

ГОГОНИН АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

**КОНСОРЦИУМ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ
ВОД ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

Специальность 1.5.6. Биотехнология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Работа выполнена в Институте биологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Научный руководитель:

Щемелинина Татьяна Николаевна, кандидат биологических наук (специальности 1.5.19. Почвоведение и 1.5.15. Экология), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, лаборатория биохимии и биотехнологии Института биологии, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Муратова Анна Юрьевна, доктор биологических наук (специальность 1.5.11. Микробиология и 1.5.6. Биотехнология), Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, лаборатория экологической биотехнологии, заведующая лабораторией, г. Саратов

Мальцев Евгений Иванович, кандидат биологических наук (специальность 1.5.14. Экология), доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, лаборатория молекулярной систематики водных растений, ведущий научный сотрудник, г. Москва

Ведущая организация:

Институт биологии Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Уфимский федеральный исследовательский центр» Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, г, Уфа

Защита состоится «___» _____ 2023 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета 64.1.002.01 в Федеральном бюджетном учреждении науки «Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по адресу: Территория «Квартал А», д. 24, п. Оболенск, г.о. Серпухов, Московская область, 142279.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии» Федеральной службы по защите прав потребителей и благополучию человека Российской Федерации по адресу: Территория «Квартал А», д. 24, п. Оболенск, г.о. Серпухов, Московская область, 142279.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г

Ученый секретарь
диссертационного совета 64.1.002.01
кандидат биологических наук

Фурсова Надежда Константиновна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Проблема очистки сточных вод лесопромышленных комплексов (ЛПК) и целлюлозно-бумажных комбинатов (ЦБК) для Российской Федерации в настоящее время является одной из приоритетных в сфере экологической биотехнологии, так как сточные воды данной отрасли содержат широкий перечень поллютантов, биогенных элементов, органических загрязнителей (фенолы, нитратный, нитритный, аммонийный азот, фосфаты, сульфаты, металлы и пр.) (Karels et al., 1999; Kumar and Chandra., 2021; Мичукова и др., 2006). Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ после очистки воды в цехе биологической очистки сточных вод (ЦБОСВ) достигаются не по всем показателям, и как результат вода на выходе оказывается недостаточно очищенной. Проблему может решить доочистка воды с помощью дополнительных технологий. По данным Рослесинфорг, Акционерное Общество "Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс" (АО Монди СЛПК) входит в пятерку крупнейших компаний ЛПК РФ - за 2021 год компания изготовила 1,2 млн тонн офисной и офсетной бумаги. Сточные воды лесопромышленного предприятия акционерного общества (АО) «Монди СЛПК», включающие как стоки промышленные, так и коммунально-бытовые (промышленные стоки - 210 тыс. м³/сут, коммунально-бытовые СВ - 81 тыс. м³/сут) по химическому составу весьма неоднородны и разнообразны по времени, в связи с этим необходимо оптимальное решение с инновационным подходом (Щетинин и др., 2012).

Осуществление проблемы доочистки воды от загрязняющих веществ может быть реализовано путем использования биологических агентов – микроводорослей (МВ) (Kumar et al., 2021; Oswald and Golueke, 1968; Винберг, 1963). Микроводоросли участвуют в процессе фотосинтеза, выделяют экзометаболиты и другие физиологически активные вещества, выполняя антибиотическую функцию (Hassan et al., 2022; De Morais et al., 2015). Симбиотические отношения МВ, бактерий и других представителей активного ила дополняют свойства друг друга: органические соединения, выделяющиеся в результате фотосинтеза водорослей, в конечном счете могут стать источником пищи для различных гетеротрофных микробов. Стимулирующее рост вещество, вырабатываемое бактериями, может способствовать росту МВ (Sahoo et al., 2019; Su et al., 2012; Tiron et al., 2014). Водоросли можно использовать на ЦБОСВ промышленных предприятий для утилизации биогенных элементов и органических отходов, поскольку водоросли потребляют фенолы, нитраты, фосфаты и сокращают количество бактерий и токсинов в воде (Adholeya and Das, 2015; Zhang et al., 2018; Глушанкова и др., 2020; Щемелинина и др., 2015). На основе различных фототрофных микроорганизмов, относящихся к разным отделам, родам и видам, можно сконструировать консорциумы МВ, которые могут быть более

эффективны в снижении биогенных элементов и биотрансформации органических загрязнителей.

Цель и задачи исследования.

Цель работы – создание консорциума микроводорослей и его применение в технологии очистки сточных вод лесопромышленных предприятий от основных загрязняющих веществ (на примере Акционерного общества «Монди СЛПК»).

Поставленная цель определила следующие задачи:

1. Оценить и подобрать наиболее эффективные микроводоросли для снижения содержания основных загрязняющих веществ в сточных водах (в том числе фенолов, ионов железа и алюминия, ионов аммония, нитрата и нитрита, общего азота и фосфора).

2. Провести сравнительный анализ эффективности очистки сточной воды от основных загрязняющих веществ с помощью монокультур микроводорослей и их консорциумов, культивированных на разных питательных средах.

3. Установить зависимость эффективности снижения содержания основных загрязняющих веществ в сточной воде от концентрации клеток микроводорослей и их консорциумов.

4. Исследовать возможность использования сточной воды вторичных отстойников цеха биологической очистки сточных вод Акционерного общества «Монди СЛПК» в качестве питательной среды для получения биомассы микроводорослей с одновременной очисткой сточной воды.

5. Оценить биотехнологические свойства монокультуры и консорциума микроводорослей в опытно-промышленных испытаниях в сточной воде аэротенков цеха биологической очистки сточных вод Акционерного общества «Монди СЛПК».

6. Провести сравнительный анализ биотехнологических свойств микроводорослей в свободной и иммобилизованной форме.

Научная новизна определяется тем, что впервые изучено влияние монокультур микроводорослей и их консорциумов (*Eustigmatos magnus*, *Coelastrum proboscideum*, *Acutodesmus obliquus*, *Chlorella vulgaris*) в разных сочетаниях на очистку сточной воды лесопромышленного комплекса Акционерного общества «Монди СЛПК» от загрязняющих веществ и доведение воды до норм предельно допустимых концентраций. Показана эффективность очистки сточной воды при введении микроводорослей и их консорциумов: Al на 11-41 %, Fe на 14-39,3 %, P_{общ.} на 19-78 %, S_{общ.} на 16 %, N_{общ.} на 15-64 %, NO³⁻ на 10-53 %, NH⁴⁺ на 87-90 %, фенолы на 30-83 %. Новизна исследований подтверждена патентом РФ на изобретение (Приложение 2): «Штамм микроводорослей *Chlorella vulgaris* Beijer. f. *globosa* V. Andr. для очистки природных водоемов и сточных вод промышленных предприятий» (№ 2703499).

Экспериментально обосновано использование сточной воды вторичных отстойников Акционерного общества «Монди СЛПК» в качестве питательной среды для наработки биомассы в процессе культивирования микроводорослей с одновременной очисткой сточной воды от загрязняющих веществ.

Оценка биотехнологических свойств микроводорослей в иммобилизованном виде показала эффективность очистки модельной воды от фенолов на 82 - 93 % с уменьшением срока очистки по сравнению с использованием микроводорослей в свободной форме.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что научно подтверждена возможность использования консорциума микроводорослей в свободной и иммобилизованной форме при определенном титре клеток для очистки сточной воды от основных загрязняющих веществ.

Практическое значение диссертации заключается в разработке технологии доочистки сточной воды лесопромышленного комплекса с помощью монокультур микроводорослей и их консорциумов, технологии культивирования микроводорослей на сточной воде с целью ее доочистки и получения питательной биомассы, используемой в сельском хозяйстве. Технологии могут быть использованы в цехе биологической очистки сточной воды профильных промышленных предприятий (Справки о внедрении Акционерного общества «Монди СЛПК» от 10.03.2022 г.) Материалы, полученные в процессе исследований, используются в Рабочей программе обучения школьников «Биология с основами биотехнологии» Государственное автономное учреждение дополнительного образования Республики Коми «Республиканский центр дополнительного образования», Технопарк «Кванториум» (Справка о внедрении от 10.03.2022 г.).

Методология и методы исследования.

