

Введение. Актуальность исследования обусловлена тем, что в XXI веке проблемы глобального значения (изменение климата, загрязнение вод и воздуха, потеря биоразнообразия, чрезмерная эксплуатация природных ресурсов, пандемии) продолжают иметь большие масштабы и требуют новых подходов в решении. Одной из областей научных знаний является сохранение и восстановление природных (водных) ресурсов, находящихся в непосредственной близости от среды обитания человека. Решение этой задачи лежит в плоскости применения природоподобных (конвергентных) технологий: нанотехнологий, биотехнологий, информационных, когнитивных и социогуманитарных [1]. В общем виде идея инсталляции природоподобных технологий в окружающий мир сводится к созданию на «платформе», создаваемой с помощью нанотехнологий, симбиоза эколого-информационных продуктов, расширяющих арсенал методов научного познания [2]. В 2019 г. Правительство Российской Федерации утвердило программу «Комплексное развитие сельских территорий» с объемом финансирования в 2020–2025 гг. 2,3 трлн руб., в том числе за счет средств федерального бюджета – 1 трлн руб. [3].

В число основных задач Программы входит формирование благоприятной среды для жизни и здоровья человека через оздоровление природных и искусственных водоемов. Во флагманском исследовании, проводимом ФГБНУ ВНИИОЗ, изучаются различные аспекты использования водных ресурсов в Южном федеральном округе (ЮФО), прорабатываются соответствующие мероприятия [4, 5]. Водные ресурсы округа представлены бассейнами рек Волги, Дона и Кубани (протяженность – 112,99 тыс. км), естественными и искусственными водоемами (площадь – 11,41 тыс. км²), подземными водами (объем – 16 945 тыс. м³/сут). Обеспеченность населения ресурсами речного стока составляет 17,039 тыс. м³/год на человека, что ниже среднероссийского показателя (31,717 тыс. м³/год на человека). Наименее обеспеченной водными ресурсами является Ростовская область – 2,738 тыс. м³/год на человека [6]. Ежегодный забор воды из всех видов природных источников в ЮФО составляет 10 922,55 млн м³.

Основная часть воды используется на орошение (56,8 %), на долю питьевого и хозяйственно-бытового назначения приходится 10,22 %. Сброс сточных вод составляет 4650,77 млн. м³, из них 72,51 % – условно-чистые и нормативно-очищенные сточные воды, 27,49 % – загрязненные и недостаточно-очищенные. Многие природные водоемы не отвечают санитарно-гигиеническим требованиям и требуют оздоровления [7].

Процесс эвтрофирования водоемов является естественным и идет на протяжении многих лет и даже веков. При достижении в водоеме определенного количества водных организмов потребительские свойства могут резко ухудшаться, и тогда водоем переходит в стадию эвтрофии или гипертрофии. Процесс эвтрофирования значительно ускоряется под действием антропогенных факторов, особенно ярко это проявилось в искусственных водоемах, расположенных в черте городских и сельских поселений [5, 8].

Растения, обитающие в природных водоемах, подразделяются на несколько групп: первые продуцируют кислород, создавая физико-химические условия для обитания гидробионтов; вторые являются лишь звеньями в пищевых цепочках; третьи, макрофиты, формируют среду обитания и служат источником питания для многих животных и рыб, обитающих в водоемах; четвертые, произрастающие по берегам, укрепляют береговую линию, препятствуют абразии и взмучиванию донных отложений и, как следствие, увеличивают поступление солнечного цвета [9].

Одно из последствий высокой загрязненности водоемов – «цветение воды». Данный эффект создают сине-зеленые водоросли в основном трех родов: *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Microcystis*, которые доминируют над другими группами и таксонами [10]. Сине-зеленые водоросли способны фиксировать растворенный в воде атмосферный азот, усваивать диоксид углерода, обеспечивать свое доминирующее положение. Даже при разложении сине-зеленых водорослей в водоемах наблюдается снижение кислорода, появление токсинов, что вызывает заморы рыб и гибель

гидробионтов. Обычно «цветение» начинается в толще воды и затем постепенно за счет расширения газовых вакуолей водорослей перемещается в верхние слои водоемов. «Цветение» приводит к значительному увеличению концентрации аммиака и нитратов в воде. Учеными многих стран разрабатываются физические, механические, химические и биологические методы устранения эффекта «цветения» водоемов. В каждом предлагаемом методе есть свои положительные и отрицательные стороны: при химическом – в водоемы может вноситься медный купорос, газообразный хлор, хлорная известь, которые обеспечивают лишь временный положительный эффект. При дозе хлора 0,1 мг/л в присутствии большого количества планктона развитие сине-зеленых водорослей не угнетается, при дозе 1,0 мг/л, наоборот, может увеличиваться [11].

