

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»**

На правах рукописи

Семина Ирина Сергеевна

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ
ЗЕМЕЛЬ, НАРУШЕННЫХ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЙ
ПО ДОБЫЧЕ И ПЕРЕРАБОТКЕ УГЛЯ
(НА ПРИМЕРЕ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ – КУЗБАССА)**

1.6.21 Геоэкология

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:
доктор биологических наук, главный научный сотрудник,
директор Института почвоведения и агрохимии СО РАН
Андроханов Владимир Алексеевич

Новокузнецк – 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Российская Федерация является одной из крупнейших стран в мире по запасам разведанных полезных ископаемых, в том числе по резервам угля, и занимает лидирующие позиции по добыче этого ценного ресурса. Добыча угля имеет существенное значение для развития экономики Российской Федерации. С одной стороны, в соответствии со стратегией развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 г. добыча и переработка угля в России является одной из задач социально-экономического развития, с другой – деятельность предприятий по добыче и переработке угля влияет на состояние всех компонентов окружающей среды и на каждом этапе сопровождается негативным влиянием на природную среду. Особенно существенное влияние оказывают работы по добыче угля открытым способом: происходит уничтожение почвенного и растительного покрова. В результате деятельности открытых горных работ изменяется естественный ландшафт и, соответственно, растительный и почвенный покров, трансформируется гидрологический режим, увеличивается антропогенное воздействие на все компоненты природной среды, происходит изъятие земель на длительный период. Так, результаты обработки данных дистанционного зондирования Земли Кемеровским филиалом ФИЦ ИВТ показывают, что в 2023 г. общая площадь нарушенных предприятиями земель в Кемеровской области – Кузбассе составила 110,345 тыс. га, в том числе угольными разрезами – 79,464 тыс. га. Площадь рекультивированных и самозарастающих отвалов составила 21,017 тыс. га. (Е.Л. Счастливцев, Н.И. Юкина, 2024). На основании Федерального закона «Об охране окружающей среды» одним из основных принципов обеспечения благоприятных условий среды и экологической безопасности является рациональное использование природных ресурсов, и в соответствии с концепцией перехода России к устойчивому развитию необходимо создавать условия для постепенного восстановления природных экосистем до уровня, гарантирующего стабильное функционирование окружающей среды как на уровне региона, так и страны в целом. Комплексный подход к рекультивации земель (создание корнеобитаемого слоя из плодородного слоя почвы (ПСП), потенциально плодородных пород (ППП) и других материалов; внесение минеральных удобрений и микроорганизмов; подбор видового разнообразия растений и травосмесей; формирование благоприятного рельефа) будет способствовать ускоренному восстановлению растительного и почвенного покрова на техногенно нарушенных территориях. Между тем, оценивая районы по природно-климатическим, геологическим, геоморфологическим условиям, необходимо отметить тот факт, что на определенных территориях разных регионов страны имеется дефицит как ПСП, так и PPP (покровных суглинков). Кроме того, после завершения работ на предприятиях по добыче угля остаются значительные площади выработанного пространства. При решении вопросов заполнения карьерных выработок, оставшихся после ведения горных работ предприятиями по добыче угля, для создания безопасного, устойчивого ландшафта и возврата нарушенных территорий в повторное использование возникает дефицит материалов. Такой дефицит можно компенсировать техногенными ресурсами.

Таким образом, разработка научно-технологических основ рационального использования природных и техногенных ресурсов для рекультивации земель, нарушенных деятельностью предприятий по добыче и переработке угля (на

примере Кемеровской области – Кузбасса), имеет важное хозяйственное значение для обеспечения устойчивого развития горнодобывающих регионов, экологического благополучия населения и является актуальной научной проблемой.

