

*На правах рукописи*

**Коротаева Анна Эдуардовна**



**ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
СТОЧНЫХ ВОД ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ МЕТОДАМИ  
БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ**

*Специальность 1.6.21. Геоэкология*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

*Пашкевич Мария Анатольевна*

**Официальные оппоненты:**

*Таловская Анна Валерьевна*

доктор геолого-минералогических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение геологии, профессор;

*Антонинова Наталья Юрьевна*

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория экологии горного производства, заведующий лабораторией.

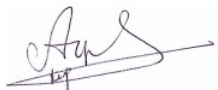
**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **27 июня 2024 г. в 15:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 27 апреля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ  
Павел Игоревич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Высокий рост промышленного производства, сельского хозяйства, а также урбанизация приводят к загрязнению водных объектов широким спектром загрязняющих веществ, преобладающими из которых являются соединения азотной группы и металлы. Во многих странах, включая Российскую Федерацию, для этих веществ введены пороговые значения, которые регламентируются, среди прочего, способностью водной экосистемы к их трансформации и удалению.

Одним из крупных источников загрязнения водных объектов является горная промышленность, характеризующаяся образованием большого объема сточных вод с высокими концентрациями загрязняющих веществ на всех этапах производственных работ, начиная с добычи и заканчивая обогащением.

В процессе открытой отработки месторождений полезных ископаемых в связи с поступлением атмосферных осадков и подземных вод в горную выработку образуются карьерные воды, которые характеризуются многокомпонентным составом, что обусловлено спецификой отработки месторождений и химическим составом вскрышных и вмещающих пород. Одними из наиболее распространенных компонентов в составе карьерных вод являются соединения азотной группы, попадающие в воды при ведении взрывных работ, а также железо, входящее в состав горных пород и природных вод.

Соединения азотной группы попадают в карьерные воды несколькими путями: в результате неполной детонации взрывчатого вещества и его растворения в обводненных скважинах; при вымывании сорбированных на горной породе или мелкодисперсной пыли оксидов азота, образовавшихся в процессе взрыва; вследствие связывания газообразных продуктов взрыва с влагой воздуха с образованием азотной или азотистой кислот, которые могут попадать на поверхность горной породы и далее

в карьерные воды. Кроме загрязнения карьерных вод соединениями азотной группы, взрывные работы приводят к дроблению монолитных горных пород, что ведет к повышению их растворимости, в частности, по соединениям железа.

При отсутствии на предприятии эффективной очистки сточные воды, содержащие высокие концентрации соединений азота, после сброса в природные водоемы и водотоки, могут вызывать снижение качества воды и способствовать эвтрофикации, приводя к кислородному голоданию водных организмов и, как следствие, потери биоразнообразия. Попадание высоких концентраций железа в силу эффекта биомагнификации также представляет серьезную угрозу для компонентов водных экосистем.

Необходимость решения проблем, связанных с ликвидацией последствий загрязнения сточных вод горных предприятий предопределяет актуальность диссертационного исследования.

#### **Степень разработанности темы исследования**

Проблема очистки сточных вод от соединений азотной группы нашла отражение в трудах таких ученых, как Л.Ф. Долина, Е.С. Гогина, О.С. Дубовик, Е. Osama, Y., G. Markou, в том числе с помощью биологической очистки – Р.М. Маркевич, М.В. Корнейкова, L.A. Wendling и другие.

В последнее время широкое распространение получил метод биологической очистки сточных вод, основанный на применении сконструированных водно-болотных угодий. Большое внимание данному методу уделялось в работах Г.А. Евдокимовой, Н.М. Щегольковой, P.D. Jenssen, J. Vymazal, R.H. Kadlec, S. Kumar, V. Kumar, D. de la Varga, T. Saeed и H. Brix.

Вопросы эффективности высшей и низшей водной растительности в системах биологической очистки отражены в работах Д.В. Ульриха, С.С. Тимофеевой, J. Opitz, L. Kröpfelová, M. Min, M. Maine, J. Jarsiö и J.S. Chin.

В связи со спецификой образования карьерные сточные воды, с одной стороны, часто являются многотоннажными, с другой, характеризуются наличием широкого спектра загрязняющих веществ, многие из которых многократно превышают значения нормативов, что обуславливает необходимость разработки решения, направленного на осуществление комплексной экологически и экономически эффективной очистки вод на предприятиях горной промышленности.

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности 1.6.21. Геоэкология** по пунктам 19 и 24.

**Объект исследования** – загрязненные карьерные воды.

**Предмет исследования** – процессы биологической очистки карьерных вод.

**Цель работы** – снижение техногенной нагрузки на водные объекты при ведении взрывных работ на горнопромышленных предприятиях путем внедрения биологической очистки.

**Идея** – биологическая очистка карьерных вод должна производиться путём конструирования водно-болотного угодья с совместным использованием видов высшей и низшей водной растительности.

Поставленная в диссертационном исследовании цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Анализ существующих методов очистки сточных вод от азотных соединений и железа, а также оценка эффективности их удаления.

2. Выявление источников поступления азотных соединений и железа в карьерные сточные воды горнопромышленных предприятий.

3. Выбор разновидности системы сконструированного водно-болотного угодья и видов высшей водной растительности для реализации системы очистки.

4. Проведение экспериментальных исследований по определению возможности совместного использования высшей

и низшей водной растительности для комплексной очистки карьерных вод от азотных соединений и железа.

5. Разработка конструкции системы очистки по типу сконструированного водно-болотного угодья с совместным использованием высшей и низшей водной растительности, а также проведение эколого-экономической оценки предлагаемого мероприятия по очистке карьерных сточных вод.

**Научная новизна работы:**

1. Выявлены механизмы формирования высококонтрастных карьерных сточных вод по содержанию аммонийной, нитритной и нитратной форм азота, а также железа на горно-промышленных предприятиях.

2. Установлена зависимость эффективности процесса очистки модельного раствора карьерных сточных вод от азотных соединений и железа в системе по типу сконструированного водно-болотного угодья с открытой поверхностью от проективного покрытия видов высшей водной растительности (60:20:20) и начальной плотности культуры низшей водной растительности (от 0,16 г/дм<sup>3</sup> до 1,60 г/дм<sup>3</sup>).