Одной из стартовых площадок, обеспечивающих восстановление водоемов является – *биомелиорация*. К биомелиорации относят биоаугментацию и альголизацию водоемов. В качестве примера биоаугментации можно привести внесение в водоемы препарата микрозим Понд-Трит, представляющий собой смесь от 6 до 12 видов аэробных мезофильных микроорганизмов, для которых основным источником жизнедеятельности являются свободные органические вещества, растворенные в воде [12].

Технология *альголизации* основывается на внесении в водоемы микроводоросли *Chlorella vulgaris*, жизнедеятельность которой позволяет снижать количество сине-зеленых водорослей в биоценозе, убрать эффект «цветения». В основе альголизации лежит аксиома, что между сине-зелеными и зелеными водорослями в фитопланктонном сообществе складываются антагонистические отношения. Подмечено, что штамм *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 ведет себя весьма активно в отношении сине-зеленых водорослей, приводит к снижению численности их популяции. От других представителей фитопланктона *Chlorella vulgaris* отличается широким температурным диапазоном жизнедеятельности (от 2 до 35 °С), устойчивостью к шокным

реакциям (например, замораживанию). При значительном размножении *Chlorella vulgaris* в водоеме увеличится и масса зоопланктона, который является пищевой нишей для рыб и иных водных организмов [13]. В состав клетки *Chlorella vulgaris*, которая относится к группе зеленых водорослей (*Chlorophyta*), входят протеины, жиры, витамины, микроэлементы, особые пигменты [14]. При своей жизнедеятельности хлорелла выделяет в окружающую среду более 310 наименований химических соединений [15], среди которых биологически активными являются полисахариды (например, хлон-А), органические кислоты (паринаревая, арахидоновая, линоленовая и др.), амины, обладающие сильным антимикробным действием и вызывающие ингибирование одних водорослей и стимуляцию других [16].

Для сохранения водных биоресурсов и выращивания объектов аквакультуры в водоемах, имеющих рыбохозяйственное значение, должна осуществляться биологическая мелиорация, которая направлена на подавление численности нежелательных видов водных организмов и обеспечение кормовой базы для других (например, рыб) [17, 18]. Наибольшее количество рыбоводных хозяйств расположено на юге России, однако средняя площадь (3...5 га) и средняя рыбопродуктивность (1 т/га) их невелика. Чтобы обеспечить выращивание в прудах таких рыб, как белый амур (лат. *Stenopharyngodon idella*), веслонос (лат. *Polyodon spathula*), карп (лат. *Cyprinus carpio*), требуется не только определенная температура, но и необходимое содержание кислорода (не ниже 6...8 мг/л), а это можно достичь обеспечением в воде определенного количества *Chlorella vulgaris*.

Проведенные ранее исследования показывают, что средний прирост карпа в прудах с присутствием микроводоросли *Chlorella vulgaris* составляет 1110...1620 г, белого амура – 1729...1750 г. При этом отмечается повышенная жизнеспособность и стрессоустойчивость посадочного материала [19].

Цель исследования состоит в обосновании применения штамма *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 для оздоровления природных и искусственных

водоемов, повышения продуктивности прудового хозяйства, укрепления устойчивости биоценозов.

Материалы и методы. Для исследования выбраны несколько прудов (около п. Волжанка Волгоградской области), вода в которые поступает из Волгоградского водохранилища. Климат на данной территории – умеренно-континентальный, характеризуется холодной малоснежной зимой и продолжительным жарким летом.