Предметом исследования явились методы очистки сточной воды от биогенных элементов с помощью микроводорослей и их консорциумов. Основными объектами исследования явились штаммы микроводорослей *Eustigmatos magnus* ВКПМ А1-25, *Coelastrum proboscideum* IPPAS С-2055, *Acutodesmus obliquus* IPPAS S-2016, *Chlorella vulgaris* IPPAS С-2024, питательные среды Тамия, Люка, сточная вода, анальцимсодержащая порода с иммобилизованными микроводорослями *Chlorella vulgaris*.

Теоретической базой работы явились исследования российских и зарубежных ученых. В работе применяли следующие методы исследования:

Системный анализ загрязнений в сточных водах, воздействие МВ на очистку сточных вод; экспериментально-статистические методы; конструирование консорциумов; количественная химическая оценка сточной воды методами

фотометрии, потенциометрии, амперометрии, термokatалитическим окислением с хемилюминесцентным детектированием, капиллярной хроматографией, турбидиметрией, гравиметрией; статистические методы обработки.

Положения, выносимые на защиту.

1. Штаммы *Eustigmatos magnus* ВКПМ А1-25, *Coelastrum proboscideum* IPPAS С-2055, *Acutodesmus obliquus* IPPAS S-2016, *Chlorella vulgaris* IPPAS С-2024 и их консорциумы с разной концентрацией клеток, эффективны для снижения содержания основных загрязняющих веществ в сточных водах (в том числе фенолов, ионов железа и алюминия, ионов аммония, нитрата и нитрита, общего азота и фосфора).
2. Сточная вода вторичных отстойников цеха биологической очистки сточных вод лесопромышленного предприятия Акционерного общества «Монди СЛПК» пригодна в качестве питательной среды для культивирования микроводорослей с одновременной очисткой от загрязняющих веществ (железо, алюминий, фенолы, аммоний-ион, нитрат-ион, нитрит-ион, общие фосфор и азот).
3. Штамм *Chlorella vulgaris* IPPAS С-2024 в иммобилизованном виде на аналцимсодержащей породе эффективен в очистке сточной воды от фенолов.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность работы основана на значительном объеме экспериментов и полученных в ходе исследования данных, их статистической обработке, соответствии теоретическим данным, применении современных актуальных методов исследования, соответствующих цели и задачам работы. Анализы проведены в аккредитованной экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН на сертифицированном и прошедшем поверку оборудовании. Воспроизводимость результатов подтверждена проведением серии независимых экспериментов. Выводы базируются на итогах анализа значительного объема статистически обработанных данных. Работа выполнена на базе Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН в рамках отраслевой НИР: «Разработка биокаталитических систем на основе ферментов, микроорганизмов и растительных клеток, их иммобилизованных форм и ассоциаций для переработки растительного сырья, получения биологически активных веществ, биотоплива, ремедиации загрязненных почв и очистки сточных вод» № АААА-А17-117121270025-1ИР.

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены на Всероссийских с международным участием научно-практических конференциях «Экология родного края: проблемы и пути их решения» (Киров, 2020; 2022), на Всероссийских молодежных научных конференциях «Актуальные проблемы биологии и экологии» (Сыктывкар, 2017, 2018, 2019), Всероссийских научно-практических конференциях с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем» (Киров, 2016, 2018, 2019).

Личный вклад автора заключается в анализе литературных данных по теме очистки сточных вод от основных загрязняющих веществ, проведении лабораторных и промышленных экспериментов по тематике диссертации, обобщении и обработке результатов исследования, формулировании выводов, написании публикаций, статей и патентов по теме диссертации, участие в профильных конференциях.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах из списка определенных ВАК РФ, 1 патент и 8 тезисов в материалах Всероссийских конференций с международным участием.

Структура и объем работы. Объем диссертации составляет 148 стр. текста с 26 рисунками и 27 таблицами. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка используемой литературы, включающего 264 наименований, в том числе 134 иностранных источника.

Автор выражает благодарность сотрудникам экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, сотрудникам отдела флоры и растительности Севера Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН к.б.н. Е.Н. Патовой, к.б.н. И.В. Новокавской, сотруднику Института физиологии растений имени К. А. Тимирязева РАН к.б.н. М. А. Синетовой, сотрудникам отдела охраны окружающей среды АО «Монди СЛПК», сотруднику ООО «АЛЬГОТЕК» к.б.н. Лукьянову В.А.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В обзоре литературы рассмотрены характеристики природных и сточных вод промышленных предприятий, характеристики основных загрязняющих их веществ. Рассмотрено влияние цехов производства целлюлозно-бумажной промышленности на водные ресурсы. Проведен анализ известных способов очистки сточных вод (СВ) от загрязняющих веществ, в том числе с использованием микроводорослей (МВ) в свободном виде и на носителях. Рассмотрены разные составы питательных среды для культивирования МВ.

МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОЧИСТКЕ СВ С ПОМОЩЬЮ МВ И ИХ КОНСОРЦИУМОВ

Оценка и подбор наиболее эффективных МВ для снижения содержания основных загрязняющих веществ в сточных водах

СВ образовались вследствие смешения двух потоков. Первый поток – отходы целлюлозно-бумажного производства. В этих стоках загрязняющие вещества представлены фенолами, общим фосфором и азотом, металлами, ионами нитратов,

нитритов и аммония. Второй поток – городские канализационные стоки, в которых содержатся в высоких концентрациях вещества азотной группы, общий фосфор, а также ионы железа.

Модельный эксперимент проводили с использованием СВ аэротенков и монокультур МВ титром клеток от $2,2$ до $2,6 \times 10^8$ кл./см³ (таблица 2) в течение 24 часов. Проведенный эксперимент показал изменение содержания загрязняющих веществ в сточных водах в присутствии МВ по сравнению с контролем. Заметное снижение концентрации отмечено для азота и фосфора.

Общий азот характеризует валовое содержание всех форм азота в пробе воды, именно он используется для характеристики антропогенной нагрузки природной среды или очистных сооружений (Ягов, 2008). При внесении в сточные воды МВ отмечали синтез соединений азота всеми исследованными монокультурами (рисунок 1). Достоверно значимое (таблица 1) снижение общего азота в экспериментальных условиях наблюдали для *C. vulgaris*, *E. magnus*, меньшую эффективность проявили МВ *C. proboscideum* (рисунок 1). Недостаток азота при доочистке СВ, приводящий к торможению окислительных процессов и вызывающий образование ила, который плохо оседает, компенсируется введением биогенных веществ искусственно в виде азотных удобрений.

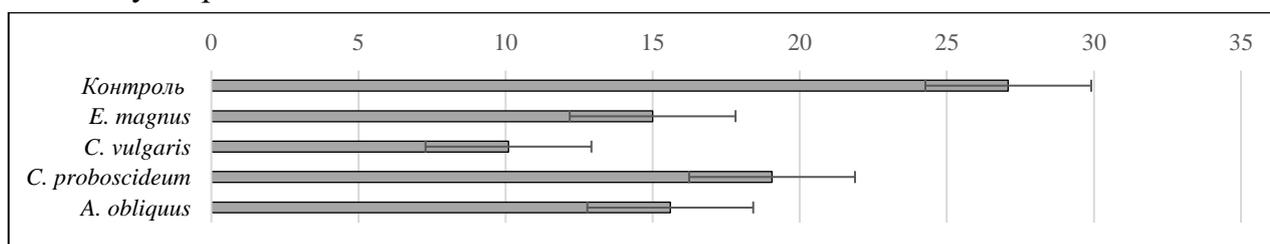


Рисунок 1 – Содержание общего азота (мг/дм³) в СВ через 24 часа после инокуляции монокультурами МВ

Общий фосфор один из основных загрязнителей стоков промышленных предприятий и коммунального хозяйства, его поступление в природные экосистемы приводит к изменению трофического статуса и перестройке сообществ водоемов (Дворецкий, 2015). В СВ с внесенными инокулятами МВ регистрировали уменьшение содержания $P_{\text{общ}}$ в 1,8-7 раз с высоким уровнем статистической значимости ($p > 0,99$) для всех исследованных штаммов (рисунок 2). Внесение монокультур *E. magnus* и *C. proboscideum* приводило к наиболее эффективному снижению соединений $P_{\text{общ}}$.

