



Л. А. Иванова, В. А. Мязин, М. В. Корнейкова, Н. В. Фокина,
Г. А. Евдокимова, В. В. Редькина

ПОРА ОЧИЩАТЬ АРКТИКУ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ СЕВЕРА
ИНСТИТУТ ХИМИИ И ТЕХНОЛОГИИ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
И МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ИМ. И. В. ТАНАНАЕВА
ПОЛЯРНО-АЛЬПИЙСКИЙ БОТАНИЧЕСКИЙ САД-ИНСТИТУТ
ИМ. Н. А. АВРОРИНА ФИЦ КНЦ РАН

**Л. А. Иванова, В. А. Мязин, М. В. Корнейкова, Н. В. Фокина,
Г. А. Евдокимова, В. В. Редькина**

**ПОРА ОЧИЩАТЬ АРКТИКУ.
СОЗДАНИЕ ФИТООЧИСТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ
ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГОРНОРУДНЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА**



Издательство Кольского научного центра
2021

DOI: 10.37614/978.5.91137.449.5

УДК 622.5

ББК 28.5

П59

Печатается по решению Редакционного совета Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»

П59 Пора очищать Арктику. Создание фитоочистной системы для доочистки сточных вод горнорудных предприятий от минеральных соединений азота / Л. А. Иванова, В. А. Мязин, М. В. Корнейкова, Н. В. Фокина, Г. А. Евдокимова, В. В. Редькина ; ответственный редактор канд. биол. наук Е. А. Боровичев. — Апатиты : Издательство Кольского научного центра, 2021. — 88 с.: ил.

ISBN 978-5-91137-449-5

Обобщен многолетний опыт исследований по разработке перспективной и малозатратной инновационной технологии создания фитоочистной системы (ФОС) для доочистки сточных и карьерных вод от нитрат-ионов, нитрит-ионов и ионов аммония на действующих горнопромышленных предприятиях в Арктической зоне РФ. Технология базируется на естественных механизмах преобразования техногенных водоемов в природоподобную болотную экосистему для повышения эффективности доочистки промышленных стоков. В основе предлагаемой технологии лежит комплексное использование четырех инновационных фитомодулей для создания оптимальных условий для роста и развития аборигенных растений на всех стадиях онтогенеза. Входящие в ФОС фитомодули отличаются простой конструкции, что позволяет предлагать инновационную технологию для малого предпринимательства как бизнес-идею с минимальными вложениями.

Представленные материалы могут быть полезны экологическим службам промышленных и коммунальных предприятий, заинтересованным в проведении работ по очистке водоемов от минеральных загрязнений.

УДК 622.5
ББК 28.5

Научное издание

Редактор С. А. Шарам

Технический редактор В. Ю. Жиганов

Подписано в печать 19.05.2021. Формат бумаги 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 5.11. Заказ № 12. Тираж 500 экз.



Электронная версия: <https://inep.ksc.ru>

Методические рекомендации изданы при финансовой поддержке экспертного центра «Проектный офис развития Арктики (ПОРА)»

ISBN 978-5-91137-449-5

© Л. А. Иванова, В. А. Мязин, М. В. Корнейкова,
Н. В. Фокина, Г. А. Евдокимова, В. В. Редькина, 2021
© ИППЭС КНЦ РАН, 2021
© ФИЦ КНЦ РАН, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В СТОЧНЫХ ВОДАХ	6
ТРАДИЦИОННЫЕ СПОСОБЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	7
АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СПОСОБЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	12
Современная классификация конструкций ФОС	15
Механизм очистки промышленных сточных вод от соединений азота при использовании фитотехнологий	16
Принципы построения ФОС	17
Факторы, влияющие на эффективность очистки воды	19
РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ФИТООЧИСТНОЙ СИСТЕМЫ (ФОС) ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГОРНОРУДНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ	23
Климатические условия Мурманской области	23
Опыт применения фитоочистных сооружений в северных регионах	24
Характеристика объекта проведения исследования	25
Этап I. Разработка ФОС для доочистки карьерных вод с использованием плавающих фитомодулей	31
Этап II. Модернизация ФОС с использованием фитомодулей нового поколения. Их функции и конструкционные особенности	44
Фитоматы	44
Фитосадки	48
Фитотубусы	53
АССОРТИМЕНТ ВЫСШИХ ВОДНЫХ И ОКОЛОВОДНЫХ РАСТЕНИЙ, РЕКОМЕНДУЕМЫЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ФОС В УСЛОВИЯХ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ	58
СУБСТРАТЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ФИТОМАТОВ И ПОСТРОЕНИЯ ФОС ..	73
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ КАРЬЕРНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОС В УСЛОВИЯХ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	77
СЛОВАРЬ НЕКОТОРЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ	78
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	80

ВВЕДЕНИЕ

Состояние природной среды во многом зависит от степени ее загрязнения в результате деятельности человека. Немалый вклад в это вносят промышленные отходы предприятий, в том числе сточные воды. В Мурманской обл. функционируют различные промышленные предприятия, одно из них — Оленегорский горно-обогатительный комбинат (АО «Олкон»). Комбинат разрабатывает месторождения Заимандровского железорудного района и является самым северным в России производителем концентрата железной руды. Добыча осуществляется открытым и комбинированным способами с применением взрывчатых веществ, содержащих нитрат аммония, нитрометан, нитрит натрия и другие химические компоненты. В результате проходки горных выработок с использованием буровзрывных работ сопровождается загрязнением шахтных и сбрасываемых карьерных вод соединениями азота [Методы снижения..., 2017]. От 20 до 30 % азота, содержащегося во взрывчатых веществах, попадает в технологический процесс с рудой, удаляется с пустой породой и сбрасывается с карьерной водой [Mattila et al., 2007], из них до 1 % поступает со стоками в природные водоемы, загрязняет грунт и подземные воды. В конечном итоге токсины попадают в организм человека, вызывая различные заболевания [On the fit of statistical..., 2011]. Единственной возможностью избежать негативных последствий является очистка промышленных сточных вод от соединений азота. Это актуальная и достаточно специфичная проблема, универсального решения которой не существует, поскольку все соединения азота, за исключением фосфорнокислого аммоний-магния, хорошо растворимы в воде и не могут быть удалены в результате химического взаимодействия. Ситуацию усугубляют большие объемы сбрасываемых сточных вод, их состав, специфика предприятий (конкретные особенности технологического процесса), уровень организации каждого вида работ [Атавина, 2018], что требует индивидуального подхода к выбору способа очистки сточных вод для каждого конкретного промышленного объекта и природной зоны в том числе.

Исследования по разработке технологий эффективной доочистки карьерных вод от соединений азота в условиях Крайнего Севера

проводятся с 2012 г. в Кольском научном центре. Инициатором этих работ выступила доктор биологических наук Г. А. Евдокимова (ИППЭС КНЦ РАН). Сначала они носили сугубо поисковый характер и предназначались для внедрения на отстойнике Кировогорского карьера АО «Олкон». Исследование включало серию лабораторных, пилотных полевых и многолетних опытно-промышленных экспериментов.

В результате была разработана малозатратная инновационная технология создания фитоочистных систем (ФОС) с использованием плавающих фитомодулей и подобран ассортимент аборигенных видов растений, дающих большую биомассу в условиях Севера. В дальнейшем проводилась оптимизация этой технологии, модернизация конструкции плавающего биоплата с целью повышения его устойчивости к изменению уровня воды в отстойнике и его механической прочности. В итоге в дополнение к плавающим фитомодулям были разработаны фитоматы, садковые фитомодули (фитосадки) и фитотубусы. Их комплексное использование позволило оптимизировать условия для интенсивного роста и развития растений, и формировать разные комбинации растительных блоков (фитоценозов), предназначенных для локального зарастания прибрежных территорий и заболачивания глубоко- и мелководных участков водоемов. Инновационные фитомодули и растения, рекомендуемые для формирования ФОС, быстро включаются в природный биогеохимический цикл, могут применяться в разных комбинациях.

Предлагаемый комплексный подход к формированию биологической системы очистки карьерных вод осуществлен впервые в условиях действующего предприятия в Арктической зоне РФ. Настоящая брошюра является логическим продолжением методических рекомендаций «Пора озеленять Арктику. Инновационные газонные технологии для создания травяного покрова различного назначения в условиях Заполярья» [2020].

Основные результаты, которые легли в основу настоящих методических указаний, получены в результате выполнения государственных заданий ИППЭС КНЦ РАН и ПАБСИ КНЦ РАН, а также при организационной и финансовой помощи «Оленегорского горно-обогатительного комбината (АО «Олкон»). Издание подготовлено и опубликовано при финансовой поддержке экспертного центра «Проектный офис развития Арктики (ПОРА)».

ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В СТОЧНЫХ ВОДАХ

Согласно ст. 44 Водного кодекса РФ¹, «использование водных объектов для целей сброса сточных, в том числе дренажных, вод осуществляется с соблюдением требований, предусмотренных настоящим Кодексом и законодательством в области охраны окружающей среды».

В целях предотвращения негативного воздействия на окружающую среду устанавливаются нормативы допустимых концентраций загрязняющих веществ в сточных водах, поступающих в системы водоотведения предприятия, основным из которых является ПДК_в — предельно допустимая концентрация вредного вещества в воде (выражается в миллиграммах вещества на 1 л воды, мг/л). Превышение установленных ПДК наносит вред флоре и фауне водоема и требует проводить очистку стоков.

При сбросе сточных вод непосредственно в водный объект промышленные предприятия руководствуются ПДК, установленными в СанПин 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» и в приказе № 552 Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (с изм. на 10 марта 2020 г.)». Нормативы ПДК едины на всей территории России, и их применение не зависит от природно-климатических, геохимических, гидрохимических и гидрологических особенностей водоемов. Штрафы за несоблюдение природоохранного законодательства и превышение нормативов загрязняющих веществ становятся все более высокими, в связи с чем необходима разработка и внедрение новых эффективных очистных сооружений.

¹ Водный кодекс РФ от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 08.12.2020) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2021).

ТРАДИЦИОННЫЕ СПОСОБЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Для очистки сточных вод используют следующие методы²:

- *механические* (отстаивание и фильтрация) — очистка проводится в несколько этапов в искусственных резервуарах или водоемах, где под действием силы гравитации происходит осаждение взвешенных частиц, что позволяет удалить из промышленных стоков до 95 % нерастворимых крупных твердых минеральных частиц и снизить концентрацию нерастворимых органических жидкостей на 25 % (рис. 1);



Рис. 1. Отстойники³ механической очистки сточных вод: радиальный (а) и горизонтальный (б)

- *химические* (нейтрализация, окисление и восстановление, включая электрохимические превращения) — очистка проводится в емкостях-реакторах и основывается на введении в водный поток химических реагентов для перевода растворенных загрязняющих веществ в нерастворимое состояние. Данные методы используются для удаления тяжелых металлов (медь, ртуть, цинк, хром) и иных вредных компонентов (цианиды, мышьяк), которые нецелесообразно извлекать другими способами;

² URL: <https://kvanta.ru/ochistka-vody/promyshlennye-stochnye-vody-normativy-i-metody-ochistki> (дата обращения: 24.01.2021).

³ Отстойники: радиальный (https://studfile.net/html/18237/583/html_TeJ480A2C8.ZE4l/img-DHRy7A.jpg), горизонтальный (<https://musorish.ru/wp-content/uploads/2018/12/skrebkovyy-mehanizm-dlya-gorizontalnyh-otstoynikov.jpg>).

- *физико-химические* (коагуляция, флокуляция, флотация, сорбция и ионный обмен, реже — экстракция и эвапорация) — используются для очистки сточных вод с растворенными и нерастворенными соединениями с применением реагентов, расщепляющих органические загрязнения, и позволяющих выводить их остатки;

- *биологические* (биологические пруды, анаэробная очистка, аэробная очистка) — позволяют очищать сточную воду от органики и снижать значения БПК (биохимическое потребление кислорода) и ХПК (химическое потребление кислорода). В их основе лежит способность микробиоты превращать загрязняющие вещества, используя их как питательные субстраты, в безвредные соединения. Анаэробные микроорганизмы применяются в основном для обезвреживания осадков, работают только в бескислородном пространстве в специальных емкостях (рис. 2). Загрязняющие вещества сорбируются активным илом и окисляются микроорганизмами. Процесс, называемый брожением, позволяет очищать сточные воды на 85 %.

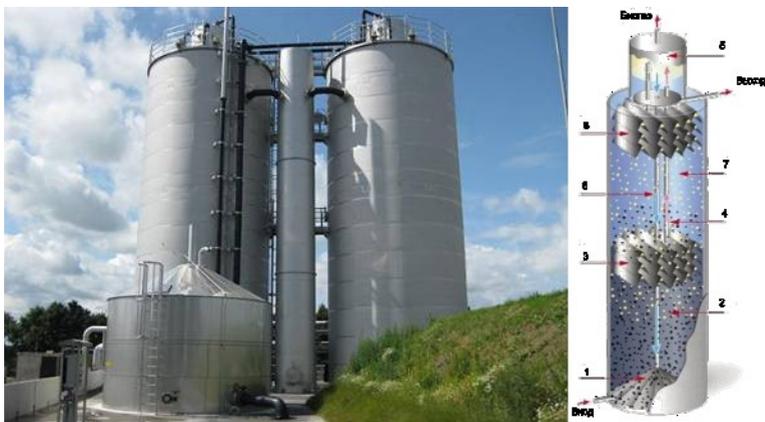


Рис. 2. Анаэробный реактор с внутренней циркуляцией⁴

⁴ URL: <http://myproject.msk.ru/assets/images/collections/404/biogaz2.png> (дата обращения: 26.01.2021).

Аэробные микроорганизмы проводят превращение субстратов только в присутствии кислорода. Они широко применяются для очистки стоков и могут использоваться как в искусственных сооружениях, так и в естественных условиях (поля орошения, специальные прудах (рис. 3).

Общая продолжительность пребывания стоков в биологических прудах составляет несколько дней, процесс может осуществляться на нескольких ступенях. В ходе аэробной очистки в аэротенках и биофильтрах растворенные органокомплексы переходят в биомассу активного ила. Протекание окислительных процессов и перемешивание сточных вод с активным илом происходит за счет подачи воздуха. Система очистки стоков может осуществляться различными методами поэтапно или совместно. Вклад каждого из методов индивидуально определяется для конкретного предприятия и зависит от состава загрязняющих веществ.



Рис. 3. Аэротенк для биологической очистки сточных вод⁵

Наиболее распространенными способами удаления азотистых соединений из промышленных сточных вод признаны ионный обмен, каталитическое окисление, обратный осмос и биологическая очистка. Финскими исследователями совместно с основными крупными

⁵ URL: https://musornyi.ru/uploads/posts/2019-11/zhbo-rasshifrovka_3.jpg (дата обращения: 26.01.2021).

горнодобывающими предприятиями Финляндии был осуществлен масштабный проект KAIRA, направленный на изучение проблемы очистки шахтных вод от соединений азота [Mattila et al., 2007]. В ходе исследований были определены основные источники соединений азота и пути их дальнейшего распространения в технологическом процессе. На первом этапе был изучен процесс осмотической фильтрации и концентрирования биогенных веществ из загрязненных стоков разных предприятий. Затем проводилось высокоскоростное биологическое удаление общего азота из холодных карьерных вод путем сочетания биопленочных реакторов с нитрифицирующими и денитрифицирующими бактериями, также осуществлялось биологическое удаление соединений азота из холодного олиготрофного концентрата, полученного методом обратного осмоса. Экономические расчеты позволили дать оценку эффективности процесса предварительной очистки шахтной воды этим методом с последующим использованием биопленочных реакторов для полного удаления азота. Показано, что эффективность методов, разработанных в рамках проекта KAIRA, сопоставима с эффективностью муниципальных очистных сооружений, использующих высокопроизводительную биореакторную систему с биопленками. С помощью технологии обратного осмоса из шахтных вод удаляется более 90,7 % азота нитратов и более 86,1 % азота аммония, ориентировочная стоимость очистки шахтных вод этим способом составляет 0,31–0,34 евро/м³.

Трансформация аммония в газообразный азот посредством нитрификации и денитрификации в биореакторах с активным илом с 1996 г. успешно применялась в процессе биологического удаления цианида и тиоцианата из стоков хвостохранилищ на руднике в Хоумстейке (Британская Колумбия, Канада) [Combined aerobic..., 1998; Given, Meyer, 1998]. Общие эксплуатационные расходы при данном способе очистки сточных вод составили около 0,01 евро/м³, из них около 5 % расходов пришлось на подогрев, так как для нитрификации требуется температура выше 10 °С, еще 5 % — на метанол, используемый в качестве источника углерода при денитрификации в соотношении 3 кг метанола на 1 кг азота нитратов.

