

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Рудзиш Эделина



РЕКУЛЬТИВАЦИЯ ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕТРАДИЦИОННЫХ МЕЛИОРАНТОВ

Специальность 25.00.36 – Геоэкология
(в горно-перерабатывающей промышленности)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Петрова Т.А.

Санкт-Петербург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ И ПРИМЕНЕНИЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ МЕЛИОРАНТОВ	11
1.1 Техногенно нарушенные земли горнодобывающей промышленности	11
1.2 Рекультивация техногенно нарушенных земель территорий горнодобывающей промышленности.....	23
1.3 Мелиоранты для рекультивации техногенно нарушенных земель	30
1.4 Нетрадиционные мелиоранты на основе осадков сточных вод в рекультивации техногенно нарушенных территорий.....	39
1.5 Выводы по Главе 1	51
ГЛАВА 2 ФОРМИРОВАНИЕ ПОЧВЕННОГО СЛОЯ НА РЕКУЛЬТИВИРУЕМЫХ ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ ЗЕМЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД.....	52
2.1 Мелиорационный потенциал осадков сточных вод	52
2.1.1 Осадки городских сточных вод, как нетрадиционные мелиоранты	53
2.1.2 Осадки сточных вод ЦБП, как нетрадиционные мелиоранты	56
2.2 Состав и характеристика осадка сточных вод ЦБК	61
2.3 Исследования воздействия ОСВ ЦБК на формирование питательного режима техноземов	67
2.4 Выводы по Главе 2	71
ГЛАВА 3 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА.....	72
3.1 Методы оценки применимости нетрадиционных мелиорантов	72
3.2 Методика оценки биологической продуктивности с применением цифровой обработки данных	73
3.3 Методика оценки роста и развития растений через анализ функций роста	84
3.4 Выводы по Главе 3	87

ГЛАВА 4 ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПРИ ВНЕСЕНИИ НЕТРАДИЦИОННОГО МЕЛИОРАНТА	89
4.1 Оценка воздействия нетрадиционного мелиоранта на раннюю стадию развития растений.....	91
4.2 Оценка воздействия нетрадиционного мелиоранта на рост и развитие травянистого покрова	100
4.2.1 Оценка мелиорационного потенциала осадка сточных вод.....	106
4.2.2 Оценка экологической безопасности осадка сточных вод.....	114
4.3 Выводы по Главе 4	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	123
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения	139
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения результатов работы в учебный процесс	140
ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации изобретения	141
ПРИЛОЖЕНИЕ В Возможные варианты обработки ОСВ ЦБК для использования в качестве нетрадиционного мелиоранта	142

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Процесс добычи и переработки полезных ископаемых вызывает нарушение целостности природных ландшафтов, деградацию земель и снижение их способности поддерживать полноценное функционирование экосистемы, что приводит к формированию техногенно нарушенных земель.

Согласно Государственному (национальному) докладу «О состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2020 году» из хозяйственного оборота выведено более 1,1 млн. га земель с нарушенной целостностью природных ландшафтов. Вместе с этим ежегодно происходит увеличение интенсивности и масштабов негативного воздействия на земельные ресурсы от горнодобывающих и горноперерабатывающих производств, площади техногенно нарушенных земель расширяются: за 2016 – 21,6 тыс. га, за 2017 – 163,4 тыс. га, за 2018 – 71,2 тыс. га.

Основная проблема рекультивации техногенно нарушенных земель при разработке месторождений твердых полезных ископаемых заключается в масштабных трансформациях почвенно-минеральных комплексов. Вследствие интенсивной деформации ландшафта на данных территориях земли характеризуются нарушениями физико-химических показателей, почвенных режимов, а также низким показателем органической составляющей. В связи с этим, для эффективного восстановления почвенно-растительного комплекса на техногенно нарушенных землях необходимо проведение рекультивационных мероприятий с применением органических мелиорантов.

Все наиболее доступные и распространенные органические мелиоранты (сапрпель, компост, остатки растительного и животного происхождения) имеют ряд недостатков.

Во-первых, краткий период воздействия на физико-химические показатели почвы с усвоением растениями питательных веществ за первые вегетационные сезоны, что в дальнейшем приводит к губительным последствиям для формируемого растительного покрова и экосистемы в целом. Вследствие чего

увеличиваются сроки восстановления и снижается экологическая эффективность рекультивационных мероприятий. Следовательно, при рекультивации техногенно нарушенных земель необходимо использовать органические мелиоранты с пролонгированным эффектом воздействия.

Во-вторых, большинство существующих органических мелиорантов имеют высокую стоимость, что в совокупности с масштабами нарушенных земель, препятствует их использованию в рекультивации ввиду экономической нецелесообразности.

К альтернативным малозатратным субстратам относятся нетрадиционные мелиоранты – отходы производства, в том числе осадки сточных вод (ОСВ), обладающие мелиорационным потенциалом. Осадки сточных вод имеют низкой себестоимостью, а также ряд из них характеризуется пролонгированным эффектом воздействия, что делает их потенциально эффективными нетрадиционными органическими мелиорантами для рекультивации техногенно нарушенных земель.

Степень разработанности темы исследования

Проблемами восстановления почвенно-растительного комплекса на нарушенных землях занимались такие ученые как В.В. Тарчевский, Б.П. Колесников, Т.С. Чибрик и другие, а в последние годы: С.П. Месяц, А.И. Семячков, К. Svobodova, А.Т. Cross, Z. Bai, A. Manero, J. Wang, и др.

В последнее время активно развивается направление по разработке способов мелиорации нарушенных земель с использованием нетрадиционных мелиорантов, в том числе, на основе осадков сточных вод. Вопросы применимости нетрадиционных мелиорантов и ОСВ рассмотрены в работах: E.M. Eid, M.M. Jordan, D.J. Batstone, Е.П. Пахненко, V. Carabassa, W. Halecki, W.E. Sopper, V. Asensio, A.M. Abbas и других.

Несмотря на изученность вопроса восстановления техногенно нарушенных земель, в работах авторов уделено недостаточное внимание к выбору экологически эффективных и экономически целесообразных региональных

нетрадиционных мелиорантов для формирования почвенно-растительных комплексов.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 25.00.36 – Геоэкология (в горно-перерабатывающей промышленности) по пункту 3.3 «Геоэкологические аспекты рационального использования и охраны минеральных ресурсов Земли и рекультивации территорий, нарушенных при разработке месторождений и обогащении твердых полезных ископаемых».

Цель работы – экологически эффективное восстановление почвенно-растительного комплекса на территориях, нарушенных при разработке месторождений твердых полезных ископаемых для снижения техногенной нагрузки.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Классификация мелиорантов на основе систематизации характеристик техногенно нарушенных земель с целью их дальнейшей рекультивации.

2. Обоснование возможности применения нетрадиционных мелиорантов для рекультивации техногенно нарушенных земель.

3. Лабораторные исследования химического и мелиорационного потенциала предлагаемых композиционных составов нетрадиционных мелиорантов.

4. Экспериментальные исследования по оценке экологической эффективности: экологической безопасности и мелиорационного потенциала предлагаемых нетрадиционных мелиорантов.

5. Обоснование выбора предлагаемого нетрадиционного мелиоранта, используемого для восстановления почвенно-растительного комплекса при проведении экологически эффективной рекультивации техногенно нарушенных земель.

Идея работы – рекультивация техногенно нарушенных земель должна проводиться с использованием нетрадиционных органических мелиорантов для экологически эффективного восстановления почвенно-растительного комплекса.

Объект исследования – техногенно нарушенные земли, образованные в результате складирования отходов при разработке месторождений твердых полезных ископаемых.

Предмет исследования – органические мелиоранты на основе осадков сточных вод для восстановления почвенно-растительного комплекса при рекультивации техногенно нарушенных земель.

Научная новизна работы:

1. Установлена зависимость между массой растительного покрова и результатами расчета вегетационного индекса листовой поверхности (LAI – Leaf Area Index) травянистой растительности для оценки почвенных субстратов.

2. Определены оптимальные диапазоны доз внесения нетрадиционного органического мелиоранта для восстановления растительного покрова на антропогенно измененных супесчаных почвах, наносимых при рекультивации техногенно нарушенных земель.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана методика оценки эффективности внесения мелиорантов в почвенные субстраты на основе анализа роста и развития растительного покрова.

2. Обоснована экологическая эффективность предлагаемого нетрадиционного мелиоранта и его доз внесения.

3. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс в ходе проведения практических и лабораторных занятий обучающихся направлений 05.04.06 «Экология и природопользование» и 21.05.04 «Горное дело».

4. Результаты и рекомендации диссертационной работы приняты к использованию при рекультивации объекта размещения отходов АО «Омский каучук» (акт о внедрении результатов от 14.03.2022).

Методология и методы исследования. Проведение исследований осуществлялось в соответствии со следующими методами:

1. Системный анализ характеристик техногенно нарушенных земель, влияющих на сроки их восстановления для классификации видов мелиорантов.

2. Аналитические и экспериментальные исследования в лабораторных условиях на базе Центра коллективного пользования высокотехнологичным оборудованием Горного университета.

3. Методы цифровой обработки данных совместно с расчетами вегетационных индексов для анализа биомассы растительного покрова.

4. Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту

1. Повышение достоверности оценки биологической продуктивности восстанавливаемого травянистого покрова техногенно нарушенных земель в динамике роста и развития достигается с использованием метода цифровой обработки RGB-снимков с применением вегетационного индекса листовой поверхности.

2. Рекультивацию техногенно нарушенных земель при нанесении плодородного или потенциально плодородного слоя супесчаной почвы следует проводить с использованием нетрадиционных органических мелиорантов, содержащих активный ил и лигниновое волокно, что обеспечивает высокое содержание органического вещества (>90 %) и пролонгированный эффект воздействия из-за повышенного соотношения углерода к азоту ($C/N > 30$).

3. Для экологически эффективного восстановления травянистого растительного покрова на рекультивируемых техногенно нарушенных землях горного производства следует вносить 90 т/га предлагаемого нетрадиционного органического мелиоранта.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена значительным объемом обработанных данных, полученных в результате лабораторных и экспериментальных исследований с использованием

современных методов анализа, а также с применением цифровых методов обработки данных.

Апробация результатов

Основные и отдельные положения работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных и научно-технических конференциях и симпозиумах, в том числе: Международная конференция по вопросам обращения с отходами горнодобывающих предприятий (г. Санкт-Петербург.; 2019 г.); XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов (г. Санкт-Петербург.; 2019 г.); XV Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург.; 2019 г.); X Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (г. Санкт-Петербург.; 2020 г.); XVII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых “Topical Issues of Rational Use of Natural Resources” (г. Санкт-Петербург.; 2021 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследований; разработке методики анализа роста и развития растительного покрова для оценки почвенных субстратов; проведении экспериментальных исследований по оценке применимости предлагаемого нетрадиционного мелиоранта и обоснование его доз внесения.

Публикации по работе

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 172 наименования, и 4 приложения. Диссертация изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 37 рисунков и 9 таблиц.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, кандидату технических наук, доценту Петровой Татьяне Анатольевне за всестороннюю помощь, поддержку и конструктивную критику, а также выражает искреннюю благодарность всему коллективу кафедры геоэкологии Санкт-Петербургского горного университета.

ГЛАВА 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ И ПРИМЕНЕНИЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ МЕЛИОРАНТОВ

1.1 Техногенно нарушенные земли горнодобывающей промышленности

К техногенно нарушенным землям (ТНЗ) относятся земельные территории, степень нарушения которых привела к невозможности использовать их в соответствии с целевым назначением, вследствие высокой степени деградации земель, а также являющиеся источником негативного воздействия на компоненты окружающей среды через процессы эрозии в связи с нарушением почвенного покрова, гидрологического режима и образования техногенного рельефа в результате производственной деятельности человека [60; 98].

Согласно Государственному (национальному) докладу «О состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2020 году» в результате нарушений целостности ландшафтов и ухудшения почвенных условий из хозяйственного оборота выведено более 1,1 млн га земель. Вместе с этим ежегодно происходит увеличение площадей нарушенных земель промышленного назначения – 445,7 тыс. га в 2020 году, 437,4 тыс. га в 2019, 430,6 тыс. га в 2018, 419,4 тыс. га в 2017 году [57–60] в результате работ по добыче полезных ископаемых, промышленного лесопользования, загрязнения отходами промышленных предприятий, промышленного строительства и обеспечения инфраструктуры и т.п.

Существенное влияние на увеличение площадей ТНЗ оказывает горная промышленность, что составляет более 40 % от общих площадей нарушенных земель промышленного назначения. Интенсивное и масштабное изменение ландшафта при горнодобывающих и горноперерабатывающих производствах сопровождается негативным воздействием на земельные ресурсы с ежегодным образованием новых площадей техногенно нарушенных земель – за 2016 – 21,6 тыс. га, за 2017 – 163,4 тыс. га, за 2018 – 71,2 тыс. га [19].

Для снижения негативного воздействия и возвращения земельных ресурсов в хозяйственный оборот необходим системный подход с учетом всех природных и антропогенных процессов, а также классификация объектов ТНЗ и оценка их восстановительного (рекультивационного) потенциала [8]. Первые работы по определению и классификации ТНЗ относятся к концу 1960-х – началу 1970-х гг. [22; 30].

Нарушенные земли были описаны в общей классификации земель, которая заключалась в исследовании морфолого-структурного строения ландшафтов, образовавшихся в результате хозяйственной деятельности человека. Классификация была сформирована для эколого-экономической оценки пригодности и рентабельности дальнейшего использования нарушенных земель в хозяйственной деятельности. Таким образом, ландшафты были разделены на три категории по степени антропогенной измененности и представляли собой следующие категории: (1) естественные (природные), которые подчиняются общим закономерностям развития природы, не измененные человеком; (2) культурные, состояние которых находится под постоянным контролем; и (3) техногенные – бесплодные техногенные геокомплексы, которые обуславливают техногенез и представляют угрозу окружающей среде и жизни человека, поэтому требуют преобразования в культурные или окультуренные ландшафты [30]. Согласно первым упоминаниям, техногенные ландшафты («бесплодные ландшафты/геокомплексы или геосистемы») характеризовались разнообразными нарушениями функциональной целостности биосферы при ослаблении биогеохимических и энергетических функций экосистемы и снижении ее продуктивности, что в конечном итоге приводит к деградации почвенно-растительных комплексов [30].

Согласно современному определению (ГОСТ Р 59057-2020), нарушенные территории включают в себя земли, которые полностью или частично утратили продуктивность в результате негативного воздействия хозяйственной деятельности [16; 18] и характеризуются: измененным гидрологическим режимом (подтоплением, заболачиванием), загрязнением или заражением земель,

развитием водной и ветровой эрозий, засолением, иссушением, уплотнением и захлаплением земель [16; 20; 60].

Кроме представленных определений нарушенных земель, в литературе можно встретить некоторые другие сопоставимые с понятием «техногенно нарушенный ландшафт» [28; 29; 62] – «техногенные ландшафты» [2], «техногенные массивы», «нарушенные биоценозы», «антропогенные земли» и др. [9]. В обобщённом рассмотрении подразумеваются антропогенные земельные территории, либо (1) заново созданные человеком на месте природных или ранее нарушенных, либо (2) земли, измененные в процессе деятельности человека (промышленной, хозяйственной или др.). Классификации таких ТНЗ основываются на следующих принципах разделения и типологии: по составу ландшафтов, по степени воздействия на окружающую среду, по происхождению, по источнику, по возрасту и времени образования, а также свойству к саморегуляции и по пригодности к дальнейшему использованию.

Актуальная регламентированная классификация ТНЗ (ГОСТ Р 59060-2020 «Охрана окружающей среды. Земли. Классификация нарушенных земель в целях рекультивации») основывается на характеристиках пригодности земель для их рекультивации и устанавливает виды их возможного использования, где систематизация базируется на основе параметра формы техногенного рельефа [17].

Среди ТНЗ особое внимание уделяется земельным территориям горной и горноперерабатывающей промышленности. Для восстановления этих ТНЗ многими были предложены свои методы классификации на основе различных принципов. Один из самых простых и часто встречаемых принципов систематизации техногенных ландшафтов, как ТНЗ является – отклонение от поверхности литосферы [1; 24; 63]. Данная классификация аналогична определению формы рельефа и разделяет все объекты на положительные – выпуклые (отвалы, терриконы, дамбы, навалы и др.) и отрицательные – вогнутые (шламохранилища, карьеры, шахтные пространства и др.).

Аналогичным принципом систематизации с разделением объектов по отклонению от поверхности является классификация отвалов и выемок Е. Папшицкого [63]. Классификация основывается на определении отвалов и выемок, как двух противоположных типов образования рельефа, распределенных по пяти группам признаков: происхождения, температурной активности, механическому составу, покрытию и форме (рисунок 1.1).

ОТВАЛЫ И ВЫЕМКИ				
А. Отвалы			Б. Выемки	
по происхождению	по температурной активности	по механическому составу	по происхождению	по температурной активности
1. угольные	1. активные (действующие)	1. пылевидные	1. каменные карьеры: известковые, песчаные	1. активные
2. цинковые	2. горящие	2. мелочь	2. песчаные карьеры: сухие/ подмокшие/ залитые водой	2. старые
3. железорудные	3. неактивные	3. отвалы из гравия	3. глиняные карьеры	
4. известняковые	4. используемые неактивные отвалы	4. отвалы из щебенки	4. провалы в местах оседания местности над шахтными выработками: подмокшие/сухие	
5. цинковые полуобогащенные		5. цементированные	5. территория оставленных шурфов - наследие в виде заброшенных шахт, воронок и углублений с остатками пустых пород и пыли	
6. из угольной пыли			6. места открытой добычи серебра, свинца и цинка в виде выемок	
7. из угольного шлака			7. территория после открытой добычи: железных руд/ угля	
8. из железистого шлака: доменной/ мартеновской печей	по покрытию	по форме		по покрытию
9. из отходов химических заводов	1. голые	1. конусовидные и куполообразные		1. голые
10. из цинкового шлака	2. с редкой растительностью	2. столовые		2. озелененные
11. из осадков при очистке стоков	3. заросшие густой растительностью	3. хребтовидные		3. заросшие густой растительностью
12. смешанные отвалы из различных промышленных отходов (состав зависит от вида продукции данного предприятия)	4. заросшие деревьями	4. плоские		4. заросшие деревьями

Рисунок 1.1 – Классификация промышленных отвалов и выемок (по Е. Папшицкому)

Среди техногенно нарушенных земель горной промышленности особое внимание уделено полигонам для складирования горнопромышленных отходов. Горнодобывающая промышленность вносит наибольший вклад в образование

промышленных отходов, что в РФ составляет более 94 % от общего количества [55]. Ежегодно при разработке месторождений полезных ископаемых на поверхность перемещают более 100 млрд т горной массы [39], только на территории России накоплено более 80 млрд т горнопромышленных отходов, количество которых ежегодно увеличивается на 2 млрд т [13; 37]. Под складирование горнопромышленных отходов в РФ выведено из хозяйственного оборота более 300-500 тыс. га земель [13; 37; 55], однако негативное воздействие от складированных отходов проявляется на больших территориях, что оценивают в площади в 10-15 раз превышающие площади полигонов [55].

К горнопромышленным хранилищам отходов относят пространственные нарушения ландшафта, такие, как отвалы, насыпи, навалы, дренажные поля, дамбы, терриконы, хвостохранилища, плотины, золошлаконаливные поля и др. Подобные хранилища горной промышленности занимают обширные территории оказывают негативное воздействие на окружающую среду. Сложность восстановления таких ТНЗ обусловлена разнородностью и разнообразием слагающих их отходов от различных ступеней переработки сырья горнодобывающего комплекса, которые извлечены, переработаны, перемещены и сосредоточены на относительно ограниченной территории.

Одними из наиболее масштабных объектов техногенно нарушенных земель – горнопромышленных хранилищ отходов являются отвалы горнодобывающей промышленности [121]. Отвалы характеризуются комплексным повреждением ландшафта [129; 171], геохимическим загрязнением и физическим нарушением грунтов.

Для систематизации отвалов С. Адамовичем была представлена классификация генезиса отвалов, в котором основополагающим фактором являлось происхождение ландшафтного объекта (рисунок 1.2) [63].

Аналогичным образом Б.П. Колесников и Г.М. Пикалова (1974) выделили две группы промышленных отвалов по происхождению и составу: первые – образованы преимущественно веществами минерального происхождения (субстратами), вторые – образованы субстратами, насыщенными компонентами

органического происхождения или полностью состоящими из последних. Такие группы были выбраны из-за совершенно различных субстратов по происхождению, составу и свойствам (рисунок 1.3) [30]. Однако, в классификации отмечен экологический подход к систематизации отвалов.

ОТВАЛЫ	
Источник происхождения	Объект происхождения
Отвалы каменные или земельные из отходов подземной выработки	<ul style="list-style-type: none"> – каменного угля – свинцово-цинковых руд – железных руд – прочих полезных ископаемых
Отвалы промышленных отходов	<ul style="list-style-type: none"> – черной металлургии – заводских и постфлотационных (цинковых и прочих цветных металлов) – химического производства – шлаковые и зольные – прочие отходы и комплексные отвалы различного происхождения
Земельные, наружные и внутренние отвалы, возникшие при открытой добыче	<ul style="list-style-type: none"> – каменного угля – бурого угля – серы – прочих ископаемых
Глиняные или каменные выработки, возникшие после открытой добычи	<ul style="list-style-type: none"> – песка – каменного угля – бурого угля – глины, гравия – извести – прочих месторождений
Горнопромышленные отвалы	<ul style="list-style-type: none"> – различные выработки, навалы, отвалы, территории бывших шахт и т.п.
Комплексно-поврежденные территории	
Местности, расположенные в полосе максимально катастрофического загрязнения промышленными выделениями	

Рисунок 1.2 – Классификация С. Адамовича согласно генезису отвалов

Минеральные грунты образуются в технологической цепочке следующих отраслей промышленности: горнодобывающий сектор – угольная, сланцевая, бокситовая, урановая и т.д.; рудоперерабатывающий сектор – черная и цветная металлургия; строительные материалы – графит, асбест, гипс, глина, гранит, доломит, известняк, кварц, каолин, мергель, мел, полевои шпат и т.п.; теплоэнергетический сектор – зола.

Отвалы, образованные минеральными грунтами (субстратами), формируются в результате производственных процессов, оказывающих наибольшее негативное влияние на компоненты окружающей среды. Отвалы не имеют прямых форменных аналогов в природе, поэтому они, в свою очередь, дифференцированы на две подгруппы: породные отвалы и золоотвалы, согласно характеристике измененности.

ОТВАЛЫ	
Отвалы, сложенные минеральными грунтами (субстратами)	Отвалы, сложенные субстратами, насыщенным органическим веществом
лимитирующий фактор: отсутствие органического вещества. Органическая жизнь возникает в основном от диаспор организмов, заносимых извне с соседних местообитаний. В отсутствие органической составляющей происходит недостаток питания растительных сообществ.	лимитирующий фактор: избыток органики на фоне недостатка минеральных солей. Несмотря на резкий рост живых организмов, которые в подобных условиях могут возникать автохтонно и ускорения почвообразовательных процессов, экосистема приходит в быстрый упадок ввиду недостатка минеральной подпитки.
исключения: отвалы, сложенные углистыми сланцами, аргиллитами и подобными осадочными породами нередко содержат органические вещества обусловленные включениями в породу ископаемых остатков органической жизни прошлых геологических эпох. Такое органическое вещество повышает потенциальное плодородие грунтов отвала, постепенно мобилизуемое растительностью.	исключения: отвалы, сложенные в основном минеральными субстратами, которые насыщены органическим веществом.

Рисунок 1.3 – Группы промышленных отвалов Колесникова и Пикаловой

В то время, как первые субстраты извлечены, перемещены и складированы без существенных изменений в морфологических и химических свойствах (пустая порода), вторые – подвергаются дополнительной переработке: измельчению, сепарации, химической или термической обработке (шламы, хвосты, золы), на основе данных различий их определили в соответствующие группы.

Отвалы, сложенные минеральными субстратами, характеризуются лимитирующим фактором – дефицитом органического вещества, следовательно,

для их рекультивации необходимо восполнение органического вещества путем внесения органических добавок [30].

Другим примером систематизации отвалов является классификация В.В. Тарчевского, где признаки объектов разделены на семь групп: генезис, возраст, высота, форма, механический состав, кислотность и возможность утилизации. Классификация основана на экономическом подходе, с расчетом на последующую утилизацию отходов (рисунок 1.4).

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОТВАЛЫ			
I. По происхождению	II. По возрасту	III. По высоте	IV. По форме
1. Отвалы добывающей промышленности (добыча каменного угля, железа, цветных металлов, разработка нерудных месторождений)	1. свежие (< 5 лет)	1. низкие (< 5 м)	1. поля нарушений с разнообразным мезо- и микро-рельефом
	2. молодые (< 15 лет)	2. средние (< 25 м)	
	3. средневозрастные (< 40 - 50 лет)	3. высокие (< 50 м)	2. длинновытянутые гребни, гривы
	4. старые (> 40 - 50 лет)	4. очень высокие (> 50 м)	3. одиночные конусы, бугры
	а) внешние и внутренние отвалы открытых разработок		4. чашевидные (шлаконаливные поля, хвосты- и шламохранилища)
б) породные отвалы при подземной разработке (терриконы)		5. неопределённые	
в) отвалы из перемещенных грунтов (дражный способ добычи золота)			
2. Отвалы перерабатывающей промышленности	V. По механическому составу	VI. По кислотности (рН)	VII. По утилизации
а) насыпные (шлаки, отходы заводского происхождения)	1. пылевидные (< 0,01 мм)	1. кислые	1. идущие на вторичную переработку
б) наливные (шламовые поля, золоотвалы и др.)	2. крупнопылевидные и пески (до 0,1 мм)	2. нейтральные	
в) полигоны захоронения	3. гравийные (до 1 см)	3. щелочные	2. употребляемые в строительстве
3. Прочие отвалы	4. щебенчатые (до 5 см)		3. пригодные в качестве удобрений
а) отвалы из остатков основного сырья	5. крупномерные (свыше 5 см)		4. применяемые для дорожного покрытия
б) отвалы из строительных остатков			5. неиспользуемые
в) отвалы из заводского мусора			

Рисунок 1.4 – Классификация промышленных отвалов (по В.В. Тарчевскому)

Б.П. Колесников расширил классификацию ландшафтов, пояснив, что техногенные ландшафты, требующие особого внимания, тоже можно дифференцировать на группы согласно общим принципам и свойствам. В классификации Колесникова основным объектом систематизации является отвал, как одна из наиболее сложных форм техногенного рельефа, образующегося при разработке полезных ископаемых, поэтому характеризующим признаком был взят возможный ход направления восстановительного и почвообразовательного процесса. Классификация полностью основана на эколого-генетическом подходе с расчетом на рекультивацию нарушенных земель.

Также согласно исследованиям Б.П. Колесникова и Г.М. Пикаловой на основе свойств отходов, отвалы можно определить по группе (потенциальные, бедные или токсичные) и типу: вполне пригодные, пригодные, пригодные после улучшения или нуждающиеся в коренной реставрации (рисунок 1.5) [29].



Рисунок 1.5 – Классификация отвалов

Кроме Колесникова и Пикаловой разработкой классификаций отвалов и пустых пород занимался Н.И. Горбунов, такие он приводил систематизацию вскрышных пород для оценки пригодности породы при восстановлении техногенно нарушенных земель. Еще одно сходство его классификации с предшествующей в главном параметре – категории пригодности породы (вполне пригодные, пригодные, пригодные после улучшения или нуждающиеся в коренной реставрации).

Однако по классификации Горбунова (рисунок 1.6) вскрышная порода относилась к соответствующей категории на основе целого ряда признаков: слагающие минералы, растворимые соли, кислотность, фракционный состав, оглеенность, гумус, подвижный алюминий и набухание породы [63].

Категория пригодности	Вполне пригодные	Пригодные	Пригодные после небольшого улучшения		Непригодные или нуждаются в коренном улучшении	
Минералы Признак пригодности	смесь гидрослюд монтмориллонита, вермикулита, хлорита, каолинита, кварца или смешанослойных образований		значительное преобладание одного из минералов: монтмориллонита, кальцита, кварца, каолинита, гипса		пирит, гетит, гипсит, галит	
Растворимые соли (хлориды)	0,1 - 0,3	0,3 - 0,5	0,5 - 0,7		> 0,7 - 1	
рН	5,5 - 8,3	4,5 - 8,3	3,4 - 4,0	8,3 - 9,0	< 3,4	> 9,0
Подвижный алюминий, мг/100 г	0 - 2	2 - 4	5 - 10		> 15	
Емкость поглощения, %	0 - 10	0 - 10	10 - 25		> 25	
Фракции <0,001 мм, %	10 - 20	10 - 20	0-5	30-40	>40	
Фракции <0,01 мм, %	20-45	20-45	0-10	45-75	>75	
Набухание, %	10 - 15	10 - 15	5	15-18	>20	
Оглеенность	нет	слабая	средняя		сильная	
Гумус, %	>1	<1	<1		<1	

Рисунок 1.6 – Классификация вскрышной породы Горбунова

Схожая классификация на основе оценки пригодности отвальных пород для определения направления рекультивации (сельскохозяйственного и лесохозяйственного и др.) опирается на характеристики вскрышных и вмещающих пород с приведением рекомендаций по обращению с ними: по подъему на поверхность или захоронению (рисунок 1.7) [118].

КЛАССИФИКАЦИЯ ОТВАЛОВ			
Класс ценности	Применимость для сельскохозяйственных культур	Примеры	Обращение с вскрышными и вмещающими породами
I и II	применимые для сельскохозяйственных работ	лесс, хорошие суглинки, известковые глины	отдельная выемка грунта, отдельная транспортировка, сброс на поверхность (насыпи)
III	применимые для лесохозяйственных работ	нетоксичные пески, суглинки, глины,	рекомендуется внесение пород класса I, если I отсутствует
IV	низкоплодородные и бесплодные, могут быть восстановлены, но без урожая	кварцевый гравий, очень бедные пески	рекомендуется не поднимать на поверхность
V	токсичные, с токсичными или вредоносными компонентами	слои, содержащие токсичные вещества	не поднимать на поверхность, или до рекультивации должны быть покрыты изоляционным слоем

Рисунок 1.7 – Классификация отвалов по рекомендациям к обращению с породами

Классификации ТНЗ, в том числе отвалов направлена на оценку форм рельефа, состава и свойства горных пород, а также на рекультивационный потенциал вскрышных пород.

Оценка вскрышных и вмещающих пород для рекультивации на сегодняшний день регламентируется ГОСТ 17.5.1.03-86 «Охрана природы. Земли. Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель» [14]. Классификация основывается на разделении вскрышных и вмещающих пород по группам пригодности, инженерно-геологическим характеристикам и показателям химического и гранулометрического состава.

Широкий перечень классификаций и типологий ТНЗ, а также размеры площадей и ежегодное расширение земель нарушенных вследствие функционирования горных предприятий свидетельствуют о том, что в условиях горной промышленности остается острая проблема восстановления ТНЗ. На данный момент накоплено более 1,1 млн га техногенно нарушенных земель, из которых 300-500 тыс. га выведено из хозяйственного использования под полигоны горнопромышленных отходов. Кроме того, ежегодно увеличиваются

размеры площадей ТНЗ промышленного назначения, в т.ч. более 40 % из которых принадлежат горнодобывающей отрасли. Поэтому, особое значение приобретает исследование подходов к эффективной рекультивации техногенно нарушенных земель.

На основе существующих классификаций можно сделать вывод, что основные определяющие характеристики отвалов устанавливают их происхождение, топографию и параметры, необходимые для последующей рекультивации (состав слагающих пород, механический состав и их потенциальное плодородие). Из чего следует, что основными возможными препятствиями в рекультивации могут стать неблагоприятные характеристики состава, в том числе дефицит органического вещества, однородный механический состав и низкое потенциальное плодородие или токсичность отвальных пород.

1.2 Рекультивация техногенно нарушенных земель территорий горнодобывающей промышленности

Интенсивные процессы деградации почв, вызванные масштабными работами по освоению месторождений полезных ископаемых, приводят к снижению продуктивности экосистем и плодородия, общему нарушению взаимодействия компонентов окружающей среды [102; 126; 137; 156]. Скорость истощения почвы и, как следствие, окружающей среды (вызванная антропогенным воздействием) преобладает над скоростью самовосстановления. Без должного внимания и проведения мероприятий по рекультивации техногенно нарушенных земель проблема деградации почвенного слоя ежегодно усугубляется.

Ежегодно в мире образуется до 6-7 млн га нарушенных земель, требующих проведения рекультивационных мероприятий с целью их возвращения в хозяйственный оборот [43]. По данным Росприроднадзора и периодических государственных докладов «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации» площадь рекультивированных земель в объеме нарушенных земель за год составляла лишь 63,5 % за 2015 год, 20,7 % за 2016 год,

38,5 % за 2017 год, 49,7 % за 2018 год и 52,6 % за 2019 год, что свидетельствует о низком уровне восстановления и общем накоплении площадей неиспользуемых земель.

Земельные объекты горной промышленности, вследствие невозможности их использования в соответствии с целевым назначением, высокой степенью деградации земель и негативного воздействия на окружающую среду через процессы ветровой и водной эрозии относятся к техногенно нарушенным территориям [98; 102]. Для восстановления нарушенных земель и своевременного вовлечения их в хозяйственный оборот необходимо проводить комплекс рекультивационных мероприятий. Основными задачами которых являются восстановление морфоструктурного облика ландшафта с формированием устойчивого техногенного биотопа и устранением загрязнений, образовавшихся в результате разработки месторождений полезных ископаемых и переработки минерального сырья.

Одни из наиболее масштабных объектов рекультивации ТНЗ горной промышленности – это отвалы [121]. Территории размещения отвалов характеризуются комплексным повреждением ландшафта [129; 171], геохимическими загрязнениями и физическими нарушениями грунтов. Разработка месторождений твердых полезных ископаемых сопровождается механическим нарушением почвенных и породных слоев-горизонтов. При выемке минерального сырья на поверхность ландшафта происходит повреждение поверхности: трансформация и перемешивание генетических горизонтов, изъятие и (или) погребение органического материала под массой минерального. В результате этого, восстановление техногенно нарушенных территорий горнодобывающей и горноперерабатывающей отраслей осложняется множественными морфоструктурными нарушениями и неравномерными (горизонтальными и вертикальными) распределениями минеральных и органических веществ.

Для их восстановления необходим комплекс технических и биологических работ по рекультивации земель [67; 88]. Экологически эффективная рекультивация ТНЗ, в том числе отвалов вскрышных и вмещающих пород

заключается в формировании устойчивого почвенно-растительного комплекса [33], поддерживающего свои естественные функции [25; 38] без антропогенного вмешательства. В свою очередь, восстановление основных функций почвенно-растительного комплекса, таких как почвообразование и самовосстановление обеспечивает поддержание и развитие экосистемы и ее структуры в целом. В связи с этим, при рекультивации и восстановлении нарушенной среды необходимо учитывать характеристики нарушенных территорий и природно-климатические условия восстанавливаемых территорий.