Железо является биологически активным элементом и оказывает влияние на интенсивность развития фитопланктона и микрофлоры в водоемах (Muthuraman, 2021, Zhang, 2018). В нашем случае выявили достоверное (рисунок 3) уменьшение содержания общего железа при внесении культуры *E. magnus*, менее активно сорбировал этот элемент в среде инокулят *C. proboscideum* (рисунок 3).

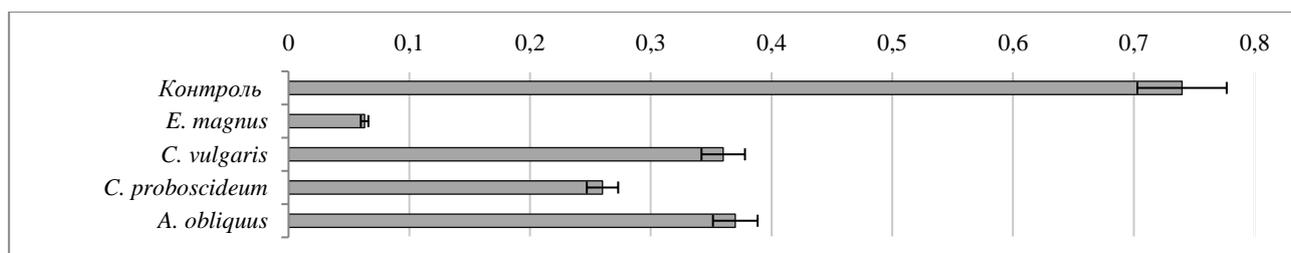


Рисунок 2 – Содержание общего фосфора (мг/дм³) в СВ через 24 часа после инокуляции монокультурами МВ

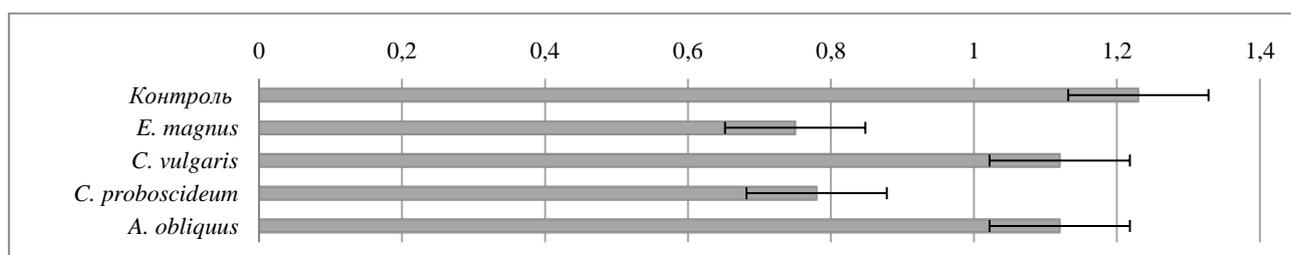


Рисунок 3 – Содержание ионов железа (мг/дм³) в СВ через 24 часа после инокуляции монокультурами МВ

Ионы алюминия при поступлении в природные водоемы со СВ в высоких концентрациях оказывают токсичное воздействие на водные организмы (Das et al., 2017). Достоверно снижали содержание Al^{3+} ($p > 0,95$) по отношению к контролю инокулированные в сточную воду *E. magnus* и *C. proboscideum* (рисунок 4).

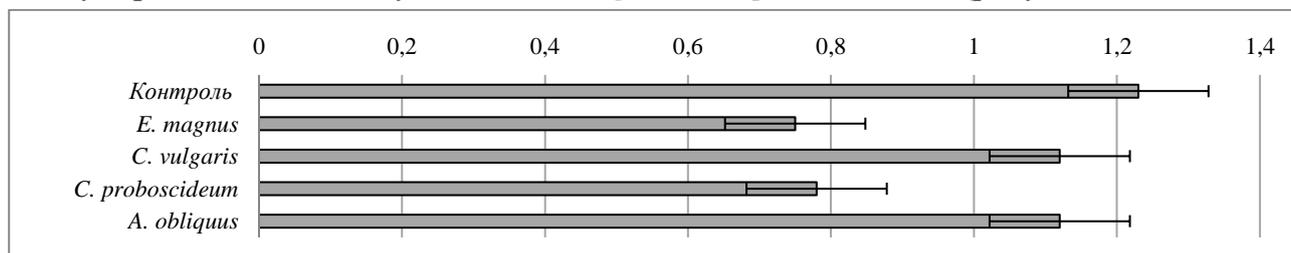


Рисунок 4 – Содержание алюминия (мг/дм³) в СВ через 24 часа после инокуляции монокультурами МВ

Фенольные соединения в СВ лесопромышленного комплекса представляют собой продукты глубокой биодеструкции лигнина. Эффект биотрансформации фенолов с высокой достоверностью различия ($p > 0,97$) отмечали у культур МВ *E. magnus* и *C. proboscideum* (рисунок 5). Инокулированные в СВ штаммы *C. vulgaris* и *A. obliquus* повышали содержания фенолов в исследуемых образцах, что можно обосновать синтезом некоторых фенольных соединений МВ (Miranda et al., 2017).

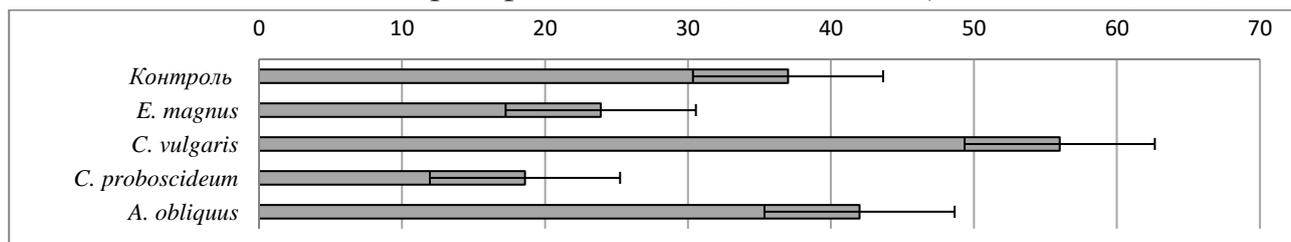


Рисунок 5 – Содержание фенолов (мкг/дм³) в СВ через 24 часа после инокуляции монокультурами МВ

Разная способность изученных штаммов МВ к связыванию и поглощению загрязняющих веществ может быть связана с их морфофизиологическими и экологическими свойствами (таблица 2). Так, виды *C. proboscideum*, *E. magnus* и *A. obliquus* имеют крупные размеры клеток, и, следовательно, большую поверхность для поглощения загрязняющих веществ из сточной воды (Ettl, Gärtner, 2014; Царенко, 1990). Наличие вакуолей у вышеназванных видов, а также у *C. vulgaris* обеспечивают хорошую поглощающую способность, особенно в старых культурах, которые могут накапливать как запасные вещества, так и конечные продукты метаболизма клетки. Эффективность использования культур МВ в процессах очистки СВ может также объясняться их способностью к полноценному развитию в водоемах с различным уровнем трофности. Например, *C. vulgaris* относится к альфамезосапробионтам (Барина и др., 2006) и может обитать в водоемах с высоким уровнем загрязнения, что подтверждали и наши исследования (рисунок 1, 2, 4). Вид *E. magnus* приспособлен к обитанию в почвенной и водной средах (Ettl, Gärtner, 2014). Обширный ареал и частая встречаемость свидетельствуют о высокой толерантности данного вида к неблагоприятным условиям среды. Эффективную биодеструкцию загрязняющих веществ из СВ этим штаммом подтверждали результаты эксперимента (рис. 1 – 5). Аналогичный вывод можно применить к культуре *C. proboscideum*. Несмотря на обитание этой МВ в олигосапробных зонах, характеризующихся небольшим содержанием органических соединений, инокулированный штамм *C. proboscideum* проявил активность в отношении ряда загрязняющих веществ в органической субстанции (рисунок 1 – 5). Несмотря на то, что штамм *A. obliquus* был выделен из исследуемой СВ, в ходе проведения лабораторного эксперимента проявил не высокую эффективность очистки.