Полномасштабная денитрификация карьерных вод также проводилась на двух шахтах в Монтане неподалеку от национального

парка Йеллоустон в США при температуре всего 2 °С. Производительность денитрифицирующего биореактора в данном случае составила 4,2 м³/мин, а эксплуатационные расходы находились в диапазоне от 0,08 до 0,20 евро/м³ [Reinsel, 2001].

Традиционные подходы к очистке промышленных стоков постоянно совершенствуются в результате внедрения новых технологий и современного оборудования. Например, мембранные технологии обладают высокой эффективностью отделения примесей за счет использования фильтрующих материалов, подобранных с учетом состава сточных вод. Используется и комплексный подход, при котором комбинируются традиционные и усовершенствованные методы. Несмотря на это, они не получили широкого внедрения на территории Российской Федерации и постепенно теряют свою популярность в мире. Одними из главных критериев при выборе и оценке их эффективности, наряду с долей удаляемых загрязняющих веществ, является также объем капитальных и эксплуатационных затрат для очистки единицы объема сточной воды, сложность в обслуживании и климатические ограничения использования [Вурдова, Фомичев, 2001; Инженерная защита..., 2002; Ксенофонов, 2003; Хенце, 2004]. Поэтому в мире продолжается активный поиск, разработка и применение наиболее эффективных, экологически и экономически приемлемых альтернативных методов, направленных на очистку производственных сточных вод, позволяющих сократить потребление ресурсов и снизить образование отходов при очистке сточных вод [Водоотведение, 2007].

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СПОСОБЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В последнее время традиционные методы очистки и доочистки сточных вод дополняются новыми перспективными фитотехнологиями, основанными на использовании водных растений. Эти технологии находят применение и для экологической реконструкции водных объектов [Доочистка сточных вод..., 2017].

Водоочистные системы, построенные с использованием фитотехнологий, относятся к классу новых водоохраных сооружений и представляют собой болотоподобные, аналогичные естественному природному ландшафту, системы. Фитосистемы объединяют в себе основные технические элементы сооружений, предназначенных для очистки сточных вод от содержащихся в них загрязнений с помощью водной растительности и микробных сообществ, развивающихся в их корневой зоне и на иных субстратах в водной среде. Очищенная вода либо используется в дальнейшем, либо сбрасывается в природные водоемы. В мире подобные фитосистемы носят следующие названия: constructed wetlands, биолато, ФОС (фитоочистные системы или сооружения), БИС (биоинженерные сооружения). Они могут различаться конструктивно, но основная цель их применения — снижение уровня биогенного загрязнения [Остроумов, 2006].

Фитоочистные сооружения имеют вид искусственно созданных водных бассейнов произвольной формы: мелких озер, заболоченных участков или болот. В их основании или бортах располагается фильтрующая загрузка из песка, щебня или других подобных субстратов, в которую высажены водные растения. Водная поверхность этих объектов частично или полностью покрыта закрепленной или плавающей высшей водной растительностью (рис. 4). Загрязненная вода, проходя через заросли растений, корнеобитаемый слой и фильтрующую загрузку, очищается в ходе природных процессов до экологически приемлемого состояния, достаточного для их сброса в водные объекты.

Основная сфера применения фитосистем — очистка и доочистка хозяйственно-бытовых сточных вод, поверхностного стока пищевого и сельскохозяйственного производства, промышленных предприятий и жилых массивов. Кроме функций биоинженерного сооружения, ФОС

создают пространственную неоднородность в антропогенных ландшафтах и предоставляют дополнительную среду обитания и пищевые ресурсы для различных видов флоры и фауны, что создает благоприятные условия для поддержания биоразнообразия. Применение принципов ландшафтного дизайна в проектировании и строительстве ФОС позволяет использовать декоративные возможности таких сооружений для улучшения эстетического восприятия антропогенных водоемов [Стольберг и др., 2003].



Рис. 4. Заросли высшей водной растительности в городском пруду г. Пскова. Фото В. Мязина

Первые искусственные сооружения для очистки сточных вод, основанные на природных механизмах, были созданы в Австралии в начале XX в. Исследования в этой области в Европе начались в 1950-х, а в США — в 1970-х гг. [Patrick, 1998]. После этого фитотехнологии для очистки сточных вод стали массово развиваться во многих странах благодаря доступности и относительно высокой эффективности очистки сточных, а спрос на подобные проекты резко вырос [Constructed Wetlands Treatment..., 1999; Jin et al., 2002; Ran et al., 2004; Application..., 2014; Vymazal, 2014].

В настоящее время фитосистемы признаются как популярный и экономичный альтернативный способ очистки промышленных сточных вод от различных видов загрязняющих веществ и создаются практически во всех природно-климатических зонах от Норвегии до Австралии (в

основном в Северной Америке, Европе, Юго-Восточной Азии и Океании) [Применение биолато..., 2009; Vymazal, 2010]. Так, в США и в странах Евросоюза искусственные ФОС рассматриваются как часть системы устойчивого развития и возобновляемого природопользования и используются для очистки промышленных и муниципальных сточных вод [R&D priorities in the field..., 2015]. В Китае в последнее десятилетие возросло количество проводимых исследований в области фитотехнологий и реализованных проектов сооружений для очистки сточных вод [Казмирук, Казмирук, 2013, 2015]. Большой популярностью фитоинженерные системы очистки сточных вод пользуются в Украине [Захарченко, Рыжикова, 2005; Применение биолато..., 2009; Zakharchenko et al., 2006]. В России также активно проводятся исследования в этом направлении. Например, в Томской обл. для очистки хозяйственно-бытовых сточных вод было предложено использовать биологические пруды с болотной растительностью, представляющие собой специально подготовленные участки торфяных болот либо участки с минеральным грунтом, на которые предварительно нанесен торфяной грунт [Савичев, 2008].

По результатам анализа мирового опыта использования водно-болотных систем с высшей водной растительностью для очистки сточных вод был отмечен ряд достоинств: возможность применения для широкого ряда загрязнителей и очистки воды до нормативных показателей; отсутствие вторичного загрязнения и негативных побочных эффектов. ФОС просты в эксплуатации, способны к самоподдержанию и самовосстановлению, остаются эффективными в течение длительного времени при непрерывном использовании. Сооружение ФОС не требует высокой квалификации кадров и специального оборудования, может осуществляться из недорогих местных материалов. Наибольшая эффективность очистки достигается по показателям БПК и ХПК, содержанию соединений азота и фосфора, взвешенных веществ, в некоторых случаях она составляет 98 % [Казмирук и др., 2004; Казмирук, 2013].

Таким образом, перечисленные преимущества ФОС делают их хорошей альтернативой традиционным методам очистки сточных вод ввиду отсутствия ограничений использования.

Современная классификация конструкций ФОС

Принципиальным отличием искусственных фитоочистных систем, кроме формы сооружений и различий в видовом составе используемых высших водных растений, является наличие или отсутствие свободной поверхности воды. Сооружения без свободной поверхности воды могут быть с горизонтальным или вертикальным движением потока очищаемой воды (рис. 5). В последних возможно движение загрязненной воды сверху-вниз или снизу-вверх [Применение биоплато..., 2009]. Сооружения с подповерхностным течением воды, как правило, более эффективны, чем со свободной водной поверхностью [Kadlec, Wallace, 2008; Казмирук, Казмирук, 2016].

В комбинированных системах на отдельных участках используются различные схемы для создания оптимальных условий аэрации воды и субстрата, а также комфортных условий для существования растений и сопутствующих им микроорганизмов.

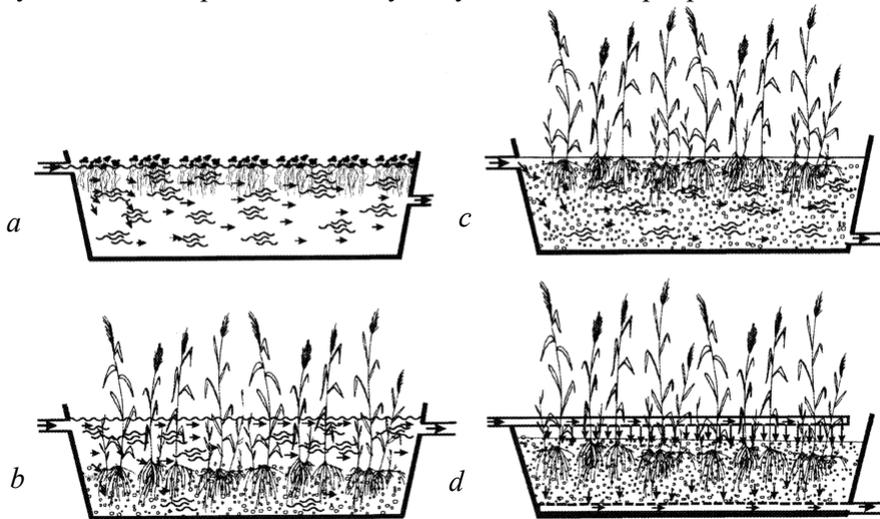


Рис. 5. Типы ФОС по направлению движения потока:

- a* — биоплато с открытой водой и свободно плавающими растениями;
- b* — биоплато с горизонтальным поверхностным потоком;
- c* — биоплато с горизонтальным подповерхностным потоком;
- d* — биоплато с вертикальным потоком [Stottmeister et al., 2003]

Наряду с традиционными направлениями очистки и извлечения биогенных и органических веществ, тяжелых металлов и радионуклидов, появились фитотехнологии по очистке вод от медицинских препаратов. Получили распространение методы селекции и генетической модификации растений с целью получения желаемых характеристик, использования наночастиц, биофумигации, совмещения водоочистки с производством биотоплива [Казмирук, Казмирук, 2015].

Механизм очистки промышленных сточных вод от соединений азота при использовании фитотехнологий

Вне зависимости от типа ФОС и применяемых в них видов растений очистка воды в этих сооружениях происходит по единым физико-химическим и биохимическим механизмам: адсорбция-десорбция, ассимиляция-диссимиляция, окисление-восстановление, эвапотранспирация.

Общее содержание азота в воде определяется его нахождением в четырех формах: твердые частицы органического азота, твердые частицы неорганического азота, растворенный органический азот и растворенный неорганический азот. Неорганический азот растворим в воде и представлен ионами аммония (NH_4^+), нитрата (NO_3^-) и нитрита (NO_2), обладает высокой реакционной способностью и в первую очередь ассимилируется водорослями и растениями, превращаясь в органический азот биомассы [A review..., 2013]. Часть азота трансформируется в оксиды азота или газообразный азот в процессах нитрификации и денитрификации, анаммокс-процесса (анаэробное окисление аммония) и биоразложения [Microbial processes..., 2009]. Азот в виде твердых частиц осаждается и накапливается в донных осадках. Среди всех процессов полное удаление азота обеспечивается только микробной нитрификацией и денитрификацией, в то время как водные растения обеспечивают временное хранилище для азота и фосфора [Савичев, 2008]. После отмирания растений биогенные вещества вновь попадают в воду, где подвергаются разложению микроорганизмами.

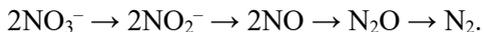
Нитрификация — это начальный этап удаления общего азота, который происходит путем окисления аммония до нитрита с последующим окислением нитрита до нитрата. Аммоний окисляется бактериями родов *Nitrosomonas* и *Nitrospira*:



Нитрит окисляется бактериями родов *Nitrobacter* и *Nitrospira*:



Биологическая денитрификация происходит путем восстановления нитрата до газообразного азота с помощью факультативных анаэробных гетеротрофных бактерий:



Для денитрификации олиготрофной воды (с низким содержанием органического вещества) гетеротрофным бактериям требуются дополнительные источники углерода, поставляемые отмирающими растительными остатками.

Процессы нитрификации протекают в прикорневой зоне, а также в поверхностных слоях воды, насыщенных кислородом, в то время как денитрификация ингибируется наличием свободного кислорода и активно протекает в придонных слоях воды и донных осадках.

Принципы построения ФОС

Основной задачей при создании фитоочистных систем является выбор оптимальных параметров для протекания физико-химических и биохимических процессов трансформации загрязняющих веществ. Их проектирование осуществляется на основе предварительного научного и технико-экономического обоснования возможности и целесообразности использования для каждого конкретного объекта. Для этого в ходе предварительных исследований проводится первичное обследование, отбор проб с последующим изучением химических и микробиологических свойств воды и грунтов. Уровень извлечения загрязняющих веществ из сточных вод в значительной степени зависит от созданных условий [Стольберг и др., 2003], поэтому достижения проектных параметров очистки следует ожидать после формирования на блоках комплекса зрелых зарослей высшей водной растительности.

Условия очистки сточных вод не должны вызывать угнетения растений, приводить к их частичной или полной гибели, что может наблюдаться при наличии в сточных водах токсичных веществ или чрезмерного количества взвешенных примесей. Последние могут

воспрепятствовать их естественной аэрации и заиливанию дренажных систем фильтрационных блоков фитосистемы, поэтому ФОС следует использовать только на стадии доочистки воды, после проведения механической, а при необходимости и физико-химической очистки.

Для предотвращения высыхания и гибели растений фитосооружения не должны продолжительное время оставаться без воды. Расположение очистных сооружений следует осуществлять таким образом, чтобы поддерживалось беспрепятственное течение воды, а комплекс сооружений биологической очистки вписывался в рельеф местности как его составная часть. При этом время прохождения сточных вод сквозь фитосистему должно быть достаточным для осуществления процессов деструкции и поглощения загрязняющих веществ. Несоблюдение этого условия может привести к образованию обширных застойных зон, где будут развиваться процессы гниения и вместо очистки будет происходить вторичное загрязнение воды.

Наличие высшей водной растительности позволяет практически полностью ликвидировать гнилостный запах сточных вод. Однако при посадке высшей водной растительности следует следить за плотностью посадок и своевременно осуществлять дополнительное подсаживание растений или удаление избыточной фитомассы.

Отмирающие стебли и листва растений образуют детрит толщиной до 1 мм в год, где формируется биоценоз, также способный поглощать соединения азота и фосфора и обеспечивать дополнительную очистку сточных вод. Растительная подстилка обеспечивает теплоизоляцию корневой системы в холодный период года, аккумулирует снег, ограничивая конвекцию и снижая потери тепла.

Для посадки предпочтительны аборигенные макрофиты одного и более видов, способных выдерживать зимний режим эксплуатации ФОС. Адаптация создаваемого биоценоза к условиям нормальной эксплуатации длится до тех пор, пока в очищаемой воде не будет установлено снижение содержания загрязняющих веществ [Применение биоплато..., 2009].

Факторы, влияющие на эффективность очистки воды

Эффективность очистки, во многом связанная с экологическими и экономическими преимуществами, — одна из наиболее важных характеристик ФОС. Важным параметром, определяющим эффективность всей фитосистемы, является степень удаления биогенных элементов (азота, фосфора). Многими авторами отмечалась относительно высокая (более 70 %) эффективность очистки воды от взвешенных частиц, улучшения показателей ХПК и БПК [Vymazal, 2007; A review on the sustainability..., 2015; Han et al., 2017], в то время как эффективность удаления соединений азота и фосфора обычно изменялась в пределах 40–50 и 40–90 % соответственно [A review on the sustainability..., 2015].

Несмотря на тщательное изучение процесса очистки воды с использованием ФОС в лабораторных модельных экспериментах, эффективность очистки в реальных условиях очень сильно варьирует и плохо поддается прогнозированию из-за большого количества изменяющихся и часто неконтролируемых факторов конструктивного и эксплуатационного характера (величины гидравлической нагрузки, времени гидравлического воздействия, глубины и соотношения сторон конструктивных элементов ФОС (пруды), состава поступающих стоков и видов растений) [Optimal design..., 2009; Influence of residence..., 2013].

Гидравлическая нагрузка и время задержки воды в ФОС являются двумя ключевыми факторами при очистке сточной воды. При увеличении гидравлической нагрузки (объема подаваемой на ФОС воды) сокращается время задержки (продолжительность нахождения воды в ФОС) соответственно и время ее контакта с растениями и микроорганизмами. Гидравлическое время задержки — один из наиболее важных параметров при работе ФОС, в значительной степени влияющий на эффективность очистки, особенно от азота и фосфора [Pilot-scale comparison..., 2009], определяется временем прохождения биотических и абиотических процессов. Более длительное время задержки и низкий уровень гидравлической нагрузки позволяет добиться и более высокой эффективности очистки. В частности, снижение содержания азота и фосфора на 30–45 % достигается через 3–12 дней, а максимальное удаление этих элементов — при гидравлической нагрузке менее 0,1 м³/день [Performance evaluation..., 2014]. В то же время

слишком длительный период задержки может приводить к застою воды и развитию процессов эвтрофикации водоема [Improving water..., 2010].

