ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Обзорная статья

Геотехнология и инженерная геология

Плавающие биоплато Constructed Floating Wetlands – фитотехнология для очистки сточных вод: опыт применения и перспективы использования

Л.А.Иванова[1,2], **Е.А.Красавцева**[2,3]✉, **Т.Т.Горбачева**[2]

[1] *Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А.Аврорина ФИЦ КНЦ РАН, Кировск, Россия*

[2] *Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*

[3] *Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики ЦНМ КНЦ РАН, Апатиты, Россия*

Как цитировать эту статью: Иванова Л.А., Красавцева Е.А., Горбачева Т.Т. Плавающие биоплато Constructed Floating Wetlands – фитотехнология для очистки сточных вод: опыт применения и перспективы использования // Записки Горного института. 2025. С. 1-14. EDN WITMPB

Аннотация

Статья посвящена активно развивающемуся направлению очистки сточных вод – Constructed Floating Wetlands (CFW, плавающие биоплато). Освещены история создания и опыт эксплуатации CFW в России и за рубежом. Описаны конструкции и предпочтительные составы субстратов и растений для создания фитомодулей. Особое внимание уделено применению природных минералов и выбору местных видов растений-макрофитов. Технология CFW пригодна для очистки разных типов сточных вод, включая неорганические стоки горно-промышленных предприятий. Рассмотрены результаты применения фитотехнологии для очистки сточных вод от загрязняющих веществ (общий азот и фосфор, органические вещества, взвешенные частицы, тяжелые металлы, сульфаты, бор и др.). Показан положительный опыт использования CFW для кислотных дренажных стоков, наиболее сложных для применения фитотехнологий. Выявлены факторы, влияющие на эффективность удаления загрязнителей – глубина водоема, скорость потока, площадь покрытия, аэрация, температура. Представлены способы повышения глубины очистки вод при пониженных температурах. Отмечено положительное влияние плавающих биоплато на состояние водоемов, в которых они размещаются. Приведены стоимостные оценки применения технологии CFW для очистки сточных вод. Даны рекомендации, основанные на опыте внедрения технологии на пруде-отстойнике горно-промышленного предприятия Мурманской обл.

Ключевые слова

Constructed Floating Wetlands; биоплато; очистка сточных вод; промышленные предприятия; фитотехнологии; азотные соединения; тяжелые металлы; водные объекты

Финансирование

Исследование проведено в рамках тем НИР FMEZ-2025-0046, FMEZ-2025-0044, FMEZ-2024-0012.

Поступила: 04.12.2024 ***Принята: 16.07.2025*** ***Онлайн: 21.11.2025***

Введение

Горная промышленность является одной из бурно развивающихся отраслей экономики РФ, все предприятия, относящиеся к этой сфере, признаются объектами, оказывающими негативное влияние на окружающую среду. В перечень обязанностей входит утверждение нормативов по предельно допустимому сбросу загрязняющих веществ в водные объекты. Для карьерных, шахтных, дренажных вод, поступающих с территории горно-промышленного предприятия, характерно преобладание минеральных компонентов и соединений азота (для карьерных сточных вод при применении взрывчатых веществ), а в хозяйственно-бытовых стоках на промплощадках их состав определяет органическое вещество. Отведение вод осуществляется на очистные сооружения (раздельные или комбинированные), а далее, через пруды-отстойники – в природные водоемы или оборотное водоснабжение для нужд предприятия. Влияние на них недостаточно очищенных стоков проявляется в изменении гидрологического и температурного режимов, повышении мутности вод, заиливании дна, перестройке видового состава микробиоты, флоры и фауны[1] [1]. В 2022 г. введен в действие информационно-технический справочник по лучшим доступным технологиям очистки

[1] РД 52.24.622-2001. Методические указания. Проведение расчетов фоновых концентраций химических веществ в воде водотоков. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 69 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

сточных вод (ИТС НДТ 8-2022[2]). В нем наиболее перспективными методами обработки стоков признаются биосорбция, озонирование, окисление ферратами, аэробная и анаэробная микробиологическая очистка, коагуляция/флокуляция, мембранная дистилляция. Фитотехнологии выделены как направление, которое, как показал международный опыт, кроме важного природоохранного значения, подтвердило свою высокую экономическую эффективность при применении в системах очистки вод. Международной водной ассоциацией в 2000 г. выпущен основной нормативный документ по проектированию и эксплуатации фитоочистных систем [2]. На его основе создаются национальные стандарты очистки вод с обязательным учетом местных особенностей[3] [3, 4].

Фитотехнологии активно внедряются по всему миру, о чем свидетельствует ряд обзорных статей, опубликованных в международных журналах и посвященных очистке вод различной природы [5, 6], удалению металлов и металлоидов с помощью биоплато [7], а также повышению интенсификации процесса [8]. В научной литературе широко освещается опыт функционирования фитоочистных систем в условиях холодного климата (Финляндия, Канада, Норвегия, Северный Китай) [9-11].

В РФ среди статей, размещенных в Научной электронной библиотеке за последние пять лет и касающихся внедрения фитотехнологий в промышленном масштабе, только две посвящены очистке карьерных вод от азота на горно-промышленном предприятии Мурманской обл. [12] и обессоливанию дренажных вод в оросительных системах Калмыкии [13]. Хотя широкого распространения в РФ эти технологии пока не получили, разработка методов их проектирования и эксплуатации в различных климатических зонах страны и для широкого ряда загрязнителей не остается без внимания научного сообщества [14, 15].

История создания плавающих биоплато

Перспективным направлением фитотехнологий является создание плавающих биоплато. В научной литературе приводятся различные наименования: Floating treatment wetland, Floating island, Ecological floating bed, Artificial floating island, Planted floating system bed, Vegetated floating island, Hydroponic root mat, Natural floating wetland, Constructed Floating Wetlands. В последние годы наиболее часто встречается название Constructed Floating Wetlands (CFW) – искусственные плавающие болота, поэтому мы будем пользоваться этим термином.

Способы формирования таких растительных конструкций известны с древних времен, когда в странах, страдающих от регулярного затопления плодородных земель, стали развиваться водные агротехнологии (floating-bed agriculture). Этот способ до сих пор широко применяется в Бангладеш, Индии, Вьетнаме, Индонезии, Таиланде, Филиппинах. Он заключается в создании искусственных плавающих островов для гидропонного выращивания овощных и зерновых культур на длительно затопляемых территориях [16, 17]. Отличительной особенностью плавающих биоплато является развитие корневой системы растений в водной среде, а листовой биомассы – над поверхностью воды. В качестве субстратов-почвозаменителей применяются легкоразлагающиеся остатки водных растений – эйхорнии (*Eichhornia*) и ряски (*Lémna*), отличающихся активным накоплением азота, фосфора и калия и поэтому одновременно выполняющих функцию биоудобрения.