При вторжении горячего воздуха из Казахстана температура может подниматься до $+35...+40$ °С. Для исследования выбраны: опытный пруд № 4 (площадь зеркала – 61 га, средняя глубина – 1,4 м, геометрический объем – 856,8 тыс. м³, объем испарения – 388,6 тыс. м³); опытный пруд № 1 (площадь зеркала – 61 га, средняя глубина – 1,4 м, геометрический объем – 854 тыс. м³, объем испарения – 387,4 тыс. м³); контрольный пруд № 2 (площадь зеркала – 59 га, средняя глубина – 1,4 м, геометрический объем – 828,8 тыс. м³, объем испарения – 375,9 тыс. м³) (рис. 1).

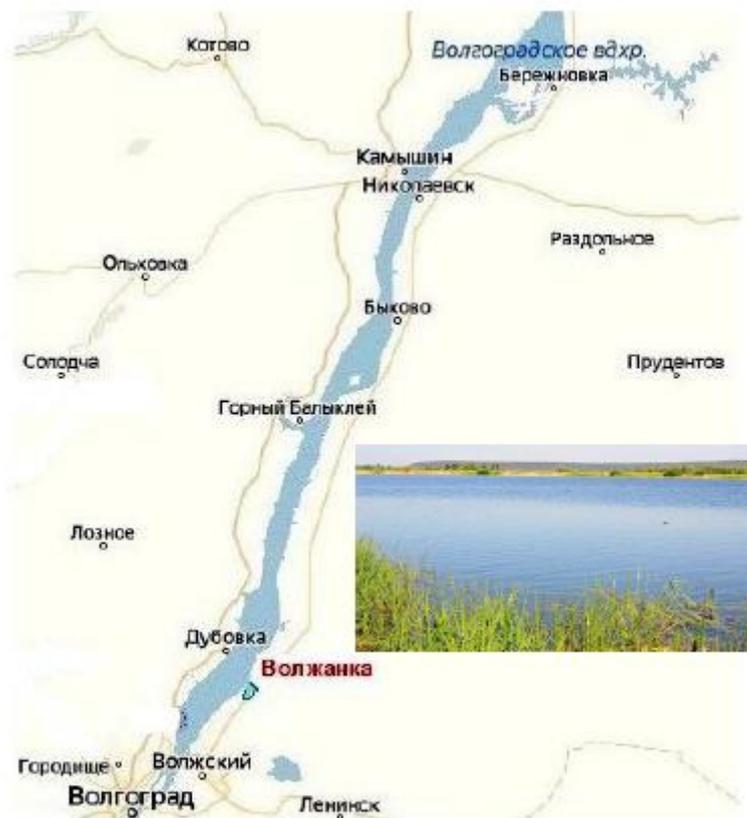


Рис. 1. Расположение п. Волжанка на карте Волгоградской области, внешний вид одного из опытных водоемов

Отборы проб воды на гидрохимические и гидробиологические показатели производили один раз в пяти квадратах каждого пруда в мае, июне, июле, августе и сентябре.

Учитывая предыдущие положительные результаты исследований в заливах Волгоградского водохранилища [20], объем вселяемой *Chlorella vulgaris* рассчитывали из сложившейся практики: опытный пруд № 4 – 10 л на 1 га площади водного зеркала, пруд № 1 – 20 л. Распределение общего объема *Chlorella vulgaris* проводили по пяти квадратам каждого опытного пруда (табл. 1). Кратность вселения хлореллы в опытные водоемы составляла 1 раз в месяц, плотность клеток – 10 млн/мл.

Таблица 1

Объем вселения *Chlorella vulgaris* в опытные пруды, л/га

| Опытный пруд № 4 | | Опытный пруд № 1 | |
|------------------|----------|------------------|----------|
| Месяц | Объем, л | Месяц | Объем, л |
| Май | 610 | Май | 1220 |
| Июнь | 610 | Июнь | 1220 |
| Июль | 610 | Июль | 1220 |
| Август | 610 | Август | 1220 |
| Сентябрь | 610 | Сентябрь | 1220 |
| Итого | 3050 | Итого | 6100 |