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Рассмотрены существующие методы очистки сточных вод от азотных соединений и железа, а также представлено обоснование применения системы по типу сконструированного водно-болотного угодья.

2. Доказано увеличение эффективности снижения концентраций аммонийной, нитратной и нитритной форм азота, а также железа в карьерных сточных водах при совместном применении высшей и низшей водной растительности.

3. Разработано средозащитное мероприятие, заключающееся в комплексной очистке карьерных сточных вод в системе по типу сконструированного водно-болотного угодья с использованием видов высшей водной растительности: рогоз широколистный (*Typha latifolia* L.), частуха обыкновенная (*Alisma*

*plantago aquatica* L.) и ситник членистый (*Juncus articulatus* L.) и низшей водной растительности (*Chlorella* sp.).

4. Результаты и рекомендации диссертационного исследования приняты к использованию в производственной деятельности АО «Карельский окатыш» (акт о внедрении (использовании) результатов от 11.08.2022).

5. Результаты диссертационного исследования подтверждены патентом на изобретение № 2796677 «Способ биологической очистки сточных вод» от 29.05.2023 г.

**Методология и методы исследования.** Проведение исследований осуществлялось на основе системного анализа данных отечественных и зарубежных ученых в области биологической очистки, в частности, сконструированных водно-болотных угодий; экспериментального моделирования комплексной системы очистки по типу сконструированного водно-болотного угодья в лабораторных условиях на базе Научного центра «Экосистема» с использованием высокотехнологичного оборудования и широкого спектра методов анализа (жидкостная хроматография, атомно-эмиссионная спектрометрия, элементный анализ, фотокolorиметрический, ионометрический и электрохимический методы).

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Проведение взрывных работ на горнопромышленных предприятиях обуславливает попадание взрывчатых веществ, азотсодержащих продуктов взрыва и частиц горной породы в карьерные сточные воды, приводя к их загрязнению соединениями азотной группы ( $1,1 \leq K_{\text{ПДК}_{\text{р.х.}}}^{\text{NH}_4^+} \leq 103$ ;  $6,1 \leq K_{\text{ПДК}_{\text{р.х.}}}^{\text{NO}_2^-} \leq 207$ ;  $1,1 \leq K_{\text{ПДК}_{\text{р.х.}}}^{\text{NO}_3^-} \leq 15$ ), а также железом ( $1,1 \leq K_{\text{ПДК}_{\text{р.х.}}}^{\text{Fe}_{\text{общ}}} \leq 2400$ ).

2. Комплексное снижение концентраций аммонийной (до 96%), нитритной (до 99%) и нитратной (до 80%) форм азота, а также железа (до 50%) в карьерных сточных водах достига-

ется за счет использования видов высшей водной растительности: рогоз широколистный (*Typha latifolia* L.), частуха обыкновенная (*Alisma plantago aquatica* L.) и ситник членистый (*Juncus articulatus* L.) с проективным покрытием 60:20:20 и внесения низшей водной растительности (*Chlorella* sp.) с достижением плотности культуры в системе от 0,16 г/дм<sup>3</sup> до 1,60 г/дм<sup>3</sup>.

3. Предотвращение загрязнения водных объектов в зоне воздействия горнопромышленного предприятия должно достигаться путем сооружения в пруду-отстойнике системы по типу сконструированного водно-болотного угодья с достижением гидравлического времени удержания карьерных сточных вод в системе в течение 3 суток.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена проведением мониторинга карьерных вод на опытных горнопромышленных предприятиях; значительным объемом лабораторных и экспериментальных исследований водных и растительных проб с применением современного высокотехнологичного оборудования; подтверждается сходимостью полученных экспериментальных данных по изучению аккумуляционной способности растений с теоретическими исследованиями.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию подготовки в Томском государственном университете специалистов в области наук о Земле (ноябрь 2021, г. Томск), XVI, XVII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (2022, 2023, г. Екатеринбург), XX, XXI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем (2022, 2023, г. Киров), XVIII Международном форуме-конкурсе студентов и аспирантов «Актуальные



проблемы недропользования» (май 2022, г. Санкт-Петербург), XXVII Международном молодежном научном симпозиуме имени академика М.А. Усова, посвященного 160-летию со дня рождения академика В.А. Обручева и 140-летию академика М.А. Усова, основателям Сибирской горно-геологической школы (апрель 2023, г. Томск), Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2023» (апрель 2023, г. Москва), IV Всероссийской молодежной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ноябрь 2023, г. Махачкала).

**Реализация результатов работы.** Диссертационное исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-116\_2 от 11.04.2024).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; обосновании выбора типа системы сконструированного водно-болотного угодья и видов высшей и низшей водной растительности; проведении лабораторных исследований по изучению аккумуляционной способности растений по отношению к нитратной форме азота; проведении экспериментальных исследований по изучению сочетаний высшей и низшей водной растительности наиболее эффективных с позиции очистки карьерных сточных вод от аммонийной, нитратной и нитритной форм азота, а также железа в карьерных сточных водах; разработке системы фиторемедиации карьерных вод; эколого-экономической оценке комплексной системы очистки по типу сконструированного водно-болотного угодья.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 12 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых

научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 174 наименования, и 2 приложений. Диссертация изложена на 183 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков и 31 таблицу.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю д.т.н., профессору Пашкевич Марии Анатольевне за научное руководство над работой. За помощь в проведении исследований и ценные научные консультации директору НЦ «Экосистема» к.т.н., доценту Матвеевой В.А., сотруднику кафедры геоэкологии к.т.н., доценту Петрову Д.С., а также всему коллективу кафедры геоэкологии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и НЦ «Экосистема».

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен анализ проблемы загрязнения сточных вод соединениями азотной группы и железом. Рассмотрены существующие методы очистки и обоснован выбор наиболее эффективного направления. В ходе мониторинговых исследований определены области основного загрязнения карьерных вод и выделены предприятия со сходными проблемами загрязнения. Исходя из результатов проведенного анализа, сформулированы цель и задачи научного исследования.