Таблица 1 – Показатели достоверностей различия (p) между инокулированными образцами и контролем

Культуры МВ	$N_{\text{общ}}$	$P_{\text{общ}}$	Фенолы	Al^{3+}	Fe^{2+}
<i>E. magnus</i>	0,99	0,995	0,98	0,95	0,90
<i>C. proboscideum</i>	0,95	0,99	0,99	0,95	–
<i>C. vulgaris</i>	0,995	0,98	–	–	–
<i>A. obliquus</i>	0,98	0,98	–	–	–

Выявили ряд эффективности МВ в отношении снижения загрязняющих веществ в пределах доверительной вероятности различий между образцами и контролем: $N_{\text{общ}}$ (*C. vulgaris*>*E. magnus*>*A. obliquus*>*C. Proboscideum*); $P_{\text{общ}}$ (*E. magnus*>*C. proboscideum*>*C. vulgaris*>*A. Obliquus*); Фенолы (*C. proboscideum*>*E. Magnus*); Al^{3+} (*E. magnus*>*C. proboscideum*>*A. Obliquus*); Fe^{2+} (*E. Magnus*).

На основании проведенной оценки влияния монокультур МВ на содержание химических элементов выявили два штамма *E. magnus* и *C. proboscideum*, наиболее эффективных для очистки от загрязняющих веществ СВ в пределах доверительной вероятности различий между образцами и контролем. Эти культуры использовали для создания консорциума МВ и наилучшего проявления их синергетического эффекта. Таблица 2 – Морфологические и экобиологические характеристики видов МВ, использованных для эксперимента

Характеристика МВ	<i>Eustigmatos magnus</i> (B.-Peters.) Hibberd (<i>Vischeria magna</i> (J.B.Petersen) Kryvenda, Rybalka, Wolf & Friedl)	<i>Coelastrum proboscideum</i> Bohlin, (<i>Tetradesmus obliquus</i> (Turpin) M.J.Wynne)	<i>Chlorella vulgaris</i> Beijerinck	<i>Acutodesmus obliquus</i> (Turpin) Hegewald & Hanagata
№ регистрации в коллекции*	СΥΚΟΑ-Е-001-09	СΥΚΟΑ Ch-033-14	СΥΚΟΑ Ch-011-10	СΥΚΟΑ Ch-055-12
Коллекция	Всероссийская коллекция промышленных микроорганизмов ФГБУ «ГосНИИгенетика»	Коллекция МВ и цианобактерий IPPAS ИФР РАН		
№ в каталоге депонирования	ВКПМ А1-25	IPPAS C-2055	IPPAS C-2024	IPPAS S-2016
Место сбора	Россия, Приполярный Урал	активный ил, Цех биологической очистки	Россия, Приполярный Урал	активный ил, Цех биологической очистки
Характеристика МВ	<i>Eustigmatos magnus</i> (B.-Peters.) Hibberd (<i>Vischeria magna</i> (J.B.Petersen) Kryvenda, Rybalka, Wolf & Friedl)	<i>Coelastrum proboscideum</i> Bohlin, (<i>Tetradesmus obliquus</i> (Turpin) M.J.Wynne)	<i>Chlorella vulgaris</i> Beijerinck	<i>Acutodesmus obliquus</i> (Turpin) Hegewald & Hanagata
Среда обитания	Водная и почвенная	Водная	Водная и почвенная	Водная
Форма клеток	Сферическая	Сферическая, формируют ценобии	Сферическая	Эллипсоидная, ценобии
Размер клеток	От 14 до 34 мкм	Длина 6-15, Ширина 3-11 мкм	От 3,3 до 13,3 мкм	4-25 мкм длина и 2,2-11 мкм ширина
Состав клеточной оболочки	Пектиновая оболочка	Целлюлозно-пектиновая оболочка	Целлюлозно-пектиновая оболочка	Целлюлозно-пектиновая оболочка

Продолжение таблицы 2 – Морфологические и экобиологические характеристики видов МВ, использованных для эксперимента

Вакуоли	Есть	Есть	Есть	Есть
Запасные вещества	Хризо-ламинарин и масло	Крахмал, масло	Крахмал, масло	Крахмал, масло
Уровень трофности	–	Олигосапробионт	Альфа мезо сапробионт	Бета-полисапробионт
Экобиологическая характеристика	Снижает концентрацию:			
	(3+)**N _{общ} , (5+)P _{общ} , (4+)Фенолов, (5+)Al ³⁺ (5+)Fe ²⁺	(1+)N _{общ} , щ, (3+)P _{общ} , щ, (5+)Фенолов, (4+)Al ³⁺ + (3+)Fe ²⁺ +	(4+)N _{общ} , (2+)P _{общ} , (1+)Al ³⁺	(3+)N _{общ} , (1+)P _{общ} , (2+)Al ³⁺

* Коллекция зарегистрирована во Всемирном каталоге коллекций культур микроорганизмов GCM (Global Catalogue of Microorganisms) Acronym: SYKOA, WDCM Number: 1125; SYKOA (SY – Сыктывкар; КО – Коми; А – algae).

**Эффективность биотрансформации элемента, по шкале от 1+ до 5+

Сравнительный анализ эффективности очистки СВ от основных загрязняющих веществ с помощью монокультур МВ и их консорциумов, культивированных на разных питательных средах

Модельный эксперимент проводили с использованием СВ аэротенков. Биомассу МВ культивировали в колбах объёмом 250 см³ на питательных средах Люка и Тамия в течение 14 суток. Титр клеток культур МВ составил от 2,3 до 2,7×10⁸ кл/см³. В емкости объёмом 3 дм³ помещали СВ по 1,5 дм³ и инокулировали её монокультурами МВ (*V. magna*, *C. proboscideum*, *T. obliquus*, *C. vulgaris*) и консорциумом (*C. proboscideum*+*E. magnus*) в количестве 1% от общего объема СВ в течении 24 часов.

Содержание железа в СВ, отобранной из аэротенков СБО АО «Монди СЛПК», было в 2,5 раза больше ПДК (0,1 мг/дм³) (рис. 6). В течение суток произошло незначительное поглощение ионов железа клетками МВ. Штамм *E. magnus* и консорциум, выращенный на среде Люка, снижали содержание ионов железа на 35,7 % и 39,3 %, соответственно.

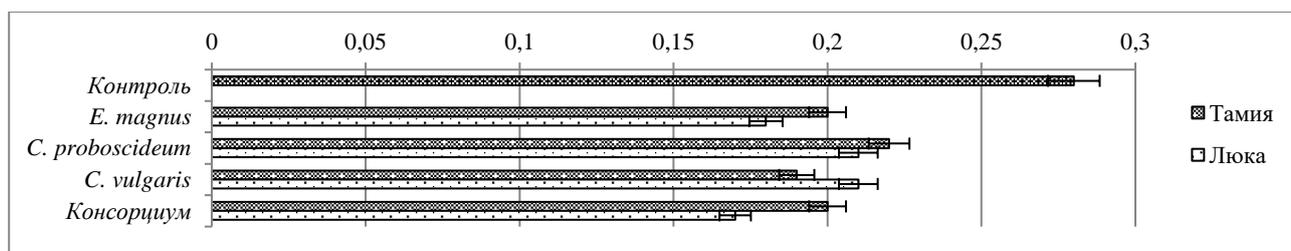


Рисунок 6 – Содержание железа (мг/дм^3) в модельной СВ через 24 часа после инокуляции монокультурами МВ и консорциумами

Содержание **алюминия** в контрольном варианте СВ в 14 раз превысило ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения ($0,04 \text{ мг/дм}^3$) (рис. 7). За сутки в присутствии МВ произошло незначительное снижение концентрации алюминия, но только в пределах погрешности.

