

Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина –
обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук»

На правах рукописи



ЛУСИС АДЕЛИНА ВАДИМОВНА

**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ПЫЛЯЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
АПАТИТОНЕФЕЛИНОВОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА
В УСЛОВИЯХ КОЛЬСКОГО СЕВЕРА**

Специальность 1.6.21. – «Геоэкология» (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор биологических наук
Л.А. Иванова

Москва – 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ-----	5
ГЛАВА I. Хранилища горнопромышленных отходов и их влияние на окружающую среду -----	14
1.1. Современное состояние и проблемы антропогенно-трансформированных земель на Кольском Севере -----	14
1.2. Современные методы снижения негативного воздействия антропогенно-трансформированных земель на природные экосистемы -----	19
1.3. Адаптированные технологии биорекультивации нарушенных ландшафтов на Кольском Севере -----	25
1.4. Использование осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод для реабилитации нарушенных территорий -----	30
Выводы по главе 1 -----	36
ГЛАВА 2. Условия, объекты и методы исследования -----	38
2.1. Краткая характеристика района исследования -----	38
2.2. Агроклиматические условия региона-----	39
2.3. Объекты исследования-----	42
2.4. Методы исследований -----	50
ГЛАВА 3. Оценка возможности использования мелиоранта на основе осветленных коммунальных стоков для экологической стабилизации пылящих поверхностей хранилищ горнопромышленных отходов на кольском севере-----	56
3.1. Использование мелиоранта на основе осветленных коммунальных стоков для стимулирования восстановительной сукцессии на апатитонефелиновом хвостохранилище-----	56
3.1.1. Лабораторный опыт №1. Биотестирование -----	58
3.1.2. Лабораторный опыт №2. Химический состав мелиоранта-----	63
3.2. Применение осадка сточных вод и термовермикулита для формирования искусственного фитоценоза на разных субстратах-----	64

3.3. Применение мелиорантов на основе осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод для рекультивации отвалов отходов рудобогащения (хвостов) (лабораторный опыт №4) -----	72
3.4. Применение осадков сточных вод для формирования противоэрозионного фитоценоза на техногенном грунте песчаного карьера (многолетний полевой эксперимент №1) -----	77
Выводы по главе 3: -----	88
ГЛАВА 4. Химическая мелиорация нефелиновых песков с использованием отходов селитебного комплекса (осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод) -----	91
4.1. Химическая мелиорация нефелиновых песков с применением осветленных коммунальных стоков (лабораторный опыт №5) -----	91
4.2. Химическая мелиорация нефелиновых песков с применением осадка сточных вод (лабораторный опыт №6) -----	98
Выводы по главе 4 -----	105
ГЛАВА 5. Обоснование технологии экологической стабилизации пылящих поверхностей хранилищ горнопромышленных отходов на кольском севере ----	107
5.1. Влияние мелиорантов (осветленных коммунальных стоков, осадков сточных вод, минеральных удобрений) на продуктивность и показатели пигментного комплекса тимофеевки луговой (лабораторный рекогносцировочный опыт №7) -----	107
5.2. Оценка фотосинтетической активности и содержания пигментов пластид овсяницы красной в искусственных фитоценозах, созданных с применением осадков сточных вод на техногенном грунте песчаного карьера -----	114
5.3. Технология экологической стабилизации пылящих поверхностей хранилищ горнопромышленных отходов на Кольском Севере -----	126
5.4. Практические рекомендации по использованию отходов селитебного комплекса (осадка сточных вод) для экологически эффективной ревитализации нарушенных горными работами ландшафтов на Кольском Севере -----	127
5.5. Экономическая оценка ревитализации, нарушенных горными работами ландшафтов, с применением предлагаемых мелиорантов на основе отходов	

селитебного комплекса (осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод) -----	128
Выводы по главе 5 -----	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ -----	134
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ -----	138
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ -----	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ -----	142

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью решения приоритетных задач в соответствии с Указами Президента РФ № 176 от 19 апреля 2017 г. «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года»: п. 11 р) устранение негативных последствий для окружающей среды хозяйственной и иной деятельности человека, и № 645 от 26 октября 2020 г.».

Научно-технический прогресс не только способствовал росту благосостояния общества, но и привел к появлению большого количества новых техногенных угроз для отдельного человека и для цивилизации в целом [91]. По мере ускорения его темпов воздействие хозяйственной деятельности человека на природу становится все более разрушительным, приводящим к возникновению новых техногенных форм ландшафта и другим качественным изменениям состояния земель [29].

Активная эксплуатация месторождений полезных ископаемых в Мурманской области способствовала формированию на ее территории многочисленных малых и больших карьерных выработок и 17 крупнейших техногенных массивов класса хвостовых отвалов с полностью утратившими растительный покров пылящими песчаными поверхностями, 9 из которых размещены на территориях крупнейшего градообразующего производственного предприятия КФ АО «Апатит» [4]. Практически все они включены в перечень объектов накопленного экологического ущерба [96]. При формировании карьеров, вводе и эксплуатации хранилищ промышленных отходов происходит изъятие из хозяйственного оборота значительного количества продуктивных земель. Занимающие большие площади вблизи населенных пунктов, они приводят к запылению и химическому загрязнению атмосферного воздуха, почв, биоты, поверхностных и подземных вод, что отрицательно сказывается на здоровье населения [51].

Одним из распространенных способов пылеподавления и снижения негативного воздействия обширных техногенных массивов на объекты природной среды является отведение их части под самозарастание [54]. Однако, в связи с

неблагоприятным прогнозом и сложностью естественного восстановления растительности на малопродуктивных песчаных отложениях карьеров и хвостовых отвалов, обусловленных индивидуальной и региональной спецификой [44], на первый план выдвигается проведение биорекультивационных работ, включающих комплекс агротехнических и фитомелиоративных мероприятий (проведение землевания, применение удобрений и др.), направленных на возобновление на объектах экологического ущерба исторически сложившейся совокупности флоры, фауны и микроорганизмов [21]. Такой классический вариант биорекультивации нарушенных земель с малопродуктивными песчаными техногенно-трансформированными грунтами в условиях Заполярья проблематичен без дополнительных инвестиций в дорогостоящие удобрения, из-за отсутствия в регионе торфоразработок, дефицита окультуренных и низкого питательного статуса местных почв, трудоемкости и дороговизны мероприятий по повышению их плодородия. Последнее зачастую имеет решающее значение при проведении восстановительных работ, требует поиска и разработки нетрадиционных, научно-обоснованных, адаптированных к экологическим и экономическим особенностям региона, способов использования более дешевых, замещающих удобрения, материалов для удешевления и повышения эффективности биорекультивационных технологий.

В этой связи большой интерес представляют продукты переработки региональных водоканализационных хозяйств (ВКХ) – осветленные коммунальные стоки (ОКС) [159, 170] и осадки сточных вод (ОСВ) [55, 56, 148].

Данный метод является разновидностью химической мелиорации, направленной прежде всего на улучшение эдафических свойств техногрунтов. Мелиорирующий и удобрительный эффект осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод связан с наличием в них органического вещества и ряда доступных для растений питательных элементов. Однако они характеризуются непостоянством состава, могут содержать набор вредных химических веществ и патогенов, поэтому для их успешного применения в качестве мелиорантов

малопродуктивных угодьев актуальны исследования по изучению каждого из них в конкретных условиях рекультивируемых территорий [93].

Значительный вклад в изучение влияния горных предприятий на окружающую среду и ликвидации накопленного ущерба, рекультивации нарушенных территорий внесли российские и зарубежные ученые: академик В.А. Чантурия, Г.В. Калабин, Т.И. Моисеенко, В.Н. Макаров, Д.В. Макаров, С.П. Месяц, Л.П. Капелькина, Переверзев В.Н., Евдокимова Г.А., M. J.H. Fu, M. Lindsay, A. Tariaa, P. Thomas и др.

Цель исследований — обоснование технологии экологической стабилизации пылящих поверхностей хранилищ горнопромышленных отходов в условиях Кольского Севера.

Идея работы заключается в том, что экологическая стабилизация хранилищ твердых песчаных отходов и обеспечивается за счёт утилизации различных типов отходов селитебного комплекса в соотношениях, определяемых структурой видового состава формируемого противозрозийного фитоценоза.

Задачи исследования:

- Провести литературный обзор современного состояния и проблемы антропогенно-трансформированных земель в условиях Кольского Севера;
- Провести оценку возможности использования мелиорантов на основе осветленных коммунальных стоков для экологической стабилизации пылящих поверхностей хранилищ горнопромышленных отходов в условиях Кольского Севера;
- Провести лабораторные исследования возможности использования мелиоранта на основе осветленных коммунальных стоков для стимулирования восстановительной сукцессии на хвостохранилище и формирования искусственного фитоценоза на разных субстратах;
- Провести исследования применения химической мелиорации нефелиновых песков с использованием отходов селитебного комплекса (осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод);

- Предложить технологию экологической стабилизации пылящих поверхностей хранилищ горнопромышленных отходов в условиях Кольского Севера;
- Дать практические рекомендации по использованию отходов селитебного комплекса (осветленные коммунальные стоки и осадок сточных вод) для экологически эффективной ревитализации, нарушенных горными работами, ландшафтов в условиях Кольского Севера;
- Дать экономическую оценку ревитализации, нарушенных горными работами, ландшафтов с применением предлагаемых мелиорантов на основе отходов селитебного комплекса (осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод).

Научная новизна:

Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены экологически эффективная возможность и способы биорекультивации техногенных пылящих поверхностей с использованием отходов селитебного комплекса в условиях Кольского Севера за счет целенаправленного формирования эдафических свойств техногрунтов, соответствующих структуре видового состава противозерозийных травяных фитоценозов.

Определено, что применение мелиорантов на основе осветленных коммунальных стоков стимулирует восстановительную сукцессию на апатитонегелиновом хвостохранилище и положительно влияет на прорастание семян тимopheевки луговой и дальнейший рост и развитие растений в искусственно создаваемом фитоценозе.

Установлено, что в условиях Кольского Севера оптимальный состав травяных смесей формируется на основе видовой структуры аборигенных фитоценозов с учётом степени влияния состава применяемых мелиорантов на интенсивность процессов корнеобразования видов эдификаторной группы.

Определены показатели работы фотосинтетического аппарата доминантных видов аборигенных растений Кольского Севера в созданном многолетнем противозерозийном фитоценозе, позволившие конкретизировать разрабатываемую

технологии стабилизации пылящих поверхностей хранилищ горнопромышленных отходов.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что сформированный при проведении исследований на Кольском Севере общеметодологический подход к выбору оптимального уровня мелиорирующего и удобрительного эффекта комплексных смесей жидких бытовых отходов исходя из экологически обусловленных темпов изменений биологической продуктивности и проективного покрытия травяных противозерозионных смесей может быть использован при создании подобных технологий экологической стабилизации пылящих техногенных поверхностей в любых других климатических зонах.

Практическая значимость работы:

1. Разработанные научно-методические приемы биорекультивации обширных техногенных массивов в зоне добычи и переработки полезных ископаемых на основе использования отходов селитебного комплекса; будут способствовать ускоренному и эффективному восстановлению противозерозионных травяных биогеоценозов на нарушенных территориях, а также мобилизации потенциала земель и возвращения их в хозяйственный оборот и природную экосистему, что особенно важно в условиях Крайнего Севера.

2. Накопленный положительный опыт по биологической рекультивации песчаных карьеров и отвалов хвостов рудообогащения АНОФ-2 КФ АО "Апатит" с применением мелиорантов, меньшие природно-ресурсные затраты и невысокие материальные издержки дают возможность тиражировать предлагаемый способ на другие промышленные объекты с нарушенными землями в Мурманской области, делают его весьма перспективным для распространения в остальные арктические регионы РФ.

3. Применение нетрадиционных почвоулучшителей для восстановления нарушенных ландшафтов будет способствовать рациональной утилизации огромных накоплений токсичных отходов местных канализационно-очистных сооружений, росту прибыли водопроводно-канализационных хозяйств (ВКХ) за счет снижения штрафных санкций за их сверхнормативный сброс, а также

возможности совершенствования технологических процессов на этих предприятиях.

Объекты и материалы исследований:

- отвалы отходов рудообогатения АНОФ-2 КФ АО "Апатит";
- песчаный карьер ВКХ АО «Апатитыводоканал»;
- отходы производства и потребления регионального ВКХ АО «Апатитыводоканал»: осветленные коммунальные стоки и осадки сточных вод;
- термовермикулит марки Випон-2;
- 12 видов многолетних травянистых и 1 вид древесных растений;
- минеральные удобрения «Аммофос»;
- нефильтрованная дождевая вода;
- нефильтрованная дождевая вода.

Методы исследований. Аналитическая работа выполнена в специализированных аккредитованных лабораториях ФГБУН КНЦ РАН с применением современного оборудования (атомно-абсорбционного спектрометра с пламенной атомизацией, AAnalyst 400 PerkinElmer, масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой, ELAN 9000 PerkinElmer, спектрофотометра UV-1800 (Shimadzu, Япония), инфракрасного газоанализатора LI-COR-850 (LI-COR, США) и др.) Показатели анализировались согласно действующих ГОСТ, ОСТ и методик.

Отбор проб техногенно-трансформированных грунтов, надземной части растений и отходов регионального ВКХ проводился в соответствии с утвержденными методиками. Определение инженерно-геологических характеристик хвостов обогащения апатитонелефиновых руд проводили согласно ГОСТ 5140-84.

В работе использованы данные экспериментальных исследований и результаты анализов отобранных проб.

Изучение возможности использования осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод в качестве мелиорантов техногенно-трансформированных

грунтов выполняли согласно требованиям СанПиН 2.1.7.573-96 «Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения для сельскохозяйственных полей орошения (ЗПО)» и ГОСТ Р 54534–2011, предъявляемым к осадкам при использовании в качестве почвогрунта для биологической рекультивации.

Для анализа естественных и антропогенных сообществ на территориях объектов исследований использовали общепринятые геоботанические методики осуществления полевых экспериментов. Латинские названия растений приводятся в соответствии с общепринятыми международными названиями World Flora Online.

Обработка полученных результатов произведена с применением статистических методов, в том числе однофакторного дисперсионного анализа (One-way ANOVA) в программных продуктах Microsoft Excel.

Защищаемые положения:

1. Эффективное закрепление пылящих поверхностей хранилищ тонкодисперсных отходов в условиях Кольского Севера достигается в течение уже в первый год вегетации видов-эдификаторов в составе травосмеси путем формирования противозерозийного растительного покрова с высоким проективным покрытием и мощной травяной дерниной при воздействии разных типов жидких отходов селитебного комплекса.

2. Механизм ревитализации ландшафтов техногенных новообразований из отходов обогащения заключается в снижении подвижности тонкодисперсных фракций в их приповерхностной зоне за счёт ускоренного развития восстановительной сукцессии в направлении воспроизводства там экологически устойчивых, самостоятельно существующих и развивающихся, растительных сообществ.

3. Отходы селитебного комплекса (осветленные коммунальные стоки и осадки сточных вод) характеризующиеся высоким содержанием легкодоступного для микробиоты органического вещества, а также лабильностью питательных элементов, способствующие повышению доступности калия и фосфора за счет их мобилизации из апатито-нефелиновых песков, дальнейшей ассимиляции растениями азота, фосфора и

калия, являются эффективными почвоулучшителями стимулирующего и пролонгирующего действия, повышающими биогенность малопродуктивных техногенных грунтов, способными создавать на них в зоне рискованного земледелия благоприятные для выращивания растений эдафические условия.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается применением современной приборной базы, апробированных методов анализа и статистической обработки фактического материала, представительностью и значительным объемом исходных данных, использованием общепринятых критериев оценки полученных результатов; подтверждается согласованностью выводов теоретического анализа и данных эксперимента, удовлетворительной сходимостью результатов измерений и экспериментальных исследований, а также апробацией на научных конференциях, форумах и практической реализацией полученных результатов.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на: XVIII Международной молодежной научной конференции «Экологические проблемы недропользования. Наука и образование» (2018 г., г. Санкт-Петербург), Международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019» (2019 г., г. Севастополь), Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные вопросы изучения и сохранения растительного мира Арктики и горных районов» (2021 г., г. Апатиты), 5-й конференции Международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН (2022 г., Москва), Международном симпозиуме «Неделя Горняка 2023» (2023 г., Москва), Международной конференции «Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» («Плаксинские чтения – 2023»), (2023 г., Москва), 16 Международной научной школы молодых ученых и специалистов

«Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых», (2023 г., Москва) и 8-и заседаниях Ученого совета ПАБСИ КНЦ РАН.

Личный вклад автора. Все полевые и лабораторные эксперименты, включая их постановку и проведение, определение цели и задач исследований, анализ зарубежной и отечественной научной литературы по теме работы, отбор почвенных и растительных проб, получение экспериментальных данных, их камеральная и статистическая обработка, обобщение и интерпретация полученных результатов проводились лично соискателем, или при его непосредственном участии.

Публикации. По теме работы опубликовано 12 печатных трудов, в том числе: 1 – монографическая работа, 2 – в рецензируемых журналах, индексируемых в Scopus, 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ, и 6 – в сборниках и материалах конференций различного ранга.

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования и науки Мурманской области. Проект 17-45-510205: «Дефосфотация коммунальных стоков в условиях снижения водопотребления» в 2017-2019 гг.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы и 2 приложений. Она изложена на 171 странице, включает 30 таблиц, 39 рисунков. Список литературы составляет 201 источник, среди которых 66 иностранных.

Благодарности. Автор глубоко признателен научному руководителю, д.б.н. Л.А. Ивановой, ведущему научному сотруднику ИППЭС КНЦ РАН, к.б.н. Т.Т. Горбачевой, советнику генерального директора ФИЦ КНЦ РАН, д.т.н. В. А. Маслобоеву; выражает особую благодарность за оказанную поддержку, внимание и помощь Шмаковой Н.Ю., к.б.н. Шпак О.Н., к.б.н. Румянцевой А.В., д.б.н. к.х.н. Дрогобужской С.В. и главному технологу цеха водоотведения АО «Апатитыводоканал» Горбачеву А.А.

ГЛАВА I. Хранилища горнопромышленных отходов и их влияние на окружающую среду

1.1. Современное состояние и проблемы антропогенно-трансформированных земель на Кольском Севере

Мурманская область является наиболее промышленно и инфраструктурно развитым регионом на северо-западе Арктической зоны РФ (АЗРФ) [23]. В ее недрах обнаружено и изучено 1070 минералов, что составляет 1/4 из всех известных на Земле. Из них 256 являются новооткрытыми, 100 - найдены только здесь. В области расположены крупные горно-обогатительные предприятия: АО «Апатит», ЗАО «СЗФК», АО «Кольская ГМК», АО «Ковдорский ГОК», ООО «Ловозерский ГОК» и др., добывающие и перерабатывающие более 30 полезных ископаемых (железные, апатито-нефелиновые, медно-никелевые, магнетитовые, лопаритовые руды, кианит, ниобий и тантал, слюда, сырье (природные пески) для строительных материалов и др.). Регион производит 100% апатитового, нефелинового и бадделеитового концентратов, 45% никеля, 11% железорудного концентрата, 7% рафинированной меди от всего объема материалов, производимых и добываемых на территории РФ.

Индекс промышленного производства в Мурманской области неуклонно растет, в то время как во многих других регионах страны снижается. Согласно Доклада министерства экономического развития Мурманской области [40] в январе - марте 2022 года он сохранил положительную динамику и составил 110,5 % относительно соответствующего периода 2021 года (в среднем по России – 105,9 %), добыча полезных ископаемых увеличилась на 6.4 %, в обрабатывающих производствах отмечен рост на 20.4 %.

Вместе с тем, природа Мурманской области очень уязвима для побочных продуктов активной антропогенной деятельности. Чем выше преобразующая деятельность человека, тем выше уровень антропогенных опасностей. Интенсивное развитие на Кольском полуострове горнодобывающей, химической и металлургической промышленности привели к избыточному потреблению природных ресурсов в таких масштабах, которые превосходят способность

природы к самовосстановлению и экологическим проблемам: интенсивному сокращению природных ресурсов, нарушению арктической экосистемы и глобальному загрязнению окружающей природной среды [72]. Все это отрицательно сказывается на здоровье человека и генетическом фонде [47, 30].

Учитывая то обстоятельство, что прямой выход продукта в технологической цепочке «сырье – целевой продукт» редко превышает 10 %, то есть порядка 90% идет в отходы, ежегодно увеличивающийся объем добычи полезных ископаемых приводит к накоплению огромнейшего количества отходов промышленного производства. В настоящее время на территории РФ саккумулировалось уже свыше 100 млрд т отходов горнопромышленного производства, причем около 40% можно вовлекать в качестве источника минеральных ресурсов, однако на деле используется менее 1% от их общего количества. [53]. С каждым годом этот объем увеличивается. В 2021 году наибольший объем образования отходов производства и потребления приходился на вид экономической деятельности «добыча полезных ископаемых». Общий объем образования отходов в целом по СЗФО составил 577,336 млн т, что на 1,3% больше, чем в 2020 г. (570,189 млн т). Тенденция образования отходов в разрезе субъектов СЗФО имела в целом положительную направленность. Наибольший объем образования отходов в 2021 г. отмечен в Мурманской области - 292,055 млн т. [23]. Из них забалансовые и попутные руды составили 2.4%, вскрышные породы, проходки - 72.4%, хвосты обогащения различных руд (24%), шлаки и золы (до 1.5%) [178].

Одной из часто встречающихся форм антропогенного типа ландшафтов в Мурманской области являются песчаные карьеры, в которых осуществляется добыча песка открытым способом. Их характеризуют отсутствие растительности, округлые вершины холмов, крутые склоны, на которых можно наблюдать сползание песчаного субстрата. Карьерный песок – сыпучий материал, образовавшийся в процессе естественного разрушения горных пород, состоящий из частиц кварца, слюды и полевого шпата и других минералов. Из-за всевозможных включений (остатков растений, небольшого количества гравия, глинистых и пылевидных частиц, камней), большая часть карьерного песка используется как строительный материал (песок) для

изготовления строительных штучных материалов, панелей, а также для засыпки траншей и планировки рельефа участков и т. п. Объемы его добычи измеряются миллионами кубометров в год. По крупности зерна он относится к тонко- и среднеразмерной разновидностям [19].

Еще одной широко распространенной в регионе формой нарушения ландшафтов являются хвостовые хозяйства (апатит-нефелиновые хвостохранилища). Они представляют собой сложный комплекс гидротехнических сооружений по гидротранспортировке и укладке измельченных хвостов обогащения, очистке и отвода воды, возврата ее в оборот после осветления [74, 152, 145, 175, 149, 175]. В настоящее время общая площадь хвостохранилищ обогатительных фабрик в регионе насчитывает более 5 тысяч гектаров. При активной эксплуатации, которая, как правило, длится десятилетиями, практически лишенная растительности, поверхность хвостохранилища, способна достигать нескольких квадратных километров. На создание и поддержание таких хвостохранилищ требуются значительные капитальные и эксплуатационные затраты. При этом огромные площади выводятся из хозяйственного оборота. К этому добавляются платежи за земли, изъятые из лесных фондов и сельского хозяйства, на разработку предельно допустимых выбросов, нормативов допустимого сброса, проектов нормативов образования отходов и лимитов на их размещение, не говоря уже о штрафах за их превышение.

Хвостохранилище АНОФ-2 КФ АО «Апатит», предназначенное для складирования отвальных хвостов, поступающих с апатит-нефелиновой обогатительной фабрики №2 (АНОФ-2), не является исключением. Данный объект введен в эксплуатацию в 1963 г., расположен в 8 км к северо-западу от г. Апатиты (Мурманская область) и занимает часть губы реки Белой, представляющей залив крупнейшего в регионе озера Имандра. Территория хвостохранилища вытянута с юго-востока на северо-запад, ограничена с востока Хибинским горным массивом, а с запада – озером Имандра (рис. 1.1). Его тип по размещению – равнинное, площадь составляет 7.8 км², а периметр по дамбе обвалования – 11550 м. Это крупнейший намывной техногенный массив в РФ по высоте ограждающей дамбы

(более 75 м) и по объему заскладированных в нем отходов (свыше 700 млн м³ хвостов). Ежегодно с обогатительной фабрики на хвостохранилище поступает более 6 млн м³ хвостов обогащения [4].



Рисунок 1.1. Карта расположения двух действующих апатит-нефелиновых хвостохранилищ КФ АО «Апатит». Красный — расположение апатит-нефелиновых хвостохранилищ АНОФ-2 (слева) и АНОФ-3 (справа); жёлтый — г. Апатиты; зелёный — г. Кировск; синий — жилые зоны городов, где находятся жилые дома и прочая гражданская инфраструктура

Как и карьерные выработки, складированные твердые минеральные отходы (хвостохранилища) подвержены деятельности ветровой и водной эрозии, оказывают негативное влияние на окружающую среду, являются источником серьезного загрязнения атмосферы, почв, поверхностных и подземных вод химическими веществами [151, 172]. Так, в сухие дни летнего периода, в связи с быстрой потерей влаги верхними песчаными слоями этих объектов, и, под воздействием ветра, происходит формирование значительного по контрастности химического загрязнения атмосферного воздуха, достигающего близлежащих населенных пунктов (рис. 1.2, 1.3). Для тонкодисперсного материала характерна

высокая площадь поверхности частиц, при их попадании на поверхность почвы происходит химическое взаимодействие с атмосферными водами и почвенными органосодержащими растворами [70]. В результате этого взаимодействия на близлежащих территориях может наблюдаться превышение среднесуточной предельно-допустимой концентрации взвешенных частиц в 2,0-2,5 раза [120]. В весенний период случаются размывы дамб хвостохранилищ с аварийными сбросами в близлежащие водоемы [51].



Рисунок 1.2. Пылеунос с хвостохранилища АНОФ-2 (фото с сайта <https://www.opentown.ru/novosti/19359>)



Рисунок 1.3. Пыление отвалов хвостохранилища АНОФ-2, достигающее г. Апатиты

Частицы пыли комплексно воздействуют на окружающую среду, в том числе на биоту. Растения испытывают токсический стресс, когда частицы попадают в почву, растворяются и становятся частью почвенного раствора. Кроме того, значительная часть пыли оседает и скапливается на листовых пластинках растений.

Долгосрочное воздействие переносимых твердых частиц на человека связано с широким спектром потенциальных рисков для здоровья, включая анемию [179], сердечно-сосудистые [144] и респираторные заболевания [147], хроническую обструктивную болезнь легких и др. [169]. Согласно существующим эпидемиологическим исследованиям, действие частиц носит системный характер,

оказывает биологическое действие на иммунный ответ, проявляет цитотоксичность и потенциальную мутагенность по отношению к клеткам организма [194].

Таким образом, следствием нарушения экологического состояния воздушного бассейна региона является ухудшение условий нормальной жизнедеятельности человека, организмов флоры и фауны [51], что требует проведения на объектах накопленного ущерба экологических мероприятий по пылеподавлению [52].

1.2. Современные методы снижения негативного воздействия антропогенно-трансформированных земель на природные экосистемы

Универсального решения проблемы пыления хвостохранилищ не существует. Многие горнодобывающие предприятия используют превентивные меры пылеподавления, но высокая стоимость, большая площадь хвостохранилищ и нестабильные условия окружающей среды снижают эффективность таких мер. Применяемые в настоящее время методы борьбы с уносом песков условно можно разделить на три основные группы: механические, физико-химические, химические и биологические [124, 78].

Механический метод основан на засыпке песчаной поверхности инертным материалом (щебнем или гравием) слоем толщиной до 0,20 м. Его достоинством является отсутствие необходимости применения специализированной техники для предварительной подготовки поверхности и нанесения закрепителей, а недостатком – использование данного способа только на территориях, требующих закрепления на длительный период времени. В случае, когда необходимо консервативное закрепление, механический способ может сделать невозможным переработку складированных отходов в перспективе [67].

Физико-химический метод направлен на создание на песчаной поверхности противоэрозийного покрытия с помощью разного рода вяжущих и цементирующих химических составов (реагентов) как органического, так и неорганического происхождения, либо поливы водой (гидрообеспыливание) [87].

Гидрообеспыливание - орошение пылящей поверхности водой, является самым первым способом пылеподавления, издревле применяемом в мире, и широко используемым в настоящее время в условиях эксплуатации отвалов и карьеров. Для технологической реализации предлагаемого способа предусмотрено применение разных передвижных, стационарных или плавучих мелководных оросительных установок. Однако, его серьёзными недостатками является очень большой расход воды и расстояния транспортирования воды от хвостохранилищ до многоярусных отвалов, а также опасность усиления фильтрационных нагрузок на ограждающую дамбу, которые могут вызвать обрушение, сползание откосов и нарушение устойчивости сооружения в целом. Кроме того, орошение пылящих поверхностей в жаркую погоду признается малоэффективным, так как пески быстро высыхают, а постоянная работа дождевальными установками сопровождается значительными затратами. Поэтому среди физико-химических методов предпочтение отдается использованию химреагентов, обеспечивающих не только смачивание твердых частиц песка и пыли, но и их обволакивание и закрепление в общей массе. Во многих случаях такой подход помогает закреплять пылящие поверхности на продолжительный срок [59].

В последнее десятилетие активно ведется научный поиск новых наиболее экологически безопасных связующих и усовершенствование существующих с целью достижения оптимальных показателей прочностных и фильтрационных свойств [115]. Хорошие перспективы для внедрения в современные «зеленые» технологии» пылеподавления имеют производные хитозана [201], гуаровая камедь [138], модифицированный крахмал [78] и многофункциональные смеси на основе альгината натрия [195]. Несмотря на это, в настоящее время по-прежнему одним из самых эффективных и широко применяемых во всем мире способов стабилизации и укрепления песчаных техногрунтов, остается создание на их поверхности искусственных эрозиостойких покрытий из распыленных полимерных эмульсий на водной основе и сополимеров на основе винилацетата или акрила.

Проблеме подавления пылеуноса с отвалов отходов рудообогащения в Кировско-Апатитском районе уделяется огромное внимание. Природоохранной

службой КФ АО «Апатит» постоянно ведется подбор и испытание наиболее эффективных связующих реагентов. Так, начиная с 2003 года, закрепление хвостов АНОФ-2 реализовывалось нанесением на их поверхность анионной битумной эмульсии (рис. 1.4).



Рисунок 1.4. Закрепление дорожного полотна на хвостохранилище АНОФ-2 с помощью анионной битумной эмульсии

В его основе рабочий раствор товарной битумной эмульсии, имеющий достаточно широкий температурный интервал использования. В условиях Крайнего Севера данное связующее не теряет свои потребительские свойства при замораживании и обеспечивает закрепление пылящих поверхностей на протяжении 4-6 месяцев. Однако, как показала практика, из-за слабой адгезии битума к поверхности хвостов при неблагоприятных метеорологических условиях (скорость ветра ≥ 10 м/с),

сформированная данным способом поверхностная пленка, может разрушаться (рис. 1.5), также становясь источником мелкодисперсной пыли [73].



Рисунок 1.5. Результат применения анионной битумной эмульсии для пылеподавления на резервном хвостохранилище АНОФ-2

Разработкой мероприятий по повышению эффективности пылеподавления и улучшения экологической обстановки в регионе активно занимаются и сотрудники ФИЦ КНЦ РАН. На территории хвостохранилища АНОФ-2 ими был испытан ряд новых, рекомендуемых как экологически безопасных («environmentally-friendly»), полимерных связующих реагентов: лигносульфонат, Floset S44, Dustbind (NALCO), Alcotac DS1, PHX-1021, изучены их физико-механические свойства и устойчивость закрепления по отношению к агрессивным воздействиям, а также влияние, поступающих в оборотную воду, реагентов на технологические показатели флотации апатит-нефелиновой руды [74, 17]. В результате, оптимальным связующим для промышленного применения был признан реагент Dustbind (NALCO). В настоящее время он успешно используется в КФ АО «Апатит» для пылеподавления на хвостохранилище АНОФ-2 вместо анионной битумной эмульсии [73].

Из недостатков применения физико-химических методов пылеподавления можно выделить два фактора. Это неустойчивое состояние формируемых на долгосрочную перспективу, покрытий, и, технически трудоемкий и энергоемкий, требующий повышенного расхода как воды, так и химреагентов, технологический процесс создания. Более того, к физическо-химическим методам предъявляются повышенные и сложные для выполнения требования: выбранные закрепители не должны быть токсичными, дорогостоящими и дефицитными. Желательно, чтобы они были биологически разлагаемыми, способными предотвращать ветровую эрозию при минимальном расходе, сохранять прочность закрепленной поверхности и, после намокания, быстро восстанавливать ее до первоначальной величины. Сама технология закрепления песков должна быть относительно простой и предусматривать полную механизацию работ [79, 83].

Биологический метод. В практике горнорудных предприятий РФ одним из способов закрепления пылящих поверхности на обширных нарушенных территориях является отведение их части под самозарастание, основанное на процессах естественного самовосстановления природных экосистем. При превышении площади проективного покрытия участков самозарастания более чем на 50% дополнительных мер для его стимулирования, как правило, не требуется. В противном случае прибегают к биологическому методу восстановления экологического состояния нарушенных земель (биорекультивации).

Согласно действующего ГОСТ Р 59060-2020 [22] рекультивации подлежат нарушенные земли всех категорий - карьеров, выработок, складов, отвалов и т. п. Она выполняется по нескольким направлениям: сельскохозяйственное, лесохозяйственное, водохозяйственное, рекреационное, санитарно-гигиеническое (природоохранное) и строительное. Анализ существующей ситуации показывает, что в настоящее время для заполярных техногенно нарушенных ландшафтов наиболее приемлемыми направлениями рекультивации являются: природоохранное (укрепление откосов склонов от ветровой и водной эрозии, восстановление видового разнообразия флоры, чистоты атмосферы и гидросферы)

и санитарно-гигиеническое направление (консервация нарушенных земель, полноценная рекультивация которых нецелесообразна) [4].

Биорекультивация обычно состоит из двух основных этапов - технического и биологического. На техническом этапе проводится корректировка ландшафта и нанесение плодородных пород или почв на поверхность рекультивируемого участка. Биологический этап включает проведение комплекса работ по возобновлению растительного покрова (рис. 1.6) [49].



а



б

Рисунок 1.6. Пример биологической рекультивации хвостовых отвалов традиционным посевным способом с проведением выполаживания и нанесения на поверхность техногенного грунта слоя почвосмеси: а – до начала проведения рекультивационных работ, б – результат после их завершения

Биологические процессы, приводящие к развитию биогеоценоза, являются ведущими механизмами трансформации техногенных ландшафтов в естественные. Под воздействием растительности начинают протекать процессы, характерные для почвообразования, в частности, накопления органического вещества не только на поверхности песков, но и в приповерхностном дерновом слое, густо заросшем травами и переплетенном их корнями, находящимися в симбиозе с почвенными микроорганизмами. Дерновый пласт способен удерживать влагу, хорошо аэрируется, а через некоторое время может привести к перемешиванию материала на технически рекультивированных поверхностях. Постепенно в нем начинает

совершаться биологический круговорот веществ в системе субстрат-растение. В условиях Крайнего Севера задержание территории и опад являются признаками первичного почвообразовательного процесса, характерного для конкретных биоклиматических условий. Трансформация растительного опада, попадающего в дернину, приводит к увеличению содержания гумуса и формированию органогенного горизонта на рекультивируемой поверхности техногрунта и способствует повышению его плодородия [84]. Поэтому на сегодняшний день биологический метод общепризнан лучшим способом закрепления пылящих техногрунтов [21].