**Во второй главе** представлены теоретические исследования в области сконструированных водно-болотных угодий, механизмов удаления и трансформации загрязняющих веществ, на основе которых предложен тип системы очистки сточных вод на предприятии. Также во второй главе произведен выбор видов высшей водной растительности для применения в данной системе.

**В третьей главе** описаны экспериментальные исследования по изучению комплексного метода биологической очистки с использованием системы сконструированного водно-болотного угодья с открытой водной поверхностью. Представлены результаты численного изменения параметров модельного раствора карьерных сточных вод в зависимости от начальной плотности суспензии микроводоросли.

**В четвертой главе** осуществлено проектирование конструкции системы очистки и ее основных конструктивных параметров для реализации комбинированной фиторемедиации карьерных сточных вод с обоснованием эколого-экономической эффективности предлагаемой системы.

**В заключении** сформулированы основные научные и практические выводы по диссертационной работе.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Проведение взрывных работ на горнопромышленных предприятиях обуславливает попадание взрывчатых веществ, азотсодержащих продуктов взрыва и частиц горной породы в карьерные сточные воды, приводя к их загрязнению соединениями азотной группы ( $1,1 \leq K_{\text{ПДК}_{\text{р.х.}}}^{\text{NH}_4^+} \leq 103$ ;  $6,1 \leq K_{\text{ПДК}_{\text{р.х.}}}^{\text{NO}_2^-} \leq 207$ ;  $1,1 \leq K_{\text{ПДК}_{\text{р.х.}}}^{\text{NO}_3^-} \leq 15$ ), а также железом ( $1,1 \leq K_{\text{ПДК}_{\text{р.х.}}}^{\text{Fe}_{\text{общ}}} \leq 2400$ ).**

Соединения азота, представленные аммонийной, нитратной и нитритной формами азота, являются распространенными

загрязняющими веществами в сточных водах горнопромышленных предприятий, что связано с применением аммонийной селитры при взрывных работах. В ходе теоретических исследований было установлено, что проблема азотного загрязнения карьерных вод характерна для многих горных предприятий, расположенных на всей территории Российской Федерации. В таблице 1 представлены коэффициенты контрастности соединений азота в карьерных сточных водах ряда предприятий.

С целью подтверждения проблемы и определения уровня азотного загрязнения, а также выявления потенциальных источников и механизмов попадания азотных соединений в карьерные воды были проведены мониторинговые исследования на ряде объектов горной промышленности.

Было установлено, что подземные воды, разгружающиеся в горную выработку вне воздействия взрывных работ, характеризуются только на одном объекте незначительными превышениями ПДК<sub>р.х.</sub> по аммонийному азоту (таблица 2). Наибольшие превышения относительно нормативных значений по аммонийной, нитритной и нитратной формам азота до 103, 42 и 5 раз соответственно наблюдались в непосредственной близости от места осуществления взрывных работ (таблица 3).

Единственным возможным источником такого высокого уровня загрязнения является растворение взрывчатых веществ в результате их заряжания в обводненные скважины, что было подтверждено измерением концентрации данных соединений в канавке для отвода вод с растворенным взрывчатым веществом с обводненных скважин, а также проведением качественных реакций на аммоний и нитрат ионы.

Помимо загрязнения карьерных вод соединениями азотной группы было установлено превышение предельно допустимой концентрации железа. В связи с его распространенностью в составе горных и водовмещающих пород, а также природных вод данная проблема характерна для многих горнопромышлен-

ных предприятий (таблица 4). В ходе оценки было определено, что порядка 65% предприятий с проблемой азотного загрязнения карьерных вод также сталкиваются с превышениями нормативных значений по железу, что обуславливает актуальность совместного удаления данных загрязняющих веществ в системе очистки.

В результате теоретических исследований научной и фондовой литературы было установлено, что при необходимости очистки многотоннажных карьерных вод наиболее эффективным методом является биологическая очистка в системах сконструированных водно-болотных угодий.

Протекание процесса очистки в таких системах может быть ограничено значениями концентраций загрязняющих веществ, превышение которых оказывает токсическое воздействие на водную растительность. На основе многочисленных исследований было выявлено, что при установленных концентрациях соединений азотной группы в карьерных водах процесс очистки в системах сконструированных водно-болотных угодьях не лимитирован. При этом снижение концентрации железа отмечается при значении до 100 мг/дм<sup>3</sup> в поступающих карьерных водах на очистку (коэффициент контрастности 1000).

**2. Комплексное снижение концентраций аммонийной (до 96%), нитритной (до 99%) и нитратной (до 80%) форм азота, а также железа (до 50%) в карьерных сточных водах достигается за счет использования видов высшей водной растительности: рогоз широколистный (*Typha latifolia* L.), частуха обыкновенная (*Alisma plantago aquatica* L.) и ситник членистый (*Juncus articulatus* L.) с проективным покрытием 60:20:20 и внесения низшей водной растительности (*Chlorella* sp.) с достижением плотности культуры в системе от 0,16 г/дм<sup>3</sup> до 1,60 г/дм<sup>3</sup>.**

С целью выявления наиболее экологически и экономически эффективной системы очистки были проанализированы

процессы удаления и трансформации загрязняющих веществ в существующих разновидностях систем сконструированных водно-болотных угодий. Было установлено, что эффективное снижение концентраций достигается в системе со свободной водной поверхностью.

Растения в данной разновидности систем сочетают в себе ряд функциональных характеристик, поэтому была рассмотрена их роль в удалении азотных соединений и железа. Учитывая совокупность необходимых характеристик, в том числе широкий ареал распространения, фиторемедиационный потенциал и экологическую совместимость видов, были отобраны 3 вида высшей водной растительности: рогоз широколистный (*Typha latifolia* L.), частуха обыкновенная (*Alisma plantago-aquatica* L.) и ситник членистый (*Juncus articulatus* L.).