Глубина воды и соотношение сторон пруда в ФОС также являются важными параметрами при их проектировании и эксплуатации и оказывают влияние на процессы нитрификации, денитрификации и поведение взвешенных частиц в воде: глубина связана со снижением концентрации азота за счет процессов нитрификации и денитрификации, в то время как соотношение сторон влияет на распределение углерода, необходимого для протекания этих процессов [Kadlec, 1994].

Как правило, глубина водосборных бассейнов находится в диапазоне 0,1–0,6 м [A correction coefficient..., 2013]. Однако глубоководные пруды становятся все более популярными в связи с увеличением потребности в повторном использовании воды. Кроме того, более глубокие пруды позволяют улучшить гидравлические характеристики и эффективность очистки [Design and assessment..., 2017], обеспечивают больший объем, что дает возможность увеличить время воздействия в ФОС [Vymazal, 2007]. Некоторыми исследователями установлено, что глубоководные пруды могут оказывать отрицательное влияние на эффективность очистки воды от ионов аммония, так как увеличение глубины создает более анаэробные условия в ее толще [Persson, Wittgren, 2003], но при этом могут повысить интенсивность процесса денитрификации.

Соотношение сторон водосборного пруда с точки зрения гидравлических характеристик влияет на скорость течения. Оптимальным значением соотношения сторон признано от 4:1 до 5:1 [Influence of residence..., 2013; Spatio-temporal..., 2017]. Оно обеспечивает равномерное движение потока и уменьшает площадь мертвых зон. При больших соотношениях может возникнуть высокая скорость в поперечном сечении, что приведет к эрозии дна заболоченных земель. Когда сточные воды проходят через заболоченные пруды, большее расстояние означает более длительное время контакта, что благоприятно сказывается на эффективности очистки воды.

Состав сточных вод (например, отношение C/N, C/N/P) является одним из ключевых факторов эффективности очистки [Removal of nitrogen..., 2014]. Как показали многие исследования, удаление азота сильно зависит от отношения C/N в сточной воде [Free water..., 2006; Effects of influent..., 2012]. Сточные воды различного состава по-разному влияют на микробиоценозы и,

следовательно, на скорость нитрификации и денитрификации. При соотношении C/N 12:1 достигается самая высокая эффективность удаления общего азота и ионов аммония (90 и 98 % соответственно) [Removal of nitrogen..., 2014]. Наличие легкодоступного углерода способствует протеканию процессов трансформации соединений азота. Однако разложение органического углерода и нитрификация — две конкурирующие аэробные реакции. Избыточный органический углерод может препятствовать нитрификации, но стимулировать денитрификацию. Следовательно, контроль и корректировка соотношения C/N в воде позволяет повысить эффективность удаления азота.

Такой параметр, как *pH воды*, определяет протекание многих физических, химических и биологических процессов в ФОС [Younger, 1995; Wetland treatment..., 2009]. Функционирование фитосистемы возможно в диапазоне от 4 до 12 pH. Экстремально низкое или высокое значение pH влияет на рост и развитие растений и состояние микробных сообществ [Constructed wetlands..., 2017].

Температура воды также влияет на эффективность очистки сточных вод [Yumazal, 2005]. Функционирование и биологическая активность микроорганизмов значительно снижается при температуре ниже +10 °С. Процесс нитрификации в чистых культурах наиболее эффективно протекает в диапазоне температур от +25 до +35 °С [Tanaka et al., 2011], а скорость денитрификации увеличивается в 1,5–2,0 раза при повышении температуры на каждые 10 °С. Следовательно, температура в естественной среде также является ключевым фактором и для достижения максимальной эффективности очистки она должна быть выше +10 °С.

Подавляющее большинство фитоочистных сооружений используется в странах, находящихся в умеренной климатической зоне, что связано с рядом ограничивающих факторов, в частности с их работой в холодный период года. Если для определенной местности характерна зима с большим количеством осадков, то эксплуатация ФОС в таких условиях благодаря слою снега не вызовет затруднений даже при понижении температуры воздуха до —10 °С. В то же время на территориях с малоснежной зимой использование биоплато для очистки сточных вод может стать невозможным даже при незначительных заморозках. Такие особенности эксплуатации ФОС в зимний период в первую очередь касаются сооружений с горизонтальным и открытым

потоком воды. В случае применения сооружений, в которых сточные воды движутся вертикально сквозь слой загрузки различного фракционного состава и дренируются в его толще, влияние отрицательных температур на процесс очистки не так велико. Кроме того, в холодный период года значительно (до 5 раз) снижается скорость биохимических процессов, обеспечивающих очистку воды, а, следовательно, и эффективность биооплато как очистного сооружения [Применение биооплато..., 2009].

Концентрация растворенного кислорода влияет на скорость разложения органических веществ. Более высокая скорость разложения органического вещества достигается при более высоком содержании кислорода. Однако разложение органического вещества сдерживает процесс удаления общего азота за счет снижения нитрификации в аэробных условиях. Денитрификация, происходящая в анаэробных условиях, наоборот, будет усиливаться, что приведет к снижению концентрации нитрат-ионов [Removal of nitrogen..., 2014].

Различные виды растений обладают разной способностью к усвоению питательных веществ, что определяет эффективность удаления биогенных веществ из воды [A review..., 2013]. Разные растения в одном и том же типе ФОС обладают разной эффективностью удаления азота [Vymazal, 2013]. Надводные макрофиты влияют на гидравлические характеристики и усиливают седиментацию за счет снижения скорости поверхностных вод. В процессе фотосинтеза водные растения обогащают толщу воды кислородом, который необходим для биодеградации и минерализации органических веществ [Brix, 1997]. Растения являются источником органического углерода, питательных веществ и поверхностью для прикрепления и развития денитрифицирующих бактерий [Kirby, Cravotta, 2005], однако некоторые их виды, в силу своего быстрого распространения и захвата новых территорий, могут создавать ряд экологических проблем. Поэтому контроль зарастаемости, проблема переработки и утилизации загрязненной растительной массы должны учитываться при использовании фитотехнологий для очистки вод. Для борьбы с зарастанием водоемов разработаны методы по переработке биомассы в биотопливо [Казмирук, Казмирук, 2016].

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ФИТООЧИСТНОЙ СИСТЕМЫ ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГОРНОРУДНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

Климатические условия Мурманской области

Климат Мурманской обл. определяется ее положением за Северным полярным кругом, рельефом, влиянием Баренцева и Белого морей, он также резко меняется по сезонам года. Зима начинается при устойчивом падении средней суточной температуры воздуха ниже 0 °С в конце октября и заканчивается в конце-начале мая. Устойчивый снежный покров образуется в ноябре, его мощность редко превышает 60–75 см, число дней со снежным покровом в центральных районах составляет 200–210. В результате более половины года приходится на зиму, продолжительность которой составляет от 6 до 6,5 месяцев. В течение зимы наблюдаются оттепели, при которых температура воздуха может достигать 4–12°С выше нуля. Морозы ниже –20 °С бывают редко, однако в центре Кольского п-ова температура может опускаться ниже –40°С. Средняя температура января составляет –13...–14 °С. Отличительными особенностями зимы являются частые туманы, метели, гололед, изморозь, обильные снегопады, большая облачность и высокая относительная влажность воздуха (75–80 %). В среднем каждый второй-третий день наблюдаются метели.

Лето короткое, начинается в середине июня и заканчивается в конце августа, как правило, холодное и влажное. Средняя температура воздуха в июле составляет 11–15 °С выше нуля, возможно ее снижение до отрицательных значений с выпадением снега. Летние заморозки — характерное явление в климате субарктических и арктических районов, к которому вынуждены адаптироваться как местные, так и интродуцированные растения (более поздние сроки высадки растений в открытом грунте отрицательно сказываются на их приживаемости, сроках бутонизации и цветения, подготовке к перезимовке). Заморозки повреждают всходы растений, семена которых высеваются в грунт. Сумма положительных температур за период вегетации редко превышает 1300 °С, годовая сумма осадков составляет 400–600 мм, в году в среднем насчитывается 230–260 дней с осадками.

Осень короткая и дождливая, начинается обычно в конце августа и заканчивается в конце октября. Этот сезон характеризуется морозящими дождями, сильными ветрами, частыми туманами, высокой относительной влажностью воздуха, заморозками и кратковременными снегопадами. Уже в сентябре может установиться снежный покров [Справочник по климату..., 1966–1968].

Наиболее специфичен в условиях Заполярья световой режим. Полуденная высота солнца здесь изменяется в течение года от 0–0,5° в период зимнего и до 42,0–44,5° в период летнего солнцестояния. Максимально возможная продолжительность дня колеблется от 0 (в период полярной ночи) до 24 часов (в период полярного дня). Из-за значительной облачности среднегодовой приход солнечной радиации к поверхности почвы составляет около половины ее возможного поступления для данной широты. В среднем за год продолжительность солнечного излучения на территории региона составляет 1200–1600 часов [Зюзин, 2006].

Таким образом, основными агроклиматическими факторами региона являются короткий вегетационный период с возможностью заморозков даже в июле и бедность местных почв питательными элементами. Подобные условия являются неблагоприятными для культивирования растений [Головкин, 1973].

Опыт применения фитоочистных сооружений в северных регионах

Мировой опыт применения ФОС в Дании, Швеции, Норвегии и Северной Америке показывает, что искусственно созданные заболоченные территории в качестве сооружений доочистки стоков являются эффективными даже при низких температурах. Зимнее снижение активности систем незначительно по сравнению с теплым сезоном, изоляция заболоченного участка снежным, ледяным и естественным растительным покровом позволяет им оставаться функциональными даже в условиях низких температур [Jenssen et al., 1993].

Несмотря на это, существующие трудности в создании и функционировании ФОС в северных широтах, обусловленные климатическими особенностями, объемами и составом загрязненных вод, особенностями технологического процесса и др., требуют

индивидуального подхода в каждом конкретном регионе [A review on the sustainability..., 2015; Constructed wetlands for wastewater..., 2017].

Первый опыт эксплуатации фитоочистной системы (биоплато) в Мурманской обл. был осуществлен в 2002 г в пос. Шонгуй и в 2005 г. в пос. Верхнетуломский. Сооружение доочистки в пос. Шонгуй состояло из блока с горизонтальным течением очищаемой воды по специально устроенным лоткам и поверхностного инфильтрационного блока, который представлял собой котлован с противофильтрационным экраном, дренажем из слоя щебня и слоем грунта с высаженными осоковыми растениями. Доочистка обеспечивалась за счет горизонтального движения жидкости через высаженные осоковые растения и вертикального — через корнеобитаемый грунт с почвенной микрофлорой. Основным очищающим компонентом в гидрботанической технологии доочистки стоков являлся биоценоз высших водных растений на поверхности и почвенных микроорганизмов в дренажном фильтрующем слое, который также способствовал осаждению взвешенных веществ. Доочистке подвергали смесь хозяйственно-бытовых и производственных стоков (включая стоки рыбоперерабатывающих предприятий), прошедшую двухступенчатую (в том числе биологическую) систему очистки.

Эффективность доочистки стоков за четырехлетний период эксплуатации по БПК₅ составила в среднем 26 % за год, по аммонийным формам азота возростала с 27 до 39 %, по азоту нитратов — с 16 до 18 %, по фосфору — с 8 до 15 % в год [Гидрботанический способ..., 2011].

Характеристика объекта проведения исследования

Разработка и последующее внедрение ФОС для доочистки сточных карьерных вод на горнодобывающем предприятии в Мурманской обл. были начаты в 2012 г. ИППЭС совместно с ПАБСИ на отстойнике Кировогорского карьера АО «Олкон» (г. Оленегорск).

АО «Олкон» — самый северный в РФ производственный комплекс по добыче и обогащению железистых кварцитов с выделением железорудного концентрата (рис. 6). Проектная мощность предприятия по производству концентрата составляет 5 млн т/год. В настоящее время комбинат ведет разработку шести месторождений железных руд.

Добыча руды осуществляется открытым и комбинированным способом [Атавина, 2018].

Отстойник Кировогорского карьера представляет собой копанный пруд, состоящий из двух секций, разделенных насыпной дамбой из песчано-гравийно-каменистого грунта. Его общая площадь составляет 2291116 м², объем воды — 1438927 м³.

Вода атмосферных осадков и грунтовая вода поступает в узел сбора стоков на дне карьера, откуда с помощью водоотливных установок отводится в первую секцию пруда-отстойника, где осуществляется механическая очистка стоков (выпадение взвешенных минеральных частиц), затем, пройдя сквозь дамбу (фильтрация, адсорбция, осаждение и окислительно-восстановительные реакции), попадает для доочистки во вторую секцию, после которой через коллектор поступает в природный водоток — ручей (рис. 7). Суммарный объем отводимых сточных вод из карьеров в водные объекты составляет в среднем от 1,2 до 1,9 млн м³/год. Основными загрязняющими веществами в сточных водах данного объекта являются вещества группы азота (ежемесячно 5000–6000 кг нитратов, 30–50 кг нитритов и 60–80 кг аммонийного азота), образующиеся вследствие использования аммиачной селитры в производстве массовых взрывов при добыче руды [Атавина, 2018].

Отстойник имеет глубину более 2 м, высокую скорость потока и характеризуется часто меняющимся уровнем воды; дно его состоит из нагромождения валунов большого размера. По этим причинам использование традиционной технологии очистки сточных вод путем создания биопрудов с насыпным гравийным или торфяным ложем для высадки болотной растительности сильно затруднено [Калайда, 2010; Казмирук, Казмирук, 2015].

Исследуемый район относится к подзоне северотаежных хвойных лесов. Окружающая пруд растительность — низкорослые сосново-березовые молодняки, дёрнные, воронично-черничные, гераниевые, осоковые и болотнотравные, фрагментированные техногенными осоково-хвоцевыми, пушицевыми, щучковыми и другими растительными группировками.



*Рис. 7. Общий вид отстойника Кировогорского карьера:
 1 — место сброса сточных вод в отстойник; 2 — дамба; 3 — место сброса сточных вод в природный водоток; А — первая секция отстойника; Б — вторая секция отстойника*

Почвенные условия во всех выделенных экотопах объекта (прибрежная полоса, горизонтальная поверхность и откосы дамбы, мелководье) неодинаковые, оказывают существенное влияние на их биоразнообразие. Заметному увеличению флористической насыщенности и экологической разнородности естественных фитоценозов способствует неоднородность водного (более сильное увлажнение в понижениях у уреза воды) и светового (южная ориентация участков) режимов.

Обследование растительного покрова на прибрежной полосе вокруг водоема и теле дамбы показало, что он характерен для сухих и бедных почв. Естественное зарастание этих участков местными видами растений протекает очень медленно, растительность занимает крайне незначительную часть их поверхности, формирующиеся группировки растений разрежены (покрытие обычно в пределах от 0,5 до 1–2 %), часто встречаются лишь единичные особи (рис. 8).



а



б

Рис. 8. Растительные сообщества прибрежной зоны отстойника (фото Л. Ивановой): а — хвощ топяной; б — осоки

В отстойнике растительность представлена в основном прибрежно-водными сообществами гелофитов с незначительным

развитием прикрепленных и свободноплавающих моновидовых гидрофитных сообществ; погруженно-водные макрофиты отсутствуют.

В первой секции отстойника в условиях высокой мутности воды (дно не просматривается с глубины 0,5 м) развитие высшей гидрофитной растительности невозможно. Формирование сообществ здесь может происходить только за счет прибрежного зарастания гелофитами и временно подтопленными гидрофильными видами, формирующими свой ассимиляционный аппарат над поверхностью воды. Это заходящие в воду на глубину 0,2–0,4 м пушица многоколосковая и разные виды осок. Вдоль берега в акватории водоема на расстоянии до 1,5 м относительно уреза воды встречаются ивы, пушицы и осоки. Все растения существуют в режиме долговременного подтопления. Единственным гелофитом в полном значении этого термина является хвощ топяной, образующий небольшие сообщества на глубине до 1 м, имеющий высокую жизнеспособность и гигантские (более 1,5 м) размеры особей.