Техногрунты таких категорий нарушенных земель как песчаные карьеры и отвалы апатит-нефелиновых хвостохранилищ характеризуются отсутствием органического вещества биогенного происхождения (гумуса), а также пониженным содержанием полезных для растений питательных веществ, и по этим причинам относятся к малопродуктивным угодиям. Поэтому при проведении рекультивационных работ на этих объектах определяющими факторами успешности и эффективности являются: поиск, разработка и быстрое использование малоэнергоёмких, упрощённых и природовосстановительных технологий, адаптированных к экологическим и экономическим особенностям региона, а также питательный режим их поверхностного слоя.

1.3. Адаптированные технологии биорекультивации нарушенных ландшафтов на Кольском Севере

Апатит-нефелиновым хвостам, как и многим другим техногенным отвалам и карьерным выработкам, процессы естественного зарастания также свойственны [48], но в экстремальных природноклиматических условиях Заполярья они идут крайне медленно [34]. Это обусловлено многими причинами, в том числе: случайностью заноса семян растений, способных произрастать в маргинальных условиях; невозможностью закрепиться растениям на поверхности склонов из-за их крутизны, сильной выраженности на поверхности холмов процессов смыва и размыва, с которыми связан вынос мелких частиц и диаспор растений

поверхностными водами. На значительных массивах открытых пространств естественное восстановление растительного покрова еще в большей степени усугубляется ввиду часто повторяющихся переносов песка, препятствующего закреплению растительности на его поверхности [47].

На хвостохранилище АНОФ-2 процессы естественного зарастания и развития восстановительной сукцессии слабо выражены, характеризуются высокой разреженностью формирующихся группировок растений и небольшим по численности (21 вид) флористическим составом растений, адаптировавшихся к специфическим для них условиям произрастания. Участки из самостоятельно формирующихся группировок растений в основном сосредоточены у береговой линии искусственных и естественных водоемов. Там же, где наблюдается интенсивная ветровая эрозия или смыв верхнего слоя (пляжи, ровная поверхность склонов, дороги), дикорастущая растительность вовсе отсутствует. Для большинства растений характерно поверхностное (до 5 см) залегание корневой системы, хрупкость и сильная изогнутость корней, вследствие чего их надземная биомасса практически не способна противостоять эрозионным процессам [35] (рис. 1.7, 1.8), что требует проведения биорекультивационных мероприятий.

Из-за отсутствия органического вещества биогенного происхождения (гумуса), а также пониженного содержания полезных для растений питательных веществ, техногрунты таких категорий нарушенных земель как песчаные карьеры и отвалы апатит-нефелиновых хвостохранилищ относятся к малопродуктивным угодиям. Поэтому при проведении рекультивационных работ на этих объектах одним из определяющих факторов успешности является питательный режим их поверхностного слоя.



Рисунок 1.7. Самозарастание территории резервного хвостохранилища АНОФ-2 КФ АО «Апатит»



Рисунок 1.8. Естественная группировка растений

Начиная с 1964 и по настоящее время сотрудниками в то время Кольского филиала АН СССР проводится активная наработка опыта по консервации апатит-нефелиновых хвостохранилищ КФ АО «Апатит». Валовой анализ техногрунта свидетельствовал о благоприятных предпосылках для выращивания растений, поэтому традиционное задержание тела этого хвостохранилища признавалось перспективным направлением не только для предотвращения его ветровой и водной эрозии, но и в целях создания продуктивных сельскохозяйственных угодий на отработанной территории [88]. Авторами были даны рекомендации по созданию устойчивого растительного покрова на нарушенных территориях в зависимости от состава песков, характера рельефа, условий увлажнения грунта и предусматривалось обязательное проведение землевания путем нанесения плодородного слоя почвы либо потенциально плодородных пород. Последнее значительно осложняет проведение биорекультивационных работ в условиях Мурманской области, требует существенных материальных затрат, в частности по причине отсутствия в регионе торфоразработок. Проблема еще более усугубляется дефицитом окультуренных и низким питательным статусом естественных почв, а также трудоемкостью и дороговизной мероприятий по повышению их плодородия [134]. Данные обстоятельства зачастую имеют решающее значение при

осуществлении восстановительных работ, требуют поиска нетрадиционных способов формирования растительного покрова на нарушенных землях.

В 2000-е годы сотрудниками КНЦ РАН был разработан альтернативный подход к восстановлению нарушенных ландшафтов с помощью, адаптированных к условиям Заполярья, технологий ускоренного формирования растительного покрова [35, 36]. В их основе лежит комплексное использование многолетних травянистых растений, в том числе, присущих региону видов, в сочетании с региональными воздухо- и влагоемкими субстратами-почвозаменителями (термовермикулитом, древесными опилками, корой, жмыхом хвои, водорослями и травой морских штормовых выбросов или сапропелем). Применение данных технологий для биорекультивации разных категорий техногенно нарушенных земель в Мурманской области, включая объекты со сложным рельефом, без проведения землевания и выполаживания участков, способствовало ускорению восстановительной сукцессии и созданию на них высококачественного противоэрозионного растительного покрова с мощной травяной дерниной (рис. 1.9-1.11) [33, 161].



а



б

Рисунок 1.9. Биорекультивация пологого склона хвостоотвалов АНОФ-2 с помощью инновационного экспресс-способа – шевронного настила ковровой травяной дернины: а – начало эксперимента - сентябрь 2006 г., б – полное задернение экспериментального участка - август 2008 г.



а



б

Рисунок 1.10. Биорекультивация крутых склонов на хвостоотвалах АНОФ-2 с помощью инновационного экспресс-способа – шахматного настила ковровой травяной дернины: а – начало эксперимента (август 2014 г.), б – самораспространение и зарастание межфрагментарных оголенных пространств на склоне растительностью (август 2015 г.)



а



б

Рисунок 1.11. Внешний вид дернины одногодичного фитоценоза, сформированного с помощью экспресс-способа: а – травяная дернина и корневая система, б –кern

1.4. Использование осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод для реабилитации нарушенных территорий

Среди мелиоративных методов, направленных на повышение НПК-статуса малопродуктивных пылящих песчаных техногрунтов, ускорения процесса их зарастания и поддержания качества травостоя в искусственно создаваемых на них фитоценозах, широко используется внесение органических (навоз) и минеральных удобрений и мелиорантов, способствующих также удержанию влаги и развитию микробных сообществ, интенсифицирующих процессы почвообразования. Однако в настоящее время в РФ ощущается острый дефицит органических удобрений, обеспеченность навозом составляет не более 15 %. В среднем на поля вносится не менее 1.1-2.0 т этого удобрения на 1 га (в пересчете на подстилочный навоз). Несмотря на это, повсеместно отмечается отрицательный баланс по органическому веществу почвы [77]. К тому же, в навозе содержится недостаточное количество такого важного для питания растений макроэлемента, как фосфор и некоторых других микроэлементов, что требует увеличения дополнительных затрат на приобретение и использование минеральных удобрений [110].

В Мурманской области, где существует такая проблема, как отсутствие животноводческих комплексов, с которых можно было бы собирать и вывозить навоз, актуален поиск альтернативных органических удобрений. В этой связи обращают на себя внимание отходы производства и потребления региональных водопроводно-канализационных хозяйств (ВКХ) - осветленные коммунальные стоки (ОКС) и осадок сточных вод (ОСВ). Это вещества, которые образованы в процессе производства, выполнения работ, оказания услуг или в процессе потребления, которые удаляются, предназначены для удаления или подлежат удалению в соответствии с настоящим Федеральным законом [101]. Количество отходов производства и потребления ежегодно и неуклонно растет. Основной их объем в качестве отходов IV (большая часть после соответствующей обработки) или V класса опасности складывается на объектах размещения в городской черте или пригородной зоне, представляя собой огромные залежи. За их размещение и негативное воздействие на окружающую среду организации ВКХ несут

колоссальные транспортные расходы, осуществляют многомиллионные экологические платежи в бюджет.

Проблема накопления и переработки коммунальных отходов всегда была, есть и будет одной из самых серьезных и труднорешаемых для всех существующих в мире очистных сооружений, в том числе и для России. Она затрагивает практически все существующие предприятия ВКХ, в том числе, региональное предприятие ВКХ АО «Апатитыводоканал» (Мурманская область) и требует экстренного решения, поскольку сброс его «проблемных» стоков производится в озеро Имандра - крупнейшее в регионе водохранилище, экосистема которого весьма уязвима к изменению трофического статуса [118]. Промедление в решении этих вопросов может стать для региона настоящим экологическим бедствием, в то время как местные почвы ждёт полное истощение и деградация. При правильном же, научно обоснованном и экологически безопасном применении данное альтернативное удобрение может дать свои плоды.

В этой связи формирование и стимулирование стабильного спроса на данное сырье и продукцию, проведение исследований, направленных на утилизацию и поиск путей их эффективного вторичного использования в народном хозяйстве, - крайне актуальная экологическая проблема, существующая как для России, так и для зарубежных стран [25]. Ее решение и, получаемый при этом экономический эффект, трудно поддается оценке [198, 159].

Отечественной и зарубежной наукой и практикой доказана целесообразность эффективного использования осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод в качестве ценных удобрений, почвогрунтов и компостов для повышения биогенности малопродуктивных грунтов [45]. Данный метод относят к нетрадиционной разновидности химической мелиорации [61, 106, 10]. Тем не менее, применение отходов ВКХ в отечественном растениеводстве не превышает 7 %, в то время как за рубежом, оно достигает более 40 % [110].

Использование осветленных коммунальных стоков (ОКС). Для обывателя сточные воды в качестве удобрения представляются, наверное, в последнюю очередь. Всё-таки в их составе может быть всё что угодно. Несмотря на это,

применение, должным образом обработанных сточных вод, для выращивания растений с различной целевой направленностью (заготовка и переработка кормовых и технических культур, овощеводство, садоводство, озеленение) признано международной практикой эффективным и экономически целесообразным еще в прошлом столетии и рассматривается как метод повторного использования водных ресурсов и питательных веществ. Растущий интерес к ОКС обусловлен многокомпонентным составом стоков с соотношением макро- и микроэлементов, благоприятным для удобрительных поливов [159, 181]. Немаловажным фактором является и положительное влияние ОКС на повышение биологической активности почв/грунтов орошаемых территорий, связанное с высоким содержанием лабильных форм органического вещества [148], особенно микробного происхождения [170].

Согласно оценке, приведенной в работе В. Jimenez и Т. Asano [2004] [164], площадь земледельческих полей, орошаемых ОКС, достигает в мире 3.5 млн. га. В последние годы существенно расширяется область их применения в горной промышленности, главным образом на месторождениях сульфидных руд [168, 190, 192]. Это обусловлено высокой кислотонейтрализующей и комплексообразующей способностью стоков. Смешение с ними высокоагрессивных дренажных вод позволяет существенно снизить экологическую опасность побочных продуктов добычи и в местах разработки руд цветных металлов. Также предлагается внедрение технологий орошения хозяйственно-бытовыми стоками нарушенных территорий [57, 58]. При этом основным направлением признавалась активизация почвообразовательных процессов для эффективного задержания территорий, нарушенных золоотвалами и хвостохранилищами, однако широкого распространения в РФ такой способ не получил.

Использование осадка сточных вод (ОСВ). Большое внимание в мировой практике применения нетрадиционных удобрений привлекают осадки станций очистки хозяйственно-бытовых стоков [46]. Они являются широко распространенным видом отходов, образующихся при очистке сточных вод перед их сбросом в водоёмы. Индустриальные методы их обработки сложны и

энергоемки. Наиболее распространенными способами обращения с этим видом коммунальных отходов являются: сжигание и депонирование. Для использования их в качестве удобрений, столь необходимых сельскому хозяйству, обрабатываемые на иловых площадках ОСВ должны находиться там не менее трех лет и для полного их обеззараживания - подвергаться соответствующей обработке.

В одной тонне сухого осадка сточных вод в среднем содержится 50–70 кг, необходимых для растений, питательных веществ. Из них 80 % приходится на легкодоступные для микробиоты органические и около 20 % - на минеральные вещества [3]. Благодаря этому ОСВ могут служить дополнительным резервом для поддержания бездефицитного баланса гумуса в почве, оказывая положительное влияние на ее агрохимические показатели и продуктивность растений [135, 148].

Как и в случае с ОКС в мировой и отечественной практике осуществлялись работы по использованию осадков сточных вод для реабилитации нарушенных территорий. В Мурманской области инициатором такого применения явился «Мончегорскводоканал», а в 2003 г. силами «Мончлеспхоза» при финансовой поддержке Кольской горно-металлургической компании (дочернего предприятия ПАО ГМК «Норильский никель» в Мурманской области) и научном руководстве ИППЭС КНЦ РАН рекультивационные работы с применением ОСВ были выполнены в промышленных масштабах на техногенных пустошах вблизи г. Мончегорск. Экспертная оценка принятых мер подтвердила их эффективность и признала данный метод биорекультивации альтернативным традиционному [55, 56].

Требования к свойствам и содержанию загрязняющих веществ в отходах селитебного комплекса. Источником коммунальных сточных вод и их осадков является город, в связи с чем они не имеют постоянного состава, могут содержать такие загрязнения как разные металлсодержащие микрокомпоненты (тяжелые металлы, мышьяк), а также вирусы, сальмонеллы, яйца гельминтов, пестициды, бензопирены, фенолы, синтетические поверхностно-активные вещества, нефтепродукты, а также аммоний, нитриты, нитраты, бром и др. химические вещества.

Известно, что в силу продолжающегося применения устаревших технологий на большинстве предприятиях ВКХ РФ средней мощности отсутствует стадия доочистки коммунальных стоков от азота и фосфора до уровня НДС (нормативов допустимых сбросов) [99]. Поэтому существует угроза их использования либо вообще без предварительной очистки, либо не полностью доведенных до установленных санитарно-гигиенических нормативов. [136]. При отсутствии надлежащей обработки и экологически ненормированном применении отходы производства и потребления могут оказаться потенциальными источниками загрязнения почв, грунтовых вод и растениеводческой продукции [129]. К тому же, при попадании в водоприемники, могут безвозвратно утратиться и все ценные компоненты, остающиеся в них после недостаточной очистки [167, 118].

Таким образом, существующая на сегодняшний день, проблема утилизации и недостаточная изученность вопроса эффективного и безопасного использования отходов производства и потребления городских ВКХ способны негативно влиять на окружающую природную среду и здоровье человека. Однако во всем мире оценке риска применения коммунальных стоков в системах поверхностного и внутрипочвенного орошения и разработке агрономически эффективных и экологически безопасных технологий их утилизации уделяется пристальное внимание. В большинстве стран данная проблема экологической безопасности решается успешно [10, 182, 137, 184, 160].

В настоящее время в РФ разработан «Типовой технологический регламент использования осадков сточных вод в качестве органического удобрения». По своему статусу он является нормативным документом, уточняющим и дополняющим положения СанПиН 2.1.7.573-96–96 «Гигиенические требования ..., 1996 в соответствии с разработками последних лет, нашедшими отражение в проекте ГОСТа Р 17.4.3.07-2001 "Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений" [2000]. Согласно этим документам, экологически безопасное использование отходов ВКХ должно обеспечиваться контролем за содержанием в них нормируемых загрязнений, соблюдением определенных условий их обработки и применения в качестве

удобрений, и, обязательно с учетом требований безопасности. Станции биологической очистки сточных вод на объектах ВКХ должны очищать воду, по качеству делая ее пригодной для сброса в местные акватории [98] (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Основные нормативы ПДК очищенной сточной воды, поступающей в водоем рыбохозяйственного назначения

Санитарно-гигиенический норматив	Показатель									
	рН	БПК _п	ХПК	взвешенные вещества	азот аммонийный	азот нитритов	азот нитратный	фосфор фосфатов	СПАВ	нефтепродукты
ПДК, мг/л	6,0-9,0	3,0	30,0	6,42	0,39	0,04	9,02	0,15	0,5	0,05

Использованию подлежат осадки, прошедшие технологические стадии обработки на очистных сооружениях канализации в целях снижения массы, объема, влажности, улучшения физико-механических свойств, стабилизации органических веществ, снижения запаха, обеззараживания, придания благоприятного товарного вида. Кроме того, различные технологические схемы и методы обработки отходов, в том числе и их дообработки после механического обезвоживания, предусмотрены Сводом правил СП 32.13330.2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03–85» [2012]. Многие из них включены в Информационно-технический справочник по НДТ ИТС 10–2015 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов», утвержденный приказом Росстандарта от 15 декабря 2015 года № 1580 [2015], включая наиболее эффективные в плане обеспечения гумификации органических веществ, технологии, например, компостирование осадков с органическими наполнителями (торфом или с растительными остатками, опилками, корой или щепой, дождевыми

червями), которые поглощают избыточные тяжёлые металлы, не давая им попасть в растения.

Недообработанные отходы, обладающие вязкой консистенцией, запахом, не вполне благоприятные в санитарном отношении, не могут быть использованы, как не соответствующие требованиям установленной нормативной документации, так и с точки зрения невозможности применения существующей сельскохозяйственной техники для их внесения.

Выводы по главе 1

1. Развитие горнодобывающей отрасли в Мурманской области сопровождается образованием значительного количества отходов добычи и переработки полезных ископаемых, создающих экологическую нагрузку на компоненты окружающей среды. Загрязнение сопредельных территорий происходит вследствие миграции поллютантов с водными потоками и пыления незакрепленных поверхностей нарушенных земель.

2. В настоящее время существуют и разрабатываются множество способов пылеподавления на техногенных массивах хвостовых отвалов и карьерных выработок в Мурманской области, однако их применение часто ограничивается высокой стоимостью или низкой эффективностью. Перспективным методом снижения пылеуноса на выведенных из эксплуатации техногенно нарушенных землях может быть биологический (биорекультивация) с использованием малоэнергоёмких, упрощённых и природовосстановительных методов, адаптированных к экологическим и экономическим особенностям региона.

3. В этой связи большой интерес представляют широкодоступные и дешёвые, являющиеся, к тому же, дополнительным источником питательных веществ, продукты переработки региональных коммунальных сточных вод: осветлённые коммунальные стоки и осадки сточных вод.

4. Их применение позволит вовлечь в хозяйственный оборот большой объём, требующих утилизации, отходов и, тем самым, добиться существенного снижения их негативного воздействия на окружающую среду в регионе.

На основании вышесказанного сформулированы следующие задачи исследования:

- Провести оценку возможности использования мелиорантов на основе осветленных коммунальных стоков для экологической стабилизации пылящих поверхностей хранилищ горнопромышленных отходов в условиях Кольского Севера;
- Провести лабораторные исследования возможности использования мелиоранта на основе осветленных коммунальных стоков для стимулирования восстановительной сукцессии на хвостохранилище и формирования искусственного фитоценоза на разных субстратах;
- Провести исследования применения химической мелиорации нефелиновых песков с использованием отходов селитебного комплекса (осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод);
- Предложить технологию экологической стабилизации пылящих поверхностей хранилищ горнопромышленных отходов в условиях Кольского Севера;
- Дать практические рекомендации по использованию отходов селитебного комплекса (осветленные коммунальные стоки и осадок сточных вод) для экологически эффективной ревитализации, нарушенных горными работами, ландшафтов в условиях Кольского Севера.
- Дать экономическую оценку ревитализации, нарушенных горными работами, ландшафтов с применением предлагаемых мелиорантов на основе отходов селитебного комплекса (осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод).

ГЛАВА 2. Условия, объекты и методы исследования

2.1. Краткая характеристика района исследования

Работа выполнена в период с 2017 по 2023 гг. в Мурманской области (Россия) в лабораторных условиях и на локальных опытных площадках в открытом грунте, находящихся в непосредственной близости от городов Кировск и Апатиты.

Мурманская область является одним из 11 субъектов Российской Федерации, входящих в состав Северо-Западного федерального округа (СЗФО), находится на севере и северо-западе России. Площадь Мурманской области составляет 144902 км² (0.85 % площади России). Вся ее территория относится к Арктической зоне РФ (АЗРФ), большая часть - расположена за Северным полярным кругом.

В административно-территориальном отношении Мурманская область состоит из 17 территориальных единиц, в том числе 6 городов областного значения, включая г. Апатиты с численностью населения 49647 человек (по данным Росстата 2022 г.) и г. Кировск - 24857 человек.

Мурманская область – один из наиболее крупных и экономически развитых регионов Европейского Севера России. Вместе с тем это уникальный природный комплекс территорий с широчайшим разнообразием флоры и фауны, а также значительной ресурсной базой. В географическом отношении она охватывает Кольский полуостров и материковую часть, граница между которыми почти субмеридиональна. В ее состав входят Кольский, Рыбачий и Средний полуострова, а также прибрежные морские острова и острова Кандалакшского залива. На севере Мурманская область омывается Баренцевым морем (акватория более 140 тыс. км²), на востоке и юге – Белым (около 90 тыс. км²); на западе граничит с Норвегией и Финляндией, а на юге – с Республикой Карелия. Максимальная протяженность области с севера на юг составляет 400 км, с запада на восток – 580 км, площадь – около 144.9 тыс. км².

2.2 Агроклиматические условия региона

В целом климат Мурманской области определяется ее положением за Полярным кругом, рельефом и влиянием Баренцева и Белого морей. Он относится к Атлантико-Арктической зоне умеренного климата с преобладанием тёплых воздушных потоков с Северной Атлантики и холодных из Атлантического сектора Арктики, для которой характерно увеличение повторяемости циклонов в холодное время года и антициклонов в тёплое [114].

Для Заполярья присущи отрицательные среднегодовые температуры и избыточное увлажнение воздуха. Его климат резко меняется по сезонам года. Зима начинается при устойчивом падении средней суточной температуры воздуха ниже 0°C в конце октября и заканчивается в начале или конце мая. Устойчивый снежный покров образуется в ноябре, его мощность редко превышает 60-75 см, число дней со снежным покровом в центральных районах составляет 200-210. В результате, в годовом цикле более половины года приходится на зиму, продолжительность которой составляет от 6 до 6.5 месяцев. В течение всей зимы во время прихода теплых и влажных воздушных масс Атлантического океана наблюдаются оттепели, при которых температура воздуха может достигать $4-12^{\circ}\text{C}$ выше нуля. Морозы ниже -20°C бывают редко. Однако в центре Мурманской области температура может опускаться ниже -40°C . Средняя температура января составляет $-13...-14^{\circ}\text{C}$. Отличительными особенностями зимы являются частые туманы, метели, гололед, изморозь, обильные снегопады, большая облачность (7-8 баллов) и высокая относительная влажность воздуха (75-80%). Лето короткое, как правило, холодное и влажное, начинается в середине июня и заканчивается в конце августа. Средняя температура воздуха в июле составляет $+11...+15^{\circ}\text{C}$, возможно снижение температуры до отрицательных значений с выпадением снега. Летние заморозки – характерное явление в климате субарктических и арктических районов, к которому вынуждены адаптироваться как местные, так и интродуцированные растения (более поздние сроки высадки растений в открытом грунте отрицательно сказываются на их приживаемости, сроках бутонизации и цветении, подготовке к перезимовке). Заморозки могут повреждать всходы растений, семена которых высеваются в грунт. Осень короткая и дождливая, обычно начинается

в конце августа и заканчивается в конце октября. Этот сезон характеризуется морозящими дождями, сильными ветрами, частыми туманами, высокой относительной влажностью воздуха, заморозками и кратковременными снегопадами. Уже в сентябре может установиться снежный покров [113]. Годовая сумма осадков составляет 400-600 мм, в году в среднем насчитывается 230-260 дней с осадками.

Ветровой режим в регионе носит муссонный характер и сказывается на пылеобразовании. Он выражается в преобладании зимой ветров южного и юго-западного направлений, а летом - северного и северо-западного направлений [4].

Наиболее специфичен в условиях Мурманской области световой режим. Полуденная высота солнца здесь изменяется в течение года от $0-0.5^{\circ}$ в период зимнего и до $42.0-44^{\circ}$ в период летнего солнцестояния. В связи с этим максимально возможная продолжительность дня колеблется от 0 (в период полярной ночи) до 24 ч (в период полярного дня). Из-за значительной облачности среднегодовой приход солнечной радиации к поверхности почвы составляет немногим более половины ее возможного поступления для данной широты. Только в наиболее малооблачные месяцы (март, апрель) этот приход достигает $2/3$ от возможного поступления. В среднем за год продолжительность солнечного излучения на территории региона составляет 1200-1600 ч [31].

Несмотря на хорошее увлажнение и длительный световой период климатические условия региона неблагоприятны для растительности, так как сумма положительных температур воздуха выше 10°C за вегетационный период изменяется от 870°C на севере до 1127°C на юге, продолжительность вегетационного периода составляет 80-120 дней [14].

Наиболее распространенным типом почв в регионе являются подзолы [89]. Профиль подзола (рис. 2.1) состоит из подстильно торфяного горизонта О, сформированного из скопления слаборазложившихся растительных остатков на поверхности почвы, осветленного за счет обеднения оксидами железа подзолистого горизонта Е и альфегумусового горизонта ВНН, сформированного в результате иллювиальной аккумуляции алюмо-железо-гумусовых соединений.



Рисунок 2.1. Профиль подзола

Для подзолов характерна слабокислая реакция среды всего профиля, слабая насыщенность почвенно-поглощающего комплекса основаниями, основаниями, низкое содержание гумуса и фульватный характер гумуса в альфегумусовом горизонте. За счет биогенной аккумуляции подстилка характеризуется высоким содержанием подвижных форм важных питательных элементов, их содержание в минеральных горизонтах характеризуется как крайне низкое [89]. Преобладающим типом органогенных почв являются торфяные олиготрофные почвы верховых и переходных болот. Их профиль состоит в основном из остатков сфагновых мхов. Для олиготрофных торфяных почв характерны: неблагоприятное избыточное увлажнение, сильноокислая реакция среды и низкое содержание питательных элементов. Из-за сложного холмистого и среднегорного характера рельефа, Мурманская область насчитывает характерно очень небольшие площади почв, пригодных для сельскохозяйственного освоения. В настоящее время площадь окультуренных почв в области составляет около 66 тыс. га., или 0.45% от ее общей территории [26].

Таким образом, суровые климатические условия региона и низкое естественное плодородие местных почв не способствуют развитию здесь растениеводства в разных его проявлениях.

2.3. Объекты исследования

Объектами настоящих исследований явились: нефелиновые пески в виде усредненной пробы лежалых хвостов, отобранные на одном из 3-х крупнейших в Мурманской области хвостохранилище (отвалах отходов рудообогащения) АНОФ-2 КФ АО «Апатит» (рис. 2.2), локальная нарушенная территория - песчаный карьер АО «Апатитыводоканал» (рис. 2.3, 2.4) по добыче строительного материала (песка), отходы производства и потребления регионального ВКХ АО «Апатитыводоканал» (осветленные коммунальные стоки и осадки сточных вод), термовермикулит марки Випон-2, минеральные удобрения «Аммофос», нефильтрованная дождевая вода и многолетние травянистые и древесные растения.



Рисунок 2.2. Внешний вид хвостохранилища АНОФ-2 КФ АО «Апатит»



Рисунок 2.3. Внешний вид песчаного карьера АО «Апатитыводоконал»

Отвалы отходов рудообогатления АНОФ-2 КФАО "Апатит". Хвосты флотации апатит-нефелиновых руд обогатительной фабрики АНОФ-2 представляют собой мелкий несвязный песок серого цвета (рис. 5) крупностью частиц от 0.2 до 1.1 мм и значительным содержанием в них пылеватых фракций. Объёмная плотность сухих хвостов в хвостохранилище составляет 1.54 г/см [4].



Рисунок 2.4. Внешний вид техногенного грунта хвостоотвалов апатит-нефелиновых руд обогатительной фабрики АНОФ-2

С агротехнической точки зрения хвосты существенно отличаются от зональных песчаных почв [89]. Их химический состав (табл. 2.1) показывает наличие полезных компонентов, присущих первоначальным перерабатываемым рудам [69], согласно Приказа Минприроды РФ от 04.12.2014 N 536 [97] они считаются практически неопасными.

Таблица 2.1. Среднее валовое содержание основных химических компонентов
песчаного субстрата хвостоотвалов АНОФ-2

Субстрат	Компонент, содержание, %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	SrO
Песок отвалов	40.95	21.17	2.63	5.85	6.01	1.19	10.13	5.85	0.27	2.53	0.22

Песчаный карьер АО «Апатитоводоканал» расположен в непосредственной близости от городов Апатиты и Кировск, предприятия и хвостохранилища АНОФ-2 КФ АО «Апатит». Район, в котором находится данный объект, относится к подзоне северотаежных хвойных лесов, их флористическая насыщенность сосудистыми растениями составляет около 250 видов [100].

Глубина карьера варьирует от 3 до 5 м. В карьере видны следы деятельности ветровой и водной эрозии (сползание грунта, округлость вершин холмов). Модельный участок (рис. 2.5) представлял собой песчаный склон (уклон 30°) северо-западной экспозиции площадью 200 м², свободный от растительности, с предварительно проведенным на нем выполаживанием, террасированием и планировкой поверхности [18].



Рисунок 2.5. Модельный участок в песчаном карьере АО «Апатитыводоканал»

Отходы регионального водопроводно-канализационного хозяйства АО «Апатитыводоканал». Существующие городские очистные сооружения ВКХ АО «Апатитыводоканал» (рис. 2.6) построены по типовым проектам в 1970-х годах, предназначены для очистки всего объема поступающих сточных вод. Проектная производственная мощность канализационных очистных сооружений (КОС-З) данного предприятия составляет 47000 м³ сточных вод в сутки, фактическая производительность (согласно письму №2424/01 от 05.04.18 АО «Апатитыводоканал») - 26400 м³/сутки, ежегодно накапливается до 10-12 тысяч тонн канализационных отходов производства и потребления.



а



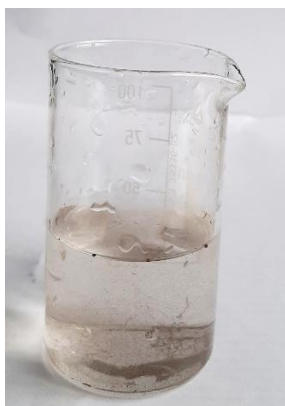
б

Рисунок 2.6. Водопроводно-канализационное хозяйство АО

«Апатитыводоканал»: а - осветление сточных вод на КОС-3 г. Апатиты, б - один из иловых накопителей ОСВ

За последние несколько лет на некоторых узлах очистных сооружений АО «Апатитыводоканал» проведена частичная замена технологического оборудования. Так, традиционный метод обеззараживания очищенных сточных вод хлором заменен на ультрафиолетовое облучение. В перспективе планируется проведение реконструкции аэротенков с целью изменения схемы очистки сточных вод и постепенная замена остального существующего технологического оборудования.

Отходами регионального водопроводно-канализационного хозяйства АО «Апатитыводоканал», представляющими интерес для использования в растениеводстве являются осветленные коммунальные стоки и осадок сточных вод (рис. 2.7).



а



б

Рисунок 2.7. Внешний вид отходов регионального предприятия водопроводно-канализационного хозяйства АО «Апатитыводоканал»: а – жидкие осветленные коммунальные стоки (ОКС), б – твердый осадок сточных вод (ОСВ)

Осветлённые коммунальные стоки представляют собой прозрачную жидкость с резким специфическим запахом, отобранную после первичных отстойников на промежуточной стадии водоочистки. Затем очищенные сточные воды поступают в контактный резервуар для обеззараживания и далее - по каналу на выпуск в реку Жемчужная, впадающую в озеро Имандра.

По содержанию загрязняющих веществ они считаются средне загрязненными (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Химический состав ОКС*

Параметр	Ед. измерения	Значение
рН	-	7.63
Взвешенные вещества	мг/л	67.6
Сухой остаток	мг/л	290
ХПК	мгО ₂ /л	223.7
БПК ₅	мгО ₂ /л	117.7
NH ₄ ⁺	мг/л	25.74
NO ₂ ⁻	мг/л	0.14
NO ₃ ⁻	мг/л	0.30
Cl ⁻	мг/л	31.31

P-PO ₄ ³⁻	мг/л	1.83
SO ₄ ²⁻	мг/л	32.26
K	мг/л	7.50
Na	мг/л	30.0
Ca	мг/л	14.5
Mg	мг/л	3.52
Fe	мг/л	1.29
Примечание: *по данным Испытательного центра качества вод АО «Апатитыводоканал», аттестат аккредитации № РОСС RU. 0001.514427		

Эффективность снижения показателей ОКС, поступающих на очистные сооружения и на сбросе в водоем составляет: БПКп (количество легкоокисляющихся органических загрязняющих веществ) – 98,46, ХПК – 94,4, взвешенные частицы – 97,0, азот общий – 98,8, азот нитратов – 24,0, фосфор – 40,8 %. Концентрация азота нитратов в сточной воде при прохождении механической и биологической очистки несколько увеличивается. Его концентрация в исходной воде составляет 0,19 мг/л, в очищенной – 42,04 мг/л.

Осадок сточных вод КОС представляют собой сложную смесь с высоким содержанием воды, в которой биологически безвредные вещества прочно связаны с загрязняющими токсичными компонентами органической и неорганической природы.

Основным способом его обработки на очистных сооружениях является подсушка и выдержка на иловых накопителях в течение трех и более лет. Для этого на территории очистных сооружений имеются две иловые площадки (гидротехнические сооружения с герметичным дном) площадью примерно 1.8 га каждая. В настоящее время они переполнены ОСВ (рис. 2.6 б), нуждающимися в мероприятии по их обезвоживанию. Решение этой проблемы ограничено отсутствием на предприятии производственных площадей для дополнительного строительства.

Согласно испытаниям, проведенным специализированным предприятием ООО «Бифар-Экология», осадок сточных вод АО «Апатитыводоканал» относится к отходам V класса опасности и полностью соответствует требованиям ГОСТ Р 54534-2011, предъявляемым к ОСВ при его использовании в качестве почвогрунтов для биологической или технической рекультивации [20]. Валовое содержание тяжелых металлов в данных ОСВ значительно ниже установленных нормативов: Ni < 30 мг/кг,

Cu < 30 мг/кг, Pb < 30 мг/кг, Zn 186 мг/кг при нормативе 800 мг Ni/кг, 1500 мг Cu/кг, 1000 мг, Pb/кг, 7000 мг, Zn/кг.

Территориально КОС-3 ВКХ АО «Апатитыводоканал» примыкают к хвостам АНОФ-2. Возможность их мелиорации отходами регионального ВКХ поднималась многократно. Бесспорно, что ее решение важно для обеих сторон, поможет обоим предприятиям и, самое главное, будет способствовать улучшению экологии в близлежащих городах Апатиты и Кировск.

