгоценоза. Поэтому отсутствие «цветения» водоема в первый год проведения альголизации еще не является признаком полного освобождения водоема от синезеленых водорослей.

Через четыре года непрерывной альголизации их остается порядка 6% от начального количества (рис. 2), что не даст им стать доминирующими, так как доминантами в этом случае станут зеленые водоросли. Это и определяет четырехлетний цикл проведения основных работ.

В последующие четыре года проводится альголизация водоема однократно в год и только в зимний период для наращивания биомассы хлореллы планктонных штаммов (и других зеленых водорослей), которая была снижена за счет выедания зоопланктоном и личинками рыб. При этом «цветения» воды синезелеными водорослями не должно быть.

Следующие четыре года водоем не альголизуется, но за ним ведется наблюдение и проводится ежегодная регистрация отсутствия «цветения» воды синезелеными водорослями.

Рис. 1. Ассоциативно-симбионтные взаимоотношения сочленов фитопланктонного сообщества  
 — ассоциативный партнер  
 — доминантный партнер  
 — хозяин

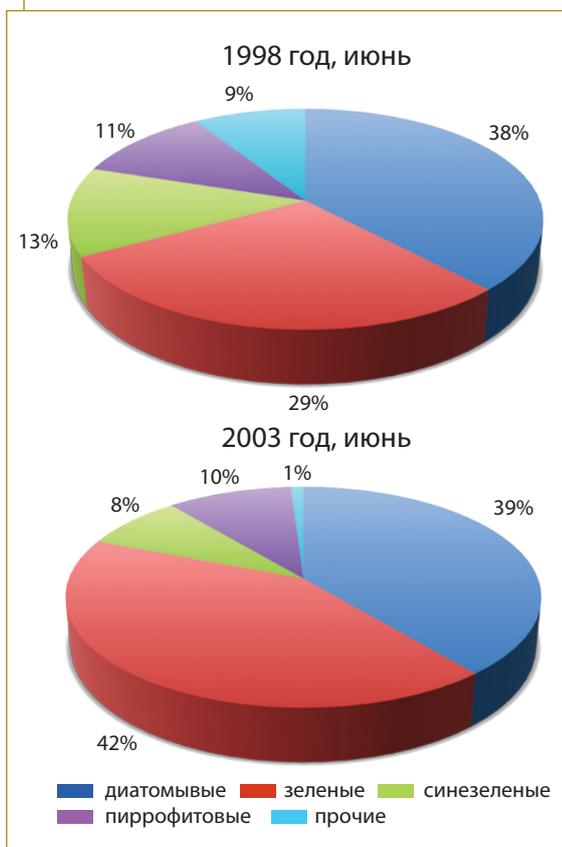


Рис. 2. Соотношение видового состава фитопланктона Пензенского водохранилища.

### Результаты проведенной биологической реабилитации водных объектов

По такой схеме была проведена биологическая реабилитация Пензенского водохранилища хозяйственно-питьевого назначения, которое не «цветет» с 2001 г. по настоящее время (2019 г.).

В 2009 году начались работы по реабилитации Матырского водохранилища, расположенного в Липецкой области, которое по гидрологическим особенностям схоже с Воронежским водохранилищем и входит с ним в одну гидрологическую систему.

В условиях альголизации вод в 2010 и в 2011 годах в общем составе сообществ низших водорослей Матырского водохранилища наблюдалось видовое разнообразие и высокие оценки обилия диатомовых водорослей, которые доминируют в сообществах. Подчиненное значение имели синезеленые водоросли (цианобактерии), а также другие низшие водоросли.

При анализе последствий альголизации вод, особое внимание было уделено выявлению и оценке изменений в составе фитопланктона по годам. В 2011 году, по сравнению с 2010 годом, произошло резкое снижение

общей биомассы микроводорослей и на этом фоне – общее уменьшение таксономического разнообразия в составе сообществ фитопланктона. При этом по-прежнему доминировали диатомовые водоросли. Из состава сообществ, практически исчезли синезеленые (цианобактерии), резко уменьшилось распространение других водорослей, причем как на родовом, так и видовом уровнях. Все это привело к улучшению качества воды в санитарном и органолептическом отношении.