Обработку проб воды осуществляли по общепринятым в гидробиологии методам Лаврентьева и Абакумова. Гидрохимические анализы воды выполняли в лаборатории ФГБНУ ВНИИОЗ и аккредитованной гидрохимической лаборатории ФГУ «Управление эксплуатации Волгоградского водохранилища» (номер в реестре аккредитованных лиц № RA.RU.21AE08). Гидрохимический анализ воды проводили по показателям: рН, железо общее, марганец, фосфаты, биохимическое потребление кислорода (БПК), химическое потребление кислорода (ХПК). Культивирование штамма *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 для исследования проводили в лаборатории ФГБНУ ВНИИОЗ по авторской методике и методам, разработанным А.М. Музафаровым, Т.Т. Таубаевым (1984 г.), на элективной питательной среде (N – 64, P – 8, Fe – 0,1, Co – 0,001, Cu – 0,001 мг/л) [21]. Плотность культуры

штамма *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 определяли оптическим светопропусканием и камерой Горяева (рис. 2).



Рис. 2. Исследование по биологии и культивированию штамма *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 в лаборатории ФГБНУ ВНИИОЗ

Для определения уровня загрязнения водоема использовали шкалу (табл. 2), нормативы, утвержденные приказом Минсельхоза РФ от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах и в водных объектах рыбохозяйственного значения» (зарегистрировано в Минюсте РФ 13.01.2017 № 45203) и СанПиН 2.1.5.980–00 «Гигиенические требования к охране поверхностных вод».

Таблица 2

Шкала оценки состояния водоема по бактериологическим и гидробиологическим показателям

| Степень загрязнения | Бактериологические | | | Санитарно-гидробиологические показатели | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------|---|--------------------------------------|
| | Кишечная палочка (титр) | Сапрофитовые микроорганизмы в 1 мл | Прямой счет | Сапробность | Биологический показатель загрязнения |
| Очень чистые | 10...100 | а.10 | 10^5 | Катаробная | 0...5 |
| Чистые | <10...1 | а.100 | 10^6 | Олиго-сапробная | 6...10 |
| Умеренно-загрязненные | <1...0,05 | а.1000 | 10^6 | α-мезосапробная | 11...20 |
| Загрязненные | <0,05...0,005 | а.10000 | 10^7 | β-мезосапробная | 21...60 |
| Грязные | <0,005...0,001 | а.100000 | 10^7 | Полисапробная | 61...90 |
| Очень грязные | <0,001 | а.1000000 | 10^8 | Полисапробная | 100 |

Результаты и обсуждение. Мелиорация, как процесс преобразования природной среды в интересах хозяйственной деятельности человека, подразделяется на несколько направлений, одно из которых – биологическая мелиорация (биомелиорация), направленная на улучшение состояния

природного (водного) объекта. Биологическая мелиорация водных объектов преследует цель: восстановление водных экосистем до естественного уровня и использования в процессе производственной деятельности человека.

Основываясь на знании процессов, протекающих в водоемах, применяя природосберегающие технологии, человек способен обеспечить качество воды в водоемах до естественного состояния, убрать загрязняющие вещества. К биологической мелиорации водоемов относят интродукцию, вселение в водоемы растительноядных рыб (белого амура, белого и пестрого толстолобиков), чтобы уменьшить зарастание водоемов [13, 19]. Наука, которая занимается изучением водорослей, называется альгологией (alga – водоросль, logos – наука). Улучшение состояния водного объекта с помощью микроводорослей носит название – альголизация. Логически предположить, что альголизация как самостоятельное направление в оздоровлении водоемов имеет свой механизм, инструментарий и технологию, то есть весь арсенал научных знаний. Уместно при оздоровлении водоемов с помощью микроводорослей использовать термин – алгобиомелиорация. Введение в оборот нового термина расширит представление о биомелиорации водных объектов, создаст площадку для последующих исследований и научных преобразований.

При альголизации водоемов особый интерес вызывает механизм воздействия *Chlorella vulgaris* на сине-зеленые водоросли [20–22]. В лабораторных опытах установлено, что присутствие штамма *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 в водоемах угнетающе отражается на жизнедеятельности сине-зеленых водорослей, особенно *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Microcystis*, создающих в водоемах эффект «цветения». Другие виды сине-зеленых водорослей не испытывают на себе ни литического, ни ингибирующего воздействия *Chlorella vulgaris*, а сине-зеленая водоросль *Oscillatoriasancta* наоборот, начинает интенсивно размножаться. Следовательно, *Chlorella vulgaris* оказывает избирательное воздействие на разные виды сине-зеленых водорослей.