Термовермикулит марки Випон-2. Мелкофракционированный ковдорский термовермикулит марки Випон-2 (рис. 2.8). Размер гранул термовермикулита 2-5 мм, пористость - 98%, влагоемкость - 5 мл/г, насыпная масса 350-399 кг/м³. Термовермикулит - природный почвозаменитель, приготовленный методом электрообжига, в результате которого, его гранулы приобретают форму пластинчатой "гармошки", а сам субстрат - ряд ценных для выращивания растений свойств: экологичность, высокую воздухо- и влагоемкость, прочность, буферность, адсорбционные свойства, долговечность [32].

Випон-2 не подвержен физико-химическому старению, засолению и может успешно применяться в качестве субстрата-почвозаменителя или мелиоранта при выращивании овощных, и декоративных культур, производстве зеленых витаминных кормов, формировании газонов различного назначения и биорекультивации техногенно-нарушенных территорий [37, 43].

Многолетние растения. Всего в качестве растений-рекультивантов в исследованиях были использованы 12 видов многолетних травянистых растений: овсяница красная (*Festuca rubra* L.), кострец безостый (*Bromus inermis* Leyss.), фестулолиум изумрудный (*Festulolium smaragdinum*), тимopheевка луговая (*Phleum pratense* L.), люпин многолистный (*Lupinus angustifolius* L.), астрагал субарктический (*Astragalus subpolaris* Boriss. & Schischk), копеечник многолистный (*Hedysarum alpinum* L.), клевер ползучий (*Trifolium repens* L.), пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Desv. ex Nevski, син. (*Elymus repens* (L.) Gould.), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), волоснец песчаный (*Leumus arenarius* (L.) Hochst.,

Elymus arenarius L.), овсяница шершаволистная (*Festuca trachyphylla* (Hack.) Krajina), и 1 вид древесных растений – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.).

Среди них первостепенное значение, особенно при проведении лабораторных опытов, было уделено тимopheевке луговой (*Phleum pratense*).



Рисунок 2.8. Вспученные гофрированные гранулы мелкофракционированного термовермикулита марки Випон-2 – "гармошки"

2.4. Методы исследований

Аналитическая работа выполнена в специализированных аккредитованных лабораториях ФГБУН КНЦ РАН с применением современного оборудования (атомно-абсорбционного спектрометра с пламенной атомизацией, AAnalyst 400 PerkinElmer, масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой, ELAN 9000 PerkinElmer) и др.) Показатели анализировались согласно действующих ГОСТ и ОСТ.

В лабораторных экспериментах для выращивания растений использовали пластиковые емкости следующего размера: высота 3.5 см, длина 13.0 – см, ширина – 9.5 см (рис. 2.9).



Рисунок 2.9. Пластиковые емкости, использованные в лабораторных опытах

Растения выращивали в помещении при естественном освещении. Интенсивность освещения в период проведения опытов варьировала от 10 до 20 клк, температура воздуха - 18-22°C, влажность воздуха - 60%.

Техногенный грунт (нефелиновые пески) массой 340 г помещали в пластиковые емкости слоем 3 см и увлажняли водой до полного насыщения.

В зависимости от условий эксперимента на поверхность субстрата высевали семена многолетнего травянистого злакового растения - тимофеевки луговой (*Phleum pratense*) или травосмеси с заделкой семян на глубину 0,5 см. В лабораторных условиях после увлажнения семян емкости с посевами укрывали пластиковой пленкой для сохранения влаги до начала появления первых зеленых всходов. После этого пленку снимали и больше не использовали. В полевых исследованиях покрытие песчаной поверхности плодородным слоем почвы не проводилось. Сложные посевные фитоценозы были созданы: на песчаном карьере с помощью подзимнего способа прямого посева травосмеси (состав травосмеси, норма высева семян представлены в главе 6).

Дополнительная подкормка растений минеральными удобрениями в ходе экспериментов не проводилась.

В экспериментах по изучению влияния разных мелиорантов (традиционных – аммофос и не фильтрованная дождевая вода, термовермикулит Випон-2) и нетрадиционных (ОСВ и ОКС) норма внесения составляла для ОКС - 0.5 л/0.5 м² (12 мл/емкость), и ОСВ – 1 л/ 0.5 м² (24 мл/емкость) 8-ю точечными фрагментами; для минеральных удобрений аммофос (азотно-фосфорное концентрированное растворимое удобрение, содержащее около 10—12 % N и 52 % P₂O₅) норма внесения составляла - 1.0 г/1 емкость.

Изучение возможности использования ОКС и ОСВ в качестве мелиорантов техногенно-трансформированных грунтов выполняли согласно требованиям СанПиН 2.1.7.573-96 «Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения для сельскохозяйственных полей орошения (ЗПО)» и ГОСТ Р 54534–2011, предъявляемым к осадкам при использовании в качестве почвогрунта для биологической рекультивации.

По окончании лабораторных и в процессе проведения полевых экспериментов наземная биомасса растений полностью срезалась, высушивалась до воздушно-сухого состояния и размалывалась. Далее навеска наземной части растительного материала (около 1 г) переводилась в азотнокислую вытяжку в открытой системе мокрого озоления (установка Gerhard (Germany) с применением концентрированной HNO₃).

Содержание калия в профильтрованной вытяжке определялось методом атомно-эмиссионной спектрометрии, фосфора – фотоколориметрическим методом Лоури-Лопеса по интенсивности синей окраски восстановленного фосфорно-молибденового комплекса (восстановитель-аскорбиновая кислота). Валовое содержание азота в растительном материале определялось методом Кьельдаля после озоления навески в концентрированной серной кислоте в присутствии катализатора (K₂SO₄ + CuSO₄). Этот же метод использовался для определения общего азота в исходном грунте и остаточного содержания N в навеске по окончании эксперимента.

Техногенный грунт после окончания эксперимента доводился до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре, после чего из него тщательным образом удалялись растительные остатки. Анализ на остаточное содержание доступных форм К и Р проводился после просеивания грунта через сито 2 мм. Далее по аналогии с почвенными анализами готовилась вытяжка грунта с применением аммонийно-ацетатного буфера (рН=4.65) при соотношении грунт:буферный раствор 1:10) [156]. Содержание элемента в аммонийно-ацетатной вытяжке с таким значением рН характеризует уровень его доступности для растений [197]. Содержание калия в профильтрованной вытяжке определялось методом атомно-эмиссионной спектрометрии, фосфора – фотоколориметрическим методом Ватанабэ по интенсивности синей окраски восстановленного фосфорно-молибденового комплекса (восстановитель - аскорбиновая кислота). Аналогичным образом проводился анализ исходной пробы ОСВ.

Пролонгированность действия удобрительных поливов на питательный режим нефелиновых песков оценивалась путем сопоставления результатов остаточного содержания доступных форм К и Р по окончании эксперимента с их подвижностью в лимоннокислой вытяжке исходного грунта (0.01 М раствор лимонной кислоты, соотношение 1:10). Выбор лимонной кислоты в качестве экстрагента обусловлен ее доминированием в составе фракции органических кислот почвенных растворов под посевными культурами [165]. К навеске 25 г грунта добавлялось 250 мл 0.01М раствора лимонной кислоты. В течение 6 часов проводилось непрерывное перемешивание смеси на магнитной мешалке ES-6120 (ЭКРОС) при температуре 20°C, после чего полученная суспензия фильтровалась через двойной фильтр «синяя лента». Химический анализ фильтрата на содержание калия и фосфора проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (Elan 9000).

Результаты анализов грунтов, растений и ОСВ выражались в мг/кг с пересчетом на абсолютно-сухую массу, для чего в отдельной навеске каждой пробы определялся коэффициент гигроскопической влажности.

В качестве информативных физиологических показателей эффективности воздействия мелиорантов на рост растения-рекультиванта - овсянницы красной - использовали содержание пигментов пластид и интенсивность фотосинтеза. Концентрацию пигментов пластид определяли на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония) в спиртовой вытяжке по оптической плотности в максимумах поглощения при длинах волн 665 и 649 нм для хлорофиллов *a* и *b*, при 470 нм для каротиноидов [173]. Интенсивность фотосинтеза определяли в открытой системе при оптимальном температурном режиме и освещенности с помощью инфракрасного газоанализатора LI-COR-850 (LI-COR, США). Пробы листьев овсянницы красной отбирали в 3-кратной биологической и 2-кратной лабораторной повторностях в каждом варианте опыта. Масса навески составляла в среднем 0.30 мг сырого веса. Навески средней пробы листьев растирали в суспензию с добавлением безводного Na_2SO_4 и NaHCO_3 . Содержание абсолютно сухого вещества в листьях определяли высушиванием при 105°C. Хлорофилльный индекс (ХИ), рассчитывали, как отношение суммарного количества хлорофиллов ($a+b$) в зеленых частях растений к площади почвы, занимаемой сообществом (г хлорофилла/м²).

Концентрацию пигментов пластид определяли на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония) в спиртовой вытяжке по оптической плотности в максимумах поглощения при длинах волн 665 и 649 нм для хлорофиллов *a* и *b*, при 470 нм для каротиноидов. Пробы листьев растений тимopheевки отбирали в 3-кратной биологической и 2-кратной лабораторной повторностях в каждом варианте опыта. Содержание абсолютно сухого вещества в листьях определяли высушиванием при 105°C.

Для экологической оценки существующей на объекте исследования растительности, изучения видового состава флоры на экспериментальных площадках и в окружающих их экосистемах, определения её численности и жизненного состояния, оценки перспектив развития растительности по мере формирования культурфитоценозов использовали общепринятые геоботанические методики осуществления полевых экспериментов [121]. Определение видов

растений проводилось с помощью специальной литературы [108], при необходимости использовался бинокулярный микроскоп МБС-10. Латинские названия растений приводятся в соответствии с современными представлениями о систематическом статусе вида [193].

Камеральные исследования включали в себя регулярные наблюдения за ростом и развитием растений, формированием травостоя. Влияние мелиорантов оценивалось по высоте растений в травостое, накоплению зеленой массы и проективному покрытию. Измерения [94] биометрических показателей проводили одновременно во всех повторностях, определение биомассы производилось в сыром и абсолютно-сухом состоянии в лабораторных условиях с использованием аналитических весов.

Обработка полученных результатов произведена с применением статистических методов, в том числе однофакторного дисперсионного анализа (one-way ANOVA) в программных продуктах Microsoft Excel. Достоверность различий между вариантами принималась при значениях $p < 0,05$ «на уровне тенденций», высокий уровень значимости различий - при $p < 0,001$. Вариантам считались недостоверными при значениях $p > 0,05$.

ГЛАВА 3. Оценка возможности использования мелиоранта на основе осветленных коммунальных стоков для экологической стабилизации пылящих поверхностей хранилищ горнопромышленных отходов на кольском севере

3.1. Использование мелиоранта на основе осветленных коммунальных стоков для стимулирования восстановительной сукцессии на апатитонефелиновом хвостохранилище

Общеизвестно, что интенсивность пыления поверхности хвостохранилища на прямую зависит от гранулометрического и вещественного состава хвостов обогащения. Установлено, что поверхностный слой апатитонефелиновых хвостов на 70-80 % их массы характеризуется преобладанием фракций с размером зерен $-0,5+0,25$ мм и $-0,25+0,1$ мм и могут быть отнесены к мелко- и среднезернистым пескам. Исходя из величин коэффициента пористости (0,76-1,31), исследованные пробы по плотности сложения были отнесены к рыхлым, несвязным грунтам. Таким образом, по инженерно-геологическим характеристикам хвосты апатитовой и нефелиновой флотации обогатительных фабрик склонны к пылению.

Они состоят в основном из нефелина и сопутствующих материалов, соотношение которых изменяется в зависимости от состава поступающей руды. Для химического состава нефелиновых песков (табл. 3.1) характерно меньшее количество, по сравнению с зональными почвами, кремнезема.

Поэтому относительное содержание некоторых других элементов в них заметно более высокое. В первую очередь это относится к алюминию, фосфору, калию и натрию. Содержание фосфора в нефелиновых песках на порядок выше, чем в зональных почвах, поскольку в них присутствует апатит, не полностью извлеченный из руды при ее обогащении. Количество калия в хвостах также значительно больше, чем в зональных почвах.

Таблица 3.1. Химический состав песчаного субстрата отвалов

Субстрат	Компонент, содержание, %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	Na ₂ O
Песок отвалов	41.47	22.52	2.22	5.54	4.34	0.80	10.13	6.46	0.06	0.69	11.40

Таким образом данные по валовому химическому составу хвостов свидетельствуют о благоприятных предпосылках для выращивания растений в целях закрепления их поверхности от развеивания. Однако, показатели наименьшей влагоемкости в нефелиновых песках значительно ниже, чем в почвах аналогичного гранулометрического состава. Это связано с полным отсутствием в отвальных песках органического вещества, которое во многом определяет водные свойства и водный режим почв и по этой причине процессы естественного зарастания и развития восстановительной сукцессии слабо выражены. Поэтому при проведении рекультивационных работ на этих объектах одним из определяющих факторов успешности является питательный режим их поверхностного слоя. Одной из мер стимулирования может являться поверхностное и внутригрунтовое орошение малопродуктивных техногрунтов мелиорантами на основе отходов селитебного комплекса - осветленные коммунальные стоки (ОКС) и осадки сточных вод (ОСВ). Они обладают потенциально полезными свойствами вследствие высокого содержания легкодоступного для микробиоты органического вещества, а также лабильности азота, фосфора и калия, обуславливающей их быструю ассимиляцию растениями. Данные по составу ОСВ и ОКС представлены в таблице 3.2 и 3.3 соответственно.

Данные по компонентному составу ОСВ свидетельствуют о соответствии ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 «Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений».

Таблица 3.2. Количественный химический анализ ОСВ в абсолютно сухом состоянии

Субстрат	Компонент, содержание, %							Компонент, содержание, мг/кг			
	органическое в-во	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Pb	Ni	Zn	Cu
ОСВ	62	21,7	6,14	5,83	2,99	0,45	0,279	<30 (15)	<30 (15)	186	<30 (15)

Таблица 3.3. Состав ОКС

Проба	Компонент, содержание, мг/л							
	взвешенные вещества	Аммоний ион	Нитрат ион	Хлорид ион	Фосфор	Железо	ХПК	БПК ₅
ОКС	67,6	25,74	0,140	31,31	1,83	1,29	223,7	117,7

Для оценки пригодности использования мелиоранта на основе осветленных коммунальных стоков для стимулирования восстановительной сукцессии на апатитонефелиновом хвостохранилище была проведена серия лабораторных экспериментов.

3.1.1. Лабораторный опыт №1. Биотестирование

В практике горнорудных предприятий РФ в условиях, когда одним из способов экологической реабилитации обширных территорий хвостохранилищ является отведение их части под самозарастание. При превышении площади проективного покрытия участков самозарастания более чем на 50% дополнительных мер стимулирования, как правило, не требуется. При меньших показателях одной из мер стимулирования может являться проведение

рекультивационных работ с поверхностным или внутригрунтовым орошением нарушенных территорий стоками региональных предприятий водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) [24].

Первоначально, в опыте с имитацией поверхностного орошения техногрунта хвостохранилища АНОФ-2.

Цель эксперимента - изучение осветленных коммунальных стоков АО «Апатитыводоканал» на соответствие показателям СанПиН 2.1.7.573-96 «Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения» [196] в части оценки их токсичности в проращивании семян сельскохозяйственных культур. В данном документе в качестве таких культур для посева в Арктической зоне на полях орошения рекомендуются клевер, костер безостый, лисохвост луговой, тимофеевка луговая, овсяница луговая и тростниковидные и др. виды.

В данном эксперименте использовали тимофеевку луговую (*Phleum pratense*). Это многолетнее растение из семейства злаковые (Poaceae) имеет широкое распространение в подзоне средней и северной тайги и часто используется для создания травянистых сообществ различных типов, в том числе в непосредственной близости от крупных промышленных предприятий [42, 62]. К тому же, данный злак является одним из основных высокопродуктивных компонентов в составе травосмесей, широко используемых для закрепления эродированных почв. Он относится к наиболее устойчивым травам, способным в условиях Крайнего Севера формировать высокий и густой травостой, образующим достаточное количество семян для его поддержания, хорошо отзывается на минеральные и органические удобрения [82].

Лабораторное исследование проводилось в период с 18.07. по 15.08.2018 г.

Схема опыта включала два варианта: 1 (опытный) вариант - с поверхностным орошением воздушно-сухого грунта отходов рудообогащения стоками, разбавленными в 50 раз; 2 (контрольный) вариант - с поверхностным орошением грунта водопроводной водой. Каждый вариант опыта проводился в пяти повторностях. В пластиковые емкости размерами 13х9, 5х3.5см насыпали

двухсантиметровый слой грунта, затем субстрат увлажняли согласно схеме эксперимента осветленными коммунальными стоками либо водопроводной водой до полного насыщения, на что потребовалось около 40 мл воды. До начала появления первых всходов высокая влажность грунта поддерживалась за счет покрытия емкостей полиэтиленовой пленкой. После появления первых всходов (с 23.07) полив осуществлялся ежедневно в дозе 25 мл на отдельную емкость (или в пересчете 20 м³/га), т.е. в целом орошение грунта за период проведения опыта составило порядка 500 м³/га.

Влияние осветленных коммунальных стоков на растения отмечено уже на начальном этапе развития растений – в фазу появления первых всходов.

Жизненный цикл (онтогенез) растений делится на ряд этапов, отличающихся особенностями роста и развития структурных частей организма и, что самое важное, их целевой предназначенностью [130]. Злаковые растения характеризуются продолжительным предгенеративным периодом жизни, включающим эмбриональный, ювенильный и виргинильный этапы онтогенеза. В свою очередь, ювенильный этап - рост зародыша (его прорастание) включает три последовательных фазы: физическую – семена поглощают воду и набухают, биохимическую (превращение нерастворимых запасных веществ в растворимые) и морфологическую - начало роста зародыша [1]; он является этапом доминирования ростовых процессов вегетативных органов - семя прорастает, образуется корневая система, растет стебель и листья.

Изучение роста и развития проростков, полученных из семян, является одним из наиболее перспективных путей выявления потенциальных и адаптивных возможностей видов и может служить основой направленного отбора более устойчивых особей, что очень важно для успешного формирования противоэрозийных фитоценозов [8].

Наиболее ранние и многочисленные всходы появились в варианте №1 (рис. 3.1), где использовались осветленные коммунальные стоки. В варианте №2 первые всходы были единичными (рис. 3.2).



повторность 1



повторность 2

Рисунок 3.1. Первые всходы – опытный вариант



повторность 1



повторность 2

Рисунок 3.2. Первые всходы – контрольный вариант

Далее на протяжении всего эксперимента рост растений в опытном варианте опережал контрольные (рис. 3.3). К концу опыта высота травостоя в первом варианте достигла 10 см, в то время как в контрольном варианте оставалась ниже на 1-3 см.

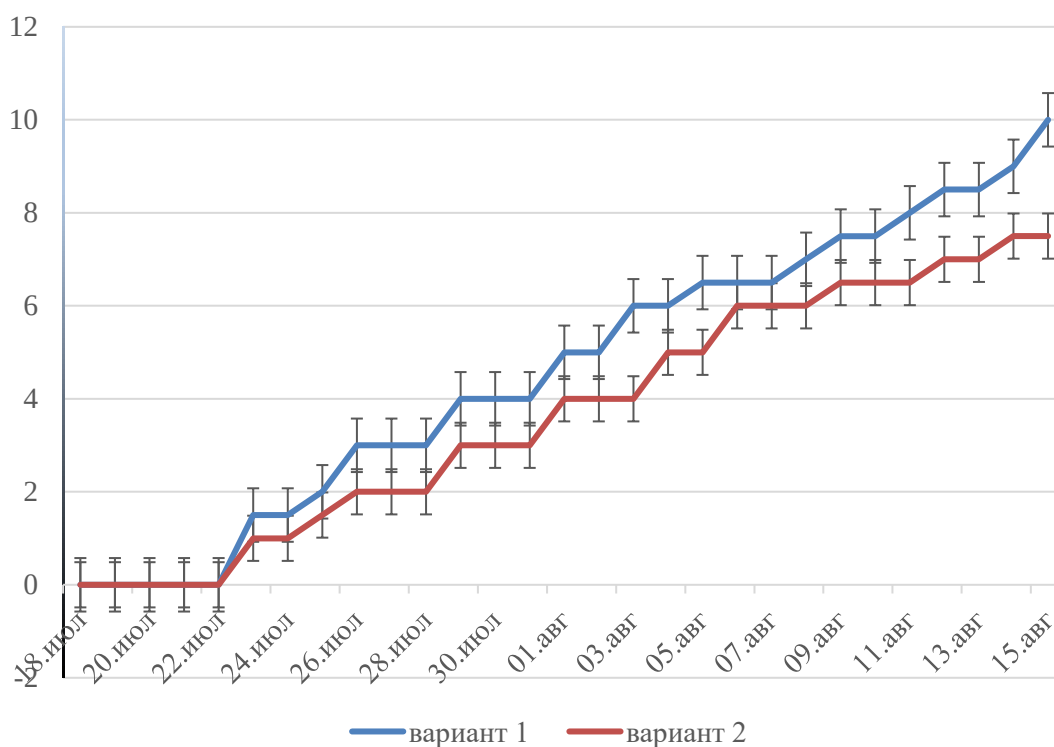


Рисунок 3.3. Динамика роста растений в лабораторном эксперименте

В опытном варианте без использования дефицитных в регионе почвы и торфа был сформирован растительный покров с 70 % проективным покрытием, что на 17-20% выше по сравнению с контролем (в абсолютных величинах 42 и 46 % соответственно).

В отношении надземной биомассы растений выявлены статистически значимые ($p < 0.2$) различия между опытным и контрольным вариантами. Продуктивность надземной массы растений в опытном варианте составила 1.54 ± 0.1 г (в пересчете на 1 га - 1.28 т/га), в контроле этот показатель был ниже – 0.91 ± 0.01 г (0.91 т/га). Для сравнения - урожай зеленой массы многолетних трав в Заполярье с применением минеральных удобрений может составлять 4.0 т/га [60].

Данные по биомассе растений, наряду с различиями в обозначенных выше параметрах, свидетельствует о стимулирующем эффекте осветленных коммунальных стоков на рост и развитие растений.

3.1.2. Лабораторный опыт №2. Химический состав мелиоранта

В данном эксперименте была дана оценка химическому составу осветленных коммунальных стоков (содержанию основных биогенных элементов азота, фосфора, калия) на их пригодность для стимулирования самозаращения хвостохранилища АНОФ-2 АО «Апатит». Как и в предыдущем опыте ОКС оценивались по показателям, утвержденными СанПиН 2.1.7.573-96 «Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения», установленным для сельскохозяйственных полей орошения (ЗПО) [196].

Содержание основных биогенных элементов в ОКС определялось по сумме аммонийного, нитратного и нитритного азота, фосфора фосфатов и валовому содержанию калия. Согласно нормативам СанПиН, удобрительная ценность ОКС низкая ($N < 100$ мг/л, $P < 30$ мг/л, $K < 70$ мг/л). Стоки с таким низким содержанием биогенных элементов не могут быть признаны пригодными для удобрительных поливов на ЗПО, но для принятия стимулирующих мер на хвостохранилищах приемлемы. Это подтверждается сопоставлением отчетных данных местного предприятия ВКХ с составом питательных растворов, рекомендуемых для гидропоники [32], а также обнадеживающими результатами предыдущего лабораторного опыта по биотестированию осветленных коммунальных стоков на тимофеевке луговой.

Вариабельность химического состава ОКС оценивалась по ежегодным отчетным данным АО «Апатитыводоканал» за июнь 2005-2017гг. Выбор периода для оценки обусловлен предположением, что орошение в начале вегетационного периода (июне) является наиболее рациональным для грунтов с промывным водным режимом, обусловленным высокой долей пылевато-песчаной фракции, характерной для гранулометрического состава нефелиновых песков АНОФ-2 [29].

рН ОКС варьирует в пределах 7.21-7.85 ($n=39$), что соответствует требованиям СанПиН для орошения и кислых, и щелочных почв ЗПО.

Содержание суммы легкорастворимых солей оценивалось по данным о прокаленном сухом остатке ОКС, пределы варьирования содержания остатка 85-

204 мг/л (n=39), что позволяет классифицировать стоки как слабоминерализованные. В соответствии с требованиями СанПиН 2.1.7.573-96, солесодержание в оросительной воде не должно превышать 3 г/л для песчаных почв.

Соотношение одно- и двухвалентных катионов определялось по отношению нормальной концентрации натрия к сумме кальция и магния, выраженной в мг-экв/л. Величина отношения для мелиоранта на основе осветленных коммунальных стоков варьирует в пределах 1.3, что существенно ниже утвержденного СанПиН показателя для песчаных некарбонатных почв, равного 4. Отсюда следует, что проблема осолонцевания грунта хвостохранилищ под действием мелиоранта на основе осветленных коммунальных стоков не актуальна.

Таким образом, согласно результатам вышепроведенных оценок, мелиорант на основе осветленных коммунальных стоков АО «Апатитыводоканал» по химическим показателям пригодны для стимулирования восстановительной сукцессии на апатитонефелиновом хвостохранилище.

3.2. Применение осадка сточных вод и термовермикулита для формирования искусственного фитоценоза на разных субстратах

Цель исследования – оценка осадка сточных вод и термовермикулита Випон-2 на их пригодность для использования в качестве мелиорантов для формирования фитоценозов на апатитонефелиновых отходах рудобогащения (хвостах).

Лабораторные исследования проведены в период с 18.07 по 18.08.2017 г.

ОСВ и термовермикулит Випон-2 в данном эксперименте выступали и в роли субстрата-почвозаменителя, так и качестве мелиоранта (рис. 4.1).

Схема опыта включала 5 вариантов, каждый выполнен в пяти повторностях (табл. 3.4, рис. 3.4).

Таблица 3.4. Схема лабораторного опыта

Вариант исследования	Субстрат
----------------------	----------

1 (O)	опытный (n=5)	хвосты+термовермикулит
2 (O)	опытный (n=5)	термовермикулит
3 (O)	опытный (n=5)	хвосты+ осадок сточных вод
4 (O)	опытный (n=5)	хвосты+термовермикулит+ осадок сточных вод
5 (K)	контрольный (n=5)	хвосты



1 (O) - хвосты+термовермикулит



2 (O) - термовермикулит



3 (O) – хвосты + осадок сточных вод



4 (O) – хвосты + термовермикулит + осадок сточных вод



% (К) - хвосты

Рисунок 3.4. Общий вид повторностей в вариантах с использованием разных субстратов

Для создания искусственного фитоценоза использовалась травосмесь, рекомендуемую для биорекультивации техногеннонарушенных территорий в районах Крайнего Севера, состоящую из костреца безостого (*Bromus inermis* Leyss.) – 33.4%, фестулолиума изумрудного (*Festulolium smaragdinum*) – 11.1%, овсяницы красной (*Festuca rubra* L.) – 44.4%, тимopheевки луговой (*Phleum pratense* L.) – 11.1%. Норма посева смеси в эксперименте составляла 92 г/м². Травостой, сформированный с помощью этой травосмеси, на протяжении многих лет способен противостоять негативному действию водной и ветровой эрозии в условиях техногенных ландшафтов в условиях Арктической зоны РФ [37, 43].

Появление первых всходов отмечено во всех пяти вариантах одновременно. Вероятно, сказалось покрытие посевов полиэтиленовой пленкой.

Влияние разных субстратов на формирование растительного покрова было зафиксировано в фазу появления массовых всходов. Так, на 5-й день после посева семян отмечено одновременное их появление только в опытных вариантах 1-4. В контроле (хвосты) массовые зеленые всходы обнаружены на 2 дня позже. Такая разница обусловлена следующим. Согласно концепции прорастания семян [45, 46], сухие семена способны быстро переходить в состояние активного

метаболизма, инициирующего рост осевых органов проростка, только при благоприятных режимах температуры, аэрации и влажности воздуха в среде их прорастания. Создать такие оптимальные для прорастания семян условия можно с помощью субстрата, в который они высеваются. В данном случае в качестве такого субстрата выступил термовермикулит Випон-2, обладающий высокими воздухо- и влагоемкостью [32]. Лучшему прорастанию семян также способствовал и влажный осадок сточных вод.

При этом наибольшей интенсивностью роста отличались растения в вариантах с использованием осадка сточных вод, меньшей – термовермикулита и хвостов (рис. 3.5).

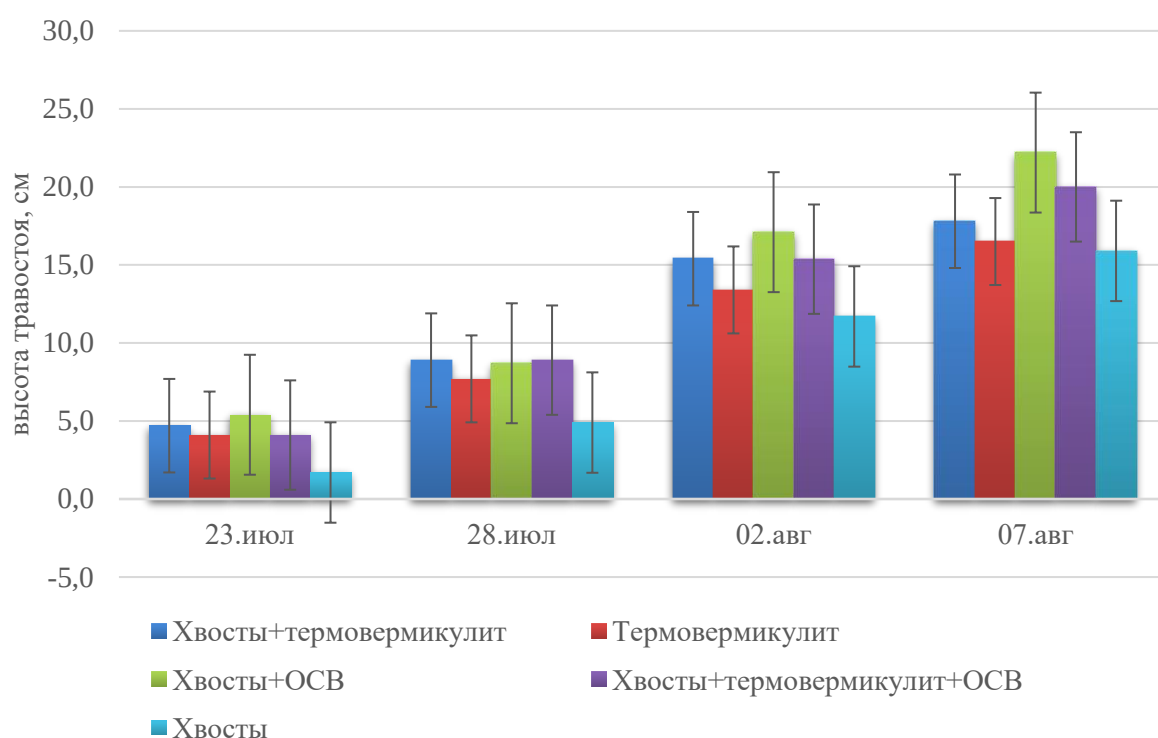


Рисунок 3.5. Динамика роста растений, выращенных на разных субстратах в лабораторном эксперименте с использованием осадка сточных вод (ОСВ)

В подразделе «Методика исследований» настоящей работы представлены данные о содержании в исследуемых субстратах доступных для растений питательных веществ. Этот показатель для осадка сточных вод выше по сравнению

с термовермикулитом. О высокой продуктивности осадка сточных вод, депонируемого АО «Апатитыводоканал» на иловых картах, также говорит и активное самозаращение этих карт (рис. 3.6., 3.7).



Рисунок 3.6. Самозаращение иловых карт АО «Апатитыводоканал» мать-и-мачехой обыкновенной (*Tussilago farfara*), бескильницей расставленной (*Puccinella distans*)



Рисунок 3.7. Самозаращение иловых карт АО «Апатитыводоканал» иванчаем узколистным (*Chamaenerion angustifolium*)

Использование в эксперименте осадка сточных вод способствовало лучшему питанию растений и более интенсивному росту растений. К его завершению высота растений в вариантах с применением осадка сточных вод превышала 20 см, в то время как в вариантах с термовермикулитом она была ниже на 2-3 см, а в контроле – всего 15.9 см (рис. 3.5).

Анализ других качественных показателей сформированного в эксперименте травостоя показал, что эффект применения осадка в данном случае оказался иным (табл. 3.5). Так, если в вариантах с применением вермикулитового субстрата, нанесенного на поверхность хвостов (опытные варианты 1 и 2) отмечено 100% проективное покрытие (табл. 3.5, рис. 3.8, 3.9), то на песчаном субстрате отходов рудообогащения (контроль) оно составило 85 ± 1.1 , в вариантах 3 и 4 с применением осадка сточных вод – 70 ± 2.3 и 78 ± 3.1 % соответственно.

Таблица 3.5. Влияние мелиоранта осадка сточных вод на проективное покрытие и биомассу фитоценоза, сформированного на разных субстратах

Вариант исследования, субстрат		Показатель	
		проективное покрытие, %	зеленая биомасса, г
1 (O) (n=5)	хвосты+термовермикулит	100	16.7±1.3
2 (O) (n=5)	термовермикулит	100	14.1±1.5
3 (O) (n=5)	хвосты + осадок сточных вод	70±2.3	11.5±2.0
4 (O) (n=5)	хвосты + термовермикулит + осадок сточных вод	78±3.1	11.2±1.7
5(K) (n=5)	хвосты	85±1.1	11.6±2.2



Рисунок 3.8. Проективное покрытие растительного покрова, сформированного на вермикулите



Рисунок 3.9. Проективное покрытие растительного покрова, сформированного на хвостах, с применением осадка сточных вод

На наш взгляд, причиной такой разницы в вариантах 3 и 4 в краткосрочном эксперименте явилась высокая плотность слоя осадка сточных вод, сквозь который часть проростков семян тимopheевки не смогла пробиться. Это не могло не отразиться и на накоплении растениями биомассы. В вариантах с применением осадка сточных вод этот показатель был сравнительно ниже, чем в других вариантах опыта. Учитывая то обстоятельство, что в полевых условиях нанесение осадка сточных вод на поверхность грунта сплошным слоем, так как это было сделано в лабораторном эксперименте, сложно, осадок, нанесенный фрагментарно на хвостохранилище, не будет препятствовать прорастанию семян и росту проростков, и, отдавая питательные элементы, обеспечит формирование высококачественного фитоценоза на данном объекте.

Таким образом, результаты, полученные при проведении краткосрочного рекогносцировочного лабораторного эксперимента, позволили выявить существенные различия между использованными в нем мелиорантами и, рассматриваемыми в качестве основы для формирования искусственных фитоценозов на хвостохранилищах, субстратами.