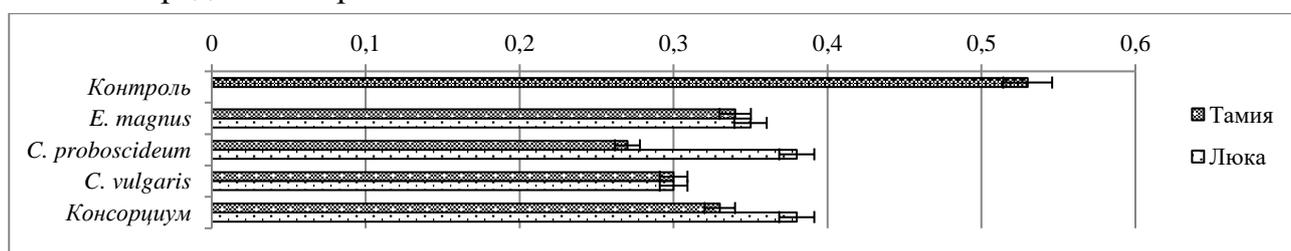


Рисунок 7 – Содержание алюминия (мг/дм^3) в модельной СВ через 24 часа после инокуляции монокультурами МВ и консорциумами

Концентрация **азота общего** в СВ была в пределах ПДК. Все МВ интенсивно использовали азотные соединения из СВ (рис. 8).

Азот аммонийный в контрольной пробе СВ превысил ПДК ($0,5 \text{ мг/дм}^3$) в 7,8 раз. Наиболее эффективными по снижению содержания NH_4^+ по сравнению с контрольным вариантом оказались консорциумы, культивированные на среде Тамия и Люка. Эффективность очистки составила 87 % и 90 %, соответственно. Причем, после инокуляции консорциумом (среда Люка) содержание аммонийного азота не превышало норм ($0,5 \text{ мг/дм}^3$) (рис. 9).

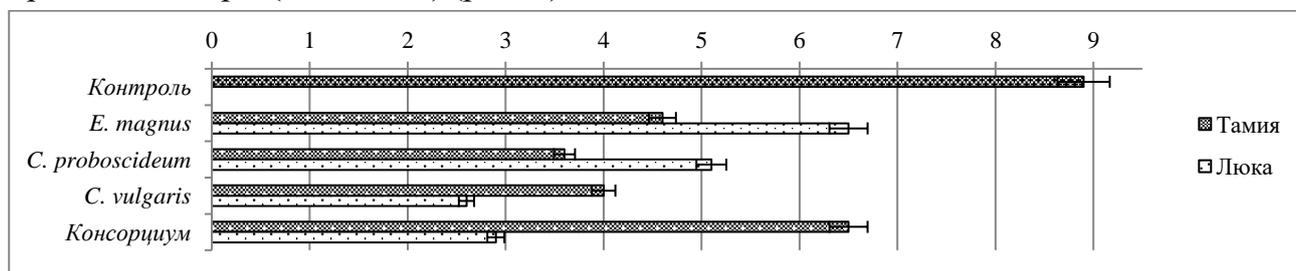


Рисунок 8 – Содержание общего азота (мг/дм^3) в модельной СВ через 24 часа после инокуляции монокультурами МВ и консорциумами

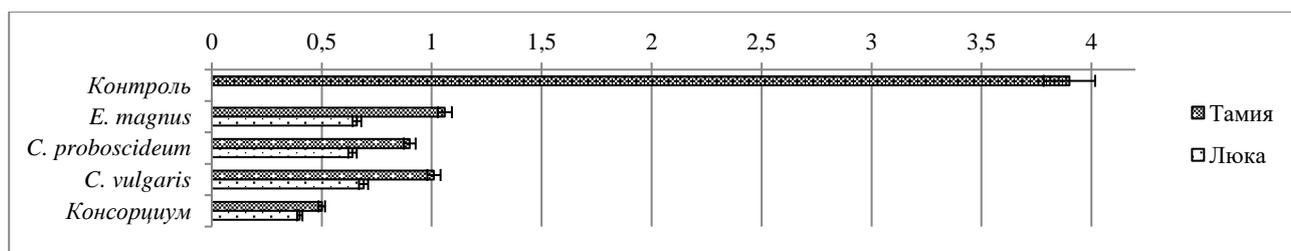


Рисунок 9 – Содержание аммонийного азота (мг/дм^3) в модельной СВ через 24 часа после инокуляции монокультурами МВ и консорциумами

Азот нитратный – образуются как последний этап окисления аммонийного азота. Внесение МВ стимулировало окисление NO_3^- , что привело к его снижению в пробах модельного эксперимента в 1,7-2 раза (рисунок 10).

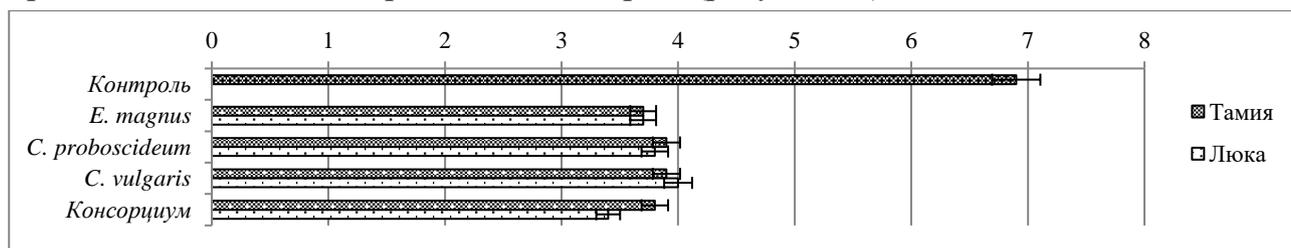


Рисунок 10 – Содержание нитратного азота (мг/дм^3) в модельной СВ через 24 часа после инокуляции монокультурами МВ и консорциумами

Эффективность очистки от **фенолов** в СВ при внесении штаммов *C. vulgaris*, *C. proboscideum*, *E. magnus*, а также их консорциумов составила от 31,5 до 83% (рисунок 11).

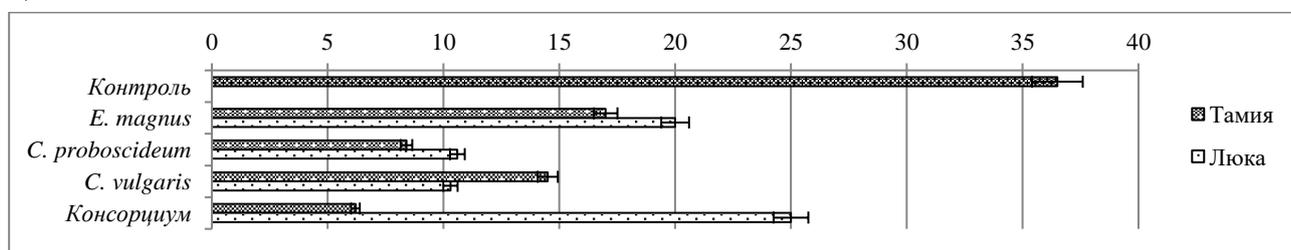


Рисунок 11 – Содержание фенола (мкг/дм^3) в модельной СВ через 24 часа после инокуляции монокультурами МВ и консорциумами

Таким образом, инокулирование монокультурами МВ и их консорциумами СВ привело к снижению концентрации исследованных поллютантов. Консорциум МВ, состоящий из штаммов *C. proboscideum*, *E. magnus*, культивируемый на среде Люка показал наиболее эффективные результаты.

Эффективность очистки сточной воды в зависимости от концентрации клеток в биомассе МВ

Исследовали возможность очистки СВ лесопромышленного предприятия в зависимости от концентрации клеток МВ монокультур и консорциумов. Предполагалось, что с меньшей концентрацией клеток очистка будет более эффективной, так как в процессе интенсивного роста и развития культуры МВ более

эффективно потребляют загрязняющие вещества СВ в качестве элементов питания. Результаты эксперимента по поглощению и трансформации основных загрязняющих веществ микроводорослями с различными концентрациями клеток показали, что монокультуры эффективно очищают СВ при титре клеток 10^6 кл./мл (таблица 3), консорциумы МВ при титре клеток 10^4 кл./мл (таблица 4).

Таблица 3 – Снижение содержания основных загрязняющих веществ в СВ, взятой из аэротенков, при введении в нее штаммов МВ концентрацией клеток 10^6 кл./мл.

Обозначение штаммов	Al,	Фенол	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	N _{общ.}	Fe	P _{общ.}
	мкг/дм ³				мг/дм ³			
<i>E.magnus</i>	+	++	+	+	-	++	++	-
<i>C. proboscideum</i>	++	++	++	+	-	+	-	+
<i>C. vulgaris</i>	+	-	+	++	-	++	-	+
<i>A.obliquus</i>	+	-	++	+	-	-	-	Не опр.