Степень разработанности темы

Вопросами рекультивации нарушенных земель занимаются уже более 60 лет (с начала 1960 г.), и значительный вклад в восстановление почвенного и растительного покрова на техногенных ландшафтах в разных регионах России внесли отечественные ученые: С.С. Трофимов, С.А. Таранов, В.А. Овчинников, В.В. Тарчевский, И.В. Трещевский, Я.В. Панков, Н.Е. Бекаревич, Н.Т. Масюк, И.Х. Узбек, Л.В. Етеревская, М.Т. Донченко, Л.В. Лехциер, Л.П. Баранник, А.Н. Куприянов, В.М. Курачев, И.М. Гаджиев, В.И. Щербатенко, Л.П. Капелькина, Е.Р. Кандрашин, В.А. Андроханов. Классификационные вопросы пригодности вскрышных и вмещающих пород отражены в многочисленных исследованиях ученых: Ф.К. Рагим-Заде, Г.И. Махониной, Л.В. Моториной, Г.А. Зайцева, А.И. Савича, В.Н. Чеклина, В.А. Овчинникова, Т.С. Чибрик. В настоящее время вопросы восстановления техногенно нарушенных земель не потеряли актуальности; в соответствии с приоритетными направлениями научно-технологического развития России вопросы сохранения биоразнообразия, рационального использования природных ресурсов и климатических изменений являются приоритетными научными исследованиями. Решениям таких значимых экологических вопросов посвящены научные труды ученых, использующих разные подходы, методы исследований и технологии для ускоренного восстановления фитоценозов и почвенного покрова на техногенных ландшафтах; пристальное внимание уделено вопросам восстановления почвенно-экологического состояния, состава микробиома, растительного покрова на территориях после проведения рекультивации земель, вопросам экологического мониторинга. Значительный вклад внесли следующие ученые: Л.П. Капелькина, Л.Т. Крупская, В.М. Курачев, В.А. Андроханов, Е.В. Абакумов, Д.А. Соколов, И.Н. Госсен, А.Т. Лавриненко, А.П. Яковлев, А.Н. Куприянов, Ю.А. Манаков, В.И. Уфимцев, В.П. Потапов, Е.Л. Счастливцев, Г.И. Махонина, Т.С. Чибрик, Н.В. Лукина, М.А. Глазырина, Е.И. Филимонова, С.В. Овсянникова, В.П. Середина, С.И. Миронова, А.Г. Тюрюков, Zhu X., Da L., Diagne N., Tilley D., Hulet A., Randi L., Wang F. и др. Накоплен богатый материал результатов исследований ученых в области лесной рекультивации земель, отраженный в многочисленных работах Л.П. Баранника, А.Н. Куприянова, В.П. Николайченко, А.Ф. Салагаева, В.И. Уфимцева, Э.И. Трещевской, Е.Н. Тихоновой, С.В. Трещевской, О.Л. Цандековой, Н.Р. Сунгуровой, И.Е. Корчагина, М.А. Яковченко, А.А. Косолаповой. Вклад в изучение вопросов самовосстановления техногенно нарушенных территорий внесли Т.С. Чибрик, Н.В. Лукина, Е.И. Филимонова, М.А. Глазырина, П.Е. Тихменев.

Значительный вклад в решение вопросов использования разных отходов производства для рекультивации земель внесли Л.П. Капелькина, Л.Т. Крупская, С.А. Эпштейн, Г. Шайхислам, М.А. Пашкевич, А.С. Водолеев, А.А. Никифоров, С.И. Миронова, Т.А. Петрова, А.В. Бачурина, А.А. Мартынюк, Т.В. Шевченко, Buta M., Blaga G., Fernández-Caliani J.C., Giráldez, M.I., Tsadilas, C.D., Hu, Z. и др. Существенный вклад в изучение гидрологических свойств почвенных конструкций, трансформации элементов питания и развития растительного покрова внесли А.Б. Умарова, А.В. Смагин, М.А. Бутылкина и др. Устойчивое развитие

биологического разнообразия, процессов почвообразования на техногенных ландшафтах и, соответственно, почвенно-экологическая эффективность рекультивационных работ во многом зависят от сохранения и рационального использования ПСП и ППП (покровные суглинки). Сохранить и использовать данные материалы для рекультивации земель возможно только в процессе ведения горных работ. Значительный вклад в создание научных основ рационального использования природных ресурсов по разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом и формированию техногенных ландшафтов как новых структур, функционирующих как одно целое с окружающей средой, внесли Г.Г. Пивняк, И.Л. Гуменик, Г.Г. Дребенштед, Хэге К., А.И. Панасенко, В.И. Супрун, Я.В. Левченко, А.Я. Якутов, Т.В. Корчагина, П.И. Томаков, В.С. Коваленко, А.М. Михайлов, А.Т. Калашников, М.Е. Певзнер, И.В. Зеньков, Ху Ю., Не Х. Однако, несмотря на многочисленные исследования в области рекультивации земель, комплексных научных изысканий по обоснованию экологически эффективных решений проблемы восполнения недостатка природных (литогенных) ресурсов для рекультивации нарушенных земель и рационального использования техногенных ресурсов для создания устойчивого, экологически безопасного ландшафта на предприятиях по добыче и переработке углей Кузбасса, расположенных в разных природно-климатических, геологических районах, с возможностью использования собственных ресурсов предприятий в экономике замкнутого цикла производства практически не проводилось.