Технология CFW в начале своего пути развивалась в рамках технологии Constructed Wetlands (CW), появившейся в Германии в 1950-х годах, но быстро выделилась в самостоятельное научное направление. Первое сообщение о создании CFW для очистки вод было получено из Германии и опубликовано в работе [18]. Строго говоря, плавающие биоплато нельзя назвать «искусственными болотами», однако термин продолжает повсеместно использоваться. Это объясняется тем, что CFW объединяет в себе механизмы очистки вод в естественных и искусственных болотах (прудах) со свободно плавающей растительностью [19]. Стоимость технологии CFW значительно ниже, чем CW, поскольку для ее внедрения не требуется строительство гидротехнических сооружений и их

[2] Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях. ИТС НДТ 8-2022. М.: Бюро НДТ, 2022. 93 с.

[3] Standard DWA-A 262E. Principles for Dimensioning, Construction and Operation of Wastewater Treatment Plants with Planted and Unplanted Filters for Treatment of Domestic and Municipal Wastewater. German Association for Water, Wastewater and Waste, 2018. 68 p.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

постоянное обслуживание. Детальный ретроспективный анализ разработки технологии CW в целом и CFW в частности проведен в работе [20], этапов отработки гидропонных технологий (плавающих и неплавающих (укорененных) биоплато), их отличия от CW и биологических прудов очистки – в работе [19].

В конце 1980-х годов технологии CFW стали активно развиваться в Китае, США и Японии [21], но применялись главным образом для очистки хозяйственно-бытовых и ливневых стоков. В дальнейшем разработка технологии CFW шла по пути как совершенствования и расширения перечня удаляемых загрязнителей, так и объединения с классическими и современными технологиями очистки вод, что привело к созданию гибридных систем [22].

В настоящее время лидирующее положение по внедрению CW технологий занимают Китай, США, Германия, Япония, Австралия, технологии CFW – Китай и Пакистан [4].

Конструкции плавающих биоплато

В связи с активным внедрением таких природоподобных технологий, как CFW, для очистки вод и ландшафтного дизайна в США фирмой Floating Islands International налажен промышленный выпуск каркасов биоплато из вторичного вспененного ПЭТ-сырья. Чаще конструируют каркасы из подручных материалов по собственным разработкам [23]. Особо важно обеспечение плавучести каркаса биоплато и возможности объединения отдельных модулей в кластеры. Для этого применяют трубы из ПВХ или полиэтилена, а также бамбуковые стебли [24]. Имеется опыт применения в качестве поплавков ПЭТ-бутылок емкостью 1,5 л. Основание биоплато выполняется из вспененных полимерных пластиков (пенополиуретана, пенополиэтилена, пенополипропилена, полиэтилентерефталата вторичной переработки). Наиболее рациональная площадь отдельных модулей – 2 м^2, но в литературе приводятся варианты каркасов площадью от 0,025 до 50 м^2 [24]. Соединение модулей осуществляется натуральными или синтетическими волокнами [25] либо специальными стяжками.

На рис.1 приведена запатентованная конструкция фитомодуля плавающего биоплато [26], используемая для отработки технологии очистки карьерных вод на пруде-отстойнике АО «Олкон» (Оленегорск, Мурманская обл.) [12]. В ее состав входит каркас из прямоугольной рамки-основания, выполненной из пластиковых труб длиной 1 и 2 м, диаметром 20 или 50 мм, соединенных под прямым углом отводами. На каркас укладывается пластиковая решетка с размером ячеек 3×3 см, площадью 2 м^2, на которой в качестве биозагрузки размещается заранее выращенная ковровая травяная дернина (рис.1, *а*) либо фитоматы [27] (рис.1, *б*), в обоих случаях – с подсаженными в них болотными видами растений [28].

Сформированные ряды фитомодулей прикреплялись к берегу водоема тросами с карабинами, а кластеры устанавливались в центре водоема и удерживались на глубоководных участках с помощью якоря, которым служил мешок с камнями общей массой около 15 кг. Детали соединения фитомодулей между собой и методы упрочнения конструкции подробно описаны в патенте [26]. На рис.2 показано, как осуществлялась установка фитомодулей на поверхности водоема.

В дополнение к плавающим биоплато на открытых участках водоема с глубиной до 2 м использовали фитосадки [29], конструкция которых состоит из жесткого основания из материала с положительной плавучестью, сетчатой садковой части и якоря (рис.3).

а *б*

Рис.1. Общий вид фитомодуля плавающего биоплато с подсаженными в дернину (*а*) и фитоматы (*б*) болотными растениями

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

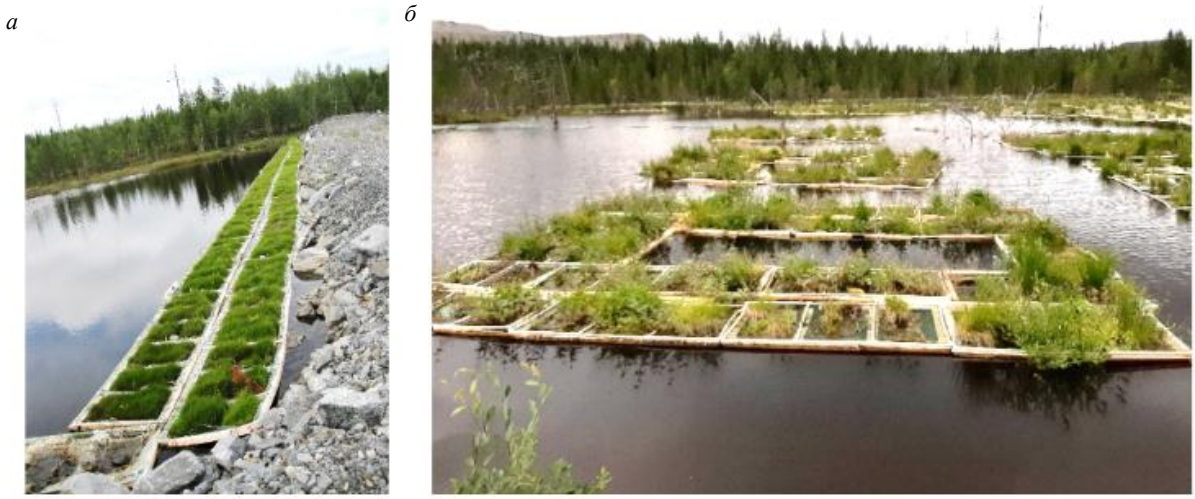

Рис.2. Установка фитомодулей в ряд (*а*) и кластеры (*б*) на глубоководной части водоема

В технологиях CFW при выборе субстратов, в которые помещаются растения, учитываются параметры материала – пористость, наличие капилляров и удобрительная ценность. Чаще всего применяются кокосовое и бамбуковое волокно, компост, активированный уголь, биоуголь, вермикулит, перлит, пластиковые гранулы. Рекомендации по выбору и оптимизации состава субстратов

Рис.3. Фитосадки, установленные на глубоководных участках водоема:
а – общий вид фитомодуля; *б* – фитосадок, наполненный местными видами водных растений; *в* – установленные в ряд фитосадки

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

изложены в обзорной статье [30]. Основным требованием к применяемым материалам являются слабое влияние на pH вод и отсутствие токсичности в отношении микробиоты и растений. Авторы работы [28] в качестве субстрата использовали термовермикулит марки Випон разной фракции, широко применяемый и в других гидропонных технологиях, а также свежие и подстилочные древесные опилки.