Показано, что использование широко доступного и более дешевого влагоемкого компонента в виде осадка сточных вод, являющихся, к тому же, дополнительным источником питательных веществ, в том числе - отсутствующих в техногенном субстрате хвостохранилищ, нитрат-ионов, будет способствовать удешевлению и повышению эффективности технологии их фитореабилитации за счет снижения расходов на приобретение и внесение минеральных удобрений.

При этом следует иметь в виду, что из-за высокой плотности осадка сточных вод часть проростков растений может погибать, поэтому предпочтительнее наносить осадка сточных вод на техногенный грунт вроссыпь и тонким слоем.

Использование термовермикулита также способствует интенсивному росту растений и получению более плотного/густого по сравнению с осадком сточных вод травостоя. Однако, в отличие от осадка сточных вод, его применение в качестве биорекультивационного слоя для создания искусственного фитоценоза на больших площадях апатитонепелиновых хвостохранилищ из-за дороговизны не целесообразно.

3.3. Применение мелиорантов на основе осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод для рекультивации отвалов отходов рудообогатления (хвостов) (лабораторный опыт №4)

Целью данного исследования являлось изучение влияния мелиорантов на основе осветленных коммунальных стоков, осадка сточных вод и нефильтрированной дождевой воды на формирование растительного покрова из тимофеевки луговой *Phleum pratense* на отходах рудообогатления (хвостах) при разных нормах и способах их внесения в условиях лабораторного эксперимента.

Эксперимент проводился в период с 03.09 по 13.10.2018 г.

Схема опыта включала 4 варианта, каждый из которых был выполнен в пяти повторностях (табл. 3.6).

Таблица 3.6. Схема лабораторного опыта

Вариант	Мелиорант, способ внесения и полива
1 (О) (n=5)	осветленные коммунальные стоки концентрированные, полив 1 раз при закладке эксперимента, далее полив дождевой водой
2 (О) (n=5)	осветленные коммунальные стоки концентрированные, внесение при закладке эксперимента, полив только концентрированными осветленными коммунальными стоками в течение всего эксперимента
3 (О) (n=5)	осадки сточных вод – размещение 8 фрагментов по поверхности, полив только дождевой водой
4 (К) (n=5)	без осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод, полив дождевой водой

Для создания фитоценоза использовали тимофеевку луговую (*Phleum pratense* L.), семена которой высевали в апатитонефелиновые отходы рудообогащения (хвосты).

Полив растений осуществляли согласно схемы опыта, нормы полива представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7. Схема полива грунта осветленными коммунальными стоками

№	Дата и норма полива, мл												
	03.09	06.09	09.09	12.09	15.09	18.09	21.09	24.09	29.09	01.10	04.10	07.10	10.09
1 (О) (n=5)	40	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
2 (О) (n=5)	40	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
3 (О) (n=5)	40	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
4 (К) (n=5)	40	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35

Появление первых всходов в эксперименте было отмечено во всех вариантах одновременно - на 4-й день после посева семян. лучшие результаты получены при орошении грунта осветленными коммунальными стоками (варианты 1 и 2), что позволяет предполагать о стимулирующем действии указанного мелиоранта на прорастание семян тимopheевки луговой *Phleum pratense*.

Дальнейшие наблюдения за ростом растений в опыте выявили слабую вариабельность высоты растений в начале опыта (рис. 3.10). Затем было отмечено опережение роста растений в вариантах с применением добавок по сравнению с контрольным вариантом. На 10-й день исследований травостой в вариантах с применением осветленных коммунальных стоков оказался выше на 0.1 см по сравнению с фрагментарным применением ОСВ и на 0.2 см – по сравнению с контролем. К концу эксперимента средняя высота растений в вариантах с осветленными коммунальными стоками составила 10.5 см, тогда как в контроле она была на 1.0-1.5 см ниже.

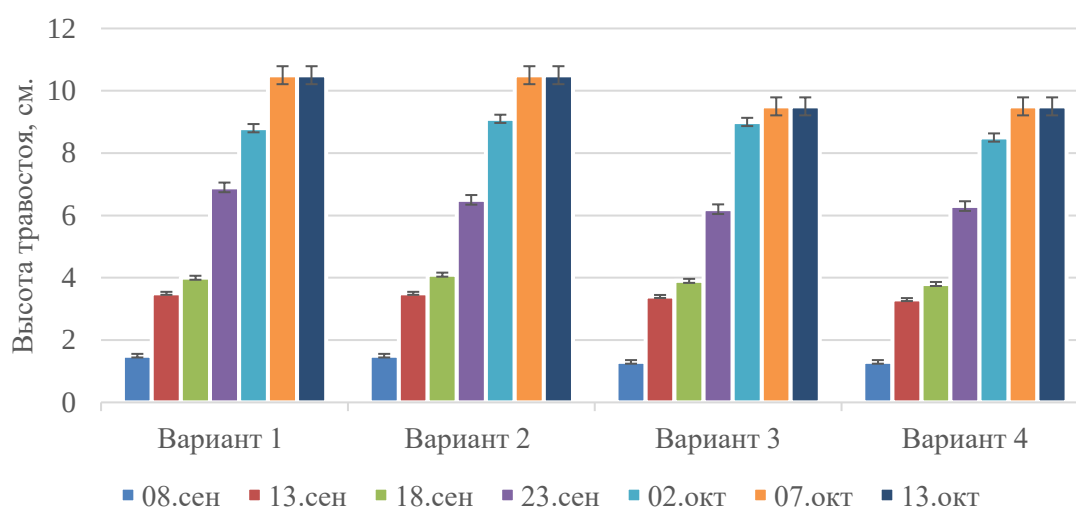


Рисунок 3.10. Динамика роста растений тимopheевки луговой в эксперименте

Максимально достигнутое проективное покрытие по всем вариантам не превысило 74%, что можно объяснить краткосрочностью эксперимента. Орошение грунта стоками имело такой же эффект на проективное покрытие, как и полив дождевой водой, на что указывает недостоверность различий между 1 и 4, 2 и 4, а

также между 1 и 2 вариантами (табл. 3.8). Отмеченную тенденцию можно признать благоприятной, поскольку осветленные коммунальные стоки, несмотря на присутствие в нем органического вещества с выраженными комплексообразующими свойствами, не способствовало повышению токсичности (V класса опасности).

Таблица 3.8. Средние значения качественных показателей посевного фитоценоза в лабораторном эксперименте

Вариант исследования	Проективное покрытие, %	Биомасса, г
	13.10	13.10
1(O) (n=5)	70±3.41	2.0±0.63
2(O) (n=5)	68±3.25	2.1±0.43
3(O) (n=5)	55±3.54	1.5±0.39
4(K) (n=5)	65±3.97	1.2±0.35

Наблюдения выявили снижение проективного покрытия по сравнению с контролем ($p < 0.01$) (табл. 3.9) при фрагментарном размещении осадков сточных вод на техногенном грунте. Это можно объяснить формированием корки на точках размещения осадков сточных вод, которая оказала некоторое ингибирующее действие осадка на молодые проростки. В то же время орошение грунта стоками даже при однократном поливе оказало более выраженное стимулирующее действие на расширение площади растительного покрова, чем внесение осадка сточных вод ($p < 0.005$ при сопоставлении вариантов 1 и 3, 2 и 3).

По сравнению с контрольным вариантом прирост надземной биомассы наблюдался во всех вариантах с применением добавок, но на уровне тенденции ($p < 0.05$) (табл. 3.10). При орошении грунта осветленными стоками отмечено двукратное превышение сырой биомассы по сравнению с контролем. Внесение осадков сточных вод также стимулировало статистически значимый рост биомассы, но менее выраженный.

Таблица 3.9. Значимость различий в проективном покрытии

Вариант	1	2	3	4
1	х	н.д.	***	-
2	-	х	***	н.д.
3	-	-	х	-
4	н.д.	-	**	Х
Примечание: здесь и далее *- $p < 0.05$; ** - $p < 0.01$; *** - $p < 0.005$; н.д. - недостоверные различия; прочерк-исключение повторения результатов				

Таблица 3.10. Значимость различий в биомассе растений

Вариант	1	2	3	4
1	х	н.д.	н.д.	-
2	-	х	*	*
3	-	-	х	-
4	*	-	*	Х
Примечание: здесь и далее *- $p < 0.05$; ** - $p < 0.01$; *** - $p < 0.005$; н.д. - недостоверные различия; прочерк-исключение повторения результатов				

Таким образом, изучение влияния осветленных коммунальных стоков и осадка сточных вод на создание растительного покрова из тимофеевки луговой *Phleum pratense* на нефелиновых песках, позволило заключить, что данные мелиоранты пригодны для биорекультивации земель, нарушенных при добыче апатитонепелинового концентрата в условиях Заполярья без проведения затратных работ по землеванию и нанесению защитных полимерных реагентов. Их использование по сравнению с контрольным вариантом (поливом дождевой водой) оказало положительное влияние на формирование ценозов, но зависело от способа их применения. При многократном орошении субстрата осветленными коммунальными стоками, в отличие от фрагментарного использования осадков

сточных вод, был получен наиболее качественный противоэрозионный растительный покров (с двукратным превышением сырой биомассы и статистически значимым ростом растений). Однократный полив осветленными коммунальными стоками оказал стимулирующее действие на рост растений и более выраженное влияние на расширение площади покрытия растительного покрова, по сравнению с фрагментарным нанесением на техногенный грунт осадка сточных вод и контролем.

3.4. Применение осадков сточных вод для формирования противоэрозионного фитоценоза на техногенном грунте песчаного карьера (многолетний полевой эксперимент №1)

Обнадеживающие результаты, полученные в краткосрочном рекогносцировочном лабораторном опыте №3 с использованием осадка сточных вод, нашли подтверждение и в многолетнем полевом эксперименте, который проводился на песчаном карьере АО «Апатитыводоканал».

Цель исследования – оценка возможности применения **осадка сточных вод** местного предприятия водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) АО «Апатитыводоканал» для ускоренного формирования высококачественного противоэрозионного растительного покрова на песчаных карьерах в условиях Кольского Севера.

Сроки проведения эксперимента - с 07.10.2017 г. по 31.09.2020 г.

По результатам исследований модельный участок представлял собой вторичный экотоп, содержащий в поверхностном слое грунта незначительное количество зачатков растений. Анализ состава растительных сообществ, произрастающих в карьере, выявил наличие в нем небольших микрогруппировок из одно-, дву- и многолетних пионерных видов растений с небольшой степенью покрытия его поверхности данной растительностью. Растительный покров вокруг карьера представлен естественными лесными сообществами, главным образом березняками, лишайниково-разнотравными и лишайниково-травянисто-моховыми

ельниками, на открытых участках – луговыми растениями. В общей сложности непосредственно на территории карьера и в ближайших окрестностях было зафиксировано 56 видов, характерных для сухих и бедных почв. При благоприятных условиях произрастания они могли бы участвовать в естественном зарастании карьерного пескогрунта, повышении биоразнообразия рекультивируемой территории. Это способствовало бы формированию значительно более устойчивого искусственного фитоценоза [177].

В карьере были выявлены следы деятельности ветровой и водной эрозии (сползание грунта, округлость вершин холмов).

Материалом исследований являлся песчаный карьерный грунт. Согласно Государственному стандарту 25100–2011 [1984] [18] по крупности зерна он относится к среднеразмерной разновидности с содержанием незначительной доли глинистых частиц.

В качестве мелиоранта для повышения биогенности данного грунта использовался осадок сточных вод канализационных очистных сооружений (КОС-3) г. Апатиты (Мурманская область), выдержанный на иловых площадках в течение трех лет. Контрольный образец ОСВ относится к отходам V класса опасности и полностью соответствовал требованиям ГОСТ Р 54534–201 [20], предъявляемым к осадкам сточных вод при использовании в качестве почвогрунта для биологической рекультивации.

Схема полевого опыта включала 3 варианта, каждый выполнялся в 6 повторностях. С этой целью на модельном участке было заложено 18 экспериментальных делянок, каждая размером 1×1 м, расположенных через 0,5 м друг от друга (рис. 3.11). Нанесение ОСВ на поверхность грунта в опытных вариантах производилось двумя способами: фрагментарно (рис. 3.12) и сплошным слоем, в контроле осадок сточных вод не вносили.



Рисунок 3.11. По периметру участка были сформированы 18 делянок, каждая площадью 1м²



Рисунок 3.12. Фрагментарное нанесение слоя из ОСВ на опытных делянках

Особенности схемы полевого опыта представлены в таблице 3.11.

Покрытие песчаной поверхности плодородным слоем почвы и дополнительная подкормка растений минеральными удобрениями в ходе эксперимента не проводились.

Таблица 3.11. Схема полевого опыта

Вариант	Способ нанесения осадков сточных вод
1 (О) ($n = 6$)	Фрагментарно слоем высотой с посевом семян по поверхности грунта (под слой осадков сточных вод)
2 – (О) ($n = 6$)	Сплошным слоем высотой с посевом семян поверх слоя ОСВ
3 – (К) ($n = 6$)	Без использования осадков сточных вод с посевом семян по поверхности грунта

Сложный посевной фитоценоз формировался с помощью подзимнего способа прямого посева травосмеси, разработанной нами на основании биологических характеристик видов многолетних травянистых растений. Она включала 3 вида злаков – овсяницу красную (*Festuca rubra* L.), волоснец песчаный (*Leymus arenarius* Hochst.), пырей ползучий (*Elymus repens* (L.) Gould) – и 2 вида бобовых растений – люпин многолистный (*Lupinus polyphyllus* Lindl.), копеечник альпийский (*Hedysarum alpinum* L.), взятые в соотношении 5:1:1:0.1:0.1 (по объему). Норма высева семян составляла 27,5 г/м² [104]. В опытном варианте №1 семена высевались непосредственно на поверхность грунта (под слой ОСВ) (рис. 3.13), в варианте №2 – поверх сплошного слоя ОСВ. Отдельно от травосмеси в нижний правый угол каждой делянки высевали по 6 штук семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).



Рисунок 3.13. Прямой посев травосмеси осуществленный непосредственно на поверхность техногрунта

2018 г. Появление первых всходов посеянных растений в эксперименте было зафиксировано во всех трех вариантах одновременно сразу после схода снежного покрова в мае 2018 г. Однако самые дружные и качественные всходы отмечены в вариантах с использованием ОСВ (табл. 3.12), что позволило предполагать стимулирующее действие указанного мелиоранта на процесс прорастания семян.

В течение последующих 1,5 месяцев на экспериментальных площадках сформировались примитивные (одноярусные) растительные сообщества (табл. 4.10), на июль 2018 г. состоящие только из двух посеянных видов – овсяницы красной и пырея ползучего. Качество травостоя на опытных делянках сильно отличалось от контрольных. В обоих опытных вариантах это был густой, хорошо развитый травостой яркого изумрудно-зеленого цвета с высоким проективным покрытием. На делянках со сплошным нанесением осадка сточных вод и верховым посевом травосмеси (вариант 2) оно составило 100 %, с фрагментарным (вариант 1) – 87 %, во втором случае прорастание семян наблюдалось главным образом на свободных от слоя ОСВ участках опытных делянок, и в меньшей степени – на участках, покрытых слоем мелиоранта. В контроле (без внесения осадка сточных

вод) сформированный травостой был разреженным желто-красного цвета, покрывающим всего 15% площади делянки. Растения в нем находились в угнетенном состоянии и к завершению вегетационного сезона практически не прибавили в высоту.

В первый вегетационный период увеличение (до пяти видов) состава сформированных фитоценозов отмечалось только на опытных делянках (табл. 3.12) за счет вселения с близлежащих территорий трех новых видов. Это аборигенные пионерные и сорные растения – мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.), иван-чай узколистый (*Epilobium angustifolium* L.) и щавель малый (*Rumex acetosella* L.).

В 2019 г. на контрольных площадках травостой по-прежнему оставался низким, разреженным (проективное покрытие составляло всего 20 %), а образовавшееся сообщество осталось одноярусным (табл. 3.12, рис. 3.14). Опытные делянки отличались плотным травостоем сложного двухярусного строения высотой, в 4–5 раз превышающей высоту растения в контроле.

Таблица 3.12. Средние показатели искусственного фитоценоза в 2018-2019 гг. в песчаном карьере АО «Апатитыводоканал»

Показатель	Вариант и способ нанесения осадков сточных вод					
	2018 г.			2019 г.		
	1 (О)*	2 (О)**	3 (К)	1 (О)*	2 (О)**	3 (К)
Количество ярусов, шт.	1	1	1	2	2	1
Средняя высота растений (по виду-доминанту), см	27,4 ± 1,5	35,3±1,2	8,1 ±0,3	56,9±1,7	69,7±1,9	12,8±0,5
Среднее количество видов из числа высеянных, шт.	2	2	2	4,5	5,6	4,0
Среднее количество вселившихся видов, шт.	3	3	–	3,8	3,8	2,3
Проективное покрытие, %	87	100	15	100	100	20
Примечание: * – фрагментарное нанесение ОСВ, ** – нанесение ОСВ сплошным слоем, К -контроль						



1 (О)



2 (О)



3 (К)

Рисунок 3.14. Внешний вид опытных делянок в 2019 г.

Растения на контрольных площадках только вегетировали, а на опытных — находились в фазе цветения. Все шесть посеянных видов, включая семена сосны обыкновенной, были зафиксированы только на опытных делянках. В этот период видовой состав созданного растительного сообщества пополнили четыре вида из основной посевной травосмеси — волоснец песчаный (*Leymus arenarius* Hochst.), люпин многолистный (*Lupinus polyphyllus* Lindl.), копеечник альпийский (*Hedysarum alpinum* L.) и сосна обыкновенная, продолжилось заселение опытных делянок, а также их периметра шестью новыми видами аборигенных растений — астрагалом субарктическим (*Astragalus norvegicus* Grauer), щучкой дернистой (*Deschampsia caespitosa* (L.), P. Beauv.), жерушником болотным (*Rorippa palustris* Besser), кульбабой осенней (*Scorzoneroidea autumnalis* (L.) Moench), полевицей тонкой (*Agrostis capillaris* L.), кисличником двупестичным (*Oxyria digyna* Hill.). На контрольных площадках чаще всего в травостое не удавалось обнаружить волоснец песчаный и сосну обыкновенную, что может быть обусловлено качеством собранных в природных условиях семян и их незначительной объемной долей при посадке. Несмотря на то, что люпин многолистный приурочен к местообитаниям с песчаными почвами и вполне может развиваться на бедных питательными

веществами субстратах [108], данный вид зафиксирован только на опытных делянках, где присутствовал осадок сточных вод.

2020 г. За три вегетационных периода благодаря применению осадка сточных вод на лишенном растительного и почвенного покрова модельном откосе карьера, без землевания и использования удобрений были сформированы сообщества растений, обладающих интенсивным ростом и развитием, в которых по-прежнему доминировали два, определяющие их высоту, вида: овсяница красная и пырей ползучий (рис. 3.15).



1 (О)



2 (О)



контрольный вариант

Рисунок 3.15. Внешний вид опытных делянок в 2020 г.

У растений опытных вариантов она достигла $95,2 \pm 1,4$ см (вариант 2) и $86,7 \pm 3,3$ (вариант 1), в контроле данный показатель был в 6 раз меньше (табл. 3.13). В отличие от контроля, растения опытного варианта по-прежнему сохраняли красивый интенсивно зеленый цвет и блестящую поверхность листьев и стеблей. Плотность травостоя в опытных вариантах превосходила контроль в 1,7–4,4 раза. 100%-ное проективное покрытие делянок было отмечено только в опытных

вариантах. На контрольных делянках этот показатель составил всего 10 %, это ниже, чем в первый и второй вегетационные периоды на 5–10 %. Корни растений в опытных вариантах хорошо освоили песчаный субстрат и сформировали плотную травяную дернину мощностью $3,6 \pm 0,03$ см (вариант 1) и $9,6 \pm 0,02$ см (вариант 2). В контроле этот показатель был меньше в 1,4 и 3,7 раза соответственно.

Высокое проективное покрытие и плотность травостоя в вариантах с применением осадка сточных вод обусловили и существенное для северо-запада РФ накопление биомассы [11]. В опытном варианте 1 она составила $2952,0 \pm 52,5$ г/м², в варианте 2 – $5632,0 \pm 28,9$ г/м² (в пересчете 29 и 56,3 т/га), что в 29 и в 56 раз превысило данный показатель в контроле (всего $100,7 \pm 3,2$ г/м²) (1 т/га) (табл. 3.13).

Исследование изменения основных качественных показателей, созданного за три вегетационных периода растительного покрова под влиянием ОСВ (табл. 3.13) показало, что средние выборки для трех основных показателей качества искусственного фитоценоза статистически значимо отличаются ($p < 0,05$). Вычисленное для них F больше уровня значимости (F критическое), поэтому выдвинутая нами нулевая гипотеза, а именно – *высота, накопление зеленой биомассы растений и плотность травостоя не зависят от применения ОСВ* – была отклонена и принята альтернативная, согласно которой наше предположение о зависимости основных качественных показателей от применения ОСВ статистически обоснованно. Таким образом, с вероятностью 95% было доказано, что использование осадка сточных вод оказало положительное влияние на качественные показатели созданного за три вегетационных периода растительного покрова на песчаном карьере.

Сформированный на опытных делянках плотный травостой имел сложное (дву- и трехъярусное) строение, в контроле он по-прежнему оставался примитивным, разреженным, одноярусным (табл. 3.14).

Таблица 3.13. Результаты дисперсионного анализа влияния способа нанесения осадка сточных вод на основные качественные показатели искусственного фитоценоза (2020 г.)

Вариант, источники вариации	Показатель		
	Высота растений (по виду доминанту), см	Плотность травостоя, количество стеблей/1 м ²	Зелёная биомасса, г/м ²
1	86,7±3,3	12830±123,14	2952±52,5
2	95,2±1,4	32589,7±546,7	5632±28,9
3	13,7±0,9	7431,7±20,9	100±3,2
SS	120538	2105022787	76295880,9
df	2	2	2
MS	60269	1052511394	38147940,5
F	13452,6	10040	39119,4
p-значение	p<0,001	p<0,001	p<0,001
F критическое*	7,4	3,7	3,9
Примечание: *F критическое – табличное значение критерия принятого уровня – достоверность различий между вариантами принималась при значениях $p < 0,05$ ($n=6$). Варианты считались недостоверными при значениях $p > 0,05$.			

В 2020 г. видовой состав созданных растительных сообществ пополнился еще двумя новыми видами аборигенных растений – ивой филиколистной (*Salix phylicifolia* L.), мятликом луговым (*Poa pratensis* L.), наблюдалось быстрое зарастание оголенных межделяночных участков и периметра площадок пионерными растениями, способствуя тем самым ускорению восстановительной сукцессии в карьере. Общее число видов (с учетом входящих в основной посевной состав) на модельном участке, адаптировавшихся к специфическим для них условиям, в 2020 г. увеличилось до 21, у семи из них наблюдался полный цикл развития. Отмеченное при этом возникновение элементов естественных фитоценозов, свойственных зональному типу растительного покрова, позволил характеризовать искусственно созданное растительное сообщество как

экологически устойчивое, имеющее перспективы к самостоятельному существованию и дальнейшему развитию [122].

Таблица 3.14. Влияние способа нанесения осадков сточных вод на качественные показатели искусственного фитоценоза (2020 г.)

Показатель	Вариант		
	1*	2**	3 (контроль)
Количество ярусов, шт.	2	3	1
Среднее количество видов из числа высеянных, шт.	6,0	6,0	4,5
Среднее количество вселившихся видов, шт.	11,7	12,0	3,0
Проективное покрытие, %	100	100	10
Мощность дернины (по керну, $n = 3$), см	$3,6 \pm 0,03$	$9,6 \pm 0,02$	$2,6 \pm 0,2$
Примечание: * – фрагментарное нанесение ОСВ, ** – нанесение ОСВ сплошным слоем.			

Таким образом, в многолетних полевых исследованиях сделана попытка разработки практических основ инновационного метода биорекультивации пескогрунтов без торфо- и землевания, дополнительного использования минеральных и органических удобрений.

Способ основан на натурных наблюдениях экспериментального орошения техногенного грунта песчаного карьера продуктом переработки региональных коммунальных сточных вод – осадков сточных вод с подтверждением стимулирующего эффекта их использования на прорастание семян, дальнейший рост и развитие растений, улучшение качества искусственно создаваемых посевных фитоценозов, что может способствовать частичному решению таких важных экологических проблем, как рациональное применение ОСВ региональных ВКХ для восстановления объектов накопленного экологического ущерба и улучшения окружающей среды на Крайнем Севере.

Показано, что осадок сточных вод может применяться двумя способами – сплошным и фрагментарным нанесением на техногрунт, а подзимний посев семян – непосредственно по поверхности грунта (под слой ОСВ), либо поверх осадка.

Способ нанесения мелиоранта существенно влияет на качество формируемого посевного фитоценоза. Фрагментарное нанесение осадка сточных вод на поверхность грунта способствует увеличению высоты растений в создаваемом фитоценозе в 6,3, плотности травостоя – в 1,7, биомассы – в 29,3, проективного покрытия – в 10 раз и мощности дернины в 1,4 раза по сравнению с контролем (вариант без внесения осадка сточных вод). При нанесении осадка сплошным слоем данные показатели в сравнении с контролем еще больше возрастают: высота растений – в 6,9, плотность травостоя – в 4,4, биомасса – в 55,9, мощность дернины – в 3,7 раза.

Независимо от способа нанесения применение осадка сточных вод способствует ускорению восстановительной сукцессии и увеличению биоразнообразия на песчаном карьере, а мощный травостой – заселению пионерных видов, быстрому зарастанию внутренних оголенных участков, возникновению элементов естественных фитоценозов, свойственных зональному типу растительности, закреплению, а также стабилизации процессов эрозии.

Выводы по главе 3:

1. Показана принципиальная возможность использования мелиорантов на основе осветленных коммунальных стоков и осадка сточных вод для экологической стабилизации пылящих горнопромышленных отходов на Кольском Севере путем формирования искусственного фитоценоза на хвостохранилищах апатитонефелинового производства без землевания и нанесения защитных реагентов.

2. Мелиоранты на основе осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод пригодны для биорекультивации земель, нарушенных при добыче апатитонефелинового концентрата и песчаных карьеров в условиях Кольского севера без проведения землевания и нанесения защитных полимерных реагентов.

3. В условиях лабораторного эксперимента с имитацией поверхностного орошения грунта подтвержден стимулирующий эффект применения мелиорантов (нефильтрованных дождевой воды, осветленных коммунальных стоков и их комбинации) на питательный режим рекультивируемых нефелиновых песков.

4. Оценка мелиоранта на основе осветленных коммунальных стоков АО «Апатитыводоканал» на соответствие показателям СанПиН 2.1.7.573-96 «Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения кислых и щелочных почв ЗПО» (рН, содержание суммы легкорастворимых солей в прокаленном сухом остатке стоков и величина отношения одно- и двухвалентных катионов для мелиоранта на основе осветленных коммунальных стоков), позволили классифицировать стоки как слабоминерализованные, соответствующие требованиям СанПиН, для которых проблема осолонцевания грунта хвостохранилищ под действием ОКС не актуальна.

5. Орошение песчаного апатитнефелинового субстрата мелиорантом на основе осветленных коммунальных стоков положительно влияет на прорастание семян тимopheевки луговой и дальнейший рост и развитие растений в искусственно создаваемом фитоценозе, что свидетельствует о стимулирующем процессе самозаращания поверхности хвостохранилища эффекте данного мелиоранта.

6. Мелиорант на основе осадка сточных вод может применяться двумя способами – сплошным и фрагментарным нанесением на техногрунт, а подзимний посев семян – непосредственно по поверхности грунта (под слой осадка сточных вод), либо поверх осадка.

7. Способ нанесения мелиоранта существенно влияет на качество формируемого посевного фитоценоза. Фрагментарное нанесение осадка сточных вод на поверхность грунта способствует увеличению высоты растений в создаваемом фитоценозе в 6,3, плотности травостоя – в 1,7, биомассы – в 29,3, проективного покрытия – в 10 раз и мощности дернины в 1,4 раза по сравнению с контролем. При нанесении осадка сплошным слоем данные показатели в сравнении

с контролем еще больше возрастают: высота растений – в 6,9, плотность травостоя – в 4,4, биомасса – в 55,9, мощность дернины – в 3,7 раза.

8. Независимо от способа нанесения, осадок сточных вод способствует ускорению восстановительной сукцессии и увеличению биоразнообразия на песчаном карьере, а мощный травостой – заселению пионерных видов, быстрому зарастанию внутренних оголенных участков, возникновению элементов естественных фитоценозов, свойственных зональному типу растительности, закреплению, а также стабилизации процессов эрозии.

9. Использование широкодоступных и более дешевых влагоемких компонентов в виде осветленных коммунальных стоков и осадка сточных вод, являющихся, к тому же, дополнительным источником питательных веществ, будет способствовать удешевлению и повышению эффективности технологии биорекультивации нарушенных земель за счет снижения расходов на приобретение и внесения минеральных удобрений. Несмотря на то, что использование термовермикулита способствует интенсивному росту растений на песчаных техногенных грунтах и получению более плотного/густого травостоя по сравнению с осадком сточных вод, его применение в качестве биорекультивационного слоя для создания растительного покрова на больших площадях апатитонефелиновых хвостохранилищ из-за дороговизны не целесообразно.

Таким образом, подтверждается первое научное положение:

Эффективное закрепление пылящих поверхностей хранилищ тонкодисперсных отходов в условиях Кольского Севера достигается в течение уже в первый год вегетации видов-эдикаторов в составе травосмеси путем формирования противоэрозийного растительного покрова с высоким проективным покрытием и мощной травяной дерниной при воздействии разных типов жидких отходов селитебного комплекса.

ГЛАВА 4. Химическая мелиорация нефелиновых песков с использованием отходов селитебного комплекса (осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод)

4.1. Химическая мелиорация нефелиновых песков с применением осветленных коммунальных стоков (лабораторный опыт №5)

Целью данной работы являлась оценка эффективности и пролонгированного действия химической мелиорации нефелиновых песков осветленными коммунальными стоками для повышения биогенности (NPK-статуса) техногрунта при создании растительного покрова как способа консервации хвостохранилища.

Лабораторный эксперимент проводился в период с 03.09. по 13.10.2018 г.

Объектом исследований в данном эксперименте являлись нефелиновые пески, отобранные на хвостохранилище АНОФ-2 АО «Апатит» в виде усредненной пробы лежалых хвостов. Общее содержание калия в исходном грунте (в пересчете из оксидной формы) составляет 41500 мг/кг, фосфора – 5276 мг/кг. Техногенный грунт массой 340 г помещали в пластиковые емкости слоем 3 см, на поверхность высевали семена тимopheевки луговой (*Phleum pratense* L.).

В данном эксперименте использовали тимopheевку луговую (*Phleum pratense*). Как уже упоминалось ранее, данный злак является одним из основных высокопродуктивных компонентов в составе травосмесей, широко используемых для закрепления эродированных почв. Он относится к наиболее устойчивым травам, способным в условиях Крайнего Севера формировать высокий и густой травостой, образующим достаточное количество семян для его поддержания, хорошо отзывается на минеральные и органические удобрения [82].

Норма высева семян составляла 66 г/м².

Схема опыта включала 3 варианта: (1) – контрольный, орошение нефилтрованной дождевой водой на протяжении всего эксперимента (n=5); (2) – однократное орошение осветленными коммунальными стоками в начале эксперимента, затем – только дождевой водой (n=5); (3) – орошение только осветленными

коммунальными стоками в течение всего эксперимента ($n=5$). Дождевая вода собиралась в специальную емкость до начала эксперимента. Орошение грунта и осветленными коммунальными стоками, и дождевой водой осуществлялось без их предварительной фильтрации, что предполагает наличие в них взвесей до 68 мг/л. Как было указано выше, осветленные коммунальные стоки отличаются высоким содержанием питательных элементов (К, Са, Mg, Р, аммонийного N) в водорастворимых формах, доступных для растений. Относительно высокие значения ХПК и БПК₅ стоков позволяют предполагать инокуляцию нефелиновых песков после их орошения стоками, сопровождающуюся повышением биогенности таких техногрунтов за счет роста микробиологической активности [166, 170]. Такое же предположение мы считаем обоснованным и в отношении дождевой воды – в связи с наличием в ней взвешенных частиц, признающимися основными источниками микробиологического загрязнения атмосферных выпадений [136, 146, 167].

Последовательность орошения грунта осветленными коммунальными стоками либо дождевой водой следующая: при закладке опыта 40 мл на емкость, затем через каждые три дня по 35 мл на емкость. Суммарная норма орошения за весь период эксперимента составила 38 л/м² (380 т/га).

Результаты фенологических наблюдений, полученные в данном исследовании, приведены в нашей работе [66], где показано, что последствием многократного поверхностного орошения нефелиновых песков осветленными коммунальными стоками явилось двукратное превышение зеленой биомассы относительно контрольного варианта (с орошением грунта дождевой водой в тех же нормах).

Биогенность техногенного грунта. Считается, что нефелиновые пески лишены органического вещества биогенного происхождения и связанного с ним азота [29]. Однако в ходе химического анализа исходного грунта нами определено низкое, но не нулевое среднее содержание ($n=3$) в нем азота, а именно 9.77 мг/кг. Это можно объяснить остаточным содержанием в грунте азотсодержащих флотоагентов и возможной азотфиксацией в поверхностном слое лежалых грунтов.

Установлено, что отходы рудобогащения, выходящие с АНОФ-2, содержат как сапротрофные бактерии, использующие азот органических соединений, так и бактерии, утилизирующие минеральный азот [29]. В этой же работе отмечено возрастание численности микроорганизмов в самом технологическом процессе переработки руды, условия которого способствуют размножению бактерий. Согласно [29] техногенный грунт хвостохранилища содержит микроорганизмы (бактерии, грибы), суммарная биомасса которых достигает в среднем 37 мг/кг субстрата в свеженамытых хвостах и 56 мг/кг в лежалых отходах. В работах [131, 183] на хвостохранилище АНОФ-2 отмечено образование поверхностной криптогамной корки, содержащей цианопрокариоты, являющиеся основными азотфиксаторами, повышающими азотный пул складированных песков.

Следует отметить, что и без химической мелиорации с применением осветленных коммунальных стоков отмечен высокий азотный пул техногенного грунта после изъятия биомассы. Так, в контрольном варианте остаточный уровень $N_{общ}$ в грунте в 11 раз превысил исходное содержание (табл. 4.1), что невозможно связать только с привнесением соединений азота в составе дождевой воды. В свою очередь, при вычислении нами массовых потоков N с учетом его изъятия зеленой биомассой выяснилось, что вынос азота растениями существенно выше его поступления с ОКС, даже с учетом возможного содержания в них органических форм азота, не принимающихся во внимание в ходе производственного мониторинга состава стоков.

Полагаем, что накопление азота в эксперименте связано не только с азотфиксирующей деятельностью микроорганизмов, присутствующих в грунте изначально и привнесенных с оросительной водой, в частности, в составе инокулированных взвесей. Вероятно, имеет место трансформация различных форм азота в пределах микробиологической пленки, формирующейся на нефелиновом субстрате, функционирующем, по сути, как медленный песчаный фильтр. Биогенная трансформация может как повысить, так и понизить остаточный уровень общего содержания азота.