Рекультивируемые техногенные почвы по происхождению и составу субстратов, слагающих профиль, разделяют на два вида: (1) «техноземы» – образованные, преимущественно насыпным плодородным (или потенциально плодородным) почвенным слоем, (2) «литоземы» – техногенные почвы из преимущественно горных пород или их смесей [22; 50]. В мировой реферативной базе почвенных ресурсов такие антропогенные почвы относятся к «Technosols», к землям сильно измененным деятельностью человека [99]. Согласно этой классификации техноземы содержат значительное количество включений антропогенного или техногенного происхождения [99], в том числе отвальные породы, золы, илы и т.п. [90; 114; 132], свойства и почвообразование которых определяет их генезис.

Развитие техноземов обуславливается четырьмя стадиями развития: инициальной, органно-аккумулятивной, дерновой и гумусово-аккумулятивной [2; 52], процесс перехода стадий развития связан с накоплением органического вещества. На инициальной стадии эволюционного развития техноземов новообразования и аккумуляции гумусовых веществ определяется эоловыми процессами и формированием благоприятных физико-химических условий для почвенной биоты, определяющих интенсивность почвообразовательных процессов в почвах [25]. Биогенно-аккумулятивные процессы обуславливают переход техноземов к органно-аккумулятивной стадии, однако, как и при инициальной преобладающие процессы данной стадии развития – это различные преобразование минерального субстрата. Впоследствии, по мере эволюции

техноземов и интенсификации биогенной аккумуляции веществ за счет развития микроорганизменных и растительных сообществ, преобладающими процессами почвообразования являются трансформации органического вещества.

При нормальном восстановлении среды каждой стадии формирования эмбриоземов соответствует свой тип растительной группировки синергично связанный с определенным этапом эволюции техноземов [3], аномальное восстановление при сильной степени нарушенности, или низкоэффективной рекультивации затормаживает стадии сукцессии [32].

Скорость нормального восстановления при благоприятных антропогенных и природно-климатических условиях составляет 10-20 лет, то есть период развития техноземов с переходом к эмбриоземам – почвам с естественной эволюционной схемой развития [2; 33; 46]. Однако, для каждого техногенного ландшафта длительность процесса развития может отличаться в зависимости от антропогенных и природно-климатических условий.

Процесс и скорость восстановления нарушенной среды определяют ее компоненты, их состояние, качество и функционирование [2]. В основе теоретического почвоведения (В.В. Докучаев) лежит положение о переходе любой горной породы в почвенное тело под естественным воздействием на нее основных факторов почвообразования: климата, живых организмов и времени. Естественное формирование природных эмбриоземов, как биогенных почвенных образований протекает аналогичным образом с эволюционным развитием почв со схожей морфологической структурой, однако различия природно-климатических условий и степени накопления органического вещества могут существенно отражаться на процессе почвообразования. Таким образом, любые техногенно нарушенные земельные территории посредством ландшафтообразующих факторов постепенно трансформируются в естественный природный биотоп. Длительность периода, необходимого для такой трансформации, для каждого техногенного ландшафта своя [28].

Формирование эмбриоземов и скорость смены стадий сукцессии на отвалах, сложенных минеральными грунтами (субстратами) на начальных этапах

восстановления зависит от антропогенных и природных факторов: подстилающая порода, локальные климатические условия, совокупность живых организмов, форм рельефа и времени, как и при естественном формировании почвенных горизонтов. Однако, в качестве материнской породы на рекультивируемых ТНЗ таких, как поверхности отвалов выступают вскрышные и вмещающие породы.

Формирование антропогенного рельефа обусловлено проводимыми работами на техническом этапе рекультивации, степенью изменчивости структурных элементов отвала при выравнивании и сглаживании поверхностей, террасировании и выполаживании склонов, а также скоростью эрозионных процессов и устойчивостью закрепленных грунтов.

При рекультивации отвалов, сложенных минеральными грунтами (субстратами), определяют степень пригодности грунтов на основе классификаций вскрышных и вмещающих пород. Согласно рассмотренным классификациям, породы подразделяют на три категории: (1) пригодные, (2) малопригодные – пригодные после улучшения и (3) непригодные (или токсичные) [14; 63; 118]. Вскрышные и вмещающие породы категорий – пригодные и малопригодные подлежат рекультивации, непригодные (или токсичные) – консервируются до снижения степени деградации нарушенных земель [23; 47]. Таким образом, почвообразующая порода для восстановления земель отвалов горной промышленности определяется степенью нарушенности земель, а рельеф работами, проведенными на техническом этапе рекультивации, что делает их регулируемыми факторами восстановления среды. К нерегулируемым природным факторам, влияющим на процесс почвообразования, относятся природно-климатические условия и локальные виды живых организмов.

Климат оказывает значительное влияние на физические, химические и биологические процессы, происходящие в почвах. При благоприятных условиях – климатических и почвенно-экологических факторов, процессы аккумуляции органического вещества почвы могут протекать достаточно интенсивно [28]. При неблагоприятных условиях воздействие климатического фактора может стать

лимитирующим для эффективного восстановления земель, что приведет к снижению скорости развития почвенно-растительного комплекса.

Живые организмы являются мощными почвообразователями, а также представляют собой биотический фактор восстановления среды в целом. Формирование растительных сообществ (преимущественно высаженных растений, растений-пионеров) и животных сообществ (почвенных микроорганизмов) происходит на пострекультивационном этапе. Процесс формирования сообществ зависит от созданных условий (в основном на биологическом этапе рекультивации).

Биологический этап рекультивации заключается в формировании почвенного слоя, оструктуривании почвы, оптимизации почвенных режимов (питательного, водно-воздушного) и доведение свойств почвенного покрова до состояния, отвечающего требованиям целевого рекультивационного направления – сельскохозяйственного, лесохозяйственного, рекреационного или санитарно-гигиенического.

Ключевые работы на биологическом этапе рекультивации ТНЗ – это землевание. Землевание – это комплекс работ по снятию, транспортированию и нанесению плодородного слоя почвы и (или) потенциально-плодородных пород на малопродуктивные угодья с целью повышения их улучшения (согласно ГОСТ 17.5.3.05-84). При землевании наносится плодородный слой почвы, для формирования схожего с верхним гумусированным почвенным профилем и обладающего благоприятными для роста растений химическими, физическими и агрохимическими свойствами [28]. На отвалах с пригодными и малопригодными породами проводят работы по землеванию рекультивируемых поверхностей, для консервируемых пород создают изолирующий слой, после чего наносят плодородный или потенциально плодородный почвенный слой [15], с целью повышения продуктивности формируемых техногенных земель.

Рекультивационные мероприятия по землеванию проводятся при первичной обработке территории (работы по мелиорации), с учетом объемов плодородного слоя почвы, оценки его пригодности (согласно ГОСТ 17.4.2.02-83), норм внесения

слоя в зависимости от конкретных природно-климатических условий, целевого использования и природно-экономических характеристик рекультивируемых земель.

Сложность восстановления техногенно нарушенных земель объектов горнодобывающей промышленности, главным образом, обусловлена нарушением и/или полным снятием почвенно-растительного слоя, который является источником органического вещества, необходимого для осуществления процессов почвообразования и самовосстановления среды. Оголенные горизонты почв и пород мало пригодны для формирования растительных сообществ и плодородных слоев почвы.

Кроме того, для земельных отвалов горных производств, переведенных на этап рекультивации, характерны множественные нарушения и загрязнения, препятствующие восстановлению почвенно-растительного комплекса, основными из которых являются: эродирование, дегумификация, уплотнение, захламливание, подтопление, заболачивание, засоление, а также химическое загрязнение.

Таким образом, даже после рекультивации, мелиорации и других работах по восстановлению почвенно-растительных комплексов возникают проблемы формирования устойчивой системы с естественными функциями самовосстановления. Среди основных из них отмечают: загрязнения почвенного слоя, переуплотненность почвы и почвенных субстратов, грубый механический состав пород, дефицит органики, нарушения в почвенных режимах и другие. Из чего следует, что успешное восстановление почвенно-растительного комплекса на отвалах горнодобывающей промышленности основывается на оптимизации почвенных режимов и устранении дефицита органического вещества [69; 88; 105]. Кроме того, восстановление баланса минеральной и органической составляющих почвы улучшает структуру техноземов [111; 113; 114], оптимизирует почвенные режимы [155; 157] и обеспечивает биоту (растения и почвенные организмы) питательными веществами [70; 122; 172].

Вмешательство человека может ускорить процесс восстановления среды, путем создания техноземов при внесении требуемых органических удобрений и

других питательных добавок. Недостаток органического вещества восполняется органическими удобрениями, мелиорантами или почвенными добавками.

1.3 Мелиоранты для рекультивации техногенно нарушенных земель

Мелиоративные работы при рекультивации техногенно нарушенных земель, как комплекс мероприятий, направлены на нормализацию физических и химических свойств техногенных почв, а также на оптимизацию неблагоприятного воздействия от природных факторов: климатических, орографических и эдафических условий с целью повышения эффективности восстановления земель для целевого хозяйственного использования.

Результатами проведения мероприятий по мелиорации ТНЗ является формирование благоприятных водных, воздушных, солевых, питательных и тепловых режимных условий [44].

В целях обеспечения эффективной рекультивации ТНЗ выделяются два направления в мелиорации: техническое и химическое. Технический вид мелиорации направлен на снижение степени засоленности и загрязненности, а также на устранение изменений плотности техногенных почв. Химическая мелиорация нормализует кислотность почвогрунтов.

Вносимые мелиоранты подразделяются на различные виды в зависимости от поставленных задач и методов их реализации. Классификация видов основывается на следующих принципах деления и типологии: по составу – органические, минеральные и органоминеральные; по воздействию – мелиоранты-сорбенты, удобрения-мелиоранты, мелиоранты-структурообразователи и мелиоранты оптимизирующие кислотность; по происхождению – искусственные, природные и нетрадиционные (рисунок 1.8) [44].

При рекультивации земель, нарушенных при разработке месторождений твердых полезных ископаемых лимитирующим фактором восстановительных и почвообразовательных процессов является дефицит органического вещества, недостаток которого может быть восполнен путем внесения мелиорантов [135]. На данный момент существует порядка 300 видов органических удобрений-

мелиорантов, в числе которых такие наиболее распространенные как: торф, вещества на основе остатков и продуктов жизнедеятельности животных и растений, зеленые удобрения, сидераторы, осадки сточных вод, сапропели, углеотходы, биогумус, гуминовые удобрения и другие органические добавки на основе древесной коры, лигнина и прочих субстратов [5; 11; 61; 93; 133; 151].

МЕЛИОРАНТЫ		
ПО СОСТАВУ	ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ	ПО ПРОИСХОЖДЕНИЮ
1. Органические Торф, сапропель, перегной, лесная подстилка, древесные опилки и др.	1. Мелиоранты-сорбенты Глауконит, цеолит, известняк, бентонит, торф	1. Искусственные (синтетические) Синтетические препараты
2. Минеральные Известняк, доломит, гипс, глауконит, цеолит и др.	2. Удобрения-мелиоранты Осадки сточных вод, сапропель, лесная подстилка	2. Природные Глауконит, торф, сапропель, кремнеземы, глиноземы и др.
3. Органоминеральные Комплексные смеси	3. Мелиоранты-структурообразователи Глина, песок, торф, терриконовая порода	3. Нетрадиционные Золошлаки, осадки сточных вод, цементная пыль и др.

Рисунок 1.8 – Классификация мелиорантов по группам согласно составу, воздействию и происхождению

Минеральная составляющая является основой для твердой фазы почвогрунтов, образующей структурный каркас почвы. Разнообразие размеров минеральных частиц определяет структуру и устойчивость техноземов, а характерный для отвалов монофракционный состав пород замедляет процессы почвообразования. Для нормального роста и развития растительного покрова на ТНЗ горных предприятий для восстановления баланса питательных веществ применяются преимущественно минеральные и органоминеральные мелиоранты. Внесение комплексных органоминеральных материалов необходимо при первичном формировании почвогрунтового горизонта (техногенных почв) на отвалах пород крупных фракций, а также для рекультивационных работ ТНЗ со снятым почвенным слоем.

Для комплексного воздействия на растительные и микроорганизменные сообщества рекультивируемого биотопа применяют органоминеральные добавки.

Органоминеральные мелиоранты обладают сбалансированным соотношением химических питательных элементов, способствующих общему повышению трофности почвенной среды [44].

В зависимости от типов земельных нарушений и целевого эффекта определяется вид мелиоранта согласно его воздействию на почвенно-растительные комплексы (рисунок 1.9).

ВИДЫ НАРУШЕНИЙ	МЕЛИОРАНТЫ
Деградация почв	Удобрения-мелиоранты
Химическое загрязнение	Мелиоранты-сорбенты
Засоление	
Нарушения кислотности	Оптимизаторы кислотности
Нарушения плотности	Мелиоранты-структурообразователи
Нарушения водного режима	
Эрозия почв	

Рисунок 1.9 – Схема мелиорантов по видам воздействия

Применение технического и химического мелиорационных направлений на рекультивируемых территориях горного производства позволяет устранить засоление, иссушение, подтопление, изменение в соотношении химических веществ, а также оптимизировать показатели плотности, кислотности и коэффициента разрыхления грунта[44].

Для рекультивации загрязненных земельных участков, в том числе нефтепродуктами [6; 7], тяжелыми металлами [10; 11; 31; 41] применяются мелиоранты-сорбенты. Наибольшее распространение эта группа мелиорантов получила в нефтедобывающей и нефтеперерабатывающих промышленности, это связано с низкой себестоимостью вещества, простотой применения и относительно высокой эффективностью.

Воздействие мелиорантов-сорбентов нацелено на иммобилизацию загрязняющих веществ. Среди мелиорантов-сорбентов минерального состава наиболее высокими сорбционными способностями обладают: каолиниты, глинистые минералы, слюды, керамзит, глауконит, цеолиты [10; 21; 27; 31; 41]. К

органическим мелиорантам-сорбентам относятся: торф, сапропель, лигнин, кора, опилки, мох, компост и другие вещества биологического происхождения [6; 7; 11; 27; 93]. В дополнение, сырьем для формирования мелиоранта могут служить вещества нетрадиционного происхождения: техногенные шлаки, шламы, фосфогипс, силикаты и гидросиликаты магния, угольная пыль [27; 31].

При восстановлении земельных участков с нарушениями структуры, агрегированности частиц, плотности сложения и т.п. проводят мелиорационные работы с внесением мелиорантов-структурообразователей. Мелиоранты-структурообразователи направлены на устранение последствий почвенной эрозии и на восстановление структуры почвы, для их создания часто используют вещества, в композиционный состав которых входят удобрения органического происхождения, кальцийсодержащие и водоудерживающие вещества.

Благодаря внесению органических веществ формируются благоприятные зонально-локальные условия для развития анаэробных (внутри агрегатов) и аэробных (на поверхности агрегатов) микроорганизмов, которые способствуют структурированию органоминеральных комплексов и образованию новых почвенных агрегатов. Сформированная совокупность почвенных агрегатов представляет собой структуру почвы. Устойчивая структура почвы обладает оптимальным водно-воздушным режимом и предотвращает процессы почвенной эрозии, тем самым повышая устойчивость биотопа [56; 162].

Рекультивация земельных территорий с оптимизацией питательного режима или повышением плодородия почв сопровождается внесением мелиорантов-удобрений. Действие данных мелиорантов направлено на увеличение содержания питательных элементов необходимых почвенной среде и растительным сообществам. Отличительной характеристикой удобрений-мелиорантов от классических удобрений является пролонгированный эффект воздействия, обусловленный привнесением в почву резервных питательных элементов необходимых растениям и микроорганизмам. Доступность питательных веществ для растительных и микроорганизменных сообществ обуславливается определенными условиями и процессами. Таким образом, классические

удобрения больше направлены на повышение эффективного плодородия, а мелиоранты-удобрения – потенциального.

Однако, сбалансированное содержание питательных веществ не гарантирует повышенное плодородие почвы и эффективное восстановление почвенной среды. Доступность питательных элементов, растворимость и усвояемость растениями определяется кислотностью почвы. Универсальных оптимальных диапазонов значений кислотности почвы нет, но, тем не менее можно отметить общие закономерности формирования благоприятных условий, в зависимости от климата, водного режима почвы и характера биохимических процессов, протекающих в ней.

На территории Российской Федерации наиболее широко применимым мелиорационным мероприятием при рекультивации земель является известкование кислых почв. Мелиоранты используемые при известковании почв благодаря своим свойствам можно отнести как к структурообразователям, так и сорбентам или удобрениям.

Внесение кальцийсодержащих веществ оказывает благоприятное воздействие на кислые и некарбонатные почвы, улучшая почвенную структуру, нормализуя водно-воздушный баланс почвенно-растительных комплексов, таким образом, определяя мелиорант как структурообразователь. В совокупности, это приводит к нейтрализации кислот и способствует разложению минералов, насыщая почву питательными элементами – мелиорант-удобрение [35]. Кроме того, изменение кислотности приводит к иммобилизации тяжёлых металлов, путем образования соединений гидрооксидов, карбонатов, фосфатов, что, в свою очередь, снижает подвижность и поступление тяжелых металлов в растительные организмы – мелиорант-сорбент.

В большинстве случаев антропогенное закисление почв на территориях, прилегающих к горнопромышленным объектам, происходит вследствие промышленных выбросов, содержащих повышенные концентрации оксидов углерода, серы и азота. Известкование таких почв проводят путем добавления мелиорантов: различных видов мергелей, негашёной извести, мела, доломитовой

и известняковой муки. Аналогичным методом мелиорации на основе действия кальция является гипсование почв (внесение гипса). На промышленных территориях гипсование проводят в местах нарушения водных и солевых режимов почвы для замедления процессов галогенеза, окультуривания солонцов и солонцеватых почв. Улучшение физико-химических свойств засоленных почв происходит за счет замещения ионами кальция растворенных в почве ионов натрия.

К распространенным источникам засоления грунтов минерально-сырьевого комплекса относятся площадки складирования сырья, продукции, отходов и места перегрузки, кроме того, месторождение и разрабатываемая порода могут быть причиной и источником высвобождения минеральных солей. Помимо внесения молотого гипса, применяют различные кальцийсодержащие нетрадиционные мелиоранты, которые входят в группу отходов производства (например: фосфогипс – отход химической промышленности). Обязательным условием применения нетрадиционных мелиорантов является отсутствие в них токсичных примесей.

Существуют и другие методы обработки почв с воздействием на концентрации различных ионов в почвенных растворах: водородных – кислование с применением мелиорантов на основе серной кислоты, серы и различных сульфатов, фосфорных – внесением фосфорных удобрений-мелиорантов (фосфорирование) [21].

Метод кислования относится к спорным методикам мелиорации ввиду наличия, как положительного эффекта воздействия, так и отрицательного. Наличие кислоты в мелиоранте способствует переходу труднорастворимых соединений в подвижные, более доступные растениям. Однако, локальная аккумуляция мелиоранта приводит к разрушению почвенного поглощающего комплекса, что в свою очередь может привести к губительным последствиям для почвенной микробиоты.

В качестве нетрадиционных мелиорантов для подкисления почв широко используются вещества на основе отходов металлургической, химической и нефтеперерабатывающей промышленности [54].

Помимо изменений кислотности, мелиоративные вещества способны воздействовать на плотность почв. Основные техногенные причины ухудшения плотности грунтов связаны с нарушением вертикальной и горизонтальной структуры почвенно-грунтового покрова и изменением морфологического строения грунтов. Искусственная уплотненность или разрыхленность характерна для различных сооружений, хранилищ промышленных отходов, транспортной инфраструктуры и других объектов [98].

Особенно остро вопрос стоит с устранением последствий уплотнения потенциально-плодородной почвы, в местах временных хранилищ, для последующего применения в рекультивационных работах. Длительное хранение и уплотнение приводит к деградации почв, путем разрушения естественной структуры почвы, нарушении воздухо-воздушного режима и гибели почвенных сообществ микро- и макроорганизмов [28].

Проблему искусственного уплотнения или разрыхления позволяет устранить проведение мелиорационных работ по изменению гранулометрического состава грунта. Выделяют работы по глинованию, то есть привнесению илистых или коллоидных частиц в песчаные почвогрунты для увеличения емкости поглощения почв, и, как следствие, улучшения водно-воздушного и питательного режимов и пескованию, то есть изменению плотности тяжелых суглинков.

От плотности почв и размеров почвенных частиц зависит емкость катионного обмена грунта и поглонительная способность в целом, поэтому глинование является одним из наиболее распространённых методов мелиорации в рекультивации [12; 26; 49]. Мелиорационные работы по глинованию техноземов на территориях горных комплексов актуальны при рекультивации хвостохранилищ и других объектов с характерной преимущественной мелкодисперсной фракцией грунта. Глинистые минералы обладают хорошей

сорбционной способностью, поэтому глинование может применяться на территориях, загрязненных тяжелыми металлами.

Пескование земель применяется на переуплотненных почвах, где преобладающими являются илистые и глинистые частицы. Нарушение фракционного состава почвы оказывает негативное воздействие на воздушный, водный и тепловой режимы почвы, что приводит к гибели почвенных микроорганизмов. Пескование улучшает микроклимат почвы и, как правило, применяется совместно с внесением органических удобрений, способствуя восстановлению условий пригодных для микробиологических сообществ.

Таким образом, основные направления мелиорационных работ с привнесением различных почвенных добавок на рекультивационном этапе по улучшению агрофизических и агрохимических показателей разделены на два вида мелиораций: культуротехнический и химический. Соответственно, при культуротехнической мелиорации используют в основном мелиоранты-сорбенты и мелиоранты-структурообразователи, а при химической – удобрения-мелиоранты.

Ежегодно расширяется база удобрений, мелиорантов, макро- и микроудобрений, микробиологических добавок и других веществ для улучшения плодородия почвы. В связи с этим, для полноценного представления о вносимом добавочном материале необходимо учитывать происхождение вещества.

Классификация по происхождению почвенных добавок, в том числе и мелиорантов значительно видоизменяется, появляются понятия «природного происхождения», «синтетического» и другие. Это осложняет работу по систематизации почвенных добавок и химических веществ, затрудняет процесс контроля и мониторинга, что в результате может стать причиной риска возникновения негативного воздействия. Наиболее часто встречаемой классификацией мелиорантов по происхождению является упрощенное разделение веществ на искусственные, традиционные и нетрадиционные.

Мелиоранты, относящиеся к группам происхождения традиционных и искусственных чаще применяются при восстановлении земель

сельскохозяйственного назначения, традиционные и нетрадиционные мелиоранты чаще используются при рекультивации. Выбор традиционных и нетрадиционных мелиорантов для рекультивации обусловлен их стоимостными характеристиками.

В связи с дефицитом и повышением рыночной стоимости традиционных мелиорантов, в настоящее время все более актуальным вопросом является применение группы мелиорантов нетрадиционного происхождения, к которым в том числе относятся мелиоранты на основе отходов производства и потребления.

Использование приемлемых субстратов в качестве нетрадиционных мелиорантов является одним из рациональных экологических методов их утилизации, экономическая эффективность применимости заключается в их низкой стоимости. Кроме того, превосходство этих мелиорантов по сравнению с классическими удобрениями заключается в улучшении физико-химических показателей грунтов, за счет долговременного эффекта воздействия, что в свою очередь приводит к повышению почвенного плодородия. При этом зачастую, эти мелиоранты по питательным свойствам и эффективности воздействия не уступают традиционным [36; 48; 61].

К наиболее известным видам нетрадиционных мелиорантов можно отнести растительную золу и промышленные известьсодержащие отходы. Следует отметить, что к концу XX века около 20 % известковых удобрений были представлены отходами промышленности. На данный момент среди нетрадиционных мелиорантов активно используются некоторые виды шламов, металлургические шлаки, золы, отходы бурых углей, цементная пыль, остаточный мел, известковые и доломитовые отходы и др. [40; 53].

Высокой удобрительной пролонгацией обладают нетрадиционные мелиоранты на основе осадков сточных вод [4; 34; 133], магниевые мелиоранты – отходы горной промышленности и комплексные мелиоранты на основе глауконитов, кремнеземов или глиноземов [41; 48]. Благодаря их высоким ионообменным и сорбционным способностям питательные элементы сохраняются от вымывания, что исключает необходимость повторного внесения мелиорантов в течение 5-6 лет [4].

Для рекультивации техногенно нарушенных территорий свойство пролонгированного эффекта играет важную роль при выборе мелиорационного вещества. Оно обеспечивает восстанавливаемые земли питательными элементами без необходимости повторного внесения мелиоранта, сохраняя сырьевые и финансовые ресурсы предприятий.

Таким образом, из основных преимуществ использования мелиорантов можно отметить их долговременный эффект воздействия, комплексное воздействие на земельные ресурсы и низкую стоимость. Представленные мелиоранты оптимизируют не только почвенные режимы (водный, воздушный, кислотный, тепловой), но и повышают содержание доступных растениям питательных элементов, что в совокупности обеспечивает повышение плодородия восстанавливаемых почв. Комплексный эколого-экономический эффект мелиорантов повышает их спрос при проведении рекультивационных работ техногенно нарушенных земель.

Таким образом, на основе сформированной классификации видов мелиорантов, можно сделать вывод, что при рекультивации ТНЗ объектов горной промышленности, в том числе отвалов наиболее рационально и эффективно применять органические мелиоранты нетрадиционного происхождения.

1.4 Нетрадиционные мелиоранты на основе осадков сточных вод в рекультивации техногенно нарушенных территорий

Увеличение масштабов нарушений и развитие способов проведения работ по восстановлению почвенно-растительного покрова обусловили необходимость поиска наиболее эколого-экономически рациональных подходов и технологий в области рекультивации техногенно нарушенных земель. Одним из актуальных направлений в рекультивации земель объектов горной промышленности является использование нетрадиционных удобрений (мелиорантов), сформированных на основе осадков сточных вод (ОСВ) [154] для восстановления ТНЗ, в том числе карьеров [73; 82], отвалов [107; 111], хвостохранилищ [65].

Согласно ГОСТ 17.4.3.07-2001 под осадком сточных вод понимают твердую фракцию, состоящую из органических и минеральных веществ, выделенных в процессе очистки сточных вод методом отстаивания (сырой осадок), и комплекса микроорганизмов, участвовавших в процессе биологической очистки сточных вод и выведенных из технологического процесса (избыточный активный ил).

Возможность применения ОСВ в качестве органических почвенных добавок уже доказана и активно используется в сельском хозяйстве разных стран [115], согласно статистической службе Европейского союза Eurostat («Евростат») за 2018 год: в Польше использовано 20 % ОСВ в качестве мелиорантов на сельскохозяйственных землях (из 583,07 тыс. тонн), Австрии – 21 % (из 234,481 тыс. тонн), Швеции – 39 % (из 210,9 тыс. тонн), Норвегии – 44 % (из 147,6 тыс. тонн).

Кроме того, разработан ряд нормативной документации в области сельского и лесного хозяйства по применению ОСВ в качестве удобрений и почвенных добавок устанавливающей регламент контроля и регулирования поступающих в почву экологически опасных компонентов осадка, в том числе патогенов и тяжелых металлов.

Осадок сточных вод по своему виду, химическому составу и физико-химическим свойствам может существенно отличаться в зависимости от состава очищаемых сточных вод, системы водоочистки и процессов его обработки [66].

Сточные воды делятся на бытовые, промышленные и поверхностные («ливневые стоки») [103], различные соотношения видов поступающих на очистку вод влияют на характеристику образуемых ОСВ. Характерные отличия можно наблюдать при сравнении осадков от городских систем очистки вод, очистных сооружений различных производственных объектов и даже при резкой смене годовых или сезонных распределений атмосферных осадков [153].

В зависимости от целей и требований, система водоочистки комплектуется из аппаратов механических, физико-химических и биологических методов очистки. Таким образом, совокупность процессов водоочистки является одним из определяющих факторов состава и характеристики образующегося осадка [77].

По завершению всех этапов водоочистки осадок удаляется из очистных сооружений для обработки перед складированием, утилизацией или захоронением. Обработка ОСВ (уплотнение, обезвоживание, стабилизация, кондиционирование и обезвреживание) влияет на его объем, влажность, плотность и состав.

Существуют различные классификации ОСВ в зависимости от происхождения, этапов очистки сточных вод и его обработки. При очистке сточных вод из системы удаляется различный мусор, песок, избыточный активный ил и другие включения.

Обобщенное понятие «осадка сточных вод» подразумевает совокупность массы сырого осадка и избыточного активного ила, т.е. твердые, полутвердые или илоподобные образования, которые в различных пропорциях состоят из тяжелых примесей (песка), сырого осадка (в основном, взвешенных веществ) и активного ила (избыточного количества различных популяций микроорганизмов).

Осадок сточных вод широко используется в качестве удобрений, мелиорантов и других почвенных добавок, он является источником высокого содержания органического вещества (от >20 % до 80 %), обладает рядом питательных элементов, необходимых растениям, а также может регулировать почвенные режимы [91; 115].

Органическое вещество имеет ключевое значение при восстановлении техногенно нарушенных земель, поскольку оказывает воздействие на основные физические, химические и биологические свойства почвы, чем улучшает ее структуру, повышает почвенную устойчивость к эрозии, способствует удержанию питательных веществ и содержит значительную часть активаторов роста растений [122; 172]. Таким образом, наличие достаточного количества органического вещества определяет экологическую эффективность рекультивационных мероприятий, скорость восстановления почвенно-растительного комплекса и стабильность поддержания продуктивности техногенной экосистемы.

Согласно исследованиям, из-за высоких концентраций фосфора и азота, ОСВ может быть причислен к фосфорным и/или азотным удобрениям [131]. По

результатам полевых и почвенных модельных исследований было отмечено значительное повышение концентраций азота и фосфора в почве, обработанной ОСВ [10, 34, 49].

В рекультивации техногенно нарушенных земель азот и фосфор существенно влияют на положительную динамику роста растений, улучшают рост клеток, процессы метаболизма, участвуют в формировании корневой системы [164]. Однако, вследствие неоднородности происхождения и различий процессов образования осадков, и соответственно разного состава ОСВ могут отмечаться и обратные результаты – с понижением концентрации азота, что о чем свидетельствуют результаты исследования воздействия шлама кварцевой промышленности на почвенный покров [91].

Кроме того, к существенному преимуществу ОСВ относится наличие питательных компонентов, таких как К, Са, Mg, Na, необходимых растениям и почвенным микроорганизмам [91].

В связи с этим, при восстановлении бедных и малоплодородных почвогрунтов нужно учитывать количество питательных веществ, входящих в состав вносимого осадка, во избежание их дефицита в почве и последующего угнетения нормального роста и развития растений. Неоднородность по содержанию питательных элементов в различных осадках сточных вод отмечено в таблице 1.1.

Кроме того, наблюдается расхождение в результатах воздействия вносимого осадка на кислотность и электропроводность почвы.

По мере постановки и проведения экспериментов на почвенно-растительных площадках были получены результаты по повышению [91] и снижению [6, 35, 47, 49] кислотности почвы с увеличением дозировки внесенного осадка, что также объяснимо различием осадка и исходной кислотностью почвы. Без внесения критических объемов осадка, значение кислотности почвы отмечалось в диапазоне – 6,0-7,5.

Таблица 1.1 – Усредненные состав и характеристика ОСВ

Характеристика	Осадок городских сточных вод*	Источники
pH	~ 6,0-7,5	[64; 80; 95; 120; 134; 136; 172]
Электропроводность, (мкСм/см)	1,39-2,83	[95; 120; 134; 136]
Органическое вещество, %	26,6-83,5	[64; 78; 80; 95; 120]
N (общ.), %	~ 5-20	[78; 80; 134; 136]
P (P ₂ O ₅), %	~ 2-20	[78; 80; 168]
Zn, мг/кг	~ 500-1000	[78; 80; 95; 120; 164; 172]
Cu, мг/кг	~ 90-800	[64; 78; 95; 120; 164; 172]
Cr, мг/кг	~ 16-288	[64; 80; 95; 164; 172]
Ni, мг/кг	~ 10-140	[64; 80; 95; 164]
Pb, мг/кг	~ 1,5-190	[64; 78; 80; 164; 172]
Cd, мг/кг	~ 0,5-2	[64; 78; 80; 95; 164]

Применение осадков сточных вод в качестве почвенной добавки оказывает значительное влияние на изменение электропроводности, которое, в основном, повышается в исследуемых почвах после внесения осадков [66; 91; 168]. При изменении состава осадка, засоленности почв или методов обработки, может возникать обратный эффект – понижение электропроводности [172], как например, при замораживании-оттаивании ОСВ, перед внесением в солонцеватые почвы [86]. Изменение проводимости является индикатором засоленности почв, увеличение значения при внесении осадка может быть связано с растворением солей из осадка [16, 22, 35]. Нарушение водно-солевого режима оказывает неблагоприятное воздействие на жизнедеятельность растений, поэтому при

разработке проекта по мелиорации и рекультивации необходимо учитывать такие параметры, как кислотность и электропроводность.

В целом, результаты исследований применения осадков сточных вод в качестве почвенных добавок подтверждают положительное воздействие на состав и свойства почв. Внесение осадка сточных вод увеличивает водоудерживающую способность почвы [172], улучшает ее структуру, оптимизирует режимы, повышает содержание органических веществ, азота, фосфора и, в некоторых случаях, ряда других питательных элементов таких, как, К, Са, Mg, Na [172].

Отмечалось благоприятное воздействие на процессы фотосинтеза и на содержание хлорофилла при использовании осадка сточных вод, как почвенной добавки [78; 134; 168]. При сравнении хвои лиственницы, выращенной на почве с внесенным осадком и на контрольной почве, отмечалось значительное увеличение хлорофилла (при внесении осадка 30 и 60 т/га) [78]. Однако, при оценке хлорофилла в подсолнечнике, выращенном на почвах, удобренных осадком (15, 30 и 60 т/га) и классическим удобрением (NPK), существенных различий не наблюдалось [134]. Рекультивация земель с применением ОСВ в таких диапазонах доз улучшает фотосинтез, не уступая классическим удобрениям, что дает как экологический эффект, так и экономическое преимущество его применения.

В исследованиях воздействия внесённого осадка на рост растений отмечается общая тенденция, где небольшие концентрации осадка дают лучшую динамику роста растений (злаковых [91; 172], травянистых [80; 119; 138], подсолнечников [91; 120; 134], бобовых [96]), чем контрольные почвы, при этом, увеличение количества добавляемого ОСВ до критических значений дает ингибирующий эффект и приводит к торможению роста [96; 160; 164]. Подобные результаты подавления роста растений после увеличения доз внесения осадка можно объяснить достижением пороговых значений – без фитотоксичного воздействия [64]. Поэтому, необходим разумный подход в использовании осадка с расчетом доз внесения на основе всех факторов воздействия.