Выбор растений в технологии CFW имеет принципиальное значение, поскольку их способность быстро наращивать биомассу и накапливать в ней элементы-загрязнители во многом определяет степень очистки вод. Не менее важным свойством является наличие в корневой системе аэренхимы – воздухоносной ткани из клеток, между которыми остаются крупные пустоты (межклетники), заполненные воздухом [18]. Такая ткань, часто встречающаяся у водных и болотных растений, обеспечивает необходимый уровень газообмена в анаэробных условиях.

В благоприятных климатических условиях для очистки вод от различных загрязнителей чаще всего используют камыш озерный (*Schoenoplectus* (*Scirpus*) *lacustris*), осоки (*Carex* sp.), пистию телорезовидную (*Pistia stratiotes*), рогоз широколистный (*Typha latifolia*), ряску малую (*Lémna mínor*), ситник развесистый (*Juncus effusus*), тростник обыкновенный (*Phragmites australis*), эйхорнию толстоножковую (*Eichhornia crassipes*). В пилотных исследованиях М.А.Пашкевич и др. [31] выявлен процесс активного транспорта Zn, Cu, Mn у рогоза широколистного и частухи обыкновенной (*Alisma plantago-aquatica*), что является признаком гипераккумуляции тяжелых металлов растениями-макрофитами.

В северных условиях на основе имеющегося опыта в качестве биологической загрузки плавающих биоплато можно рекомендовать использование следующих растений: овсяница красная (*Festuca rubra*), пырей сизый (*Elytrigia intermedia*), райграс пастбищный (*Lolium perenne*), тимофеевка луговая (*Phleum pratense*) – для формирования ковровой травяной дернины [28]; аборигенные болотные виды (белокрыльник болотный (*Calla palustris*), вахта трехлистная (*Menyanthes trifoliata*), ива козья (*Salix caprea*), ива филиколистная (*S. phylicifolia*), лютик ползучий (*Ranunculus repens*), мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara*), осоки, пушица узколистная (*Eriophorum angustifolium*), пушица влагалищная (*E. vaginatum*) и пушица Шейхцера (*E. scheuchzeri*), сабельник болотный (*Comarum palustre*), сфагновые мхи (*Sphagnum* spp.), хвощ болотный (*Equisetum palustre*) и хвощ топяной (*E. fluviatile*) – для дополнительного подсаживания в созданное растительное покрытие [27]. На открытых участках водоема с небольшой глубиной (до 1 м) в заводях возможно применение ивы козьей и ивы филиколистной, калужницы болотной (*Cáltha palústris*), лютика ползучего, мха варнсторфия плавающего (*Warnstofia fluitans*), рдеста плавающего (*Potamogeton natans*), ряски малой (рис.4), хвостника обыкновенного (*Hippuris vulgaris*), хвоща болотного и хвоща топяного.

Следует отметить, что выбор ассортимента растений основывался на многолетнем опыте их применения. Предпочтение отдавалось относительно толерантным к техногенному загрязнению

Рис.4. Использование ряски малой для заболачивания заводи водоема

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

(в т.ч. биогенными элементами) многолетним макрофитам (гидро- и гидатофитам), произрастающим в Мурманской обл., исключающим их межвидовые конфликты и внутривидовую конкуренцию, способным в условиях загрязнения хорошо размножаться вегетативно, накапливать большую биомассу и выполнять фильтрационную (оседание взвешенных веществ), поглотительную (поглощение биогенных элементов и органических веществ), накопительную (накопление некоторых металлов и органических веществ), окислительную (обогащение воды кислородом) и детоксикационную (преобразование токсичных соединений в нетоксичные) функции.

Значительную роль в технологии CFW играет симбиоз растений с микроорганизмами (бактериями, водорослями, грибами), особенно в ризосферной (прикорневой) зоне. Для повышения эффективности очистки принимают меры по созданию искусственной биопленки – консорциума бактерий, грибов, водорослей и простейших, объединенных внеклеточными полимерными соединениями на каком-либо твердом носителе. Основными полимерными компонентами являются полисахариды, протеины, нуклеиновые кислоты и липиды. Биоразнообразие в этом сообществе выше, чем в воде, что повышает биомассу, устойчивость микробоценоза и увеличивает площадь поверхности CFW [18]. Биопленка особо эффективно удаляет взвешенные вещества, фосфор и азот, сглаживает негативное влияние неравномерности потока воды, температуры и антропогенной нагрузки на растения биоплато [32].

В качестве носителей биопленки применяются натуральные и синтетические материалы: растительные остатки, базальтовое волокно, цеолиты, активированный уголь, боросиликатное стекло, вермикулит, перлит, натуральные волокна, клиноптилолит (натуральный ионит), полиэтилен, полипропилен, полиуретан. Способы формирования искусственной биопленки в технологиях водоочистки подробно изложены в работе [33]. В пилотных экспериментах площадь поверхности биопленки увеличивается за счет применения гирлянды биошаров (bio-ball), заполненных пористым материалом. Внешний вид и способ крепления биошаров в корневой зоне растений приведены в работе [34].

Среди разнообразия типов вод, на которых успешно отработаны технологии CFW, выделяют хозяйственно-бытовые, карьерные, ливневые (поверхностный сток, смывы с улиц, дорожного полотна), сельскохозяйственные (животноводческие, птицеводческие), стоки комбинатов пищевой промышленности, нефтезагрязненные, сточные воды текстильной и сахароперерабатывающей промышленности, элюаты (стоки с полигонов твердых бытовых отходов), дренажные, технологические.