Таблица 4.1. Остаточное содержание N, P, K в техногенном грунте по окончании эксперимента

Повторность опыта	Нобщ, мг/кг			Доступный Р, мг/кг			Доступный К, мг/кг		
	1 (К)	2 (О)	3 (О)	1 (К)	2 (О)	3 (О)	1 (К)	2 (О)	3 (О)
1	09.9	1.6	23.7	3.7	8.4	44.0	2171.9	2084.3	2293.3
2	03.7	22.5	86.3	9.0	3.0	44.2	2000.4	2125.6	2335.0
3	4.2	12.2	138.5	0.4	9.8	39.3	2220.9	2125.7	2419.3
4	21.5	04.7	74.8	1.0	9.1	52.1	2171.1	2126.9	2376.9
5	21.3	86.3	73.3	3.9	0.6	46.2	2086.6	2292.7	2663.4
Среднее значение	08.1	01.5	99.3	1.6	2.2	45.2	2130.2	2151.0	2417.6
% от валового содержания	-	-	-	0.98	0.80	0.86	5.13	5.18	5.83

Так, многократное внесение легкодоступного органического вещества с осветленными коммунальными стоками в варианте 3) могло стимулировать денитрификационную активность микробиоты песков, что способствовало удалению части азота из сферы реакции в молекулярной форме (N_2). Этим можно объяснить для варианта с многократным внесением осветленных коммунальных стоков самое низкое остаточное содержание общего азота в грунте при самом высоком поступлении в него соединений этого элемента (табл. 4.2). Так, в [171] отмечено, что потеря азота в гидропонных системах, работающих на коммунальных стоках, за счет денитрификации признается одной из основных проблем, снижающих экономическую эффективность функционирования таких систем.

Доступные формы калия и фосфора. Высокое исходное валовое содержание калия и фосфора в нефелиновых песках обеспечило сохранение высокого уровня доступности для растений данных элементов питания и по окончании эксперимента (после изъятия зеленой биомассы) (табл. 4.2). Данные производственного мониторинга БПК₅ и ХПК использованных для орошения коммунальных стоков, химический состав которых представлен в Главе «Условия,

объекты и методы исследований», а также соотношение этих двух параметров свидетельствуют о высоком содержании в водах органического вещества, в частности, низкомолекулярных органических кислот. Эта фракция обладает высокой реакционной способностью, что способствует повышению подвижности/доступности калия и фосфора за счет их мобилизации из минеральных субстратов [165]. Однако, если с увеличением привноса органического вещества возрастает и остаточное содержание калия в грунте, то относительно доступности фосфора картина иная: максимум остаточного содержания его доступных форм отмечен после орошения дождевой водой. Возможной причиной может являться побочные эффекты влияния осветленных коммунальных стоков на грунт, а именно ассимиляция фосфора микробиотой, формирование труднорастворимых фосфатов Ca, Fe, Al за счет вытеснения указанных элементов из тонкодисперсной фракции песков, образование ассоциатов фосфат-ионов с органическим веществом, внесенным в составе осветленных коммунальных стоков. Однако следует подчеркнуть, что остаточное содержание доступных форм К и Р в техногрунте остаются величинами, сопоставимыми с их содержанием в лимоннокислой вытяжке исходного грунта (табл. 4.2), что подтверждает пролонгированный эффект орошения на калий-фосфорный режим песков.

Таблица 4.2. Доступность К и Р в лимоннокислой вытяжке исходного грунта

Параметр	Валовое содержание [34]	0.01 М раствор лимонной кислоты	
	мг/кг	мг/кг	% извлечения
К	41500	1020	2.26
Р	5276	45.7	0.49

Листовая диагностика по окончании эксперимента. Результаты листовой диагностики показали, что в ходе эксперимента отмечено активное накопление

всех основных элементов питания (азота, фосфора, калия) в наземной части растений одновидового фитоценоза (табл. 4.3). Высокая обеспеченность посевной культуры указанными элементами отмечена и в контрольном варианте (с орошением дождевой водой). При этом коэффициент биологического поглощения всех элементов возрастал с увеличением количества внесенных осветленных коммунальных стоков, но линейной зависимости не наблюдалось. Такой быстрый отклик растений на оросительные поливы даже в условиях контрольного опыта мы можем объяснить возможным усилением микробиологической активности при благоприятных условиях проведения эксперимента. Высокая влажность грунта, оптимальные температура и освещенность, хорошая аэрация, поступление важных элементов питания (К, Р, Са, Mg, аммонийного и нитратного азота) с дождевой водой создают такие условия. Так, согласно данным государственного мониторинга [107], средневзвешенный химический состав осадков, выпадающих в регионе, следующий: калий – 0.6 мг/л, ион аммония – 0.2 мг/л), нитрат-ион – 0.9 мг/л, кальций – 1.2 мг/л, магний – 0.3 мг/л.

Таблица 4.3. Валовое содержание N, P, K в наземной части растений тимopheевки луговой

Повторность опыта	Нобщ, мг/кг			Робщ, мг/кг			Кобщ, мг/кг		
	1 (K)	2 (O)	3 (O)	1 (K)	2 (O)	3 (O)	1 (K)	2 (O)	3 (O)
1	24625	30869	30030	577	713	4587	25133	29985	29220
2	4880	28862	28850	097	444	5527	30465	28160	32091
3	4942	28581	34804	591	178	4490	27070	32158	35656
4	6544	26028	28406	602	137	4709	22928	22671	30728
5	4479	25559	32285	371	793	4558	29169	29464	32612
Среднее значение	3094	27980	30875	048	253	4774	26953	28488	32061
КПБ*	-	-	-	0.77	0.81	0.90	0.65	0.69	0.77
Примечание: * коэффициент биологического поглощения (КПБ) - отношение содержания элемента в надземной части растений к его валовому содержанию в исходном грунте; для азота данный параметр не определяется									

Весьма важным фактором роста доступности К и Р может являться относительно высокая кислотность (низкие значения рН) атмосферных выпадений в виде дождя, что является характерной особенностью даже условно-фоновых территорий крайнего Северо-Запада РФ [90].

По уровню накопления калия в сухой массе тимфеевки луговой, достигнутого в данной работе в опытах с применением осветленных коммунальных стоков, можно говорить о его соответствии вариантам с торфованием нефелиновых песков и выращиванием злаков на окультуренных подзолистых почвах региона [88].

Многократное орошение грунта дождевой водой обеспечило накопление фосфора с надземной фитомассе свыше 4000 мг/кг. Это превысило среднее содержание элемента в сухой массе тимфеевки луговой, выращенной на нефелиновых песках АНОФ-1 (2400 мг/кг в контроле, 2500 мг/кг при торфовании), а также предел 3300 мг/кг, достигнутый на окультуренных подзолистых почвах региона [88]. Орошение песков ОКС в максимально достигнутой норме 380 т/га способствовало повышению уровня содержания фосфора в сухой массе тимфеевки луговой до 4800 мг/кг. Содержание фосфора в растениях во всех вариантах проведенного опыта соответствует оптимальным значениям для злаковых растений [158].

Содержание общего азота в наземной части растений в контрольном варианте данной работы совпадает с результатами полевых экспериментов ее выращивания на хвостохранилище АНОФ-1 без принятия каких-либо мелиоративных мер [88]. В свою очередь, даже при однократном орошении нефелиновых песков коммунальными стоками накопление азота в тимфеевки луговой уже достигает уровня, отмеченного для данной культуры в международной практике повышения питательной ценности кормов за счет применения высоких доз минеральных удобрений, в том числе комплексных (NPK) [141]. В варианте с многократным внесением осветленных коммунальных стоков (суммарно 380 т/га) получены результаты накопления азота в сухой массе растений соизмеримые с результатами листовой диагностики в полевых опытах на

нефелиновых песках при внесении 100 т/га навоза как традиционного мелиоранта [88].

Таким образом, в условиях лабораторного эксперимента с имитацией поверхностного орошения грунта подтвержден стимулирующий эффект орошения техногенного грунта хвостов АНОФ-2 мелиорантами (нефильтрованной дождевой водой, осветленными коммунальными стоками отдельно и в комбинации) на питательный режим рекультивируемых нефелиновых песков.

Орошение нефелиновых песков осветленными коммунальными стоками в суммарной норме 380 т/га при соблюдении условий многократного равномерного распределения поливочной воды по площади имеет пролонгированный эффект на питательный режим грунта и достаточно для создания устойчивого растительного покрова из тимофеевки луговой на отходах рудообогащения без землевания.

Коэффициент биологического поглощения N, P, K надземной биомассой одновидового (timoфеевка луговая, *Phleum pretense*) сеянного фитоценоза при поверхностном орошении во всех вариантах соответствует оптимальным уровням накопления, определенных для злаковых растений в вариантах с торфованием, внесением традиционных мелиорантов и комплексных минеральных удобрений.

По причине промывного водного режима нефелиновых песков эффект, полученный в лабораторных условиях, требует верификации в условиях полевого эксперимента.

4.2 Химическая мелиорация нефелиновых песков с применением осадка сточных вод (лабораторный опыт №6)

Целью данной работы являлось продолжение проводимых исследований с оценкой эффективности и подтверждения пролонгированности действия химической мелиорации нефелиновых песков с применением осадка сточных вод (ОСВ) для повышения биогенности (NPK-статуса) грунта при создании растительного покрова как способа консервации хвостохранилища АНОФ-2 АО «Апатит».

Как и в предыдущих исследованиях данный лабораторный эксперимент проводился в период с 03.09. по 13.10.2018 г.

Схема опыта включала 2 варианта: (1) – опытный, однократное 8-фрагментарное нанесение осадка сточных вод в начале эксперимента, затем – периодическое орошение дождевой водой; (2) – контрольный, без применения ОСВ, только орошение нефilterованной дождевой водой на протяжении всего эксперимента. Каждый вариант выполнен в пятикратной повторности.

Дождевая вода собиралась в специальную емкость до начала эксперимента, периодическое орошение ею грунта проводилось в одинаковых дозах, последовательность орошения приведена ниже. Опыты в каждом варианте проводились в пяти повторностях. Последовательность орошения посевов дождевой водой производилась следующим образом: при закладке опыта в количестве 40 мл на емкость, затем через каждые три дня по 35 мл на емкость. Суммарная норма орошения за весь период эксперимента составила 38 л/м² (380 т/га).

Лабораторный опыт проводился на отходах рудобогащения («хвостах») апатит-нефелиновой фабрики АНОФ-2 КФ АО «Апатит» с преобладанием в их составе нефелиновых песков. Техногенный грунт (нефелиновый песок) массой 340 г помещали в пластиковые емкости слоем 3 см и увлажняли водой до полного насыщения.

Для формирования фитоценоза на поверхность субстрата высевали семена многолетнего травянистого злакового растения - тимopheевки луговой (*Phleum pratense*).

Существует мнение, что в нефелиновых песках полностью отсутствует органическое вещество и связанный азот [29]. Однако в наших исследованиях было доказано, что азот в исходном техногенном грунте хвостохранилища АНОФ-2 присутствует в количестве 9.77 мг/кг. Это можно объяснить остаточным содержанием в грунте азотсодержащих флотоагентов и возможной азотфиксацией в поверхностном слое лежалых грунтов. В нефелиновых песках отмечено наличие сапротрофных бактерий, использующих азот органических соединений, а также

бактерий, утилизирующих минеральный азот [29]. Наличие цианопрокариот [131, 183], являющихся основными азотфиксаторами, также повышает азотный пул складируемых песков.

Анализ полученных данных показал, что осадок сточных вод, однократно примененный в эксперименте, и после изъятия растительной биомассы способствовал сохранению остаточного содержания азота в техногенном грунте, в 12.7 раз превышающего исходное (9.7 мг/кг) (табл. 4.4). В опытном варианте это может быть связано с внесением легкодоступного органического вещества и связанных с ним аммонийных форм азота с осадком сточных вод. Содержание $N_{\text{общ}}$ в исходном осадке сточных вод составляет 1918 мг/кг.

Таблица 4.4. Остаточное содержание N, P, K в техногенном грунте по окончании эксперимента

Вариант исследования	Повторность	Содержание биогенных элементов, мг/кг		
		$N_{\text{общ.}}$	$P_{\text{доступный}}$	$K_{\text{доступный}}$
Опытный - осадок сточных вод +дождевая вода	1	97,70	44,84	2292,95
	2	126,09	44,00	2576,50
	3	135,04	47,87	2001,91
	4	114,29	44,45	2084,80
	5	140,92	46,08	2378,12
	Среднее	122,8	45,4	2266,9
Контрольный	1	109,91	53,66	2171,87
	2	103,72	49,03	2000,36
	3	84,22	50,40	2220,87
	4	121,54	51,04	2171,08
	5	121,33	53,86	2086,58
	Среднее значение	108,1	51,6	2130,2

В контрольном варианте также отмечено высокое остаточное содержание азота, в 11 раз превышающее исходное. Такое увеличение может быть связано с азотфиксирующей деятельностью микроорганизмов, изначально присутствующих в грунте, а также привнесенных с оросительной водой в составе инокулированных взвесей, поскольку в опыте применялась дождевая вода без предварительной фильтрации.

Высокое валовое содержание в исходном техногенном грунте фосфора, обусловленное присутствием апатита (2,9 %), который не полностью был извлечен из руды при ее обогащении [88, 73] обеспечило высокий уровень их доступности для питания растений в эксперименте (табл. 3.4). Однако, если с внесением осадка сточных вод, содержащего 3792,23 мг/кг калия в доступной для растений форме, возрастало и остаточное содержание калия в грунте, то относительно доступности фосфора картина иная. Максимум остаточного содержания его доступных форм отмечен в контрольном варианте. Возможной причиной может являться более интенсивный вынос фосфора с биомассой в опытном варианте, ассимиляция фосфора микробиотой, формирование труднорастворимых фосфатов Ca, Fe, Al за счет вытеснения указанных элементов из тонкодисперсной фракции песков, а также образование ассоциатов фосфат-ионов с гумифицированным органическим веществом, входящем в состав осадка сточных вод. Следует упомянуть, что содержание доступных форм P в примененном мелиоранте невелико (146 мг/кг) и не может играть существенной роли при формировании фитоценоза, когда валовое содержание фосфора в самом грунте составляет 5276 мг/кг.

На 4-й день эксперимента (после посева семян) в обоих вариантах одновременно было зафиксировано появление первых всходов. При использовании осадка сточных вод отмечены самые дружные всходы, что позволяет предполагать стимулирующее действие указанного мелиоранта на прорастание семян тимофеевки луговой.

Высокое валовое содержание в исходном техногенном грунте фосфора и калия, а также доступных для растений форм азота в осадке сточных вод оказали положительное влияние на рост растений (рис. 4.1).

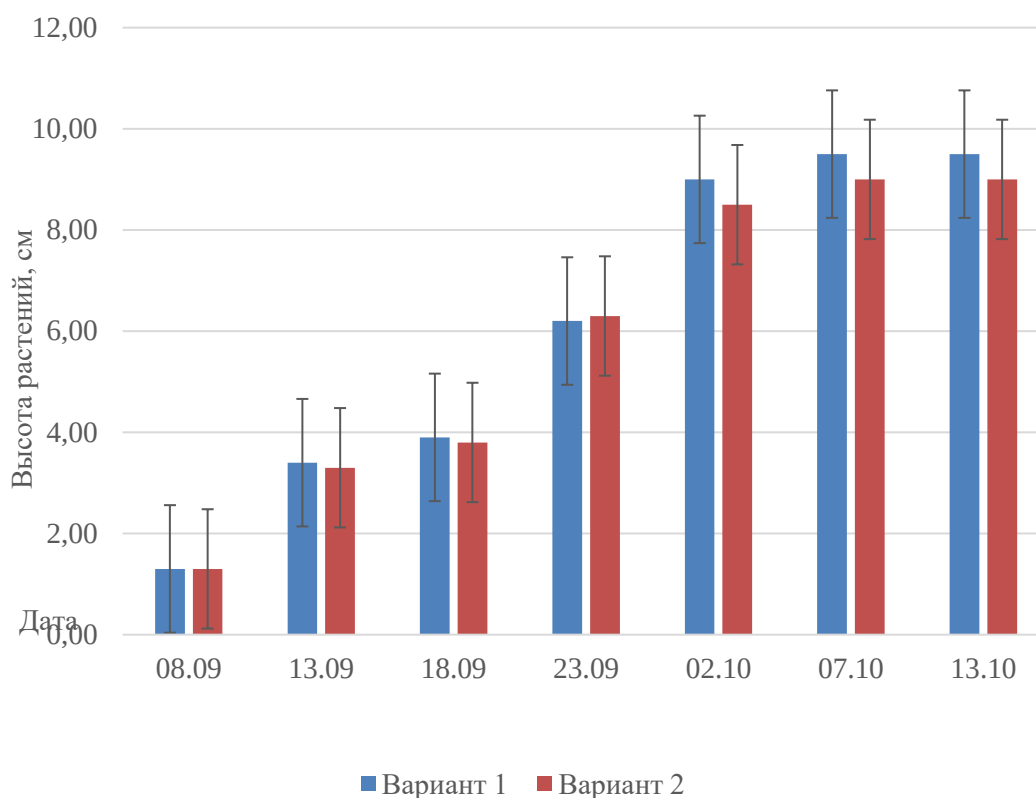


Рисунок 4.1. Динамика роста растений в эксперименте

Относительно высоты растений в начале эксперимента наблюдалась слабая вариабельность. Однако в дальнейшем отмечено опережение роста у растений опытных вариантов (с применением мелиоранта) по сравнению с контролем, что может быть связано с постепенным вымыванием из осадка сточных вод лабильных форм элементов питания. На 10-й день эксперимента высота травостоя в вариантах с применением осадка была выше всего на 0.1 см по сравнению с контролем. К завершению опыта средняя высота опытных растений составила 9.5 см, тогда как в контроле она была на 0.5 см ниже.

Максимально достигнутое проективное покрытие в эксперименте, вероятно из-за краткосрочности опыта, не превысило 65%. При этом было отмечено снижение этого показателя при фрагментарном размещении осадка на субстрате по сравнению с контролем ($55.00 \pm 3.54\%$, $p < 0.01$). По всей видимости это было связано с формированием корки на центральных точках размещения осадка, что и оказало некоторое ингибирующее действие осадка сточных вод на молодые

проростки. Тем не менее, внесение осадка сточных вод стимулировало статистически значимый ($p < 0,05$) прирост зеленой массы по сравнению с контрольным вариантом (1.50 ± 0.39 г против 1.20 ± 0.35 г).

Результаты листовой диагностики показали активное накопление всех основных элементов питания (азота, фосфора, калия) в наземной части растений одновидового фитоценоза в обоих вариантах (табл. 4.5).

Таблица 4.5. Валовое содержание N, P, K в наземной части *Phleum pretense*

Вариант исследования	Повторность	Содержание питательных элементов, мг/кг		
		N _{общ.}	P _{общ.}	K _{общ.}
Опытный - ОСВ+дождевая вода	1	30144,60	4901,05	28000,91
	2	25601,25	3544,51	26217,91
	3	32239,01	3102,05	21299,49
	4	28371,73	3639,32	26857,49
	5	31877,19	3675,78	25617,02
	Среднее значение	29647	3773	25599
Контрольный	1	24624,96	3577,32	25133,23
	2	24880,05	4096,61	30465,26
	3	24942,05	4591,17	27069,85
	4	26544,18	3602,05	22927,52
	5	14479,92	4370,68	29168,66
	Среднее значение	23094	4048	26953

Такую реакцию растений даже в условиях контрольного варианта можно объяснить возможным усилением микробиологической активности при благоприятных условиях проведения эксперимента (высокая влажность грунта,

оптимальные температура и освещенность, хорошая аэрация, поступление важных элементов питания (К, Р, Са, Mg, аммонийного и нитратного азота) с дождевой водой). Согласно данным государственного мониторинга [107], средневзвешенный химический состав осадков, выпадающих в регионе, содержит: калий – 0,6 мг/л, ион аммония – 0,2 мг/л), нитрат-ион – 0,9 мг/л, кальций – 1,2 мг/л, магний – 0,3 мг/л.

По уровню накопления калия в сухой массе опытных растений в обоих вариантах можно говорить о его соответствии вариантам с торфованием нефелиновых песков и выращиванием злаков на окультуренных подзолистых почвах в регионе [88].

Однократное внесение осадка сточных вод обеспечило накопление фосфора в надземной фитомассе свыше 3000 мг/кг - таково среднее содержание элемента в сухой массе тимopheевки, выращенной на нефелиновых песках АНОФ-1, и даже превышение предела 3300 мг/кг, достигнутого на окультуренных подзолистых почвах Мурманской области [88]. Содержание фосфора в растениях в обоих вариантах проведенного опыта соответствует оптимальным значениям для злаковых растений, установленных в [158]. Содержание общего азота в наземной части тимopheевки луговой в контрольном варианте данной работы совпадает с результатами полевых экспериментов ее выращивания на хвостохранилище АНОФ-1 без принятия каких-либо мелиоративных мер [88]. В свою очередь, даже при однократном внесении осадка сточных вод накопление азота в тимopheевке луговой достигает уровня, отмеченного для данной культуры в международной практике повышения питательной ценности кормов за счет применения высоких доз минеральных удобрений, в том числе комплексных (NPK) [141]. Полученные результаты валового содержания азота в биомассе соизмеримы и с результатами листовой диагностики в полевых опытах на нефелиновых песках при внесении 100 т/га навоза как традиционного мелиоранта [88].

Таким образом, в результате исследований в условиях лабораторного эксперимента с имитацией однократного фрагментарного поверхностного нанесения мелиоранта на техногенный грунт подтверждены стимулирующий

эффект осадка сточных вод на питательный режим нефелиновых песков и возможность создания устойчивого растительного покрова из тимopheевки луговой при их рекультивации.

Накопление N, P и K надземной биомассой одновидового (тимopheевка луговая, *Phleum pretense*) сеяного фитоценоза при поверхностном нанесении осадка сточных вод соответствует уровням накопления, определенным для злаковых растений в вариантах с торфованием, внесением навоза или комплексных минеральных удобрений в условиях длительных полевых опытов с грунтом близкого минерального состава (хвостах АНОФ-1).

Высокое остаточное содержание N, P и K после изъятия зеленой биомассы свидетельствует о пролонгированном действии осадка сточных вод.

По причине промывного водного режима нефелиновых песков эффект, полученный в лабораторных условиях, требует верификации в условиях полевого эксперимента для признания предлагаемого метода альтернативой традиционным методам рекультивации техногрунтов.

Выводы по главе 4

1. В условиях двух лабораторных экспериментов с имитацией поверхностного орошения грунта хвостов АНОФ-2 мелиорантами на основе отходов селитебного комплекса (осветленных коммунальных стоков и осадка сточных вод) (в суммарной норме 380 т/га при соблюдении условий многократного равномерного распределения поливочной воды по площади), нефильтованной дождевой водой при их отдельном и комбинированном использовании был подтвержден стимулирующий и пролонгированный эффект этих мелиорантов на питательный режим нефелиновых песков и возможность создания устойчивого растительного покрова из тимopheевки луговой для ревитализации нарушенных горными работами ландшафтов.

2. Коэффициент биологического поглощения N, P, K надземной биомассой одновидового сеяного фитоценоза при поверхностном орошении осветленными коммунальными стоками во всех вариантах и при поверхностном

нанесении осадка сточных вод соответствует оптимальным уровням накопления, определенным для злаковых растений в вариантах с торфованием, внесением навоза или комплексных минеральных удобрений в условиях длительных полевых экспериментов с грунтами близкими по минеральному составу (хвосты АНОФ-1).

3. По причине промывного водного режима нефелиновых песков эффект, полученный в лабораторных условиях, требует верификации в условиях полевого эксперимента для признания предлагаемого метода альтернативой традиционным методам ревитализации нарушенных горными работами ландшафтов.

Таким образом подтверждается второе и третье научное положение

Второе научное положение:

Механизм ревитализации ландшафтов техногенных новообразований из отходов обогащения заключается в снижении подвижности тонкодисперсных фракций в их приповерхностной зоне за счёт ускоренного развития восстановительной сукцессии в направлении воспроизводства там экологически устойчивых, самостоятельно существующих и развивающихся, растительных сообществ.

Третье научное положение:

Отходы селитебного комплекса (осветленные коммунальные стоки и осадки сточных вод) характеризующиеся высоким содержанием легкодоступного для микробиоты органического вещества, а также лабильностью питательных элементов, способствующие повышению доступности калия и фосфора за счет их мобилизации из апатито-нефелиновых песков, дальнейшей ассимиляции растениями азота, фосфора и калия, являются эффективными почвоулучшителями стимулирующего и пролонгирующего действия, повышающими биогенность малопродуктивных техногенных грунтов, способными создавать на них в зоне рискованного земледелия благоприятные для выращивания растений эдафические условия.

ГЛАВА 5. Обоснование технологии экологической стабилизации пылящих поверхностей хранилищ горнопромышленных отходов на кольском севере

5.1. Влияние мелиорантов (осветленных коммунальных стоков, осадков сточных вод, минеральных удобрений) на продуктивность и показатели пигментного комплекса тимофеевки луговой (лабораторный рекогносцировочный опыт №7)

Для оценки влияния нетрадиционных видов удобрений, в качестве которых использовали осадок сточных вод и осветленные коммунальные стоки городского предприятия АО «Апатитыводоканал», на продуктивность посевов тимофеевки луговой при мелиорации площадей с отходами нефелинового производства ОАО «ФосАгро» провели лабораторный рекогносцировочный эксперимент в течение месяца. Их применение сравнивали с использованием традиционного мелиоранта в виде минерального удобрения «Аммофос».

Схема опыта включала 3 опытных варианта и 1 – контрольный, каждый был выполнен в 3-х кратной повторности (табл. 5.1).

Таблица 5.1. Схема проведения лабораторного эксперимента

Вариант исследования	Повторность	Мелиорант
1 (К) n=3	1-1	отстоянная водопроводная вода
	1-2	
	1-3	
2 (О) n=3	2-1	удобрения
	2-2	
	2-3	
3 (О) n=3	3-1	осветленные коммунальные стоки
	3-2	
	3-3	
4 (О) n=3	4-1	осадок сточных вод
	4-2	
	4-3	

Использовали осветленные коммунальные стоки (ОКС) при норме внесения 0.5 л/0.5 м² (12 мл/емкость) и осадок сточных вод (ОСВ) – 1 л/ 0.5 м² (24 мл/емкость) 8-ю фрагментами. В качестве традиционных мелиорантов применяли минеральное удобрения «аммофос» - азотно-фосфорное концентрированное растворимое удобрение, содержащее около 10—12 % N и 52 % P₂O₅. В основном оно состоит из моноаммонийфосфата NH₄H₂PO₄ и, частично - диаммонийфосфата (NH₄)₂HPO₄, норма внесения составляла 25 г/м² (3 г/1 емкость). Аммофос действует намного быстрее любого из суперфосфатов, так как действующие вещества содержатся в его составе в легко усваиваемой форме. Это свойство выделяет данный агрохимикат из ряда других удобрений данного класса.

Полив растений водой производили по мере подсыхания субстрата в среднем по 25 мл/1 емкость в каждый полив.

Для более полной имитации условий полевого эксперимента все мелиоранты в лабораторном опыте были использованы только после завершения первой фазы развития тимopheевки луговой - процесса прорастания семян. Это обусловлено тем, что данный вид является однодольным злаковым растением с подземным типом прорастания семян. Первая фаза его развития включает несколько последовательных этапов: набухание, наклевывание семени, период гетеротрофного питания (только за счет запасных веществ эндосперма семени) и переход к автотрофному питанию. На завершающем этапе у проростков формируется первый зеленый лист и придаточные корни, способствующие поглощению питательных веществ из почвы. таким образом, стартовые возможности у растений во всех вариантах опыта были одинаковые: высота проростков составляла 1.0 см, площадь проективного покрытия – 100%.

Проведенные исследования показали, что тимopheевка луговая эффективно отреагировала на применение всех видов мелиорантов в период проведения краткосрочного лабораторного эксперимента. Высота растений в среднем составила в контроле 7.6 см, а в наиболее продуктивном варианте опыта с осадком сточных вод – 10.3 см (рис. 5.1).

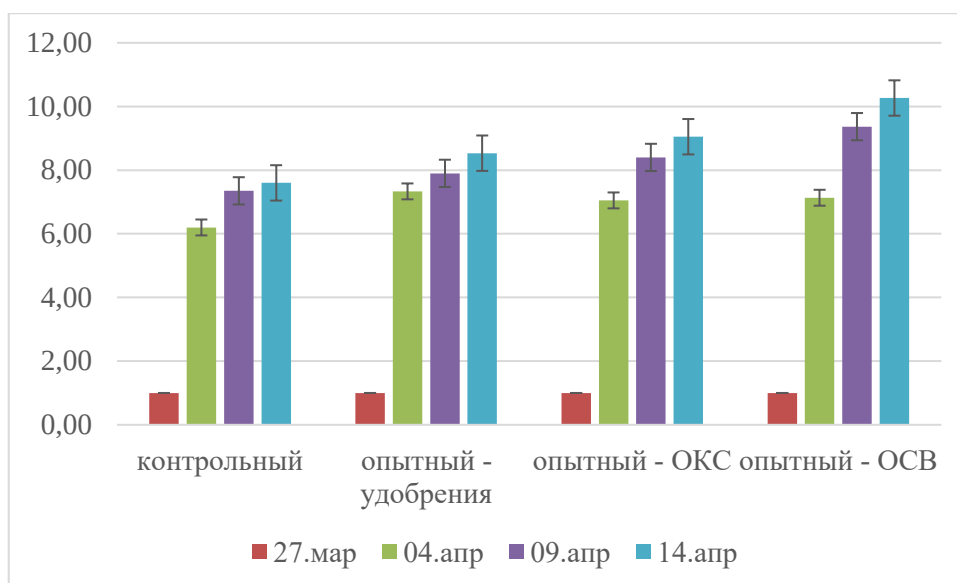


Рисунок 5.1. Динамика роста листьев (см) тимopheевки луговой в лабораторном эксперименте

Спустя 12 дней после посева во всех вариантах опыта высота особей тимopheевки достигла 1 см. Далее большая часть фитомассы растений сформировалась за следующие 18 дней эксперимента. В первый период наблюдений (7-8 дней) было сформировано уже 70-85 % от конечной величины показателя высоты растений, причем особи в контроле и при применении азофоски росли быстрее, чем при обработке нетрадиционными удобрениями на 10-15%. В конце эксперимента высота растений в опытных вариантах по отношению к контролю увеличилась: под действием обычных удобрений на 11%, при воздействии осветленных коммунальных стоков – на 16 %, при применении осадка сточных вод – уже на 26%. Диапазон изменений надземной фитомассы значительно больше по сравнению с высотой растений, но различия между вариантами применяемых удобрений в опыте незначительны. В сравнении с контролем применение традиционного удобрения вызвало увеличение биомассы на 40%, нетрадиционных – на 44 % (табл. 5.2). Продуктивность надземной фитомассы тимopheевки луговой на конец эксперимента в расчете на 1 м² занимаемой площади составила 42-75 г/м² (табл. 5.2).

Таблица 5.2. Влияние мелиорантов на накопление биомассы тимopheевки луговой

Средние значения надземной фитомассы, г сырой массы/емкость			
2 (К)	2 (О)	2 (О)	2 (О)
4.05±0.17	7.45±1.04	7.56±0.02	7.67±0.44

В конце 30-дневного лабораторного эксперимента наряду с морфологическими параметрами определили ряд физиологических показателей, оценивающих работу фотосинтетического аппарата (содержание основных пигментов пластид, хлорофильного индекса).

Накопление пигментов в растениях связано с онтогенетическим развитием, максимальные концентрации, как правило, совпадают с репродуктивной фазой - бутонизации или цветения [18]. Исследованный вид тимopheевки луговой находится в фазе отрастания, поэтому полученные данные по количеству фотосинтетических пигментов нельзя считать максимальными. Суммарное содержание хлорофиллов в контрольном варианте составило 1.98 мг/сырой массы (16.22 мг/г сухой массы), каротиноидов 0.3 мг/сырой массы (2.43 мг/г сухой массы) (табл. 5.3). Тем не менее, полученные нами сведения согласуются с данными для тимopheевки луговой, выращенной в условиях средней тайги на европейском северо-востоке (г. Сыктывкар), где сумма хлорофиллов находилась в диапазоне 1.7-2.8 мг/г сырой массы, содержание каротиноидов - 0.3-0.4 мг/г сырой массы [60]. Изучение физиологических показателей тимopheевки в вегетационном опыте по влиянию кадмия на ФСА в лабораторных условиях в Карелии выявило, что содержание хлорофиллов в контроле составило 1.91 мг/г сырой массы, каротиноидов - 0.53 мг/г сырой массы [133, 71]. То есть содержание фотосинтетических пигментов генетически детерминированный признак растений. Соотношение хлорофиллов во всех вариантах опытов довольно стабильное 2.7-2.9, что указывает на приспособленность к большей амплитуде изменения освещенности, а также проявления признаков теневыносливости.

Таблица 5.3. Показатели пигментного комплекса (мг/г сухой массы) тимOFFеевки луговой в эксперименте

Вариант	Хлорофиллы (X)				Каротиноиды (K)	X/K	% сухого вещества
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a + b</i>	<i>a / b</i>			
1 (K)	11.96±1.91	4.26±0.78	16.22±2.6 ₈	2.8	2.43±0.42	6.7	12.42±1.74
2 (O)	13.38±0.80	4.69±0.20	18.07±0.9 ₉	2.9	2.70±0.16	6.7	11.13±1.07
3 (O)	13.35±1.19	4.90±0.36	18.27±1.5 ₃	2.7	2.68±0.24	6.8	11.82±0.20
4 (O)	13.17±0.77	4.91±0.26	18.08±1.0 ₃	2.7	2.62±0.16	6.9	11.65±0.19

В вариантах с мелиорантами отмечены изменения в содержании, как зеленых, так и желтых пигментов. Содержание хлорофилла *a* по сравнению с контролем увеличивается на 10-11 %. Увеличение хлорофилла *b* относительно контроля выражено в большей степени на 9-15%. По-видимому, увеличение биомассы в вариантах с удобрениями привело к загущению опытных вариантов и соответственно, к затенению особей и к повышению содержания хлорофиллов, особенно хлорофилла *b*. Увеличение содержания хлорофиллов при загущении посевов связано с активизацией метаболических процессов в системе биосинтеза хлорофилла [60]. Повышенное содержание хлорофилла *b* связано с защитной функцией пигмента, оказывающего экранирующее действие на фотосинтетически активный хлорофилл *a* [64]. Содержание каротиноидов по сравнению с контролем изменялось незначительно, не более 3-10 %, что говорит об их устойчивости к факторам среды. Поэтому говорить о тенденции их изменения и роли в опытных вариантах с применением мелиорантов не представляется возможным.