Примечание: "-" - различия выборок не достоверны при $p < 0,95$; "+" - различия выборок достоверны при $p > 0,95$; "++" - различия выборок достоверны при $p > 0,98$.

Таблица 4 – Снижение содержания основных загрязняющих веществ в СВ, взятой из аэротенков при введении в нее консорциумов МВ концентрацией клеток 10^4 кл./мл.

Обозначение консорциумов	Al	Фенол	NO ₃ ⁻	N _{общ.}	Fe	P _{общ.}
	мкг/дм ³		мг/дм ³			
<i>C. vulgaris, C. proboscideum, E. magnus</i>	+	+	+	-	-	+
<i>C. vulgaris, C. proboscideum</i>	-	-	+	-	-	-
<i>C. proboscideum, E. magnus</i>	+	+	+	+	-	+
<i>C. vulgaris, E. magnus</i>	+	-	-	+	-	+
<i>C. vulgaris, A. obliquus</i>	-	-	-	+	-	+

Примечание: "-" - различия выборок не достоверны при $p < 0,95$; "+" - различия выборок достоверны при $p > 0,95$.

Таким образом, после проведенного скрининга коллекционных и аборигенных штаммов МВ, а также их консорциумов выявили 2 монокультуры - *E. magnus* и *C. proboscideum*, введение которых в пробы наиболее эффективно очистило СВ от основных загрязняющих веществ (таблица 3). Консорциум, состоящий из этих же штаммов (*E. magnus* и *C. proboscideum*) оказался оптимальным для снижения в СВ концентрации алюминия, фенолов, фосфора, нитратного и общего азота (таблица 4).

Оценка использования СВ в качестве питательной среды и для накопления биомассы МВ

Провели исследование по возможности культивирования МВ на СВ, образовавшейся в результате хозяйственной деятельности АО «Монди СЛПК».

Внесение в СВ культуры МВ *C. vulgaris*, культивированной на разных средах, способствовало снижению основных загрязняющих веществ в воде (таблица 5). При

этом МВ, культуру которой, получали на СВ, эффективнее снижали содержание алюминия, железа и общего азота (таблица 5).

Таблица 5 – Снижение содержания основных загрязняющих веществ в СВ при введении в нее штаммов МВ *S. vulgaris*, культивированной на разных средах

Среда	Al, %	Фенол, %	NH ₄ ⁺ , %	NO ₃ ⁻ , %	NO ₂ ⁻ , %	N _{общ.} , %	Fe, %
Тамия	34-36	33-35	23-28	1-3	-	3-5	20-25
Люка	32-34	47-50	20-29	16-19	-	3-5	22-24
Сточная вода	61-62	26-28	-	-	64-65	43-45	82-84

Таким образом, СВ, образовавшаяся в результате хозяйственной деятельности АО «Монди СЛПК» может использоваться в качестве питательной среды для культивирования МВ.

Получение биомассы в процессе культивирования МВ на СВ вторичных отстойников СБО АО «Монди СЛПК» с одновременной очисткой СВ

Инокулирование МВ в СВ приводит не только к снижению концентрации загрязняющих веществ, но и к насыщению биомассы МВ макро- и микроэлементами. В то же время, МВ, обладая антисептическими свойствами (Beaulieu et al., 2015; Jena et al., 2019; Muthuraman et al., 2021), обеззараживают СВ и способствуют получению питательной биомассы, которая может быть использована в сельском хозяйстве. Исследовали накопление питательных элементов в процессе культивирования биомассы МВ на СВ отстойников (проба СВМ) и эффективность очистки стоков после осаждения и удаления клеток МВ (проба СВО) (таблица 6).

При культивировании МВ *S. vulgaris* в течение 12 суток в процессе накопления биомассы до концентрации клеток $3,3 \times 10^8$ кл./мл произошло окисление NH₄⁺ на 38 % и NO₂⁻ на 43 % и трансформация фенола на 58 % (проба СВМ). В биомассе произошла аккумуляция PO₄³⁻, S_{общ.}, Ca; небольшое увеличение содержания Mg, K, Na, Cu. Изменение содержания остальных исследованных элементов в пробе произошло в пределах погрешности. После осаждения и удаления МВ из сточной воды (проба СВО) произошло снижение содержания всех исследуемых элементов до норм ПДК.

Таблица 6 – Характеристика экспериментальных проб

Вариант	Цветность, градусы	рН	ВВ	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Cl ⁻
			Содержание, мг/дм ³				
СВ	>500 (942)	8,68±0,2	346±24	0,7±0,3	1,3±0,4	0,023	97±13
СВМ	>500 (884)	8,90±0,2	484±24	0,43±0,17	1,3±0,4	0,013	100±13
СВО	>500 (560)	8,45±0,2	150±14	0,40±0,17	1,1	0,001	45±10
Вариант	PO ₄ ³⁻	P _{общ.}	S _{общ.}	N _{общ.}	Ca	Mg	
	Содержание, мг/дм ³						
СВ	0,13±0,03	0,39±0,12	128±23	2,1±0,4	36±6	8,1±1,2	

Продолжение таблицы 6 – Характеристика экспериментальных проб

СВМ	1,31±0,24	0,61±0,15	131±24	2,0±0,4	86±14	9,3±1,4
СВО	0,09±0,02	0,11±0,04	86±20	1,45±0,3	16±3	3,2±0,8
Вариант	К	Na	Fe	Mn	Zn	Cu
	Содержание, мг/дм ³			Содержание, мкг/дм ³		
СВ	26±4	300±40	0,19±0,05	69±17	<5,0	4,4±1,8
СВМ	30±5	320±50	0,19±0,05	610±110	<5,0	17±7
СВО	11±2	249±34	0,12±0,03	65±17	<5,0	2,1±0,9

Таким образом, при культивировании МВ на СВ вторичных отстойников ЦБОСВ АО «Монди СЛПК» наблюдается очистка сточной воды от загрязняющих элементов за счет аккумуляции их клетками МВ.

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Проведение опытной выработки по увеличению эффективности очистки фенолов на станции биологической очистки СВ (ЦБОСВ) с добавлением штамма МВ *Acutodesmus obliquus* Syko-A Ch-055-12

Основной задачей, поставленной экологами АО «Монди СЛПК» было снижение в СВ фенолов. Для доочистки СВ использовали автохтонный штамм МВ *Acutodesmus obliquus*. Ранее, в лабораторных условиях штамм показал эффективность очистки СВ от фенолов на 94%, а также аккумуляции Fe (снижение в воде в 7,7 раз), усвоению N_{общ.} (8,4 мг/дм³) и PO₄³⁻ (66%) (Щемелинина и др., 2015).

При проведении эксперимента на очистных биомассу МВ концентрацией клеток 10⁶ кл./мл подавали в преаэрактор II ступени в смешанный лоток. Эффективность очистки по фенолам, в среднем, составила 85,9% (max 92,4%). После окончания выработки эффективность составила 72,9%, при этом зафиксировали минимальные концентрации фенолов в поступающих сточных водах.

Проведение опытной выработки по увеличению эффективности очистки от NO₃⁻, PO₄³⁻, Al, фенола на станции биологической очистки СВ с добавлением консорциума штаммов МВ

В большинстве фундаментальных исследований по проблеме удаления фенолов из СВ рассматриваются модельные системы, состоящие из воды и основной примеси – фенолов; при этом всей совокупности сопутствующих веществ не уделяется достаточного внимания. В данной опытной выработке оценили эффективность очистки от NO₃⁻, PO₄³⁻, Al, фенола. Состав консорциума (*A. obliquus*, *C. proboscideum*, *C. vulgaris*) определили исходя из результатов лабораторных экспериментов, а также в учет брали то, что штаммы *A. obliquus* и *C. proboscideum* являлись автохтонными. Консорциум внесен в аэротенки концентрацией клеток 10⁵-10⁶ кл./мл 100 литров. По окончанию эксперимента проведен отбор и анализ проб.