Отработка технологии CFW основывается на данных лабораторных, пилотных (в микрокосмах) и полевых исследований. Для практической реализации, без сомнения, более ценными являются результаты полевых экспериментов, но в научной литературе они описываются значительно реже, чем результаты лабораторных и пилотных изысканий. Впервые подробный обзор сопоставления степеней очистки вод, полученных в ходе различных видов опытов в рамках применения технологии CFW, проведен китайскими специалистами в работе [21]. Из обширной базы научных статей, опубликованных на английском и китайском языках, только 28 посвящены результатам исследований *in situ* (полевых экспериментов), причем 11 из них относятся к гибридным системам (например, с добавкой погружных растений и принудительной аэрацией). Наиболее высокая эффективность фитотехнологии CFW отмечена при удалении всех форм азота (аммонийной, нитратной, нитритной, органической), фосфора фосфатов и органически связанного фосфора, а также для снижения показателей биохимического и химического потребления кислорода (БПК и ХПК) вод. Обнадеживающие результаты получены и в работах по очистке вод от фекального загрязнения [22].

Эффективность очистки вод плавающими биоплато

В научной литературе освещены результаты очистки вод от широкого перечня загрязняющих веществ с применением CFW.

Общий азот и фосфор. Общий азот в водах представлен аммонийной, нитратной, нитритной и органической формами. Очистка воды от азота происходит тремя способами: денитрификация, седиментация, биоаккумуляция водными растениями и микроорганизмами. За счет денитрификации (восстановления нитратов до молекулярного азота) происходит удаление до 80 % азота, за счет седиментации и биоаккумуляции – суммарно не более 20 % [21]. Для усиления денитрификации

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

авторы рекомендуют увеличивать площадь ризосферной зоны и обеспечивать оптимальное время нахождения воды в очищаемом водоеме. Степень извлечения фосфора при применении CFW варьируется от 5 до 88 % [18], основным механизмом извлечения признается сорбция биопленкой и седиментация.

Органические загрязнители. Высокое содержание органического вещества в водах как лабильного источника углерода приводит к неконтролируемому росту водорослей. При разложении органического вещества под действием бактерий потребляется большое количество кислорода, что вызывает гибель рыб и других гидробионтов. Удаление органического вещества при очистке вод происходит за счет прямого поглощения бактериями, водорослями и высшими растениями, трансформации высокомолекулярных соединений до более простых с меньшей молекулярной массой под действием микроорганизмов и адсорбции гидрофобных органических соединений на взвешенных частицах или биопленке с последующим осаждением в виде донных отложений.

Взвешенное вещество. За счет взвешенных частиц происходит повышение мутности вод, а это снижает доступность солнечного излучения для бактерий, макрофитов и бентосных организмов. Взвешенные частицы влияют на выживаемость мальков рыб и жизнеспособность зоопланктона. Взвеси, как правило, представляют собой неорганические частицы размерами порядка 2 мкм, но могут иметь и органическое происхождение (водоросли, бактерии и их остатки). Поскольку взвешенные частицы не представляют питательной ценности, они не поглощаются напрямую растениями или микроорганизмами, происходит их седиментация в водном слое между поверхностью биоплато и донными отложениями, а также на корнях растений [21].

Тяжелые металлы. Тяжелые металлы (ТМ) попадают в водные объекты в составе промышленных сбросов и смыва с поверхности автомобильных трасс. Поступление этих загрязнителей идет главным образом во взвешенной форме и лишь незначительной части – в растворенной, которая может напрямую поглощаться растениями за счет взаимодействия ионов ТМ с функциональными группами клеточной стенки. Высокая минерализация и многокомпонентный состав поступающих в водоемы вод снижают глубину очистки за счет взаимного влияния ионов. Эффективность поглощения взвешенных частиц зависит от состава вод, Eh, pH, концентрации ТМ, доступности элементов питания, а также физиологических особенностей растений, входящих в состав биоплато. Примеры применения классических технологий CW для удаления тяжелых металлов приведены в работе [14], где указывается достижение степени очистки 99 %. Работ по оценке эффективности извлечения тяжелых металлов при применении CFW немного [35, 36]. Имеющиеся результаты показывают, что осаждение взвешенных форм в ризосферной зоне и на биопленке – более эффективный процесс, чем прямое поглощение растениями, поэтому при применении данной технологии рекомендуется уделять особое внимание наращиванию мощной корневой массы растений и увеличению площади биопленки.

Сульфаты. Трехлетний опыт по очистке дренажных вод от сульфатов в пруде-отстойнике описан в работе [37]. Полевой эксперимент проводился в районе Садбери (Канада), в качестве субстрата использована почва – для создания анаэробных условий. В состав фитомодуля входили рогоз, осока и ситник. Авторами работы приведены доказательства эффективности технологии CFW в восстановительных условиях при низком значении pH (5,0) и длительном периоде функционирования биоплато при пониженной температуре. Отмечено активное развитие сульфатредуцирующих бактерий, способствующих восстановлению сульфатов до нерастворимых сульфидов и их осаждению.

Бор. Проблема загрязнения водных экосистем соединениями бора актуальна в Чили, Турции, Новой Зеландии, США, что связано с природными особенностями территорий. Концентрация бора в дренажных водах карьеров Турции по добыче борсодержащих руд достигает 2000 мг/л при среднемировом содержании бора в поверхностных водах на уровне 0,1 мг/л [38]. В приведенной работе показано, что рогоз, тростник и ряска при применении в CW могут проявлять себя как гипераккумуляторы бора. Основными процессами удаления бора в фитоочистных системах являются сорбция и биоаккумуляция растениями. Для повышения эффективности удаления бора рекомендовано повышать содержание органического вещества и глинистых минералов в субстрате.

Селен. Селен присутствует в водах в анионной форме в виде селенатов и селенитов. В работе [39] в ходе пилотных экспериментов проведена комплексная оценка эффективности извлечения селена

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

болотоцветником – основным растением-макрофитом плавающих биоплато в Китае, а также концентрирования Se по пищевой цепи. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета аккумуляции Se всеми живыми организмами, населяющими биоплато.

Нефтепродукты и фенол. Исчерпывающий обзор по применению технологии CFW для очистки вод от нефтезагрязнения и фенолов приведен в работе [40]. В целом технология признается весьма эффективной и при применении только одних растений, чаще всего тростника и рогоза, и при дополнительном внесении бактериальных культур. Опыты проводили главным образом в регионах с теплым климатом, но имеются положительные примеры и для северных регионов. Утверждается, что ризосферная микробиота растений биоплато справляется с нефтезагрязнением не менее эффективно, чем привнесенные бактериальные культуры, поэтому рекомендуется предпринимать меры по стимулированию ее роста.