В условиях Севера соотношение зеленых и желтых пигментов высокое и оно зависит от экологических факторов [60]. В конкретных условиях существования эта величина может указывать на большую или меньшую лабильность пигментного

комплекса. Исходя из полученных данных, отношение хлорофилла к сумме каротиноидов в листьях тимopheевки луговой варьирует в пределах 6.7-6.9.

Содержание сухого вещества в пробах растений всех вариантов эксперимента слабо варьировало – 11-12 % (табл. 6.4). Если рассчитать скорость прироста надземной фитомассы, учитывая продолжительность периода основного роста (18 дней), то можно отметить, что по сравнению с контрольным вариантом, в опытных с применением мелиорантов эффективность ростовых процессов в 1.7-1.8 раза больше (табл. 5.4).

На основе имеющихся данных о концентрации хлорофиллов были рассчитаны ХИ для вариантов эксперимента (табл. 5.4), как произведение содержания хлорофилла во всех фотосинтезирующих органах на их сухую массу на единицу площади.

Таблица 5.4. Показатели продуктивности тимopheевки луговой

Вариант	Ассимилирующая поверхность, г сухой массы/м ²	Скорость роста фитомассы г сухой массы/ м ² сутки	Содержание хлорофилла, (a + b), мг/г сухой массы	ХИ (г/м ²)
1 (К)	41.92	2.3	16.22±2.68	0.68
2 (О)	69.10	3.8	18.07±0.99	1.25
3 (О)	74.47	4.1	18.27±1.53	1.36
4 (О)	74.46	4.1	18.08±1.03	1.35

По данным С.В. Куренковой (1998) [60] величина ХИ у однолетних с/х культур составляла 15.8-21.0 кг/га, у многолетних 12.9-21.0 кг/га. Наибольшее ХИ для однолетних растений отмечено у овса, у многолетних – у клевера красного. Большинство культурных растений образуют фитоценозы с ХИ 30-40 кг/га. В пределах величин ХИ 6-24 кг/га установлена прямолинейная зависимость между ХИ и аккумуляцией углерода [126]. Средние величины аккумуляции углерода в

биомассе растений за вегетацию у однолетних культур составляли 2.3-4.3, у многолетних 1.7-2.7 тС/га [60].

Величина ХИ в эксперименте оказалась наиболее информативным показателем, который показал степень влияния удобрений на параметры продуктивности (табл. 6.4). Можно отметить, что по сравнению с контролем в вариантах опыта с применением ОКС и ОСВ хлорофильный индекс больше на 50% (1.35 г/м² или 13.5 кг/га). Величины рассчитанных ХИ тимopheевки луговой сопоставимы со сведениями по многолетним культурам европейского северо-востока.

Таким образом, компоненты пигментного комплекса (суммарное содержание хлорофиллов) можно использовать в качестве тестовой характеристики потенциальной продуктивности отдельных растений и посевов в целом. Однако прогноз будет более точным при проведении продолжительного полевого эксперимента с учетом всех фаз развития растения, так как у злаковых наибольшая продуктивность работы единицы хлорофилла отмечается в период активного роста – колошения. Особого внимания заслуживает вопрос о применимости ХИ для оценки стока углерода и годичной продукции фитоценоза.

Данный опыт получил продолжение в многолетнем полевом эксперименте по оценке фотосинтетической активности и содержания пигментов пластид овсяницы красной в искусственных фитоценозах, созданных с применением ОСВ на техногенном грунте песчаного карьера в условиях кольского Севера. В его основе данные, полученные в предыдущем многолетнем полевом эксперименте в 2017-2020 гг.

5.2. Оценка фотосинтетической активности и содержания пигментов пластид овсяницы красной в искусственных фитоценозах, созданных с применением осадков сточных вод на техногенном грунте песчаного карьера

В северных широтах рост и развитие растений сдерживается недостатком тепла, коротким вегетационным периодом и бедностью подзолистых почв. Общий положительный радиационный баланс складывается за счет длинного дня в первой половине вегетации, когда нередки резкие суточные колебания температуры и ночные заморозки. На фоне комплексного действия неблагоприятных факторов фотосинтетический аппарат (ФСА) растений испытывает дополнительное напряжение, как следствие возрастает защитная роль пигментов. Актуальность исследования пигментного комплекса в таких условиях обусловлена необходимостью расширения текущих представлений о пигментном аппарате растений и адаптационных механизмах, которые обеспечивают устойчивость ФСА в условиях возрастания нестабильности климата и углубления региональных экологических проблем.

Первостепенное значение для корректировки продукционных процессов в посевах имеет процесс фотосинтеза. Выявлено, что связь хозяйственного урожая и интенсивности фотосинтеза в большинстве случаев отсутствует [2]. Наиболее перспективными являются «валовые» показатели, учитывающие величину фотосинтезирующей поверхности и время ее работы, например, хлорофильный фотосинтетический потенциал и проективное содержание хлорофилла (ХИ) на единицу площади, занимаемой растительным сообществом. Содержание пигментов применяют в качестве показателя, определяющего потенциальную возможность фотосинтетического аппарата растений [117, 125], поскольку пигментный комплекс изменяется в зависимости от условий существования растений.

В эколого-физиологических исследованиях содержание хлорофиллов используется как один из показателей фотосинтетической способности листа [109, 154, 185]. К настоящему времени хорошо изучены спектральные свойства и

биосинтез фотосинтетических пигментов, разработана концепция антенных комплексов и реакционных центров, а также определены фундаментальные механизмы фотосинтеза [143, 150, 7].

При воздействии стрессовых условий количественные и качественные изменения пигментной системы оказываются чувствительными показателями физиологического состояния растений и их ФСА, направленности адаптивных реакций [112, 91, 142].

Лимитирующими факторами при формировании пигментного комплекса являются свет и температура [68, 127, 65, 9, 75, 180, 15, 133, 109].

Установлено, что содержание пигментов в растениях тропиков, субтропиков и умеренной зоны находится в пределах 0.8-6.5 мг/г зеленой массы. Средним содержанием хлорофиллов (1.5-3 мг/ сырой массы) характеризуются растения умеренной зоны [81, 127].

В условиях подзоны средней тайги Европейского северо-востока Содержание пигментов в листьях культурных растений изменялось в широких пределах: у многолетних растений семейств злаковых и бобовых среднее содержание зеленых пигментов листьях не превышает 2 мг/г сырой массы, в то время как в группе однолетних растений среднее количество хлорофиллов ниже 2 мг/г сырой массы [60].

Эффективность ассимиляции углекислоты растительным покровом определяется как интенсивностью процесса и его продолжительностью, так и суммарной величиной листовой поверхности в сообществе и количеством фотосинтетических пигментов в ней. Более точное представление о развитии фотосинтетического аппарата можно получить с помощью данных о содержании хлорофилла во всех органах растений на единице площади, покрытой растительностью [116]. Хлорофилльный индекс (ХИ) – это проективное содержание хлорофилла в ассимилирующих органах. Его применяют в качестве показателя продуктивности растений и для количественной оценки фотосинтетического связывания атмосферного углерода растительными сообществами. Сток углерода зависит от содержания хлорофилла в растениях. Он

определяется способностью фитоценозов поглощать CO_2 в процессе фотосинтеза. Для разных зон РФ показана высокая корреляция ХИ с первичной продукцией фотосинтеза [80, 126, 12, 13, 123]. Эта связь определяется согласованностью процессов фотосинтетического преобразования световой энергии в энергию химических связей. Поэтому пропорциональность ХИ фотосинтетическому стоку углерода за период вегетации характерна для всех видов растений. Его используют в качестве критерия фотосинтетической продуктивности для косвенной оценки аккумуляции углерода в сообществах.

Видовой состав, масса ассимилирующих органов и плотность растительного покрова являются основными факторами, определяющими величину хлорофильного индекса в сообществе. Среднее связывание атмосферного углерода растительностью любой ботанико-географической зоны РФ составляет около 145 кг на 1 кг хлорофилла за вегетационный период [80].

Цель исследования: оценка состояния искусственно созданного фитоценоза на песчаных карьерах с применением осадков сточных вод регионального ВКХ АО «Апатитыводоканал» по параметрам фотосинтетического аппарата доминантного вида-рекультиванта овсяницы красной (*Festuca rubra* L.).

Схема опыта включала 3 варианта (n=6): 1 (К) - без использования осадка сточных вод с посевом семян по поверхности грунта, 2 (О) – фрагментарное нанесение осадка сточных вод с посевом семян по поверхности грунта (под слой осадков сточных вод), 3 (О)– сплошное нанесение осадков сточных вод с посевом семян поверх слоя осадков сточных вод.

Результаты предыдущего полевого эксперимента показали, что доминирующим видом в созданных в песчаном карьере многолетних фитоценозах является овсяница красная. Это широко распространенный многолетний низовой злак озимого типа является хорошим пастбищным растением. Встречается в разнообразных климатических и почвенных условиях на заливных низинных суходольных лугах в разреженных лесах до верхнего горного пояса европейской части. Может использоваться в посевах, как на Крайнем Севере, так и в лесной и лесостепной зонах. Овсяница красная стоит на первом месте по способности к

задернению и восстановлению структуры почвы; считается лучшей культурой для проведения биологической рекультивации отвалов и фитомелиорации других техногенных земель без нанесения почвенного слоя при обязательном повышении плодородия субстрата.

Как и в предыдущем эксперименте, влияние мелиоранта на качество создаваемых фитоценозов оценивалось по высоте растений в травостое (см), проективному покрытию (%) на делянках, по мощности дернины (см), плотности травостоя (количество побегов на 1 м²) и накоплению сырой биомассы (г/м²). Надземную биомассу растений измеряли в конце вегетационного периода, рассчитывали в г сухой массы на 1 м².

В качестве информативных физиологических показателей эффективности воздействия мелиорантов на рост овсяницы красной - использовали содержание пигментов пластид и интенсивность фотосинтеза. Концентрацию пигментов пластид определяли на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония) в спиртовой вытяжке по оптической плотности в максимумах поглощения при длинах волн 665 и 649 нм для хлорофиллов *a* и *b*, при 470 нм для каротиноидов [173]. Интенсивность фотосинтеза определяли в открытой системе при оптимальном температурном режиме и освещенности с помощью инфракрасного газоанализатора LI-COR-850 (LI-COR, США). Пробы листьев овсяницы красной отбирали в 3-кратной биологической и 2-кратной лабораторной повторностях в каждом варианте опыта. Содержание абсолютно сухого вещества в листьях определяли высушиванием при 105°C.

Для оценки достоверности различий использовали *t*-критерий Стьюдента. Статистически значимыми считали различия при $p < 0.05$, высокий уровень значимости различий - при $p < 0,001$. Статистическая обработка данных проведена с использованием стандартных пакетов описательной и сравнительной статистики программы Microsoft Excel.

Появление первых всходов посеянных растений в эксперименте было зафиксировано во всех трех вариантах одновременно сразу после схода снежного покрова в мае 2018 г. Дружные и качественные всходы отмечены в вариантах с

использованием осадка сточных вод, что позволило предполагать стимулирующее действие указанного мелиоранта на процесс прорастания семян. Однако прорастание семян происходило в большей степени по трещинам, где дольше задерживалась влага. В конце вегетационного сезона на всех площадках сформировались примитивные фитоценозы с разным проективным покрытием. В обоих опытных вариантах это был густой, хорошо развитый травостой яркого изумрудно-зеленого цвета с высоким проективным покрытием. На делянках со сплошным нанесением осадка сточных вод и верховым посевом травосмеси (вариант 2) оно составило 100 %, с фрагментарным (вариант 1) – 87 %, во втором случае прорастание семян наблюдалось главным образом на свободных от слоя осадка сточных вод участках опытных делянок, и в меньшей степени – на участках, покрытых слоем мелиоранта. На контрольных площадках отметили разреженный травостой, проективное покрытие составило не более 15 %; высота овсяницы красной в конце сезона вегетации составила в среднем 8.1 см. Красный цвет листьев растений свидетельствовал о выраженном недостатке элементов питания, прежде всего азота и фосфора, что можно объяснить недостатком в песке влаги и питательных элементов. Высота растений овсяницы красной в опытных вариантах была в 3.5-4.5 раза больше, чем в контроле. Растения на контрольных площадках только вегетировали, а на опытных – находились в фазе цветения.

В конце третьего вегетационного периода (в 2020 г.) на опытных вариантах с применением осадка сточных вод были сформированы сообщества растений, обладающих интенсивным ростом и развитием, листья и стебли имели ярко зеленый цвет и блестящую поверхность. Высота растений в них в 6 раз превосходила образцы на контрольных площадках. Высокое проективное покрытие (100 %) и плотность травостоя (в 1.7-4.4 раза больше контроля) в вариантах с применением осадка сточных вод обусловили и существенное для северо-запада РФ накопление биомассы [11]. Надземная фитомасса овсяницы красной в контроле не превышала $100,7 \pm 3,2$ г/м² (1 т/га), тогда как в опытных вариантах в 29 и 56 раз больше.

Общее число видов на искусственно созданном фитоценозе и адаптировавшихся к специфическим для них условиям (с учетом входящих в основной посевной состав) в 2020 г. увеличилось до 21, у семи из них наблюдался полный цикл развития. Это позволяет считать искусственно созданное растительное сообщество как экологически устойчивое, имеющее перспективы к самостоятельному существованию.

В конце четвертого сезона исследований (2021 г.) различия между опытными площадками и контролем сохранились: высота растений овсяницы красной в контроле была ниже, чем в опытных вариантах (1 и 2) 3.5 раза и в 4.8 раза, соответственно. Запасы надземной фитомассы в августе 2021 года на опытных площадках были в 8-14 раз больше, чем в контроле (табл. 5.5).

Если принять в среднем продолжительность вегетационного периода 80 дней (от отрастания до укоса зеленой массы), то наибольший среднесуточный прирост фитомассы оказался в варианте со сплошным покрытием делянок ОСВ, что почти в 14 раз эффективнее, чем на контрольных площадках (табл. 6.5).

Таблица 5.5. Морфологические характеристики *Festuca rubra* при влиянии осадка сточных вод на четвертый сезон вегетации

Показатель	Вариант		
	(К)	1(О)	2(О)
Высота растений, см	16.20±0.5	56.33±1.4	77.50±1.5
Надземная фитомасса, г/м ²	203.0±56.0	1674.5±230.5	2877.5±235.5
Среднесуточный прирост фитомассы, г сухой массы/м ² сут.	2.5	20.9	36.0
Примечание. 1 – вариант с фрагментарным нанесением осадка сточных вод, 2 – вариант с нанесением осадка сточных вод сплошным слоем.			

Таким образом, осадок сточных вод длительной выдержки, в максимальной степени прошедший процессы гумификации и выщелачивания, может рассматриваться как перспективный и, что особенно важно, дешевый мелиорант,

пригодный для повышения плодородия песчаного техногрунта и создания на них высокопродуктивных противозрозионных фитоценозов.

Одним из наиболее важных показателей, дающих представление об особенностях протекания процесса фотосинтеза в посевах и потенциальных возможностях продуктивности растений, является мощность фотосинтетического аппарата. Представление о развитии фотосинтетического аппарата дают данные о содержании пигментов пластид, которые используют как показатель потенциальных возможностей фотосинтетического аппарата [117].

В течение четвертого вегетационного сезона оценили влияние осадка сточных вод на показатели работы фотосинтетического аппарата овсяницы красной, как доминирующего вида искусственных фитоценозов, созданных на песчаных техногрунтах. Первое, что обращает на себя внимание, это содержание сухого вещества в ассимилирующих органах. Максимальная оводненность листьев (68-75%) отмечена в варианте 2 с большим количеством влагоудерживающего компонента (осадка сточных вод), в контрольных вариантах содержание воды в листьях не более 60% (табл. 5.6).

В начале вегетации суммарное содержание хлорофиллов в листьях овсяницы красной в контроле составило 3.3 мг/г сухой массы. В опытном варианте 1 содержание зеленых пигментов незначительно выше в 1.2 раза. При сплошном нанесении осадков сточных вод (вариант 2) содержание хлорофиллов по сравнению с контролем увеличивается в 1.8 раза (табл. 2). Различия в разных вариантах опыта оказались достоверны при $p < 0.05$. Количество каротиноидов достоверно отличалось от контроля только в варианте 2 (больше в 1.2 раза). От уровня обеспеченности растений минеральным питанием, особенно азотным зависит формирование фотосинтетического аппарата и регулирование процессов хлорофиллообразования. Недостаток азота сильно снижает концентрацию хлорофилла в ассимиляционной ткани, особенно в фазу вегетативного роста [60]. Показано, что при однократном внесении осадка сточных вод накопление азота в надземной массе злаков сеяных фитоценозов сопоставимо с применением высоких доз минеральных комплексных удобрений для повышения питательной ценности

кормов [17]. Полученные данные опытного варианта 2 подтверждают эти закономерности. Кроме того, отметили, что под действием азота в пуле хлорофиллов происходит большее накопление хлорофилла *b* и снижение величины соотношения хлорофиллов. Усиление синтеза хлорофилла *b* способствует увеличению светопоглощающей функции ассимилирующих органов. Так, если в контроле соотношение *a/b* составляет 3.3, то при сплошном варианте с осадком сточных вод – 2.9 (табл. 5.6).

В конце июля вклад листьев злаковых культур, в общий пигментный фонд, начиная с фазы колошения снижается [15]. В связи с этим отмечаем снижение концентрации зеленых пигментов в контроле и варианте 1, но различия между ними недостоверны. Максимальное накопление всех фотосинтетических пигментов (6.69 мг/г сухой массы хлорофиллы, 0.95 мг/г сухой массы каротиноиды) получено только во втором варианте, что на 11-17% больше, чем в предыдущем сроке наблюдений и в 3 раза больше контроля (табл. 2). Очевидно, что высокая обеспеченность азотом в этом варианте позволила поддерживать высокий уровень биосинтеза хлорофилла.

В конце вегетационного сезона возможно уже пожелтение листьев, которое сопровождается уменьшением содержания фотосинтетических пигментов во всех вариантах эксперимента. Особенно надо отметить деланки, где осадок сточных вод нанесен сплошным слоем. На них при высокой плотности травостоя, которая в 2.5-4 раза превышает показатели первого варианта и контроля, отмечено полегание и закручивание особей, что очень сильно нарушает условия светового и водного режимов. Поэтому здесь зафиксировали резкое снижение количества фотосинтетических пигментов: на 45% хлорофиллов и 40% каротиноидов. В контрольных площадках уменьшение количества зеленых пигментов не превысило 17% относительно июльских значений, тогда как в варианте 1 количество пигментов не изменилось.

В целом, следует отметить, что изменения в содержании фотосинтетических пигментов в листьях овсянницы красной в опытных вариантах с применением осадка сточных вод на протяжении всего сезона вегетации в большей степени

связаны с долей участия хлорофилла *b* и каротиноидов. Наибольший диапазон изменений отмечен в июле в варианте 2, где осадок вносили сплошным слоем. Увеличение биомассы в опытных вариантах привело к загущению растительного покрова и соответственно, к затенению особей и к повышению содержания хлорофиллов, особенно хлорофилла *b*. Увеличение содержания хлорофиллов при загущении посевов связано с активизацией метаболических процессов в системе биосинтеза хлорофилла и результат адаптации к условиям освещения (Куренкова, 1998). Повышенное содержание хлорофилла *b* является защитной функцией пигмента, оказывающего экранирующее действие на фотосинтетически активный хлорофилл *a* [64]. Соотношение хлорофиллов и каротиноидов один из важных показателей состояния ассимиляционного аппарата. Соотношение зеленых и желтых пигментов зависит от экологических факторов и в условиях Севера оно высокое [60]. Эта величина может указывать на большую или меньшую лабильность пигментного комплекса в конкретных условиях существования. Величина соотношения хлорофиллы/каротиноиды показывает, что в контроле этот показатель находится в диапазоне, характерном для большинства таксономических групп растений (4-5), а в опытных вариантах этот показатель увеличен до 6.3-7.5, что свидетельствует о уменьшении доли желтых пигментов в фотосинтетическом комплексе овсяницы красной.

На основе данных о концентрации хлорофиллов можно рассчитать хлорофилльный индекс (ХИ), как произведение содержания хлорофилла во всех фотосинтезирующих органах на их сухую массу на единицу площади фитоценоза. В среднем за год с помощью энергии, поглощенной 1 кг хлорофилла любой растительной ассоциации, связывается 145 углерода [12]. Это позволяет рассматривать ХИ в качестве показателя продуктивности и стока углерода за вегетационный период. Величина ХИ в условиях подзоны средней тайги европейского Северо-Востока у однолетних с/х культур составляла 15.8-21.0 кг/га, у многолетних 12.9-21.0 кг/га. Наибольший хлорофилльный индекс для однолетних растений отмечен у овса, у многолетних трав – у клевера красного. Большинство культурных растений образуют фитоценозы с ХИ 30-40 кг/га [60]. В

пределах величин ХИ 6-24 кг/га установлена прямолинейная зависимость между ХИ и аккумуляцией углерода [127]. Средние величины аккумуляции углерода в биомассе растений за вегетацию у однолетних культур составляли 2.3-4.3, у многолетних 1.7-2.7 т С/га [60].

Если рассматривать искусственно созданные фитоценозы с максимальным проективным покрытием овсяницы красной, то хлорофилльный индекс для них будет равен 4-105 кг/га (табл. 5.6).

Таблица 5.6. Содержание и соотношение фотосинтетических пигментов в листьях *Festuca rubra* в искусственно созданных фитоценозах

Вариант опыта		% сухого вещества	Сумма, мг/г сухой массы		a/b	Хл./Кар.	ХИ, кг/га
			Хл.	Кар.			
30.06.21	К	41	3.29±0.14	0.66±0.02	3.3	5.0	
	1	31	3.81±0.10*	0.63±0.02	3.1	6.0	
	2	26	6.04±0.24*	0.81±0.03**	2.9	7.5	
29.07.21	К	44	2.15±0.09	0.55±0.01	3.4	3.9	
	1	37	2.05±0.04	0.40±0.01**	3.1	5.1	
	2	25	6.69±0.08**	0.95±0.02**	2.9	7.0	
19.08.21	К	43	1.75±0.07	0.43±0.01	3.4	4.1	4
	1	35	2.05±0.09*	0.40±0.02	3.0	5.1	34
	2	32	3.65±0.10**	0.58±0.02**	2.9	6.3	105
Примечание. Приведены средние значения со стандартной ошибкой. К – контроль, 1 – вариант с фрагментарным нанесением ОСВ, 2 – вариант с нанесением ОСВ сплошным слоем. Хл. – сумма хлорофиллов a и b. Кар. – каротиноиды. Достоверность различий между контролем и вариантами опыта: * при p< 0.05, ** при p<0.001.							

В опытных вариантах по сравнению с контролем ХИ больше в 8.5 - 26 раз. В среднем содержание углерода в надземной фитомассе составляет 40% [60]. По нашим данным депонирование углерода в фитомассе овсяницы красной за

вегетационный период 2021 года составило в контроле 0.8 т С/га, в опытном варианте с фрагментарным внесением ОСВ – 6.7 т С/га, при сплошном нанесении – 11.5 т С/га. Однако, расчет продуктивности хлорофилла (количество углерода, аккумулированное в результате фотосинтеза, в расчете на 1 кг хлорофилла за вегетацию) показал, что наибольшая эффективность работы характерна для контрольных площадок (222 кг С), в варианте 1 несколько ниже (197 кг С), а во втором варианте даже в 2 раза меньше (110 кг С), несмотря на более высокие абсолютные показатели фитомассы и содержания хлорофиллов. Повышение содержания хлорофиллов в ассимилирующих органах на делянках с большим количеством осадка сточных вод (вариант 2), особенно теневого компонента – хлорофилла *b*, при сильной загущенности фитоценоза и снижении освещенности является результатом улучшения светособирающих свойств фотосинтетического аппарата. Но эта ситуация не стала оптимальной стратегией адаптации этого вида, а привела к снижению эффективности работы единицы хлорофилла, так как при изменении светового режима значительная доля хлорофилла требовалась для улавливания кванта света. Избыточное увлажнение, особенно в августе, (оводненность листьев 68-75% - табл. 2), отмеченное в этом же варианте из-за повышенной влагоемкости компонентов осадка сточных вод, также вызвало нарушения в пигментном фонде.

Определение интенсивности фотосинтеза листьями овсяницы красной (при оптимальных условиях температуры и освещенности - 12-17° С, 20-30 кЛк) выявило наличие достоверных отличий между вариантами контроля и опытов с применением осадка сточных вод. В июне наибольшие скорости фотосинтеза (11.81 мг СО₂/г сухой массы ч) получены в варианте 2, что выше почти в 3 раза соответственных данных в контроле и в 2 раза в варианте 1 (рис. 5.2).

В середине вегетационного сезона отметили незначительное изменение скорости газообмена (не более 5%) на всех делянках, независимо от применения мелиорантов. В конце вегетационного периода в контроле интенсивность фотосинтеза увеличилась на 15%, тогда как в опытных вариантах выявлено достоверное снижение интенсивности фотосинтеза в 2.5-10 раз. Можно отметить,

что на контрольных делянках происходит плавное увеличение фотосинтетической активности ассимилирующих органов в течение всего сезона вегетации, с максимумом в конце августа.

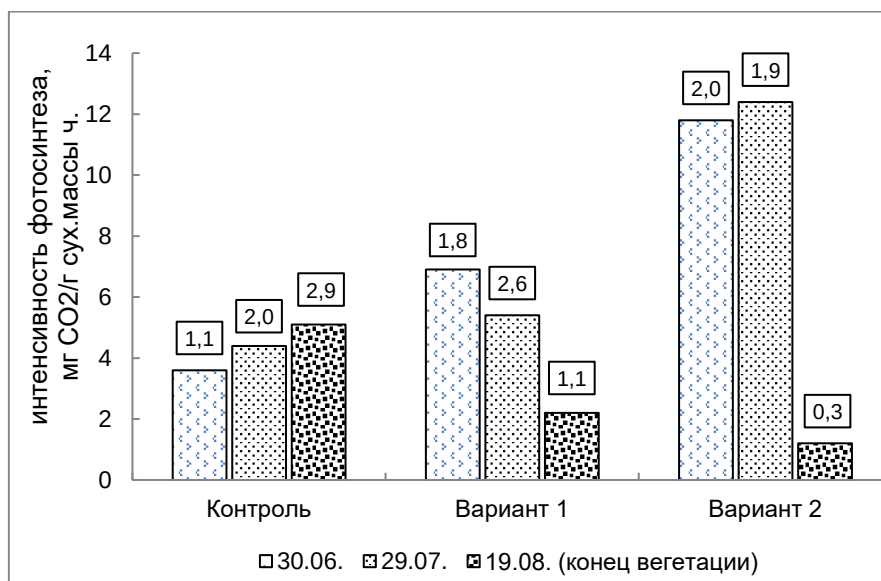


Рисунок 5.2. Фотосинтетическая активность *Festuca rubra* в искусственно созданных фитоценозах (с применением осадка сточных вод). К – контроль, вариант 1 – фрагментарное нанесение осадка сточных вод, вариант 2 – нанесение осадка сточных вод сплошным слоем. Сверху над столбцами обозначено ассимиляционное число (эффективность работы хлорофилла, мг $\text{CO}_2/\text{г}$ хлорофилла час)

В опытных вариантах с мелиорантом картина деятельности фотосинтетического аппарата несколько иная. Наибольшая скорость процессов ассимиляции углекислоты отмечается в начале и середине лета, когда еще не происходит сильного загущения в посевах и изменения освещенности. В конце вегетации, которая в условиях Крайнего Севера приходится на конец августа, отмечаем резкое снижение фотосинтетической активности, особенно при избытке осадка сточных вод.

Эффективность работы фотосинтетического аппарата можно оценить, рассчитав ассимиляционное число, которое показывает сколько CO_2 фиксируется единицей хлорофилла в час. Видно, что, несмотря на высокие показатели

содержания хлорофиллов и скорости фотосинтеза в начале и середине вегетации при большом количестве внесенного осадка сточных вод, эффективность работы фотосинтетического аппарата сильно уменьшается в августе - почти в 6 раз (рис. 5.2). Это говорит об ингибировании фотосинтетического аппарата избытком минерального питания и изменением светового режима. Таким образом, применение осадка сточных вод увеличивает фотосинтетическую продуктивность овсяницы красной по сравнению с контролем. Однако для оптимальной работы фотосинтетического аппарата (ФА) овсяницы важно учитывать дозы вносимого нетрадиционного удобрения, поскольку избыток минерального питания сначала способен вызвать резкий всплеск роста надземной фитомассы, но в дальнейшем происходит снижение продуктивности и ингибирование работы ФА.

5.3. Технология экологической стабилизации пылящих поверхностей хранилищ горнопромышленных отходов на Кольском Севере

Предложена технологическая схема проведения работ по биологической рекультивации откосов ограждающей дамбы хвостохранилища АНОФ-2 КФ АО «Апатит» с использованием осадка сточных вод АО «Апатитыводоканал» в целях развития противоэрозионных фитоценозов без дополнительных инвестиций дорогостоящих минеральных удобрений, без применения почвогрунтов и дополнительных инвестиций в дорогостоящие удобрения (рис. 5.3).

С иловых накопителей водопроводно-канализационного хозяйства АО «Апатитыводоканал» техникой КАМАЗ-Илосос произведена загрузка ОСВ в емкость объемом 8м³. Затем осуществляется его транспортировка на хвостохранилище. Расстояние между иловыми накопителями и хвостохранилищем составляет около 7 километров. Далее производится нанесение мелиоранта и последующий за этим посев семян поверх его.

В 2022 г. разработанная нами технология экологической стабилизации пылящих поверхностей хранилищ горнопромышленных отходов была внедрена на

апатитнефелиновом хвостохранилище АНОФ-2 КФ АО «Апатит» (Приложение 2).



Рисунок 5.3. Технологическая схема проведения работ по биологической рекультивации откосов ограждающей дамбы хвостохранилища АНОФ-2 КФ АО «Апатит» с использованием осадка сточных вод АО «Апатитыводоканал»

5.4. Практические рекомендации по использованию отходов селитебного комплекса (осадка сточных вод) для экологически эффективной ревитализации нарушенных горными работами ландшафтов на Кольском Севере

В настоящей работе исследована эффективность способа ревитализации хвостохранилища КФ АО «Апатит», основанного на использовании мелиоранта ОСВ регионального ВКХ АО «Апатитыводоканал». Результаты этой работы послужили основой для разработки методических рекомендаций по его применению «ПОРА восстанавливать Арктику. Использование отходов производства и потребления региональных водопроводно-канализационных хозяйств для реабилитации нарушенных ландшафтов» [2023] [95].

Основные их положения заключаются в следующем:

1. На поверхность песчаного техногрунта мелиорант ОСВ наносится одним из двух способов – сплошным или фрагментарным нанесением без перемешивания с техногрунтом вручную или с использованием специализированной автотехники. Выбор способа зависит от возможностей и стоимости работ.

2. Предпочтительнее фрагментарное нанесение, для которого характерны наиболее оптимальные показатели работы фотосинтетического аппарата растений-рекультивантов, более низкая себестоимость метода, а также опасность возникновения полуанаэробных или анаэробных условий в периоды с обилием осадков, приводящих к увеличению оводненности тканей в растениях, снижению интенсивности фотосинтеза и их продуктивности.

3. Посев семян растений-рекультивантов следует производить классическим способом прямого посева непосредственно по поверхности грунта (под слой ОСВ), либо поверх ОСВ.

4. Нормы высева семян и виды высеваемых растений-рекультивантов не зависят от способа и доз использования ОСВ, подбираются в соответствии с особенностями рекультивируемого объекта, решаемыми задачами и личным предпочтением.

5.5. Экономическая оценка ревитализации, нарушенных горными работами ландшафтов, с применением предлагаемых мелиорантов на основе отходов селитебного комплекса (осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод)

В рамках представленных в работе исследований были подготовлены расчеты затрат на выполнение основных этапов создания посевного фитоценоза на песчаных техногенных грунтах (табл. 5.7). В целях уточнения перечня технологических операций, видов и стоимости работ были использованы: «Прайс-лист на работы по озеленению и благоустройству территорий» [<https://www.rolllawn.ru/rulonnyj-gazon-cena-za-m2.html>] и «Технологический

регламент 108-Р от 11.05.2017 г. по производству работ и содержанию территорий зеленых насаждений» [2017] [119].

Таблица 5.7. Стоимость выполнения этапов создания посевного фитоценоза на техногенном грунте

Услуга	Стоимость, руб./ м ²		
	традиционным способом с землеванием	с применением мелиоранта ОКС без землевания	с применением мелиоранта ОСВ без землевания
Грунт растительный, слой 10 см	110	-	-
Семена (40-50 гр./м ²)	40	40	40
Минеральные удобрения	20	-	-
Итого материалы:	170	40	40
Культивация, планирование и выравнивание существующего грунта планировщиком трактором AVANT	80	-	-
Разнос и планировка привозного плодородного грунта (слой 10 см) с уплотнением и выравниванием	100	-	-
Посев семян с заделкой граблями и прикатыванием	30	30	-
Посев семян без заделки граблями и прикатывания – (под слой ОСВ или поверх влажного осадка)	-	-	10
Полив водой - 1 раз	20	-	-
Орошение ОКС методом дождевания	-	20	-
Нанесение жидкого ОСВ - 1 раз	-	-	20
Работа без материалов:	230	50	30
ИТОГО:	400 руб./ м ²	90 руб./ м ²	70 руб./ м ²
	4.0 млн. руб./га	0.9 млн. руб./га	0.7 млн. руб./га

Расчет затрат на создание 1 м² посевного фитоценоза на техногенном грунте хвостохранилища показал, что себестоимость данной технологии во многом зависит от метода его создания и стоимости материалов. Так, в себестоимости технологии

стоимость материалов при традиционном способе (с землеванием) с учетом всех эксплуатационных затрат (выравнивание поверхности грунта, семена и минеральные удобрения) составляет 42.5%, при нетрадиционном способе (с внесением мелиорантов и без землевания), при котором затраты включают только стоимость семян, в случае использования осветленных коммунальных стоков – 44.4% от их суммарной стоимости.

Основным ценообразующим фактором при традиционном способе создания посевного ценоза, являются затраты на такие виды работ как выравнивание поверхности техногенного грунта, разнос, транспортировку, планировку и нанесение привозного плодородного грунта, формирование его 10 см слоя, уплотнение и выравнивание, применение минеральных удобрений, посев семян с заделкой граблями и прикатыванием, составляющие 57.5% от их суммарной стоимости. При нетрадиционном способе с внесением мелиорантов и без землевания в случае использования осветленных коммунальных стоков, включающем только посев семян с заделкой граблями и прикатыванием, орошение грунта осветленными коммунальными стоками методом дождевания – 55.6% от их суммарной стоимости (рис. 5.3).

Необходимо подчеркнуть, что в случае использования мелиоранта на основе осветленных коммунальных стоков основным ценообразующим фактором являются затраты на приобретение семян, которые составляют – 57.1 % от их суммарной стоимости. Затраты на работы без стоимости материалов, включающие посев семян без заделки граблями и прикатывания и нанесение самого мелиоранта – (под слой ОСВ или поверх влажного осадка) составляют 42.9% от их суммарной стоимости.