Обеспечение экологической устойчивости сконструированной системы, а также эффективности очистки зависит от проективного покрытия выбранных видов растений. На основе научных исследований, а также визуальной оценки естественных водно-болотных угодий было установлено, что при проективном покрытии рогоза широколистного около 60% достигается стабильное функционирование экосистемы водно-болотного угодья. В результате серии экспериментов с вариациями соотношений проективного покрытия 60:20:20, 60:10:30 и 60:30:10 согласно вышеперечисленной последовательности видов было выявлено, что соотношение 60:20:20 является наиболее перспективным для проведения дальнейшего экспериментального исследования.

На первом этапе экспериментального исследования осуществлялась количественная оценка способности отобранных видов растений поглощать нитратную форму азота, в связи с тем, что она является конечной в цепочке превращений азотных соединений, и железо из раствора.

Эффективность снижения концентрации нитратной формы азота к концу экспериментального исследования была наивысшей в модели с рогозом широколистным и составила около 40%, модели с двумя другими видами растений показали одинаковое снижение равное 35%. Максимальное снижение концентрации железа составило 8,3%. При этом, указанная эффективность достигалась спустя месяц пребывания модельного раствора в системе, что говорит о низкой скорости поглощения данных загрязняющих веществ растениями, и не может быть обеспечено в условиях реального предприятия.

Для интенсификации процесса очистки было принято решение внести низшую водную растительность (микроводоросль *Chlorella*) в систему. В связи с тем, что микроводоросль способствует насыщению кислородом водной среды, а также использует азотные соединения и железо для поддержания метаболической активности, ее внесение в систему должно способствовать увеличению эффективности их удаления. Таким образом, на втором этапе экспериментального исследования изучалось влияние различных значений начальной плотности культуры микроводоросли в растворе на снижение концентрации данных загрязняющих веществ.

Для этого в 6 конических колб с объемом модельного раствора 500 мл добавлялся раствор штамма микроводоросли с достижением начальной плотности культуры в системе 1,60 г/дм<sup>3</sup>, 0,32 г/дм<sup>3</sup>, 0,16 г/дм<sup>3</sup>, 0,032 г/дм<sup>3</sup>, 0,016 г/дм<sup>3</sup>, раствор в 6<sup>ой</sup> колбе принимался за фоновый.

При начальной плотности культуры микроводоросли 0,016 г/дм<sup>3</sup> не отмечалось увеличение плотности клеток, что свидетельствует об отсутствии адаптации к условиям модельного раствора (рисунок 1). Для раствора с начальной плотностью клеток 0,032 г/дм<sup>3</sup>, несмотря на присутствующую динамику роста, значительного изменения измеряемых параметров не наблюдалось. Для растворов с начальными плотностями

1,60 г/дм<sup>3</sup>, 0,32 г/дм<sup>3</sup>, 0,16 г/дм<sup>3</sup> отмечалось значительное увеличение концентрации растворенного кислорода (рисунок 2), снижение концентрации аммонийного азота до 91% (рисунок 3), нитратного азота до 65% (рисунок 4) и железа до 70% (рисунок 5), что свидетельствует о повышении эффективности очистки с достижением плотности культуры в системе от 0,16 г/дм<sup>3</sup>.

На третьем этапе исследования был поставлен эксперимент с сочетанием высшей и низшей водной растительности в системе очистки. Для этого была смоделирована установка по примеру системы сконструированного водно-болотного угодья с открытой водной поверхностью, в которую высаживались отобранные виды растений с проективным покрытием 60:20:20 и вносилась определенная норма штамма микроводоросли на втором этапе. Всего было проведено 9 последовательных циклов очистки в течение 31 дня, при этом для каждого цикла готовился новый модельный раствор карьерных сточных вод.

Было определено, что содержание общего и накопленного нитратного азота в тканях растений по сравнению с фоновыми значениями увеличилось. На данном этапе наблюдалось устойчивое снижение концентрации аммонийного азота до 96% и нитратного азота до 80%, начиная с конца четвертого цикла очистки (рисунок 5), а также увеличение эффективности удаления железа с первого цикла очистки с 8,3% до 50,4%.

Аддитивный эффект очистки обеспечивается за счет формирования растениями дополнительной площади для развития микроводоросли, что ведет к увеличению клеток культуры и, как следствие, интенсивной выработке кислорода и поглощению азотных соединений и железа. В свою очередь, высокая концентрация кислорода в среде способствует интенсификации корневой системы растений в поглощении загрязняющих веществ из модельного раствора карьерных сточных вод.



**3. Предотвращение загрязнения водных объектов в зоне воздействия горнопромышленного предприятия должно достигаться путем сооружения в пруду-отстойнике системы по типу сконструированного водно-болотного угодья с достижением гидравлического времени удержания карьерных сточных вод в системе в течение 3 суток.**

Установленная эффективность снижения концентраций соединений азотной группы и железа достигается при гидравлическом времени удержания модельного раствора карьерных сточных вод в сконструированной системе в течение 3 суток, поэтому проектирование конструктивных особенностей системы осуществлялось с целью обеспечения удержания объема поступающих на очистку карьерных сточных вод горнопромышленных предприятий в течение этого времени.

При проектировании учитывались следующие параметры: соотношение сторон сооружения очистки, распределение потока воды в сооружении, особенности сооружения насыпи и гидроизоляции, устройства для регулирования и распределения воды, формирование среды для укоренения и особенности создания растительного покрова. На основе гидравлических и геотехнических характеристик системы очистки предложена следующая конструкция (рисунок 7 и 8).

Соотношение сторон системы равняется 3:1, что регламентируется рекомендациями по предотвращению образования застойных зон и вихревых течений воды. Предполагается наличие четырех зон с увеличенной глубиной дна для осуществления выпуска и сбора карьерных сточных вод, а также дополнительного времени удержания вод в системе. Уклон насыпи выбран 3:1 с учетом обеспечения устойчивости склонов с высотой, значение которой обуславливается обеспечением высоты зон с увеличенной глубиной дна, максимальной высоты среды укоренения, максимально возможного уровня воды в системе и вы-

соты снижения насыпи в течение срока эксплуатации. Гидроизоляционные свойства обеспечиваются за счет укладки геотекстиля и геомембраны.