Исследование по влиянию штамма *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 на состояние прудов № 4, № 1 в п. Волжанка Волгоградской области проводили с апреля по октябрь 2019 г. На рис. 3 показана динамика изменения гидрохимических показателей воды в прудах по пяти квадратам.

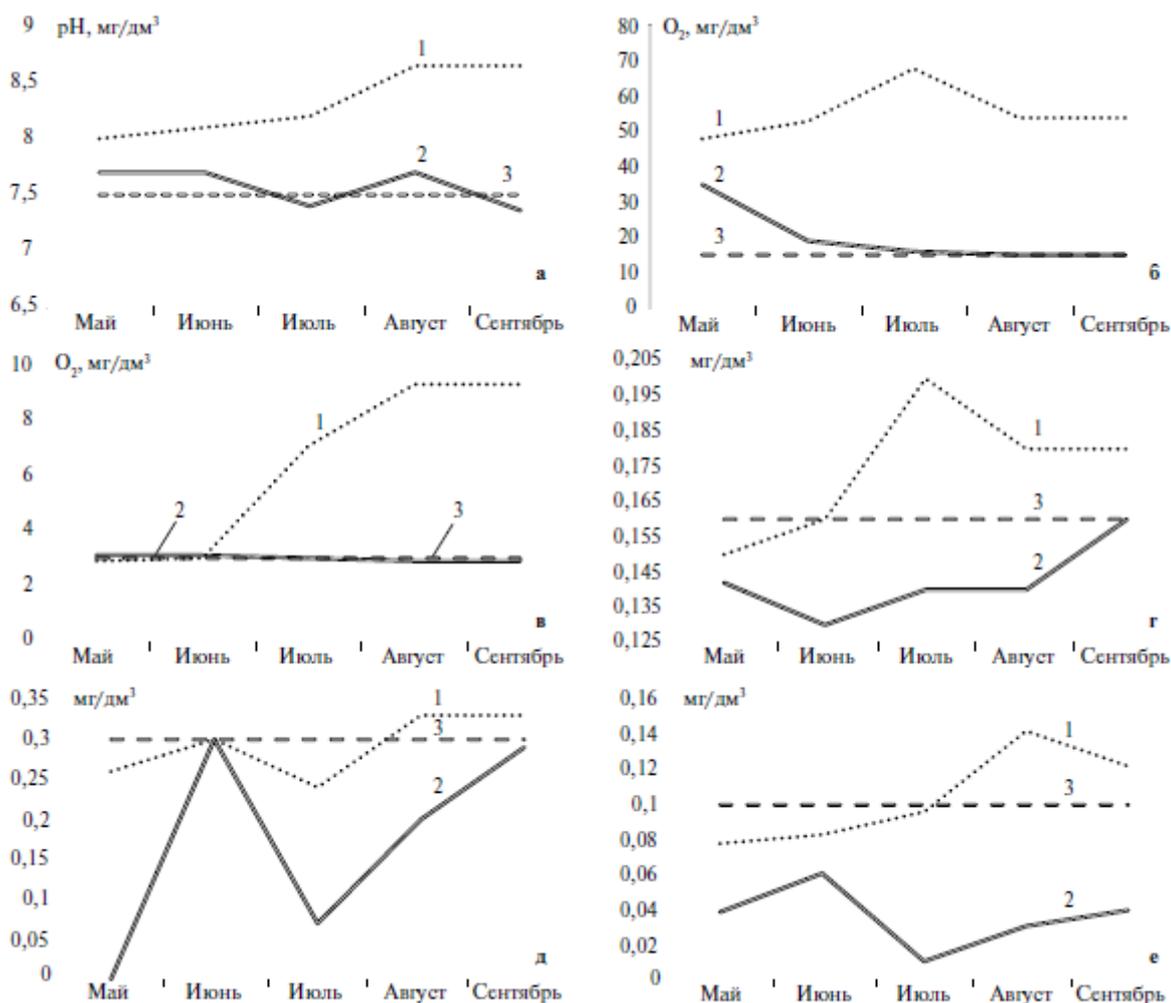


Рис. 3. Уровень гидрохимических показателей воды в опытных и контрольном прудах: 1 – контроль; 2 – опыт; 3 – ПДК; а – рН; б – ХПК; в – БПК; г – фосфаты; д – железо; е – марганец

Водородный показатель на опытных прудах (рис. 3а) находился в пределах нормы в течение исследуемого периода, однако в контрольном пруде из-за повышения температуры воды (август–сентябрь) наблюдалось превышение уровня ПДК.