Во II секции отстойника вода менее мутная, дно просматривается на глубине 1,0–1,2 м. Оно в основном крупнокаменистое и сильно захламлено топляком (порубочными остатками). Отмечено повсеместное обрастание топляка колониями водорослей. В таких условиях отсутствует возможность самоукоренения и развитие погруженно-водных прикрепленных макрофитов не происходит. Водная растительность встречается лишь на заиленных с выровненным дном участках прибрежных мелководий. Она представлена редкими моновидовыми сообществами хвоща и обильными осоково-пушицевыми сообществами, переходящими в небольшие береговые осоковые болотца. По трофическому статусу отстойник можно отнести к олиготрофно-мезотрофному типу, который характеризуется низкой численностью бактериопланктона. Средняя численность сапротрофных бактерий, использующих органические формы углерода, составляет от 10^2 до 10^3 клеток в 1 мл воды; количество хемотрофных бактерий — нитрификаторов и денитрификаторов, получающих энергию в процессе трансформации неорганических соединений, — от 9 до 25 и от 150 до 950 кл/мл соответственно.

В исследуемых створах отстойника Кировогорского карьера зафиксировано превышение допустимых нормативов качества воды в водных объектах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового

водопользования по содержанию иона аммония (превышение ПДК в 2–10 раз), нитрит-иона (в 1,5–2 раза), нитрат-иона (в 4–5 раз). На сбросе в природный водоток концентрация загрязняющих веществ снижается незначительно, что обусловлено низкой эффективностью очистной системы. Уровень pH воды изменяется от 7,6 в I секции до 6,8 во II секции и 6,6 в природном водотоке.

Таким образом, особенностями отстойника Кировогорского карьера является большая площадь и глубина водоема, отсутствие естественного ложа (грунтового дна) и препятствий на пути потока, а следствием этого — недостаточная динамическая задержка воды в отстойнике и ее разбавление, а также несбалансированный состав питательных веществ (очень низкое содержание фосфора). Все это затрудняет применение традиционных технологий биологической очистки стоков путем создания насыпного ложа для высадки водной растительности и требует иного подхода к решению проблемы доочистки пруда от соединений азота.

Этап I. Разработка ФОС для доочистки сточных карьерных вод с использованием плавающих фитомодулей

Исследования по трансформации локальных глубоко- и мелководных участков отстойника в полноценно функционирующую природоподобную болотную экосистему для более эффективной доочистки сточных карьерных вод от соединений азота включали серию лабораторных, полевых и опытно-промышленных экспериментов.

В ходе лабораторных исследований изучалось влияние высших растений, микроорганизмов и вермикулитового субстрата на содержание в сточной воде ионов NO_3^- , NO_2^- и NH_4^+ , а также определялась оптимальная площадь покрытия поверхности водоема растениями для наиболее эффективной очистки (рис. 9).

В пластиковые сосуды, наполненные водой из отстойника Кировогорского карьера, устанавливали модель плавающего фитомодуля, состоящую из пластиковой решетки с растительной загрузкой в виде травяной дернины и посаженными в нее болотными растениями. Травяная ковровая дернина была предварительно выращена на вермикулитовом субстрате и включала в себя шесть видов высших

растений: овсяницу красную (*Festuca rubra*), тимофеевку луговую (*Phleum pratense*), мать-и-мачеху (*Tussilago farfara*), осоку (*Carex sp.*), пушицу многоколосковую (*Eriophorum angustifolium*), хвощ топяной (*Equisetum fluviatile*). Также в воду добавляли ассоциацию зеленых микроскопических водорослей родов *Chlorococcum*, *Scendesmus* и денитрифицирующих бактерий.

На этапе лабораторных экспериментов было установлено: комплексное использование высших растений, микроорганизмов и вермикулитового субстрата позволяет снизить содержания в сточной воде веществ азотной группы: NH_4^+ — в 9,2 раза; NO_3^- — в 3,1 раза, NO_2^- — почти в 2 раза при 50 %-м покрытии растениями очищаемой поверхности [Floating bioplato..., 2016].

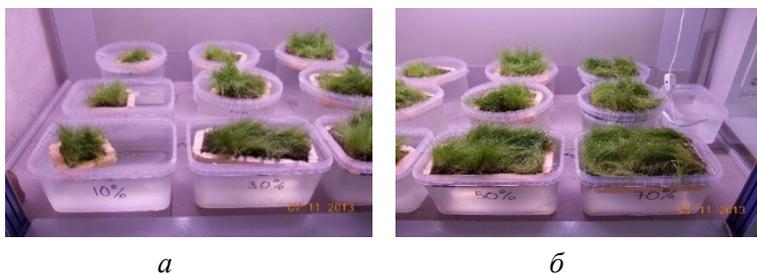
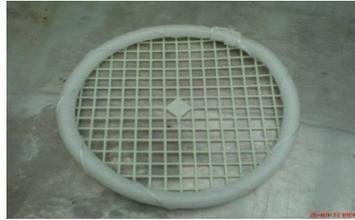


Рис. 9. Лабораторный опыт по определению оптимальной площади покрытия поверхности водоема плавающими фитомодулями (фото В. Мязина): а — варианты с 10 и 30 %-м покрытием, б — варианты с 50 и 70 %-м покрытием

Далее в условиях оранжереи ПАБСИ были проведены полевые испытания конструкции фитомодуля. Он представлял собой пластиковый сетчатый каркас с поплавком, удерживающим каркас на поверхности воды, и фитоагрузкой из ковровой травянистой дернины, выращенной на термовермикулите, с посаженными в нее мезо- и гигрофитами. Фитомодуль помещали в пластиковое ведро черного цвета (для предотвращения обильного развития водорослей), наполненное модельной водой (рис. 10).



а



б



в



г

Рис. 10. Конструкция фитомодуля для проведения полевого эксперимента (фото Л. Ивановой):

а — поплавок; б — сетчатый каркас с поплавком; в — фитозагрузка на сетчатом каркасе; г — фитомодуль на поверхности воды



Рис. 11. Состояние фитоценоза после окончания эксперимента. Фото Л. Ивановой

Созданный на плавающем фитомодуле фитоценоз интенсивно рос и развивался. Всего за две недели высота растений увеличилась до 30 см, длина корневой системы — до 35 см (рис. 11). Полномасштабные испытания в полевых условиях инновационной ФОС проводили на отстойнике Кировогорского карьера.



а



б



в

*Рис. 12. Выращивание ковровой дернины (фото Л. Ивановой):
а — формирование слоя вермикулитового субстрата для посева травосмеси; б — дернина с проросшей травосмесью; в — рулоны ковровой дернины, готовые к транспортировке*

Ковровая травяная дернина для фитомодулей была выращена заблаговременно гидропонным способом [Иванова, 2009] без применения удобрений, во избежание дополнительного загрязнения

водоема (рис. 12); в ее основе вермикулитовый субстрат-почвозаменитель Випон-1 [Иванова, Котельников, 2006]. Размер дернины был меньше, чем площадь каркаса фитомодуля, чтобы растения могли беспрепятственно распространяться по периметру фитомодуля.

Видовой состав дернины формировался из быстрорастущих, преимущественно злаковых видов растений. В надземной части она имела плотный (более 700 побегов/дм²) травостой высотой около 6,0 см, в подземной — жизнеспособную (толщиной 2,0 см и более) «войлочную подушку» из переплетенных и пронизывающих вермикулитовый субстрат корней. Главное назначение дернины — включить в свой состав водные растения, обеспечить их удержание, интенсивное развитие и наращивание биомассы.

Каждый плавающий фитомодуль состоял из каркаса и помещенной на него ковровой дернины с подсаженными в нее болотными растениями (рис. 13).

Для создания каркаса использовалась прямоугольная рамка-основание 1, выполненная из пластиковых труб с поплавками из пенопласта 2, на которую укладывалась пластмассовая решетка 3 с размером ячеек 3×3 см и площадью 2 м², на решетке размещалась заранее выращенная ковровая дернина 4 в качестве фитоагрузки. Количество поплавков одного биоплата рассчитывалось таким образом, чтобы на поверхности воды мог держаться фитоценоз общей массой 30 кг и более.

В травяную дернину готовых фитомодулей подсаживали молодые растения-гигрофиты (рис. 14).

Фитомодули соединяли друг с другом с помощью крепежных элементов (пластиковые стяжки, нейлоновый шнур) и перемещали по воде на участок водоема для установки. Там плавающие фитомодули группировались в ряды или кластеры (рис. 15).

Сформированные таким образом ряды фитомодулей закрепляли к берегу водоема тросами с карабинами, а кластеры устанавливали главным образом в центре отстойника (рис. 16) (Плавающие биоплаты..., 2015).

Каждый кластер был сформирован из 19 фитомодулей, которые были соединены между собой пластиковыми стяжками (рис. 17). Кластер удерживается на глубоководных участках с помощью четырех якорей весом 15 кг. Длина нейлоновых шнуров, которые соединяют кластер с якорями, соответствовала максимальному уровню воды в месте установки кластера, что дало возможность компенсировать колебания ее уровня.



Рис. 13. Общий вид плавящегося фитомодуля с посаженными в дернину болотными растениями. Фото Л. Ивановой



a



б



*Рис. 14. Посадка болотных растений (хвоцца (а) и осоки (б)) в дернину.
Фото Л. Ивановой*



a



б

*Рис. 15. Установка фитомодулей в ряд (а) или кластер (б) на
глубоководной части водоема. Фото Л. Ивановой*



а



б

Рис. 16. Установка фитомодулей в два параллельных ряда вдоль дамбы (а) и закрепление их к берегу с помощью троса (б).

Фото Л. Ивановой

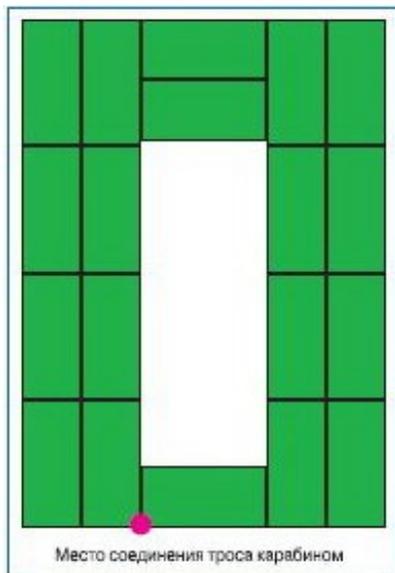


Рис. 17. Схема кластера из 19 фитомодулей с биологической загрузкой

По периметру каждый кластер скреплялся стальным тросом в нейлоновой оболочке, придающим ему прочность и предотвращающим разрушение всей конструкции в результате воздействия ветра и волн летом и льда зимой. Скрепляющий стальной трос оснащен разъемным соединением, что позволяет получить доступ ко всем составляющим кластер фитомодулям для проведения технического обслуживания и посадки растений.

За трехлетний период использования плавающих фитомодулей растения продемонстрировали свою жизнеспособность и возможность поглощать соединения азота — в большей степени аммонийных и нитритных, в меньшей — нитратных.

За этот период содержание ионов аммония в воде второй секции отстойника уменьшилось на 53–90 %, а концентрация нитратного азота — на 15–20 % [Евдокимова и др., 2015; Плавающие биоплаты..., 2015].

Наблюдения за ростом и развитием растений на биоплато показали, что все виды растений хорошо растут и интенсивно развиваются. Подсаженные в дернину макрофиты быстро и крепко вращали в нее, формировали мощную корневую систему и множество дочерних побегов (рис. 18). В конце вегетационного периода (октябрь) фитомодули покрывались снегом и уходили в воду под лед, перезимовывали (рис. 19), а весной быстро возобновляли свой рост и развитие (рис. 20).



Рис. 18. Фитоценоз, сформированный на плавающих биоплато (фото Л. Ивановой):
 а — всрастание в дернину и формирование дочерних побегов у пушицы; б — формирование дочерних побегов у осок; в — корневая система растений из основного состава дернины; г — корневая система пушицы; д — корневая система ивы филоколистной; е — корневая система калужницы болотной



а



б

*Рис. 19. Фитомодули, покрытые первым снегом (а) и льдом (б).
Фото Л. Ивановой*

К концу I этапа исследований общая площадь покрытия пруда-отстойника фитомодулями-биоплато составила 20 %. Параллельно с ее наращиванием осуществлялось введение в биозагрузку новых видов болотных растений, что способствовало увеличению биоразнообразия на объекте исследований.



б



а



с



в

Рис. 20. Весеннее возобновление роста сабельника болотного (а), калужницы болотной (б), ивы феликолистной (в) и злаков (г). Фото Л. Ивановой

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

1. Разработанный инновационный фитомодуль (плавающее биоплато) может быть использован при формировании болотоподобной фитоочистной системы для естественной биологической очистки промышленных стоков от соединений азота.

2. В основе ФОС находятся жизнеспособные, стабильные во времени фитоценозы, которые, интенсивно развиваясь в сложных климатических условиях Заполярья, потребляют из сточных вод минеральные соединения азота и создают среду обитания для нитрифицирующих и денитрифицирующих микроорганизмов, тем самым очищая водоем. Чем интенсивнее развивается созданный фитоценоз, увеличивается его биомасса и чем большую площадь водоема покрывает ФОС, тем быстрее и эффективнее происходит очищение сточных вод.

3. При использовании дернины, выращенной заранее с применением многолетних травянистых растений, поглощение азотистых соединений начинает происходить сразу после ее размещения на поверхности водоема пластиковых конструкций, не дожидаясь укоренения высаженных в дернину водных видов растений.

4. Применение ковровой травянистой дернины, выращенной гидропонным способом на основе термовермикулита без использования удобрений, исключает вторичное загрязнение воды.

5. Возможность заблаговременного создания большого количества модулей биоплато позволяет быстро покрыть поверхность водоема до оптимального уровня и получить хорошие результаты уже в первый вегетационный период.

Таким образом, плавающее биоплато позволяет повысить эффективность очистки сточных карьерных вод от соединений азота, сократить затраты на ее осуществление и уменьшить негативное воздействия на окружающую среду.

Наряду с этим был сделан вывод и о том, что использование только плавающих фитомодулей не позволяет достаточно эффективно проводить доочистку сточных вод Кировогорского карьера от соединений азота. При этом не задействованными оказываются так называемые «мертвые зоны» (участки, где не могут быть размещены предлагаемые плавающие фитомодули) — прибрежная полоса, откосы дамбы, мелководье и заводи. Заболачивание этих участков помогло бы

значительно увеличить площадь покрытия пруда растениями и ускорить восстановительную сукцессию на объекте и тем самым повысить эффективность очистки вод от загрязняющих веществ.

Этап II. Модернизация ФОС с использованием фитомодулей нового поколения. Их функции и конструкционные особенности

Целью второго этапа исследований стала разработка новых фитомодулей без использования дефицитных в регионе почвенных компонентов для повышения эффективности фитоочистной болотной экосистемы.

В период с 2015 по 2020 гг. в дополнение к плавающим на поверхности водоема фитомодулям были разработаны и внедрены еще три вида фитомодулей: фитоматы, фитосадки и фитотубусы.

Их назначение — способствовать быстрому созданию разных типов искусственных фитоценозов и ускорению процесса заболачивания сложных и непригодных для произрастания растений участков водоема.

Фитоматы

Данный фитомодуль представляет собой пластиковый сетчатый мешок размером 0,4×0,7 м, наполненный 12,5 дм³ сухой органо-минерально-растительной субстратной смесью [Разработка и оптимизация..., 2019] (рис. 21). В состав травосмеси входят 50 г семян трав, главным образом злаковых видов растений, интенсивно растущих в условиях Мурманской обл. В качестве субстратов-почвозаменителей для создания фитоматов используются мелко- или крупно фракционированный термовермикулит и древесные опилки (свежие или подстилочные), взятые в соотношении 4:1 (по объему).

Данный объем многокомпонентной смеси позволяет формировать фитоматы высотой до 10 см и площадью около 0,3 м² каждый, хранить готовые изделия в сухом состоянии в течение длительного времени и транспортировать на любые расстояния.

Главное назначение фитоматов — формирование искусственных фитоценозов или растительных блоков трех типов.



а

б

Рис. 21. Основные компоненты, входящие в состав фитоматов (фото Л. Ивановой): а — опилки, крупно фракционированный термовермикулит, семена; б — готовые фитоматы

Растительные блоки I типа — для задержания песчано-гравийных участков и трансформации их в фитозаградительные барьеры (рис. 22). При этом фитоматы размещают на поверхности участка, после чего их увлажняют из расчета 5 л воды на 1 ед. для запуска процесса прорастания семян. В этих условиях начальное прорастание семян в открытом грунте происходит на 5–7-й день, массовое — на 10–13-й день.

Параллельно с применением фитоматов для ускорения задержания песчано-гравийных участков прибрежной полосы пруда-отстойника проводился посев травосмеси аборигенных видов растений, что явилось важным элементом в создании полноценно функционирующей ФОС.