Мониторинговые работы проводились в 2012–2015 гг. Они показали, что в первые годы после завершения биологической реабилитации происходило сдерживание развития синезеленых водорослей. Но так как технология была нарушена, в 2015 году экосистема водоема не справилась, что привело к заморным явлениям.

### Выявленные эмпирические закономерности

Таким образом, применение биологической реабилитации методом коррекции альгоценоза на Матырском водохранилище выявило эмпирическую закономерность, что вегетативные формы и споры синезеленых водорослей уменьшаются за первый год в среднем до уровня 57% от исходного, за два года 33%, за три года до уровня 20%, за четыре года до 11%, а за пять лет их остается порядка 6% от начального количества, что не дает им доминантных преимуществ.

График уменьшения количества синезеленых водорослей приведен на рисунке 5, и характеризуется экспоненциальной зависимостью:

$$C = C_0 e^{-t/\tau} \quad (1)$$

где:  $C_0$  – первоначальное количество водорослей, выраженное в процентах,  $\tau$  – постоянная очистки, определяемая временем в течение которого количество синезеленых водорослей уменьшается в  $e$  раз.

По результатам измерений  $\tau = 1,79$  года. Цикл технологических работ составляет четыре года, за который водный объект, практически, не подвержен «цветению» [3].

### Метод коррекции альгоценоза для очистки сточных вод

В настоящее время для очистки сточных вод, в основном, используются аэротенки, в которых бактерии для своей жизнедеятельности используют кислород, а в окружающую среду выделяют углекислый газ. То есть ныне существующие очистные сооружения являют-



2011 г.



2015 г.

Рис. 3. Состояние Матырского водохранилища в 2011 и 2015 году.

ся потребителями кислорода и загрязнителями воздуха углекислым газом. Немаловажно то, что в санитарном отношении эта система очистки также является порочной, так как она не освобождает сточные воды от микроорганизмов, вызывающих заболевание человека и животных.

Биологическая особенность бактерий заключается в том, что они узкоспециализированы, то есть необходимо иметь много видов бактерий, чтобы они могли очистить весь спектр веществ, которые находятся в сточных водах. Нет одного универсального вида бактерий, способного справиться со всем комплексом веществ загрязняющих сточные воды [2]

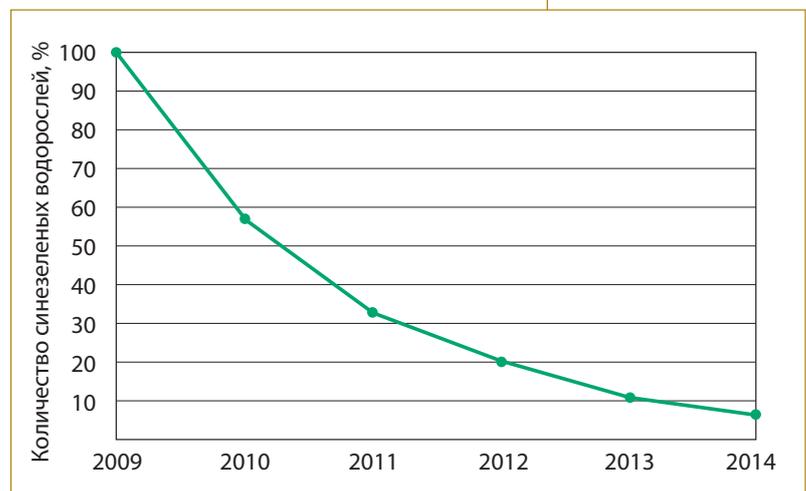
Особую эффективность показывает применение хлореллы в качестве альголизанта сточных вод. Применение водорослей для очистки сточных вод оправдано экологически, так как они используют биогенные вещества и углекислый газ, а в процессе жизнедеятельности выделяют в окружающую среду кислород. Эволюционно водоросли более высокоразвитые организмы, чем бактерии и поэтому многие виды являются универсальными потребителями минеральных и органических веществ.

С 2013 года ООО НПО «Альгобиотехнология» оказывает природоохранные услуги данного направления – биологическую ре-

билитацию сточных вод сахарных производств методом коррекции альгоценоза.