При обсуждении тонкостей внедрения технологии CFW нельзя не упомянуть такое современное направление очистки вод, как биосорбция [41]. В качестве сорбента может выступать как живая биомасса растений и микроорганизмов, так и детрит, зачастую более эффективный. Сорбционный процесс обусловлен прежде всего наличием кислородсодержащих функциональных групп в живой растительной клетке или детрите. Биосорбция носит внеклеточный, внутриклеточный и поверхностный характер. Пассивная биосорбция загрязнителей происходит в результате взаимодействия с клеточной стенкой, что является физико-химическим процессом. Биоаккумуляция в свою очередь зависит от метаболизма внутри растительной клетки, поэтому признается активным процессом.

При очистке вод от тяжелых металлов биосорбция занимает ведущее положение, причем сорбционная емкость детрита сопоставима с этим показателем, отмеченным для химических сорбентов, и достигает сотни миллиграммов на грамм. Особенно активно этот метод развивается для извлечения из сточных вод редких и рассеянных элементов, а также драгоценных металлов.

Факторы, влияющие на эффективность очистки вод CFW

Несмотря на то, что основные механизмы накопления различных загрязняющих веществ растениями известны по многочисленным исследованиям фиторемедиации и восстановления растительного покрова на техногенно нарушенных землях, прогнозировать успех фитоочистных мероприятий достаточно сложно. К основным факторам, влияющим на эффективность очистки вод, можно отнести химический состав воды, глубину водоема и скорость потока, площадь покрытия водоема фитомодулями, аэрацию, условия окружающей среды (температура воды и воздуха, количество осадков).

Химический состав воды играет важную роль в выборе метода очистки, что особенно актуально для сточных вод горно-промышленных предприятий и производств. С одной стороны, стоки, характеризующиеся экстремально высокими или низкими значениями pH, повышенными содержаниями поллютантов, могут оказывать фитотоксическое действие на размещаемые растения, приводя к их гибели [28, 42]. С другой стороны, совместное нахождение в воде различных загрязняющих веществ может снижать эффективность очистки (в сравнении с лабораторными экспериментами) из-за конкуренции [21].

Оптимальной глубиной водоема при применении технологии CFW считаются 0,6-1,1 м, хотя опыты проводились на разных глубинах – от 0,25 до 3 м [43]. При малой глубине корни растений биоплато будут касаться донных отложений водоема и постепенно прорастать в грунт. Кроме того, на малой глубине снижается эффективность аэрации, что понижает микробиологическую активность. С повышением уровня воды произойдет отрыв растений, в результате чего они могут погибнуть. При выборе растений биоплато необходимо учитывать максимальную длину их корневой системы. В полевых испытаниях на пруде-отстойнике карьерных вод его глубина в отдельные сезоны достигала 2 м из-за увеличения объемов сброса [28]. Это отражалось на снижении эффективности очистки вод от нитратной формы азота из-за больших скоростей водного потока и его слабого влияния на растения биоплато (по причине прохождения вод транзитом). Высокие скорости потока увеличивают содержание растворенного кислорода в воде, а это негативно сказывается на процессах денитрификации [44]. Поступление больших масс воды способствует вымыванию биопленки либо перестройке ее видового состава [43]. Для расчета оптимальных скорости потока и времени нахождения водных масс в водоеме разработаны математические модели, пример приведен в работе [45].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Для повышения эффективности очистки площадь покрытия водоема подбирается опытным путем с таким условием, чтобы обеспечить необходимый уровень кислорода в воде. Площадь покрытия выше 50 % может вызвать дефицит кислорода, незначительная площадь – низкую степень очистки, 100 %-ное покрытие водоема признается целесообразным в исключительных случаях, например при очистке вод от нитратов, где определяющим является процесс денитрификации, проходящий преимущественно в анаэробных условиях [24]. На пруде-отстойнике АО «Олкон» была достигнута 50 %-ная площадь покрытия водоема плавающими биоплато, что составляет 1300 м^2, для этого было создано 25 кластеров по 19 плавающих фитомодулей в каждом и 150 фитомодулей, расположенных в ряд на мелководных прибрежных участках.

Содержание растворенного кислорода в воде имеет особое значение для развития корневой системы растений и формирования биопленки. Аэрация ризосферной зоны важна при удалении органического вещества и фосфора фосфатов, но оказывает ингибирующее действие на процессы денитрификации и седиментации. Исходя из целевого показателя, на который направлена очистка, контролируется и корректируется кислородный режим в зонах, занятых фитомодулями.

Климатические условия районов размещения CFW также могут оказать сильное влияние на эффективность очистки вод. Считается, что технология CFW эффективна только в летний период, поскольку связана с микробиологической активностью, снижающейся при понижении температуры. Особенно это актуально для процессов нитрификации-денитрификации, которые практически прекращаются при температурах ниже 10 °С [11]. Однако, например, очистка вод от взвешенных частиц является в большей степени физическим процессом и обусловлена седиментацией, поэтому слабо зависит от температуры. Высокий уровень снижения БПК и ХПК вод отмечен для CFW в странах с холодным климатом – Швеции и Канаде. Процесс денитрификации практически полностью подавляется при температурах ниже 10 °С, в работе H.Postila и др. [46] приводится оценка эффективности очистки вод от общего азота – 12-14 % для фитоочистных систем открытого типа в Финляндии даже в летний период (проведена оценка 14 объектов).

Очистка водно-болотных угодий холодного региона CFW (Талкитна, Аляска) также показала недостаточную эффективность технологии для соответствия очищенной воды установленным нормативам [47]. Однако в исследовании, проведенном в Альберте (Канада), была достигнута высокая эффективность очистки муниципальных сточных вод [48]. Авторы работы предположили, что положительное влияние оказало созревание CFW, сопровождавшееся взаимодействием растений и микроорганизмов, увеличение площади фитомодулей и добавление аэрации под CFW.

Относительно низкая температура воды и воздуха замедляет рост растений и набор биомассы. Все макрофиты, такие как тростник, рогоз, ситник, отмирают при продолжительном воздействии низких температур из-за формирования кристаллов льда в их клетках и денатурации белков. Отмирающая биомасса становится причиной вторичного загрязнения вод.

Для повышения степени очистки вод в холодный период применяют внесение в водоем материалов – носителей биопленки и дополнительных источников лабильного органического вещества, например соломы. Эффективным методом является внесение суспензии волокнистых материалов и микробной массы в плавающие биоплато. Чем выше в них биоразнообразие микроорганизмов, тем выше степень очистки даже в холодный период. Активно развиваются биотехнологии по культивированию холодостойких видов макрофитов, в том числе с применением методов генной инженерии. Особое внимание уделяют изучению бентосных организмов, которые вносят свой вклад в повышение эффективности применения технологии CFW при пониженных температурах.