Растительные блоки II типа — для создания растительных сообществ на участках водоемов с глубиной менее 0,3 м. Готовые фитоматы с сухой субстратной смесью раскладываются группами и погружаются в воду частично или полностью (рис. 23). При благоприятной температуре появление массовых всходов отмечается на 7-й день с начала работ, после чего можно приступать к посадке различных видов гигро- и гидрофитов в прорезанные на их поверхности «окна». В таких условиях подсаженные растения приживаются в течение 3–5 дней и быстро прорастают в грунтовую основу водоема.



Рис. 22. Растительные блоки I типа, сформированные на прибрежной полосе и откосе дамбы. Фото Л. Ивановой



a



б



в

г

Рис. 23. Фитомат с пророщенной злаковой травосмесью, подготовленный для посадки макрофитов (а); грунта фитоматов, помещенная на мелководье (б); сформированные растительные блоки II типа: рогоз широколистный, ивы, злаки (в) катужинца болотная, сабельник болотный, осоки, злаки (г).

Фото Л. Ивановой

Растительные блоки III типа — для формирования сообществ на участках водоемов с глубиной более 0,3 м. В данном случае фитоматы размещаются на плавающих фитомодулях, обеспечивающих их удержание и полное или частичное погружение в воду (рис. 24).



Рис. 24. Фитомат, помещенный на плавающий фитомодуль (а) и растительный блок III типа (злаки), сформированный с помощью фитоматов (б). Фото Л. Ивановой

Фитосадки

Данный модуль фитосистемы представляет собой конструкцию, предназначенную для размещения в ней водных погруженных растений, получающих оптимальные условия для быстрого вегетативного размножения. Конструкция позволяет удерживать растения на глубине более 0,5 м и препятствует их выбросу на прибрежную полосу во время волн и изменения уровня воды в водоеме.

Общая схема конструкции фитосадка — модуля фитосистемы для биологической доочистки промышленных сточных вод от загрязняющих веществ, представлена на рис. 25. Каждый модуль содержит каркас 1 и биологическую загрузку 2. Каркас состоит из рамки 3, сетчатой садковой части 4 и якоря 5.

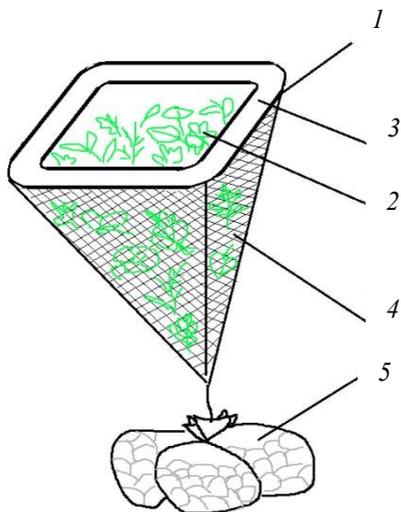


Рис. 25. Схема конструкции модуля фитосистемы — фитосадка

Рамка жесткая, выполнена из материала с положительной плавучестью. Она может быть собрана, например, в виде прямоугольника из пластиковых труб, соединенных отводами, или полипропиленового материала, а садковая часть — из пластиковой сетки (рис. 26). В качестве якоря для обеспечения необходимой глубины погружения фитосадка может быть использован один или несколько соединенных между собой синтетических мешков с камнями общей массой 10–15 кг. Основание, садковая часть и якорь соединяются между собой с помощью пластиковых стяжек или нейлонового шнура.

Готовый модуль с прикрепленным якорем транспортируют на лодке к месту размещения, после чего в него помещают живые растения. Они размещаются вертикально по всей глубине водоема в требуемых местах в ряд, шахматном порядке, поперек и вдоль потока воды или горизонтально на мелководье. Размеры, количество и способ размещения конструкции зависят от профиля, глубины водоема, скорости водного потока, объема биологической загрузки и вида растений.



а



б



в



г

Рис. 26. Основания фитосадов, собранные из сантехнических труб (а), пластиковая сетка для формирования фитосадов (б), якоря — мешки с камнями (в) и фитосадов в сборе (г).

Фото Л. Ивановой

Биологическая загрузка в фитосадках состоит из живых многолетних аборигенных водных растений, преимущественно гидатофитов, необходимым условием жизни которых является пребывание в пресной воде (рис. 27). Они способны быстро вегетативно размножаться, интенсивно накапливать биомассу и образовывать ряд экологических группировок на глубоководных участках водоемов.



Рис. 27. Фитозагрузка: сфагновые мхи, варнсторфия плавающая (а) и пузырчатка средняя (б). Фото Л. Ивановой

В фитосадке растения находятся в свободном плавании внутри садковой части, самостоятельно и равномерно распределяются по всей конструкции, охватывая как поверхностные, так и глубинные слои водоема (рис. 28). Сточные воды, протекая через данный модуль, находятся в непосредственном контакте с органами растений. В результате под влиянием процессов седиментации, фильтрации, адсорбции, а также окисления и восстановления усиливается очищение воды и в целом повышается эффективность работы всей фитоочистной системы.

Использование живых многолетних водных растений способствует значительному ускорению формирования водопогруженных фитоценозов,

повышению их жизнеспособности и полноценному функционированию создаваемой фитоочистной системы. На протяжении всего периода функционирования модулей фитосистема продолжает выполнять функции фильтра. Ежегодно отмирающие части растений через ячейки сетки фитосадка оседают на дне и создают питательный слой для новых растений и более активного развития микроорганизмов, участвующих в процессе очистки водоема. Так работает самовосстанавливающаяся система, создающая придонный грунт и питательные вещества для растений других растительных блоков, что также способствует очищению водных источников.



Рис. 28. Фитосадки, установленные на глубоководных участках водоема. Фото Л. Ивановой

Фитосадки, установленные в виде фитозаградительных барьеров на пути водотока, способствуют снижению его скорости и более качественному очищению воды. При соблюдении технологии фитоочистка воды происходит сразу же после установки фитомодулей. Если необходимо, в любое время можно увеличивать и расширять видовой состав биологической загрузки за счет введения новых перспективных видов растений.

При необходимости осуществления биологической очистки на мелководье с течением (на глубине до 1 м) данный фитомодуль можно трансформировать для горизонтального применения, используя садковую часть без основания каркаса. Полученную «подушку» с растениями укладывают на дно и фиксируют с помощью подручных материалов, чтобы конструкцию не смыло течением. Таким образом, растения удерживаются в толще воды на участках, где для вертикального модуля недостаточно глубины, и также очищают ее от загрязняющих веществ.

Используемые в технологии материалы позволяют производить фитомодули заблаговременно или непосредственно на месте проведения работ из заранее подготовленных заготовок, значительно сокращая время создания будущих водопогруженных фитоценозов, а также хранить готовые изделия в сухом состоянии в течение длительного времени и транспортировать на любые расстояния. Применение данных фитомодулей является интенсивным методом очистки сточных вод от загрязняющих веществ ввиду отсутствия ограничений применения, что позволяет расширить область их возможного использования.

Фитотубусы

Как показал многолетний опыт работы, иногда для усиления эффективности очистки воды возникает необходимость быстрого формирования фитоценозов на мелководных участках с высокой скоростью потока воды и каменистым или песчаным дном. В таких условиях практически невозможно осуществить групповую посадку растений. Для решения этой проблемы была разработана специальная конструкция — фитотубус (рис. 29). Он выполняет функцию

искусственного барьера, ограждающего растения от сильного потока воды.

Данный фитомодуль представляет собой цилиндрическую пластиковую емкость без дна 1, высота которой зависит от глубины мелководного участка, где предполагается посадка живых болотных растений, и должна быть выше уровня воды. Для посадки высоких, крупных растений (рогоз, аир, белокопытник и т. д.) необходимо использовать более широкие емкости. В верхней части емкости делают три небольших сквозных отверстия, в которые продевают и закрепляют растяжки из нейлонового шнура или стального троса в оплетке 2. Подготовленный таким образом каркас устанавливают на дно водотока, предназначенного для посадки растений, заглубляют на 2–5 см и фиксируют с помощью металлических крючков 3 в грунте. В закрепленную емкость высаживают одно или несколько растений 4. Если дно и грунт водоема позволяет, растения высаживают в лунку. В противном случае тубус на треть заполняют увлажненным привнесенным субстратом (песком, мелким гравием, почвой и др.), в который высаживают растение (рис. 30).

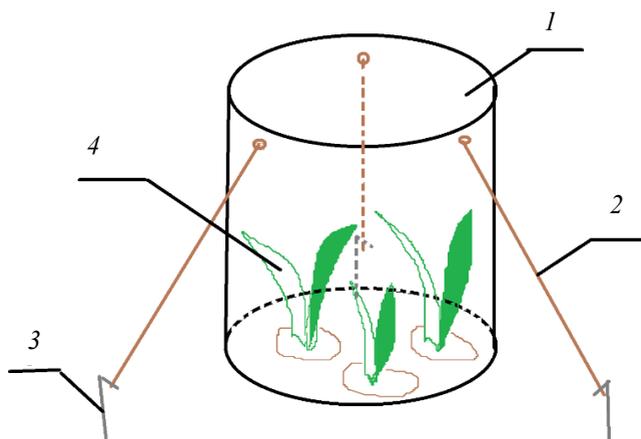


Рис. 29. Схема модуля — фитотубус:

- 1 — пластиковый цилиндрический корпус без дна; 2 — растяжки;
3 — крючок для закрепления в грунт; 4 — растения

При подборе растений для посадки в фитотубусы следует отдавать предпочтение быстрорастущим и склонным к сильному разрастанию болотных видам. После укоренения высаженного растения и вставания его в дно водоема, тубус убирают и сохраняют для дальнейшего использования.

Опыт применения фитотубусов показал, что они позволяют в течение одного вегетационного сезона создавать плотные посадки водных растений на сложных участках водоема, значительно уменьшая площадь «мертвых зон». Такие посадки снижают скорость водного потока, обеспечивают равномерное движение воды и, как следствие, увеличивают продолжительности ее контакта с растительностью.

Для изготовления всех видов инновационных фитомодулей использовались дешевые и доступные полимерные материалы, которые не подвержены процессам гниения и не являются источниками вторичного загрязнения, что способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду и сокращению затрат на очистку сточных вод.



Рис. 30. Растения рогоза широколистного, высаженные в фитотубусы, на мелководном участке с высокой скоростью течения воды. Фото В. Редькиной

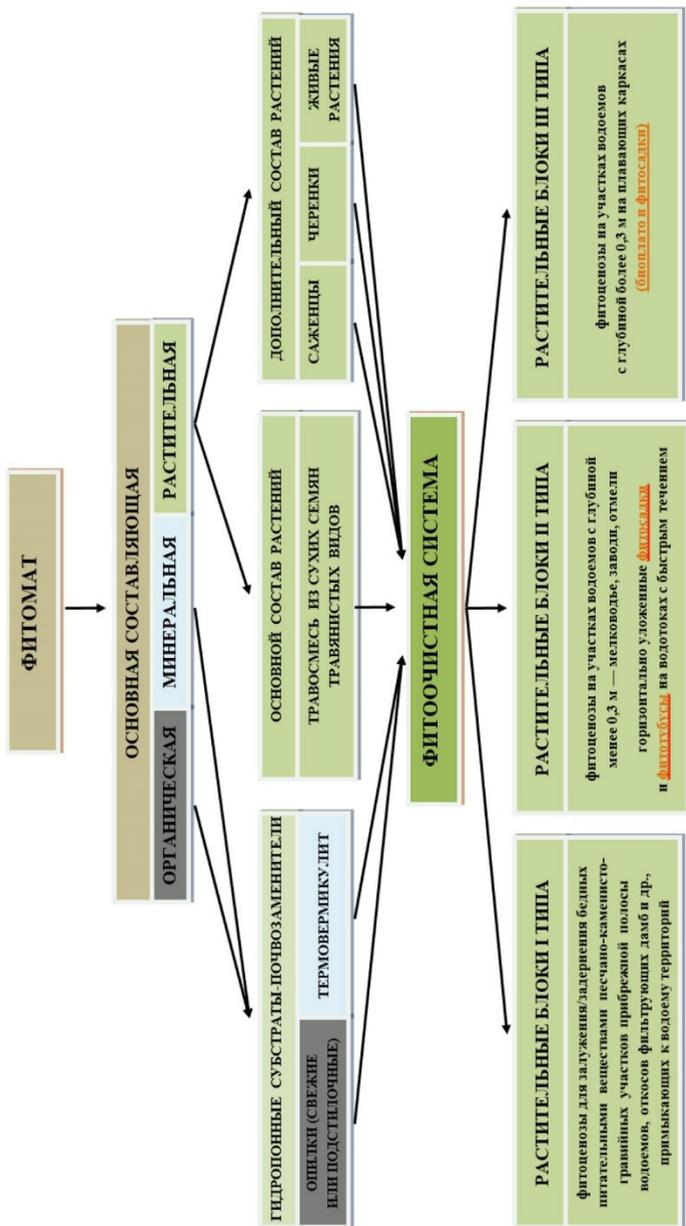


Рис. 31. Компоненты, формирующие растительные блоки инновационной фитоочистной системы

В общей сложности на отстойнике Кировогорского карьера было размещено 575 плавающих фитомодулей, более 700 фитоматов, а также 40 фитосадков.

Испытанные в разных комбинациях и объединенные в одну фитосистему (рис. 31), они позволили в короткие сроки в суровых климатических условиях Крайнего Севера сформировать разные типы высококачественных растительных сообществ и к 2020 г. увеличить площадь покрытия объекта исследования до 50 %. Использование инновационной ФОС способствовало повышению эффективности очистки карьерной воды, что, в свою очередь, привело к снижению содержания на выходе из пруда иона аммония на 92 %, нитрат-ионов на 28 %. Численность нитрифицирующих и денитрифицирующих бактерий возросла в 2–3 раза.

АССОРТИМЕНТ ВЫСШИХ ВОДНЫХ И ОКОЛОВОДНЫХ РАСТЕНИЙ, РЕКОМЕНДУЕМЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ФОС В УСЛОВИЯХ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Способность высших водных растений удалять из воды загрязняющие вещества и уменьшать ее загрязненность нефтепродуктами и синтетическими ПАВ позволяет использовать их в практике очистки сточных вод [Диренко, Коцарь, 1999].

Для функционирования фитоочистных систем используют многолетние макрофиты (гидро- и гидатофиты). Это растения, которые накапливают большую биомассу и способны эффективно извлекать загрязняющие вещества из воды. Гидрофиты — наиболее многочисленная группа водных растений, которые погружаются в воду только нижней частью (мелководные, прибрежные и болотные формы растений), гидатофиты — растут погруженными в воду полностью или большей своей частью.

Обитание макрофитов в водной среде обусловило особые черты их организации: быстрое увеличение площади их поверхности по сравнению с массой, что достигается развитием больших тонких листьев (рдесты), расчленением листовой пластинки на тонкие нитевидные доли (урути, роголистники), сильным развитием воздухоносных полостей и больших межклетников. У водных растений плохо развиты или даже отсутствуют сосуды в проводящих пучках и корневой системе, а вода с растворенными в ней минеральными веществами может проникать непосредственно в листья. Большая плотность водной среды обуславливает также слабое развитие механических элементов в листьях и стеблях макрофитов и расположение их преимущественно в стеблях ближе к центру. Эта особенность придает водным растениям большую гибкость, поэтому им не требуется поддержка в воде. Так как интенсивность света в воде резко снижается с глубиной, то у многих макрофитов в клетках эпидермиса имеются хлорофилловые зерна. Почти все водные растения размножаются вегетативно.

Растения в водных объектах выполняют несколько функций:

- фильтрационная (оседание взвешенных веществ);
- поглотительная (поглощение биогенных элементов и органических веществ);

- накопительная (накопление некоторых металлов и органических веществ);
- окислительная (обогащение воды кислородом);
- детоксикационная (преобразование токсичных соединений в нетоксичные).

Благодаря этому фитоочистные системы способны снижать содержание взвешенных веществ, азота, фосфора и бактерий коли-форм [Denny, 1997].

Эффективность создаваемых фитоочистных систем в значительной степени зависит от правильного выбора видового состава растений, исключающего их межвидовые конфликты и внутривидовую конкуренцию [Constructed Wetlands..., 1999]. Кроме того, растительные сообщества, состоящие из нескольких видов растений с разными сезонными моделями роста и разной корневой системой, могут повысить эффективность ФОС.

Самыми распространенными видами макрофитов для ФОС являются рогозы, камыши, айры, ирисы, тростник, калужница болотная, лютик водяной, рдест курчавый и др. Все они способны наращивать большую биомассу и, следовательно, нуждаются для ее накопления в большом количестве биогенных элементов, в первую очередь азота. Поверхность водных растений служит для прикрепления и удержания микроорганизмов, обеспечивающих, например, разложение аммонийного азота.