Добавление осадка улучшает корневую систему – способствует увеличению биомассы и разрастанию корневой системы [104; 170]. Корни растений в рекультивации техногенно нарушенных земель ускоряют процесс восстановления почвенно-растительного комплекса, поскольку закрепляют почвенный слой, улучшают его структуру, препятствуют процессам эрозии.

Почвы с внесённым осадком дают лучшие результаты по продуктивности биомассы растений: злаков [73; 138; 172] и кустарников [95]. Биологическая продуктивность почвенно-растительных комплексов отражает состояние плодородия почвы и ее ресурсов. Органические удобрения или органические нетрадиционные добавки, например, осадки сточных вод способны восстановить баланс органических и минеральных компонентов, необходимых растениям и, тем самым, обеспечить восстановление техногенно нарушенных земель [122].

По данным ранее проведенных исследований при рациональных дозах внесения ОСВ в почву индикаторов болезней, пигментных изменений (хлороза или некроза) у растений не отмечалось [138; 168].

На почвах обработанных ОСВ отмечалось улучшение результатов по росту растений и приросту биомассы в диапазоне внесения 15-45 % осадка в сравнении с необработанными почвами [80; 138; 168]. Оптимальная доза внесения обусловлена усиленной доступностью питательных компонентов для растений, в сравнении с контрольными площадками необработанных почв [80; 120].

Осадки сточных вод могут содержать потенциально опасные компоненты, такие как, тяжелые металлы [66; 86; 91; 136], органические загрязнители, патогены [66; 172] и другие фитотоксичные вещества [168], которые могут накапливаться в организмах и окружающей среде, препятствуя развитию и восстановлению почвенно-растительных участков. Для стабилизации и снижения токсичности осадка, проводят мероприятия по обработке и обезвреживанию осадка: компостирование, термическое воздействие (тепловая сушка/обработка, сжигание, замораживание-оттаивание), анаэробное сбраживание и другие методы. Тем не менее, это не устраняет вероятность загрязнения экосистемы тяжёлыми

металлами, что делает их основным лимитирующим фактором применения ОСВ в земельных работах [91; 164].

При внесении в почву ОСВ с высокими концентрациями тяжёлых металлов (ТМ), отмечается увеличение концентраций ТМ в почве Cu и Zn, Pb и Mn, Cr, Cd. В зависимости от эдафических условий происходит аккумуляция в верхних почвенных горизонтах и накопление в растениях и живых организмах, а также вертикальная, горизонтальная миграция с почвенными растворами в нижние горизонты и на ближайшие территории. Миграция, трансформация и биоаккумуляция соединений ТМ зависят от химического состава и реакции среды [123; 149], органического вещества, режимов почвы и геохимических барьеров [68; 148].

Чрезмерное накопление ТМ в почве и растениях может привести к нарушению функций экосистемы и негативным последствиям для живых организмов. В связи с этим, для предотвращения загрязнения почв внесение осадков сточных вод нормируется и регламентируется нормативными документами (для РФ – ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 «Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений»).

Согласно нормативным документам (ГОСТ Р 17.4.3.07-2001) и установленным значениям допустимых валовых содержаний ТМ в ОСВ допускается внесение осадка с повышенными содержаниями ТМ (в сравнении с ПДК) без последующего негативного воздействия на обрабатываемые почвы, что также подтверждалось исследованиями [91; 136].

Однако, стоит учитывать, что недостаток некоторых тяжелых металлов также может привести к угнетению или гибели растений, так как ряд из них является питательными микроэлементами для растений [66; 86]. Например, наличие меди и магния в почве необходимо для регуляции процессов фотосинтеза и транспорта белков, цинк – для окислительно-восстановительных процессов. От применения осадков различного происхождения наиболее часто повторяющимися элементами, повышающими концентрации в почве, являются – Cu и Zn [66; 136];

172], что может быть как преимуществом осадка, так и недостатком, в зависимости от их концентраций.

Таким образом, для рационального внесения ОСВ и для предотвращения загрязнения почв металлами каждый осадок необходимо оценивать применительно к облагораживаемой почве и условиям среды; проводить комплексное исследование химического состава и физико-химических свойств вносимого ОСВ и обрабатываемой почвы с расчетом гарантировано безопасных доз внесения осадка [103].

Потребность в количестве питательных элементов, как и толерантность к повышенным содержаниям тяжелых металлов у разных растительных культур отличается. Следовательно, при расчете доз и оценке безопасности внесения ОСВ в земли рекультивируемых территорий следует проводить исследования почв, используемого осадка, а также мониторинг состояния восстанавливаемой растительности и необходимых оптимальных условий для обеспечения нормального роста и развития растений.

В рассматриваемых исследованиях по оценке воздействия внесенного ОСВ на растительные культуры, выращенные на обработанных почвах, не было зафиксировано негативных последствий при росте и развитии представителей травянистых [138] и сельскохозяйственных культур [91; 168].

Однако, отмеченное торможение роста растений от чрезмерных внесений ОСВ [120], а также зафиксированное накопление ТМ в различных органах растений связано с повышенными их концентрациями в осадке [96; 172]. Эти данные еще раз подтверждают, что использование ОСВ в земельных работах, обуславливает необходимость контролировать концентрации тяжелых металлов в почве; и не исключают экологически токсичное воздействие всех видов осадков.

Несмотря на эффективность действия преобразованного осадка сточных вод, его применение наиболее рационально при проведении восстановительных работ техногенно нарушенных и лесотехнических земельных территорий. Также, рекомендуется ограничить их использование на сельскохозяйственных территориях, из-за потенциального риска загрязнения окружающей среды и для

предотвращения увеличения концентраций тяжелых металлов в пищевой промышленности. При биоаккумуляции тяжёлых металлов в растениях происходит их распространение по всем трофическим уровням, что увеличивает негативное воздействие в восстанавливаемой экосистеме.

Такие загрязнения оказывают меньший масштаб воздействия на человека при использовании на техногенно нарушенных и лесохозяйственных территориях, так как не влияют на производство продуктов питания и в случае риска повышения концентраций ТМ выше установленных нормативами значений приведет к меньшему экологическому ущербу [120].

Одним из этапов планирования рекультивационных мероприятий техногенно нарушенных земель является выбор растительных культур. При внесении ОСВ с высокими концентрациями ТМ рекомендуется выбирать растения-фиторемедианты, которые позволят снизить потенциальный риск загрязнения окружающей среды от внесенного осадка [134; 164]. Таким образом, при рациональном выборе осадка, его доз внесения и метода обработки, улучшение почвогрунта путем внесения осадков не окажет фитотоксичного воздействия на восстанавливаемые почвенно-растительные комплексы при рекультивации техногенно нарушенных земель.

Для проведения эффективной рекультивации техногенно нарушенных земель объектов горной промышленности одним из основных препятствий является значительный дефицит органического материала [73; 82; 113]. Стандартный вариант мероприятий подразумевает нанесение плодородного (ПСП) или потенциально плодородного слоя почвы (ППСП) на восстанавливаемые территории, однако, такой подход не всегда гарантирует экологически эффективное формирование техногенной экосистемы. Из-за недостатка питательных элементов и органического вещества необходимо неоднократное внесение химических и органических удобрений, что повышает стоимость восстановительных работ. Альтернативным вариантом является внесение нетрадиционных удобрений – осадков сточных вод, которые по сути

являются экономически доступным [120; 131] вторичным материальным ресурсом [117].

Рекультивируемые земли горного производства, как и почвы сельскохозяйственного назначения могут быть улучшены за счет внесения ОСВ в качестве почвенных добавок [81; 82], удобрений [78; 96] или мелиорантов, которые повышают содержание органического вещества, питательных элементов [114; 117; 144] – фосфора и азота, а также ряда других микрокомпонентов, необходимых растениям. По физико-химическим свойствам почвогрунта, осадок способен улучшить плотность, агрегированность [75], структуру почвы, водно-воздушный режим, а также повысить устойчивость к процессам эрозии [113]. Как уже было отмечено ранее, согласно результатам исследований, полученным на основе облагораживания сельскохозяйственных почв, внесение ОСВ благоприятно воздействует на рост и развитие растений. Наблюдается ускорение роста растений, увеличение прироста наземной биомассы и корневой системы, а также отмечается положительное воздействие на процессы фотосинтеза и на содержание хлорофилла.

Преимущества и недостатки использования осадка сточных вод при рекультивации техногенно нарушенных земель отмечены на рисунке 1.10 [141].

С обеспечением всех оптимальных режимов для восстановления земель при проведении рекультивационных работ на техногенно нарушенных территориях горной промышленности, внесение осадка может улучшить скорость формирования почвенно-растительного покрова, то есть скорость стабилизации и восстановления техногенной экосистемы. Это позволит в кратчайшие сроки снизить негативное воздействие от нарушенных земель на окружающую среду и вернуть земли в хозяйственное использование.

Примеры положительных результатов по применимости ОСВ на техногенно нарушенных территориях горных производств можно встретить в исследованиях восстановления карьеров [73; 82], отвалов [107; 111], хвостов золотодобычи [65] и на нарушенных территориях бокситовых месторождений [163].

Добавление ОСВ при рекультивации нарушенных территорий объектов горной промышленности повышает содержания органического вещества, доступного фосфора, меди и цинка, как микроэлементов необходимых растениям [73; 82; 163]; из недостатков – увеличивает концентрации ТМ (без превышений фоновых значений) и снижает кислотность рекультивируемых земель [111; 163].

ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСВ В РЕКУЛЬТИВАЦИИ	
Преимущества	Недостатки
Низкая стоимость субстрата, как отхода, вторичного материального ресурса	Необходимость проводить предварительную обработку с целью обезвоживания, стабилизации, улучшения физико-механических свойств
Высокие концентрации азота и фосфора, что потенциально относит осадок к группе азотных, фосфорных удобрений	
Высокое содержание органического вещества, необходимого для рекультивации полигонов отходов горной промышленности	Присутствие тяжелых металлов Zn, Cu, Cr, Pb, Ni. Чтобы не допустить загрязнение почвы данными элементами необходимо строго рассчитывать дозу каждого внесения ОСВ
Наличие питательных элементов необходимых растениям – K, Ca, Mg, Na	В отсутствии обработки осадка – потенциальная экологическая опасность в наличии загрязняющих органических соединений и патогенной микрофлоры
Положительное воздействие на условия для роста растений	
Снижение количества применяемых химических удобрений и аналогичных субстратов, необходимых в сельскохозяйственной промышленности	Низкая кислотность осадка, что может негативно отразиться на техноземы из-за повышения миграционной способности тяжелых металлов
Улучшение физических свойств почвы: плотности, агрегированности, которые формируют структуру почвы и повышают устойчивость к развитию эрозионных процессов	
Потенциал способствованию восстановления экосистемы путем ускорения формирования почвенно-растительного покрова	

Рисунок 1.10 – Преимущества и недостатки ОСВ для рекультивации ТНЗ

1.5 Выводы по Главе 1

1. В результате разработки месторождений полезных ископаемых происходит интенсивное и масштабное изменение ландшафта, которое приводит к ежегодным увеличениям площадей техногенно нарушенных земель – 419,4 тыс. га за 2017 год, 430,6 тыс. га за 2018, 437,4 тыс. га за 2019, и 445,7 тыс. га за 2020 год.

Вследствие того, что ежегодно на поверхность перемещают более 100 млрд т горной массы, среди техногенно нарушенных земель особое внимание следует уделять полигонам складирования горнопромышленных отходов, в частности отвалам. На территории России уже накоплено более 80 млрд т горнопромышленных отходов, количество которых ежегодно увеличивается на 2 млрд т. В настоящее время под складирование горнопромышленных отходов и формирование отвалов в РФ из хозяйственного оборота выведено более 300-500 тыс. га земель, что обуславливает необходимость наращивания темпов и масштабов проведения рекультивационных работ.

2. Среди основных нарушений характерных для земельных объектов горной промышленности выделяют: загрязнения почвенного слоя, переуплотненность почвы и почвенных субстратов, грубый механический состав пород, дефицит органики и деградацию почвенных режимов. Таким образом, при проведении рекультивации для успешного восстановления почвенно-растительного комплекса на отвалах горнодобывающей промышленности необходимо формирование оптимальных почвенных режимов и устранение дефицита почвенного органического вещества, что возможно при внесении различных органических почвенных добавок или мелиорантов промышленного происхождения (нетрадиционных мелиорантов).

3. Потенциальными органическими мелиорантами применимыми для рекультивации техногенно нарушенных земель объектов горной промышленности являются осадки сточных вод, которые в большинстве случаев характеризуются высоким содержанием органического вещества, доступного азота, фосфора и других микроэлементов необходимых растениям. Однако, в ряде случаев также отмечается повышенное содержание тяжелых металлов, в связи с чем, необходима оценка применимости осадков перед внесением в почву.

ГЛАВА 2 ФОРМИРОВАНИЕ ПОЧВЕННОГО СЛОЯ НА РЕКУЛЬТИВИРУЕМЫХ ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ ЗЕМЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД

2.1 Мелиорационный потенциал осадков сточных вод

Один из ключевых моментов рекультивации объектов горной промышленности – мелиорация и выбор мелиорантов. Для рекультивации объектов горной промышленности приоритетнее дешевые, органические мелиоранты с пролонгированным эффектом воздействия. В связи с чем, развивается тенденция оценки применимости нетрадиционных мелиорантов, в том числе осадков сточных вод (ОСВ) в качестве мелиорантов для рекультивации техногенно нарушенных земель [154], как дешевых вторичных материальных ресурсов.

Рекультивация техногенно нарушенных земель с использованием нетрадиционных мелиорантов таких, как осадки сточных вод, комплексно решает целый ряд экологических задач:

- 1) уменьшение ущерба окружающей среде;
- 2) восстановление нарушенных территорий (путем их рекультивации);
- 3) уменьшение объемов накапливаемых отходов;
- 4) увеличение объемов вторичных материальных ресурсов;
- 5) рациональное использование материальных и земельных ресурсов.

Кроме того, совместная рекультивация техногенно нарушенных земель горной промышленности и утилизация осадков в качестве вторичных материальных ресурсов согласуется и поддерживается принципами устойчивого развития и развивающиеся эколого-экономические модели (вроде *Circular Economy*, *Zero-Waste*, *Green Economy*).

2.1.1 Осадки городских сточных вод, как нетрадиционные мелиоранты

Например, известно, что ОСВ городского происхождения широко используют в Швеция и Испания (более 60% ОСВ) в сельском хозяйстве, а в Дании, Великобритании и Швейцарии – более 45%. Кроме того, странах ЕС сельскохозяйственное использование ОСВ широко распространено в Чехии, Франции, Венгрии, Португалии, Италии и Словакии. Согласно данным *EurEau* и *Eurostat* утилизация ОСВ в сельскохозяйственном направлении является приоритетной в таких странах, как Кипр, Дания, Франция, Ирландия, Португалия, Словакия и Испании, а мелиорация земель – одно из приоритетных решений в Финляндии и Швеции.

Рассматриваемые ОСВ являются отходами биологического этапа очистки сточных вод. Биологический этап заключается в очистке вод от органических и биогенных веществ благодаря процессам жизнедеятельности бактерий, одноклеточных и других микроорганизмов. В процессе очистки образуется осадок – ОСВ, представляющий собой обезвоженный активный ил, в состав которого входят микроорганизмы, минеральные частицы, сложные органические вещества, а также возможны другие включения [34].

ОСВ городских очистных сооружений обладают высокими концентрациями органических и питательных веществ, в особенности азота и фосфора, что делает их потенциальными дешевыми органическими мелиорантами [103; 108; 170]. Высокое содержание фосфора в ОСВ позволяет отнести их к фосфорным мелиорантам. В почве, обработанной осадком, отмечается повышение содержания фосфора доступного растениям [134; 164; 172], а также увеличение содержания азота в почве [82; 92]. С увеличением срока внесения ОСВ городских очистных сооружений в почвы концентраций увеличение количества подвижного фосфора (P_2O_5), так как сложные фосфорорганические соединения разлагаются микроорганизмами-деструкторами и фосфор переходит в более подвижные формы, которые легко усваиваются растениями [34].

Повышенное содержание органического вещества в осадке улучшает агрегативную стабильность, что положительно влияет на физические

характеристики почвы, увеличивая водоудерживающую способность [172], и снижение плотности почвогрунта [82; 92; 113].

В обработанной почве также отмечается повышение ряда других питательных элементов: К, Са, Mg, Na [92; 172] и увеличение содержания тяжёлых металлов (ТМ): Cu и Zn, Pb, и Mn, Cr, Cd [66; 86; 91; 136].

Из-за высоких содержаний ТМ и экологического риска их выщелачивания, миграции и аккумуляции необходим учет рН обрабатываемой почвы [123; 148]. Кислотность (рН) осадка сточных вод определяется в диапазоне 6,5–7,5 [64; 80; 120; 172]. Однако, внесение осадка не оказывает однородного воздействия на кислотность почвы, а также на показатель электропроводности [89; 92]. При оценке воздействия осадка на обрабатываемые почвы результаты более ранних исследований отмечают, как повышение [91; 152], так и понижение [77; 170] кислотности почвы после внесения ОСВ.

Также при внесении оптимальных доз осадка городских сточных вод (не более 15-45 %) отмечается улучшение растительного покрова [80; 138; 168]. В основном отмечается увеличение прироста биомассы [73; 138; 172] и улучшение динамики роста растений [80; 91; 119; 138; 172]. Однако, есть обратные результаты, где чрезмерное внесение ОСВ приводило к торможению роста [96; 160; 164], что могло быть обусловлено повышением порога фитотоксичности осадка.

Различия в результатах воздействия ОСВ на почвенно-растительные комплексы может быть объяснено неоднородностью состава осадка. Химический состав и физико-химические свойства ОСВ могут различаться в зависимости от очищаемых сточных вод, системы водоочистки и процессов его обработки [66; 143].

Осадки городских сточных вод активно используются в качестве почвенных добавок на сельско- и лесохозяйственных территориях, также для восстановления иных малопродуктивных земель. Однако, несмотря на то, что осадок сточных вод по ГОСТ 12.1.007 преимущественно относят к IV классу опасности – к малоопасным веществам (классификация согласно Федеральному закону от

24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 02.07.2021) «Об отходах производства и потребления»), осадок может содержать значительное количество токсичных неорганических и органических соединений, опасные патогены и высокие концентрации тяжелых металлов [66; 146; 168; 172]. Для предотвращения загрязнения почв ОСВ обрабатываются (стабилизируются, обеззараживаются) и оцениваются на соответствие регламентированным нормам. На данный момент регулирование преимущественно проводится по общим показателям: химическому составу, наличию и количеству тяжёлых металлов.

В случае рассмотрения возможности применимости осадков промышленных сточных вод в качестве нетрадиционных мелиорантов необходимо учитывать различие их химического состава и физико-химических свойств, что определяет необходимость индивидуальной оценки применимости [130] с определением воздействия на почву, растительный покров и оптимальных доз внесения в качестве нетрадиционного мелиоранта.

2.1.2 Осадки сточных вод ЦБП, как нетрадиционные мелиоранты

Одним из основных источников образования осадка промышленных сточных вод является целлюлозно-бумажная промышленность. Поскольку в процессе производства бумаги используется значительное количество воды, в зависимости от степени соответствия наилучшим доступным технологиям расход воды может составлять от 210 до 63-83 м³/т готовой продукции. Вследствие того, что вода не является составляющей частью готовой продукции, технологический процесс производства бумаги связан с образованием много тоннажных объемов сточных вод – от 64 до 167 м³ в расчете на тонну готовой продукции. Согласно данным Информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 1-2015 "Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона" при очистке сточных вод ЦБП на тонну готовой продукции сульфатной целлюлозы образуется 45-50 кг осадка, а на тонну сульфитной целлюлозы – 50-80 кг.

Располагая огромной лесосырьевой базой – около четверти мировых запасов древесины, российский лесопромышленный комплекс и целлюлозно-бумажная промышленность ежегодно производят более 7,5 млн тонн бумаги и картона (согласно данным РАО «Бумпром»). Распределение объемов производства продукции отражено на карте Российской Федерации по федеральным округам на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Карта распределения объемов производства ЦБП в РФ

На территории Российской Федерации работают более 270 объектов, среди которых 20 крупных комбинатов (годовой мощностью свыше 100 тыс. тонн) производят более 80 % продукции ЦБП РФ. Их них на территории Северо-Западного федерального округа Российской Федерации находятся 7 из 10 крупнейших целлюлозно-бумажных комбината (ЦБК) Российской Федерации (рисунки 2.2 и 2.3). Общее образование ОСВ на территории СЗФО составляет более 3 тыс. тонн сухого ОСВ за год (без обезвоживания влажность ОСВ ЦБК более 80-90 %).

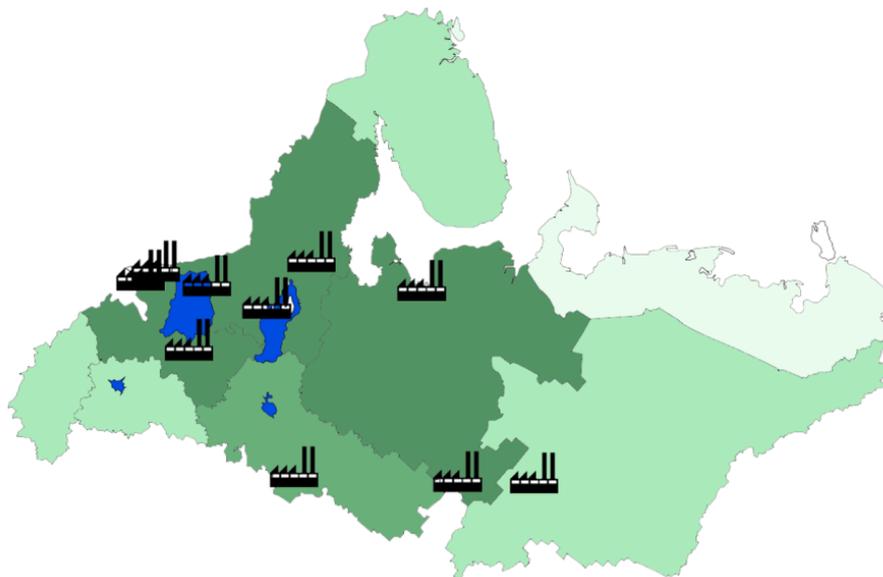


Рисунок 2.2 – Карта крупнейших ЦБК Северо-Западного федерального округа РФ

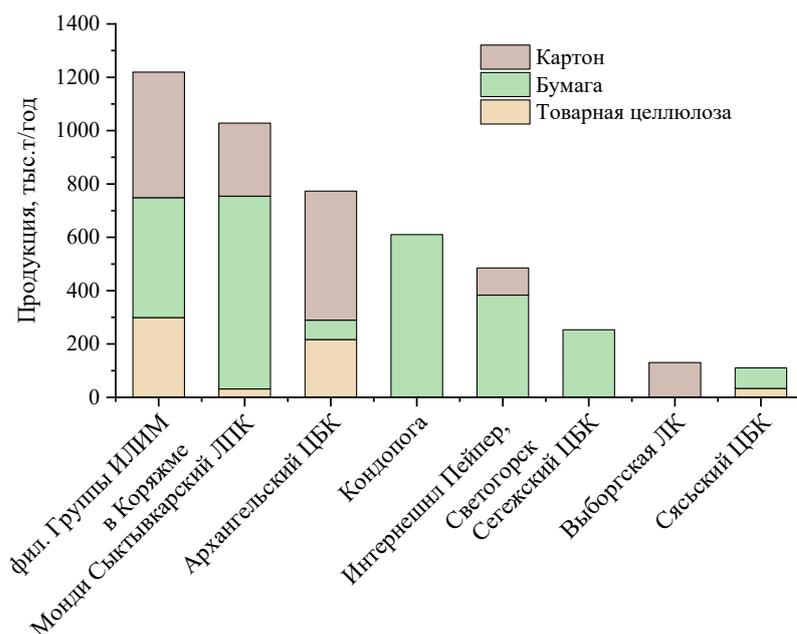


Рисунок 2.3 – Диаграмма объемов производства годовой продукции крупнейших ЦБК СЗФО

В этом же округе (на 2019 год) располагалось 125,5 тыс. га нарушенных территорий, где требуются мероприятия по рекультивации (согласно данным Росреестра «Сведения о наличии и распределении земель в Российской Федерации на 01.01.2019 (в разрезе субъектов Российской Федерации)»).

Характеристика ОСВ ЦБП

Состав и физико-химические характеристики осадков сточных вод, в частности ОСВ ЦБП указывают на мелиорационный потенциал отходов, однако, ОСВ ЦБП от ОСВ городских очистных сооружений отличаются наличием примесей лигнинового или целлюлозного волокна [106] (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Осадок сточных вод ЦБК сульфидной варки и ОСВ ЦБК при внесении в почву

Осадок сточных вод ЦБП обладает высоким содержанием органического вещества, фосфора, азота и питательных макро- и микрокомпонентов (Ca, Fe, Mn и др.), что указывает на его потенциальную применимость в качестве мелиоранта-удобрения [74; 161]. Однако, встречаются исследования, где описываются ОСВ с низкими показателями питательных веществ [139], что еще раз подтверждает необходимость оценки каждого осадка согласно их составу, происхождению, их характеристикам и системе водоочистки.

Как мелиоранты-структурообразователи ОСВ ЦБП улучшают структуру почвы и повышают ее устойчивость к процессам водной и ветровой эрозий. Вследствие высокого содержания органического вещества и наличия лигнинового

волокна в осадке при обработке почвы повышается водоудерживающая способность [140], улучшается агрегация почвенных частиц [85; 145]. Также отмечалось повышение устойчивости к водной эрозии при внесении осадка ЦБП в диапазонах 20-160 т/га, что объяснялось наличием лигнинового и целлюлозного волокна [85].

Кроме того, среди причин улучшения почвенных характеристик и повышения устойчивости к процессам эрозии при внесении осадка ЦБП было отмечено преобразование органического вещества из-за изменения активности почвенной микробиоты [145]. Сообщества почвенных микроорганизмов играют основную роль в процессах разложения, изменяя химический состав добавляемого органического вещества и дает новые типы соединений (например, внеклеточные полимерные вещества, гифы грибов и микробную некротическую массу), что в совокупности способствует агрегации почвы.

Присутствие в осадках целлюлозно-бумажной промышленности относительно медленно разлагаемых органических соединений, таких как целлюлоза и лигнин, обеспечивает подходящую среду для ряда микробных веществ, потенциально образующих органо-минеральные ассоциации с частицами почвы сопоставимые размером с глинистыми (<0,01 мм) [145].

Микробное разложение лигнина – это основной шаг завершения круговорота углерода для последующего использования растительных углеводов другими микроорганизмами. Дегградация лигнина включает многочисленные биохимические реакции, которые могут осуществлять ферменты, продуцируемые микроорганизмами. Из-за сложной химической структуры деструкция лигнина проходит при участии большого количества разнообразных ферментов, способных расщеплять широкий ряд химических соединений. Сравнительно недавно, стало известно, что бактерии нескольких родов, таких как *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Nocardia*, *Pseudomonas* и *Streptomyces* способствуют дегградации одиночных кольцевых ароматических веществ [127].

Кроме того, к основным деструкторам лигнина относятся почвенные грибы. Благодаря широкому спектру ферментов, они способны разрушать лигниновое

волокно и трансформировать его в органическое вещество почвы, хотя, как правило, с меньшей скоростью, чем бактерии. В то же время при разложении ароматических соединений грибы ведут активнее, чем бактерии. В расщеплении лигнина принимают участие различные группы ферментов (оксидоредуктазы, лиазы, эстеразы, лакказы). Ранее проводимые исследования скорости трансформации лигнина в растительном опаде хвойных лесов показали, что, в то время как идет утилизация белков и углеводов, лигнин, как наиболее устойчивое в силу своей структуры соединение, относительно долго накапливается в разлагающемся материале. Стойкость лигнина против разложения и его ароматическое строение дали основание считать лигнин возможно основным компонентом почвенного гумуса [83].

На основе собранных сведений и описания вероятных свойств осадков сточных вод ЦБП, они были рассмотрены в качестве нетрадиционных мелиорантов, обладающих потенциалом к восполнению почвенного органического вещества и питательных элементов в рекультивируемых землях отвалов в долговременной перспективе.

2.2 Состав и характеристика осадка сточных вод ЦБК

Для комплексного исследования применимости осадка сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности был отобран осадок с биологического этапа очистки сточных вод сульфатного целлюлозно-бумажного комбината с влажностью более 70-80 % (согласно документации ЦБК).

Пробоподготовка. В ходе исследования осадка влажность исходного, высушенного, экспериментального и вносимого осадка определялась согласно ГОСТ 28268-89 «Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений», а также с помощью экспресс-анализатора влажности – влагомера МХ-50 (рисунок 2.5). Погрешность измерений анализатора МХ-50 составляет 0,01 %.

Измеренная влажность осадка после пробоотбора составляла 73-86 %. Для сохранения проб для последующего анализа ОСВ ЦБК был высушен до воздушно-сухого состояния до влажности около 6-8 %.



Рисунок 2.5 – Влагомер МХ-50

Анализ содержания органического вещества и минеральных примесей проводился гравиметрическим методом – путем определения потери массы пробы при постепенном увеличении температуры (105 ± 2 °С, 200 °С и 300 °С) до прокаливания при температуре 525 ± 25 °С в муфельной печи (рисунок 2.6), согласно ГОСТ 27784-88 «Почвы. Метод определения зольности торфа и оторфованных горизонтов почв». Массовая доля зольности анализируемого осадка сточных вод ЦБК – 4 ± 10 % в пересчете на сухую пробу. Органическая

составляющая – 96 %, что является высоким показателем, что связано с наличием лигнинового волокна в осадке, для сравнения средний показатель у ОСВ городских очистных сооружений в пересчете на сухую массу – $80-85 \pm 10$ %, у торфосмесей для посадки – 50-60 %, сапрпель – около 90 %.



Рисунок 2.6 – Исходный осадок при влажности 8 %, муфельная печь и тигли с ОСВ ЦБК, минеральный остаток ОСВ ЦБК

Содержание углерода, водорода и азота в пробе ОСВ ЦБК определялось с помощью анализатора органических материалов LECO CHN628. Для данного анализа проба была высушена до воздушно-сухого состояния (влажность ~ 6-8 %).

Определение элементного химического состава минеральной части осадка сточных вод ЦБК проводилось методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индукционно связанной плазмой. Разложение проб минеральной составляющей ОСВ ЦБК для определения валового содержания элементов проводилась по методике М-МВИ-80-2008 «Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии» (рисунок 2.7). Дальнейшие измерения осуществлялись с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой Shimadzu ICPE-9000. Результаты измерений проб ОСВ ЦБК показали наличие следующих элементов: Fe, Al, B, Cu, Mn, Mg, Na и Zn. Из тяжелых металлов в повышенных концентрациях найдены марганец, медь и цинк (III класс опасности).

При небольших концентрациях из элементов, которые были определены положительный эффект для формирования почвенно-растительных комплексов могут оказать: железо, алюминий и магний, как микрокомпоненты необходимые для нормального роста и развития растений.



Рисунок 2.7 – Примеры исходной пробы ОСВ ЦБК и разложения проб для определения валового содержания элементов

Количественный анализ растворов проб на содержание тяжелых металлов и содержания кальция в ОСВ ЦБК проводился с помощью атомно-абсорбционного спектрометра модели Shimadzu AA 7000. Содержание фосфора и железа были определены с помощью спектрофотометра Hach-Lange DR 5000. Результаты всех лабораторных анализов осадка сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты лабораторных исследований по характеристикам и составу ОСВ

Характеристика	ОСВ ЦБК
рН	6,00 ± 0,5
Электропроводность, мСм/см	0,56 ± 1,0
Органическое вещество, %	96,00 ± 0,1
Углерод, %	47,21 ± 0,15
Азот, %	0,96 ± 0,05
Фосфор, %	0,16 ± 0,05
Кальций, %	7,87± 0,1
Железо, мг/кг	16,45± 0,1
Mn, мг/кг	Ниже предела обнаружения
Zn, мг/кг	430 ± 50
Cu, мг/кг	210 ± 10
Pb, мг/кг	Ниже предела обнаружения

На основе полученных данных результатов лабораторных измерений состава и характеристик исследуемого осадка сточных вод ЦБК был проведен сравнительный анализ на соответствие существующим стандартам в области почвенных добавок и удобрений. Для анализа были взяты следующие стандарты: ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 «Охрана природы (ССОП). Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений»; ГОСТ Р 54651-2011. «Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия»; ГОСТ Р 50611-93. «Удобрение комплексное органоминеральное. Технические условия»; ГОСТ Р 54000-2010 «Удобрения органические. Сапропели». Результаты анализа представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Таблица для сравнительного анализа ОСВ и требований нормативных документов

Наименование показателя	ОСВ ЦБК	ГОСТ Р 546512011		ГОСТ Р 17.4.3.07-2001		ГОСТ Р 540002010	ГОСТ Р 50611-93
		I	II	I	II		
Массовая доля примесей токсичных элементов, мг/кг сухого вещества, не более:							
свинец	ниже предела обнаружения	130	250	250	500	50-100	-
кадмий	ниже предела обнаружения	2	15	15	30	3-9	
цинк	430±50	220	1750	1750	3500	300-600	
медь	210±10	132	750	750	1500	100-300	
никель	ниже предела обнаружения	80	200	200	400	50-200	
хром	ниже предела обнаружения	90	500	500	1000	100-260	
ртуть	ниже предела обнаружения	2.1	7.5	7.5	15	1-6	
мышьяк	ниже предела обнаружения	2	10	10	20	-	
Массовая доля питательных элементов, %, не менее:							
азот общий	0.96±0.05	0.6	0.6	0.6	1.5	0.9	
фосфор общий	0.16±0.05	0.7	1.5	1.5	0.2	0.9	
калий общий	нет данных	0.1	-	-	0.3	0.1	
кальций	7.87±0.1	-	-	-	0.1	-	
Массовая доля органического вещества на сухой продукт, %, не менее	96.00±0.1	70	20	20	50	40-95	
Показатель активности водородных ионов солевой суспензии, ед. рН	6.00±0.5	6.0-8.0	5.5-8.5	5.5-8.5	-	6.0-7.5	

I – группа удобрений на основе ОСВ, используемые для выращивания технических, кормовых, зерновых и сидеральных культур. II – группа удобрений на основе ОСВ, используемые под посадки лесохозяйственных культур вдоль дорог, в питомниках лесных и декоративных культур, цветоводстве, для окультуривания истощенных почв, рекультивации нарушенных земель и откосов автомобильных дорог, рекультивации свалок ТКО.

Из таблицы видно, что по токсичным элементам ОСВ ЦБК может быть использован в качестве мелиоранта для рекультивации техногенно нарушенных

земель и для восстановления почвенно-растительных комплексов, но по питательным замечен явный дефицит. Впоследствии у растений, выращенных на смеси ОСВ ЦБК с бедными грунтами могут проявиться симптомы недостатка питательных веществ: видимые признаки – пигментация, хлороз, некроз и другие заболевания, а также отклонения в росте и развитии.