Высота среды укоренения равняется 0,4 м под посадку рогоза широколистного и частухи болотной и 0,6 метра под посадку ситника членистого для обеспечения рекомендуемого уровня воды для выживаемости растений. Для рогоза широколистного и частухи обыкновенной рекомендуемый уровень воды достигает 0,3 м, который в паводковый период может увеличивается до 0,45 м, для ситника обыкновенного – 0,1 м и 0,25 м соответственно. Внесение суспензии штамма микроводоросли *Chlorella* в систему производится на глубину 0,2-0,4 м, исходя из обеспечения нормальных условий жизнедеятельности.

Производительность системы комплексной очистки с вышеописанными параметрами для различных условий водопритока регулируется за счет варьирования значений длины и ширины сооружения. На одном из предприятий, где проводились мониторинговые исследования, необходимая производительность системы очистки: при среднем уровне воды – 3330 м<sup>3</sup>/сут, при максимальном – 3840 м<sup>3</sup>/сут, достигается при длине и ширине сооружения 180 м и 60 м соответственно.

Затраты на реализацию системы сконструированного водно-болотного угодья на предприятии равняются около 8,9 млн. рублей, при этом годовые затраты на обслуживание системы очистки снижаются на 2,2 млн. рублей. Снижение эксплуатационных затрат позволяет окупить внедрение комплексной очистки на предприятии с начала ее запуска через 5 лет.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации предлагается комплексное решение актуальной научной задачи снижения техногенной нагрузки на водные объекты при ведении взрывных работ на горнопромышленных предприятиях.

По результатам выполнения диссертационного исследования сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Установлено, что попадание взрывчатых веществ, азотсодержащих продуктов взрыва и частиц горной породы в карьерные сточные воды горнопромышленных предприятий приводит к формированию высококонтрастных вод по содержанию соединений азотной группы и железа.

2. На основе теоретических исследований установлено, что система сконструированного водно-болотного угодья с открытой водной поверхностью является наиболее эффективной разновидностью системы для очистки карьерных сточных вод с использованием в ней растений с широким ареалом распространения, неприхотливостью к условиям окружающей среды и толерантностью к условиям произрастания на заболоченной территории.

3. Экспериментальным путем определена норма внесения штамма микроводоросли для интенсификации процесса очистки при совместном использовании видов высшей и низшей водной растительности в системе по типу сконструированного водно-болотного угодья с достижением снижения концентраций аммонийной (до 96%), нитритной (до 99%) и нитратной (до 80%) форм азота, а также железа (до 50%) в карьерных сточных водах.

4. Разработано конструктивное решение для реализации средозащитного мероприятия на предприятии, заключающееся в комплексной очистке карьерных сточных вод в системе по типу сконструированного водно-болотного угодья с использованием видов высшей водной растительности: рогоз широколистный (*Typha latifolia* L.), частуха обыкновенная (*Alisma plantago aquatica* L.) и ситник членистый (*Juncus articulatus* L.) и низшей водной растительности (*Chlorella* sp.).

Дальнейшее развитие темы диссертации предполагает проведение исследований, направленных на расширение разнообразия видов высшей водной растительности, пригодных для

реализации в системе очистки, а также выявление эффективных сочетаний с другими видами низшей водной растительности.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Пашкевич, М.А. Анализ биологических методов для очистки карьерных сточных вод от азотных соединений / М.А. Пашкевич, **А.Э. Коротаева** // Геология и Геофизика Юга России. - 2021. - Т.4. - № 4. - С. 170-182.

2. Пашкевич, М.А. Оценка эффективности процесса фитоэкстракции при очистке карьерных сточных вод / М.А. Пашкевич, **А.Э. Коротаева** // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2022. - № 6-1. - С. 349-360.

*Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:*

3. **Korotaeva, A.E.** Spectrum survey data application in ecological monitoring of aquatic vegetation / A.E. Korotaeva, M.A. Pashkevich // Mining Informational and Analytical Bulletin. - 2021. - Issue 5-2. - PP. 231-244.

4. Petrov, D.S. Assessment of heavy metal accumulation potential of aquatic plants for bioindication and bioremediation of aquatic environment / D.S. Petrov, **A.E. Korotaeva**, M.A. Pashkevich, M.A. Chukaeva // Environmental Monitoring and Assessment. - 2023. - Vol.195. - № 1. - PP. 231-244.

5. Pashkevich, M.A. Experimental simulation of a system of swamp biogeocenoses to improve the efficiency of quarry water treatment / M.A. Pashkevich, **A.E. Korotaeva**, V.A. Matveeva // Journal of Mining Institute. - 2023. – Volume 263. - PP. 785-794.

*Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:*

6. Патент № 2796677 Российская Федерация, МПК C02F 3/32 (2006.01), C02F 3/06 (2006.01). Способ биологической очистки сточных вод: № 2022125405: заявл. 28.09.2022: опубл. 29.05.2023 / Пашкевич М.А., **Коротаева А.Э.**, Матвеева В.А., Петров Д.С.; заявитель СПГУ. - 10 с.