Согласно представленным расчетам итоговой стоимости, создание посевного фитоценоза на техногенном грунте хвостохранилища по инновационной технологии без землевания экономически более эффективно: при использовании ОКС в 4.4 раза, ОСВ – 5.7 раза, а традиционным способом - сопоставимо со стоимостью озеленительных работ на пустошах с применением привозного торфа, проводимых Мончегорским лесхозом (Мурманская область, РФ) (3.6 млн. руб./га) (рис. 5.3) [128], а

также со стоимостью проведения аналогичных работ в более благоприятных климатических и геохимических условиях.

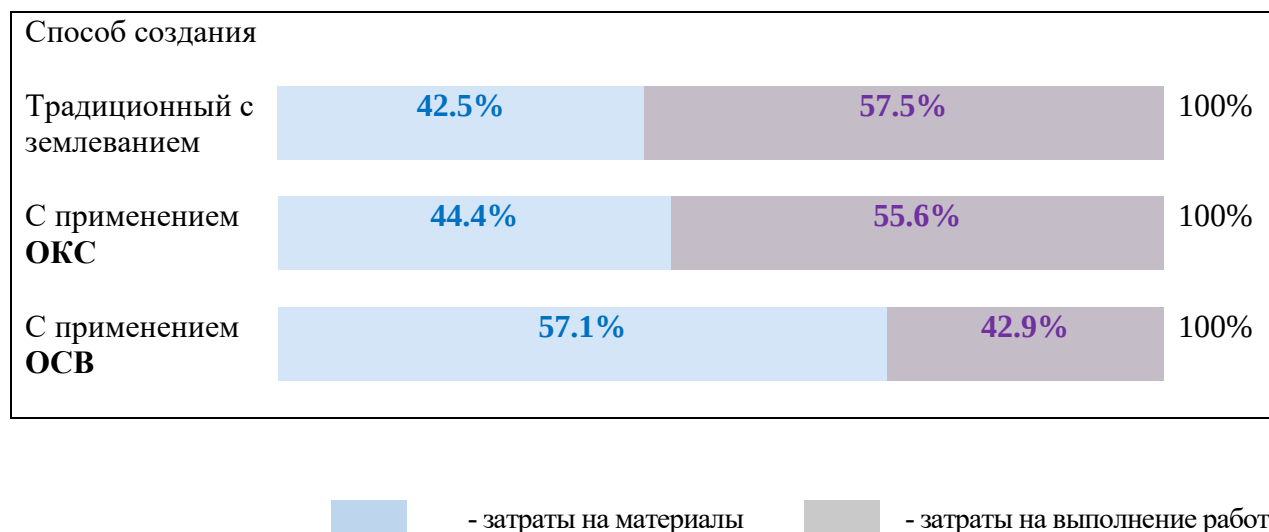


Рисунок 5.3. Структура затрат на осуществление этапов создания посевного фитоценоза разными способами на техногенном грунте

Для дальнейшего повышения эффективности предлагаемого метода создания посевных фитоценозов и поддержания ее работоспособности необходимо придерживаться разработанных направлений в его развитии, а именно: более широкому применению дешевых нетрадиционных мелиорантов, повышающих биогенность (NPK-статус) техногенного грунта, обогащению ассортиментов растений новыми относительно толерантными к техногенному грунту видами, произрастающими в Мурманской области, проведению лабораторных и полевых исследований, направленных на определение оптимальных способов и доз внесения осветленных коммунальных стоков и осадка сточных вод. При условии доработки технология, разработанная применительно к отходам апатитонефелинового производства, может быть использована в аналогичных производствах Арктической зоны РФ и других стран.

Выводы по главе 5

1. Нетрадиционные удобрения в виде осветленных коммунальных стоков и осадка сточных вод оказали на показатели продуктивности не меньший эффект,

чем традиционные минеральные удобрения «Аммофос». Однако, с экономической точки зрения, эффективность применения отходов будет намного выше, если учитывать их доступность и дешевизну.

2. Выявлено увеличение суммарного содержания хлорофиллов у растений тимopheевки луговой, больше за счет хлорофилла b, при воздействии на почву нетрадиционных удобрений.

3. Компоненты пигментного комплекса (суммарное содержание хлорофиллов) можно использовать в качестве тестовой характеристики потенциальной продуктивности отдельных растений и посевов в целом.

4. Информативные показатели работы фотосинтетического аппарата доминантного вида овсяницы красной в созданном многолетнем противозерозионном фитоценозе, свидетельствуют о том, что осадки сточных вод длительной выдержки, в максимальной степени прошедший процессы гумификации и выщелачивания, может рассматриваться в качестве перспективного мелиоранта при проведении восстановительных мероприятий на песчаных техногрунтах в условиях Крайнего Севера, так как способен оказывать эффективное воздействие на продуктивность искусственно создаваемых растительных сообществ, особенно в первой половине вегетации.

5. Наиболее оптимальные показатели работы фотосинтетического аппарата характерны для способа с фрагментарным нанесением осадков сточных вод на техногрунт, так как при сплошном нанесении данного мелиоранта, характеризующегося высокой влагоудерживающей способностью, в периоды с обилием осадков, существует опасность создания полуанаэробных или анаэробных условий, приводящих к увеличению оводненности тканей в растениях, снижению интенсивности фотосинтеза и их продуктивности.

6. Предлагаемый метод создания посевного фитоценоза на техногенном грунте хвостохранилища на основе применения нетрадиционных мелиорантов местного предприятия ВКХ АО «Апатитыводоканал» - осветленные коммунальные стоки и осадки сточных вод экономически более эффективен по сравнению с традиционным, предполагающим проведение работ по землеванию, так как он не

требует существенных капитальных вложений. Его достоинствами являются низкие эксплуатационные расходы и затраты на проведение работ.

7. Предложена технологическая схема проведения работ по биологической рекультивации откосов ограждающей дамбы хвостохранилища АНОФ-2 КФ АО «Апатит» с использованием осадка сточных вод АО «Апатитыводоканал» в целях развития противоэрозионных фитоценозов без дополнительных инвестиций дорогостоящих минеральных удобрений, без применения почвогрунтов и дополнительных инвестиций в дорогостоящие удобрения

8. Разработаны практические рекомендации по использованию отходов селитебного комплекса (осадка сточных вод) для экологически эффективной ревитализации нарушенных горными работами ландшафтов на Кольском Севере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основании выполненных автором теоретических обобщений, комплекса лабораторных, натурных и аналитических исследований получено новое решение актуальной научной проблемы предотвращения пылеобразования с песчаных поверхностей техногенных массивов отходов обогащения апатит-нефелиновых руд и карьерных выработок. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждена экологически эффективные возможность и способы биорекультивации техногенных пылящих поверхностей с использованием (при использовании) отходов селитебного комплекса техногенных почвообразований в европейской части Арктической зоны РФ за счет целенаправленного формирования эдафических свойств техногрунтов соответствующих структуре видового состава противоэрозийных травяных фитоценозов.

Показана принципиальная возможность ускоренного формирования искусственного посевного фитоценоза на техногенных грунтах хвостохранилища апатитнефелинового производства и песчаного карьера в условиях Арктической зоны РФ с использованием в качестве мелиорантов на основе осветленных коммунальных стоков и осадка сточных вод регионального предприятия АО «Апатитыводоканал» без проведения торфо- и землевания и нанесения защитных полимерных реагентов.

Установлено, что осветленные коммунальные стоки местного предприятия по химическим показателям (рН, содержанию суммы легкорастворимых солей в прокаленном и сухом остатке стоков, величине отношения одно- и двухвалентных катионов для ОКС) классифицируются как слабоминерализованные и, соответствующие требованиям СанПиН. Под их действием проблема осолонцевания грунта хвостохранилищ не актуальна, однако они могут положительно влияют на прорастание семян, рост и развитие растений в искусственно создаваемом фитоценозе, что свидетельствует о, стимулирующем процесс самозарастания песчаных поверхностей нарушенных ландшафтов.

Осадки сточных вод региональных водоканализационных хозяйств по содержанию в нем основных биогенных элементов (азота, фосфора, калия) также пригодны для стимулирования самозарастания хвостохранилища даже при его однократном и фрагментарном поверхностном нанесении на техногенный грунт.

Подтверждена пролонгированность действия химической мелиорации нефелиновых песков с применением осветленные коммунальные стоки и осадки сточных вод для повышения биогенности (содержания NPK-статуса) техногрунта хвостохранилища АНОФ-2 при создании растительного покрова как способа его консервации.

Использование обоих видов предлагаемых мелиорантов способствует интенсивному росту растений и улучшению качества посевных фитоценозов, но зависит от количества и способа их применения.

Орошение нефелиновых песков осветленными коммунальными стоками при соблюдении условий многократного равномерного распределения поливочной воды в количестве 380 т/га по площади имеет пролонгированный эффект на питательный режим грунта и достаточно для создания устойчивого растительного покрова на отходах рудообогащения без землевания. Однако по причине промывного водного режима песчаных нефелиновых песков эффект от применения осветленных коммунальных стоков, полученный в лабораторных условиях, требует верификации в условиях полевого эксперимента для признания предлагаемого метода альтернативой традиционным биорекультивационным мероприятиям малоплодородных техногрунтов.

Способ сплошного нанесения на техногенный грунт осадка сточных вод в отличие от одноразового фрагментарного его применения способствует формированию более качественного противозрозионного фитоценоза.

Мелиорант на основе осадка сточных вод можно использовать как перед посевом семян нанесением фрагментарно (вроссыпь) на поверхность техногенного грунта, так и поверх произведенных посевов.

Предпочтительнее фрагментарное нанесение осадка сточных вод, для которого характерны наиболее оптимальные показатели работы

фотосинтетического аппарата растений-рекультивантов, более низкая себестоимость метода, а также опасность возникновения полуанаэробных или анаэробных условий в периоды с обилием осадков, приводящих к увеличению оводненности тканей в растениях, снижению интенсивности фотосинтеза и их продуктивности.

Предлагаемый в работе метод создания посевного фитоценоза на техногенно нарушенных территориях с применением местных мелиорантов на основе осветленных коммунальных стоков и осадков сточных вод экономически более эффективен по сравнению с традиционным, предусматривающим проведение землевания, при использовании осветленных коммунальных стоков - в 4,4 раза, осадка сточных вод – в 5,7 раза, так как не требует существенных капитальных вложений. Его достоинствами являются более низкие эксплуатационные расходы и затраты на проведение работ.

Предложенная технологическая схема, основанная на использовании широкодоступных и дешевых, являющихся к тому же, дополнительными источниками питательных веществ, влагоемких мелиорантов в виде отходов селитебного комплекса, решает проблемы низкой продуктивности песчаных техногрунтов и пылеподавления. Предлагаемые в работе меры будут способствовать росту прибыли предприятий водоканализационных хозяйств за счет снижения штрафных санкций за сверхнормативный сброс отходов и возможности совершенствования технологических процессов, позволят вовлечь в хозяйственный оборот большой объем, требующих утилизации, отходов и, тем самым, добиться существенного снижения их негативного воздействия на окружающую среду.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что сформированный при проведении исследований в условиях Кольского Севера общеметодологический подход к выбору оптимального уровня мелиорирующего и удобрительного эффекта комплексных смесей жидких бытовых отходов исходя из экологически обусловленных темпов изменений биологической продуктивности и проективного покрытия травяных противоэрозионных фитоценозов может быть использован при создании подобных

технологий экологической стабилизации пылящих техногенных поверхностей в любых других климатических зонах.

Значение полученных результатов исследования для практики заключается в том, что на их основании в природоохранных целях предложен новый, экономически более эффективный и экологически безопасный, по сравнению с традиционным, способ создания высококачественных противозерозийных фитоценозов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ОКС – осветленные коммунальные стоки;

ОСВ – осадки сточных вод;

ВКХ – водопроводно-канализационное хозяйство;

СЗФК – северо-западная фосфорная компания;

СЗФО – Северо-Западный федеральный округ;

АНОФ-2 – вторая апатито-нефелиновая обогатительная фабрика.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Аборигенные виды растений – местные (indigenous plants, native plants) растения, существование которых на конкретной территории связано с процессами естественного флорогенеза.

Агрофитоценоз – (др.-греч. ἀγρός — «поле», φυτόν — «растение» и κοινός — «общий») — растительное сообщество, создаваемое человеком путём посева или посадки возделываемых растений (например, кормовых культур для животных).

Биорекультивация земель – комплекс мероприятий, направленных на восстановление продуктивности нарушенных земель в процессе природопользования, а также на улучшение условий окружающей среды. В рекультивации земель различают два этапа: технический - подготовка земель для последующего целевого использования и биологический – восстановление плодородия, осуществляемое после технического этапа и включающее комплекс агротехнических и фитомелиоративных мероприятий, направленных на возобновление исторически сложившейся совокупности флоры, фауны и микроорганизмов.

Биота – (от др.-греч. βιότη — жизнь) — исторически сложившаяся совокупность видов живых организмов, объединённых общей областью распространения в настоящее время или в прошедшие геологические эпохи. В состав биоты входят как представители клеточных организмов (растения, животные, грибы, бактерии, протисты и пр.), так и бесклеточные организмы (например, вирусы).

Биотоп - (био... и греч. τόπος — место), участок земной поверхности (суши или водоёма) с однотипными абиотическими условиями среды (рельеф, почвы, климат и т. п.), занимаемый тем или иным биоценозом.

Гидропоника – выращивание растений без грунта, на питательных растворах и разных почвозаменителях (термовермикулите, минеральной вате, опилках и пр.).

Мелиоранты – вещества, предназначенные для улучшения почв с неблагоприятными физическими и химическими свойствами (кислых, щелочных, загрязнённых, малогумусных и др.). Мелиоранты применяют для физического, химического и микробиологического воздействия на почву с целью нейтрализации кислотности, щёлочности, ликвидации химического загрязнения, улучшения микробиологического режима, увеличения растворимости фосфора, повышения плодородия.

Микробиом – это все микроорганизмы бактерии, дрожжи, грибы, вирусы, простейшие, объединяемые общим названием.

Окультуренные почвы – почва, свойства которой направленно изменены для выращивания более высокого урожая, например, получены нейтральные значения pH, высокое содержание гумуса.

Онтогенез (у растений) – жизненный цикл, или индивидуальное развитие, - комплекс последовательных и необратимых изменений жизнедеятельности и структуры растений от возникновения из оплодотворенной яйцеклетки, зачаточной или вегетативной почки до естественной смерти.

Питательный раствор для гидропоники – питательный раствор представляет собой водный раствор веществ, необходимых растению для жизни и роста.

Пионерный вид – вид, первым заселяющий свободные от жизни участки пространства и участвующий в первичной сукцессии.

Растение-эдификатор – вид растений с сильно выраженной средообразующей способностью, то есть определяющий строение и, в известной степени, видовой состав растительного сообщества — фитоценоза. Эдификатор оказывает сильное воздействие на среду и через неё — на жизнь прочих участников сообщества.

Ревитализация – (от лат. re... — возобновление и vita — жизнь, дословно: возвращение жизни) в контексте экологии обозначает процесс воссоздания и оживления старых нарушенных земель.

Сукцессия – (от лат. succedio — преемственность, наследование) — последовательная закономерная смена одного биологического сообщества (фитоценоза, микробного сообщества и т. д.) другим на определённом участке среды во времени в результате влияния природных факторов (в том числе внутренних сил) или воздействия человека.

Фитоценоз – (от др.-греч. φυτόν «растение» + κοινός «общий») — растительное сообщество, существующее в пределах одного биотопа (среды обитания).

Экосистема – биологическая система, состоящая из сообщества живых организмов (биоценоз), среды их обитания (биотоп), системы связей, осуществляющей обмен веществ и энергии между ними.

Ювенильный период у растений– начальный этап онтогенеза растений – рост зародыша (его прорастание). Начинается с первых делений клеток зародышевого корешка и заканчивается началом формирования вегетативных органов (листья, почки, стебли) взрослой формации. Процесс, частично скрытый для внешнего наблюдения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева И.И., Родман Л.С. Ботаника. - 4-е изд., перераб. и доп. изд. - М.: КолосС, 2010. - 584 с.
2. Андрианова Ю.Е., Тарчевский И.А. Хлорофилл и продуктивность растений. Москва: Наука, 2000. - 135 с.
3. Аргунов Н.Д., Ватуева О.Б., Веселов В.М., Саломатина Н.А., Пильгун В.А. Некоторые свойства и особенности осадков сточных вод // Агрохимический вестник, 2013, № 4. - С. 39-43.
4. Архипов, А. В. Техногенные месторождения. Разработка и формирование: монография / А. В. Архипов, С. П. Решетняк; под науч. ред. акад. Н. Н. Мельникова — Апатиты: КНЦ РАН, 2017. - 175 с.
5. Атабаева С. Д. Физиолого-биохимические основы действия тяжелых металлов на растения: автореф. дис. ... докт. биол. наук. Алматы, 2007. - 34 с.
6. Батова Ю.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф., Титов А.Ф. Влияние кадмия на некоторые физиологические процессы у растений тимофеевки луговой (*Phleum pretense* L.) // Труды КарНЦ РАН. 2013. № 3. С. 52-58.
7. Беляева О.Б. Светозависимый биосинтез хлорофилла / Под ред. Ф. Ф. Литвина. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. - 232 с.
8. Ботаника: Морфология и анатомия растений: Учебн. пособие для студентов пед. ин-тов по биол. и хим. спец. / А.Е. Васильев, Н.С. Воронин, А.Г. Еленевский и др. 2-е изд., перераб. М.: Просвещение. 1988. — 480 с.
9. Буинова М. Г. Пигменты растений Западного Забайкалья // Ботанический журнал. - 1987. Т. 72. №8. 1089-1097.
10. Виноградов Д.В., Василева В.М., Макарова М.П., Кочуров Б.И., Лупова Е.И. Агроэкологическое действие осадка сточных вод и его смесей с цеолитом на агроценозы масличных культур // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 127-133. doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-127-133.
11. Вихман М. И., Кислых Е. Е., Лисеенко Л. А. Урожайность и качество кормовых трав в зависимости от метеорологических факторов в условиях

регулируемого плодородия почв. В: Материалы 40-й Международной научной конференции «Агрохимические приёмы повышения плодородия почв и продуктивности сельскохозяйственных культур в адаптивно-ландшафтных системах земледелия» ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова. М.: Изд-во ВНИИА; 2006. С. 127–129.

12. Воронин П.Ю., Ефимцев Е.И., Васильев А.А., Ватковский О.С., Мокроносов А.Т. Проективное содержание хлорофилла и биоразнообразие растительности основных ботанико-географических зон России // Физиология растений. 1995. Т. 42. № 2. С. 295-302.

13. Воронин П.Ю., Макеев А.В., Гукасян И.А. и др. Хлорофильный индекс и ежегодный фотосинтетический сток углерода в сфагновые ассоциации // Физиология растений. 1997. Т. 44. № 1. С. 31-38.

14. Головкин Б. Н. Переселение травянистых многолетников на Полярный Север. Л.: Наука, 1973. - 266 с.

15. Головкин Т.К., Далькэ И.В., Дымова О.В., Захожий И.Г., Табаленкова Г.Н. Пигментный комплекс растений природной флоры Европейского Северо-Востока // Известия Коми Научного центра УрО РАН. 2010. № 1. С. 39-46.

16. Гершенкоп, Хохуля, Мухина, 2010 Гершенкоп А. Ш., Хохуля М. С., Мухина Т. Н. Переработка техногенного сырья Кольского полуострова // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2010. – № 1. – С. 4–8.

17. Горбачева Т.Т., Иванова Л.А., Макаров Д.В., Максимова В.В. Биотестирование полимерных реагентов для пылеподавления поверхности хвостохранилищ нефелиновых песков // Обогащение руд. 2019, №5. С. 52-56. ISSN 0202-3776.DOI: 10.17580/or.2019.05.10 - <https://www.rudmet.ru/catalog/journals/details/2/>.

18. ГОСТ 17.5.3.04–83 (СТ СЭВ 5302-85). Охрана природы. Земли. Общие требования к рекультивации земель. Nature protection. Lands. Reclamation general requirements. М.: Стандартиформ; 1984.

19. ГОСТ 25100–2011. Межгосударственный стандарт. Грунты. Классификация. 2013-01-01. М.: Стандартиформ; 2011.

20. ГОСТ Р 54534-201. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель (издание официальное). Москва. Стандартинформ. 2019.].
21. ГОСТ Р 57446-2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия. Best available techniques. Disturbed lands reclamation. Restoration of biological diversity. ОКС 13.020.70. 13.020.99. Дата введения 2017-12-01.
22. ГОСТ Р 59060-2020. НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. Охрана окружающей среды. ЗЕМЛИ. Классификация нарушенных земель в целях рекультивации. Natureprotection. Lands. Classification of disturbed lands for the purpose of reclamation. ОКС 13.020.01. Дата введения 2021-04-01.
23. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году» / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. — М.: Минприроды России; МГУ имени М. В. Ломоносова, 2020. – 1000 с.].
24. Давыдов, А.С. Опыт применения сточных вод для орошения /А.С. Давыдов, А.В. Тиньгаев, В.Б. Шепталов // Вестник АГАУ. 2008. №12. С. 43-45.
25. Данилович Д.А., Эпов А.Н., Канунникова М.А. Анализ данных работы очистных сооружений российских городов - основа для технологического нормирования // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2015. № 3-4. С. 18-28.
26. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2021 году, <https://gov-murman.ru/region/environmentstate>.
27. Дымова О.В., Головки Т.К. Фотосинтетические пигменты в растениях природной флоры таежной зоны европейского северо-востока России // Физиология растений. 2019. Т. 66, № 3. С. 198-206.
28. Евдокимова Г. А., Гершенков А. Ш., Воронина Н. В. (2008). Микробиологические процессы в системе добычи и переработки апатит-нефелиновых руд с использованием оборотного водоснабжения. СПб.: Наука, 102 с.

29. Евдокимова Г. А., Переверзев В.Н., Зенкова И.В., Корнейкова М.В., Редькина В.В. Эволюция техногенных ландшафтов (на примере отходов апатитовой промышленности) / -Апатиты: изд-во Кольского НЦ РАН, 2010.- 146 с.
30. Ермаков А.С., Ермакова А.Я. Восстановление нарушенного почвенного покрова отрицательного воздействия от промышленных предприятий // Горные науки и технологии, №1, 2014 - Горные науки и технологии. С. 24-29.
31. Зюзин Ю. Л. Суровый лик Хибин. Мурманск: Рекламная полиграфия, 2006. - 236 с.
32. Иванова Л. А. Перспективы гидропонного выращивания растений в условиях Мурманской области / Л. А. Иванова, В. А. Котельников. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2006. 106 с.
33. Иванова Л.А. Способ создания экологически чистого покрытия и питательная среда для его выращивания: пат. № 2393665, заявка № 2007126884 20.01.2009. Зарегистрировано в Госреестре изобретений РФ 10 июля 2010 г. Бюл. № 2. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2393665C2_20100710.
34. Иванова Л.А., Костина В.А., Кременецкая М.В., Иноземцева Е.С. Биологическая рекультивация хвостохранилищ в Заполярье: проблемы и перспективы исследований // Ботанические сады в 21 веке: сохранение биоразнообразия, стратегия развития и инновационные решения: Матер. междунар. научн.-практич. конф., 18-21 мая 2009 г. – Белгород: ИПЦ «ПОЛИТЕРРА», 2009. С. 488-492.
35. Иванова Л.А., Костина В.А., Кременецкая М.В., Иноземцева Е.С. Ускоренное формирование противозрозионных травостоев на техногенно-нарушенных территориях: Заполярье // Вестник МГТУ, том 13, №4/2, 2010 г. стр. 977-983.
36. Иванова Л.А., Иноземцева Е.С., Кременецкая М.В. Способ создания газонной дернины на органоминеральной основе: пат. № 2477947 заявка № 2011127457/13 04.07.2011. Зарегистрировано в Госреестре изобретений РФ 20 марта 2013 г. Бюл. № 9.

37. Иванова Л.А., Горбачева Т.Т., Слуковская М.В., Кременецкая И.П., Иноземцева Е.С. Инновационные технологии рекультивации нарушенных земель // Экология производства, 2014. - №2. - С. 58-68.
38. Иванова Л.А., Кременецкая И.П., Горбачева Т.Т., Слуковская М.В., Марковская Е.Ф., Дрогобужская С.В. Реабилитация антропогенно нарушенных территорий в условиях Арктики с применением гидропонной экспресс-технологии // Труды XIV Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 3-4 апреля 2017 г. – Изд-во КНЦ РАН, 2017. – С. 421-423.
39. Иванова Л. А., Горбачева Т. Т., Макаров Д. В., Румянцева А. В., Лусис А. В., Кони́на О. Т. Применение ковровой дернины при биологической рекультивации хвостохранилищ в условиях Крайнего Севера // Гидротехническое строительство. – 2019. – № 7. – С. 89–94.
40. Информация об основных результатах экономической деятельности, уровне жизни населения Мурманской области за январь- март 2022 г. Министерство экономического развития Мурманской области. 10 с
41. Информационно-технический справочник по НДТ ИТС 10–2015 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов», утвержденный приказом Росстандарта от 15 декабря 2015 года № 1580.
42. Казнина Н.М., Титов А.Ф., Лайдинен Г.Ф., Батова Ю. В. Влияние промышленного загрязнения почвы тяжелыми металлами на морфологические признаки растений *Phleum pratense* L. // Труды КарНЦ РАН. 2009, № 3. С. 50–55.
43. Калинин В.Т., Кременецкая И.П., Иванова Л.А., Слуковская М.В., Горбачева Т.Т., Алексеева С.А., Лащук В.В., Дрогобужская С.В. Приемы адаптивных технологий при создании культурфитоценозов в условиях техногенных ландшафтов Субарктики, загрязненных тяжелыми металлами // Вестник Кольского научного центра РАН, 2014. № 2. С. 80-89.
44. Капелькина Л.П. Экологические аспекты оптимизации техногенных ландшафтов. – СПб., 1993. – 191 с.,

45. Капелькина, Л. П. Использование отходов в качестве мелиорантов почв и удобрений: критерии пригодности / Л. П. Капелькина // ЭКиП: Экология и промышленность России. - 2006. - N 4. - С. 4-7.
46. Капелькина, Л. П. Использование осадка сточных вод для рекультивации земель на полигонах ТБО / Л. П. Капелькина, Ю. И. Скорик, Л. С. Венцюлис // Ресурсосберегающие технологии. Экспресс-информация. ВИНТИ. - 2010. - N 8. - С. 15-20.
47. Капелькина Л.П. О естественном зарастании и рекультивации нарушенных земель севера // Успехи современного естествознания. 2012. № 11-1. С. 98-102.
48. Капелькина Л. П., Сумина О. И., Лавриненко И.А. Самозарастание нарушенных земель Севера. Монография / Авторы: Л. П. Капелькина, О. И. Сумина, И.А. Лавриненко, О.В. Лавриненко, Е. А. Тихменев, С. И. Миронова - СПб.: Изд-во ВВМ, 2014.— 204 с.
49. Капелькина Л.П. Технологические аспекты рекультивации нарушенных земель на севере России // Проблемы региональной экологии. 2021. №5. С. 96-99.
50. Касатиков В., Фатеев В., Кагина О. Осадок сточных вод как удобрение: можно ли избежать нежелательных воздействий //Ежедневное аграрное обозрение. Опубликовано 26.07.2008. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://agroobzor.ru/ahim/a-118.html>. Дата просмотра 10.12.2015.
51. Кириллова Е. Управляемые "хвосты" // Хибинский вестник. 2006. № 28. 1 с.
52. Комонов С.В., Комонова Е.Н. Ветровая эрозия и пылеподавление. Курс лекций. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2008. – 192 с. 8.
53. Комплексное устойчивое управление отходами. Горнодобывающая промышленность: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. И. Петухов, Е. Гидаракос, А. Н. Ерехинский [и др.]; под ред. В. И. Петухова; Министерство образования и науки Российской Федерации, Дальневосточный федеральный университет, Российская академия естествознания. – М.: Акад. естествознания, 2016. – 638 с. – ISBN 978-5-91327-431-1.

54. Кондратюк Е.Н. Промышленная ботаника / Е.Н. Кондратюк, В.П. Тарабрин, В.И. Бакланов, Р.И. Бурда, А.И. Хархота. – Киев, 1980. – 260 с.
55. Копчик Г.Н., Смирнова И.Е., Копчик С.В., Захаренко А.И., Турбаевская В.В. Эффективность ремедиации почв техногенных пустошей вблизи комбината "Североникель" на Кольском полуострове // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2015. № 2. С. 42-48.
56. Копчик Г.Н., Копчик С.В., Смирнова И.Е. Альтернативные технологии ремедиации техногенных пустошей в Кольской субарктике // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1375-1391.
57. Кордаков И.А. Способ рекультивации золоотвалов и хвостохранилищ. Авторское свидетельство//«Бюллетень изобретений». 1976. № 20.
58. Красавцева Е.А., Горбачева Т.Т., Иванова Л.А., Максимова В.В. Коммунальные стоки в опытах по рекультивации отходов обогащения лопаритовых руд // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 3 (87). С. 44-55. DOI: 10.23968/2305-3488.2021.26.3.44-55.
59. Кретинин А.В., Борисов В.Г., Жушман В.Н. Способ борьбы с пылью на действующих хвостохранилищах // Цветная металлургия. — 1988. — № 3. — С. 55–57.
60. Куренкова С.В. Пигментная система культурных растений в условиях подзоны средней тайги европейского Северо-Востока. Екатеринбург, 1998. 113 с.
61. Лагутина Т.Б., Попова Л.А., Шалагинова Л.Н. Влияние нетрадиционных органических удобрений на плодородие и агроресурсный потенциал аллювиальных дерновых почв Архангельской области // Агрохимический вестник, 2016, № 4. - С. 19-22.
62. Ламанова Т. Г., Шеремет Н. В. Состояние агропопуляций *Phleum pratense* (*Poaceae*) на отвалах в лесостепи Кузнецкой котловины // Раст. ресурсы. 2011. Т. 47, вып. 4. С. 61–74.
63. Лебедев Ю. В., Ковалев Р. Н., Олейникова Л. Н. Основные направления инновационного развития горнопромышленных комплексов // Вестник СГУиТ. – 2019. – Т. 24. – № 3. – С. 158–168.

64. Литвин Ф.Ф., Звалинский О.В. К теории хроматической и нехроматической адаптации фотосинтеза // Успехи современной биологии. 1983. Т. 95, № 3. С. 339-357.
65. Лукьянова Л.М., Локтева Т.Н., Булычева Т.М. Газообмен и пигментная система растений Кольской Субарктики (Хибинский горный массив). Апатиты, 1986. 127 с.
66. Лусис А.В., Горбачева Т.Т., Иванова Л.А. Применение осветленных коммунальных стоков (ОКС) и осадка сточных вод (ОСВ) в качестве мелиорантов для рекультивации отвалов отходов рудообогащения (хвостов). Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019» (Севастополь, 23 – 26 сентября 2019 г.) / под ред. Л. И. Лукиной, Н. В. Ляминой. – Севастополь: СевГУ, 2019. – С. 940–944.
67. Лычагин Е. В., Синица И. В. Совершенствование методов закрепления пылящих поверхностей // ГИАБ. — 2007. — №8. — С. 136–140.
68. Любименко В.Н. Избранные труды. Работы по фотосинтезу и приспособлению растений к свету. Киев: Издательство АН Украинской ССР, 1963. Т. 1. 614 с.
69. Макаров Д.В., Нестерова А.А., Васильева Т.Н., Суворова О.В., Нестеров Д.П., Мазухина С.И., Маслобоев В.А. Геоэкологические исследования хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд // Материалы международной конференции «Современные экологические проблемы Севера (к 100-летию со дня рождения О.И. Семенова-Тян-Шанского). Ч.I. Апатиты: КНЦ РАН, 2006. С. 25-26.
70. Максимова, В. В. Исследование растворимости пылевых частиц в почвенном растворе при различных температурах (на примере хвостов обогащения лопаритовых руд) / В. В. Максимова, Е. А. Красавцева, В. А. Маслобоев, Д. В. Макаров // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2021. – Т. 24. – № 1. – С. 107-117.
71. Марковская Е.Ф., Шмакова Н.Ю. Растения и лишайники Западного Шпицбергена: экология, физиология. Петрозаводск: Изд-во Петр-ГУ, 2017. 270 с.

72. Маслобоев, В. А. Оценка экологической опасности хранения отходов добычи и переработки медно-никелевых руд / В. А. Маслобоев, С. Г. Селезнев, Д. В. Макаров, А. В. Светлов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 3. – С. 138-153.

73. Маслобоев В.А., Макаров Д.В., Бакланов А.А., Амосов П.В., Кони́на О.Т., Светлов А.В., Туртанов А.В. Опыт применения и сравнительная оценка методов закрепления пылящих поверхностей хвостохранилища АНОФ-2 АО «Апатит» // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения - 2017). Материалы Международной научной конференции. Красноярск, 2017. С. 413-416.

74. Маслобоев В.А., Светлов А.В., Кони́на О.Т., Митрофанова Г.В., Туртанов А.В., Макаров Д.В. Выбор связующих реагентов для предотвращения пылеобразования на хвостохранилищах переработки апатит-нефелиновых руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. №2. С. 161-171.

75. Маслова Т.Г., Попова И.А., Попова О.Ф. Критическая оценка спектрофотометрического метода количественного определения каротиноидов // Физиология растений. 1986. Т. 33. № 3. С. 615-619.

76. Маслова Т.Г., Мамушина Н.С., Зубкова Е.К., Буболо Л.С., Тютерева Е.В. Структурно-функциональная характеристика фотосинтетического аппарата листа зимнезеленых растений в ходе круглогодичной вегетации // Ботанический журнал. 2015. № 11. С. 1142-1153.

77. Мерзлая Г.Е. Использование органических отходов в сельском хозяйстве // Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева, 2005, т. XLIX, № 3. - С. 48-54.

78. Месяц С.П., Волкова Е.Ю. Обоснование способов сохранения техногенного минерального сырья, складированного в отвалы отходов рудообогащения//Вестник Мурманского государственного технического университета. 2009. Т.12. № 4. С. 735-741.