У анализируемого осадка ЦБК отмечается наличие высокого содержания кальция. Для сравнения: у органо-известкового сапропеля массовая доля кальция должна быть не менее 10 %, то есть осадок сточных вод ЦБК можно использовать в смеси с кислыми почвами/грунтами.

Лабораторные исследования показали, что ОСВ ЦБК нетоксичен, содержит тяжелые металлы в пределах нормы в соответствии с требованиями ГОСТ к удобрениям из осадков сточных вод. Осадок сточных вод ЦБК имеет слабокислую среду, что является нормой.

Из положительных свойств ОСВ ЦБК можно отметить высокое содержание органических веществ (96 %) и наличие кальция (~7 %). Из недостатков было определено несоответствие показателей количеств питательных веществ (ниже требуемой нормы), что может отрицательно отразиться на росте и развитии растений. Также есть вероятность, что ОСВ ЦБК, накапливая влагу, будет сорбировать питательные вещества, блокируя их доступность растениям из рекультивационного материала. В связи с этим в экспериментальной части работы рассматривается влияние ОСВ на почвогрунт, находящийся в основе предложенной смеси – искусственного грунта, а также влияние на наблюдаемые растения, выращенные на этом субстрате.

2.3 Исследования воздействия ОСВ ЦБК на формирование питательного режима техноземов

Эффективным завершением рекультивации нарушенных земель является формирование устойчивого почвенно-растительного комплекса, что обеспечивается созданием благоприятных почвенных режимов и формированием оптимального баланса органической и минеральной составляющих восстанавливаемого плодородного или потенциально плодородного почвенного слоя.

Сложность формирования устойчивых почвенно-растительных комплексов в таких отраслях, как горнодобывающая, обуславливается тем, что при разработке полезных ископаемых часто требуется удаление поверхностных горизонтов почвы. Потеря или удаление верхнего слоя почвы мгновенно сокращает запас органического вещества в почве. В результате способность вносимой при рекультивации почвы восполнять органическое вещество за счет чистой первичной продукции подавляется изменением почвенных режимов – питательного, водно-воздушного и температурного.

Для восстановления и преодоления лимитирующих (экстремальных) условий нарушенных почв, ограничивающих процессы нормального развития техногенного ландшафта (почвообразования, самовосстановления, или естественной сукцессии) вносят органические почвенные добавки (мелиоранты). Достаточное количество внесенного органического вещества определяет эффективность воссоздания поверхностного почвенно-растительного горизонта и соответственно эффективность рекультивации земель, поскольку органическое вещество играет ключевую роль в продуктивности почвы, влияя почти на все физические, химические и биологические свойства.

Органические добавки различными путями влияют на многие свойства почвы, в том числе на: питательный режим, агрегированность почвы, структуру, влагоемкость и другие. Эффекты могут быть прямыми, через внутренние свойства самих органических добавок, или косвенными, путем изменения физических, биологических и химических свойств почвы.

Отмечается, что почвы с высоким содержанием органического вещества обладают большей водоудерживающей способностью, чем большинство минеральных почв. Следовательно, рекомендуется добавление органического вещества в деградированные почвы или техногенно нарушенные земли. Как и в случае с другими свойствами почвы, величина и продолжительность положительных эффектов зависят от применяемого количества и степени разложения органических добавок. Водоудерживающая способность определяет скорость инфильтрации воды, что является определяющим фактором в перераспределении дождевой или поливной воды. Медленная инфильтрация увеличивает поверхностный сток и устойчивость к процессам эрозии, а также снижает потребление воды растениями.

Внесение органических удобрений положительно влияет на общее биоразнообразие почвы. Количественное влияние органических удобрений на микробную активность можно наблюдать с измерением содержания углерода в микробной биомассе почвы, которое почти всегда показывает увеличение после внесения органических удобрений в деградированные почвы [122]. Также влияние органических изменений на микробные процессы в почве отражаются на ферментативной активности.

Органические вещества, попадающие в почву, заселяются почвенными микроорганизмами и адсорбируются минеральными частицами, становясь центром водоустойчивых агрегатов. В тоже время почвенные грибы опутывают агрегаты почвы внутри мицелиальных нитей, стабилизируя агрегаты и в совокупности формируя устойчивую почвенную структуру.

Применение органических почвенных добавок приводит к немедленному увеличению содержания органического углерода в почве, которое обычно пропорционально количеству внесенного углерода, однако в случаях высоких фоновых уровней и/или высокой изменчивости содержания органического углерода в почве после низких или умеренных норм внесения содержания органического углерода может остаться неизменным [122]. Скорость разложения органических почвенных добавок и содержание органического углерода в почве

после внесения добавок определяется составом и характеристиками добавки. Химический состав и физические характеристики органических добавок будут зависеть от их происхождения (типа растительности, например древесные культуры однолетние сельскохозяйственные культуры).

Кроме того, важным показателем плодородия почвы является соотношение C:N почвы – взаимосвязь между почвенным органическим углеродом и общим азотом. Круговороты азота и углерода находятся в тесной взаимосвязи и не могут осуществляться друг без друга. В совокупности процессы круговорота этих элементов являются одними из самых важных для процессов фотосинтеза, разложения органических остатков, стабилизации почвенного органического вещества [51].

На соотношение C:N в почве часто влияют многие факторы, такие как климат, почвенные условия, типы растительности и методы обработки почвенного слоя [87]. Стехиометрическое соотношение углерода с азотом в почве, растениях и сообществах микроорганизмах в почве и других природных компонентах являются определяющим признаком устойчивого функционирования наземных экосистем. В почвенном слое это соотношение определяет питательный режим почвы – рисунок 2.8 [51].

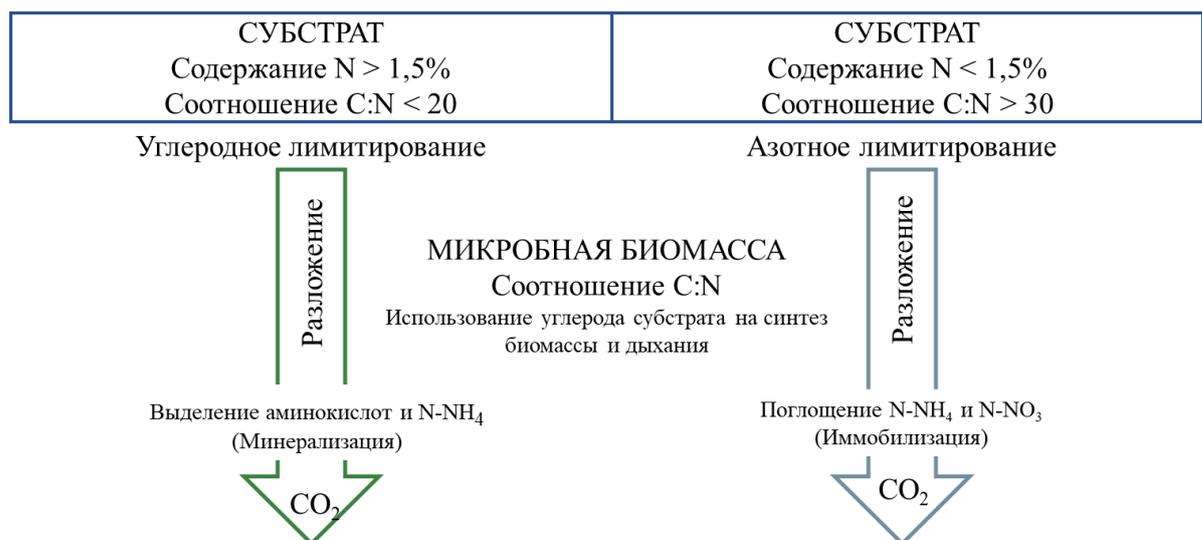


Рисунок 2.8 – Поступление углерода и азота в почву (согласно [51])

При высоких значениях соотношения углерода к азоту в почве (C:N > 30) происходит иммобилизация азота – закрепление его в органическом веществе

почвы. Имобилизированный азот из органического вещества становится доступной питательной средой для почвенных микроорганизмов, которые в процессе своей жизнедеятельности переводят его в доступные формы для растений, что дает постепенное высвобождение азота и стабильный питательный режим для растительного покрова.

Повышенным количеством углерода и высоким содержанием азота обладает осадок сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП), в состав которого входит избыточный активный ил от биологической стадии очистки и лигниновое волокно, что потенциально делает его нетрадиционным органическим мелиорантом. Избыточный активный ил обуславливает высокое содержание органического вещества – более 90 %, а лигниновое волокно – потенциал к пролонгированному эффекту воздействия на питательный режим почвенной среды.

Результаты лабораторных исследований осадков сточных вод предлагаемых в качестве нетрадиционных мелиорантов, показали, что содержание органического углерода достигает до 40 %, а азота до 1 %, что дает соотношение C:N ~ 40 и подтверждает применимость осадка сточных вод с содержанием активного ила и лигнинового волокна в качестве нетрадиционного мелиоранта с пролонгированным эффектом воздействия для экологически эффективной рекультивации техногенно нарушенных земель.

Таким образом, эффективность рекультивации горных отвалов органическими нетрадиционными мелиорантами обусловлен, по крайней мере, тремя взаимосвязанными факторами: высоким содержанием углерода, наличием достаточным количеством азота и оптимальной плотностью формируемых техноземов [34; 122].

2.4 Выводы по Главе 2

1. По составу и физико-химическим характеристикам осадки сточных вод ЦБП могут обладать мелиорационным потенциалом для почв в качестве мелиорантов-удобрений, поскольку как и осадки городских сточных вод отличаются высоким содержанием органического вещества, фосфора, азота и питательных макро- и микрокомпонентов (Ca, Fe, Mn и др.), а при использовании в качестве мелиорантов-структурообразователей ОСВ ЦБП улучшают структуру почвы и повышают устойчивость к процессам водной и ветровой эрозий. Вследствие высокого содержания органического вещества и наличия лигнинового волокна в осадке ЦБП при внесении в почву повышается водоудерживающая способность, улучшается агрегация почвенных частиц.

2. С целью оценки применимости ОСВ ЦБП для формирования почвенного слоя у отобранных проб ОСВ ЦБК был определен состав и физико-химические характеристики. Результаты лабораторных исследований показали, что ОСВ ЦБК обладает повышенной влагоемкостью, высоким содержанием органического вещества (96 %), фосфора, азота и ряда микроэлементов, в частности Ca~7 %, Fe~16,5 %, что доказывает мелиорационный потенциал осадка при рекультивации нарушенных земель, кроме того, осадок нетоксичен, содержит тяжелые металлы в пределах нормы в соответствии с требованиями ГОСТ к удобрениям из осадков сточных вод.

3. При высоких значениях соотношения углерода к азоту в почве ($C:N > 30$) происходит иммобилизация азота – закрепление его в органическом веществе почвы. Иммобилизированный азот из органического вещества становится питательной средой для почвенных микроорганизмов, которые в процессе своей жизнедеятельности переводят его в доступные формы для растений, что дает постепенное высвобождение азота и стабильный питательный режим для растительного покрова. Осадок ЦБК характеризуется повышенным количеством углерода – до 40 % и высоким содержанием азота – до 1 %, что дает соотношение $C:N \sim 40$ и определяет его, как нетрадиционный органический мелиорант с пролонгированным эффектом воздействия.

ГЛАВА 3 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

3.1 Методы оценки применимости нетрадиционных мелиорантов

Помимо расширения базы потенциальных органических мелиорантов актуален вопрос по выбору методики оценки применимости мелиорантов [154]. Для оценки применимости мелиорантов нетрадиционного происхождения необходима комплексная оценка пригодности, с учетом двух составляющих:

- анализа мелиорационного потенциала;
- оценки экологической безопасности субстрата.

Анализ мелиорационного потенциала проводится с целью определения его эффективности, как правило по отношению к физико-химическим свойствам обрабатываемой почвы, в иных случаях по отношению к растительным или микроорганизменным сообществам (например: урожайность культур, микробиологическая активность почвы и др.). Оценка экологической безопасности субстрата проводится на основе анализа его воздействия на компоненты окружающей среды и биологическую продукцию, в частности.

Методы оценки мелиорантов основываются на двух подходах: прямой оценке субстрата и косвенной. Прямая оценка заключается в анализе химического состава и физико-химических характеристик мелиоранта и их соответствие регламентированным нормам. Косвенные методы подразумевают оценку мелиоранта через воздействие на (1) растения – анализ роста и развития растений [94; 110; 125], и (2) почвенные организмы – качественный и количественный состав почвенных микроорганизмов.

Преимущество таких косвенных методов заключается в оценке воздействия мелиоранта на два наиболее влиятельных фактора экологически эффективного восстановления технозёма:

1. состояние растений – которые обеспечивают снижение негативной нагрузки на окружающую среду за счет формирования дернового слоя [76],

2. состояние почвенных организмов – которые играют важную роль в основных процессах почвообразования.

Это снижает временные, трудовые и материальные затраты на определение всего спектра возможных компонентов и физико-химических характеристик анализируемого мелиоранта (токсичные органические соединения, пестициды, тяжелые металлы, различные соли и пр.) [125; 160].

Для оценки воздействия ОСВ на растительные сообщества чаще применяются методы анализа внешних признаков и физических размеров органов растений. Воздействие оценивается, как на основе визуальных показателей – пигментации растений, хлороза, некроза, так и на измеряемых величинах роста и развития растений: всхожести, динамики роста, высоты стебля, длины листа, диаметра цветков, биомассы. Оценка биомассы осуществляется измерениями, как всего растения, так и отдельно по наземной и корневой системе, или по растительным органам: стеблям, листьям, корням и др. Для расчетов эколого-экономической эффективности проведенных земельных работ и для определения продуктивности экосистемы оценивается урожайность по биомассе, структуре урожая и ценности растительной продукции. В зависимости от тест-объектов – растений, эти параметры могут изменяться, например, длина-диаметр-масса початка кукурузы [66], выход масла от подсолнечника [120] или теплотворность в культурах, используемых в биоэнергетике [172]. Кроме того, для оценки воздействия на растительные культуры проводят анализ фотосинтеза и измерения содержания хлорофилла [78; 164; 168].

3.2 Методика оценки биологической продуктивности с применением цифровой обработки данных

Применимость почвенных добавок (мелиорантов) определяется составом и физическими характеристиками его составляющих субстратов. Однако, определение всех характеристик мелиоранта – трудоемкий и ресурсозатратный метод оценки, что не всегда осуществимо в полной мере.

Альтернативный подход – экспериментальный метод оценки воздействия вносимого мелиоранта на формируемый почвенный покров. Анализ роста и развития растительного покрова проводится для определения мелиорационного потенциала и экологической безопасности мелиоранта и его доз внесения. Анализ роста и развития может проводиться на любой стадии вегетационного периода растений, измеряемыми параметрами могут являться: процент всхожести семян, динамика роста растений, прирост биомассы, урожайность и др.

Биомасса растительного покрова отражает воздействие мелиоранта на рост и развитие растительного покрова в течение всего вегетационного периода растений. Общее количество растительного вещества отражают расчет чистой первичной продукции и темпы прироста растительного покрова [116; 159]. Классические методы анализа биомассы заключаются в деструктивном отборе проб растительного материала и измерения массы растительного материала (в свежем или сухом виде). Деструктивный отбор образцов может производиться на разных стадиях роста растений с пересчетом биомассы на количество растений (г) или единицу площади (г/м²). Такой классический подход к анализу биомассы является трудоемким и ресурсозатратным из-за низкой информативности, расходности по материалам, времени и сложностью повторных измерений [97; 112; 158].

В качестве альтернативных подходов к анализу роста и развития растений (без разрушения растительного материала) предлагаются методы цифровой обработки данных с применением различных вегетационных индексов.

Метод цифровой обработки данных широко используется в сельском хозяйстве, агрохимии, биологии и других направлениях [84]. Мониторинг растительного покрова цифровыми методами основывается на анализе изображений в красном, ближнем и (или) инфракрасном диапазонах с использованием красно-зелено-синих (RGB), мульти- и гиперспектральных камер, тепловизоров, датчиков фотосинтеза и флуоресценции, а также лидаров [112; 150]. Этими методами определяется показатель биомассы растительного покрова [109], и ряд других характеристик (прямых и косвенных): фенотипирование

сельскохозяйственных культур [147], уровень хлорофилла, дефицит воды, выявление низкого содержания азота, калия [165], оценка качества урожая, плотности растительного покрова [166] и другие [112].

Для анализа некоторых показателей применяются вегетационные индексы, позволяющие осуществить пересчет значений, полученных при применении цифровых методов обработки данных, в значения определяемых параметров. Часто встречающиеся примеры применяемых вегетационных индексов – это нормализованный относительный вегетационный индекс NDVI [165; 167], индекс зеленой поверхности GA/GAI [128; 150; 165] и индекс листовой поверхности LAI [79; 101; 166]. Расчеты вегетационных индексов основываются на спектральных особенностях растений отражать или поглощать свет.

Проведенный анализ литературных источников ранее проводимых исследований показывает, что данные методы могут быть подходящими для оценки мелиоранта и его воздействия на растительный покров. Кроме того, в связи с тем, что экспериментальное исследование было направлено на поиск наиболее простого и низкочастотного метода оценки, был выбран цифровой метод анализа RGB-изображений (полученных цифровой камерой) с анализом биомассы через индекс листовой поверхности LAI.

Для сравнительного анализа двух методов измерений показателя биомассы растительного покрова: классического с разрушением растительного материала и альтернативного – без разрушения, при оценке эффективности мелиоранта были сформированы модели почвенно-растительных комплексов. При формировании моделей почвенно-растительных комплексов были собраны образцы и материалы для трех видов почвенных субстратов – подзолистая почва с антропогенным изменением (в качестве контрольной группы) и две группы с изменением отобранной почвы: (1) с добавлением осадка сточных вод от целлюлозно-бумажного комбината (ОСВ) [138], (2) с добавлением торфосмеси коммерческого происхождения (просеянного и раскисленного торфа средней степени разложения, смешенного с известью).

Добавление почвенных добавок (мелиорантов) производилось из расчета рекомендуемых соотношений: 1:1, 1:2 и 1:3, выбранных на основе предшествующих исследований и рекомендаций из литературных источников по оценке эффективности добавления ОСВ и торфосмесей. Исследуемые модели были сформированы в 4-кратном повторении.

Для растительного покрова была выбрана травянистая культура – райграс *Lolium perenne* L., как одна из рекомендуемых культур для рекультивации территорий лугов, лесов при условиях холодного и умеренного климата, согласно ГОСТ Р 57446-2017 «Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия».

Экспериментальные модели почвенно-растительных комплексов находились в перфорированных растительных пакетах – 150x150x400 мм объемом 8 литров (рабочая поверхность 15x15 см/модель). Все модели были помещены в лабораторные условия при постоянных микроклиматических условиях (температура, влажность) с равномерным экспериментально рассчитанным поливом (исходя из требуемой для растительного покрова влажности субстратов). Для соблюдения условий освещенности были установлены фитолампы полного спектра свечения 400-800 нм (лампы – 35W) с периодом освещения – 10 часов/день.

Метод 1. Классический метод анализа биомассы – через определенные промежутки времени (каждые две недели) – 2, 4, 6 неделя после прорастания, на этапе экспоненциального роста растений были сделаны срезы наземной части растительного покрова. Свежая наземная биомасса от каждой модели была взвешена (г/м²).

Метод 2. Цифровой метод анализа данных по биомассе – перед отбором растительного материала (срезом) были сделаны снимки растительного покрова каждой модели на одинаковом расстоянии (40-50 см) от почвенной поверхности. RGB-снимки были сделаны цифровой камерой (с разрешением 10 МП).

Полученные RGB-снимки (в формате JPG) обработаны и проанализированы с помощью программного обеспечения ImageJ 1,40g для получения результатов значений индекса листовой поверхности LAI, который рассчитывается как отношение площади растительного покрова к площади земли, %.

Для получения значений индекса зеленого листа необходимо дифференцировать растровое изображение растительного покрова от пикселей фоновой части изображения (почва, камни и другие включения). Для эффективной дифференциации были определены пороги цвета (зеленого) на основе обработки оттенка, насыщенности и интенсивности цветовой модели. После чего, был произведен расчет площади отделённых «зеленых» участков растительного покрова к площади рабочей поверхности. Алгоритм и результаты обработки RGB-снимков (по этапам) представлены на рисунках 3.1 и 3.2. Для всех снимков были выбраны унифицированные условия обработки (значения насыщенности, интенсивности и порога при дифференциации), исходя из наибольшей точности обработки.

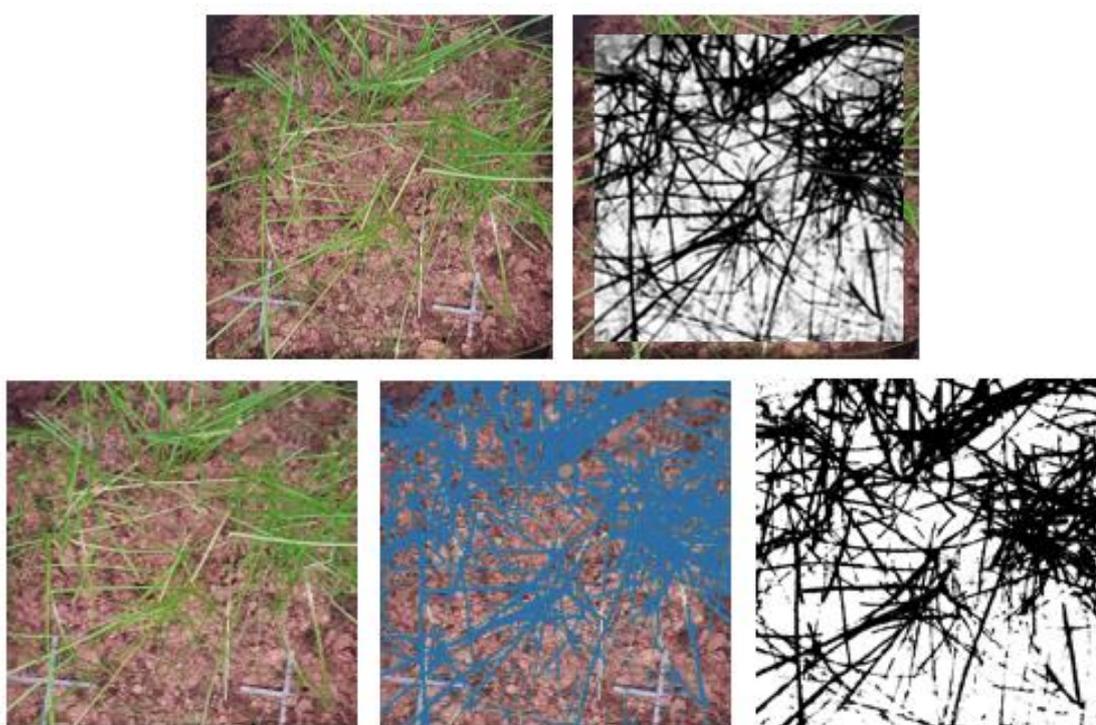


Рисунок 3.1 – Поэтапные результаты обработки RGB-снимков, где (1) исходный снимок, (2) определение границ рабочей поверхности и пример дифференциации «зеленого», (3) исходный снимок после обрезки до площади рабочей поверхности, (4) проверка точности определения при дифференциации, (5) полученные данные после отделения фоновой части изображения

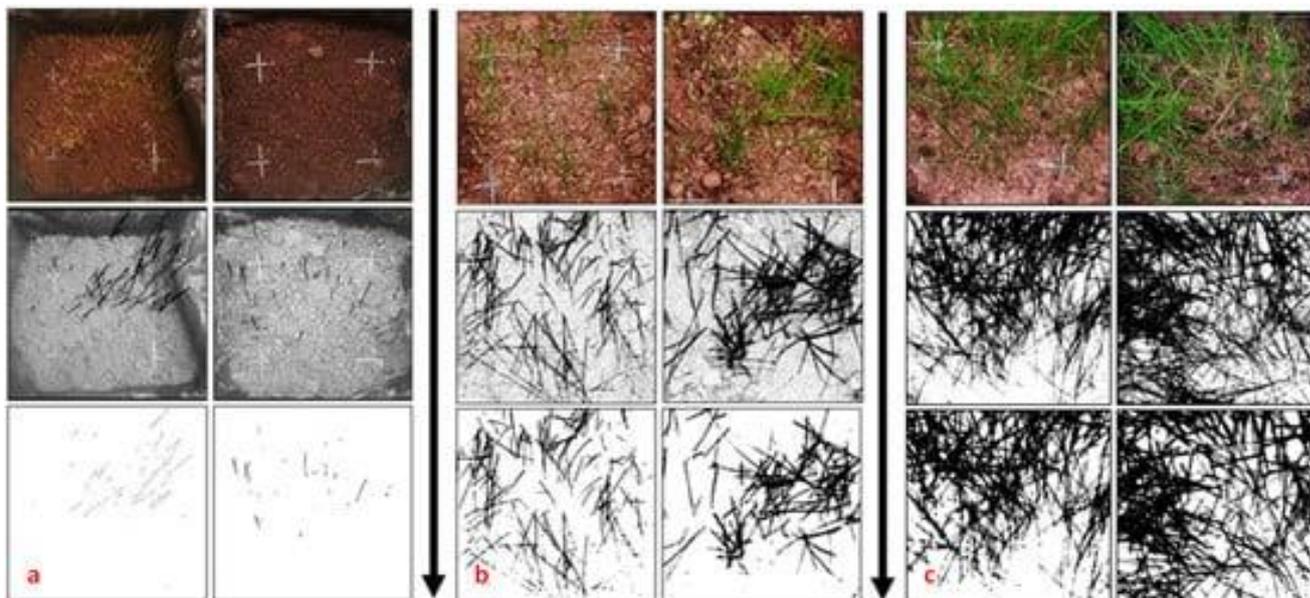


Рисунок 3.2 – Пример изображений для обработки цифрового RGB-изображения (пошагово) травянистого покрова на разных стадиях вегетации (1, 2, 3 недели): (a) RGB-изображение до цифровой обработки изображения; (b) цветокоррекция для удаления фона; (c) удаление фона (почвы, камней, различных включений и т.п.)

Результаты анализа биомассы растительного покрова, как при традиционном методе, так и при альтернативном, показали, что почва, улучшенная внесением торфосмеси на первых этапах (вторая и четвертая неделя после прорастания) дает лучший прирост биомассы райграса (на 20-70 %), чем контрольная группа (выращенная на почвенных моделях). В свою очередь, почва, улучшенная ОСВ, в среднем дает меньший прирост биомассы (на 20-60 %) от контрольных моделей. Общее представление полученных данных по двум методам анализа (традиционному и альтернативному) биомассы растительного покрова, выращенного на различных субстратах, изображено на рисунках 3.3, 3.4, 3.5.

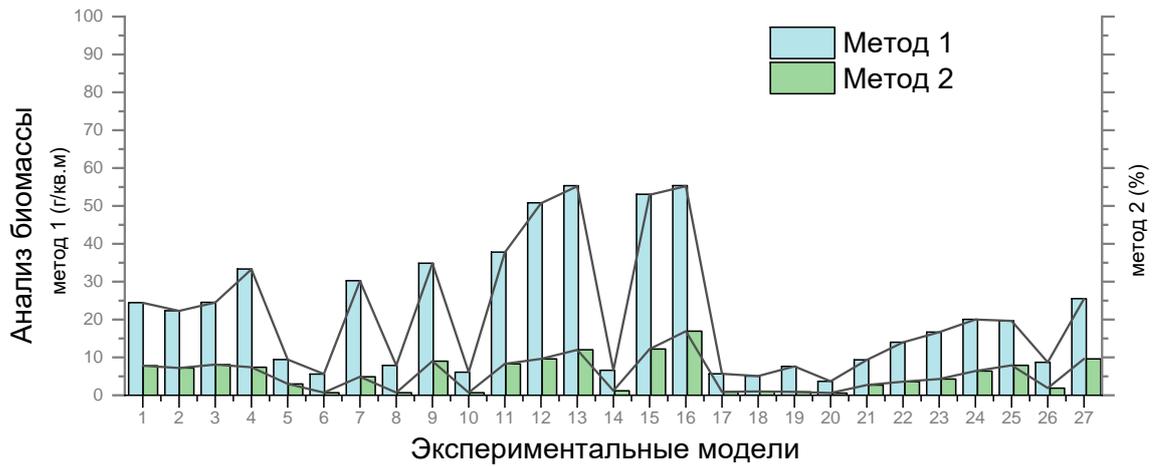


Рисунок 3.3 – Результаты серий анализа биомассы двумя методами на 2 неделю от всхода семян: традиционный метод 1 – срез биомассы, альтернативный метод 2 – с помощью цифровой обработки данных на 27 моделях: 1-4 на почве, 5-16 почва с торфосмесью, 17-27 почва с ОСВ

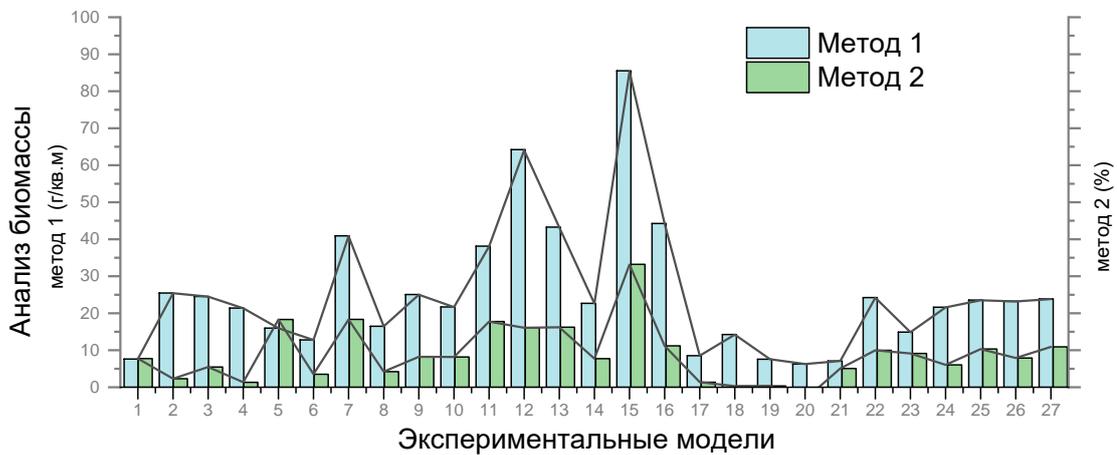


Рисунок 3.4 – Результаты анализа биомассы двумя методами на 4 неделю от всхода семян

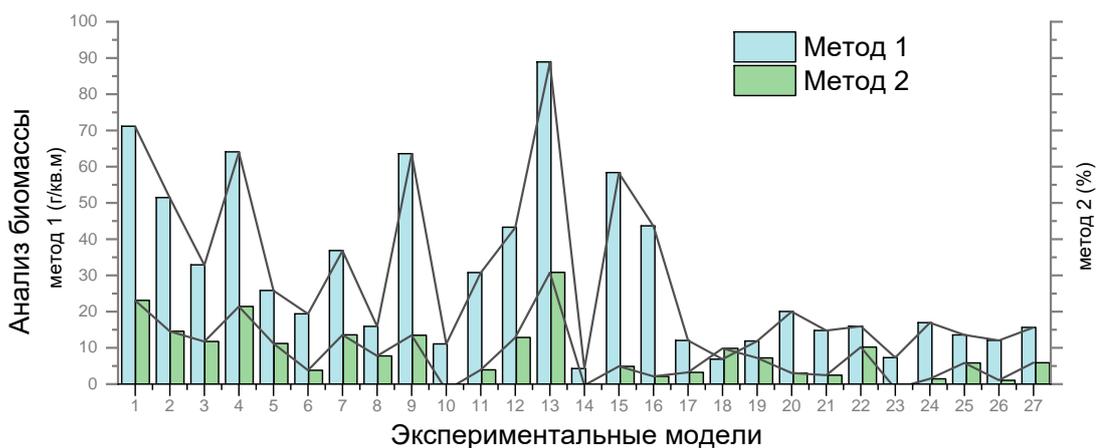


Рисунок 3.5 – Результаты анализа биомассы двумя методами на 6 неделю от всхода семян

Анализ биомассы растительного покрова, выращенного на субстратах при различных соотношениях с почвой (1:1, 1:2 и 1:3), не отразил существенной

разницы от количества внесения субстратов. Однако, при добавлении торфосмеси или ОСВ при соотношении 1:1 отмечается торможение прироста биомассы. Значения прироста биомассы (в сравнении с контрольной группой): для торфосмеси (1:1) были в 1-2 раза хуже, для ОСВ (1:1) – в 1-4 раза хуже контрольных моделей. Схожие результаты были ранее получены при исследованиях воздействия ОСВ на почвенно-растительные комплексы [88; 89], что подтверждает непригодность данных субстратов (при соотношении 1:1) для восстановления растительного покрова, посадкой травянистых растений райграса.

Рекомендуемыми соотношениями внесения являются: для торфосмеси– 1:2 и 1:3 (к почве), для осадка сточных вод 1:3. Результаты анализа (на основе усреднения данных 4-кратного повтора) значений прироста биомассы показали: при добавлении торфосмеси в соотношениях 1:2 улучшаются показатели прироста биомассы на 20-30 % от контрольной группы, в соотношении 1:3 – на 60-70 %; при добавлении ОСВ в соотношении 1:3 – достигаются значения прироста биомассы, схожие с контрольными моделями почвенно-растительных комплексов.

Далее, для оценки применимости альтернативного метода анализа биомассы растительного покрова на почвах с добавлениями мелиорантов был проведен сравнительный анализ двух полученных массивов результатов – цифровым методом с вегетационным индексом LAI и классическим с измерением массы растительного материала.

Сравнительный анализ полученных данных от двух методов анализа биомассы растительного покрова (традиционного и альтернативного) показал корреляцию по всем трем сериям анализов (на 2, 4, 6 неделю от прорастания растительного покрова – $r_1^2 > 0,95$; $r_2^2 > 0,75$; $r_3^2 > 0,75$), что подтверждает пригодность предложенного метода для оценки эффективности мелиоранта и анализа растительного покрова. Корреляцию между результатами анализов биомассы данными методами (взвешиванием растительного материала и цифровыми методами совместно с вегетационными индексами) устанавливали в ранее проводимых исследованиях: при анализе роста бамбука с помощью LAI

[109], кустарников на пастбищных угодьях с помощью NDVI [124] и сельскохозяйственных злаков с помощью индекса зеленой поверхности GC [158].

Общий сравнительный анализ данных по всем трем сериям срезов показал большой разброс данных при увеличении биомассы растительного покрова (рисунок 3.6). Существенный разброс при увеличении биомассы можно отнести к погрешности метода расчета из-за наложений листовых поверхностей при съемке.