В качестве растений — поглотителей азота обычно рекомендуют использовать водные и прибрежно-водные растения: элодею канадскую (*Elodea canadensis*), телорез алоэвидный (*Stratiotes aloides*), рогоз широколистный (*Typha latifolia*), вейник тростниковидный (*Calamagrostis phragmitoides*), тростник обыкновенный (*Phragmites australis*), осоки (*Carex sp.*) [Potential of constructed..., 2008; Биоплато как способ..., 2009; Ашихмина, 2013; Treatment of polluted..., 2006; Performance..., 2009]. Так, для очистки загрязненных водоемов в пойме р. Вятка в качестве растений, поглощающих азот, рекомендовано использовать элодею канадскую, телорез алоэвидный, рогоз широколистный, вейник тростниковидный, тростник обыкновенный, осоки, пистию телорезовидную (*Pistia stratiotes*) и ряску малую (*Lemna minor*) [Оценка возможности..., 2013]. Доказано, что использование рогоза широколистного в системах горизонтального поверхностного потока при очистке сточных вод способствует повышению скорости и

эффективности удаления аммонийного азота [Сивкова, Прибыткова, 2011]. На Украине для этих целей по всей площади фитоочистных сооружений формируют заросли из тростника обыкновенного [Захарченко, Рыжикова, 2005], а в средней полосе России (Нижний Новгород) — специально акклиматизированный для этого водный гиацинт (*Eichhornia crassipes*) [Макеев и др., 2016]. В северных широтах для снижения количества биогенных элементов в сточных водах на этапе фитоочистки преимущественно используют местные виды семейства осоковых [Третьякова, Завалко, 2004], тростник обыкновенный и рогоз широколистный [Maehlum et al., 1995].

К сожалению, не все из вышеназванных растений растут в условиях Заполярья, поэтому в задачу исследований по созданию и повышению эффективности инновационной ФОС входила разработка и оптимизация зональных ассортиментов высших водных и околководных растений. Так, для формирования ковровой травяной дернины, использовавшейся для биологической загрузки плавающих фитомодулей были рекомендованы: пырей сизый (*Elytrigia intermedia*), овсяница красная (*Festuca rubra*), райграс пастбищный (*Lolium perenne*) и тимopheевка луговая (*Phleum pratense*), а для дополнительной посадки — пушица узколистная (*Eriophorum angustifolium*), пушица Шейхцера и влагалищная (*Eriophorum scheuchzeri* и *E. vaginatum*), хвощи болотный и топяной (*Equisetum palustre* и *E. fluviatile*), осоки, вахта трехлистная (*Menyanthes trifoliata*), сабельник болотный (*Comarum palustre*), белокрыльник болотный (*Calla palustris*), ива филиколистная (*Salix phylicifolia*), ива козья (*Salix caprea*), сфагновые мхи (*Sphagnum* spp.), мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara*), лютик ползучий (*Ranunculus repens*) (рис. 32).

При создании растительных блоков I типа хорошо себя зарекомендовали виды, интенсивно растущие на песчано-каменистых, бедных питательными веществами, грунтах: пырей сизый, овсяница красная, райграс пастбищный и тимopheевка луговая, кострец безостый (*Bromus inermis*), лисохвост луговой (*Alopecurus spratensis*), житняк гребневидный (*Agropyron pectinatum*), донник желтый (*Melilotus officinalis*), волоснец песчаный (*Leymus arenarius*). Семена этих видов можно включать в основной состав сухой травосмеси фитоматов.

Для ускорения восстановительной сукцессии на участках прибрежной полосы и откосах дамбы, помимо привнесенных с фитоматами видов и их самораспространения, можно формировать

фитоценозы с помощью посева или посадки живыми растениями (рассадой, черенками) представителей аборигенной пионерной, сорной растительности, а также мезо- и гигрофитов (влаголюбивые виды, хорошо развивающиеся, как в воде, так и на влажных грунтах): тарана Вейриха (*Aconogonon weyrichii*), змеевика живородящего (*Bistorta vivipara*), лютика ползучего, клевера ползучего (*Trifolium repens*), иванчая (*Chamaenerion angustifolium*), мать-и-мачехи, ясколки дернистой (*Cerastium holosteoides*), луговика дернистого (*Deschampsia cespitosa*), бескильницы расставленной (*Puccinellia distans*) (рис. 33 и 34).

В качестве биоматериала для формирования растительных блоков II типа с помощью фитоматов при размещении их на переувлажненных и мелководных участках, отмелях предпочтительны: рогоз широколистный, калужница болотная, лютик ползучий, вахта трехлистная, пушицы узколистная и Шейхцера, осоки, сабельник болотный, ива филиколистная, ива козья, сфагновые мхи, мать-и-мачеха обыкновенная, хвощ топяной и болотный, ряска малая (*Lemna minor*), хвостник обыкновенный, или водяная сосенка (*Hippuris vulgaris*).

На открытых участках водоема с глубиной до 1 м в заводях рекомендуется использовать мох варнсторфию плавающую (*Warnstoftia fluitans*), рдест плавающий (*Potamogeton natans*), хвощ топяной, хвощ болотный, ивы филиколистную и козью, сфагновые мхи, калужницу болотную, ряску малую, хвостник обыкновенный, лютик ползучий (рис. 35, 36).

Для заполнения фитосадков можно применять погруженные гидрофиты и виды, не требующие корневого закрепления: варнсторфию плавающую, пузырчатку малую (*Utricularia minor*), пузырчатку среднюю (*Utricularia intermedia*), пузырчатку обыкновенную (*Utricularia vulgaris*), урути и рдест с закрепленными корнями, сфагновые мхи, которые свободно размещают внутри садковой части каркаса (рис. 37). Эти виды растений (особенно урути) могут располагаться как в толще воды, так и в приповерхностном слое водоема, то есть на свету, и могут защищать от распространения зеленых и синезеленых водорослей. При использовании ряски малой фитосадковый модуль должен быть изготовлен из сетки с более мелкими ячейками.



*Рис. 32. Фитоценоз, сформированный на плавающих фитомодулях (сабельник болотный, осоки, ива филиколистная, пушицы).
Фото Л. Ивановой*



а



б

Рис. 33. Фитоценоз, сформированный методом прямого посева злаков (а), калужницы болотной (б).
Фото Л. Ивановой

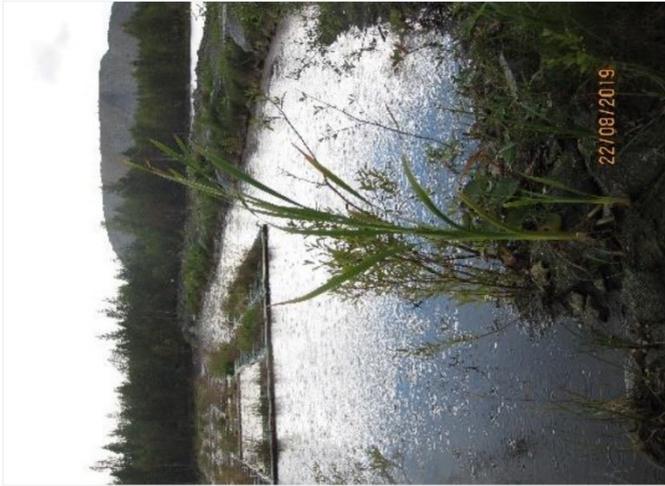


а



б

Рис. 34. Фитоценоз, сформированный методом прямого посева тарана Ветриха (а) и сабельника болотного (б).
Фото Л. Ивановой



a



б

Рис. 35. Фитоценоз, сформированный на мелководье с помощью посадки розога (а), вахты трехлистной (б)



a



б

*Рис. 36. Фитоценоз, сформированный на мелководье с помощью посадки хвостника обыкновенного (а),
ряски малой, ивы фгилликолистной и катужницы болотной (б). Фото Л. Ивановой*



Рис. 37. Мох варнсторфия плавающая. Фото Л. Ивановой

Таблица 1

Список дикорастущих видов растений

Вид	Экологическая ниша	Продолжительность жизни
Лисохвост равный (<i>Alopecurus aequalis</i>)	Берег водоема, плавающие фитомодули	Одн.
Душник лекарственный (<i>Angelica archangelica</i>)	Берег водоема	Мн.
Болотник (род) (<i>Callitriche</i> spp.)	Прибрежная зона, в воде	Одн.
Осока вздутая (<i>Carex rostrata</i>)	Прибрежная зона, плавающие фитомодули	Мн.
Страусник обыкновенный (<i>Mattuccia struthiopteris</i>)	Берег водоема, плавающие фитомодули	Мн.
Кизляк кистецветный (<i>Naumburgia thyrsoiflora</i>)	Берег водоема, прибрежная зона, плавающие фитомодули	Мн.
Персикария (<i>Persicaria</i> spp.)	Берег водоема, плавающие фитомодули	Одн.
Двуклюстичник тростниковый (<i>Phalaroides arundinacea</i>)	Берег водоема, плавающие фитомодули	Мн.
Мятлик однолетний (<i>Poa annua</i>)	Берег водоема, плавающие фитомодули	Одн.
Лютлик ядовитый (<i>Ranunculus scleratus</i>)	Берег водоема, плавающие фитомодули	Дв.
Жерушник болотный (<i>Rorippa palustris</i>)	Берег водоема, плавающие фитомодули	Одн., мн.
Щавель (<i>Rumex</i> spp.)	Берег водоема, прибрежная зона, плавающие фитомодули	Мн.
Вероника длиннолистная (<i>Veronica longifolia</i>)	Берег водоема, плавающие фитомодули	Мн.

Примечание: Мн. — многолетние растения, Одн. — однолетние растения, Дв. — двулетние растения.

Таблица 2

Список заносных видов растений

Название	Экологическая ниша	Продолжительность жизни	Примечание
Черда (<i>Bidens</i> spp.)	Берег водоема, биоплато	Одн.	Растения более южные, но можно подсеять в травяную ковровую дернину
Ситняг болотный (<i>Eleocharis palustris</i>)	Берег водоема, прибрежная зона, биоплато	Мн.	Могут быть использованы и другие доступные виды рода
Кипрей железистоцветковый (<i>Eriophorum adenocaulon</i>)	Берег водоема, биоплато	Мн.	Растения заносные, можно подсеять в травяную ковровую дернину
Кипрей розовый (<i>Eriophorum roseum</i>)	Берег водоема, биоплато	Мн.	То же
Манник (<i>Glyceria</i> spp.)	Прибрежная зона, биоплато	Мн.	Растения более южные, но может быть встречен манник большой (<i>Glyceria maxima</i>)
Водокрас лягушачий (<i>Hydrocharis morsus-ranae</i>)	Плывает на поверхности воды	Мн.	Растение более южное, но может быть встречено по заводям
Ситник сплюснутый (<i>Juncus compressus</i>)	Прибрежная зона, биоплато	Мн.	Растение более южное, но может быть встречено возле местных водоемов
Крестовник (<i>Senecio</i> spp.)	Берег водоема, биоплато	Одн., Дв.	Можно подсеять в травяную ковровую дернину, особенно <i>S. palustris</i> , <i>S. vulgaris</i>
Телорез алоевидный (<i>Stratiotes aloides</i>)	В воде	Мн.	Вид может быть встречен в местных водоемах

Название	Экологическая ниша	Продолжительность жизни	Примечание
Вероника клобучвая (<i>Veronica atagallis-aquatica</i>)	Прибрежная зона, плавающие фитомодули	Мн.	Вид может быть встречен в местных водоемах
Мятлик болотный (<i>Poa palustris</i>)	Берег водоема, плавающие фитомодули	Мн.	Можно подсеивать в травяную ковровую дернину
Сныть обыкновенная (<i>Aegorodion podagraria</i>)	Берег водоема	Мн.	Можно подсеивать в травяную ковровую дернину, фитоматы
Чихотник иволгистый (<i>Rtarnica salicifolia</i>)	Берег водоема, плавающие фитомодули	Мн.	Вид может быть встречен в местных водоемах
Элодея канадская (<i>Elodea canadensis</i>)	В воде	Мн.	Можно использовать для наполнения фитосадков
Василистник водосборolistный (<i>Thalictrum aquilegifolium</i>)	Берег водоема, биоплаги	Мн.	Вид может быть встречен в местных сообществах

Примечание: Мн. — многолетние растения, Одн. — однолетние растения, Дв. — двулетние растения.

Таблица 3

Список видов растений, внесенных в Красную книгу Мурманской обл., используемых в ФОС

Название	Экологическая ниша	Продолжительность жизни
Сусак зонтичный (<i>Butomus umbellatus</i>)	Прибрежная зона, плавающие фитомодули	Мн.
Камыш озерный (<i>Schoenoplectus (Scirpus) lacustris</i>)	Прибрежная зона	Мн.
Частуха подорожниковая (<i>Alisma plantago-aquatica</i>)	Прибрежная зона, плавающие фитомодули	Мн.

Для заболачивания мелководья с быстрым потоком воды с помощью фитотубусов можно использовать живые растения тростника обыкновенного, рогоза широколистного, пушицы узколистной, пушицы Шейхцера, осоки, ивы филиколистной, ивы козьей.

Таким образом, все виды растений, вошедшие в зональные ассортименты, разработанные для формирования ФОС на отстойнике Кировогорского карьера, способны расти не только в режиме долговременного затопления, но и при более низком уровне воды, на периодически увлажняющихся участках суши, а также в условиях часто меняющегося уровня воды. Адаптированные к условиям Заполярья, они могут быстро и самостоятельно размножаться вегетативно, формировать хорошо развитую, способную проникать на значительную глубину, корневую систему, потреблять минеральные соединения азота для своего роста и развития, увеличивая при этом фитомассу и значительно повышая эффективность очистки сточных карьерных вод. Данные виды растений образуют ряд экологических группировок на разных участках водоема, включая сложные, где размещение и выращивание растений без специализированных конструкций очень проблематично или практически невозможно.

Для расширения разработанных зональных ассортиментов растений представляют интерес дикорастущие виды (табл. 1) и виды растений, которые произрастают в естественных сообществах, но являются заносными (табл. 2). С особой осторожностью стоит использовать элодею канадскую и таран Вейриха, поскольку они являются потенциально инвазионными видами. В частности, элодея, или канадская чума, впоследствии может широко расселиться и принести значительный и экологический, и экономический ущерб. Кроме того, ряд видов, используемых в ФОС, внесены в Красную книгу Мурманской области и их применение возможно лишь при условии, что будет использован материал из других регионов.

СУБСТРАТЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ФИТОМАТОВ И ПОСТРОЕНИЯ ФОС

Принцип очистки в биопрудах с высшей водной растительностью заключается не только в усвоении и трансформации растениями и микроорганизмами загрязняющих веществ, но и в их сорбции на частицах грунта в процессе фильтрации сточных вод. Поэтому при создании фитоочистной системы важен правильный выбор субстратов, в которые предполагается посев семян или посадка растений.

При выборе субстратов и грунтов для посадки растений в водоемах к ним предъявляют определенные требования. Они должны содержать мало извести и отдавать воде как можно меньше питательных веществ. В противном случае в водоеме может появиться чрезмерное количество нежелательных водорослей. Наличие органических веществ также может способствовать процессу гниения и образования таких токсичных газов, как метан и сероводород.

Наиболее часто используемыми в ФОС субстратами являются песок и гравий. Кроме того, применяют и древесные опилки, рисовую шелуху, цеолит, слюду, золу, угольные шлаки, торф, мертвый сестон, компост гравий, реже — легкий керамзит, вспученный перлит и чистый песок. Иногда в качестве субстратов используют камни и вулканический туф [Казмирук, Казмирук, 2016].

В наших исследованиях по разработке инновационной ФОС использовали два субстрата-почвозаменителя — мелко- или крупно фракционированный термовермикулит марки «Випон» [Иванова, Котельников, 2008] и древесные опилки (свежие или подстилочные).

Термовермикулит — местный природный почвозаменитель, получаемый методом электрообжига минерала вермикулита (Ковдорское месторождение, Мурманская обл.), в результате которого он приобретает ряд ценных свойств.