Химическое потребление кислорода (ХПК) в начале исследования во всех прудах было выше уровня ПДК (рис. 3б), но после вселения штамма *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 в опытных прудах наблюдалось снижение.

Биологическое потребление кислорода (БПК) существенно уменьшилось в опытных прудах по мере вселения штамма *Chlorella vulgaris*

ИФР № С-111 (рис. 3в), в контрольном пруде наблюдалось значительное превышение значений ПДК.

В контрольном пруде уровень содержания фосфатов, железа, марганца (рис. 3г, д, е) был нестабильным, а с повышением температуры воды выходил за пределы допустимых концентраций. В опытных прудах, где вселялся штамм *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111, эти показатели не превышали ПДК.

Вселение штамма *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 в опытные пруды с мая по сентябрь 2019 г. оказало положительное влияние на биоценозы и качество воды. На основе данных об изменении содержания рН, железа, марганца, фосфатов, биохимического потребления кислорода (БПК), химического потребления кислорода (ХПК) произведена интегральная оценка загрязнения водоемов (ИЗВ): в контрольном пруде она составила 1,21, в опытных – 0,987. Воду в опытных прудах можно отнести ко II классу (чистые, ИЗВ = 0,2...1). Наблюдения за гидрофизическими показателями воды выявило, что изменение прозрачности по времени связано с уровнем развития фитопланктона, наличием взвешенных веществ, количество которых регулировалось интенсивностью взмучивания при ветровом перемешивании воды. Содержание растворенного кислорода не опускалось ниже рыбохозяйственной нормы и было на уровне: 7,5...19,4 мгО₂/дм³. Максимальные показатели кислорода (12,4...19,4 мгО₂/дм³) зарегистрированы в опытных водоемах.

Выводы. Экологическая обстановка в водоемах Южного федерального округа за счет роста антропогенной нагрузки претерпевает значительные изменения в сторону ухудшения. Преобладающее развитие сине-зеленых водорослей в летний период приводит к эффекту «цветения», созданию технических трудностей при подаче воды на орошение и в водопроводную сеть. Ихтиофауна, населяющая водоемы, в силу ограниченности видового состава и их численности, не способна в полной мере утилизировать редуцирующиеся органические вещества, что приводит к его эвтрофикации. Применение алгобиомелиорации (вселение в водоемы штамма *Chlorella*

vulgaris ИФР № С-111) позволяет изменить ситуацию, запустить механизм оздоровления водоемов. Показано, что *Chlorella vulgaris* в ходе своей жизнедеятельности активно поглощает азот, фосфорсодержащие компоненты, подавляет развитие болезнетворных бактерий, улучшает состояние водоемов, создает условия для хозяйственно-питьевого водоснабжения и целей рекреации.

Результаты исследования, проведенные на прудах п. Волжанка Волгоградской области, позволяют сделать следующие заключения: при вселении штамма *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 в водоемы улучшилась их экологическое состояние, увеличилось насыщение кислородом и уменьшилось «цветение» воды, что позволило получить определенный экономический хозяйственный эффект. Кроме того, способность микроводоросли *Chlorella vulgaris* адсорбировать органические и неорганические загрязнители, насыщать воду кислородом, увеличило пищевую нишу зоопланктона, создало условие для дальнейшего развития прудового хозяйства.

Многие ученые называют микроводоросль *Chlorella vulgaris* индикатором качества воды в природных и искусственных водоемах. Однако до настоящего времени отдельные вопросы, связанные с технологией вселения *Chlorella vulgaris* в водоемы, остаются открытыми. Не отработанными до конца остается вопросы получения необходимого количества микроводорослей в закрытых фитобиореакторах и автоматизация их вселения в водоемы.