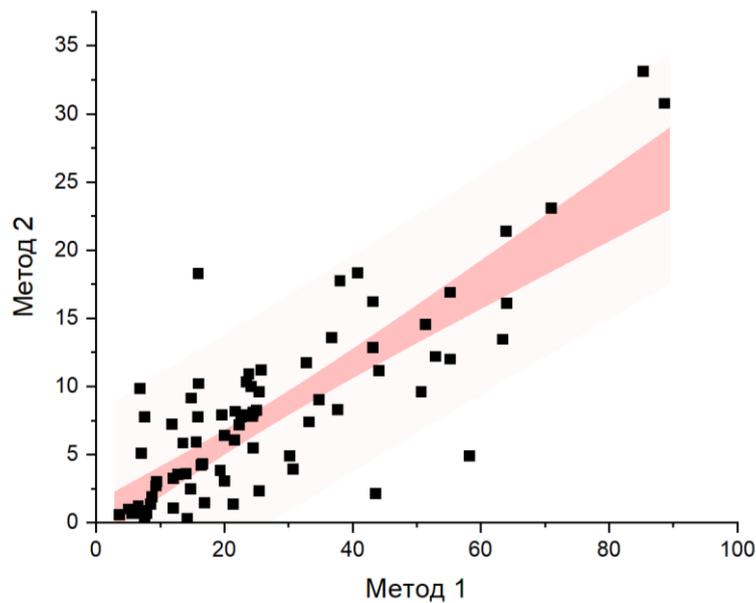


Рисунок 3.6 – Результаты сравнительного анализа по всем сериям анализов биомассы, где метод 1 – традиционный метод среза наземной биомассы, метод 2 – метод цифровой обработки при индексе LAI

Кроме того, погрешности метода и отклонения расчетных значений данными методами могут быть объяснены рядом следующих причин и нарушений (визуальные примеры представлены на рисунке 3.7):

1. факторы поглощения/отражения света: тени, неравномерность освещенности, элементы преломления света каплями воды, элементы затемнения/осветления фонового участка из-за различий почвенной влажности, примесей или других световых отклонений;

2. факторы состояния растений: изменения пигментации, насыщенность цвета листовой поверхности, хлороз, некроз;

3. факторы расположения камеры: отклонения расстояния, угла или ошибки настройки камеры (диафрагмы, светочувствительность ISO, баланса белого и пр.);

4. факторы фона: отсутствие или низкая контрастность почвы и растения, что осложняет дифференцирование растрового изображения растительного покрова от «фона».

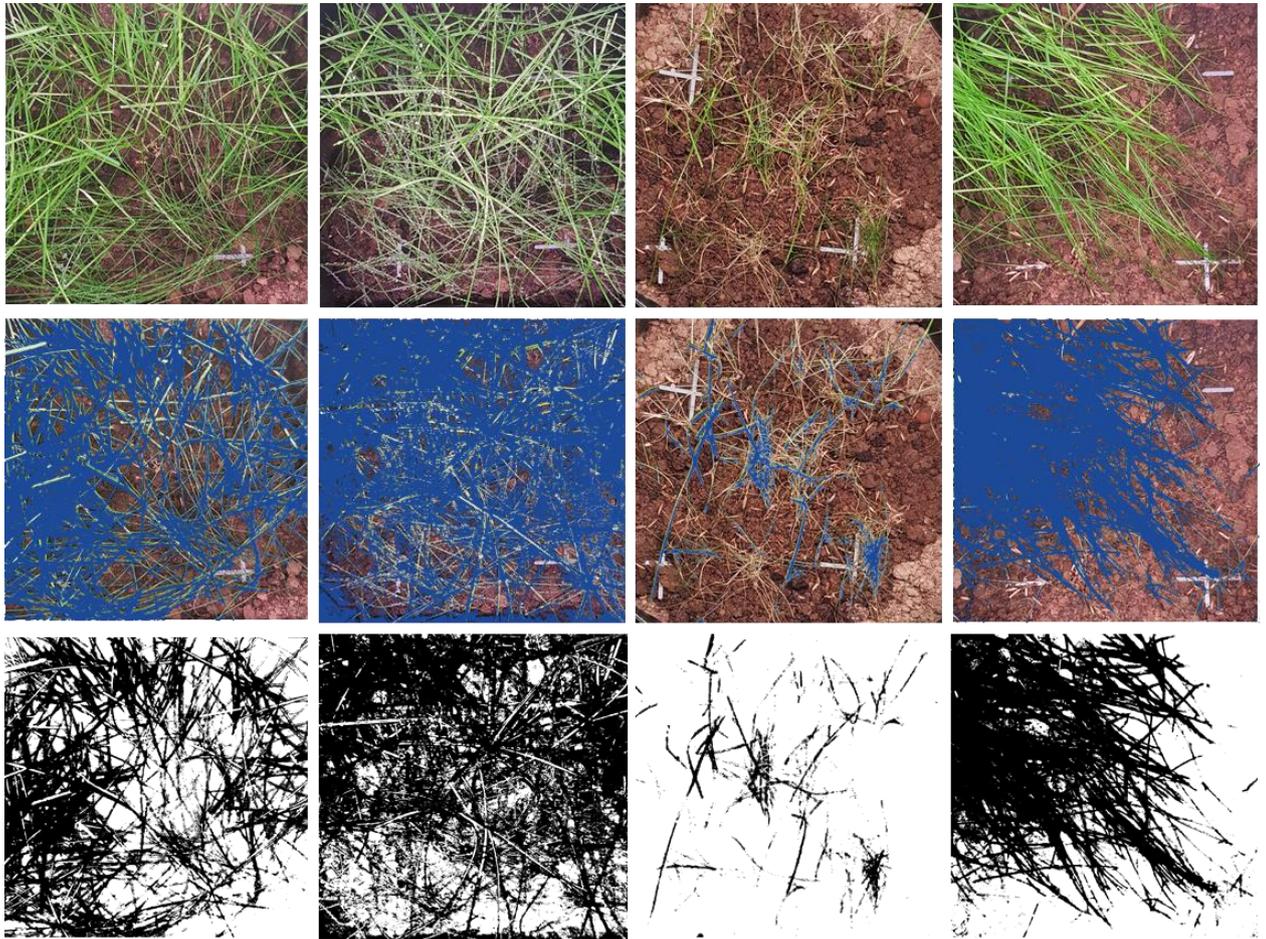


Рисунок 3.7 – Неподходящие условия почвенно-растительных моделей, вызывающие нарушения при цифровой обработке RGB-снимков: (1) отражение света каплями воды с листовой поверхности, что видно при наложении в виде белых или осветлённых участков травы; (2) нарушения отражения и поглощения света каплями воды и участками черных краев растительных пакетов; (3) хлороз и некроз травы; (4) низкий контраст «фона» и растительного покрова (верхний левый угол)

Для снижения погрешности анализа данных биомассы растительного покрова рекомендуется: устранить все элементы нарушения поглощения/отражения света, установить одинаковую и равномерную освещённость моделей и разработать единый подход съемки и обработки цифровых данных RGB-снимков. Также, по тому же ряду причин, данная методика анализа затруднительна для реализации в полевых исследованиях.

Проведенное экспериментальное исследование на моделях почвенно-растительных комплексов (на основе трех серий) показало существенную линейную взаимосвязь ($r_1^2 > 0,95$; $r_2^2 > 0,75$; $r_3^2 > 0,75$), между результатами двух сравниваемых подходов в анализе биомассы растительного покрова – классического с измерением массы наземного растительного материала, и предложенного, основанного на цифровой обработке RGB-снимков и расчетом вегетационного индекса LAI [45].

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что предложенный метод оценки эффективности мелиорантов, вносимых для восстановления растительного покрова на нарушенных земельных территориях применим в лабораторных условиях при контролируемых условиях микроклимата и освещенности для анализа воздействия мелиоранта на биологическую продуктивность в динамике.

Также, стоит отметить, что в ходе исследования классическим методом за вегетационный период было сделано три серии отбора растительного материала, это позволило оценить растительный покров в определенный период и с разрушением анализируемого материала, что является существенными недостатками метода для оценки нормы или отклонения роста и развития растительного покрова на протяжении всего вегетационного периода.

При проведении исследования биологической продуктивности предложенным методом было сделано и обработано более 700 RGB-снимков, что позволило оценить рост и развитие травянистого покрова за весь вегетационный период растений с еженедельной периодичностью без разрушения растительного материала, т.е. в динамике роста и развития растительного покрова.

Предложенный метод оценки биологической продуктивности позволяет оценить эффект воздействия от внесения мелиорантов (почвенных добавок) на формирование растительного покрова на протяжении всего вегетационного периода и своевременно определить ухудшение почвенных режимов на рекультивируемых участках техногенно нарушенных земель, что еще раз подтверждает преимущества данного метода в сравнении с классическим.

3.3 Методика оценки роста и развития растений через анализ функций роста

Оценка роста и развития растений во временной динамике эффективна при использовании методов цифровой обработки данных (снимков) совместно с моделированием кинетики роста растений. Кинетика роста и развития растений описывается нелинейными регрессионными моделями.

Нелинейные регрессионные модели являются важными инструментами, поскольку интерпретируют многие процессы, происходящие в растениях и почве. Интерпретируемость определяется тем, что параметры развития растений описываются S-образными кривыми роста. Однако, существует множество видов S-образных кривых роста и не все применимы к анализу роста биологических видов, исследуемых в эксперименте. В связи с чем, выбор математической модели может существенно повлиять на оцениваемые параметры и достоверность полученных результатов.

Цель исследования состояла в том, чтобы подобрать нелинейную регрессионную модель роста применимую для оценки тенденции данных о росте и развитии растений с расчетом их отклонения от норм.

Методология

В ходе исследования были проанализированы наиболее часто встречавшиеся S-образные кривые роста, а именно: *Verhulst Logistic Growth Model*, *Richards Plant Growth Model*, *Hill-function* и *Gompertz model* [72]. Существует несколько подходов к подбору наиболее подходящей модели роста, например, оценка по общим статистическим параметрам данных, преобразование нелинейных моделей в линейные, анализ графического представления результатов или применение уже существующих алгоритмов.

Таким образом, для анализа роста и развития растений на основе полученных экспериментальных данных были рассмотрены нелинейные регрессионные математические модели описания роста продуктивности растений по временной шкале. Выбор подходящей математической модели производился по данным роста растительного покрова, собранным с почвенно-растительных моделей. По полученным данным были построены графики роста и наложены

сигмовидные кривые, описывающие рост. Также была проведена статистическая обработка данных на сходимость результатов со значениями «эталонной» функции роста.

Для оценки численной проверки сходимости, была проведена статистическая обработка с получением коэффициентов корреляции. Общий алгоритм выбора сигмовидных кривых, описывающих рост и развитие растительного покрова отражен на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – Алгоритм выбора математической модели, описывающей рост и развитие анализируемого растительного покрова

Полученные результаты

При анализе графического наложения и численной проверки сходимости путем проведения статистической обработки с получением коэффициентов корреляции, была выбрана математическая модель сигмовидной функции Гомперца (*Gompertz model*), как наиболее точно описывающая рост и развитие

травянистого растительного покрова S-образная кривая роста ($r^2 > 0,95$). Примеры подбора и графическое отображение представлено на рисунке 3.9.

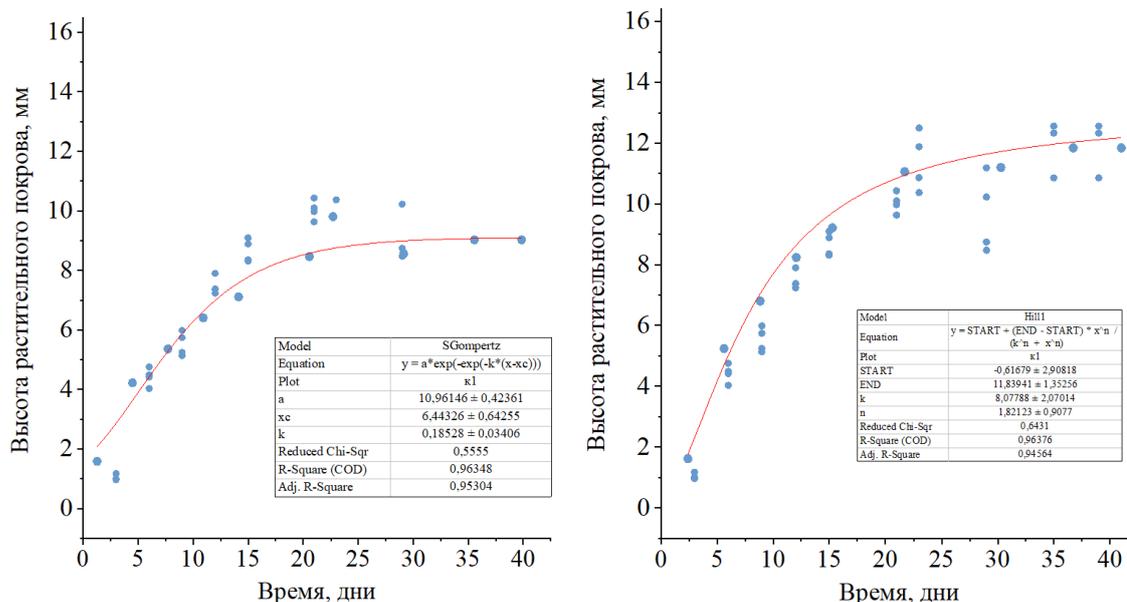


Рисунок 3.9 – Примеры выбора функций роста путем анализа графического отображения и параметров описательной статистики

Выводы по выбору функций роста для оценки роста и развития растений

Подбор функций роста осуществлялся для оценки роста и развития растений и осуществлялся путем рассмотрения нелинейных регрессионных математических моделей описания роста продуктивности растений на основе полученных экспериментальных данных формирования растительного покрова во временной шкале. Путем наложения графических изображений и численной проверкой сходимости благодаря проведению статистической обработки с получением коэффициентов корреляции, была выбрана математическая модель для оценки прироста биомассы растений и скорости роста – математическая модель *сигмовидной функции Гомперца (Gompertz model)*.

3.4 Выводы по Главе 3

1. Для определения возможности применимости мелиорантов нетрадиционного происхождения необходима комплексная оценка пригодности с учетом двух составляющих: анализа мелиорационного потенциала и оценки экологической безопасности субстрата.

Методы оценки применимости мелиорантов основываются на двух подходах: прямой оценке субстрата и косвенной. Прямая оценка заключается в анализе химического состава и физико-химических характеристик мелиоранта и их соответствие регламентированным нормам. Косвенные методы подразумевают оценку мелиоранта через воздействие на биотические компоненты окружающей среды. Преимущество таких косвенных методов заключается в оценке воздействия мелиоранта на два наиболее влиятельных фактора экологически эффективного восстановления технозёма: состояние растений и почвенных организмов.

2. Один из вариантов оценки воздействия мелиорантов на растения это анализ биологической продуктивности формируемого растительного покрова. Классический подход к анализу является трудоемким и ресурсозатратным, а также приводит к разрушению анализируемого растительного материала. Предложенный альтернативный подход заключается в цифровой обработке RGB-снимков с применением вегетационного индекса листовой поверхности. Проведенное экспериментальное исследование на моделях почвенно-растительных комплексов показало существенную линейную взаимосвязь ($r^2 > 0,75-0,95$), между результатами двух сравниваемых подходов, что доказывает применимость предложенного метода.

При проведении анализа биологической продуктивности предложенным методом было сделано и обработано более 700 RGB-снимков, что позволило оценить рост и развитие травянистого покрова без разрушения растительного материала за весь вегетационный период растений с еженедельной периодичностью, т.е. в динамике роста и развития растительного покрова.

3. Оценка роста и развития растений во временной динамике эффективна при использовании методов цифровой обработки данных (снимков) совместно с моделированием кинетики роста растений. Кинетика роста и развития растений описывается нелинейными регрессионными моделями. На основе полученных экспериментальных данных о росте и развитии растений во временном периоде был определен вид математической модели наиболее достоверно описывающий прирост биомассы растений и скорость роста.

Путем наложения графических изображений и проведения статистической обработки – численной проверки сходимости с получением коэффициентов корреляции, математическая модель сигмовидной функции Гомперца (*Gompertz model*) была определена, как наиболее достоверно отражающая рост и развитие опытных растений. В связи с этим, модель была выбрана для анализа формирования растительного покрова с целью оценки воздействия нетрадиционного мелиоранта на растения.

ГЛАВА 4 ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПРИ ВНЕСЕНИИ НЕТРАДИЦИОННОГО МЕЛИОРАНТА

Экологически эффективное формирование почвенно-растительного комплекса на рекультивируемых территориях горных производств – сложный процесс, ведущий к долговременному самовосстановлению среды. Стабилизация изменений экосистемы может длиться десятки лет, в зависимости от состояния техногенной экосистемы. Для скорейшего восстановления и снижения негативного воздействия нарушенных земель рекомендуется ускоренное зарастание его растительностью. Почвенно-растительный покров снижает негативную нагрузку путем восстановления естественных функций экосистемы, а также буферных свойств почвенного покрова, предотвращает эрозионные процессы, и при успешном восстановлении, возвращает земли в хозяйственное использование.

Экологически эффективное восстановление растительного покрова на техногенно нарушенных землях, как составляющая часть рекультивационных мероприятий необходимо для формирования устойчивого почвенно-растительного комплекса, способного поддерживать свои естественные функции с дальнейшим эволюционным развитием характерным для данных техногенных и природно-климатических условий без антропогенного вмешательства.

Эволюционное развитие почвы и растительного покрова происходит синергично и в большей степени определяется биогенной аккумуляцией органического вещества в восстанавливаемой экосистеме. При благоприятных антропогенных и природно-климатических условиях скорость нормального восстановления составляет 10-20 лет [2; 33; 46]. Однако, для каждого техногенного ландшафта длительность процесса развития может отличаться в зависимости от степени нарушенности и локальных условий.

В связи с чем для рекультивации техногенно нарушенных земель горной промышленности необходимо внесение органических почвенных добавок для

интенсификации процесса формирования устойчивого почвенно-растительного комплекса.

С целью сохранения и рационального использования основных мелиорационных ресурсов согласно приоритетным направлениям (в первую очередь сельскохозяйственное землепользование) при рекультивации ТНЗ рекомендуется использовать вторичные материальные ресурсы – нетрадиционные мелиоранты.

Комплексная оценка применимости нетрадиционных мелиорантов подразумевает проведение анализов воздействия на оба компонента почвенно-растительного комплекса. Однако, классический подход в оценке применимости любых почвенных добавок (удобрений, мелиорантов) представляет собой в основном физико-химический анализ добавки и рассмотрение пригодности в качестве удобрения или мелиоранта для обрабатываемой почвы. В свою очередь анализ воздействия на растительный покров отражает воздействие на оба компонента восстанавливаемого комплекса: анализ прямого воздействия на растительный покров и косвенного – на почвенный слой.

Таким образом, оценка воздействия на растительный покров является обязательной для подтверждения применимости нетрадиционных мелиорантов.

Для оценки применимости предлагаемого нетрадиционного мелиоранта проводились эксперименты по воздействию на ранние стадии развития растений и на рост-развитие травянистых растений в течении всего вегетационного периода. Отклонения роста и развития растений, являются ключевыми индикаторами нарушения почвенных режимов (питательного, солевого, водно-воздушного, а также токсичности почвенных субстратов). Угнетение развития растительного покрова отражает хроническую фитотоксичность почвенных субстратов, а в свою очередь стимуляция роста свидетельствует о мелиорационном потенциале почвенного субстрата.

При оценке учитывались следующие параметры: воздействие на всхожесть семян, прирост биомассы и удельный линейный рост травянистого покрова для

подтверждения экологической безопасности и мелиорационного потенциала субстрата.

4.1 Оценка воздействия нетрадиционного мелиоранта на раннюю стадию развития растений

Качество почвенного слоя, а также мелиорационный потенциал и экологическую безопасность вносимых почвенных субстратов можно определить на ранних стадиях развития растений (всхожесть и состояние проростков). Одним из методов определения является биотестирование (фитотестирование) при помощи растений в качестве тест-объектов, выращенных на почвенных моделях. Фитотестирование для анализа прорастания выявляет неподходящие почвенные условия, такие как засоленность почвы, наличие токсичных соединений или дефицита питательных веществ для растений [125; 140].

Исследования применимости нетрадиционного мелиоранта и оценка его воздействия на ранние стадии развития растений проводились на основе методики ГОСТ Р ИСО 18763 – 2019 «Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях высших растений». Метод основан на анализе и сравнении всхожести и раннего роста однодольных и двудольных растений в контрольной почве и почве обработанной предлагаемым нетрадиционным мелиорантом.

Экспериментальные модели

В применяемом тестировании использовались семена следующих растений: однодольного – ржи посевной *Secale cereale* L., овса посевного *Avena sativa* L. и двудольных – кресс-салата *Lepidium sativum* L. и горчицы белой *Sinapis alba* L.

Для фитотестирования были сформированы планшеты с контрольной почвой и почвой, обработанной нетрадиционным мелиорантом с засевом семян в 90 см³ почвосмеси на планшет. Посев семян растений проводился на черную фильтрационную бумагу (85 г/м², толщина 0,17 мм, скорость фильтрации 45 с), покрывающую увлажненный почвенный слой. Почвы для планшетов формировались при различных дозах внесения нетрадиционного мелиоранта с

двукратным повтором по 20 равноудаленных семян на планшет (в соответствии с методикой). Для фитотестирования всхожести семян использовалась почва с антропогенно нарушенной территории (отобраны образцы антропогенно измененной супесчаной почвы – 60°16'52" с.ш., 30°14'3" в.д.) и в качестве альтернативного контроля – искусственная почва, сформированная согласно ИСО 11269-1,2. Внесение нетрадиционного мелиоранта осуществлялось в диапазоне от 0 до 100% с шагом 10%.

Подготовленные планшеты закрывались прозрачными крышками и помещались под углом 45° в темное место для инкубации в течение 72 часов. Угол наклона обусловлен повышением точности измерений за счет прямолинейного роста корней вследствие гравитропизма. Примеры моделей после инкубационного периода представлены на рисунке 4.1.

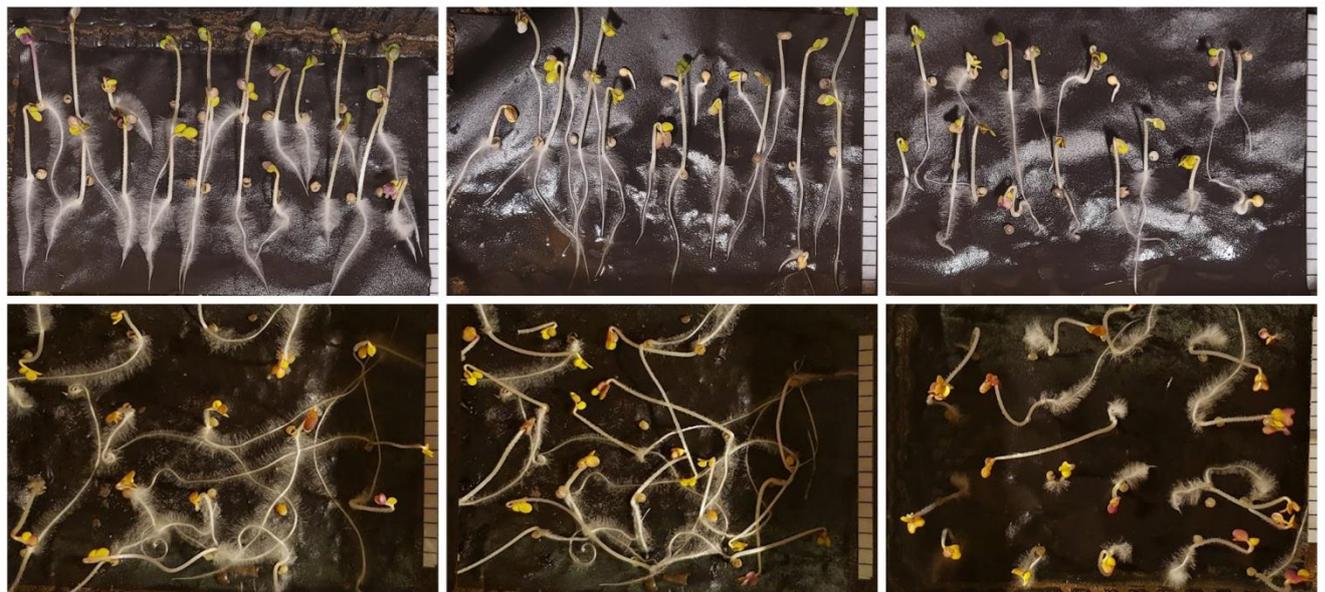


Рисунок 4.1 – Модели фитотестирования, где (слева направо): верхний ряд – всхожесть и рост семян горчицы белой на моделях с контрольной почвой, почвами обработанными ОСВ с дозировками 20 и 100 %; нижний ряд – результаты после периода инкубации моделей (контрольной почвы, 20 % и 100 % ОСВ) без угла наклона

Методология

По завершению инкубационного периода в планшетах с контрольной почвой и с исследуемыми обработанными образцами почв фиксировались следующие измеряемые параметры: количество проросших семян, длина корней и

проростков. Измерение анализируемых параметров производилось путем обработки цифровых изображений с помощью программного обеспечения ImageJ 1,40g (на основе метода, описанного в главе 3).

Экологическая безопасность вносимого субстрата – нетрадиционного мелиоранта определяется анализом фитотоксичности почвенных моделей с выявлением процентного замедления прорастания семян. Процент всхожести (GP) рассчитывался как отношение количества проросших семян к общему количеству семян, помещенных в опытной или контрольной почве каждого планшета; отношение было умножено на 100%. Для расчета всхожести принималось, что появление корня длиной не менее 1 мм свидетельствует о прорастании семян.

Также за норму для расчета предполагалось, что появление корня длиной не менее 1 мм свидетельствует о прорастании семени.

Мелиорационный потенциал подтверждается фитотестированием при проведении анализа роста проростков и их корней (измерения длины органов растений за рассматриваемый период).

Статистическая обработка данных заключалась в расчете средних значений, стандартных отклонений и нормального распределения значений выборки с применением программного обеспечения MS Excel и OriginLab.

Для оценки достоверности анализа измерений длины корней и проростков (ростков) был применен однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA), где за нулевую гипотезу было принято, что почва с нарушенных земель имеет равную всхожесть и рост корней, ростков, как и обработанная почва осадком сточных вод ЦБК (с уровнем достоверности 95 %).

Полученные результаты (экологическая безопасность)

Результаты анализа экологической безопасности внесения предлагаемого нетрадиционного мелиоранта – осадка сточных вод целлюлозно-бумажного комбината отображены на рисунке 4.2 для четырех видов растений при проведении фитотестирования. Внесение предлагаемого мелиоранта в дозировке 20-60 % не влияло на всхожесть тестируемых растений – всхожесть семян была 100 % или выше значений контрольных моделей эксперимента (на опытных

почвах всхожесть ржи составляла 60-80 % при 53-57 % на контрольных моделях). При внесении осадка более 60-70 % относительно обрабатываемой почвы в рассматриваемых моделях отмечались признаки проявления фитотоксичности – падение процента всхожести семян до 80 %, кроме семян ржи, где минимальная всхожесть составила 50 % в модельных образцах 10 % и 100 % осадка при 53-57 % всхожести у контрольных моделей.

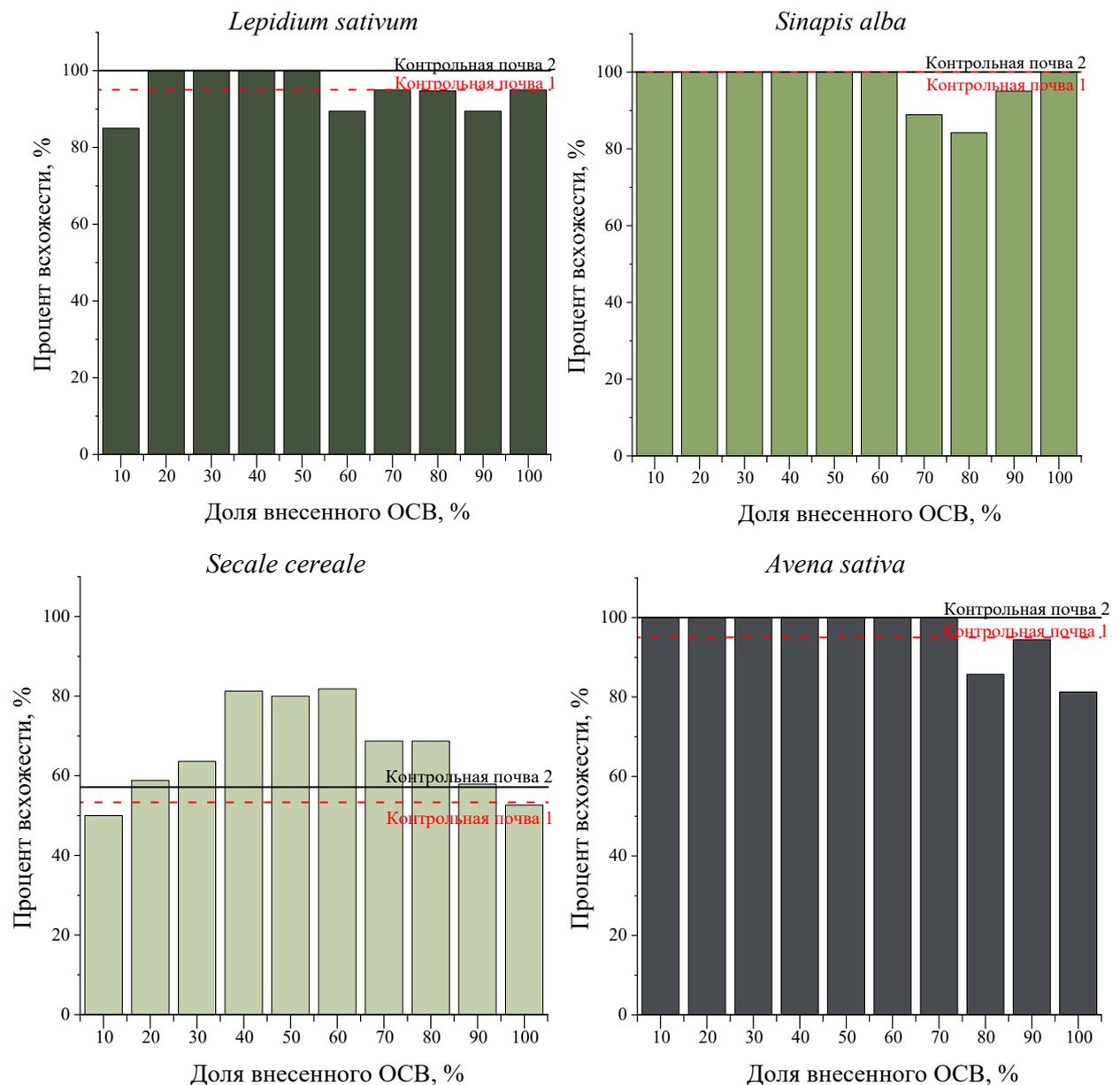


Рисунок 4.2 – Проценты всхожести семян кресс-салата, горчицы белой, ржи посевной и овса при различных дозах внесения нетрадиционного мелиоранта (ОСВ)

Согласно критериям валидности методики результаты фитотестирования, а именно результаты всхожести ржи посевной не могут быть использованы как

достоверные, т.к. всхожесть семян ржи на контрольных моделях составила менее 70 %, что противоречит критериям используемой методики.

Результаты фитотестирования подтвердили, что рациональное применение предлагаемого нетрадиционного мелиоранта – осадка сточных вод ЦБК не оказывает фитотоксичного воздействия на всхожесть семян. Внесение мелиоранта в дозировке 20-60 % к обрабатываемой почве не оказывает токсичного воздействия на овес посевной *Avena sativa* L., кресс-салат *Lepidium sativum* L. и горчицу белую *Sinapis alba* L.

Качество почвенного слоя и экологическая безопасность нетрадиционного мелиоранта при других дозировках могли повлиять на всхожесть семян, что объяснимо токсичностью мелиоранта или неподходящими почвенными условиями: засоленностью почвы, наличием токсичных соединений или дефицитом питательных веществ для растений [125; 140].

Полученные результаты (мелиорационный потенциал)

Средние значения длины корней и ростков в опытных моделях с почвой, обработанной нетрадиционным мелиорантом, существенно варьировали (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Результаты измерений длины ростков и корней

Виды растений для фитотестирования	Кресс-салат <i>Lepidium sativum</i>	Горчица белая <i>Sinapis alba</i>	Овес посевной <i>Avena sativa</i>	Кресс-салат <i>Lepidium sativum</i>	Горчица белая <i>Sinapis alba</i>	Овес посевной <i>Avena sativa</i>
	Ростки, см			Корни, см		
Опытные образцы	0,89-4,71	1,80-6,29	1,44-5,33	0,51-2,83	0,59-3,44	0,35-2,40
Контрольная почва ТНЗ	2,29±0,35	3,34±0,82	4,01±0,83	1,35±0,12	2,06±0,54	1,14±0,36
Контрольная почва (эталон)	2,67±0,27	4,56±1,04	4,82±0,98	1,83±0,25	2,51±0,44	1,21±0,42

На рисунке 4.3 представлены графические результаты роста ростков и корней у семян кресс-салата, горчицы белой и овса посевного в зависимости от дозы внесения осадка сточных вод ЦБК. При анализе результатов установлено, что внесение мелиоранта в почву не оказывало фитотоксичного воздействия или

слабо его проявляло на ранней стадии роста и развития рассматриваемых растений, исключая опытные модели с внесением ОСВ ЦБК более 70-80 %.

При этом существенное торможение роста отмечалось только у горчицы белой, остальные виды растений (кресс-салат и овес посевной) не проявили чувствительности к негативному воздействию от внесения осадка в почвенные модели. Результаты положительного воздействия от внесения ОСВ ЦБК можно было наблюдать у корней семян двудольных (кресс-салата и горчицы), что в сравнении с результатами, полученными от семян овса, можно объяснить большей чувствительностью. В связи с чем, однодольные растения, в частности кресс-салат и горчицу можно рекомендовать в качестве биоиндикаторов для оценки почвенных субстратов схожих составов.

Согласно результатам измерений корней и ростков кресс-салата оптимальные дозы внесения ОСВ (в почвы, отобранные с нарушенных земель) определяются в диапазоне 10-70 %. Последующее увеличение доз внесения приводит к угнетению роста корней. При сравнении результатов роста корней и ростков на опытных моделях с результатами контрольной «эталонной» почвы – искусственной почвой, сформированной согласно ИСО 11269-1,2, отмечалось улучшение роста на почвах с нарушенных земель, обработанных осадком в диапазоне доз внесения 10-40 %.

Результаты раннего роста горчицы белой показали схожие результаты при воздействии различных доз внесения осадка: улучшение роста корней при 10-70 % ОСВ, улучшение роста ростков при 10-40 % ОСВ в обрабатываемой почве.

С целью подтверждения полученных результатов и доказательства вышеописанных утверждений результаты были обработаны с применением однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA).