Оценивая влияние окружающей среды, нельзя не упомянуть прогнозируемые последствия изменения климата, подробно рассмотренные в исследовании [21]: повышение температуры, изменение количества выпадающих осадков, продолжительности засушливых периодов. Ожидается, что потепление приведет к увеличению периода роста и развития растений, функционирования биоплато. Повышение интенсивности осадков снизит время нахождения воды в резервуарах с CFW, будет способствовать быстрому вымыванию питательных веществ.

Следует подчеркнуть, что результаты полевых и пилотных экспериментов существенно различаются: в натурных условиях эффективность очистки снижается в среднем на 20-30 %, а по фосфору – более чем на 50 % по сравнению с пилотными. В отдельных случаях *in situ* имеет место и вторичное загрязнение вод азотом, фосфором и взвешенными частицами.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Особенности эксплуатации плавающих биоплато

Плавающие биоплато оказывают положительное влияние на состояние водоемов, в которых они размещаются [21]. Поскольку для эффективной очистки площадь покрытия водоема плавающими фитомодулями, как правило, составляет не менее 50 %, имеет место эффект затенения его поверхности. Это ограничивает развитие фитопланктона и перестраивает его видовой состав – уменьшается доля сине-зеленых водорослей, обусловливающих цветение вод. Таким образом, применение технологии CFW признается перспективным при решении проблемы эвтрофикации водоемов. Однако чрезмерно высокая площадь покрытия поверхности водоема растительными конструкциями может привести к пролонгированному периоду стратификации вод, что обязательно следует контролировать и регулировать.

В работе [49] приведен пример формирования водного биоценоза в местах применения CFW на р. Чикаго (США), где повсеместно отмечена активность зоопланктона, насекомых, амфибий, рептилий, рыб, птиц на площадях, занятых плавающими растительными конструкциями. В исследовании [28] отмечено активное освоение площади покрытия биоплато мхами и высшими растениями, не включенными в состав искусственного фитоценоза, появление лягушек, уток, куликов, зайцев, выдр, мышей. Состояние растительных фитомодулей, наблюдаемых в данной работе на пруде-отстойнике карьерных вод в 2024 г., показано на рис.5, 6.

Глубина очистки вод от большинства загрязнителей во многом зависит от мощности нарастания корневой системы растений биоплато и формирования на ней биопленки. На рис.6 показан пример развития корней растений, отмеченного в исследованиях [28].

Обслуживание биоплато заключается в контроле гидрологического режима водоема, физико-химического состава воды, процессов формирования донных отложений и биопленки на корнях растений, периодическом осмотре состояния фитомодулей, замене нарушенных элементов, подсадке новых видов растений, наблюдениях за их вегетацией. Во избежание вторичного загрязнения водоема требуется периодически удалять избыточную биомассу растений CFW, в том числе растительные остатки [50]. Эта процедура нужна и для поддержания необходимого уровня содержания

а

б

в

Рис.5. Состояние фитоценозов, созданных с помощью разных фитомодулей:
а – фитосадки; *б* – биоплато + травяная дернина; *в* – биоплато + фитоматы

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Рис.6. Состояние корневой системы у растений на плавающих фитомодулях:
а – пушица Шейхцера; *б* – дернина

кислорода в водной среде. Отобранная биомасса пригодна к использованию в качестве биотоплива, для получения биоугля, биоудобрений или биосорбентов [51]. В США активно развиваются технологии CFW для выращивания декоративных растений на ливневых стоках, что позволяет, помимо их очистки, получать еще и высокий доход от продажи цветов и биоматериалов для ландшафтного дизайна [52].

Стоимость CFW варьируется в широком диапазоне в зависимости от сложности конструкции, конфигурации, применяемых материалов, площади покрытия, состава растений, уровня обслуживания и прочих параметров. В работе [4] указывается вариабельность стоимости от 5 до 12,5 дол. за 1 м^2. Самая высокая цена отмечена для очистных сооружений ливневых и хозяйственно-бытовых стоков общей площадью 400 м^2, самодельного и промышленного изготовления, самая низкая – при совместной очистке муниципальных (60 %) и промышленных стоков (40 %) на площади 4000 м^2.

Использование CFW промышленного производства варьирует от 38 (продукция Beemats) до 377 (продукция BioHaven) дол. за 1 м^2 [53]. В других работах расчет ведется не на единицу площади CFW, а на 1 тыс. м^3 обрабатываемой воды. M.Afzal и др. [25] приводят стоимость очистки 1 тыс. м^3 стоков в 0,26 дол. (в Пакистане). В Китае себестоимость водоочистки 1 тыс. м^3 муниципальных стоков на муниципальных очистных сооружениях составляет 770 дол., с применением технологии CW – 22,3 дол., с CFW – 0,26 дол. [54]. В РФ себестоимость очистки муниципальных стоков на канализационно-очистных сооружениях Северо-Западного федерального округа варьируется от 7 до 270 дол. за 1 тыс. м^3 в зависимости от глубины очистки вод от азота (ИТС-10-2015[4]). Приведенные стоимостные оценки свидетельствуют об очевидных преимуществах применения технологии плавающих биоплато, помимо ее важного природоохранного значения.

Заключение

Проведен обзор опыта и перспектив применения активно развивающегося направления фитотехнологий – CFW (плавающих биоплато). Описана история создания плавающих биоплато и рассмотрены разные варианты их конструкций. Представлены результаты очистки вод различного генезиса CFW и указаны факторы, влияющие на эффективность процесса. Описаны особенности эксплуатации плавающих биоплато и приведены примерные стоимостные оценки внедрения технологии в разных странах.

Несомненным преимуществом внедрения плавающих биоплато в практику является простота изготовления, размещения и обслуживания составляющих их фитомодулей, что обусловливает

[4] Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. ИТС НДТ 10-2015. М.: Бюро НДТ, 2015. 394 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

высокую экономическую эффективность. Проведенный сравнительный анализ указывает на необходимость многофакторного экспериментального моделирования при проведении пилотных экспериментов и обязательного подтверждения эффективности очистки в полевых условиях. Применение технологии на предприятии должно быть основано на результатах лабораторных, укрупненных и опытно-промышленных испытаний, по окончании которых принимается окончательное решение о внедрении.

Внедрение технологии CFW имеет большие перспективы в очистке различных типов вод от широкого ряда загрязнителей, а также ландшафтном дизайне в разных климатических условиях РФ.