Древесные опилки — отходы деревообрабатывающего производства, широкодоступные и часто применяемые в растениеводстве. Оба эти субстрата обладают высокими воздухо- и влагоемкостью и нередко используются для гидропонного выращивания растений [Иванова, Котельников, 2008]. Благодаря этим свойствам они обеспечивают оптимальные условия (влажность, аэрацию и

температуру) для гарантированного, быстрого (в течение одной недели) и дружного прорастания сухих семян, входящих в состав фитоматов, и интенсивного роста и развития растений на последующих стадиях онтогенеза, тем самым ускоряя формирование искусственно создаваемых фитоценозов. Данные субстраты не являются источником вторичного загрязнения, при этом они усиливают очищающую способность создаваемой фитосистемы за счет сорбционных свойств материалов.

Сточные воды, проходя через фитосистему, непосредственно контактируют не только с растениями, но и с субстратами, в которых растения закреплены. Очищение сточных вод усиливается в результате процессов седиментации, фильтрации, окисления, восстановления и адсорбции. Кроме того, свежие опилки являются потребителями азота [Allison, 1965], потому что бактерии, грибы и актиномицеты, разлагающие растительные материалы, требуют значительного количества азота для образования белка и других составляющих клеток, что также способствует очищению воды. Их применение удешевляет технологию создания ФОС, так как опилки являются звеном безотходной технологии, имеют очень низкую стоимость и широко доступны. Подстилочные опилки несут в себе банк семян, которые, попадая во влажную среду, прорастают. Это дает основание уменьшить в дальнейшем норму внесения травосмеси, которую применяют при создании фитоматов. Если учесть, что в создании ФОС им, по сравнению с вермикулитовым субстратом, предоставлена ведущая в количественном отношении роль, то использование опилок способствует значительному снижению затрат на производство фитоматов и построение фитосистемы в целом.

Оба эти субстрата, являясь одновременно влагоемкими гидропонными сорбентами, в процессе своего использования для выращивания растений позволяют значительно ускорить формирование растительных сообществ и очистку воды от соединений азота.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ КАРЬЕРНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОС В УСЛОВИЯХ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

В настоящее время экологическая безопасность является неперенным требованием к любой хозяйственной деятельности. Загрязнять окружающую среду становится экономически не выгодно, не говоря уже об аморальной стороне этого процесса.

В результате многолетних исследований, начатых в 2012 г., была разработана и внедрена научно обоснованная, малозатратная инновационная технология трансформирования техногенного водоема в природоподобную болотную экосистему для доочистки сточных карьерных вод от соединений азота. Данный метод экономически более эффективен по сравнению с другими технологиями очистки сточных вод, так как он не требует существенных капитальных вложений. Достоинствами технологий являются низкие эксплуатационные расходы и затраты на техническое обслуживание, а также отсутствие необходимости вывоза осадка, малая численность персонала, отсутствие необходимости в реагентах.

В основе технологии лежит комплексное использование фитомодулей, позволяющих в ускоренном режиме формировать разные комбинации растительных блоков, предназначенных для локального залужения прибрежных наземных участков и заболачивания водоемов. Их применение позволило увеличить эффективность очистки сточных вод Кировогорского карьера АО «Олкон», а также свести к минимуму затраты на обслуживание очистного сооружения за счет преобладания естественных экосистемных процессов в сформированных фитоценозах.

Для дальнейшего повышения эффективности разработанной фитоочистной системы и поддержания ее работоспособности необходимо придерживаться разработанных направлений в ее развитии, а именно:

- более широкое применение садковых модулей с растениями, что позволит очищать воду по всей глубине; растения в садках являются субстратом для формирования биопленок микроорганизмов, осуществляющих трансформацию соединений азота, а также служат источником органического вещества для процессов денитрификации;

- заблачивание мелководных участков путем посадки растений, максимально аккумулирующих нитрат-ионы (осоки, рогоз, ивы, ряска и злаковые растения травосмеси);

- покрытие растительностью участков прибрежной полосы отстойника с использованием фитоматов, посева травосмесей, а также древесной растительности;

- обогащение ассортиментов растений новыми, относительно толерантными к техногенному загрязнению (в том числе биогенными элементами) видами, произрастающими в Мурманской обл.;

- увеличение времени задержки воды в водоеме путем создания искусственных препятствий по ходу движения воды с помощью фитосадков, вертикально установленных сетчатых заграждений с растениями и проч.;

- обеспечение максимально эффективного разбавления сточной карьерной воды за счет перераспределения имеющихся природных водотоков (обеспечение беспрепятственного поступления чистой природной воды с территории, окружающей карьер и пруд-отстойник (болот, склонов возвышенностей));

- проведение лабораторных и полевых исследований, направленных на определение оптимальных параметров функционирования ФОС.

Особо следует отметить, что ФОС — это живая система, нуждающаяся, как и все живое, в надлежащей поддержке своей жизнеспособности: обеспечении оптимального режима эксплуатации, сбалансированного соотношения питательных элементов в воде, отсутствия в высоких дозах токсичных соединений, пригодном диапазоне кислотно-щелочных условий среды, соблюдении гидрологического режима.

Реализация рекомендованных мероприятий позволит добиться максимальной эффективности разрабатываемой инновационной фитоочистной системы, а также поможет свести к минимуму затраты на ее обслуживание за счет интенсификации естественных экосистемных процессов в сформированных фитоценозах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время искусственно создаваемые заболоченные территории в качестве фитоочистных сооружений признаются перспективной природоподобной технологией очистки и доочистки жидких стоков от различных видов загрязняющих веществ, они создаются практически во всех природно-климатических зонах от Норвегии до Австралии, в том числе в условиях холодной климатической зоны. Так как качественное функционирование ФОС во многом зависит от климатических особенностей, объемов и состава загрязненных вод, особенностей технологического процесса и др., то их создание в условиях северных широт требует индивидуального подхода в каждом конкретном случае.

С 2012 г. усилиями ученых ИППЭС КНЦ РАН и ПАБСИ КНЦ РАН на отстойнике Кировогорского карьера АО «Олкон» (Оленегорский ГОК, г. Оленегорск) внедряется и апробируется инновационная эковиотехнология создания ФОС для эффективной доочистки сточных карьерных вод от соединений азота. Она базируется на природных механизмах трансформации соединений азота в воде путем усвоения загрязняющих веществ аборигенной болотной растительностью, микроорганизмами и за счет сорбционных свойств используемых субстратов-почвозаменителей (древесные опилки и термовермикулит), не требует затрат энергии, химических реагентов и дефицитных в регионе почвенных компонентов. В результате многолетних исследований разработаны плавающие фитомодули — фитоматы, фитосадки и фитотубусы, позволяющие снизить содержание иона аммония в сточной воде на 92 %, нитратов — на 23 %.

Комплексный подход к формированию природоподобной очистной болотной системы осуществлен впервые в практике действующих горнорудных предприятий в экстремальных условиях Арктической зоны РФ. В 2018 г. АО «Олкон» стало победителем ежегодного форума PEOPLE INVESTOR в номинации «Экологическая эффективность», где был представлен проект «Очистка сточных вод с помощью водных растений».

СЛОВАРЬ НЕКОТОРЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ

Мезофиты — наземные растения, обитающие в среде с более или менее достаточным, но не избыточным увлажнением почвы. Они требуют более или менее непрерывного водоснабжения в период вегетации, не терпимы к длительной засухе, быстро теряют влагу и увядают. К этой группе относятся растения лугов, травяного покрова лесов, лиственные древесные и кустарниковые породы из областей умеренно влажного климата, а также большинство культурных растений.

Водные и околководные растения — растения, обитающие в толще воды (рдесты, уруть, роголистник, перистолистник и др.) и на ее поверхности (кувшинка, лотос, кубышка, ряски, телорез и др.), а также прибрежные растения (тростник, рогозы, осоки, камыш и др.). Среди водных и околководных растений выделяют две большие группы: гидрофиты и гигрофиты. Многие виды гигрофитов, как и гидрофиты, имеют гидроморфное строение стебля и листьев, поэтому между этими группами растений трудно провести границу [Криворотов, Сионова, 2015].

Гидрофиты — настоящие водные растения, которые постоянно растут в воде. По образу жизни и строению среди них можно выделить погруженные растения и растения с плавающими листьями. Погруженные растения подразделяют на укореняющиеся в донном грунте и взвешенные в толще воды. Растения с плавающими листьями используют частично водную, частично воздушную среду. Многие виды, наряду с плавающими на поверхности воды листьями, имеют и подводные.

Гигрофиты — растения влажных и периодически затопляемых местообитаний, для которых характерно отсутствие приспособлений, ограничивающих расходование влаги. Гигрофиты близки к гидрофитам и гидатофитам, поэтому их в силу схожести морфологии и условий жизнеобитания иногда рассматривают как одну группу.

Гидатофиты — водные растения, которые, в отличие от гидрофитов, целиком или большей своей частью погружены в воду. Одни из них не прикреплены корнями к грунту (ряска, элодея), другие — прикреплены (кувшинка).

Гелофиты — земноводные растения береговых и прибрежных местообитаний с избыточным или переменным увлажнением. Они могут расти как в воздушной среде, так и частично погруженными в воду, могут выносить и полное временное затопление. Группа гелофитов связана, с одной стороны, с настоящими гидрофитами, а с другой — с наземными гигро- и мезофитами [Садчиков, Кудряшов, 2004].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атавина, Т. В. В гармонии с природой / Т. Атавина // Вода Magazine. 2018. № 1 (125). С. 8–11.

Ашихмина, Т. Я. Очистка загрязненных нитратом аммония пойменных озер в районе хвостохранилища мела завода минеральных удобрений Кирово-Чепецкого химического комбината / Т. Я. Ашихмина // Вестник ИБ. 2013. № 5. С. 24.

Водоотведение / Ю. В. Воронов, Е. В. Алексеев, В. П. Саломеев, Е. А. Пугачев. Москва : ИНФРАМ, 2007. 415 с.

Вурдова, Н. Г. Электродиализ природных и сточных вод / Н. Г. Вурдова, В. Т. Фомичев. Москва : Изд-во АСВ, 2001. 144 с. 7.

Гидрботанический способ доочистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий / С. Ю. Третьякова, О. А. Федорова, Б. Ф. Петров, Б. Н. Семенов // Вестник МГТУ. 2011. Т. 14, № 4. С. 837–841.

Головкин, Б. Н. Переселение травянистых многолетников на Полярный Север / Б. Н. Головкин. Ленинград : Наука, 1973. 266 с.

Диренко, А. А. Использование высших водных растений в практике очистки сточных вод и поверхностного стока / А. А. Диренко, Е. М. Коцарь // Тезисы докладов междунар. конф. «Aquaterra», Санкт-Петербург, 1999. С. 72–78.

Добровольский, Г. В. География почв / Г. В. Добровольский, И. С. Урусевская. Москва : Изд-во МГУ, 2004. 460 с.

Доочистка сточных вод с помощью фиторемедиации / Е. Э. Нефедьева [и др.] // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20, № 10. 145–148.

Захарченко, М. А. Очистка сточных воды и загрязненных грунтов с помощью эофитотехнологий / М. А. Захарченко, И. А. Рыжикова // Мир техники и технологий. 2005. № 11 (48). С. 60–62.

Зюзин, Ю. Л. Суровый лик Хибин / Ю. Л. Зюзин. Мурманск : Рекламная полиграфия, 2006. 236 с.

Иванова, Л. А. Перспективы гидропонного выращивания растений в Мурманской области / Л. А. Иванова, В. А. Котельников. Апатиты : КНЦ РАН, 2006. 106 с.

Иванова, Л. А. Экологические аспекты использования ковдорского вермикулита в северном растениеводстве / Л. А. Иванова, В. А. Котельников // Северные территории России: проблемы и перспективы развития :

материалы всерос. конф. с междунар. участием. Архангельск : ИЭПС УрО РАН, 2008. С. 517–520.

Инженерная защита окружающей среды. Очистка вод. Утилизация отходов / под редакцией Ю. А. Бирмана, Н. Г. Вурдовой. Москва : Изд-во, 2002. 296 с.

Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТЭС-2015 «Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях», утвержденный приказом Росстандарта 15.12.2015 № 1578, Раздел 6 «Перспективные технологии». Технология ПТ-1. «Фитотехнологии очистки сточных вод». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200128668> (дата обращения: 24.01.2021).

Казмирук, В. Д. Зарастающие водотоки и водоёмы: Динамические процессы формирования донных отложений / В. Д. Казмирук, Т. Н. Казмирук, В. Ф. Бреховских. Москва : Наука, 2004. 310 с.

Казмирук, В. Д. Использование фиторемедиации для охраны вод в России и мире / В. Д. Казмирук, Т. Н. Казмирук // Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз. Новочеркасск. 2013. С. 332–337.

Казмирук, В. Д. Охрана и очистка вод методами фитотехнологий / В. Д. Казмирук, Т. Н. Казмирук // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 год». Петрозаводск, 2015. Т. 1. С. 294–301.

Казмирук, В. Д. Очистка воды методами фитотехнологий // Водоочистка. 2015. № 5–6. С. 66–70.

Казмирук, В. Д. Современные тенденции использования фитотехнологий для очистки и охраны вод / В. Д. Казмирук, Т. Н. Казмирук // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 3. С. 76–81.

Казмирук, В. Д. Фиторемедиация в охране вод: неограниченные возможности и возможные ограничения / В. Д. Казмирук // Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. Вып. 10. Рязань, 2013. С. 494–501.

Калайда, М. Л. Биоплато как способ доочистки дренажных вод города и сточных вод промышленных предприятий / М. Л. Калайда, Л. К. Говоркова,

С. Д. Загустина, М. Ф. Хамитова // Проблемы энергетики. 2009. № 7–8. С. 123–129.

Калайда, М. Л. Доочистка производственных сточных вод с помощью высших водных растений / М. Л. Калайда // Экология и промышленность России. 2010. № 3. С. 33–35.

Криворотов, С. Б. Экология водных и околоводных декоративных растений : методические указания / С. Б. Криворотов, Н. А. Сионова. Краснодар : КубГАУ, 2015. 36 с.

Ксенофонтов, Б. С. Флотационная очистка сточных вод / Б. С. Ксенофонтов. Москва : Новые технологии, 2003. 160 с.

Макеев, И. С. Сезонная акклиматизация водного гиацинта для фиторемедиации малого водотока города Нижнего Новгорода / И. С. Макеев, М. И. Коротаева, А. И. Голикова // Успехи современного естествознания. 2016. № 1. С. 132–136.

Методы очистки промышленных сточных вод и их нормативы // Компания KVANTA+. URL: <https://kvanta.ru/ochistka-vody/promyshlennye-stochnye-vody-normativy-i-metody-ochistki> (дата обращения: 26.01.2021).

Методы снижения концентрации и сульфатов в сточных водах горнорудных предприятий / В. А. Маслобоев [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. Апатиты, 2017. № 1/(9). С. 99–106.

Остроумов, С. А. Гидробиологические механизмы самоочищения воды: элементы теории / С. А. Остроумов // Экологические системы и приборы. 2006. № 5. С. 17–20.

Оценка возможности использования пистии телорезовидной (*Pistia stratiotes*) и ряски малой (*Lemna minor*) для фиторемедиации водной среды / Г. А. Сорокина, Е. В. Злобина, Л. Г. Бондарева, М. А. Субботин // Вестник КрасГАУ. 2013. № 11. С. 182–186.

Патент № 2393665 Российская Федерация, МПК A01G 31/00 (2006.01). Способ создания экологически чистого покрытия и питательная среда для его выращивания : № 2007126884/12 : заявл. 13.07.2007 : опубл. 20.01.2009 / Иванова Л. А., Котельников В. А. ; Общество с ограниченной ответственностью «ВИПОН». 1 с.

Патент № 189759 Российская Федерация, МПК C02F 3/32 (2006.01). Модуль фитосистемы для биологической очистки промышленных сточных вод от минеральных загрязнителей : № 2018133048 : заявл. 17.09.2018 : опубл.

: 03.06.2019 / Иванова Л. А., Мязин В. А., Корнейкова Е. В., Фокина Н. В., Редькина В. В., Евдокимова Г. А. ; ИППЭС КНЦ РАН. 9 с.

Патент № 2560631 Российская Федерация, МПК C02F 3/32(2006.01) E02B 15/04(2006.01). Устройство для биологической очистки сточных карьерных вод : № 2014122204/13 : заявл. 30.05.2014 : опубл. 20.08. 2015 / Евдокимова Г. А., Иванова Л. А., Мязин В. А. ; ИППЭС КНЦ РАН. 10 с.

Плавающие биоплато для очистки сточных карьерных вод от минеральных соединений азота в арктических условиях / Г. А. Евдокимова [и др.] // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19, № 9. С. 35–41.

Пора озеленять Арктику. Инновационные газонные технологии для создания травяного покрова различного назначения в условиях Заполярья / Л. А. Иванова, М. В. Слукотская, И. П. Кременецкая, Т. Т. Горбачева. Апатиты : Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2020. 37 с.