Основными загрязняющими веществами сточных вод сахарных заводов являются взвешенные вещества, неорганические формы азота и фосфора, тяжелые металлы, органические вещества и нефтепродукты. Все эти поллютанты оказывают существенное влияние на формирование повышенных значений таких важных показателей качества воды, как биохимическое и химическое потребление кислорода, цветность, запах, мутность.

Рис. 4. Динамика очистки Матырского водохранилища в результате применения биологической реабилитации методом коррекции альгоценоза.



Применение биологической реабилитации позволяет значительно снизить концентрации упомянутых загрязняющих веществ и довести показатели до требуемых органами Росприроднадзора значений для сброса осветленных вод в природные водоемы.

Кроме того, проведение биологической реабилитации позволяет существенно снизить неприятный запах, исходящий от водоемов-приемников сточных вод сахарных заводов, который негативно влияет на условия труда работников предприятия и качество жизни населения, проживающего на прилегающих к нему территориях.

### Биологическая реабилитация сточных вод сахарных заводов

ООО НПО «Альгобиотехнология» уже имеет богатый опыт ведения работ с сахарными заводами России, по альголизации водоемов, находящихся в их хозяйственном ведении, зеленой микроводорослью штамма *Chlorella kessleri* ВКПМ А1-11 АRW. Альголизант имеет все необходимые ветеринарные документы. В числе заказчиков указанных работ: ЗАО «Сахарный комбинат Отрадинский», (Орловская область), ЗАО «Сахарный завод Алексеевский», АО «Красноярский сахарник», ООО «Дмитротарановский сахарный завод» (Белгородская область), АО «Сахарный комбинат Львовский» (Курская область), АО «Чишминский сахарный завод» (Республика Башкортостан), АО «Заинский сахарный комбинат» (Республика Татарстан). Проведенные

работы по биологической реабилитации сточных вод методом коррекции альгоценоза на указанных предприятиях уже доказали свою эффективность.

В качестве примера опишем работы, проведенные на картах №48 и №49 ЗАО «Сахарный комбинат «Отрадинский». Очистные объекты предприятия расположены на водоразделе рек Ока и Лисица. Местное отделение Росприроднадзора в 2012 году в очередной раз внесло запрет на сброс сточных вод в близлежащие реки по причине их загрязнения. Это произошло 25 декабря 2012 года (таблица, столбец контроль). 28 мая 2013 года была проведена биологическая реабилитация указанных отстойников путем вселения одноклеточной зеленой микроводоросли хлореллы уникального штамма.

Через 1,5 месяца после этого – 11 июля 2013 года была отобрана опытная проба и отправлена на анализ в Филиал ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Орловской области в г. Мценске». 16 июля 2013 года был получен протокол (таблица, столбец опыт).

Как видно из таблицы, применение данной технологии позволило значительно снизить концентрацию ведущих загрязняющих веществ. Конечно, нельзя сбрасывать со счетов процессы самоочищения, которые интенсифицируются в летний период, но без применения хлореллы, роль этих процессов несоизмеримо мала. Проведенная биологическая реабилитация сточных вод доказала свою состоятельность, поскольку было получено разрешение местного отделения Росприроднадзора на сброс воды, качество которой было стало лучше, чем в р. Ока.

### Выводы

Практический опыт применения биологической реабилитации водоемов методом коррекции альгоценоза доказал, что этот метод является эффективным природоохранным мероприятием, позволяющим решать целый комплекс проблем, связанных с неблагоприятным экологическим состоянием водных объектов и неудовлетворительным качеством осветленных сточных вод.

В результате методически грамотного проведения биологической реабилитации водоема методом коррекции альгоценоза происходит предотвращение «цветения» водоема синезелеными водорослями, улучшение качества природных и сточных вод в гидрохимическом и санитарно-эпидемиологическом отношении.