Цель работы – разработка научно-технологических основ рационального использования лито- и техногенных ресурсов в экономике замкнутого цикла для экологически эффективной рекультивации земель, нарушенных деятельностью угледобывающих предприятий Кемеровской области – Кузбасса.

Идея работы заключается в вовлечении природных (литогенных) и техногенных ресурсов для эффективных решений проблем рекультивации земель (восполнения недостатка плодородного слоя почвы и материалов для создания искусственных почв (техноземов) и устойчивого, безопасного ландшафта на поверхности карьерных выработок) предприятиями по добыче угля Кемеровской области – Кузбасса, расположенными в разных природно-климатических, геологических районах.

Для достижения поставленной цели работы были сформулированы следующие задачи:

1. Исследования природных (климатических и биологических (растительность)) ресурсов и оценка их значимости при восстановлении растительного и почвенного покрова на техногенно нарушенных территориях в разных природно-климатических подзонах Кузбасса.

2. Комплексная оценка литогенных, техногенных ресурсов (минералогические, физико-химические, агрохимические, биологические исследования) и установление критериев пригодности основных вскрышных и вмещающих пород горно-таежной подзоны Кузбасса для рекультивации земель и благоприятного функционирования фитоценозов и искусственных почв (техноземов).

3. Экспериментальные исследования внедрения технологии рекультивации земель в процессе ведения горных работ (селективное отвалообразование) для повышения экологической эффективности восстановления растительного и

почвенного покрова на участках рекультивации (на примере филиала АО «УК» «Кузбассразрезуголь» «Калтанский угольный разрез»).

4. Создание экологического полигона и проведение апробации технологий рекультивации в условиях дефицита литогенных ресурсов (плодородного слоя почвы и потенциально плодородных пород (покровных суглинков)) для биологической рекультивации земель (на примере АО «Разрез Распадский»).

5. Экспериментальные исследования технологии рекультивации с использованием техногенных ресурсов (отходов углеобогащения) и оценка их влияния на развитие растительного и почвенного покрова.

6. Разработка научно-технологических основ рационального использования природных и техногенных ресурсов для реализации экологически эффективных технологий рекультивации земель в экономике замкнутого цикла предприятий, которые учитывают специфику техногенных ландшафтов и влияние природно-климатических и литогенных факторов на развитие растительного и почвенного покрова.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Скорость трансформации техногенных ландшафтов в природно-техногенные комплексы определяется технологией рекультивации земель (составом и строением корнеобитаемого слоя техноземов, оптимальной мощностью, подбором видового состава растений и наиболее предпочтительных схем посадки лесных культур; составом травосмесей; применением органоминеральных удобрений), учитывающей специфику техногенных ландшафтов, влияние природно-климатических и литогенных факторов на развитие растительного и почвенного покрова. Это диагностируется изменением почвенно-экологического состояния и уровнем сингенетического развития растительного и почвенного покрова на техногенных ландшафтах.

2. Почвенно-экологическая эффективность рекультивации земель определяется свойствами искусственных почв (техноземов), сформированных на нарушенной поверхности. Наибольшая эффективность в горно-таежной подзоне Кузбасса достигается при использовании литогенных ресурсов (ПСП и ППП – четвертичные отложения I категории). При дефиците литогенных ресурсов (четвертичные отложения I категории) для формирования корнеобитаемого слоя целесообразно использовать ресурсы II категории, что обусловлено благоприятным гранулометрическим составом и возможностью регулировать физические, физико-химические параметры корнеобитаемого слоя.