При сравнении двух выработок обнаружили, что содержание фенолов в СВ (вариант контроль) было ниже в 3,5–4,5 раза (0,13–0,18 мг/дм³), чем в предыдущей опытной выработке. После введения МВ в аэротенках наблюдали снижение содержания Al (19-33 %), Fe (3-17 %). Снижение фенола произошло в первые сутки (8-25 %), на 7 сутки произошло снижение NO³⁻ (24-38 %) и фосфат-ионов (17 %).

ИММОБИЛИЗАЦИЯ МВ НА ЦЕОЛИТЫ И ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ ФЕНОЛОВ ВОДЫ

Биосорбционный метод наиболее полно реализует совместный процесс биологической и адсорбционной обработки СВ. В эксперименте провели оценку эффективности использования анальцимсодержащей породы с иммобилизованными МВ (*C. vulgaris*) для очистки воды от фенолов. Микроскопирование биогеосорбента показало наличие клеток МВ на поверхности минерала (рисунок 12), что говорило о способности клеток МВ *C. vulgaris* к пассивной адсорбционной иммобилизации на минеральном носителе.

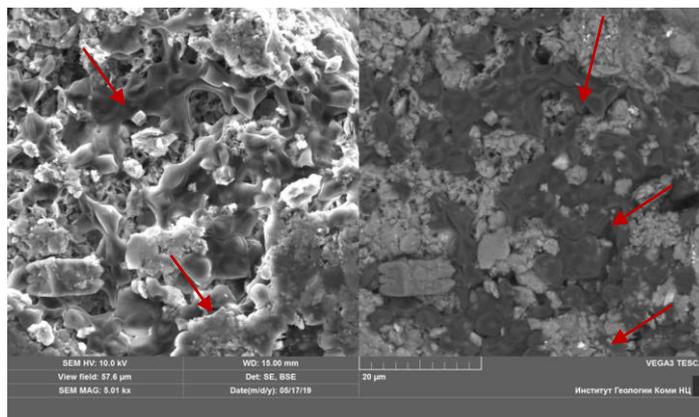


Рисунок 12 – СЭМ-изображения МВ *C. vulgaris*, иммобилизованных на анальцимсодержащей породе

Основной задачей создаваемого биогеосорбента было снижение концентрации фенола в воде до уровня ПДК и замена процесса регенерации сорбента от сорбированного фенола на биоокисление иммобилизованными МВ.

Биодеструкции фенолов осуществлялись одновременно, как связанными, так и свободными МВ за счет частичной десорбции МВ с анальцимсодержащей породы в воду. Микроводоросли могут метаболизировать фенолы посредством гидроксирования и разрыва кольца с помощью фермента лакказы (Otto, 2010).

Комплекс-консорциум (биогеосорбент) из МВ и анальцимсодержащей породы (АМВ) способствовал усилению процессов как сорбции, так и деструкции фенольных соединений в модельной воде, по сравнению с аналогичными процессами, проходящими при внесении в воду только анальцимсодержащей породы (А) или суспензии (МВ). Спустя трое суток адсорбция и процессы биоокисления

зафиксировали во всех вариантах. При увеличении времени установили максимальную очистку от фенолов относительно нулевого контроля (**К0**). В варианте с добавлением биомассы **МВ** окисление фенолов произошло на 74 % за 3 суток и 90 % за 45 суток от начальной концентрации фенолов модельной воды. **А** проявила высокую сорбционную активность по отношению к фенолам – 78 и 97 % от начального контроля за 3 и 45 суток, соответственно. При совместном процессе биологической и сорбционной обработки модельной воды с помощью **АМВ** эффективность очистки от фенолов составила 84 и 98 % от начального контроля за 3 и 45 суток, соответственно.

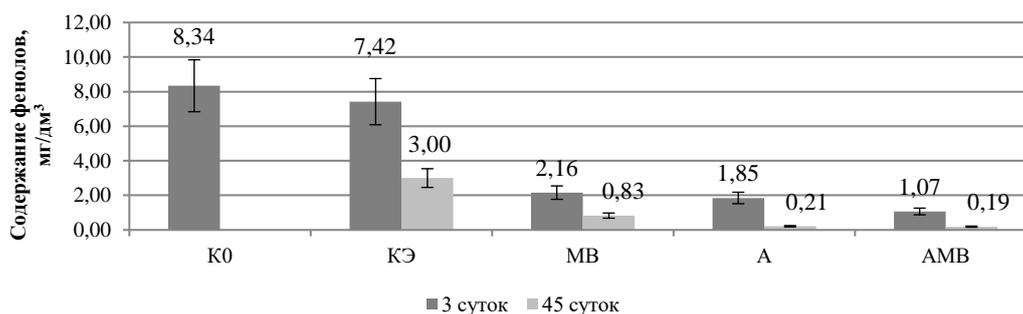


Рисунок 13 – Эффективность очистки воды от фенолов относительно контроля нулевого (**К0**) и контроля экспериментального (**КЭ**), %

При сравнении экспериментальных вариантов с контролем экспериментальным (**КЭ**) получились следующие соотношения за 3 и 45 суток: для варианта с внесением **МВ** – 70 и 72%, **А** – 25 и 93 %, **АМВ** – 82 и 93% (рисунок 13).

Таким образом, **МВ**, анальцимсодержащая порода и биогеосорбент являются эффективными ремедиантами по отношению к фенолам. Отличительной особенностью биогеосорбента и соответственно его преимуществом, является снижение периода очистки при его использовании и отсутствие вторичных отходов за счет биодеструкции фенолов в самом сорбенте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продукция лесопромышленных предприятий является одной из самых распространенных и необходимых товаров в жизни человека. При этом используемые водные ресурсы в процессе производства подвергаются загрязнению. На очистных сооружениях сточные воды в большинстве случаев, не достигая нормативов сбрасываются в водоемы, негативно влияют на экосистему в целом, а в дальнейшем и на здоровье человека. Одним из решений доочистки сточных вод может стать использование микроводорослей. С помощью биотехнологических методов исследования были определены наиболее эффективные культуры микроводорослей и их консорциумы для очистки сточных вод от поллютантов, таких как фенол, фосфаты, сульфаты, общий азот, аммонийный, нитритный, нитратный

азот, металлы. С культурами микроводорослей проведен комплекс лабораторных и опытно-промышленных испытаний, доказывающих эффективность применения микроводорослей для доочистки сточных вод как свободной, так и в иммобилизованной форме.

ВЫВОДЫ

1. Исследована очистка сточных вод лесопромышленного комплекса Акционерного общества «Монди СЛПК» от основных загрязняющих веществ (фенола, фосфатов, сульфатов, общего азота, аммонийного, нитритного, нитратного азота, металлов) с помощью монокультур микроводорослей (*Coelastrum proboscideum*, *Eustigmatos magnus*, *Chlorella vulgaris* и *Acutodesmus obliquus*) и их консорциумов. Экспериментально выявлено, что наиболее эффективными в очистке от биогенных элементов и биотрансформации органических загрязнителей, являются штаммы микроводорослей *C. proboscideum* IPPAS C-2055 (удаление Al на 11-35 %, Fe на 19 %, P_{общ.} на 21-64 %, N_{общ.} на 15-25 %, NO₃⁻ на 10 %, фенолы на 51 %), *E. magnus* ВКПМ А1-25 (удаление Al на 6-41 %, Fe на 16-35,7 %, N_{общ.} на 30 %, P_{общ.} на 19-78 %, NO₃⁻ на 53 %, фенолы на 30 %), *C. vulgaris* (удаление Al на 6-14 %, Fe на 14%, P_{общ.} на 50 %, N_{общ.} на 58 %, NO₃⁻ на 17 %) и консорциум, состоящий из культур *C. proboscideum*, *E. magnus* (удаление Al на 12 %, Fe на 20-39,3 %, P_{общ.} на 24 %, S_{общ.} на 16 %, N_{общ.} на 18-64 %, NO₃⁻ на 13 %, NH₄⁺ на 87-90 %, фенолы на 31,5-83 %).