ДО

ПОСЛЕ

2012

Озеро в центре крупного города, очищено биологическим методом за 30 дней

Таблица. Сравнительные данные химического состава сточных вод «до» и «после» проведения биологической реабилитации (данные получены от руководителя направления экологии и охраны труда ЦФ ООО «Разгуляй Сервис» Борзенкова Алексея Александровича)

Поллютант	Размерность	Декабрь 2012 (контроль)	Июль 2013 (опыт)
Взвешенные вещества		337	14,0
Аммонийный азот		3,58	1,27
Азот нитритный		н/д	0,03
Азот нитратный		н/д	2,9
Хлориды	мг/дм <sup>3</sup>	28,36	78,3
Сульфаты		72,58	22,6
Сухой остаток		3278	612,0
Железо общее		3,84	0,8
БПК <sub>5</sub>	мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	1668,4	2,5
Нефтепродукты	мг/дм <sup>3</sup>	2,1	0,015

### Обращение авторов статьи

Сегодня в России действует Национальная программа «Экология», программы «Чистая вода» и «Волга». На их реализацию планируется выделить огромное количество средств. До 2024 года следует спроектировать, построить и запустить «какое-то» количество очистных сооружений, высокотехнологичных станций водоподготовки. Казалось бы, все, что требуется, направлено на обеспечение качественной питьевой водой и снижение количества неочищенных и недоочищенных сточных вод, попадающих в водные объекты. Прописаны проектные, строительные, машиностроительные и финансовые (будет выделено 140,1 млрд. руб.) вопросы. Но почему-то экология водных объектов ушла на задний план.

Из материалов Водного конгресса мы знаем, что годовой сброс неочищенных и недоочищенных вод в Волгу в 2018 году составил 3,7 км<sup>3</sup>. К 2024 году этот сброс должен уменьшиться до 1,05 км<sup>3</sup>. При этом годовой сброс самой Волги в Каспийское море в среднем составляет 245 км<sup>3</sup>. Соответственно, в процентном отношении неочищенные сбросы составляют: 1,45% в 2018 год и 0,4% в 2024 году.

И как вы думаете, этот ли незначительный сброс является главной причиной ужасающей эвтрофикации великой русской реки Волги? Если бы в бассейне Волги был бы правильный альгоценоз, то есть доминирующими в нем были зеленые водоросли, то этот сброс «съедался бы на раз». Но Волга повсеместно заражена цианобактериями. Все 800 водохранилищ бассейна реки Волги «цветут и пахнут» в летний период то фекальными стоками, то гиасмином.

Мы являемся практическими экологами, неангажированными ни партиями, ни фондами, и занимаемся реабилитацией водных объектов уже более 12 лет. На вооружении у нас только один метод – коррекция альгоценоза. Где бы мы ни применяли этот метод, он везде работал.

Вместе с тем мы прекрасно понимаем, что избавиться от токсичного цветения природных вод в России можно только под руководством федеральных органов, если они обратят на эту проблему свое внимание и примут программу биологической реабилитации водных объектов методом коррекции альгоценоза.

### Литература

1. Богданов Н.И. Биологическая реабилитация водоемов. – Пенза, 2008. – 137 с.

2. Богданов Н.И. Биологическая реабилитация сточных вод // Материалы Всероссийской конференции «Приоритетные направления экологической реабилитации Воронежского водохранилища», Изд-во «Научная книга», Воронеж, 2012 г. С 247–252.

3. Кульнев В. В. Фрактальный анализ биологической реабилитации водных объектов методом коррекции альгоценоза / Материалы Международного научного форума, Москва / Издательство РГАУ-МСХА, 2015, С 165–180.

4. Лухтанов В. Т. О возможности экологической реабилитации Воронежского водохранилища / Материалы Всероссийской конференции «Приоритетные направления экологической реабилитации Воронежского водо-

хранилища» / 21 ноября 2012 года, Воронеж, Изд-во «Научная книга», С 297–302.

5. Немцева Н. В., Яценко-Степанова Т. Н., Бухарин О. В. Структурно-функциональная характеристика водорослевого сообщества и ее использование для определения экологического состояния пойменных водоемов // Журнал «Проблемы региональной экологии» №5, 2011.

6. Попов А. Н. Об изучении механизма взаимодействия штамма *Chlorella vulgaris* ИФР №С-111 с сообществами синезеленых водорослей поверхностных водоемов в окрестностях Екатеринбурга // А. Н. Попов, Е. А. Бутакова, Т. Е. Павлюк / Материалы Всероссийской конференции «Приоритетные направления экологической реабилитации Воронежского водохранилища», Изд-во «Научная книга», Воронеж, 2012 г. ■