3. Наиболее экологически эффективной технологией рекультивации земель в условиях дефицита плодородного слоя почвы является технология создания техноземов на поверхности техногенных ландшафтов из смеси ПСП и ППП (четвертичные отложения I категории). При такой технологии уже в первые годы функционирования техноземов наблюдается активное восстановление фитоценозов со значительным видовым разнообразием (52 вида), минимальной долей сорных видов растений (15 %), наибольшей продуктивностью (59,2 ц/га). Почвенно-экологическая эффективность рекультивации достигает 50 %.

4. Отходы углеобогащения целесообразно использовать как техногенный ресурс и размещать их в выработанном пространстве карьеров для создания безопасного и благоприятного ландшафта. Технология создания техноземов из ППП (покровных суглинков) и ПСП в послойном виде на поверхности долговременных размещенных отходов препятствует возникновению негативных

последствий на окружающую среду и способствует устойчивому развитию растительного и почвенного покрова.

5. Для восполнения дефицита ПСП и ППП (четвертичные отложения I категории) в горно-таежной подзоне Кузбасса целесообразно использовать техногенные ресурсы предприятия и формировать искусственные почвы (техноземы модифицированные) из ППП (четвертичные отложения II категории), золошлаковых материалов и окисленных каменных углей. За счет увеличения содержания органического вещества и поглонительной способности техноземов элементы питания не вымываются в нижние слои почв.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: использованием современных методов выполнения научных исследований, математической обработкой результатов, публикациями в рецензируемых научных изданиях и апробацией на многочисленных научных мероприятиях по темам основных направлений исследований, представленных в диссертации.

Научная новизна работы:

1. Выполнена комплексная почвенно-экологическая оценка вскрышных и вмещающих пород, образующихся в процессе деятельности горнодобывающих предприятий, расположенных в горно-таежной подзоне Кузбасса. Оценка позволила определить потенциал пригодности пород для биологической рекультивации земель. Основными критериями применимости пород для биологической рекультивации являются минералогические, агрохимические и физико-химические свойства, обеспечивающие потенциал пород к развитию растительного покрова и процессов почвообразования. Ранжирование пород на категории по пригодности для биологической рекультивации земель позволяет повысить эффективность использования литогенных ресурсов для ускоренного восстановления нарушенных территорий.

2. Впервые оценена трансформация искусственных почв с разными видами отсыпок (формирование корнеобитаемого слоя из ПСП и ППП), сформированных на отходах углеобогащения. Это диагностируется степенью преобразования субстратов, изменением почвенно-экологического состояния и уровнем сингенетического развития растительного и почвенного покрова на техногенных ландшафтах.

3. Впервые на искусственных почвах (техноземах), сформированных с использованием разных смесей из литогенных ресурсов, исследовано развитие растительного покрова и накопление органического вещества в почвах с «нулевого» момента, что позволяет оценить перспективы использования рекультивированных участков в климатических проектах по депонированию углерода.

4. Получены новые количественные данные об экологической безопасности отходов углеобогащения, размещенных в выработанном пространстве карьеров, о развитии растительного и почвенного покрова рекультивированных участков. Выявлены закономерности в распределении и аккумуляции полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в отходах углеобогащения и искусственных почвах – техноземах и эмбриоземах.

5. Показано, что использование технологии создания искусственных почв (техноземов модифицированных) на основе золошлаковых материалов, окисленных каменных углей и четвертичных отложений на поверхности

техногенных ландшафтов способствует накоплению органического углерода, повышению ёмкости катионного обмена в почвах и развитию растительного покрова.

Теоретическая и практическая значимость реализации результатов

На основе многолетнего опыта научно обоснованы экологически эффективные технологии рекультивации с использованием природных и техногенных ресурсов, мощность рекультивационного слоя (состав и строение профиля искусственных почв (техноземов)), рельеф, выбор видового состава растений и травосмесей, использование удобрений), которые учитывают воздействие природно-климатических факторов на развитие почвообразовательного процесса и растительного покрова, в том числе с использованием образующихся на угольных предприятиях отходов. Предложены способы сохранения и рационального использования природных ресурсов в процессе горного производства, обоснован алгоритм действий для восстановления техногенно нарушенных территорий с высокой почвенно-экологической эффективностью.