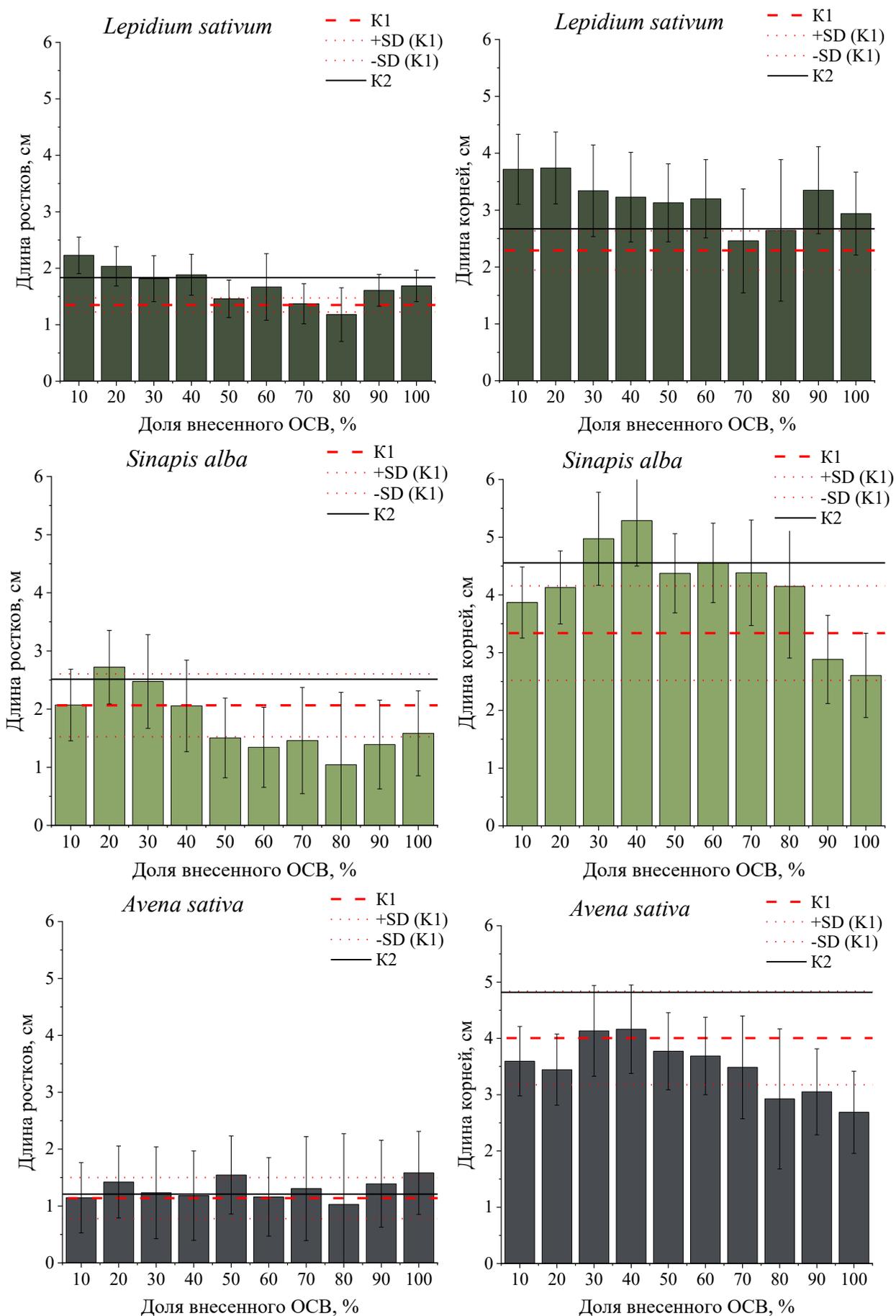


Рисунок 4.3 – Длина ростков и корней семян кресс-салата, горчицы белой и овса посевного при различных дозах внесения нетрадиционного мелиоранта (ОСВ)

Результаты по фитотестированию на двудольных растениях: кресс-салате и горчице показали более наглядную реакцию воздействия растений на внесение осадка ЦБК в почву (при уровне значимости $p=0,05$). Результаты статистической обработки результатов роста ростков и корней представлены в таблице 4.2.

При анализе овса не было выявлено статистически значимых различий между опытными и контрольными моделями, исключая внесение более 80 % ОСВ, что привело к торможению роста корней овса.

Таблица 4.2 – Таблица результатов статистической обработки измерений длины ростков и корней фитотестируемых объектов для опытных моделей в сравнении с результатами контрольных моделей (p)

Виды растений для фитотестирования	Кресс-салат <i>Lepidium sativum</i>	Горчица белая <i>Sinapis alba</i>	Овес посевной <i>Avena sativa</i>	Кресс-салат <i>Lepidium sativum</i>	Горчица белая <i>Sinapis alba</i>	Овес посевной <i>Avena sativa</i>
	Ростки (p)			Корни (p)		
10	$1,72 \cdot 10^{-9}$	0,9642	0,9708	$1,86 \cdot 10^{-5}$	0,083	0,2254
20	$9,85 \cdot 10^{-7}$	$4,22 \cdot 10^{-5}$	0,1037	$1,01 \cdot 10^{-5}$	0,008	0,1180
30	0,00124	0,0087	0,5893	0,0021	$1,88 \cdot 10^{-7}$	0,7157
40	0,000236	0,9492	0,7897	0,0036	$4,23 \cdot 10^{-9}$	0,6435
50	0,4335	0,000285	0,0114	0,0074	0,00066	0,5116
60	0,03422	$2,62 \cdot 10^{-6}$	0,9021	0,0076	0,00014	0,3357
70	0,87848	0,0001	0,3225	0,5793	0,00097	0,1094
80	0,2397	$4,33 \cdot 10^{-10}$	0,4935	0,2681	0,0175	0,0023
90	0,07676	$3,31 \cdot 10^{-6}$	0,1137	0,0011	0,1266	0,0046
100	0,01107	0,0017	0,0110	0,0331	0,0191	$8,34 \cdot 10^{-5}$

* зеленым – стимуляция роста, красным – ингибирование (торможение) роста

Результаты статистической обработки измерений корней и ростков для анализа реакции на внесение ОСВ доказали, что оптимальные дозы внесения предлагаемого нетрадиционного мелиоранта (осадка сточных вод ЦБК) – стимулирующие рост корней и ростков находятся в диапазоне 10-40 % к обрабатываемой почве.

Выводы по результатам оценки воздействия нетрадиционного мелиоранта на раннюю стадию развития растений

Таким образом, методом фитотестирования был определен мелиорационный потенциал и доказана экологическая безопасность

предлагаемого нетрадиционного мелиоранта – осадка сточных вод ЦБК. Результаты анализа всхожести семян овса посевного *Avena sativa* L., кресс-салата *Lepidium sativum* L. и горчицы белой *Sinapis alba* L. подтвердили, что рациональное применение предлагаемого нетрадиционного мелиоранта не оказывает фитотоксичного воздействия. Внесение осадка сточных вод ЦБК в дозировке 20-60 % к обрабатываемой почве не проявляло токсичного воздействия на всхожесть семян, что доказывает экологическую безопасность применения ОСВ ЦБК. Результаты анализа роста корней и ростков растений определили и доказали мелиорационный потенциал от внесенного ОСВ в диапазоне доз от 10 до 40 % к обрабатываемой почве.

Однако, стоит отметить, что фитотестирование с определением токсичности на ранних стадиях развития растений отражает исключительно острую реакцию растений и идентифицирует высокую токсичность почвенных субстратов или критические нарушения почвенных режимов (соляной, кислотный, водно-воздушный или питательны). Для подтверждения отсутствия фитотоксичности и наличия мелиорационного потенциала необходимо проведение оценки воздействия внесения нетрадиционного мелиоранта на растения в течение всего вегетационного периода.

4.2 Оценка воздействия нетрадиционного мелиоранта на рост и развитие травянистого покрова

Растения служат хорошими индикаторами состояния и качества почв, а также часто применяются в качестве тест-объектов для фитотестирования почв, почвенных субстратов и почвенных добавок, в том числе: удобрений, почвенных-улучшителей, мелиорантов и др. При биотестировании определяется экологическая безопасность рассматриваемого субстрата и его мелиорационный (или удобрительный) потенциал.

Для оценки применимости предлагаемого нетрадиционного мелиоранта – осадка сточных вод ЦБК были проведены эксперименты по исследованию воздействия мелиоранта на формирование растительного покрова в течение всего вегетационного периода. Оценка воздействия мелиоранта на формирование растительного покрова проводилась путем анализа роста и развития травянистых растений на моделях почвенно-грунтовых горизонтов.

Вегетационный период роста заключается в развитии растения начиная с прорастания семян, стадии активного роста, формирования растения и заканчивая образованием семян и гибелью. Для каждой стадии роста растения есть требования по оптимальным условиям почвенных режимов (питательному, солевому, водно-воздушному и др.), необходимых для его нормального роста и развития. В связи с чем необходим анализ воздействия от внесенного нетрадиционного мелиоранта на всех стадиях роста и развития растений: покой и всхожесть семян, экспоненциальный рост, линейный рост, замедление роста и деградация. Так как наиболее существенные стадии развития при оценке применимости мелиорантов для рекультивационных целей это всхожесть, экспоненциальный и линейный рост, то основные параметры анализировались на этих стадиях.

Процент всхожести, как определяющий фактор дальнейшего развитие растительного покрова анализируется, как для оценки мелиорационного потенциала, так и для оценки экологической безопасности нетрадиционного мелиоранта. В ходе экспоненциального роста ключевую роль играют

растительные клетки, вовлеченные в клеточное деление, что наиболее приближенно рассматривается оценкой прироста биомассы, а при линейном основные процессы заключаются в увеличении (линейном) размеров растений по мере развития фотосинтезирующего аппарата, что анализируется удельным линейным ростом травянистого покрова.

Таким образом, при оценке учитывались следующие параметры: всхожесть семян, прирост биомассы, удельный линейный рост травянистого покрова и анализ отклонения роста и развития растений. Для оценки применено два подхода: традиционный подход по сбору и пересчету растительного материала и альтернативный – цифровой метод обработки данных (описанный в главе 3).

Задачи проведения эксперимента:

- 1) создание моделей с различным композиционным составом, выбранным на основе предшествующих исследований [138],
- 2) оценка мелиорационного потенциала ОСВ ЦБК, путем анализа всхожести, прироста биомассы и удельного линейного роста растительного покрова;
- 3) оценка экологической безопасности ОСВ ЦБК, путем анализа нормы (или отклонения) роста и развития растительного покрова.

Экспериментальные модели

Отвальная порода. В основу почвенно-грунтовых моделей были положены три вида отходов горнодобывающей промышленности: (1) пустая порода, образованная при золотодобыче, (2) фосфогипс из хранилищ производства фосфорных удобрений и (3) известняковый щебень.

1. Пустая порода, отобранная из отвалов, образованных при добыче золота и занимающих большую часть земельного отвода, сложена березитами. Березит представляет собой низкотемпературную метасоматическую породу, образовавшуюся в результате замещения как магматических, так и осадочных протолитов, а также характеризующуюся наличием кварца, серицита и карбоната (состав образцов приведен в таблице 4.3).

Таблица 4.3 – Минеральный состав пустой породы

Углеродистые березиты (Собщ. = 0,5-9%)			
Неизменные породы	Слабо-проявленные (5-15%)	Сильно-проявленные (15-50%)	Полно-проявленные (более 50%)
кварц	кварц	кварц	кварц
плагиоклаз	биотит	гидросерицит	сульфиды (пирит, арсенопирит)
калиевый полевой шпат	мусковит	карбонат (анкерит)	карбонат
биотит	гидросерицит	серицит	+/- серицит
мусковит	серицит	углеродистое вещество	гидросерицит
углеродистое вещество	углеродистое вещество	пирит	
	+/- карбонат	+/- мусковит	
	турмалин	турмалин	

Аргиллизиты-березиты (Собщ. =< 0,03-1,2%)			
Слабо-проявленные (5-15%)	Сильно-проявленные (15-50%)	Полнопроявленные (более 50%)	
		Серицитовые	Кварцевые
гидросерицит	карбонат	серицит	кварц
кварц	серицит	карбонат	серицит
серицит	кварц	кварц	карбонат
каолинит	каолинит	каолинит	каолинит
+/- карбонат	+/- гидросерицит	пирит	пирит
хлорит	хлорит	+/- хлорит	+/- хлорит
мусковит	пирит		
пирит			

2. Фосфогипс представляет собой гидрат сульфата кальция, образующийся как побочный продукт производства фосфорных удобрений, состоящий в основном из $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (>80 %). Объем отходов, складированных на гипсохранилищах, может достигать десятков миллионов тонн [130].

3. Дробленый известняк в основном состоит из карбоната кальция (>97 %). По данным анализа гранулометрического состава диаметр измельченного известняка варьировал от 8 до 25 мм. Лабораторный анализ проб отвальных пород показал их геохимическую близость к общемировому содержанию элементов (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Таблица элементного состава пород (мг/кг), заложенных в основу экспериментальных моделей

Пустая порода		Фосфогипс		Известковый щебень	
Mg	8300	S	236600	Ca	387604
Na	8770	Ca	280202	Mg	17000
Ca	8050	Si	3597	Mn	23
Ti	6000	P	3226	V	2,1
Mn	840	Al	1799	Zn	1,2
Ba	720	Fe	1747	Ni	1,2
V	180	F	1600	Cd	0,74
Sr	130	Na	297	Cu	0,47
Zn	102	K	249	Pb	0,1
Cr	99	Cl	181	As	0,1
Ni	75	Mg	200	Sb	0,1
Cu	49	Mn	77		
As	31				
Co	23				
Pb	14				
Cd	2				
Mo	1				

Почва. Для формирования почвенного слоя были отобраны образцы почвы наиболее характерные для рассматриваемого региона. Отобранная почва антропогенно-природного происхождения была отобрана в Ленинградской области на полевозащитной территории, как техногенно измененная почва (60°16'52" с.ш., 30°14'3" в.д.). Пробы почвы представляли собой верхний 30-сантиметровый плодородный слой деформированных песчаных подзолов (>80 % фракции 0,05–2,00 мм). Плотность почвы $1,3 \pm 0,05$ г/см³, pH $5,00 \pm 0,5$, содержание органического вещества $6,85 \pm 0,70$ %. Перед внесением почва была высушена до воздушно-сухого состояния и просеяна через сито с размером ячеек 2 мм.

Торфосмесь (торф). В качестве субстрата для сравнительной группы почвенно-грунтовых моделей, обработанных классическим органическим мелиорантом, была взята торфосмесь, как наиболее часто используемая почвенная

добавка при восстановлении почв. Используемая торфяная смесь – товарный продукт, представляющий собой просеянный и раскисленный торф средней степени разложения с добавлением извести – 100–180 мг/л азота ($\text{NO}_3 + \text{NH}_4$), 135–255 мг/л фосфора (P_2O_5), 115–215 мг/л калия (K_2O), pH ~5–6.

Растения. Влияние почвенных добавок оценивали на смеси двух видов растений семейства злаковых: райграса *Lolium perenne* и овсяницы луговой *Festuca pratensis*. Райграс и овсяница — локально распространенные виды флоры, хорошо адаптирующиеся к антропогенным условиям и рекомендуемые для мелиорации земель. Норма высева травосмеси устанавливалась в размере 200 т/км² (20 ц/га) согласно ГОСТ Р 57446–2017 «Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель. Восстановление биологического разнообразия».

Экспериментальный комплекс. Экспериментальная установка состояла из моделей слоев отвальных пород и почв с растительным покровом. Модели формировали на рабочей поверхности размером 15×15 см по следующей схеме: слой отвальной породы мощностью 15–20 см и почва с внесенными почвенными добавками – ОСВ ЦБК и торфосмесью мощностью слоя 20 см, как минимально необходимая толщина слоя для рекультивации земель.

Сравнительную оценку проводили для двух видов мелиорантов (почвенных добавок): осадка сточных вод целлюлозного-бумажного комбината и торфяной смеси, как альтернативной почвенной добавки.

Внесение почвенных добавок осуществлялось в трех установленных соотношениях на основании рекомендаций по внесению торфяной смеси, рекомендаций по оптимальной плотности почвы для травянистых растений, литературного обзора научных работ в этой области и предварительных анализов субстратов. Для определения оптимального количества внесения ОСВ все модели формировались в соотношениях (по объему) 1:1, 1:2, 1:3 органических мелиорантов к почве.

4.2.1 Оценка мелиорационного потенциала осадка сточных вод

Оценка мелиорационного потенциала нетрадиционного мелиоранта для растительного покрова заключалась в двух подходах к измерению: (1) традиционный метод измерения физических величин (всхожесть семян, высота травы) и срез растительного материала и (2) метод с использованием цифровой обработки изображений (DIA) и расчетом индекса поверхности листа (LAI). Для оценки у растений измеряли следующие параметры: всхожесть семян, прирост биомассы и скорость роста [142].

Методология

Всхожесть. Анализ всхожести включал сравнительную оценку процента всхожести семян в опытных моделях с контрольными группами моделей. Расчет всхожести оценивался по количеству проросших семян (%) за 5–7 дней со дня посева. Пересчет производился с использованием цифровой обработки изображений (описание приведено в главе 3).

Прирост биомассы. Анализ прироста биомассы растительного покрова проводился на стадии активного роста трав (райграса и овсяницы) и включал сравнительную оценку фитомассы в опытных моделях с контрольными группами моделей. Расчет прироста биомассы оценивался, как недельное увеличение фитомассы растительного покрова. Пересчет производился с использованием цифровой обработки изображений (описанной в главе 3).

Удельная скорость роста. Анализ удельного роста растительного покрова проводился на стадии активного роста трав (райграса и овсяницы) и включал сравнительную оценку прироста линейной длины травянистого покрова в исследуемых моделях с контрольными группами моделей. Расчет удельного роста оценивался, как недельное увеличение высоты растительного покрова. Пересчет производился с использованием цифровой обработки изображений.

Полученные результаты

Всхожесть. Результаты всхожести (рисунок 4.6) показали относительно высокий показатель прорастания на контрольных почвах (>60 %) по сравнению с

почвами, где внесены мелиоранты, например, это может быть связано с повышенным питательным режимом контрольной почвы. Наиболее низкие показатели всхожести были отмечены на моделях, сформированных на слое пустой породы ~50 %, поскольку полученные данные ставят под сомнение достоверность результатов, то в дальнейшем анализе всхожести они не учитывались.

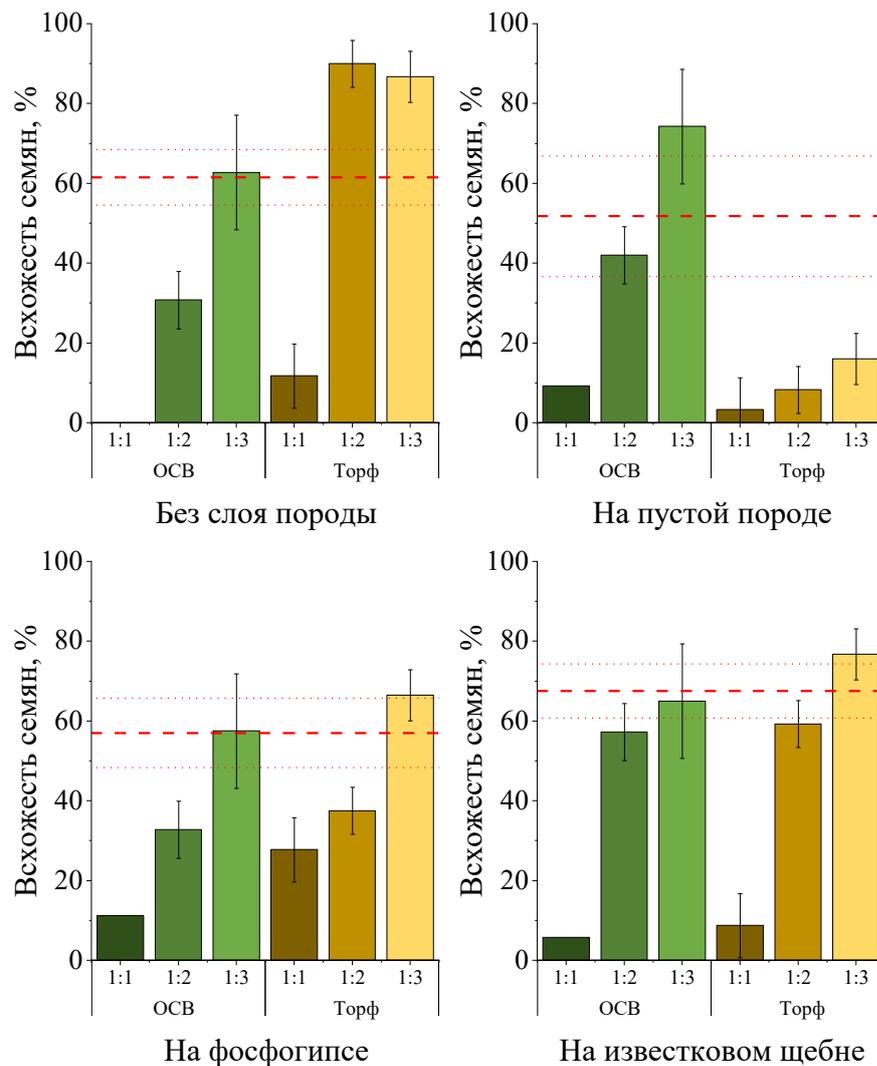


Рисунок 4.6 – Результаты всхожести семян на моделях рекультивируемых ТНЗ (%) по четырем группам слоев пород

Результаты анализа всхожести семян на почве, с внесенной торфосмесью оказались более высокими на большинстве типов слоев отвальных пород, чем почвенных моделях с внесенным ОСВ ЦБК.

В опытных почвенно-растительных комплексах травосмесей по сравнению с контрольными моделями оптимальные условия для прорастания семян были

сформированы в следующих моделях (номера моделей принималось согласно схеме эксперимента, представленной на рисунке 4.4):

- 1) Почва с внесенным ОСВ в соотношении 1:3 к почве – >60 % (№ 9,21,27);
- 2) Почва с торфосмесью в соотношении 1:2 к почве – >60 % (№ 8,26);
- 3) Почва с торфосмесью в соотношении 1:3 к почве – >70 % (№ 10,22,28).

Результаты анализа показали, что наименее пригодные условия для нормальной всхожести семян формируются в моделях, где соотношение почвы и органического мелиоранта (ОСВ и/или торфосмеси) 1:1, процент всхожести семян составил менее 15 %. Резкое угнетение прорастания семян происходит при внесении чрезмерного количества ОСВ, схожие результаты наблюдались и в более ранних исследованиях [71; 81]. Следовательно, следует избегать внесения высоких доз ОСВ, чтобы предотвратить негативное воздействие на формирование растительного покрова.

Оценка всхожести семян райграса и овсяницы луговой на рекультивированных слоях показала разницу во всхожести, что можно объяснить следующими факторами:

- 1) воздействием отвальной породы на почвенный слой,
- 2) оптимальными режимами: воздушным, водным, и питательным,
- 3) влажностью почвы.

Оптимальный воздушный режим определяется плотностью субстрата и соотношением вносимых почвенных добавок; водный режим зависит от влагоемкости и водоотдачи субстратов; соотношение питательных веществ зависит от содержания применяемых компонентов в исходной почвенной добавке. Факторы 2 и 3 могут формироваться из-за различия почвенной плотности, образованной от внесенного мелиоранта.

Различие результатов можно объяснить несколькими возможными причинами. Низкая всхожесть семян на пустой породе связана с гранулометрическим составом: модельные смеси на измельченных образцах березита размером 1 – 4 см обеспечивали лучший водоотвод, когда остальные минеральные основы характеризовались мелкофракционным составом и низкой водопроницаемостью. Это подтверждается результатами всхожести семян в

контрольных группах, высеянных на почве без слоя породы, а также слоях известнякового щебня и фосфогипса – уровни всхожести близки к 60-70 %, тогда как с пустой породой около 50 %.

В целом по результатам исследования всхожести семян установлено, что при внесении оптимального количества ОСВ при соотношении 1:3 к почве отмечается положительная динамика воздействия от внесенного осадка на всхожесть семян райграсса и овсяницы. При чрезмерном внесении проявляются признаки угнетения всхожести семян. Однако, стоит отметить, что всхожесть является индикатором малоприспособных почвенных условий и на результаты могли повлиять другие факторы, такие как, соленость [125; 140] (и электропроводность [100]), чрезмерный уровень аммонийного азота [81; 125; 140], высокое содержание металлов [140] и непригодная физическая структура [169].

Прирост биомассы. Согласно полученным результатам усредненного недельного прироста биомассы в исследованных почвенно-растительных комплексах существенно значимых различий от внесенных органических мелиорантов не наблюдалось. Результаты анализа усредненного недельного прироста биомассы растительного покрова в исследованных почвенно-растительных комплексах представлены рисунке 4.7 с графиками удельного роста различных видов моделей согласно их подстилающему слою.

Средний недельный прирост биомассы в активной стадии роста по всем опытным моделям варьировал в диапазоне от 15 до 20 г. В то время как, биомассы на контрольных моделях – от $14,9 \pm 1,8$ до $20,0 \pm 2,4$ г.

В связи с тем, что модели сформированные на пустой породе при анализе всхожести не учитывались, то и в дальнейшем анализе прироста биомассы растительного покрова они не рассматривались как достоверные.

Результаты расчетов показали незначительно меньший прирост биомассы на почвенных моделях с внесенным ОСВ в сравнении с моделями почв, где внесена торфосмесь (ОСВ – мин. 15, макс. 18 г. и торфосмесь – мин. 16, макс. 20 г.).

Наилучшие результаты усредненного недельного прироста биомассы были получены на моделях с торфосмесью при соотношении внесения 1:3 к почве – от $18,09 \pm 2,98$ (№ 10) до $20,02 \pm 2,41$ (№ 28) грамм в неделю, когда наилучшие результаты от внесенного ОСВ отмечались при внесении в соотношении 1:3 – от $17,13 \pm 1,92$ (№ 27) до $18,05 \pm 1,44$ г. (№ 21).

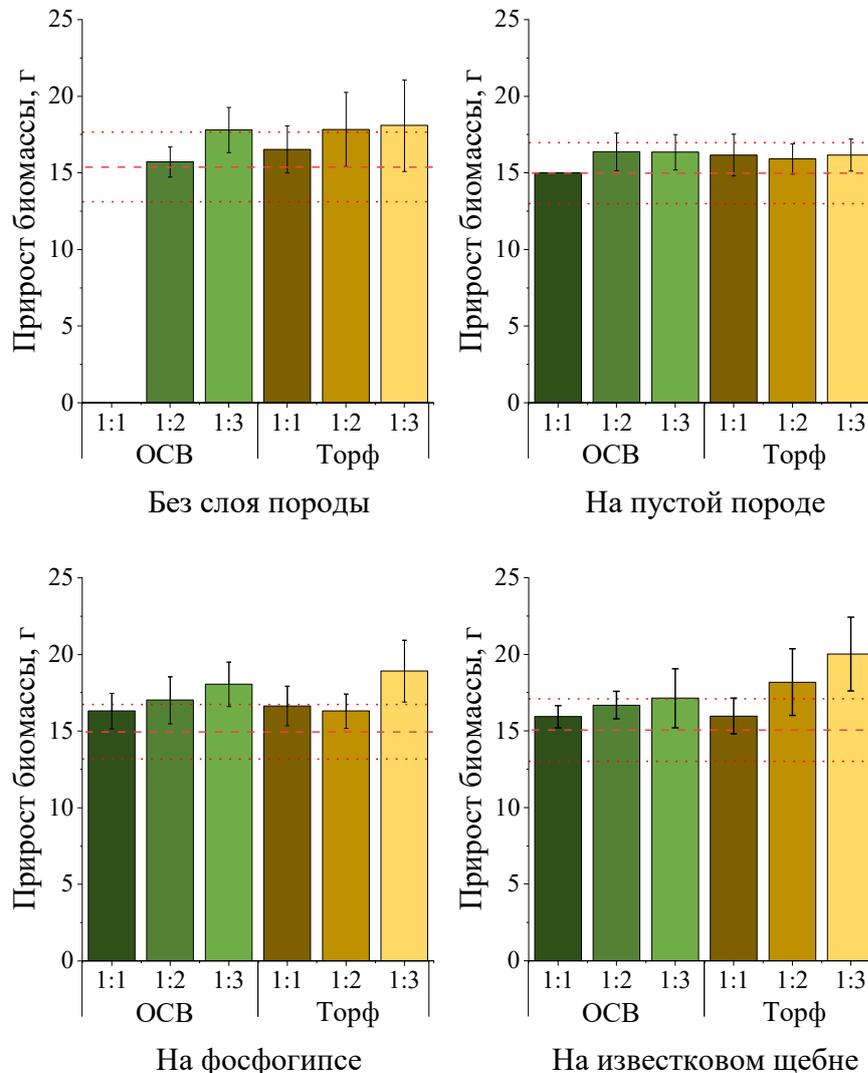


Рисунок 4.7 – Результаты недельного прироста биомассы на моделях рекультивируемых ТНЗ по четырем группам слоев пород

Самые низкие были отмечены на моделях с внесением органических мелиорантов в соотношении 1:1: для моделей с ОСВ прирост биомассы составлял от $15,01 \pm 0,24$ (№ 5) до $16,30 \pm 1,16$ г. (№ 17), а для моделей с торфосмесью от $15,96 \pm 1,16$ (№ 24) до $16,63 \pm 1,29$ г. (№ 5).

С целью подтверждения полученных результатов и доказательства вышеописанных утверждений результаты были обработаны с применением

однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) при уровне значимости $p=0,05$. Результаты статистической обработки результатов роста ростков и корней представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Таблица результатов статистической обработки прироста биомассы в сравнении с контролем (p)

	Без слоя породы			На фосфогипсе			На известковом щебне		
Торф	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
	0,203	0,007	0,003	0,060	0,120	$0,036 \cdot 10^{-3}$	0,295	0,009	$0,025 \cdot 10^{-4}$
ОСВ	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
	-	0,715	0,010	0,146	0,027	0,001	0,372	0,097	0,018

Статистическая обработка полученных данных результатов подтвердила, что имеется статистически значимое различие между контрольными моделями и почвами с внесенными органическими мелиорантами в соотношении к почве 1:3 (№ 9,10,15,16,21,22,27 и 28), что доказывает мелиорационный потенциал внесения органических мелиорантов (ОСВ и торфосмеси) для улучшения прироста биомассы.

Удельная скорость роста. Результаты средней удельной скорости роста растительного покрова в исследованных почвенно-растительных комплексах показали сильный разброс значений, что отражено на рисунке 4.8 с графиками удельного роста различных видов моделей согласно их подстилающему слою.

Согласно полученным результатам, удельная скорость роста растительного покрова на моделях почв с внесенной торфосмесью больше, чем у ОСВ, однако сильный разброс данных не дает подтверждение этому утверждению.

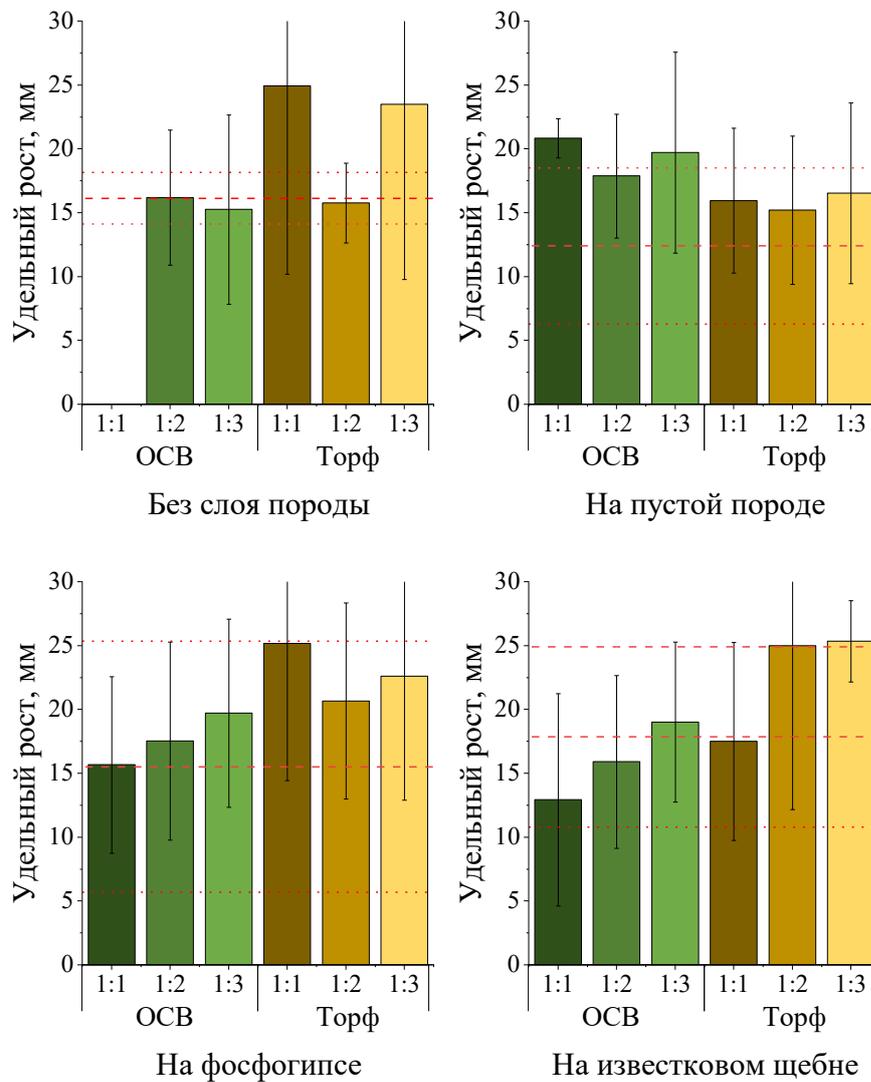


Рисунок 4.8 – Результаты недельного удельного роста растительного покрова на моделях рекультивируемых ТНЗ по четырем группам слоев пород

Выводы по результатам оценки мелиорационного потенциала осадка сточных вод

Оценка мелиорационного потенциала проводилась с различным композиционным составом внесенных органических мелиорантов (ОСВ и торфосмеси), путем анализа всхожести, прироста биомассы и удельного линейного роста растительного покрова.

Результаты анализа всхожести семян райграса и овсяницы луговой на рекультивированных слоях показали, что оптимальные условия для прорастания семян были сформированы в следующих моделях: почва с внесенным ОСВ в соотношении 1:3 и почва с торфосмесью в соотношении 1:2 и 1:3 (к почве).

На основе результатов анализа усредненного недельного прироста биомассы установлено, что почвенные модели с внесенными органическими мелиорантами в дозировке 1:3 улучшают прирост биомассы, как при использовании торфосмеси, так и при применении нетрадиционного мелиоранта – ОСВ. Статистическая обработка полученных результатов подтвердила, что ОСВ и торфосмесь при внесении в почву 1:3 улучшает прирост биомассы в сравнении с контрольными почвенными моделями (без добавления почвенных добавок). Таким образом, по результатам анализа усредненного недельного прироста биомассы можно утверждать, что ОСВ при внесении 1:3 к почве обладает мелиорационным потенциалом.