Авторы выражают благодарность инициатору исследований разработки и применения фитотехнологий CFW на Крайнем Севере заслуженному эколог РФ, д-ру биол. наук Г.А.Евдокимовой и научным сотрудникам Института проблем промышленной экологии Севера В.А.Мязину, М.В.Корнейковой, Н.В.Фокиной, принимавшим участие в исследованиях данной тематики.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Нефедьева Е.Э., Сиволобова Н.О., Кравцов М.В., Шайхиев И.Г.* Доочистка сточных вод с помощью фиторемедиации // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 10. С. 145-148.
2. *Kadlec R., Knight R., Vymazal J. et al.* Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation. IWA Publishing, 2000. 159 p.
3. *Nivala J., van Afferden M., Hasselbach R. et al.* The new German standard on constructed wetland systems for treatment of domestic and municipal wastewater // Water Science and Technology. 2018. Vol. 78. Iss. 11. P. 2414-2426. DOI: 10.2166/wst.2018.530
4. *Arslan M., Iqbal S., Islam E. et al.* A protocol to establish low-cost floating treatment wetlands for large-scale wastewater reclamation // STAR Protocols. 2023. Vol. 4. Iss. 4. P. 102671. DOI: 10.1016/j.xpro.2023.102671
5. *Shuting Shen, Xiang Li, Xiwu Lu.* Recent developments and applications of floating treatment wetlands for treating different source waters: a review // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. Iss. 44. P. 62061-62084. DOI: 10.1007/s11356-021-16663-8
6. *Vymazal J., Yaqian Zhao, Mander Ü.* Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review // Ecological Engineering. 2021. Vol. 169. № 106318. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2021.106318
7. *Guanlong Yu, Guoliang Wang, Tianying Chi et al.* Enhanced removal of heavy metals and metalloids by constructed wetlands: A review of approaches and mechanisms // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 821. № 153516. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153516
8. *Fuhao Zhang, Jie Wang, Liyuan Li et al.* Technologies for performance intensification of floating treatment wetland – An explicit and comprehensive review // Chemosphere. 2024. Vol. 348. № 140727. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140727
9. *Varma M., Gupta A.K., Ghosal P.S., Majumder A.* A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 755. Part 2. № 142540. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142540
10. *Heikkinen K., Karppinen A., Karjalainen S.M. et al.* Long-term purification efficiency and factors affecting performance in peatland-based treatment wetlands: An analysis of 28 peat extraction sites in Finland // Ecological Engineering. 2018. Vol. 117. P. 153-164. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.04.006
11. *Kumwimba M.N., Batool A., Xuyong Li.* How to enhance the purification performance of traditional floating treatment wetlands (FTWs) at low temperatures: Strengthening strategies // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 766. № 142608. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142608
12. *Korneykova M.V., Myazin V.A., Ivanova L.A. et al.* Development and optimization of biological treatment of quarry waters from mineral nitrogen in the Subarctic // Geography, Environment, Sustainability. 2019. Vol. 12. № 2. P. 97-105. DOI: 10.24057/2071-9388-2019-5
13. *Супрун В.А., Устинова В.В.* Оценка технической и экономической эффективности применения разработанного биоинженерного сооружения для очистки и снижения минерализации дренажно-сбросных вод // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 8. С. 4-9. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-8-4-9
14. *Рыбка К.Ю., Щеголькова Н.М.* Роль фито-очистных сооружений в очистке сточных вод от токсичных металлов // Вода: химия и экология. 2018. № 1-3 (114). С. 101-112.
15. *Рыбка К.Ю., Щеголькова Н.М.* Принципы проектирования фито-очистных систем // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2019. Т. 27. № 4. С. 255-263. DOI: 10.22363/2313-2310-2019-27-4-255-263
16. *Pyka L.M., Al-Maruf A., Shamsuzzoha M. et al.* Floating gardening in coastal Bangladesh: Evidence of sustainable farming for food security under climate change // Journal of Agriculture, Food and Environment (JAFE). 2020. Vol. 1. № 4. P. 161-168. DOI: 10.47440/JAFE.2020.1424
17. *Ghosh T.K., Singh A.K., Mitra S., Karmakar S.* Gathering insights of the global scenario of floating-bed agriculture through systematic literature review for its promotion in Indian context // Progress in Disaster Science. 2024. Vol. 24. № 100367. DOI: 10.1016/j.pdisas.2024.100367
18. *Hoeger S.* Schwimmkampen: Germany's artificial floating islands // Journal of Soil and Water Conservation. 1988. Vol. 43. Iss. 4. P. 304-306. DOI: 10.1080/00224561.1988.12456222
19. *Zhongbing Chen, Cuervo D.P., Müller J.A. et al.* Hydroponic root mats for wastewater treatment – a review // Environmental Science and Pollution Research. 2016. Vol. 23. Iss. 16. P. 15911-15928. DOI: 10.1007/s11356-016-6801-3

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

20. *Vymazal J.* The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment // Land. 2022. Vol. 11. Iss. 2. № 174. DOI: 10.3390/land11020174

21. *Ran Bi, Chongyu Zhou, Yongfeng Jia et al.* Giving waterbodies the treatment they need: A critical review of the application of constructed floating wetlands // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 238. P. 484-498. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.02.064

22. *Hamad M.T.M.H.* Comparative study on the performance of Typha latifolia and Cyperus Papyrus on the removal of heavy metals and enteric bacteria from wastewater by surface constructed wetlands // Chemosphere. 2020. Vol. 260. № 127551. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127551

23. *Lucke T., Walker C., Beecham S.* Experimental designs of field-based constructed floating wetland studies: A review // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 660. P. 199-208. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.018

24. *Samal K., Kar S., Trivedi S.* Ecological floating bed (EFB) for decontamination of polluted water bodies: Design, mechanism and performance // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 251. № 109550. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109550

25. *Afzal M., Arslan M., Müller J.A. et al.* Floating treatment wetlands as a suitable option for large-scale wastewater treatment // Nature Sustainability. 2019. Vol. 2. Iss. 9. P. 863-871. DOI: 10.1038/s41893-019-0350-y

26. Патент № 2560631 РФ. Устройство для биологической очистки сточных карьерных вод / Г.А.Евдокимова, Л.А.Иванова, В.А.Мязин. Опубл. 20.08.2015. Бюл. № 23.

27. Патент № 189759 РФ. Модуль фитосистемы для биологической очистки промышленных сточных вод от минеральных загрязнителей / Л.А.Иванова, М.В.Корнейкова, В.А.Мязин, Н.В.Фокина, В.В.Редькина, Г.А.Евдокимова. Опубл. 03.06.2019. Бюл. № 16.

28. *Иванова Л.А., Мязин В.А., Корнейкова М.В. и др.* Пора очищать Арктику. Создание фитоочистной системы для доочистки сточных вод горнорудных предприятий от соединений азота. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра, 2021. 88 с. DOI: 10.37614/978.5.91137.449.5

29. Патент № 2773122 РФ. Модуль фитосистемы для биологической очистки промышленных сточных вод от минеральных загрязнителей / Л.А.Иванова, М.В.Корнейкова, В.А.Мязин, Н.В.Фокина, В.В.Редькина, Г.А.Евдокимова. Опубл. 30.05.2022. Бюл. № 16.