2. Сравнительный анализ эффективности очистки сточных вод от основных загрязняющих веществ с помощью монокультур микроводорослей (*Eustigmatos magnus*, *Coelastrum proboscideum*, *Acutodesmus obliquus*, *Chlorella vulgaris*) и их консорциумов (*Coelastrum proboscideum*, *Eustigmatos magnus*), культивированных на разных питательных средах (Люка и Тамия) показал, что наиболее эффективные результаты достигнуты при инокуляции в воду консорциума микроводорослей, состоящего из штаммов *Coelastrum proboscideum* IPPAS C-2055, *Eustigmatos magnus* ВКПМ А1-25, культивированного на среде Люка.

3. Результаты исследования очистки сточных вод в зависимости от концентрации клеток микроводорослей (титр клеток 10⁴, 10⁵, 10⁶ кл./мл) показали, что наиболее эффективная очистка от основных загрязняющих веществ в сточной воде происходила при введении консорциума микроводорослей *Coelastrum proboscideum* и *Eustigmatos magnus*, культивированного на среде Люка титром клеток 10⁴ кл./мл. (Al на 12 %, Fe на 20 %, P_{общ.} на 24 %, N_{общ.} на 18 %, NO₃⁻ на 13 %).

4. Установлено, что сточная вода вторичных отстойников цеха биологической очистки сточных вод лесопромышленного предприятия Акционерного общества «Монди СЛПК» может быть использована как питательная среда для

культивирования микроводорослей с целью получения богатой аминокислотами, фосфатами, серой, кальцием, магнием, калием, натрием, медью биомассы с одновременной трансформацией микроводорослями загрязняющих веществ (окисление аммонийного азота на 38 %, нитритного азота на 43 %, фенола на 58 %).

5. Оценены свойства монокультуры и консорциума микроводорослей в эксперименте, проводимом в сточных водах аэротенков цеха биологической очистки сточных вод Акционерного общества «Монди СЛПК»: автохтонный штамм микроводорослей *Acutodesmus obliquus* IPPAS S-2016 эффективен для очистки сточных вод от фенольных соединений (до 73%); консорциум микроводорослей (*Acutodesmus obliquus* IPPAS S-2016, *Coelastrum proboscideum* IPPAS C-2055, *Chlorella vulgaris* IPPAS C-2024) снижает концентрацию алюминия до 33 %, железа до 17 %, фенола до 25%, нитратного азота до 38 %, фосфат-ионов до 17 %.

6. Испытание микроводорослей в иммобилизованной форме показало снижение в модельной воде концентрации фенолов (на 82 - 93 %) и уменьшение периода очистки от загрязняющих веществ, что было более эффективно по сравнению с использованием микроводорослей в свободной форме.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ

Полученные данные позволяют рекомендовать использование консорциума микроводорослей, состоящего из штаммов *Coelastrum proboscideum* IPPAS C-2055, *Eustigmatos magnus* ВКПМ А1-25 и консорциума микроводорослей, состоящего из штаммов *Acutodesmus obliquus* IPPAS S-2016, *Coelastrum proboscideum* IPPAS C-2055, *Chlorella vulgaris* IPPAS C-2024 для очистки сточной воды предприятий лесопромышленного комплекса от биогенных и органических загрязнителей. Технология периодического внесения консорциума микроводорослей в сточную воду позволит снизить нагрузку загрязняющих веществ на водные экосистемы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science, Scopus и ВАК

1. **Гогонин, А. В.** Оценка использования сточной воды в качестве питательной среды для накопления биомассы микроводорослей / **А.В. Гогонин**, Т.Н. Щемелинина, Е.М. Анчугова. // **Теоретическая и прикладная экология.** – 2022. – С. 68–74 (WoS/Scopus).

2. **Гогонин, А.В.** Применение микроводорослей в очистке сточных вод, содержащих отходы целлюлозно-бумажного производства и коммунальные стоки /

А.В. Гогонин, Т.Н. Щемелинина, И.В. Новаковская, Е.Н. Патова, Е.М. Анчугова, В.А. Лукьянов, Т.Н. Гаева, В.В. Володин // **Вестник Биотехнологии Физико-Химических Биологии имени Ю.А. Овчинникова**. – 2021. – Т. 17(4). – С. 24–33 (ВАК).

3. Shchemelinina, T.N. Why mineral carriers are needed for microalgae / T.N. Shchemelinina, E.M. Anchugova, O.B. Kotova, S. SUN, D.A. Shushkov, **A.V. Gogonin**, N.V. Likhanova, O.M. Zueva, Yu.S. Korchagina // **Vestnik Geosciences**. – 2020. – No. 2. – P. 25-29 (ВАК).

Патенты

4. **Патент РФ 2703499**, (51) МПК C12N 1/12, C02F 3/34, C12R 1/89, (52) СПК C12N 1/12, C02F 3/34, C12R 1/89. Штамм МВ *Chlorella vulgaris* Beijer. f. *globosa* V. Andr. для очистки природных водоемов и сточных вод промышленных предприятий [Текст] / Щемелинина Т.Н., Анчугова Е.М., **Гогонин А.В.**, Тарабукин Д.В., Шапенков Д.М. ; заявитель и патентообладатель Щемелинина Т.Н., Анчугова Е.М., Гогонин А.В., Тарабукин Д.В., Шапенков Д.М. – № 2018120704 ; опубл. 17.10.2019. Бюл. № 29. – 9 с.

Другие публикации

5. **Гогонин, А.В.** Очистка сточных вод лесопромышленного комплекса микроводорослями *Chlorella vulgaris* / **А.В. Гогонин**, Т.Н. Щемелинина, В.А. Лукьянов // Материалы XV Всероссийской с международным участием научно-практической конференции «Экология родного края: проблемы и пути их решения» – 2020 – г. Киров, – С. 87-90.

6. **Гогонин, А.В.** Влияние консорциума микроводорослей на изменение содержания общего азота, алюминия и железа в сточной воде аэротенков / **А.В. Гогонин**, Е.М. Анчугова // Материалы докладов XXVI Всероссийской молодежной научной конференции (с элементами научной школы), посвященной 75-летию А.И. Таскаева «Актуальные проблемы биологии и экологии». – Сыктывкар. – 2019. – г. Сыктывкар, – С. 148-151.

7. **Гогонин, А.В.** Сравнительная оценка экологобиотехнологических свойств микроводорослей *Chlorella vulgaris* f. *globosa*, выращенных на разных питательных средах / **А.В. Гогонин**, Т.Н. Щемелинина // Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем». – 2019. – г. Киров, – С. 271-275.

8. **Гогонин, А.В.** Создание консорциума микроводорослей с оптимальным составом и титром клеток / **А.В. Гогонин**, И.В. Новаковская // Материалы докладов III Всероссийской (XVIII) молодежной научной конференции (с элементами научной школы) «Молодежь и наука на Севере». – 2018. – г. Сыктывкар, – С. 80-81.

9. **Гогонин, А.В.** Сравнительная оценка эффективности очистки сточных вод при внесении монокультур и консорциумов микроводорослей / **А.В. Гогонин, Т.Н. Щемелинина, В.В. Володин** // Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем». – 2018. – г. Киров, – С. 200-203.

10. **Гогонин, А.В.** Использование микроводорослей для очистки сточных вод / **А.В. Гогонин, И.В. Новаковская** // Материалы докладов: XXIV Всероссийская молодежная научная конференция (с элементами научной школы), посвященная 55-летию Института биологии Коми НЦ УрО РАН «Актуальные проблемы биологии и экологии». – 2017. – г. Сыктывкар, – С. 171-174.

11. **Гогонин, А.В.** Использование микроводорослей в процессе очистки сточных вод целлюлозно-бумажного предприятия / **А.В. Гогонин, Т.Н. Щемелинина, В.В. Володин, Е.Н. Патова, И.В. Новаковская** // Материалы XV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем». – 2017. – г. Киров. – С. 13-16.

12. **Гогонин, А.В.** Микроводоросли в очистке сточных вод / **А.В. Гогонин, Т.Н. Щемелинина, Е.Н. Патова, И.В. Новаковская** // Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем». – 2016. – г. Киров., – С. 379-381.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АО Монди СЛПК – Акционерное Общество "Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс"

ООО – общество с ограниченной ответственностью

ПДК – предельно допустимая концентрация

СВМ – сточная вода из отстойников с внесенными микроводорослями

СВО – сточная вода из отстойников после осаждения и удаления микроводорослей

ЦБОСВ – цех биологической очистки сточных вод.