При статистической обработке данных для сравнительного анализа воздействия от внесения ОСВ и торфосмеси не было доказано существенных различий (статистически значимых различий), из чего нельзя точно утверждать о преимуществе какого-либо из опытных органических мелиорантов (ОСВ или торфосмеси).

4.2.2 Оценка экологической безопасности осадка сточных вод

Оценка экологической безопасности проводилась через анализ роста и развития растений с расчетом отклонений роста. Для анализа роста и развития растений на основе полученных экспериментальных данных были использованы нелинейные регрессионные математические модели описания роста продуктивности растений по временным отметкам (описание метода приведено в главе 3).

Методология

Для оценки биомассы растений и скорости роста использовался анализ *сигмовидной функции Гомперца* [72] на протяжении всей стадии экспоненциального роста растений с шагом в три дня [142]. При анализе учитывались прирост биомассы и удельный рост растительного покрова. Дисперсионный анализ (ANOVA) был использован для изучения различий между типами сформированных почвенно-растительных моделей. Все статистические анализы проводились с доверительной вероятностью 95 % ($p < 0,05$).

Полученные результаты

Высокие результаты прироста биомассы и нормального роста растительного покрова наблюдались при внесении в почву торфосмеси в соотношениях 1:3 и 1:2 и при внесении ОСВ 1:3 (рисунки 4.9 и 4.10), что подтверждает ранее полученные результаты по всхожести семян и приросту биомассы.

Наиболее высокие результаты по формированию растительного покрова и скорости роста биомассы были получены на моделях почв с внесенной торфосмесью в соотношениях 1:2 и 1:3, где отмечалось значение LAI > 50 % на контрольных моделях, LAI > 30 % на слое пустой породы, LAI > 40 % на слое фосфогипса и LAI > 60 % на известняковом щебне. В этих моделях наблюдался ускоренный рост растений и улучшенный прирост общей биомассы. Ближайшие результаты скорости прироста биомассы были на моделях с внесением ОСВ в почву в соотношении 1:3, где LAI > 30 % на всех типах слоев.

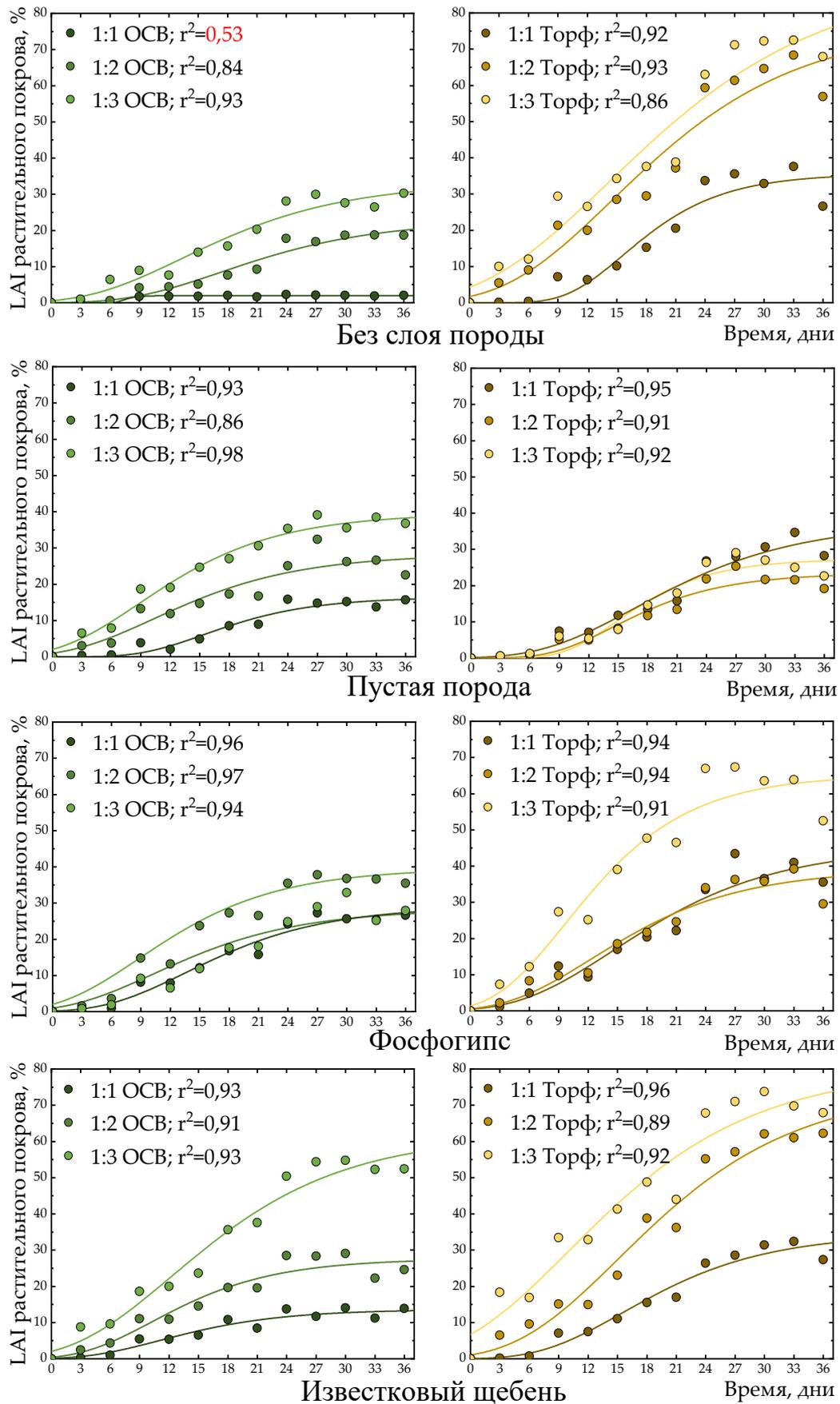


Рисунок 4.9 – Графическое представление результатов развития растительного покрова

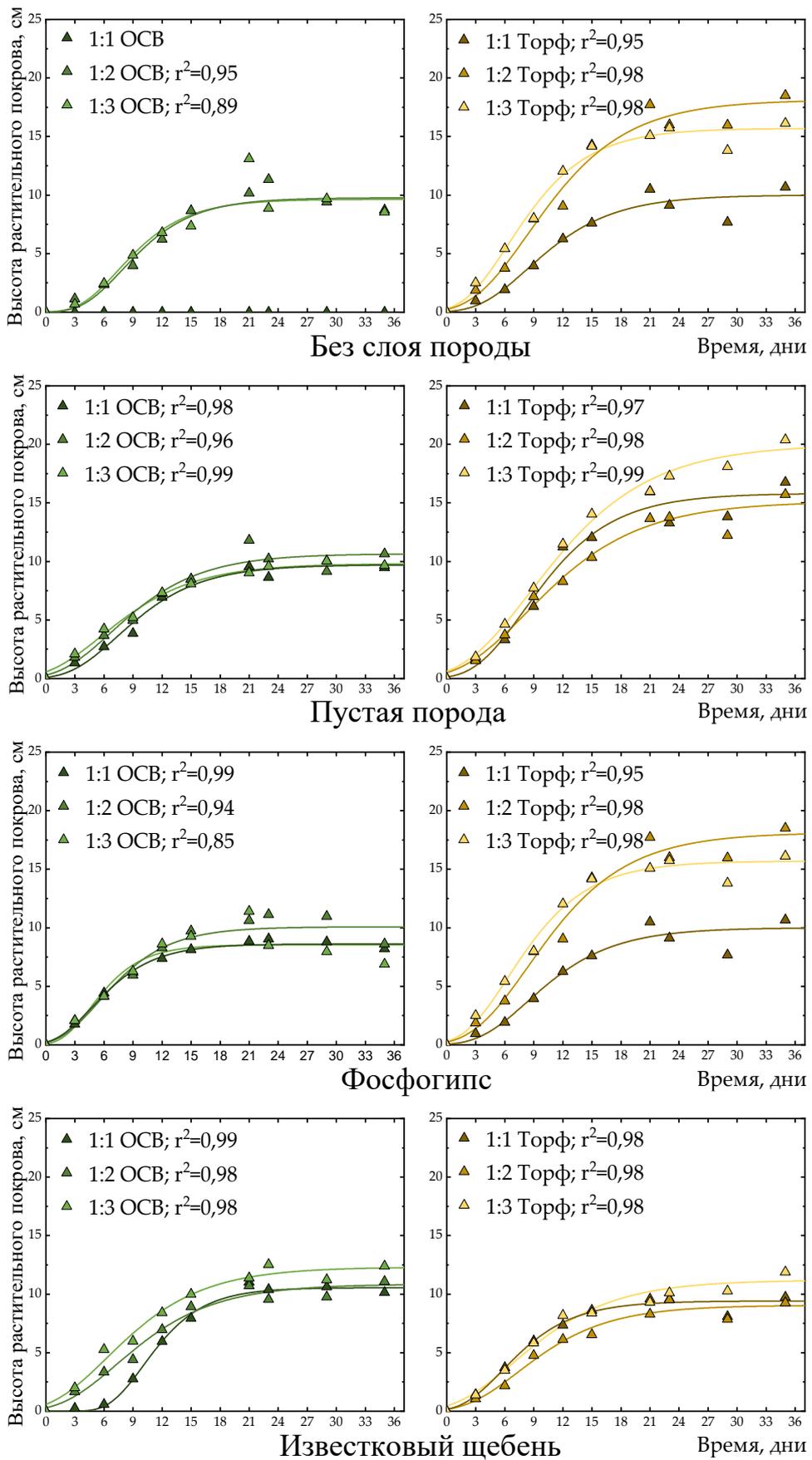


Рисунок 4.10 – Графическое представление результатов роста растительного покрова

Анализ недельного прироста высоты растительного покрова подтвердил результаты увеличения биомассы. Измерения высоты травяного покрова на почвах с внесенным ОСВ показали, что полученная максимальная высота (~10 см) была меньших значений, чем на почвах с торфосмесью (10–15 см). Результаты значений высоты растительного покрова, выращенного на смеси почвы и ОСВ, показали одинаковые результаты на всех типах рекультивируемых слоев отвальных пород.

Что касается количества внесения, то соотношение 1:1 не применимо ни к торфосмеси, ни к ОСВ, в качестве мелиорантов, так как отмечено снижение роста растений и уменьшение общей продуктивности биомассы растительного покрова. Эти результаты можно также объяснить высокой степенью легкости почвы, то есть малой плотностью почвенного субстрата, неприемлемой для эффективного формирования травяного растительного покрова, или повышением фитотоксичности почвенного слоя, что в целом оказывает угнетающее действие на рост растений. Подобные результаты исследований уже были отмечены при избыточном добавлении осадков городских сточных вод [88; 89]

Тем не менее, на основании полученных функций роста растительного покрова, в виде сигмовидных функций Гомперца и их коэффициентов корреляции можно сделать вывод, что рост и развитие растительного покрова на сформированных моделях почв с внесенными органическими мелиорантами шло без отклонений и в пределах стандартной скорости роста ($r^2 = 0,84-0,98$).

Также необходимо отметить, что ни на одной из исследованных моделей визуальных индикаторов фитотоксического действия от внесенных мелиорантов не выявлено – отсутствуют признаки хлороза, некроза и других поражений растений.

Выводы по результатам оценки экологической безопасности осадка сточных вод

На основании полученных функций роста травяного покрова в виде сигмовидных функций Гомперца и их коэффициентов корреляции можно сделать вывод, что развитие растительного покрова на сформированных моделях шло без отклонений и в пределах стандартной скорости роста ($r^2 = 0,85-0,99$), исключая модель № 5, что подтверждает экологическую безопасность предлагаемого нетрадиционного мелиоранта – осадка сточных вод ЦБК.

4.3 Выводы по Главе 4

Результаты оценки применимости предлагаемого нетрадиционного мелиоранта, полученные в ходе эксперимента по воздействию на ранние стадии развития растений, а также на рост травянистых растений в течение всего вегетационного периода позволили установить оптимальные диапазоны доз внесения мелиоранта.

1. Методом оценки воздействия мелиоранта на ранние стадии развития растений (фитотестированием) был определен мелиорационный потенциал и доказана экологическая безопасность предлагаемого нетрадиционного мелиоранта – осадка сточных вод ЦБК. Результаты анализа всхожести семян подтвердили, что рациональное применение предлагаемого нетрадиционного мелиоранта не оказывает острого фитотоксичного воздействия, поскольку при внесении осадка сточных вод ЦБК в дозировке 20-60 % к почве не проявлялось токсичного воздействия на всхожесть семян, что доказывает экологическую безопасность применения ОСВ ЦБК.

2. Результаты анализа роста корней и ростков растений определили и доказали мелиорационный потенциал от внесенного ОСВ в диапазоне доз от 10 до 40 % к почве.

Фитотестирование с определением токсичности на ранних стадиях развития растений отражает исключительно острую реакцию растений и идентифицирует высокую токсичность почвенных субстратов или критические нарушения почвенных режимов. В связи с этим, также была проведена оценка хронического воздействия на растительный покров в течение всего вегетационного периода. Оценка воздействия мелиоранта на формирование растительного покрова проводилась путем анализа роста и развития травянистых растений на моделях почвенно-грунтовых горизонтов.

В результате анализа всхожести, прироста биомассы и удельного линейного роста растительного покрова был определен мелиорационный потенциал ОСВ ЦБК. Статистическая обработка данных с оценкой нормы (или отклонения) роста

и развития растительного покрова позволила доказать экологическую безопасность ОСВ ЦБК.

3. На основе полученных результатов анализа усредненного недельного прироста биомассы установлено, что почвенные модели с внесенными органическими мелиорантами в дозировке 1:3 улучшают прирост биомассы, как при использовании торфосмеси, так и при применении нетрадиционного мелиоранта – ОСВ ЦБК. Статистическая обработка полученных результатов подтвердила, что ОСВ и торфосмесь при внесении в почву 1:3 улучшают прирост биомассы по сравнению с контрольными почвенными моделями (без внесения почвенных добавок). Таким образом, по результатам анализа усредненного недельного прироста биомассы можно утверждать, что ОСВ при внесении 1:3 к почве обладает мелиорационным потенциалом.

4. Оценка экологической безопасности проводилась через анализ роста и развития растений с расчетом отклонений от норм. Для анализа роста и развития растений на основе полученных экспериментальных данных были использованы нелинейные регрессионные математические модели описания роста продуктивности растений по временным отметкам. Высокие результаты прироста биомассы и нормального роста растительного покрова наблюдались при внесении в почву торфосмеси в соотношениях 1:3 и 1:2 и при внесении ОСВ 1:3, что подтверждает ранее полученные результаты всхожести семян и приросту биомассы.

5. На основе полученных данных измерения роста травяного покрова путем математического моделирования кинетики роста в виде сигмовидных функций Гомперца и их коэффициентов корреляции можно сделать вывод, что развитие растительного покрова на сформированных моделях шло без отклонений и в пределах стандартной скорости роста ($r^2 = 0,85-0,99$), что подтверждает экологическую безопасность предлагаемого нетрадиционного мелиоранта – осадка сточных вод ЦБК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – экологически эффективное восстановление почвенно-растительного комплекса на территориях, нарушенных при разработке месторождений твёрдых полезных ископаемых с использованием нетрадиционных мелиорантов.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Для экологически эффективного восстановления почвенно-растительного покрова на отвалах горной массы необходимо проведение работ по внесению органических мелиорантов в почвенный слой, что было подтверждено в результате анализа и систематизации техногенно нарушенных территорий горнодобывающей промышленности, составленной классификации видов мелиорантов, применимых для рекультивации.

2. ОСВ ЦБК обладает следующими характеристиками: повышенной влагоемкостью, высоким содержанием органического вещества, фосфора, азота и рядом микроэлементов, в частности, $Ca \sim 7\%$, $Fe \sim 16,5\%$, необходимых растениям, что свидетельствует о мелиорационном потенциале осадка для рекультивации нарушенных земель, кроме того, осадок нетоксичен, так как содержит тяжелые металлы в пределах нормы в соответствии с требованиями ГОСТ, что было подтверждено результатами лабораторных исследований.

3. Осадки сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности относятся к нетрадиционным органическим мелиорантами с пролонгированным эффектом воздействия ввиду повышенного содержания органического вещества – $> 90\%$ и высокого соотношения углерода к азоту ($C:N > 30$), что было доказано теоретическими и лабораторными исследованиями.

4. Разработанный и предложенный адаптированный косвенный метод анализа биомассы растительного покрова с использованием цифровой обработки данных – RGB-снимков (DIA) и индексом листовой поверхности (LAI) для комплексной оценки условий почвенно-мелиоративного слоя позволяет получать

данные о росте и развитии растительного покрова в динамике и без разрушения растительного материала.

5. ОСВ при внесении в почву 20-60 % обладает мелиорационным потенциалом и является экологически безопасным, поскольку выявлена стимуляция роста растений и отсутствие острого фитотоксичного воздействия, что было доказано результатами экспериментальных исследований оценки воздействия на ранние стадии развития растений (фитотестирование).

6. Внесение осадка сточных вод ЦБК в соотношении 1:3 к почве обладает долговременным мелиорационным потенциалом и не вызывает хронического фитотоксичного воздействия, что было доказано экспериментальными исследованиями по оценке роста и развития растений в течение всего вегетационного периода, где было отмечено улучшение всхожести и значительный прирост биомассы, а также отсутствовали нарушения в росте и развитии растительного покрова.

7. Предложенный нетрадиционный мелиорант – ОСВ ЦБП при внесении 90 т/га (при влажности осадка 70-80%) результативен для экологически эффективного восстановления почвенно-растительного комплекса на территориях, нарушенных при разработке месторождений твёрдых полезных ископаемых. Внесение в почву возможно в сухом измельченном [42] или гранулированном виде (приложение В).

8. Также на основе результатов диссертационной работы было определено, что особо актуально развитие направления исследований в области создания рекультивационных слоев с учетом локальных природно-климатических условий для создания подобия антропогенно-генетических горизонтов почво-грунтов, где нижние горизонты представляют собой отвальные породы и их измельченный слой, средние горизонты переходные слои, а верхние – грунтово-почвенные с внесением нетрадиционных органических мелиорантов и частичном добавлении отвальных пород, для формирования более устойчивой антропогенно-природной экосистемы, способной к самовосстановлению без образования эоклинов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альберг, Н.И. Проблемы перехода к устойчивому развитию угледобывающей отрасли / Н. И. Альберг // Стратегия устойчивого развития регионов России. – 2010. – № 10. – С. 112-116.
2. Андроханов, В.А. Принципы эффективного использования и сохранения георесурсов при разработке месторождений полезных ископаемых / В.А. Андроханов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – Вып. 9. – № 12. – С. 223-229.
3. Андроханов, В.А. Сингенез почвенно-генетических и биологических процессов в техногенных ландшафтах Кузбасса / Андроханов В.А. // Вестник Томского государственного университета. Приложение №7. Комплексные экологические исследования ландшафтов Сибири. – Томск, 2003. – С. 16-22.
4. Барановский, И.Н. Удобрительные смеси с участием осадков сточных вод на дерново-подзолистых почвах / И.Н. Барановский, Е.А. Подолян // Молочнохозяйственный вестник. – 2017. – Т. 3. – № 27. – С. 16-25.
5. Белюченко, И.С. Агрегатный состав сложных компостов / И.С. Белюченко // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 93. – С. 812-830.
6. Буланова, А.В. Исследование сорбционных свойств сорбентов, применяемых для очистки почв от нефтяных загрязнений / А.В. Буланова, И.В. Грецкова, О.В. Муратова // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. – 2005. – Т. 3. – № 37. – С. 150-158.
7. Бурмистрова, Т.И. Биодеградация нефти и нефтепродуктов в почве с использованием мелиорантов на основе активированного торфа / Т.И. Бурмистрова, Т.П. Алексеева, В.Д. Перфильева [et al.] // Химия растительного сырья. – 2003. – № 3. – С. 69-72.
8. Бухонова, Г.А. Анализ подходов определения термина санации природно-техногенных геосистем карьеров / Г.А. Бухонова, Л.А. Межова // Астраханский Вестник Экологического Образования. – 2020. – №4 (58). – С. 123-128.
9. Васильев, С.Б. Теоретические и практические аспекты рекультивации техногенных ландшафтов / С.Б. Васильев, А.Р. Родин // Лесной вестник. – 2016. – Т. 20. – № 1. – С. 118-122.
10. Везенцев, А.И. Сорбционная очистка почв от тяжелых металлов / А.И. Везенцев, М.А. Трубицын, Л.Ф. Голдовская Перистая, Н.А. Воловичева // Научные ведомости БелГУ. Серия: Естественные науки. – 2008. – № 3(43). – С. 172—175.
11. Гаврилов, С.В. Адсорбционные свойства торфа и продуктов его переработки / С.В. Гаврилов, З.А. Канарская // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 2. – С. 422-427.
12. Гагарина, Э.И. Об использовании агроруд для улучшения свойств почв / Э.И. Гагарина, Е.В. Абакумов // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2003. – Т. 3. – № 1. – С. 91-97.

13. Гальперин, А.М. Комплексный подход к экологически безопасному освоению техногенных массивов / А.М. Гальперин, Ю.В. Кириченко, Ю.И. Кутепов // Горная Промышленность. – 2011.– № 5 (99). – С. 1-5.

14. ГОСТ 17.5.1.03-86. Охрана природы. Земли. Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель = Nature protection. lands. classification of overburden and enclosing rocks for biological recultivation of lands: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 10 ноября 1986 г. N 3400: введен взамен ГОСТ 17.5.1.03-78 : дата введения 1988-01-01 / подготовлен Государственным агропромышленным комитетом СССР. – Москва: 2017. – 1-6 с.

15. ГОСТ 17.5.3.05-84 Охрана природы (ССОП). Рекультивация земель. Общие требования к землеванию = Nature protection. Land reclamation. General requirements for lands to be backfilled : межгосударственный стандарт : издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 27.03.84 N 1020: переиздание : дата введения 1985-01-01 / подготовлен Министерством сельского хозяйства СССР. - 1-4 с.

16. ГОСТ Р 59057-2020 Охрана окружающей среды. Земли. Общие требования по рекультивации нарушенных земель = Environmental protection. Lands. General requirements for reclamation of disturbed land : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 сентября 2020 г. N 709-ст: введен впервые: дата введения 1 апреля 2021 г. : разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 409 «Охрана окружающей природной среды» совместно с Федеральным государственным унитарным предприятием «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия». – Москва : Стандартинформ, 2020. - 1-24 с.

17. ГОСТ Р 59060-2020 Охрана окружающей среды. Земли. Классификация нарушенных земель в целях рекультивации = Nature protection. Lands. Classification of disturbed lands for the purpose of reclamation : национальный стандарт Российской Федерации издание официальное : утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 сентября 2020 г. N 712-ст: введен впервые: дата введения 1 апреля 2021 г. : разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 409 «Охрана окружающей природной среды» совместно с Федеральным государственным унитарным предприятием «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия». – Москва : Стандартинформ, 2020. - 1-20 с.

18. ГОСТ Р 59070-2020 Охрана окружающей среды. Рекультивация нарушенных и нефтезагрязненных земель. Термины и определения = Environmental protection. Reclamation of disturbed and oil-contaminated lands. Terms and definitions : национальный стандарт Российской Федерации издание официальное : утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 01 октября 2020 г. N 731-ст: введен впервые: дата введения 1 апреля 2021 г. : разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 409 «Охрана окружающей природной среды» совместно с Федеральным государственным унитарным предприятием «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия». – Москва: Стандартиформ, 2020. - 1-16 с.
19. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». - М.: Минприроды России; НПП «Кадастр». – 2019. – 884 с.
20. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году». — М.: Минприроды России; МГУ имени М.В.Ломоносова, 2021. – 864 с.
21. Ежкова, М.С. Влияние местных агроминералов (фосфоритов, глауконитов и цеолитов) на агрохимические свойства выщелоченного чернозема при возделывании яровой пшеницы / М.С. Ежкова, Л. М.-Х. Биккинина, В.О. Ежков // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 20. – С. 148-151.
22. Етеревская, Л.В. Систематика и классификация техногенных почв / Л.В. Етеревская, М.Т. Донченко, Л.В. Лехциер // Растения и промышленная среда. – 1984. – Вып. 10. – С. 14-21.
23. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 N 136-ФЗ (ред. от 16.02.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022) // Собрание законодательства РФ, 29.10.2001, N 44, ст. 4147.
24. Каздым, А.А. Техногенные отложения и культурный слой - к вопросу о систематике и классификации / А.А. Каздым // Минералогия техногенеза. – 2007. – Т. 8. – С. 224-254.
25. Калыбеков, Т. Изучение интенсификации почвообразовательных процессов при рекультивации поверхности отвалов / Т. Калыбеков, С.В. Турсбеков, Ы. Жакыпбек [et al.] // Вестник КРСУ. – 2019. – Т. 19. – № 4. – С. 93-98.
26. Капелькина, Л.П. Использование отходов в качестве мелиорантов почв и удобрений / Л.П. Капелькина // Экология и промышленность России. – 2006. – № 4. – С. 4-7.
27. Кирейчева, Л.В. Природные сорбенты для детоксикации загрязненных почв / Л.В. Кирейчева, И.В. Глазунова // Плодородие. – 2008. – Т. 6. – С. 44-46.
28. Кожевников, Н.В. Проблема хранения плодородного слоя почвы в горнодобывающей отрасли промышленности / Н.В. Кожевников, А.В. Заушинцева // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2015. – № 1-4 (61). – С. 10-14.

29. Колесников, Б.П. Рекультивация промышленных отвалов / Б.П. Колесников // Человек и среда обитания. Л. – 1974. – С. 220-232.
30. Колесников, Б.П. К вопросу о классификации промышленных отвалов, как компонентов техногенных ландшафтов / Б.П. Колесников, Г.М. Пикалова // Растения и промышленная среда. – 1974. – Вып. 3. – С. 3-28.
31. Копцик, Г.Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) / Г.Н. Копцик // Почвоведение. – 2014. – № 7. – С. 851-868.
32. Копцквa, Е.М. Первичные сукцессии растительности и почв на карьерах в подзоне северной тайги (на территории Ухтинского и Сосногорского районов Республики Коми) / Е.М. Копцквa, Е.В. Абакумов // Biological Communications. – 2013. – Вып. 1. – С. 28-44.
33. Костенков, Н.М. Посттехногенное почвообразование на отвальных породах как фактор восстановления природных ландшафтов / Н.М. Костенков, Л.Н. Пуртова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12. – № 1-4. – С. 1032-1038.
34. Левандовская, Т.В. Агрoхимические свойства отходов очистных сооружений Соломбальского и Архангельского ЦБК / Т.В. Левандовская, А.В. Чупакова // Arctic Environmental Research. – 2005. – № 2. – С. 112-115.
35. Литвинович, А.В. История известкования почв / А.В. Литвинович // Агрофизика. – 2014. – № 2(14). – С. 45-52.
36. Межевова, А.С. Нетрадиционные природные и техногенные удобрения-мелиоранты и их возможности / А.С. Межевова // Вестник аграрной науки Дона. – 2016. – № 4(36).
37. Месяц, С.П. Современный взгляд на рекультивацию породных отвалов горнодобывающей отрасли / С.П. Месяц, Е.Ю. Волкова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 56 – С. 467-478.
38. Месяц, С.П. Средообразующая роль биоты и горной породы при восстановлении техногенных ландшафтов / С.П. Месяц, Н.С. Румянцева, Е.Ю. Волкова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 56. – С. 479-490.
39. Мосейкин, В.В. Анализ ситуации с горнопромышленными отходами (геоэкологические аспекты) / В.В. Мосейкин, А.М. Гальперин, В.А. Ермолов, В.С. Круполеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – №. 1. – С. 7-23.
40. Осипов, А.И. Известьесодержащие отходы промышленности и их использование для химической мелиорации / А.И. Осипов // Здоровье - основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2018. – Т. 13. – № 2. – С. 981-988.

41. Петин, А.Н. Проблемы рекультивации земель, нарушенных горнодобывающим комплексом: российский и зарубежный опыт / А.Н. Петин, О.С. Толстопятова, М.А. Петина // SCIENCES OF EUROPE. – 2017. – Vol. 13. – № 13. – С. 28-31.
42. Патент № 2736648 С1 Российская Федерация, МПК С09К 17/00, В09С 1/00, С02F 3/02. Способ получения органического мелиоранта : № 2020125164 : заявл. 29.07.2020 : опубл. 19.11.2020 / М. А. Пашкевич, Т. А. Петрова, Ю. Д. Смирнов, Э. Рудзиш ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 9 с. : 1 ил.
43. Петин, А. Н. Проблемы рекультивации земель, нарушенных горнодобывающим комплексом: российский и зарубежный опыт / А. Н. Петин, О. С. Толстопятова, М. А. Петина // SCIENCES OF EUROPE. – 2017. – Vol. 13. – № 13. – Р. 28-31.
44. Петрова, Т.А. Виды мелиорантов для рекультивации техногенно нарушенных территорий горной промышленности / Т.А. Петрова, Э. Рудзиш // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4. – С. 100-112.
45. Петрова, Т.А. Метод оценки эффективности мелиорантов при рекультивации нарушенных земель / Т.А. Петрова, Э. Рудзиш // Вестник Евразийской науки. – 2021. – Vol. 13. – № 6. – С. 1-12.
46. Полохин, О.В. Гумусное состояние молодых почв техногенных ландшафтов / О.В. Полохин // Вестник Красноярского Государственного Аграрного Университета. – 2010. – № 10. – С. 40-44.
47. Постановление Правительства РФ от 10.07.2018г. в ред. от 07.03.2019г. N 800 “О проведении рекультивации и консервации земель.”
48. Пындак, В.И. Природные мелиоранты на основе кремнезёмов и глинозёмов / В.И. Пындак, А.Е. Новиков // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2015. – № 2(38). – С. 73-76.
49. Романов, Е.М. Мелиорация почв лесных питомников с применением нетрадиционных органических удобрений / Е.М. Романов, Д.И. Мухортов, Т.В. Нуреева // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2013. – № (2)18. – С. 59-73.
50. Саркулова, Ж. Почвенно-экологическая оценка состояния рекультивированных земель на юге и востоке Казахстана // Ж. Саркулова, Ф.Е. Козыбаева, Г.Б. Бейсеева, Г.А. Сапаров, Н.Ж. Ажикина, - Алматы.: «Жания -Полиграф». 2017. - 224 с.
51. Семенов, В.М. Функции углерода в минерализационно-иммобилизационном обороте азота в почве / В.М. Семенов // Агрохимия. – 2020. – № 6. – С. 78-96.

52. Середина, В.П. Экологические аспекты биологической рекультивации почв техногенных экосистем Кузбасса / В.П. Середина, В.А. Андроханов, Л.Н. Сысоева [et al.] // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2008. – № 2 (3). – С. 61-72.
53. Сивкова, Д.М. Нетрадиционные известковые мелиоранты / Д.М. Сивкова, Е.В. Калинина // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2018. – Т. 1. – С. 96-99.
54. Спобалакай, Г.Т. Способы мелиорации орошаемых солонцовых почв / Г.Т. Спобалакай, Л.М. Докучаева, Р.Е. Юркова [и др.] // Научный обзор. Новочеркасск: ФГНУ «РосНИИПМ. – 2011. – 73 с.
55. Тагаева, Т.О. Проблема накопления отходов в отраслях добывающей промышленности РФ / Т.О. Тагаева, В.М. Гильмундинов, Л.К. Казанцева // Всероссийский экономический журнал ЭКО. – 2019. – № 9(543). – С. 117-131.
56. Умер, М.И. Микробиологическая активность на поверхности и внутри почвенных агрегатов / М.И. Умер, А.А. Ванькова // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 6. – С. 78-83.
57. Федеральная служба государственной регистрации кадастра и картографии. Москва. Государственный (национальный) доклад “О состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2017 году” / Федеральная служба государственной регистрации кадастра и картографии. Москва. – 2018.
58. Федеральная служба государственной регистрации кадастра и картографии. Москва. Государственный (национальный) доклад “О состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2018 году” / Федеральная служба государственной регистрации кадастра и картографии. Москва. – 2019.
59. Федеральная служба государственной регистрации кадастра и картографии. Москва. Государственный (национальный) доклад “О состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2019 году” / Федеральная служба государственной регистрации кадастра и картографии. Москва. – 2020.
60. Федеральная служба государственной регистрации кадастра и картографии. Москва. Государственный (национальный) доклад “О состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2020 году” / Федеральная служба государственной регистрации кадастра и картографии. Москва. – 2021.
61. Харкевич, Л.П. Влияние осадков сточных вод и известкования на урожай и качество сена многолетних трав / Л.П. Харкевич // Агрехимический вестник. – 2011. – № 3. – С. 12-13.
62. Чибрик, Т.С. Исследования по проблеме биологической рекультивации нарушенных земель в Уральском университете. К 100-летию со дня рождения В.В. Тарчевского /

Т.С. Чибрик // Известия Уральского государственного горного университета. – 2005. – №. 37. – С. 92-100.

63. Чибрик, Т.С. Основы биологической рекультивации. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, / Т.С. Чибрик. – 2002. – 172 С.

64. Abbas, A.M. Capability of the Invasive Tree *Prosopis Glandulosa* Torr. To Remediate Soil Treated With Sewage Sludge / A.M. Abbas, S.K. Abd-Elmabod, S.M. El-Ashry [et al.] // Sustainability (Switzerland). – 2019. – Vol. 11. – № 9. – P. 1-13.

65. Ai, Y.J. Combined Effects of Green Manure Returning and Addition of Sewage Sludge Compost on Plant Growth and Microorganism Communities in Gold Tailings / Y.J. Ai, F.P. Li, H.H. Gu [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – Vol. 27. – № 25. – P. 31686-31698.

66. Alayu, E. Brewery Sludge Quality, Agronomic Importance and its Short-Term Residual Effect on Soil Properties / E. Alayu, S. Leta // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2020. – Vol. 17. – № 4. – P. 2337-2348.

67. Alekseenko, A.V. Assessment and Abatement of the Eco-Risk Caused by Mine Spoils in the Dry Subtropical Climate / A.V. Alekseenko, C. Drebenstedt, J. Bech // Environmental Geochemistry and Health. – 2021. – Vol. 44. – P. 1581-1603.

68. Alekseenko, V.A. Metallisation and Environmental Management of Mining Site Soils / V.A. Alekseenko, M.A. Pashkevich, A.V. Alekseenko // Journal of Geochemical Exploration. – 2017. – Vol. 174. – P. 121-127.

69. Angst, G. Fast Accrual of C and N in Soil Organic Matter Fractions Following Post-Mining Reclamation across the USA / G. Angst, C.W. Mueller, Š. Angst [et al.] // Journal of Environmental Management. – 2018. – Vol. 209. – P. 216-226.