79. Михайлова Т.Л., Хохряков А.В. Рациональное землепользование в цветной металлургии // Известия ВУЗов. Горный журнал. 1993. № 6. С. 97-137.
80. Мокроносов А.Т. Мезоструктура и функциональная активность фотосинтетического аппарата. Свердловск, 1978. 31 с.
81. Мокроносов А.Т. Фотосинтез и изменение содержания CO_2 в атмосфере // Природа. 1994. № 7. С. 25-27.
82. Наквасина Е.Н., Земцовская О.Н., Денисова А.И. Использование злаковых трав для биологической рекультивации нарушенных земель Севера // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия «Гуманитарные и социальные науки». 2014, №4. С. 81–89.
83. Немировский А.В. Разработка метода формирования намывного хвостохранилища, устойчивого к ветровым потокам: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2016. — 19 с.
84. Никонов В. В. Общие особенности первичной биологической продуктивности и биогеохимических циклов на Крайнем Севере (на примере Кольского Севера) // Сообщества Крайнего Севера и человек. М.: Наука, 1985. С. 79-90.
85. Обручева Н. В. Запуск роста осевых органов и его подготовка при прорастании семян, находящихся в вынужденном покое / Н. В. Обручева, О. В. Антипова // Физиология растений. 1994. Т. 41, № 3. С. 443-447.
86. Обручева Н. В. Физиология инициации прорастания семян / Н. В. Обручева, О. В. Антипова // Физиология растений. 1997. Т. 44, №2. С. 287-302.
87. Патент 2513786 РФ. Способ закрепления пылящих поверхностей / Ф. И. Лобанов, Е.М. Чукалина, Л.Н. Козлов, Е.Ю. Глоба, Ю.В. Каплунов // Оpubл. в БИ. — 2014. — № 11.
88. Переверзев В. Н., Подлесная Н. И. (1986). Биологическая рекультивация промышленных отвалов на Крайнем Севере. Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 103 с.
89. Переверзев В.Н. Лесные почвы Кольского полуострова. М.: Наука, 2004. 232 с.

90. Першина Н. А., Полищук А. И., Свистов П. Ф. К вопросу о закислении атмосферных осадков в Российской Арктике // Труды ГГО. – 2008. – Т. 558. – С. 211–232.
91. Петров К.А. Криорезистентность растений: эколого-физиологические и биохимические аспекты. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 276 с.
92. Петров С. В., Макашев В. А. Опасные ситуации техногенного характера и защита от них: ЭНАС; Москва; 2008. 191 с.
93. Петрова, Т. А., Рудзиш, Э. (2021). Рекультивация техногенно-нарушенных земель с применением осадков сточных вод в качестве мелиорантов. Записки Горного института, 251, 767-776. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.16>.
94. Полевая геоботаника. Т. 3 / Под. общ. ред. Е.М. Лавренко, А.А. Корчагина. – М.-Л.: Наука, 1964. – 530 с.
95. ПОРА восстанавливать Арктику. Использование отходов производства и потребления региональных водопроводно-канализационных хозяйств для реабилитации нарушенных ландшафтов / Л.А. Иванова, А.В. Лусис, Т.Т. Горбачева, Е. А. Красавцева; отв. ред. докт. биол. наук Л.П. Капелькина, канд. биол. наук Е.А. Боровичев. — Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2023. — 77 с.: ил. ISBN 978-5-91137-494-5. Doi:10.37614/978.5.91137.494.5.
96. Постановление Правительства Мурманской области от 29 марта 2013 года № 139-ПП/5. <http://docs.cntd.ru/document/465600568>.
97. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 04.12.2014 № 536 "Об утверждении Критериев отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду" (Зарегистрирован 29.12.2015 № 40330).
98. Приказ комитета РФ по рыболовству № 20 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» Российская газета, N 46, 05.03.2010.

99. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 29 января 2020 г. №12-47/2081 «О разъяснении положений Методики разработки НДС веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей, утвержденную приказом».
100. Раменская М. Л. Анализ флоры Мурманской области. Л: Наука;1983. 216 с.
101. Российская Федерация. Законы. Об отходах производства и потребления: Федеральный закон № 89-ФЗ: Принят Государственной Думой 22 мая 1998 года: одобрен Советом Федерации 10 июня 1998 года: с изм. и доп., вступ. в силу с 14 июня 2020 года. - Текст: электронный. - URL : <http://www.kremlin.ru/acts/bank/12555> (дата обращения: 23.01.2023).
102. Руководство по контролю и регулированию почвенного плодородия орошаемых земель / под ред. В. Н. Щедрина. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2017. 137 с.
103. СанПиН 2.1.7.573-96 «Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения» (<http://docs.cntd.ru/document/1200000109>).
104. Сариев А.Х., Зеленский В.М. Травосмеси и нормы высева многолетних злаковых трав // Вестник КрасГАУ. 2009. №5. С. 40-45.
105. Свод правил СП 32.13330.2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03–85». 2012.
106. Сельмен В.Н., Ильинский А.В. Перспективы использования органоминеральных удобрений, полученных на основе осадков сточных вод // Экологические аспекты мелиорации, гидротехники и водного хозяйства АПК. Материалы международной научно-практической конференции. - М.: Изд-во ВНИИГиМ, 2017. - С. 225-228.
107. Семенец Е. С., Свистов П. Ф., Талаш А. С. Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 27-36.

108. Скворцов В.Э. Атлас-определитель сосудистых растений таежной зоны Европейской России. – М.: Гринпис России, 2000. – 587 с.
109. Слемнев Н.Н., Шереметьев С.Н., Маслова Т.Г., Цоож Ш., Алтанцоож А. Разнообразие фотосинтетического аппарата растений Монголии: анализ биологических, экологических и эволюционных рядов // Ботанический журнал. 2012. Т. 97. № 11. С. 1377-1396.
110. Совещание «О практических аспектах утилизации прошедших обработку осадков сточных вод». - Текст : электронный // Комитет Совета Федерации по аграрно-продовольственной политике и природопользованию: официальный сайт. - 2017. - URL : http://agrarian.council.gov.ru/activity/activities/other_activities/79450/ (дата обращения : 23.01.2023).
111. Софронова В.Е., Чепалов В.А., Дымова О.В., Головкин Т.К. Роль пигментной системы вечнозеленого кустарничка *Ephedra monosperma* в адаптации к климату центральной Якутии // Физиология растений. 2014. Т. 61. № 2. С. 266-274.
112. Софронова В.Е., Дымова О. В., Головкин Т.К., Чепалов В. А., Петров К. А. Адаптивные изменения пигментного комплекса хвои *Pinus sylvestris* при закаливании к низкой температуре // Физиология растений. 2016. Т. 63. № 4. С. 461-471.
113. Справочник по климату СССР. Мурманская область. Вып. 2, Мурманская область, метеорологические данные за отдельные годы / Главное управление гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР. Ч. 1: Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. Л.: Гидрометеоиздат, 1966-1968. 60 с.
114. Справочник по климату СССР, вып. 2, Мурманская область, метеорологические данные за отдельные годы / Главное управление гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР. Ч. 1. Температура воздуха. Мурманск, 1973; ч. 2. Осадки. Мурманск, 1975; ч. 3. Снежный покров. Мурманск, 1975; ч. 4. Ветер. Мурманск. 1976.
115. Тарасова Н.П., Ингель Ф.И., Макарова А.С. Зеленая химия как

инструмент снижения рисков, обусловленных воздействием химически опасных объектов на окружающую среду // Химическая физика. 2015. Т.34. № 6. С. 5-11.

116. Тарчевский И.А. Основы фотосинтеза. М., 1977. 251 с.

117. Тарчевский И.А., Андрианова Ю.Е. Содержание пигментов как показатель мощности развития фотосинтетического аппарата у пшеницы // Физиология растений. 1980. Т. 27. № 2. С. 341-347.

118. Терентьева И.А., Кашулин Н.А., Денисов Д.Б. Оценка трофического статуса субарктического озера Имандра // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2017. Т. 20. № 1-2. С. 197-204.

119. Технологический регламент 108-Р от 11.05.2017 г. по производству работ и содержанию территорий зеленых насаждений в Санкт-Петербурге - <https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2018/07/12/...pdf>.

120. Тимофеева Ю. Р. Влияние горно-обогатительного комбината на динамику площадей нарушенных земель // Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование-2. Материалы Международной научно-практической конференции. В 2 т. Т.2. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining Information and Analytical (Scientific and Technical Journal). – 2015. - №11 (специальный выпуск 60-2). – 648 с. – М.: Издательство «Горная книга».

121. Тиходеева М.Ю., Лебедева Т.Х. Практическая геоботаника (анализ состава растительных сообществ). – СПб.: С.-Пб. университет, 2015. – 166 с.

122. Третьякова А. С., Мухин В. А. *Синантропная флора Среднего Урала*. Екатеринбург; 2001. 147 с.

123. Тужилкина В.В., Бобкова К.С., Мартынюк З.П. Хлорофилльный индекс и ежегодный фотосинтетический сток углерода в хвойные фитоценозы на Европейском Севере России // Физиология растений. 1998. Т. 45. № 4. С. 594-600.

124. Турчанинов И.А., Красносельский Э.Б., Ключникова А.М., Талалаев С.М. Проблемы закрепления пылящей поверхности действующих хвостохранилищ Заполярья // Инженерная геология. 1981. № 5. С. 107-110.

125. Тютерева Е.В., Дмитриева В.А., Войцеховская О.В. Хлорофилл В как источник сигналов, регулирующих развитие и продуктивность растений // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52. № 5. С. 843-855.
126. Цельникер Ю.Л. Физиологические основы теневыносливости древесных растений. М., 1978. 215 с.
127. Цельникер Ю.Л., Малкина И.С. Хлорофилльный индекс как показатель годичной аккумуляции углерода древостоями леса // Физиология растений. 1994. Т. 41. № 2. С. 325-330.
128. Цены на работы по озеленению и благоустройству территорий в Московской области - <https://www.rolllawn.ru/rulonnyj-gazon-cena-za-m2.html>.
129. Чеботарев Н.Т., Найденов Н.Д., Юдин А.А. Агроэкологическая оценка применения осадков сточных вод в качестве удобрения сельскохозяйственных культур // Сельскохозяйственная науки. 2016. № 1-2. С. 31-36.
130. Чепик Ф.А. Этапы онтогенеза древесных растений и их использование в диагностических целях // Материалы 3-го международного совещания «Сохранение лесных генетических ресурсов Сибири», 23-29 августа 2011, Красноярск, Россия Учреждение Российской академии наук Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН. С. 147. ISBN 978-5-903055-29-6.
131. Шалыгина Р.Р., Редькина В.В. Предварительные результаты анализа таксономического состава водорослей и цианобактерий в хвостах обогащения апатит-нефелиновых руд АНОФ-2 // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения Г.М. Крепса и 110-летию со дня рождения О.И. Семенова-Тян-Шанского. 2016. – С. 163–165.
132. Шепталов В.Б., Давыдов А.С. Влияние удобрительных поливов сточными водами на урожайность кукурузы и однолетних трав // Вестник АГАУ, 2011. № 11. С. 11 -13.
133. Шмакова Н.Ю., Марковская Е.Ф. Фотосинтетические пигменты растений и лишайников арктических тундр Западного Шпицбергена // Физиология растений. 2010. Т. 57. № 6. С. 1–7.

134. Экология и охрана природы Кольского севера – Апатиты, 1994. С. 54-70.
135. Якимова Т.С. Влияние осадков городских сточных вод на качество растениеводческой продукции // Агрохимический вестник, 2013, № 2. - С 25-26.
136. Ahmed, W., Staley, C., Hamilton, K. A., Beale, D. J., Sadowsky, M. J., Toze, S., & Haas, C. N. (2017). Amplicon-based taxonomic characterization of bacteria in urban and peri-urban roof-harvested rainwater stored in tanks. *Science of the Total Environment*, 576, 326–334. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.090.
137. Alikhasi M., Kouchakzadeh M., Baniani E. The effect of treated municipal wastewater irrigation in non-agricultural soil on cotton plant // *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2012. Vol. 14. P. 1357-1364.
138. Amato F., Nava S., Lucarelli F., Querol X., Alastuey A., Baldasano J.M., Pandolfi M.A. A review on the effectiveness of street sweeping, washing and dust suppressants as urban PM control methods//*The Science of the Total Environment*. 2010. Vol. 408. P. 3070-3084.
139. Bahgat M., Dewedar A., Zayed A. Sand-filters used for wastewater treatment: buildup and distribution of microorganisms // *Water Research*. 1999. Vol.33. P. 1949-1955.
140. Barker D.J., Stuckey D.C. A review of soluble microbial products (SMP) in wastewater treatment systems // *Water Research*. 1999. Vol. 33 (14). P. 3063-3082.
141. Bednarek, W., Dresler, S., & Tkaczyk, P. (2015). Nitrogen fractions in timothy grass (*Phleum pratense* L.) fertilized with different doses of mineral fertilizers. *Journal of Elementology*, 20(1), 49–58. doi: 10.5601/jelem.2014.19.2.633.
142. Berry J.A., Downton W.J.S. Environmental regulation of photosynthesis // *Photosynthesis V. II.* / Ed. Govindjee. Academic Press: New York, 1981. P. 263-343.
143. Blankenship R.E. *Molecular Mechanisms of Photosynthesis*. Blackwell Science, 2002. 321 p.
144. Brook, R. Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease / R. Brook, S. Rajagopalan, C. Pope, J. Brook, A. Bhatnagar, A. Diez-Roux, F. Holguin, Y.

Hong, R. Luepker, M. Mittleman, A. Peters, D. Siscovick, S. Smith, L. Whitsel, J. Kaufman // *Circulation*. – 2010. – Vol. 121 (21). – P. 2331-2378.

145. Buikema, N. Stabilisation of iron mine tailings through biocalcification / N. Buikema, B. Zwissler, E. Seagren, T. Oommen, S. Vitton // *Environmental Geotechnics*. — 2018. — Vol. 5 (2). — P. 94-106.

146. Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, S. M. J., & Han, M. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research*, 115, 195–209. doi: 10.1016/j.watres.2017.02.056.

147. Cao, L. M. Impacts of airborne particulate matter and its components on respiratory system health / L. M. Cao, Y. Zhou, Z. Zhang, W. W. Sun, G. Mu, W. H. Chen // *Chinese journal of preventive medicine*. – 2016. – Vol. 50 (12). – P. 1114-1118.

148. Chen W., Wu L., Frankenberger W.T., Chang A.C., Soil enzyme activities of long term reclaimed wastewater-irrigated soils // *Journal of Environmental Quality*. 2008. Vol. 37. P. 36-42.

149. Corriveau, M. Direct characterization of airborne particles associated with arsenic-rich mine tailings: Particle size, mineralogy and texture / M. Corriveau, H. Jamieson, M. Parsons, J. Campbell, A. Lanzirotti // *Applied Geochemistry*. — 2011. — Vol. 26 (9-10). — P. 1639-1648.

150. Cuttriss A., Pogson B. Carotenoids // *Annual Plant Reviews*. Boca Raton: CRC Press. LLC, 2004. P. 57-91.

151. Derome, J. Effects of heavy metal contamination on macronutrient availability and acidification parameters in forest soil in the vicinity of the Harjavalta Cu-Ni smelter, SW Finland / J. Derome, A. J. Lindroos // *Environmental Pollution*. — 1998. — Vol. 99. — P. 225-232.

152. Edahbi, M. Environmental challenges and identification of the knowledge gaps associated with REE mine wastes management / M. Edahbi, B. Plante, M. Benzaazoua // *Journal of Cleaner Production*. — 2019. — Vol. 212. — P. 1232-1241.

153. Ellis K.V. Slow sand filtration as a technique for the tertiary treatment of municipal sewages // *Water Research*. 1987. Vol. 21(4). P.403-410.

154. Evans, J. R. Carbon fixation profiles do reflect light absorption profiles in leaves // *Aust. J. Plant Physiol.* 1995. V. 22. P. 865-873.
155. Haig S.J., Collins G., Davies R.L., Dorea C.C. and Quince C. Biological Aspects of Slow Sand Filtration: Past, Present and Future // *Water Science and Technology.* 2011. Vol.11. P. 468-472.
156. Halonen, O., Tulkki, H., & Derome, J. (1983). Nutrient analysis methods. Research Notes from the Finnish Forest Research Institute, 121. 88 p.
157. Hamoda M.F., Al-Ghusain I., Al-Mutairi N.Z. Sand filtration of wastewater for tertiary treatment and water reuse // *Desalination.* 2004. Vol. 164 (3). P. 203-211.
158. Haneklaus, S. H., Schnug, E. (2016). Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero. Dordrecht: Springer, P. 95–125. doi: 10.1007/978-94-017-7612-7.
159. Harder R., Peters G.M., Svanström M., Khan S.J., Malander S. Estimating human toxicity potential of land application of sewage sludge: the effect of modeling choices // *International Journal of Life Cycle Assess.* 2017. Vol.22 (5). P. 731-743.
160. Inyinbor A.A., Bello O.S., Oluyori A.P., Inyinbor H.E., Fadiji A. E. Wastewater conservation and reuse in quality vegetable cultivation: Overview, challenges and future prospects//*Food Control.* 2019. Vol. 98. P. 489-500.
161. Ivanova L. A. (EN) Method for biologically recultivating industrial wastelands. (FR) Procédé de remise en culture biologique de terres appauvries sur le plan technogène. (RU) Способ биологической рекультивации техногенно-нарушенных земель. Pub. No.: WO/2011/084079. International Application No.:PCT/RU2010/000001. Publication Date: 14.07.2011. International Filing Date: 11.01.2010. IPC: A01B 79/02 (2006.01), A01G 1/00 (2006.01), A01G 31/00 (2006.01).
162. Ivanova, L.A., Gorbacheva, T.T., Makarov, D.V., Rumyantseva, A.V. (2019). Some aspects of physicochemical and biological methods for the conservation of apatite-nepheline tailings in the Far North. *Power Technology and Engineering*, 53 (1), 47–50. doi: 10.1007/S10749-019-01033-9.
163. Jenssen P.D., Krogstad T., Paruch A.M., Maehlum T., Adam K., Arias C.A., Heistad A., Jonsson L., Hellström D., Brix H., Yli-Halla M., Vråle L., Valve M. Filter

bed systems treating domestic wastewater in the Nordic countries - performance and reuse of filter media // *Ecological Engineering*. 2010. Vol. 36 (12). P. 1651-1659.

164. Jimenez B., Asano T. Acknowledge all approaches: the global outlook on reuse // *Water* 21. December 2004. P. 32-37.

165. Jones, D. L. (1998). Organic acids in the rhizosphere – a critical review. *Plant and Soil*, 205, 25–44. doi: 10.1023/A:1004356007312.

166. Kauppinen, A., Martikainen, K., Matikka, V., Veijalainen, A.-M., Pitkänen T., & Heinonen-Tanski, H. (2014). Sand filters for removal of microbes and nutrients from wastewater during a one-year pilot study in a cold temperate climate. *Journal of Environmental Management*, 133, 206–213. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.12.008.

167. Kaushik, R., Balasubramanian, R., & de La Cruz, A. A. (2012). Influence of air quality on the composition of microbial pathogens in fresh rainwater. *Applied and Environmental Microbiology*, 78, 2813–2818. doi: 10.1128/AEM.07695-11.

168. Kefeni K.K., Msagati T.A.M., Mamba B.B., Acid mine drainage: prevention, treatment options, and resource recovery: a review // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol.151. P. 475-493.

169. Krewski, D. Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society study linking particulate air pollution and mortality / D. Krewski, M. Jerrett, R. T. Burnett, R. Ma, E. Hughes, Y. Shi, M. C. Turner, C. A. Pope, G. Thurston, E. E. Calle, M. J. Thun, B. Beckerman, P. DeLuca, N. Finkelstein, K. Ito, D. K. Moore, K. B. Newbold, T. Ramsay, Z. Ross, H. Shin, B. Tempalski // *Research report: Health Effects Institute*. — 2009. — Vol. 140. — P. 5-136.

170. Kunacheva, C., David, C., & Stuckey, D. C. (2014). Analytical methods for soluble microbial products (SMP) and extracellular polymers (ECP) in wastewater treatment systems: A review. *Water Research*, 61, 1–18. doi: 10.1016/j.watres.2014.04.044.

171. Kuypers, M. M. M., Marchant, H. K., & Kartul, B. (2018). The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Review Microbiology*, 16, 263–276. doi: 10.1038/nrmicro.2018.9.

172. Liang, J. Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China / J. Liang, C. Feng, G. Zeng, X. Gao, M. Zhong, X. Li, X. Li, X. He, Y. Fang // *Environmental Pollution*. — 2017. — Vol. 225. — P. 681-690.

173. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determination of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents // *Biochem. Soc. Trans.* 1983. V. 11. № 5. P. 591–592.

174. Lilic, N. Dust and noise environmental impact assessment and control in Serbian mining practice / N. Lilic, A. Cvjetic, D. Knezevic, V. Milisavljevic, U. Pantelic // *Minerals*. — 2018.— Vol. 8. — P. 34. Long S.P., Humphries P.G., Falkowski S. Photoinhibition of photosynthesis in // *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 1994. V. 45. № 1. P. 633-662.

175. Loredó, J. Atmospheric Monitoring at Abandoned Mercury Mine Sites in Asturias (NW Spain) / J. Loredó, J. Soto, R. Álvarez, A. Ordóñez // *Environmental Monitoring and Assessment*. — 2006. — Vol. 130 (1-3). — P. 201-214.

176. Magwaza S. T., Magwaza L. S., Odindo A. O., Mditshwa A. Hydroponic technology as decentralised system for domestic wastewater treatment and vegetable production in urban agriculture: A review//*Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 698. P. 134-154.

177. McGill B. J. Towards a unification of unified theories of biodiversity. *Ecology Letters*. 2010;13(5):627–642. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01449.x>.

178. Masloboev V. A., Makarov D. V., Baklanov A. A., Amosov P. V., Seleznev S. G. Methods to reduce the environmental hazards of mining and processing of minerals in the Arctic regions. IMPC 2016: XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings. [Электронный ресурс]. – Quebec: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2016. – 11 p. CD:\Papers\impcPaper1001.pdf.

179. Mehta, U. The Association Between Ambient PM_{2.5} Exposure and Anemia Outcomes Among Children Under Five Years of Age in India / U. Mehta, S. Dey, S. Choudhury, S. Ghosh, J. Hart, A. Kuprad // *Environmental Epidemiology*. – 2021. – Vol.

5 (1). – P. 125.

180. Maslova T.G., Popova I.A. Adaptive properties of the plant pigment systems // *Photosynthetica*. 1993. V. 29. № 2. P. 195–203.

181. Norton-Brandao D.J., Scherrenberg S.M., van Lier J.B. Reclamation of used urban waters for irrigation purposes. A review of treatment technologies // *Journal of Environmental Management*. 2013. Vol. 122. P. 85-98.

182. Rana S., Bag S.K., Golder D., Mukherjee (Roy) S., Pradhan C., Jana B.B. Reclamation of municipal domestic wastewater by aquaponics of tomato plants // *Journal of Ecological Engineering*. 2011. Vol.37 (6), P. 981-988.

183. Redkina, V. V., Korneykova, M.V., & Shalygina, R.R. (2019). Microorganisms of the Technogenic Landscapes: The Case of Nepheline-Containing Sands, the Murmansk Region. Processes and Phenomena on the Boundary Between Biogenic and Abiogenic Nature. Springer, P. 561–579. doi: 10.1007/978-3-030-21614-6_30.

184. Ricart S., Rico A.M. Assessing technical and social driving factors of water reuse in agriculture: A review on risks, regulation and the yuck factor // *Agricultural Water Management*. 2019. Vol. 217. P. 426-439.

185. Porra R.J. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b // *Photosynth Res*. 2002. V. 73. P. 149–156.

186. Salgot M., Huertas E., Weber S., Dott W. and Hollender J. Wastewater reuse and risk: definition of key objectives // *Desalination*. 2006. Vol. 187. P. 29-40.

187. Scholz M. Slow Filtration. In: *Wetlands for Water Pollution Control (Second Edition)* Elsevier. 2016. P.61-68.

188. Seeger E.M., Braeckevelt M., Reiche N., Müller J.A., Kästner M. Removal of pathogen indicators from secondary effluent using slow sand filtration: optimization approaches // *Ecological Engineering*. 2016. Vol. 95. P. 635-644.

189. Scholz M. Slow Filtration. In: *Wetlands for Water Pollution Control (Second Edition)* Elsevier. 2016. P.61-68.

190. Smyntek P.M., Chastel J., Peer R., Anthony E., McCloskey J., Bach E., Wagner R., Bandstra J., Strosnider W. Assessment of sulphate and iron reduction rates during reactor start-up for passive anaerobic co-treatment of acid mine drainage and sewage // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2017. Vol. 18 (1). P. 76-84.
191. Strosnider W.H., Winfrey B.K., Peer R.A., Nairn R.W. Passive co-treatment of acid mine drainage and sewage: anaerobic incubation reveals are generation technique and further treatment possibilities // *Journal of Ecological Engineering*. 2013. Vol.61. P. 268-273.
192. Tapiaa A., Cornejo-La Torre M., Santosc E.S., Aránd D., Gallardoe A. Improvement of chemical quality of percolated leachates by in situ application of aqueous organic wastes on sulfide mine tailings // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 244. P. 154-160.
193. The WFO Plant List. Snapshots of the taxonomy. URL: <https://wfoplantlist.org/plant-list>.
194. Thompson, J. Airborne Particulate Matter / J. Thompson // *Journal of Occupational & Environmental Medicine*. – 2018. – Vol. 60 (5). – P. 392-423.
195. URL: <https://newsfinancialanalyst.com> ...
196. URL: <http://www.kolagmk.ru/ecology/monitoring>.
197. Quevauviller, P. (1998). Operationally defined extraction procedures for soil and sediment analysis. I. Standartization. *Trends in Analytical Chemistry*, 17 (5), 289–298. doi: 10.1016/S0165-9936(97)00119-2.
198. Zema D.A., Bombino G., Andiloro S., Zimbone S.M. Irrigation of energy crops with urban wastewater: effects on biomass yields, soils and heating values // *Agricultural Water Management*. 2012. Vol.115. P. 55-65.
199. Zhao Y, Wang X, Liu C, Wang S, Wang X, Hou H, Wang J, Li H. Purification of harvested rainwater using slow sand filters with low-cost materials: Bacterial community structure and purifying effect // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 674. P. 344-354.

200. Zhang, X. Impacts of lead/zinc mining and smelting on the environment and human health in China / X. Zhang, L. Yang, Y. Li, H. Li, W. Wang, B. Ye // Environmental Monitoring & Assessment. — 2012. — Vol. 184(4). — P. 2261-2273.

201. Zhou G., Ma Y., Fan T., Wang G. Preparation and characteristics of a multifunctional dust suppressant with agglomeration and wettability performance use in coal mine // Chemical engineering research and design. 2018. Vol. 132. P. 729-742.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Результаты обследования контрольных (К) и опытных (О) площадок на песчаном карьере АО «Апатитоводоканал» (2020 г.)

Пло- щадка	Название растения	Средняя высота, см	Оценка обилия вида: проективное покрытие, или обилие, и/или численность			Фено- фаза	Примечание
			%	по Друде	шт/м ²		
К1	овсяница красная	10	80	soc	-	вег.	
	волоснец песчаный	20	-	sol	-	вег.	
	копеечник альпийский	12	-	sol	8	вег.	
	пырей ползучий	20	-	sol	-	вег.	
	люпин многолистный	-	-	-	-	-	вид отсутствует
	сосна обыкновенная	-	-	-	-	-	вид отсутствует
	мать-и-мачеха	-	-	sol	3	вег.	вид вселился
	астрагал приполярный	-	-	-	2	цв1	вид вселился
К2	овсяница красная	10	70	soc	-	вег.	
	волоснец песчаный	15	-	sol	-	вег.	
	копеечник альпийский	10	-	sol	10	вег.	
	пырей ползучий	15	-	sol	-	вег.	
	люпин многолистный	-	-	-	-	-	вид отсутствует
	сосна обыкновенная	-	-	-	-	-	вид отсутствует
	мать-и-мачеха	-	-	sol	5	вег.	вид вселился
	астрагал приполярный	-	-	un	1	вег.	вид вселился

Пло- щадка	Название растения	Средняя высота, см	Оценка обилия вида: проективное покрытие, или обилие, и/или численность			Фено- фаза	Примечание
			%	по Друде	шт/м ²		
	кульбаба осенняя	-	-	un	1	вег.	вид вселился
	иван-чай узколистный	-	-	-	-	вег.	по границе площадки
	береза пушистая	-	-	-	-	вег.	на границе площадки
К3	овсяница красная	30	75	soc	-	вег.	
	волоснец песчаный	15	-	sol	-	вег.	
	копеечник альпийский	-	-	-	4	вег.	
	пырей ползучий	10	-	sol	-	вег.	
	люпин многолистный	-	-	-	-	-	вид отсутствует
	сосна обыкновенная	-	-	un	1	вег.	
	мать-и-мачеха	-	-	sol	4	вег.	вид вселился
	астрагал приполярный	-	-	-	2	цв2	вид вселился
О1	овсяница красная	100	98	soc	-	цв2	
	волоснец песчаный	-	-	sol	-	вег.	
	копеечник альпийский	25	-	sp	12	вег.	кустится
	пырей ползучий	70	-	sol	-	цв2	
	люпин многолистный	-	-	un	1	вег.	
	сосна обыкновенная	-	-	-	-	-	вид отсутствует
	мать-и-мачеха	-	-	sol	-	вег.	вид вселился
	иван-чай узколистный	-	-	sol	-	всходы	вид вселился

Пло- щадка	Название растения	Средняя высота, см	Оценка обилия вида: проективное покрытие, или обилие, и/или численность			Фено- фаза	Примечание
			%	по Друде	шт/м ²		
	береза пушистая	-	-	-	-	всходы	по границе площадки
	ива	-	-	-	-	всходы	по границе площадки
	кисличник двупестичный	-	-	-	-	цв2	на границе площадки
	щавель малый	-	-	un	1	вег.	вид вселился
О2	овсяница красная	100	98	soc	-	цв2	
	волоснец песчаный	-	-	-	-	-	вид отсутствует
	копеечник альпийский	31	-	sol	4	вег.	
	пырей ползучий	72	-	sol	-	вег.	
	люпин многолистный	30	-	sol	3	вег.	
	сосна обыкновенная	-	-	-	-	-	вид отсутствует
	мать-и-мачеха	-	-	sol	-	вег.	вид вселился
	кульбаба осенняя	-	-	sol	-	всходы	по границе площадки
	ива	-	-	-	-	всходы	по границе площадки
	кисличник двупестичный	-	-	un	1	вег.	вид вселился
	щавель малый	50	-	sol	-	цв2	вид вселился
	полевица тонкая	80	-	sol	-	цв2	вид вселился
	мятлик луговой	53	-	sol	-	цв2	вид вселился
	щучка дернистая	70	-	sol	-	цв2	вид вселился
О3	овсяница красная	105	96	soc	-	цв2	

Пло- щадка	Название растения	Средняя высота, см	Оценка обилия вида: проективное покрытие, или обилие, и/или численность			Фено- фаза	Примечание
			%	по Друде	шт/м ²		
	волоснец песчаный	-	-	sol	-	вег.	
	копеечник альпийский	30	-	sol	6	вег.	
	пырей ползучий	120	-	sol	-	цв2	
	люпин многолистный	30	-	un	1	вег.	
	сосна обыкновенная	-	-	-	-	-	вид отсутствует
	мать-и-мачеха	12	15	cop1	-	вег.	вид вселился
	астрагал приполярный	-	-	-	-	вег.	на границе площадки
	кульбаба осенняя	-	-	sol	-	всходы	вид вселился
	иван-чай узколистный	-	-	-	-	всходы	вид вселился
	ива	-	-	-	-	всходы	вид вселился
	кисличник двупестичный	-	-	-	-	вег.	на границе площадки
	полевица тонкая	-	-	-	-	вег.	на границе площадки
О4	овсяница красная	70	97	soc	-	цв2	
	волоснец песчаный	-	-	-	-	-	вид отсутствует
	копеечник альпийский	30	-	sol	-	вег.	
	пырей ползучий	70	-	sol	-	цв2	
	люпин многолистный	65	-	sol	2	цв3-п2	
	сосна обыкновенная	-	-	sol	-	вег.	
	мать-и-мачеха	-	-	sol	-	вег.	вид вселился

Пло- щадка	Название растения	Средняя высота, см	Оценка обилия вида: проективное покрытие, или обилие, и/или численность			Фено- фаза	Примечание
			%	по Друде	шт/м ²		
	астрагал приполярный	-	-	-	-	вег.	на границе площадки
	иван-чай узколистный	-	-	-	-	всходы	вид вселился
	ива	-	-	-	-	всходы	вид вселился
О5	овсяница красная	75	90	soc	-	цв2	
	волоснец песчаный	-	-	-	-	-	вид отсутствует
	копеечник альпийский	25	-	sol	3	вег.	
	пырей ползучий	100	-	sol	-	цв2	
	люпин многолистный	100	-	un	1	цв2-п1	
	сосна обыкновенная	-	-	-	-	-	вид отсутствует
	мать-и-мачеха	-	-	sol	-	вег.	вид вселился
	астрагал приполярный	-	5	sol	-	п2	на краю площадки
	иван-чай узколистный	-	-	-	-	всходы	вид вселился
	ива	35	-	un	1	вег.	вид вселился
	жерушник болотный	40	-	un	1	п2	вид вселился
О6	овсяница красная	70	97	soc	-	цв2	
	волоснец песчаный	-	-	-	-	-	вид отсутствует
	копеечник альпийский	23	-	sol	8	вег.	
	пырей ползучий	50	-	sol	-	цв2	
	люпин многолистный	-	-	un	1	вег.	

Пло- щадка	Название растения	Средняя высота, см	Оценка обилия вида: проективное покрытие, или обилие, и/или численность			Фено- фаза	Примечание
			%	по Друде	шт/м ²		
	сосна обыкновенная	-	-	-	-	-	вид отсутствует
	мать-и-мачеха	12	15	cop1	-	вег.	вид вселился
	кульбаба осенняя	-	-	sol	-	всходы	вид вселился
	иван-чай узколистный	-	-	sol	-	всходы	вид вселился
Примечание: вег. – вегетация; цв1, цв2, цв3 – стадии цветения; п1, п2, п3 – стадии плодоношения; - не определялось; жирным шрифтом выделены те виды, которые высаживались на площадки; обозначения обилия по Друде приводятся в соответствии с [94, 121]: un – один экземпляр; sol –редко, единично; sp – мало (около 5%); cop1 – обильно (10-20%); сос – образуют фон (более 65%).							



Акционерное общество «Апатит»

**Кировский филиал
акционерного общества «Апатит»
(КФ АО «Апатит»)**

Ленинградская ул., дом 1, город Кировск,
Мурманская область,
Российская Федерация, 184250
Тел.: +7(81531) 3 54 60; Факс: +7(81531) 3 17 02;
телетайп 126735 «Лавза»;
e-mail: apatit@phosagro.ru; www.phosagro.ru
ОКПО 00203938; ОГРН 1025100561012;
ИНН 5103070023

Аспиранту ФГБУН ПАБСИ КНЦ РАН
Лусис А. В.

25.05.2023

№ 6/н

на №

от

Уважаемая Аделина Вадимовна!

В ответ на Ваше письмо от 09.03.2023 сообщаем, что Кировским филиалом АО «Апатит» в 2022 г были проведены опытные работы по биологической рекультивации откосов ограждающей дамбы хвостохранилища АНОФ-2 с использованием осадка сточных вод АО «Апатитыводоканал».

Начальник отдела
по экологическому контролю
и природопользованию
Кировского филиала АО «Апатит»

М.А. Алентьев