Применение биоплато для снижения биогенного загрязнения водоемов и водотоков / Ю. Н. Соколов, Л. А. Плотницкий, Т. Ю. Стрюк, О. А. Дьяков // Вісник Одеського державного екологічного університету. 2009. Вип. 7. С. 20–25.

Разработка и оптимизация способа биологической очистки сточных карьерных вод от минеральных соединений азота в условиях Арктики / Л. А. Иванова [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. 2019. Вып. 1, № 1. С. 82–87. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-1-082-087.

Савичев, О. Г. Биологическая очистка сточных вод с использованием болотных биогеоценозов / О. Г. Савичев // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312, № 1. С. 69–74.

Садчиков, А. П. Экология прибрежно-водной растительности : учебное пособие для студентов вузов / А. П. Садчиков, М. А. Кудряшов. Москва : НИИ-Природа, РЭФИА, 2004. 220 с.

Сивкова, Е. Е. Влияние рогаза широколистного (*Typha latifolia* L.) и компонентов фильтрующей загрузки на эффективность удаления соединений азота в системах почвенно-болотной очистки сточных вод / Е. Е. Сивкова, Е. В. Прибыткова // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2011. № 2 (14). С. 141–149.

Справочник по климату СССР. Мурманская область. Вып. 2, ч. 1: Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. Ленинград : Гидрометеиздат, 1966–1968. 60 с.

Стольберг, В. Ф. Биоплато эффективная малозатратная экотехнология очистки сточных вод / В. Ф. Стольберг, В. Н. Ладыженский, А. И. Спирин // *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 3. С. 32–34.

Третьякова, С. Ю. Предварительные оценки эффективности формирования участка биоплато с использованием саженцев осоки в осенне-зимний период / С. Ю. Третьякова, С. Е. Завалко // *Наука и образование: материалы междунар. науч.-техн. конф.* (Мурманск, 7–15 апреля 2004). Мурманск : Изд-во МГТУ, 2004. Ч. 4. С. 199.

Хенце, М. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы / М. Хенце; перевод с английского Т. П. Мосоловой ; под редакцией С. В. Каложного. Москва : Мир, 2004. 480 с.

A correction coefficient for pollutant removal in free water surface wetlands using first-order modelling / S. Shih, P. Kuo, W. Fang, B. A. Le Page // *Ecol. Eng.* 2013. No. 61A. P. 200–206.

A review on the mechanism and affecting factors of nitrous oxide emission in constructed wetlands / L. Huang [et al.] // *Environ Earth Sci.* 2013. No. 68 (8). P. 2171–2180.

A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation / H. Wu [et al.] // *Bioresour Technol.* 2015. No. 175. P. 594–601.

Allison, F. E. Decomposition of wood and bark sawdusts in soil, nitrogen requirements and effects on plants / F. E. Allison // *US Dept. of Agriculture*. 1965. Vol. 1328.

Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries A review of recent developments (2000–2013) / Dong Qing Zhang [et al.] // *J. Environmental Management*. 2014. Vol.141. P. 116–131.

Brix, H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? / H. Brix // *Water Res.* 1997. No. 35 (5). P. 11-17.

Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate: a review / Mo Wang, Dong Qing Zhang, Jian Wen Dong, Soon Keat Tan // *Chemistry, Medicine : J. Environ. Sci.* 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2016.12.019>.

Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate: a review / M. Wang, D. Q. Zhang, J. W. Dong, S. K. Tan // *J. Environ. Sci.* 2017. No. 57 (7). P. 293–311.

Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate / M. Wang, D. Q. Zhang, J. W. Dong, S. K. Tan // *J. Environ. Sci.* 2017. No. 57. P. 293–311. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2016.12.019>.

Constructed wetlands in developing countries / P. Denny [et al.] // *Water Sci. and Technol.* 1997. No. 35 (5). P. 167–174.

Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters Manual — National Risk Management Research Laboratory; Office of Research and Development; U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio 45268 EPA/625/R-99/010. 1999. September

Combined aerobic and anaerobic biological treatment of tailings solution at the Nickel Plate Mine / B. Given [et al.] // *The Cyanide : monograph* / T. I. Mudder, M. Botz (eds.). 2nd ed. Limited. London, UK, 1998. P. 391–421.

Design of tropical constructed wetlands / N. Tanaka, W. J. Ng, G. Gunaratne // *Wetlands for tropical applications: Wastewater Treatment by Constructed Wetlands*. London : Imperial College Press, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2011. P. 69–93.

Effects of influent C/N ratios on CO₂ and CH₄ emissions from vertical subsurface flow constructed wetlands treating synthetic municipal wastewater / C. Yan [et al.] // *J Hazard Mater.* 2012. No. 203–204. P. 188–194.

Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment / U. Stottmeister [et al.] // *Biotechnology Advances*. 2003. Vol. 22, Issues 1–2. P. 93–117.

Floating bioplato for purification of waste quarry waters from mineral nitrogen compounds in the Arctic / G. A. Evdokimova [et al.] // *J. Environmental Sci. and Health. Part A*. 2016. Vol. 51, Iss.10. P. 833–838. IF WoS - 1.252.

Free water surface constructed wetlands for domestic wastewater treatment: a tropical case study / K. B. Jinadasa, N. Tanaka, M. I. Mowjood, D. R. Werellagama // *Chem. Ecol.* 2006. No. 22 (3). P. 181–191.

Given, B. Biological Treatment of Tailings Solution at the Nickel Plate Mine / B. Given, S. Meyer // *Proc. 22nd Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium, Penticton, British Columbia*. 1998. P. 157–171.

Guang, J. Removal of N, P, BOD₅ and Coliform in Pilot-Scale Constructed Wetland Systems / Jin Guang, Kelley Tim, Callahan Mike // *Intern. J. Phytoremediation*. 2002. Vol. 4, No. 2. P. 127–1413.

Han, L. Design and assessment of stream wetland systems for nutrient removal in an urban watershed of China / L. Han, T. O. Randhir, M. S. Huang // *Water Air Soil Poll.* 2017. No. 228 (4). P. 139–154.

Improving water quality in polluted drains with free water surface constructed wetlands / M. A. El-Sheikh, H. I. Saleh, D. E. El-Cmosy, A. A. Mahmoud // *Ecol. Eng.* 2010. No. 36. P. 1478–1484.

Influence of residence time analyses on estimates of wetland hydraulics and pollutant removal / H. Bodin, J. Persson, J. E. Englund, P. Milberga // *J. Hydrol.* 2013. 501 (10). P. 1–12.

Jenssen, P. Potential use of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Northern Environments / P. Jenssen, T. Maehlum, T. Krogstad // *Water Science Techniques.* 1993. Vol. 28, No. 10. P. 149–157.

Kadlec, R. H. Detention and mixing in free water wetlands / R. H. Kadlec // *Ecol. Eng.* 1994. No. 3 (4). P. 345–380.

Kadlec, R. H. Treatment Wetlands / R. H. Kadlec, S. D. Wallace. 2nd ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2008. No. 24 (11). P. 34–38.

Kirby, C. S. Net alkalinity and net acidity 2: practical considerations / C. S. Kirby, C. A. Cravotta // *Appl. Geochem.* 2005. No. 20 (10). P. 1941–1964.

Maehlum, T. Cold-climate constructed wetlands / T. Maehlum, P. D. Jenssen, W. S. Warner // *Wat. Sci. Tech.* 1995. Vol. 32, No. 3. P. 95–101.

Mattila, K. Biological removal of nutrients from mine waters / K. Mattila, G. Zaitsev, J. Langwaldt // *Biologinen ravinteiden poisto kaivosvedestä. Final report-loppuraportti.* 2007. 99 p.

Microbial nitrogen removal pathways in integrated vertical-flow constructed wetland systems / Y. Hu [et al.] // *Bioresour Technol.* 2016. No. 207. P. 339–345.

Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: a review / J. L. Faulwetter [et al.] // *Ecol. Eng.* 2009. No. 35 (6). P. 987–1004.

Nitrogen transformations and mass balance in an integrated constructed wetland treating domestic wastewater / M. Dzakpasu, M. Scholz, V. McCarthy, S. Jordan // *Water Sci. Technol.* 2014. No. 70 (9). P. 1496–1502.

On the fit of statistical and the k-C* models to projecting treatment performance in a constructed wetland system / A. O. Babatunde [et al.] // *J. Environ Sci. Heal.* 2011. A 46 (5). P. 490–499.

Optimal design for hydraulic efficiency performance of free-water-surface constructed wetlands / T. M. Su, S. C. Yang, S. S. Shih, H. Y. Lee // *Ecol. Eng.* 2009. No. 35B. P. 1200–1207.

Performance evaluation of an integrated constructed wetland used to treat a contaminated aquatic environment / Y. Zhang [et al.] // *Wetl. Ecol. Manage.* 2014. No. 22 (5). P. 493–507.

Pilot-scale comparison of constructed wetlands operated under high hydraulic loading rates and attached biofilm reactors for domestic wastewater treatment / M. S. Fountoulakis [et al.] // *Sci. Total Environ.* 2009. No. 407 (8). P. 2996–3003.

Patrick, P. Constructed wetlands / P. Patrick // Fujita Research. Brighton, 1998. 13 p. URL: <http://www.fujitaresearch.com/reports/wetlands.html> (дата обращения: 25.01.2021).

Performance of an anaerobic baffled reactor and hybrid constructed wetland treating high-strength wastewater in Nepale a model for DEWATs / S. Singh [et al.] // *Ecol. Eng.* 2009. No. 35. P. 654–660.

Persson, J. How hydrological and hydraulic conditions affect performance of ponds / J. Persson, H. B. Wittgren // *Ecol. Eng.* 2003. No. 21 (4–5). P. 259–269.

Potential of constructed wetlands in treating the eutrophic water: evidence from Taihu Lake of China / L. Li [et al.] // *Bioresour. Technol.* 2008. No. 99. P. 1656–1663.

Ran, N. A pilot study of constructed wetlands using duckweed for treatment of domestic primary effluent in Israel / Ran Noemi, Agami Moshe, Oron Gideon // *Water Research.* 2004. No. 38. P. 2241–2248.

R&D priorities in the field of sustainable remediation and purification of agro-industrial and municipal wastewater / K. Miksch [et al.] // *New Biotechnology.* 2015. Vol. 32, No 1. P. 128–132.

Reinsel, M. A. Analyzing a new biological treatment process for astewater / M. A. Reinsel // *Water Online News.* 2001. URL: <http://www.wateronline.com/content/news/article.asp?DocID=%7BCCA99FC1-2783-11D5-A770-00D0B7694F32%7D&Bucket=Case+Studies> (дата обращения: 30.01.2021).

Removal of nitrogen and COD in horizontal subsurface flow constructed wetlands under different influent C/N ratios / H. Zhu [et al.] // *Ecol. Eng.* 2014. No. 63. P. 58–63.

Saeed, T. A review on nitrogen and organic removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters operating conditions and supporting media / T. Saeed, G. Sun // *J. Environmental Management.* 2012. Vol. 112. P. 429–448.

Spatio-temporal shifts in the archaeal community of a constructed wetland treating river water / B. Li [et al.] // *Sci. Total Environ.* 2017. No. 605–606. P. 269–275.

Treatment of polluted river water using pilot-scale constructed wetlands / X. Ruan [et al.] // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2006. No. 76. P. 90–97.

Vymazal, J. Constructed wetlands for wastewater treatment / *J. Vymazal // Water.* 2010. Vol. 2. P. 530–549.

Vymazal, J. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: a review // *Ecol. Eng.* 2014. Vol. 73. P. 724–751.

Vymazal, J. Constructed wetlands for wastewater treatment / *J. Vymazal // Proc. of TAAL 2007: the 12th World Lake Conf., India, 28 October — 2 November. 2008. P. 965–980.*

Vymazal, J. Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: a review / *J. Vymazal // Ecol. Eng.* 2013. No. 61B. P. 582–592.

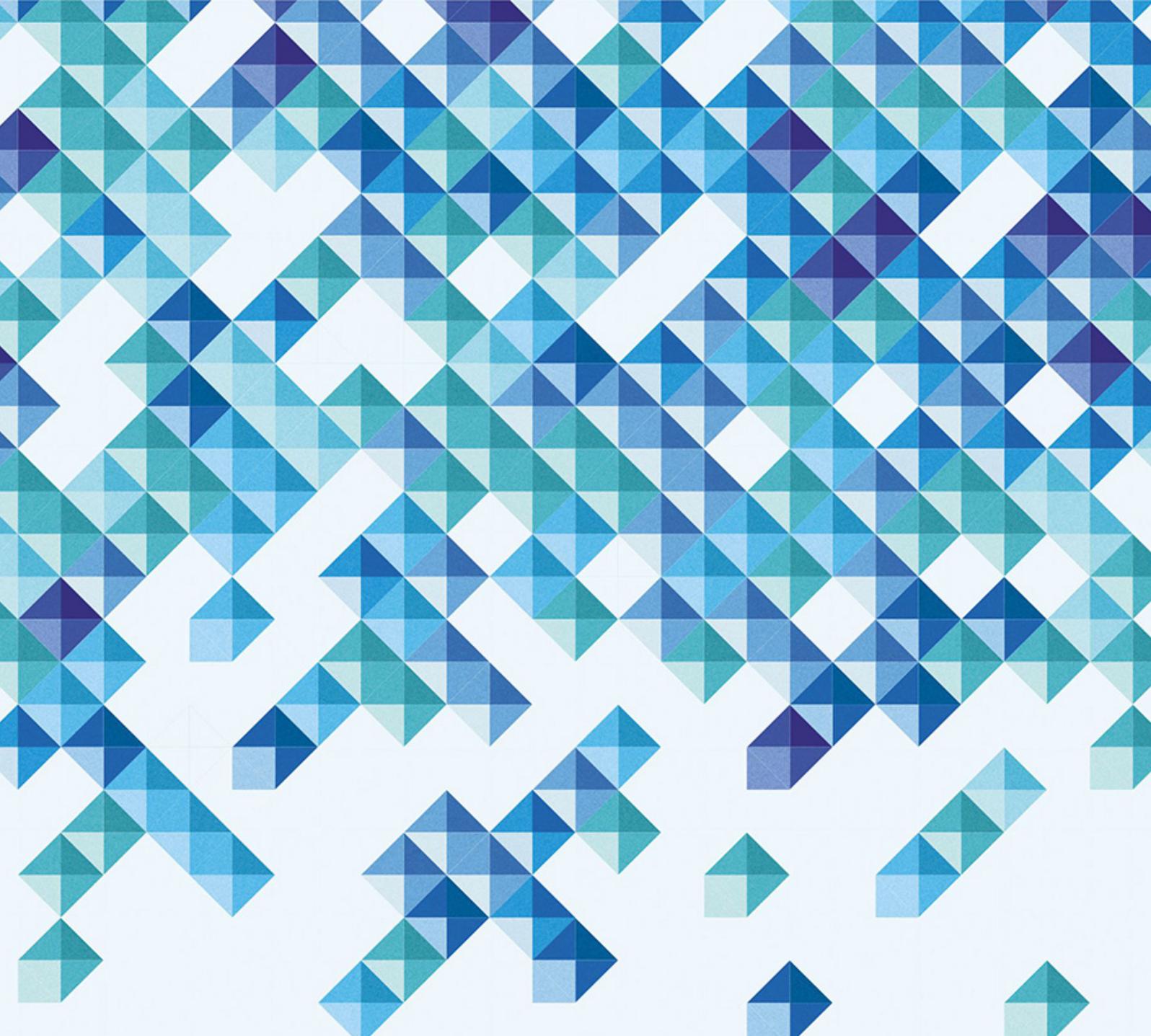
Vymazal, J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment / *J. Vymazal // Ecol. Eng.* 2005. No. 25 (5). P. 478–490.

Vymazal, J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands / *J. Vymazal // Sci. Total Environ.* 2007. No. 380. P. 48–65.

Wetland treatment at extremes of pH: a review / W. M. Mayes [et al.] // *Sci. Total Environ.* 2009. No. 407 (13). P. 3944–3957.

Younger, P. L. Hydrogeochemistry of mine waters flowing from abandoned coal workings in County Durham / *P. L. Younger // J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 1995. No. 28. P. 101–113.

Zakharchenko, M. The Experience of Exploitation of Constructed Wetlands in Ukraine / *M. Zakharchenko, Y. Dziubenko, I. Ryzhykova // 10th Intern. Conf. Wetland Systems for Water Pollution Control (2006, Lisbon, Portugal). 2006. P. 56–59.*



ISBN 978-5-91137-449-5



9 785911 374495