70. Antonelli, P.M. Long Term Carbon Sequestration Potential of Biosolids-Amended Copper and Molybdenum Mine Tailings Following Mine Site Reclamation / P.M. Antonelli, L.H. Fraser, W.C. Gardner [et al.] // Ecological Engineering. – 2018. – Vol. 117. – № September 2017. – P. 38-49.

71. Antonkiewicz, J. A Mixture of Cellulose Production Waste with Municipal Sewage as New Material for an Ecological Management of Wastes / J. Antonkiewicz, A. Baran, R. Peřka [et al.] // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2019. – Vol. 169. – № August 2018. – P. 607-614.

72. Archontoulis, S.V. Nonlinear Regression Models and Applications in Agricultural Research / S.V. Archontoulis, F.E. Miguez // Agronomy Journal. – 2015. – Vol. 107. – № 2. – P. 786-798.

73. Artico, M. Integrated Use of Sewage Sludge and Basalt Mine Environmental Restoration / M. Artico, B. A. Firpo, L.L. Artico, R.M.C. Tubino // Revista Escola de Minas. – 2020. – Vol. 73. – № 2. – P. 225-232.

74. Asemaninejad, A. Blended Pulp Mill, Forest Humus and Mine Residual Material Technosols for Mine Reclamation: A Growth-Chamber Study to Explore the Role of Physiochemical Properties of Substrates and Microbial Inoculation on Plant Growth / A. Asemaninejad, J. Arteaga, G. Spiers [et al.] // *Journal of Environmental Management*. – 2018. – Vol. 228. – № April. – P. 93-102.
75. Beckinghausen, A. Post-Pyrolysis Treatments of Biochars from Sewage Sludge and A. Mearnsii for Ammonia (NH₄-n) Recovery / A. Beckinghausen, J. Reynders, R. Merckel [et al.] // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 271. – 115212. – P. 1-8.
76. Pashkevich, M.A. Biogeochemical Assessment of Soils and Plants in Industrial, Residential and Recreational Areas of Saint Petersburg / M.A. Pashkevich, J. Bech, V.A. Matveeva, A.V. Alekseenko // *Journal of Mining Institute*. – 2020. – Vol. 241. – № 1. – P. 125-130.
77. Bıyıklı, M. Effects of Food Industry Wastewater Treatment Sludge on Corn Plant Development and Soil Properties / M. Bıyıklı, S. Dorak, B. Bülent Aşık // *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2020. – Vol. 29. – № 4. – P. 2565-2578.
78. Bourioug, M. Sewage Sludge Fertilization in Larch Seedlings: Effects on Trace Metal Accumulation and Growth Performance / M. Bourioug, L. Alaoui-Sehmer, X. Laffray [et al.] // *Ecological Engineering*. – 2015. – Vol. 77. – P. 216-224. / M. Bourioug, L. Alaoui-Sehmer, X. Laffray [et al.] // *Ecological Engineering*. – 2015. – Vol. 77. – P. 216-224.
79. Bumgarner, N.R. Digital Image Analysis to Supplement Direct Measures of Lettuce Biomass / N.R. Bumgarner, W.S. Miller, M.D. Kleinhenz // *HortTechnology*. – 2012. – Vol. 22. – № 4. – P. 547-555.
80. Burducea, M. Effects of Sewage Sludge Amendments on the Growth and Physiology of Sweet Basil / M. Burducea, A. Lobiuc, M. Asandulesa [et al.] // *Agronomy*. – 2019. – Vol. 9. – № 9. – P. 1-11.
81. Carabassa, V. Soil Restoration Using Compost-Like-Outputs and Digestates from Non-Source-Separated Urban Waste as Organic Amendments: Limitations and Opportunities / V. Carabassa, X. Domene, J.M. Alcañiz // *Journal of Environmental Management*. – 2020. – Vol. 255. – 109909. – P. 1-11.
82. Carabassa, V. Sewage Sludge as an Organic Amendment for Quarry Restoration: Effects on Soil and Vegetation / V. Carabassa, O. Ortiz, J.M. Alcañiz // *Land Degradation and Development*. – 2018. – Vol. 29. – № 8. – P. 2568-2574.
83. Chantigny, M.H. Decomposition of De-Inking Paper Sludge in Agricultural Soils as Characterized by Carbohydrate Analysis / M.H. Chantigny, D.A. Angers, C.J. Beauchamp // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2000. – Vol. 32. – № 11-12. – P. 1561-1570.

84. Chianucci, F. Estimation of Ground Canopy Cover in Agricultural Crops Using Downward-Looking Photography / F. Chianucci, A. Lucibelli, M.T. Dell'Abate // *Biosystems Engineering*. – 2018. – Vol. 169. – P. 209-216.
85. Chow, T.L. Effects of Pulp Fibre on Soil Physical Properties and Soil Erosion under Simulated Rainfall / T.L. Chow, H.W. Rees, S.H. Fahmy, J.O. Monteith // *Canadian Journal of Soil Science*. – 2003. – Vol. 83. – № 1. – P. 109-119.
86. Chu, L. Toxic Metals in Soil Due to the Land Application of Sewage Sludge in China: Spatiotemporal Variations and Influencing Factors / L. Chu, W. He // *Science of the Total Environment*. – 2020. – № 143813. – P. 1-10.
87. Corral-Fernández, R. Corral-Fernández R. Stratification ratio of soil organic C, N and C: N in Mediterranean evergreen oak woodland with conventional and organic tillage / R. Corral-Fernández, L. Parras-Alcántara, B. Lozano-García // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. – 2013. – Vol. 164. – P. 252-259.
88. Corrêa, R.S. Vegetation Cover Development Resulting from Different Restoration Approaches of Exploited Mines / R.S. Corrêa, A.P. do C. Balduino, C.T.V. Teza, G.M. de M. Baptista // *Floresta e Ambiente*. – 2018. – Vol. 25. – № 4. – e20171116 – P. 1-9.
89. Curci, M. Short-Term Effects of Sewage Sludge Compost Amendment on Semiarid Soil / M. Curci, A. Lavecchia, G. Cucci [et al.] // *Soil Systems*. – 2020. – Vol. 4. – № 3. – P. 1-18.
90. Dazzi, C. Anthropogenic Soils: General Aspects and Features / C. Dazzi, G.Lo Papa // *Ecocycles*. – 2015. – Vol. 1. – № 1. – P. 3-8.
91. Delgado, M. Valorization of Sludge from the Quartz Industry as Soil Amendment and Crop Production / M. Delgado, F.J. Maeso, J.V. Martín [et al.] // *Soil and Tillage Research*. – 2019. – Vol. 194. – 104320. – P. 1-7.
92. Delibacak, S. Use of Sewage Sludge in Agricultural Soils: Useful or Harmful / S. Delibacak, L. Voronina, E. Morachevskaya, A.R. Ongun // *Eurasian Journal of Soil Science*. – 2020. – Vol. 9. – № 2. – P. 126-139.
93. Dietrich, S. T. Building a Better Soil for Upland Surface Mine Reclamation in Northern Alberta: Admixing Peat, Subsoil and Peat Biochar in a Greenhouse Study with Aspen / S.T. Dietrich, M.D. MacKenzie, J.P. Battigelli, J.R. Enterina // *Canadian Journal of Soil Science*. – 2017. – Vol. 97. – № 4. – P. CJSS-2017-0021.
94. Vasilyeva, M. Effect of Magnetic Fields and Fertilizers on Grass and Onion Growth on Technogenic Soils / M. Vasilyeva, S. Kovshov, J. Zambrano, M. Zhemchuzhnikov // *Journal of Water and Land Development*. – 2021. – Vol. 49. – P. 55-62.
95. Eid, E.M. Sewage Sludge Application Enhances the Growth of *Corchorus olitorius* Plants and Provides a Sustainable Practice for Nutrient Recirculation in Agricultural Soils / E.M. Eid,

A.A. Hussain, M.A. Taher [et al.] // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. – 2020. – Vol. 20. – № 1. – P. 149-159.

96. Eid, E.M. The Evaluation of Sewage Sludge Application as a Fertilizer for Broad Bean (*Faba Sativa* Bernh.) Crops / E.M. Eid, S.A. Alrumman, A.F. El-Bebany [et al.] // *Food and Energy Security*. – 2018. – Vol. 7. – № 3. – P. 1-13.

97. Elsayed, S. Passive Reflectance Sensing and Digital Image Analysis Allows for Assessing the Biomass and Nitrogen Status of Wheat in Early and Late Tillering Stages / S. Elsayed, G. Barmeier, U. Schmidhalter. – 2018. – Vol. 9. – № October. – P. 1-15.

98. Evskaya, M.A. Environmental and Business Challenges Presented by Mining and Mineral Processing Waste in the Russian Federation / M.A. Nevskaya, S.G. Seleznev, V.A. Masloboev [et al.] // *Minerals*. – 2019. – Vol. 9. – № 7. – P. 445.

99. FAO. World Reference Base for Soil Resources 2014. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps / FAO. – 2014. – 1-191 p.

100. Gallardo, F. Use of Sludge from Kraft Mill Wastewater Treatment as Improver of Volcanic Soils: Effect on Soil Biological Parameters / F. Gallardo, C. Bravo, G. Briceño, M.C. Diez // *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutricion Vegetal*. – 2010. – Vol. 10. – № 1. – P. 48-61.

101. Gée, C. Evaluation of Weed Impact on Wheat Biomass by Combining Visible Imagery with a Plant Growth Model: Towards New Non-Destructive Indicators for Weed Competition / C. Gée, E. Denimal, J. Merienne, A. Larmure // *Precision Agriculture*. – 2021. – Vol. 22. – № 2. – P. 550-568.

102. Gendler, S.G. Evaluation Principles of the Dust Influence of Mining Enterprises on the Environment / S.G. Gendler, M.L. Rudakov, V.S. Kuznetsov // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. – 2019. – Vol. 56. – № 3. – P. 62-69.

103. Ghouti, M.A.Al. Potential Benefits and Risk Assessments of Using Sewage Sludge on Soil and Plants: a Review / M.A. Al Ghouti, M. Ali, T. Ahmed // *International Journal of Environment and Waste Management*. – 2019. – Vol. 23. – № 4. – P. 352.

104. Grigatti, M. Organic Wastes as Alternative Sources of Phosphorus for Plant Nutrition in a Calcareous Soil / M. Grigatti, E. Boanini, D. Bolzonella [et al.] // *Waste Management*. – 2019. – Vol. 93. – P. 34-46.

105. Gupta, S. Das. Effects of Stockpiling and Organic Matter Addition on Nutrient Bioavailability in Reclamation Soils / S. Das Gupta, W. Kirby, B. D. Pinno // *Soil Science Society of America Journal*. – 2019. – Vol. 83. – № S1. – P. 1-15.

106. Hagelqvist, A. Batchwise Mesophilic Anaerobic Co-Digestion of Secondary Sludge from Pulp and Paper Industry and Municipal Sewage Sludge / A. Hagelqvist // *Waste Management*. – 2013. – Vol. 33. – № 4. – P. 820-824.

107. Halecki, W. Application of Soil Productivity Index after Eight Years of Soil Reclamation with Sewage Sludge Amendments / W. Halecki, S. Klatka // *Environmental Management*. – 2021. – P. 1-11.
108. Halecki, W. Long Term Growth of Crop Plants on Experimental Plots Created among Slag Heaps / W. Halecki, S. Klatka // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2018. – Vol. 147. – № September 2017. – P. 86-92.
109. Huang, W. The Scaling Relationships of Leaf Biomass vs. Leaf Surface Area of 12 Bamboo Species / W. Huang, X. Su, D.A. Ratkowsky [et al.] // *Global Ecology and Conservation*. – 2019. – Vol. 20. – e00793.– P. 1-10.
110. Ivanov, A.V. Investigation of Waste Properties of Subway Construction as a Potential Component of Soil Layer / A.V. Ivanov, Y.D. Smirnov, G.I. Petrov // *Journal of Ecological Engineering*. – 2018. – Vol. 19. – № 5. – P. 59-69.
111. Jeżowski, S. Establishment, Growth, and Yield Potential of the Perennial Grass *Miscanthus × Giganteus* on Degraded Coal Mine Soils / S. Jeżowski, M. Mos, S. Buckby [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. – 2017. – Vol. 8. – P. 1-8.
112. Jin, X. High-Throughput Estimation of Crop Traits: A Review of Ground and Aerial Phenotyping Platforms / X. Jin, P. J. Zarco-Tejada, U. Schmidhalter [et al.] // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. – 2021. – Vol. 9. – № 1. – P. 200-231.
113. Jordán, M.M. Bulk Density and Aggregate Stability Assays in Percolation Columns / M. M. Jordán, J. Bech, E. García-Sánchez, F. García-Orenes // *Zapiski Gornogo instituta*. – 2016. – Vol. 222. – P. 877-881.
114. Jordán, M.M. Technosols Designed for Rehabilitation of Mining Activities Using Mine Spoils and Biosolids. Ion Mobility and Correlations Using Percolation Columns / M.M. Jordán, E. García-Sánchez, M.B. Almendro-Candel [et al.] // *Catena*. – 2017. – Vol. 148. – P. 74-80.
115. Kelessidis, A. Comparative Study of the Methods Used for Treatment and Final Disposal of Sewage Sludge in European Countries / A. Kelessidis, A.S. Stasinakis // *Waste Management*. – 2012. – Vol. 32. – № 6. – P. 1186-1195.
116. Kiani, M. Recycling Lake Sediment to Agriculture: Effects on Plant Growth, Nutrient Availability, and Leaching / M. Kiani, H. Raave, A. Simojoki [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Vol. 753. – 141984. – P. 1-13.
117. Kicińska, A. Evaluating Potential for Using Municipal Sewage Sludge in the Rehabilitation of Ground Degraded by the Sodium Processing Industry / A. Kicińska, J. Gucwa, B. Kosa-Burda // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2019. – Vol. 102. – № 3. – P. 399-406.
118. Knabe, W. Methods and Results of Strip-Mine Reclamation in Germany / W. Knabe // *The Ohio Journal of Science*. – 1964. – Vol. 64. – № 2. – P. 132-157.

119. Kodešová, R. Soil Influences on Uptake and Transfer of Pharmaceuticals from Sewage Sludge Amended Soils to Spinach / R. Kodešová, A. Klement, O. Golovko [et al.] // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – Vol. 250. – № August. – 109407. – P. 1-11.
120. Koutroubas, S.D. Sunflower Growth and Yield Response to Sewage Sludge Application under Contrasting Water Availability Conditions / S.D. Koutroubas, V. Antoniadis, C.A. Damalas, S. Fotiadis // *Industrial Crops and Products*. – 2020. – Vol. 154. – 112670. – P. 1-9.
121. Kutepov, Y.I. Engineering-Geological and Ecological Concerns in Operation and Reclamation of High Slope Dumps at Open-Pit Mines in Kuzbass / Y.I. Kutepov, N.A. Kutepova, A.D. Vasileva, A.S. Mukhina // *Mining Informational and Analytical Bulletin*. – 2021. – № 8. – P. 164-178.
122. Larney, F.J. The Role of Organic Amendments in Soil Reclamation: A Review / F.J. Larney, D.A. Angers // *Canadian Journal of Soil Science*. – 2012. – Vol. 92. – № 1. – P. 19-38.
123. Lobacheva, O. Method for Removing Valuable Components from Technogenic Solutions by the Example of Rare Earth Elements / O. Lobacheva, N. Dzhevaga. – Text : electronic // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1679. – P. 1-6.
124. Louhaichi, M.A. Reliable and Non-Destructive Method for Estimating Forage Shrub Cover and Biomass in Arid Environments using Digital Vegetation Charting Technique / M. Louhaichi, S. Hassan, K. Clifton, D.E. Johnson // *Agroforestry Systems*. – 2018. – Vol. 92. – № 5. – P. 1341-1352.
125. Luo, Y. Seed Germination Test for Toxicity Evaluation of Compost: Its Roles, Problems and Prospects / Y. Luo, J. Liang, G. Zeng [et al.] // *Waste Management*. – 2018. – Vol. 71. – P. 109-114.
126. Lytaeva, T.A. Environmental Impact of the Stored Dust-Like Zinc and Iron Containing Wastes / T.A. Lytaeva, A.E. Isakov // *Journal of Ecological Engineering*. – 2017. – Vol. 18. – № 3. – P. 37-42.
127. Malnik, V.V. Diversity of microorganisms inhabiting the sludge reservoirs of the Baikal Pulp and Paper Mill / V.V. Malnik, A.N. Suturin // *Acta Biologica Sibirica*. – 2017. – Vol. 3. – № 3. – P. 32-38.
128. Marín, J. RGB Vegetation Indices, NDVI, and Biomass as Indicators to Evaluate C3 and C4 Turfgrass under Differentwater Conditions / J. Marín, S. Yousfi, P.V. Mauri [et al.] // *Sustainability (Switzerland)*. – 2020. – Vol. 12. – № 6.
129. Marinin, M.A. State-of-Art of Mine Engineering Reclamation While Developing of Steep-Dipping Ore Fields / M.A. Marinin, V. Alexandrovichsheysky // *Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences*. – 2017. – Vol. 19. – № 1. – P. 240-246.
130. Matveeva, V.A. Industrial Processing of Phosphogypsum into Organomineral Fertilizer / V.A. Matveeva, Y.D. Smirnov, D.V. Suchkov. – Text : electronic // *Environmental Geochemistry and Health 2021*. – 2021. – P. 1-14.

131. Melo, W. Ten Years of Application of Sewage Sludge on Tropical Soil. A Balance Sheet on Agricultural Crops and Environmental Quality / W. Melo, D. Delarica, A. Guedes [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2018. – Vol. 643. – P. 1493-1501.
132. Mikheeva, I.V. Soil & Tillage Research Physical Properties of Technosols at Brown Coal Mine Wastes in Eastern Siberia / I.V. Mikheeva, V.A. Androkhonov // *Soil & Tillage Research*. – 2022. – Vol. 217. – P. 105264.
133. Miller, V.S. Amendments and Substrates to Develop Anthrosoles for Northern Mine Reclamation / V.S. Miller, M.A. Naeth // *Canadian Journal of Soil Science*. – 2017. – Vol. 97. – № 2. – P. 266-277.
134. Mohamed, B. Sewage Sludge Used as Organic Manure in Moroccan Sunflower Culture: Effects on Certain Soil Properties, Growth and Yield Components / B. Mohamed, K. Mounia, A. Aziz [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2018. – Vol. 627. – P. 681-688.
135. Nash, W.L. Long-term Effects of Rock Type on Appalachian Coal Mine Soil Properties / W.L. Nash, W.L. Daniels, K.C. Haering [et al.] // *Journal of Environmental Quality*. – 2016. – Vol. 45. – № 5. – P. 1597-1606.
136. Nicolás, C. Soil Aggregation in a Semiarid soil Amended with Composted and Non-Composted Sewage Sludge-A Field Experiment / C. Nicolás, J.N. Kennedy, T. Hernández [et al.] // *Geoderma*. – 2014. – Vols. 219-220. – P. 24-31.
137. Pashkevich, M.A. Technogenic Impact of Sulphide-Containing Wastes Produced by Ore Mining and Processing at the Ozernoe Deposit: Investigation and Forecast / M.A. Pashkevich, T.A. Petrova // *Journal of Ecological Engineering*. – 2017. – Vol. 18. – № 6. – P. 127-133.
138. Pashkevich, M.A. Lignin Sludge Application for Forest Land Reclamation: Feasibility Assessment / M.A. Pashkevich, T.A. Petrova, **E. Rudzisha** // *Journal of Mining Institute*. – 2019. – Vol. 235. – № 1. – P. 106-112.
139. Pendurraga, P. Pelletized Paper Mill Waste Promotes Nutrient Input and N Mineralization in a Degraded Alfisol / P. Undurraga, J. Hirzel, J.E. Celis [et al.] // *Chilean Journal of Agricultural Research*. – 2017. – Vol. 77. – № 4. – P. 390-399.
140. Pérez, R.A. Quality Assessment of Three Industry-Derived Organic Amendments for Agricultural Use / R.A. Pérez, C. Sánchez-Brunete, B. Albero [et al.] // *Compost Science and Utilization*. – 2016. – Vol. 24. – № 3. – P. 190-202.
141. Petrova, T.A. Utilization of sewage sludge as an ameliorant for reclamation of technogenically disturbed lands / T.A. Petrova, **E. Rudzisha** // *Journal of Mining Institute*. – 2021. – Vol. 251. – P. 767-776.
142. Petrova, T.A. Rehabilitation of Disturbed Lands with Industrial Wastewater Sludge / T.A. Petrova, **E. Rudzisha**, A.V. Alekseenko [et al.] // *Minerals*. – 2022. – Vol. 12. – № 376. – P. 1-19.

143. Pöykiö, R. Characterisation of Municipal Sewage Sludge as a Soil Improver and a Fertilizer Product / R. Pöykiö, G. Watkins, O. Dahl // *Ecological Chemistry and Engineering S.* – 2019. – Vol. 26. – № 3. – P. 547-557.
144. Przydatek, G. Analysis of the Comprehensive Management of Sewage Sludge in Poland / G. Przydatek, A.K. Wota // *Journal of Material Cycles and Waste Management.* – 2020. – Vol. 22. – № 1. – P. 80-88.
145. Rasa, K. Pulp and Paper Mill Sludges Decrease Soil Erodibility / K. Rasa, T. Pennanen, K. Peltoniemi [et al.] // *Journal of Environmental Quality.* – 2021. – Vol. 50. – № 1. – P. 172-184.
146. Raheem, A. Opportunities and Challenges in Sustainable Treatment and Resource Reuse of Sewage Sludge: A Review / A. Raheem, V.S. Sikarwar, J. He [et al.] // *Chemical Engineering Journal.* – 2018. – Vol. 337. – P. 616-641.
147. Rufo, R. Using Unmanned Aerial Vehicle and Ground-Based RGB Indices to Assess Agronomic Performance of Wheat Landraces and Cultivars in a Mediterranean-Type Environment / R. Rufo, J.M. Soriano, D. Villegas [et al.] // *Remote Sensing.* – 2021. – Vol. 13. – № 6. – P. 1-19.
148. Sarapulova, G.I. Environmental Geochemical Assessment of Technogenic Soils / G.I. Sarapulova // *Journal of Mining Institute.* – 2018. – Vol. 234. – P. 658-662.
149. Sarapulova, G. I. Geochemical Approach in Assessing the Technogenic Impact on Soils / G. I. Sarapulova. – Text : electronic // *Journal of Mining Institute.* – 2020. – Vol. 243. – № 3. – P. 388-392.
150. Sarkar, S. Peanut Leaf Wilting Estimation From RGB Color Indices and Logistic Models / S. Sarkar, A.F. Ramsey, A.B. Cazenave, M. Balota // *Frontiers in Plant Science.* – 2021. – Vol. 12. – № June. – P. 1-16.
151. Salvarenga, P. Sewage Sludge, Compost and Other Representative Organic Wastes as Agricultural Soil Amendments: Benefits Versus Limiting Factors / P. Alvarenga, C. Mourinha, M. Farto [et al.] // *Waste Management.* – 2015. – Vol. 40. – P. 44-52.
152. Siebielec, G. Long-Term Impact of Sewage Sludge, Digestate and Mineral Fertilizers on Plant Yield and Soil Biological Activity / G. Siebielec, S. Siebielec, D. Lipski // *Journal of Cleaner Production.* – 2018. – Vol. 187. – P. 372-379.
153. Singh, R.P. Potential Benefits and Risks of Land Application of Sewage Sludge / R.P. Singh, M. Agrawal // *Waste Management.* – 2008. – Vol. 28. – № 2. – P. 347-358.
154. Smirnov, Y.D. Development of the Beneficial Utilisation of Urban Sewage Sludge Using Modern Analysis Methods / Y.D. Smirnov, M.V. Suchkova // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2019. – Vol. 1384. – № 1. – P. 1-8.

155. Soria, R. Role of Organic Amendment Application on Soil Quality, Functionality and Greenhouse Emission in a Limestone Quarry from Semiarid Ecosystems / R. Soria, R. Ortega, F. Bastida, I. Miralles // *Applied Soil Ecology*. – 2021. – Vol. 164. – № February. – P. 1-25.
156. Strizhenok, A. Ecology-Economical Assessment of New Reclamation Method for Currently Working Technogenic Massifs / A. Strizhenok, P. Tsvetkov // *Journal of Ecological Engineering*. – 2017. – Vol. 18. – № 1. – P. 58-64.
157. Strizhenok, A.V. Assessment of the Efficiency of Using Organic Waste from the Brewing Industry for Bioremediation of Oil-Contaminated Soils / A.V. Strizhenok, D.S. Korelskiy, Y. Choi // *Journal of Ecological Engineering*. – 2021. – Vol. 22. – № 4. – P. 66-77.
158. Sunoj, S. Digital Image Analysis Estimates of Biomass, Carbon, and Nitrogen Uptake of Winter Cereal Cover Crops / S. Sunoj, K.C. McRoberts, M. Benson, Q.M. Ketterings // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2021. – Vol. 184. – № September 2020. – P. 106093. – P. 1-11.
159. Tackenberg, O. A New Method for Non-Destructive Measurement of Biomass, Growth Rates, Vertical Biomass Distribution and Dry Matter Content Based on Digital Image Analysis / O. Tackenberg // *Annals of Botany*. – 2007. – Vol. 99. – № 4. – P. 777-783.
160. Teid, E.M. The Effects of Different Sewage Sludge Amendment Rates on the Heavy Metal Bioaccumulation, Growth and Biomass of Cucumbers (*Cucumis Sativus L.*) / E.M. Eid, S.A. Alrumman, A.F. El-Bebany [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2017. – Vol. 24. – № 19. – P. 16371-16382.
161. Tundurraga, P. Toxicity of Paper Mill Pelletized Waste Using Germination and Biomass Production as Bioindicators / P. Undurraga, J. Hirzel, J. Celis [et al.] // *Ciencia e Investigacion Agraria*. – 2018. – Vol. 45. – № 2. – P. 147-157.
162. Tripathy, S. Comparison of Microbial Indicators Under Two Water Regimes in a Soil Amended with Combined Paper Mill Sludge and Decomposed Cow Manure / S. Tripathy, P. Bhattacharyya, S.M. Equeenuddin [et al.] // *Chemosphere*. – 2008. – Vol. 71. – № 1. – P. 168-175.
163. Tsadilas, C. D. Utilization of Coal Fly Ash and Municipal Sewage Sludge in Agriculture and for Reconstruction of Soils in Disturbed Lands: Results of Case Studies from Greece and China / C.D. Tsadilas, Z. Hu, Y. Bi, T. Nikoli // *International Journal of Coal Science and Technology*. – 2018. – Vol. 5. – № 1. – P. 64-69.
164. Urbaniak, M. The Effect of Sewage Sludge Application on Soil Properties and Willow (*Salix sp.*) Cultivation / M. Urbaniak, A. Wyrwicka, W. Tołoczko [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2017. – Vol. 586. – P. 66-75.
165. Wasonga, D.O. Red-Green-Blue and Multispectral Imaging as Potential Tools for Estimating Growth and Nutritional Performance of Cassava under Deficit Irrigation and Potassium Fertigation / D.O. Wasonga, A. Yaw, J. Kleemola [et al.] // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13. – № 4. – P. 1-20.

166. Xiong, Y. Digital Image Analysis of Old World Bluestem Cover to Estimate Canopy Development / Y. Xiong, C.P. West, C.P. Brown, P.E. Green // *Agronomy Journal*. – 2019. – Vol. 111. – P. 1-7.
167. Xu, D. Non-Photosynthetic Vegetation Cover from RGB Images in Mixed Grasslands / D. Xu, Y. Pu, X. Guo. – 2020. – Vol. 20. – 6870. – P. 1-17.
168. Xue, D. The Impact of Sewage Sludge Compost on Tree Peony Growth and Soil Microbiological, and Biochemical Properties / D. Xue, X. Huang // *Chemosphere*. – 2013. – Vol. 93. – № 4. – P. 583-589.
169. Ye, Z.H. Evaluation of Major Constraints to Revegetation of Lead / Zinc Mine Tailings Using Bioassay Techniques / Z.H. Ye, W.S. Shu, Z.Q. Zhang [et al.] // *Chemosphere*. – 2002. – Vol. 47. – № 10. – P. 1103-1111.
170. Žaltauskaitė, J. Sewage Sludge Application Effects to First Year Willows (*Salix viminalis* L.) Growth and Heavy Metal Bioaccumulation / J. Žaltauskaitė, S. Judeikytė, G. Sujetovienė, R. Dagiliūtė // *Waste and Biomass Valorization*. – 2017. – Vol. 8. – № 5. – P. 1813-1818.
171. Zuev, B.Y. Application Prospects for Models of Equivalent Materials in Studies of Geomechanical Processes in Underground Mining of Solid Minerals / B.Y. Zuev, V.P. Zubov, A. S. Fedorov // *Eurasian Mining*. – 2019. – Vol. 2019. – № 1. – P. 8-12.
172. Zuo, W. Sewage Sludge Amendment Improved Soil Properties and Sweet Sorghum Yield and Quality in a Newly Reclaimed Mudflat Land / W. Zuo, C. Gu, W. Zhang [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Vol. 654. – P. 541-549.

ПРИЛОЖЕНИЕ А**Акт внедрения****УТВЕРЖДАЮ****Заместитель генерального
директора по техническим
вопросам-главный инженер****С.В. Сергеев****«14» марта 2022 год****АКТ ВНЕДРЕНИЯ****Результатов диссертационной работы****«Рекультивация техногенно нарушенных земель с использованием нетрадиционных мелиорантов»**

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационного исследования Рудзиш Эделины «Рекультивация техногенно нарушенных земель с использованием нетрадиционных мелиорантов». Результаты и рекомендации диссертационной работы приняты к использованию при рекультивации объекта размещения отходов АО «Омский каучук».

Внедрение результатов исследований состоит в использовании нетрадиционных мелиорантов для эколого-эффективного восстановления почвенно-растительного комплекса.

Предложенные нетрадиционные мелиоранты на основе промышленных осадков сточных вод позволяют обеспечить формирование устойчивого травянистого покрова для снижения негативной нагрузки от объекта размещения отходов.

Разработанные подходы оценки эффективности мелиорантов позволяют выполнить подбор оптимального количества вносимого мелиоранта в соответствии с локальными природно-климатическими условиями территории рекультивируемого объекта размещения отходов.

Результаты использования в производственной деятельности АО «Омский каучук» материалы диссертационного исследования Рудзиш Эделины «Рекультивация техногенно нарушенных земель с использованием нетрадиционных мелиорантов» рассмотрены и утверждены комиссией в составе:

Председатель комиссии:

Начальник бюро
охраны окружающей среды

Handwritten signature of S.N. Pomortseva.

С.Н. Поморцева

Члены комиссии:

Ведущий инженер
по охране окружающей среды

Handwritten signature of M.V. Matveeva.

М.В. МатвееваНачальник отдела
промышленной безопасности

Handwritten signature of P.A. Faan.

П.А. Фаин

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения результатов работы в учебный процесс



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Рудзиш Э. «Рекультивация техногенно нарушенных земель с использованием нетрадиционных мелиорантов» внедрены в учебный процесс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

В частности, разработанная автором методика оценки эффективности внесения мелиорантов в почвенные субстраты на основе анализа роста и развития растительного покрова использовалась для изучения на практических и лабораторных занятиях при обучении студентов.

В ходе практических занятий обучающиеся направления 05.04.06 «Экология и природопользование» профиль «Экологический мониторинг и охрана окружающей среды» при изучении дисциплины «Современные методы рекультивации и биоремедиации» осваивают методику расчета доз внесения нетрадиционного мелиоранта для антропогенно измененных почв при проведении рекультивации техногенно нарушенных земель.

Также, в рамках лабораторных занятий обучающиеся направления 21.05.04 «Горное дело» профиль «Горнопромышленная экология» при выполнении «Научно-исследовательской работы» проводят экспериментальные исследования по определению возможности использования различных нетрадиционных мелиорационных субстратов для рекультивации техногенно нарушенных земель.

Декан горного факультета
 д.т.н., проф.

О.И. Казанин

Заведующий кафедрой геоэкологии
 д.т.н., проф.

М.А. Пашкевич

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации изобретения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2736648

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО
МЕЛИОРАНТА

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Пашкевич Мария Анатольевна (RU), Петрова Татьяна Анатольевна (RU), Смирнов Юрий Дмитриевич (RU), Рудзии Эделина (RU)*

Заявка № 2020125164

Приоритет изобретения 29 июля 2020 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 19 ноября 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 29 июля 2040 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Возможные варианты обработки ОСВ ЦБК для использования в качестве нетрадиционного мелиоранта



Рисунок В.1 – Примеры видов обработки и конечных продуктов из предложенного нетрадиционного мелиоранта (ОСВ ЦБП) для внесения в почву

Расчет себестоимости одной тонны готового к внесению нетрадиционного мелиоранта (ОСВ ЦБП) по гранулированию

В рамках традиционных технологий со схожим профилем по переработке и подготовке сырья подобным предлагаемым нетрадиционным мелиорантам на рынке представлены два типа оборудования – это прессование совместно с сушкой и измельчение с гранулированием. Процессы сушки проводятся при температурах от 150 до 350 °С. Данные методы позволяют перерабатывать сырье (ОСВ ЦБП) с влажностью от 40 % до 80 %.



Рисунок В.2 – Примеры оборудования для подготовки нетрадиционных мелиорантов для использования (бункер для сбора и сушки, комплекс для прессования с сушкой),

Таблица В.1 – Себестоимость единицы продукции – одной тонны ОСВ ЦБП

Показатель	Ед.изм.	Кол-во	Цена, тыс.руб
Исходное сырье – ОСВ ЦБК	тонн	100	-
ГСМ (доставка сырья до предприятия = $32\text{л}/100\text{км} * 3000\text{ поездок} * n\text{ км одна поездка}/18000\text{ тонн продукции в год}$)	л	7-21	0,32- 0,67
Электроэнергия = $m\text{ кВтч} * 16\text{ часа}/100\text{ тонн в сутки} * 70\%$ (коэфф. загрузки электр. механизмов в сутки)	кВтч	0,064- 0,070	0,17- 0,19
Итого за тонну			0,49- 0,86

n – расстояние от ЦБК до ближайших нарушенных земель при разработке месторождений твердых полезных ископаемых (от Архангельского ЦБК – 135 км, 250 км и 286 км, Сясьского ЦБК – 280 км, Сокольского ЦБК – 250 км);

m – установленная электрическая мощность оборудования, где прессование совместно с сушкой – около 420 кВт и измельчение с гранулированием – около 380 кВт.

Себестоимость ОСВ ЦБП (с доставкой) – 490-860 руб за тонну;

Средняя стоимость торфосмеси (без доставки) – 370-580 руб за тонну;

Средняя стоимость почвы (без доставки) – 590-890 руб за тонну.