Таблица 1 – Коэффициенты контрастности соединений азота в карьерных сточных водах горнопромышленных предприятий относительно ПДК<sub>р.х.</sub>

Наименование предприятия	Коэффициенты контрастности		
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
АО «Оленегорский ГОК»	3,8	25,4	1,5
АО «Ковдорский ГОК»	-	17,4	1,1
АО «Карельский окатыш»	50,4	6,1	14,9
АО «Коршуновский ГОК»	2,0	-	-
ООО «Якутская рудная компания» (Сиваглинское месторождение)	1,1	52,1	-
АО «Святогор» (Волковское месторождение)	13,4	17,9	7,0
АО «Новоорловский ГОК»	48,6	-	9,6
ООО «Нерюнгри-Металлик» (месторождение Гросс)	3,6	-	-
АО «Северо-Западная Фосфорная Компания» (Месторождение «Олений ручей»)	7,5	93,4	2,0
ОАО «РУСАЛ Ачинск» (Кия-Шалтырский нефелиновый рудник)	23,6	15,0	1,6
ПАО «Ураласбест»	37,0	207,0	3,4
АО «Малышевское рудоуправление» (Месторождение «Кедровое»)	-	27,5	-
АО «Боксит Тимана»	6,0	8,8	-
Разрез «Назаровский» (до 2022 г.)	1,9	-	-
ООО «Берингпромуголь» (Фандюшкинское месторождение)	1,3	-	-
ООО «Разрез ТалТЭК»	-	31,2	4,6
АО «СУЭК-Кузбасс»			
АО «УК «Кузбассразрезуголь» (месторождения Кузбасса)	8,0	9,0	2,0
АО «Кузбасская Топливная Компания»			

\*«-» – нет данных о превышении

Таблица 2 – Значения коэффициентов контрастности азотных соединений в подземных водах, разгружающихся в карьер, относительно ПДК<sub>р.х.</sub>

№ точки отбора	Коэффициенты контрастности									
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>			NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>			NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			
День отбора	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Выход подземных вод на рабочем борту карьера	5	6,9	6,2	6,5	0,0	0,0	0,3	0,1	0,1	0,1
	6	3,4	3,3	2,6	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0
	7	-	-	2,9	-	-	0,0	-	-	0,0

Таблица 3 – Значения коэффициентов контрастности азотных соединений в карьерных водах в период ведения взрывных работ относительно ПДК<sub>р.х.</sub>

№ точки отбора	Коэффициент контрастности									
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>			NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>			NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			
День отбора	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Скопление вод рядом с местом взрыва №1	8	102,4	57,8	-	41,8	1,5	-	3,4	4,9	-
	9	87,2	-	-	27,6	-	-	3,2	-	-
Скопление вод рядом с местом взрыва №2	10	-	-	2,5	-	-	0,0	-	-	0,0
Скопление вод рядом с местом взрыва №3	11	3,3	4,0	6,5	3,4	23,4	0,3	0,5	0,8	0,1

\*«-» – отбор проб не производился

Таблица 4 – Коэффициенты контрастности железа общего в карьерных сточных водах горнопромышленных предприятий относительно ПДК<sub>р.х.</sub>

Наименование предприятия	Коэффициент контрастности
АО «Карельский окатыш»	4,1
АО «Коршунровский ГОК»	9,0
АО «Стойленский ГОК»	5,2
ООО «Якутская рудная компания» (Сиваглинское месторождение)	9,0
АО «Святогор» (Волковское месторождение)	1,1
ООО «Башкирская медь» (до 2018 г.)	2,0
ОАО «Сибайский ГОК» (до 2019 г.)	
АО «Учалинский ГОК» (Западно-Озерное месторождение)	52,0
АО «Учалинский ГОК» (Учалинское месторождение)	2400,0
ЗАО «Шемур» (Шемурское месторождение)	1245,0
ООО «Ловозерский ГОК»	4,4
ГРК Быстринское	
ООО «Нерюнгри-Металлик» (Месторождение Гросс)	2,6
АО «Северо-Западная Фосфорная Компания» (Месторождение «Олений ручей»)	3,5
АО «Малышевское рудоуправление» (Месторождение «Кедровое»)	3,0
АО «Боксит Тимана»	79,0
ООО «Разрезуголь» (Зашуланское каменноугольное месторождение)	14,0
АО «УК Кузбассразрезуголь» (Угольный разрез «Калтанский»)	7,8
ООО «Приморскуголь» (разрез «Северная Депрессия»)	7,4
ООО «Берингпромуголь» (Фандюшкинское месторождение)	2,9
АО «СУЭК-Кузбасс»	12,0
АО «УК «Кузбассразрезуголь» (месторождения Кузбасса)	
АО «Кузбасская Топливная Компания»	

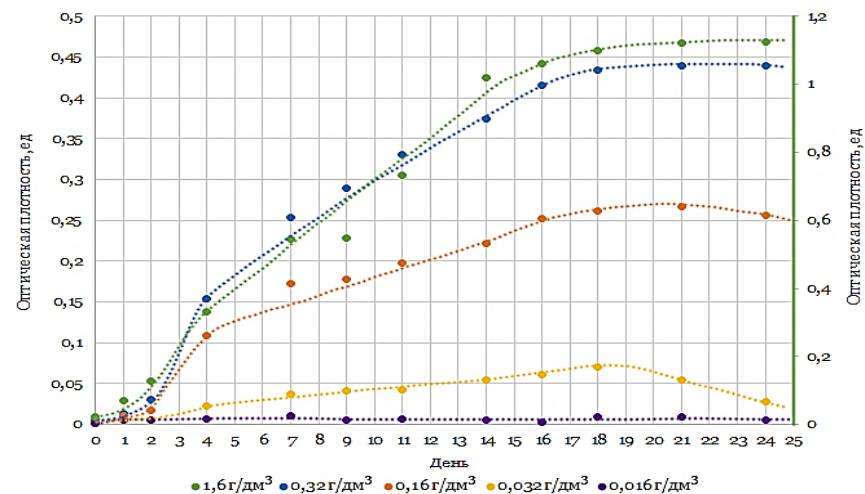


Рисунок 1 – Кривые роста микроводоросли в зависимости от начальной плотности в модельных растворах (значения кривой роста для культуры с начальной плотностью 1,6 г/дм<sup>3</sup> относятся к правой вертикальной оси)