30. *Chao Yang, Xiangling Zhang, Yuqi Tang et al.* Selection and optimization of the substrate in constructed wetland: A review // Journal of Water Process Engineering. 2022. Vol. 49. № 103140. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103140

31. *Пашкевич М.А., Коротаева А.Э., Матвеева В.А.* Экспериментальное моделирование системы болотных биогеоценозов для повышения эффективности очистки карьерных вод // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 785-794.

32. *Fuchao Zheng, Tiange Zhang, Shenglai Yin et al.* Comparison and interpretation of freshwater bacterial structure and interactions with organic to nutrient imbalances in restored wetlands // Frontiers in Microbiology. 2022. Vol. 13. № 946537. DOI: 10.3389/fmicb.2022.946537

33. *Lago A., Rocha V., Barros O. et al.* Bacterial biofilm attachment to sustainable carriers as a clean-up strategy for wastewater treatment: A review // Journal of Water Process Engineering. 2024. Vol. 63. № 105368. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105368

34. *Shengjiong Deng, Deshou Cun, Rufeng Lin et al.* Enhanced remediation of real agricultural runoff in surface-flow constructed wetlands by coupling composite substrate-packed bio-balls, submerged plants and functional bacteria: Performance and mechanisms // Environmental Research. 2024. Vol. 263. Part 2. № 120124. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120124

35. *Xuehong Zhang, Yue Lin, Hua Lin, Jun Yan.* Constructed wetlands and hyperaccumulators for the removal of heavy metal and metalloids: A review // Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 479. № 135643. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.135643

36. *Sharma R., Vymazal J., Malaviya P.* Application of floating treatment wetlands for stormwater runoff: A critical review of the recent developments with emphasis on heavy metals and nutrient removal // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 777. № 146044. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146044

37. *Gupta V., Courtemanche J., Gunn J., Mykytczuk N.* Shallow floating treatment wetland capable of sulfate reduction in acid mine drainage impacted waters in a northern climate // Journal of Environmental Management. 2020. Vol. 263. № 110351. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110351

38. *Türker O.C., Vymazal J., Türe C.* Constructed wetlands for boron removal: A review // Ecological Engineering. 2014. Vol. 64. P. 350-359. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.01.007

39. *Chuanqi Zhou, Jung-Chen Huang, Fang Liu et al.* Selenium removal and biotransformation in a floating-leaved macrophyte system // Environmental Pollution. 2019. Vol. 245. P. 941-949. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.11.096

40. *Stanley M., Palace V., Grosshans R., Levin D.B.* Floating treatment wetlands for the bioremediation of oil spills: A review // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 317. № 115416. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115416

41. *Rai P.K.* Novel adsorbents in remediation of hazardous environmental pollutants: Progress, selectivity, and sustainability prospects // Cleaner Materials. 2022. Vol. 3. № 100054. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100054

42. *Zhongbing Chen, Cuervo D.P., Müller J.A. et al.* Hydroponic root mats for wastewater treatment – a review // Environmental Science and Pollution Research. 2016. Vol. 23. Iss. 16. P. 15911-15928. DOI: 10.1007/s11356-016-6801-3

43. *Baoshan Shi, Xiangju Cheng, Junheng Pan et al.* Impact of water depth and flow velocity on organic matter removal and nitrogen cycling in floating constructed wetlands // Science of The Total Environment. 2024. Vol. 954. № 176731. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176731

44. *Xiaohan Li, Xing Yan, Haojie Han et al.* The trade-off effects of water flow velocity on denitrification rates in open channel waterways // Journal of Hydrology. 2024. Vol. 637. № 131374. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131374

45. *Stephenson R., Sheridan C.* Review of experimental procedures and modelling techniques for flow behaviour and their relation to residence time in constructed wetlands // Journal of Water Process Engineering. 2021. Vol. 41. № 102044. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102044

46. *Postila H., Ronkanen A.-K., Kløve B.* Wintertime purification efficiency of constructed wetlands treating runoff from peat extraction in a cold climate // Ecological Engineering. 2015. Vol. 85. P. 13-25. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.09.066

47. *Kadlec R., Johnson K.* Treatment wetlands of the far north // Ecological Engineering. 2023. Vol. 190. № 106923. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.106923

48. *Arslan M., Wilkinson S., Naeth M.A. et al.* Performance of constructed floating wetlands in a cold climate waste stabilization pond // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 880. № 163115. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163115

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

49. *Chih-Yu Wang, Sample D.J., Day S.D., Grizzard T.J.* Floating treatment wetland nutrient removal through vegetation harvest and observations from a field study // Ecological Engineering. 2015. Vol. 78. P. 15-26. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.05.018

50. *Rehman K., Imran A., Amin I., Afzal M.* Inoculation with bacteria in floating treatment wetlands positively modulates the phytoremediation of oil field wastewater // Journal of Hazardous Materials. 2018. Vol. 349. P. 242-251. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.02.013

51. *Ladislas S., Gérente C., Chazarenc F. et al.* Floating treatment wetlands for heavy metal removal in highway stormwater ponds // Ecological Engineering. 2015. Vol. 80. P. 85-91. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.115

52. *Locke-Rodriguez J., Troxler T., Sukop M.C. et al.* Floating flowers: Screening cut-flower species for production and phytoremediation on floating treatment wetlands in South Florida // Environmental Advances. 2023. Vol. 13. № 100405. DOI: 10.1016/j.envadv.2023.100405

53. *Lynch J., Fox L.J., Owen Jr. J.S., Sample D.J.* Evaluation of commercial floating treatment wetland technologies for nutrient remediation of stormwater // Ecological Engineering. 2015. Vol. 75. P. 61-69. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.11.001

54. *Dong Qing Zhang, Jinadasa K.B.S.N., Gersberg R.M. et al.* Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries – A review of recent developments (2000-2013) // Journal of Environmental Management. 2014. Vol. 141. P. 116-131. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.03.015

***Авторы*: Любовь Андреевна Иванова,** *д-р биол. наук, главный научный сотрудник* (*Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А.Аврорина ФИЦ КНЦ РАН, Кировск, Россия*), *ведущий научный сотрудник* (*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-7994-5431*, **Евгения Андреевна Красавцева,** *канд. техн. наук, научный сотрудник* (*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), *научный сотрудник* (*Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики ЦНМ КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), *vandeleur2012@yandex.ru*, *https://orcid.org/0000-0002-8821-4446*, **Тамара Тимофеевна Горбачева,** *канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник* (*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-5014-4385*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0