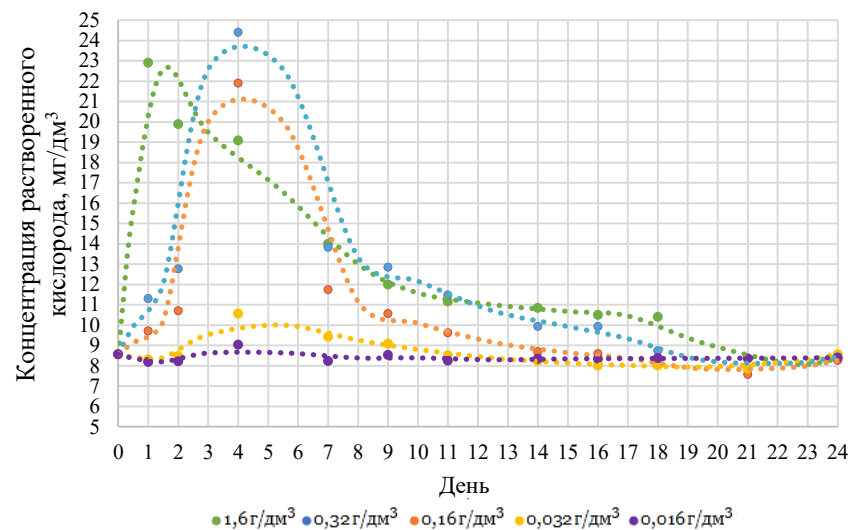


Рисунок 2 – График изменения концентрации растворенного кислорода в модельных растворах, мг/дм<sup>3</sup>

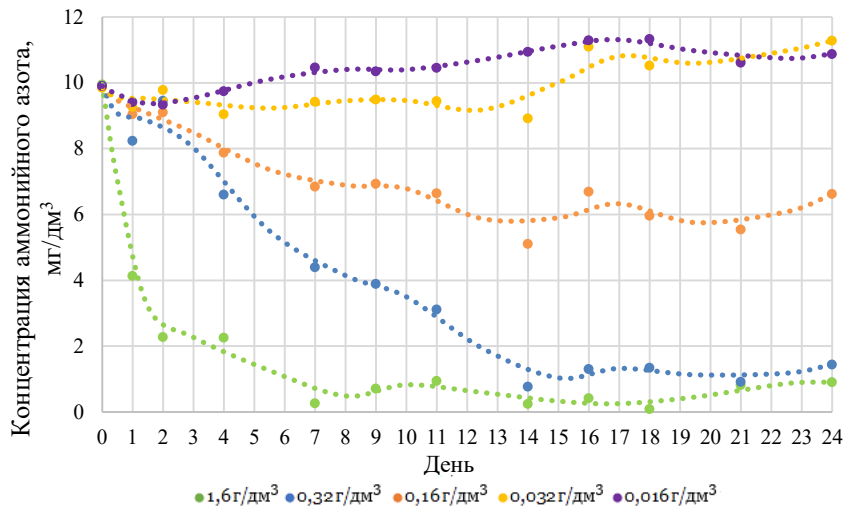


Рисунок 3 – График снижения концентрации аммонийной формы азота в модельных растворах, мг/дм<sup>3</sup>

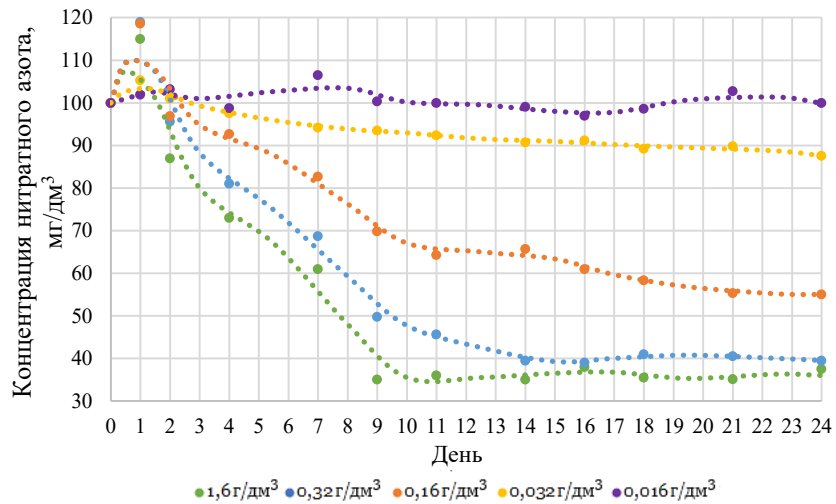


Рисунок 4 – График снижения концентрации нитратной формы азота в модельных растворах, мг/дм<sup>3</sup>

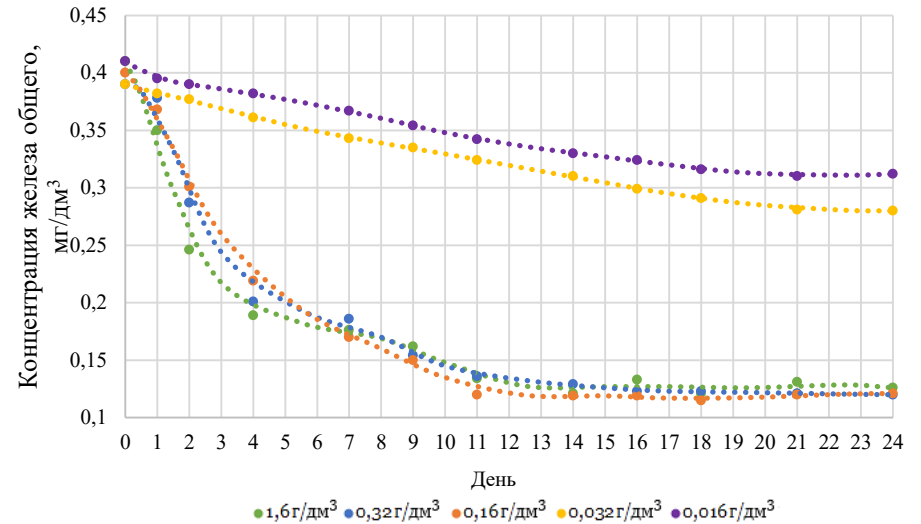


Рисунок 5 – График снижения концентрации железа в модельных растворах, мг/дм<sup>3</sup>

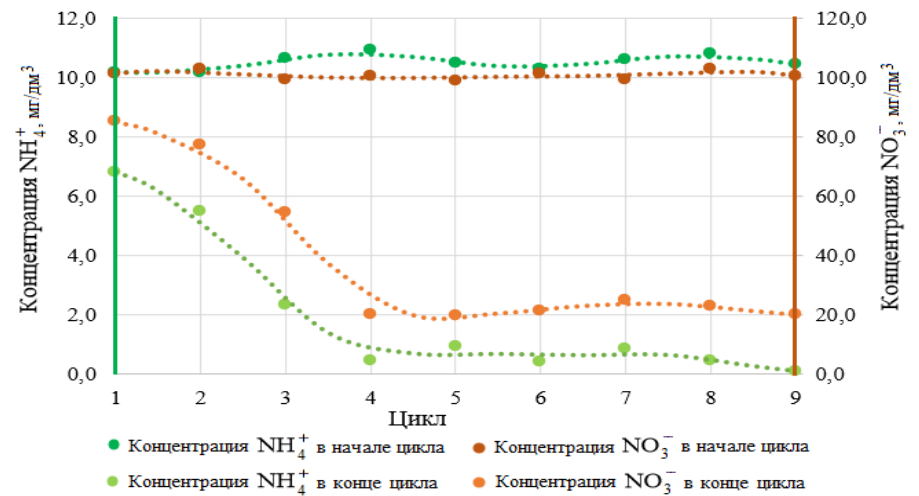


Рисунок 6 – График снижения концентраций аммонийной и нитратной форм азота в модельных растворах (значения концентраций аммонийной формы азота относятся к левой, нитратной формы азота – к правой вертикальной оси)

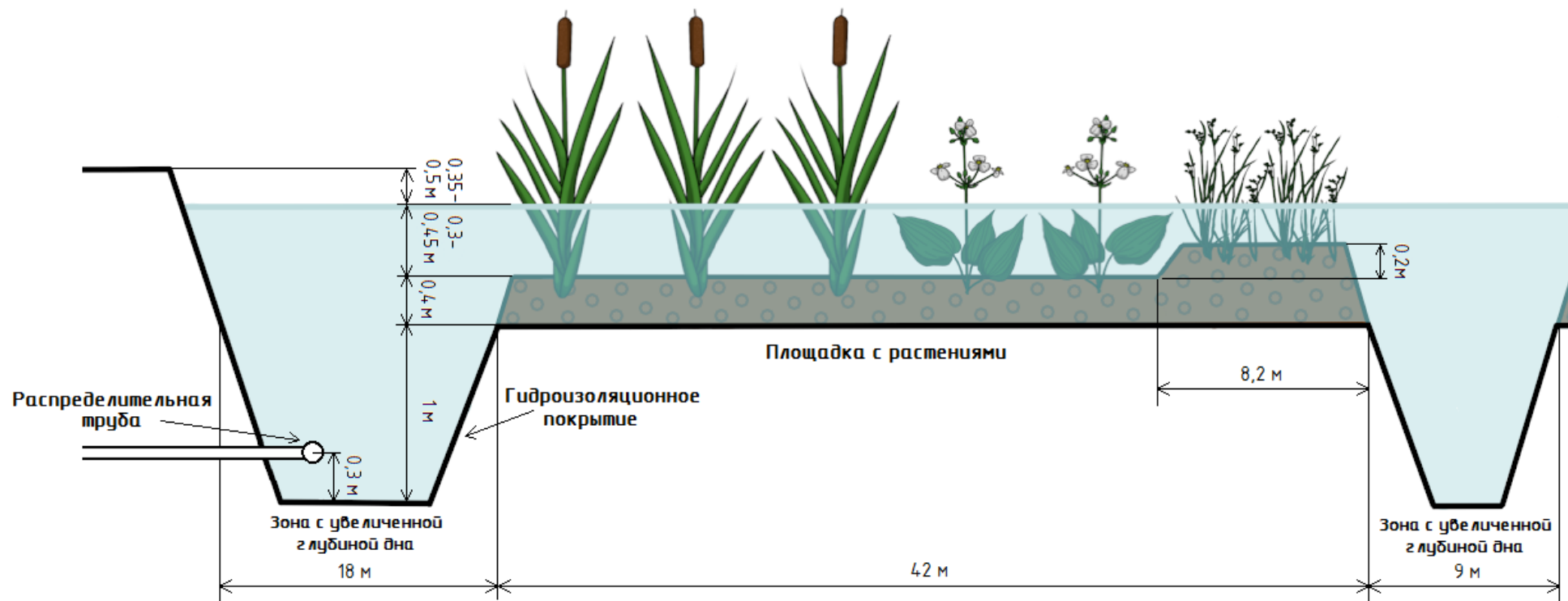


Рисунок 7 – Схематичное изображение основных составляющих системы сконструированного водно-болотного угодья

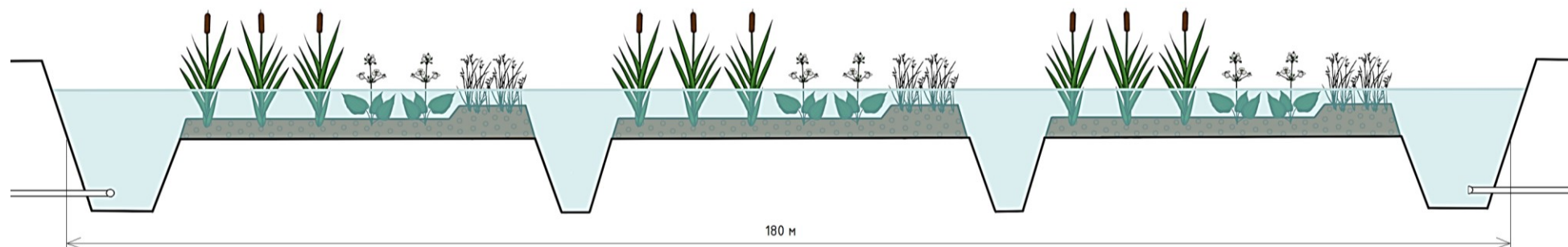


Рисунок 8 – Схематичное изображение общего вида системы сконструированного водно-болотного угодья (вспомогательные конструкции и устройства не отражены)