На основе новых научных данных по исследованию ПАУ в отходах углеобогащения и искусственных почвах (техноземах и эмбриоземах) предложена технология создания корнеобитаемого слоя путем послойного нанесения на поверхность отходов углеобогащения литогенных ресурсов, состоящих из покровных суглинков и плодородного слоя почвы, которая способствует формированию устойчивого растительного покрова и консервации отходов углеобогащения. Тематика научных исследований соответствует приоритетным направлениям научно-технологического развития РФ и перечню важнейших наукоемких технологий «Адаптация к изменениям климата, сохранение и рациональное использование природных ресурсов». С 2019 года научные исследования проводились в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований: проект № 20-44-420006 «Оценка потенциала применения отходов углеобогащения для рекультивации нарушенных земель в Кузбассе». Результаты научных исследований по восстановлению техногенно нарушенных территорий послужили основой для создания экологического полигона на АО «Разрез Распадский» в рамках научно-исследовательской работы «Создание экологического полигона по отработке технологий рекультивации и оценке перспектив поглощения CO₂ на нарушенных и подработанных землях», договор № ДГРР7-002969 от 08.06.2022 г. Результаты научных исследований и методические подходы, разработанные в рамках диссертационной работы, использованы при рекультивации нарушенных земель на АО «Разрез Распадский», а также используются в учебном курсе «Горнопромышленная экология» по специальности 21.05.04 «Горное дело».

Апробация результатов исследования

Основные научные и практические результаты работы доложены на российских и международных конференциях: Международной научной конференции «Природно-техногенные комплексы: современное состояние и перспективы восстановления (13–18 июня 2016 г., г. Новосибирск); V Международной научной конференции, посвященной 85-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ «Отражение био-, гео-, антропогенных взаимодействий в почвах и почвенном покрове. Сборник материалов» (7–11 сентября 2015 г., г. Томск); Международной научно-практической конференции

«Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимой в рамках специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России и Майнинг» (7–10 июня 2016 г., г. Новокузнецк; 7–11 сентября 2020 г., г. Новокузнецк; 1–4 июня 2021 г., г. Новокузнецк, 7–10 июня 2022 г., г. Новокузнецк); VIII съезде Общества почвоведов им. В.В. Докучаева «Почвы – стратегический ресурс России» (10–14 августа 2022 г., г. Сыктывкар); IX съезде Общества почвоведов им. В.В. Докучаева «Почвы – опора России» (12–16 августа 2024 г., г. Казань); Всероссийской научно-практической конференции «Рекультивация нарушенных земель: технологии, эффективность и биоразнообразие» (1–3 октября 2024 г., г. Новокузнецк); Международной научно-практической конференции «Развитие производительных сил Кузбасса: история, современный опыт, стратегия будущего» (17–23 ноября 2023 г., г. Москва, г. Новокузнецк).

Публикации

Основные положения и результаты работы представлены в 35 научных публикациях, из них 14 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК, Scopus и RSCI по защищаемой специальности.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав и заключения, содержит 172 рисунка, 78 таблиц, три приложения, список использованных источников из 257 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе работы представлен анализ отечественных и зарубежных источников о современном состоянии существующих технологий рекультивации нарушенных земель. Рассмотрены современные решения значимых экологических вопросов с использованием разных подходов, методов исследований и технологий для ускоренного восстановления фитоценозов и почвенного покрова на техногенных ландшафтах; уделено пристальное внимание вопросам восстановления почвенно-экологического состояния, состава микробиома, растительного покрова на территориях после проведения рекультивации земель, вопросам самовосстановления техногенно нарушенных территорий и экологического мониторинга. Освещены результаты исследований применения отходов производства для рекультивации земель, вопросов рационального использования природных ресурсов при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом и формирования техногенных ландшафтов как новых структур, функционирующих как одно целое с природной средой. На основании проведенного анализа многочисленных научных источников показана актуальность научного исследования.

Во второй главе представлены методология, методы и объекты исследований. В основе научных исследований по обоснованию использования пород, отходов углеобогащения в качестве ресурсов для рекультивации земель лежат лабораторные и полевые исследования основных вскрышных и вмещающих пород, отходов углеобогащения и искусственных почв (техноземов, эмбриоземов) с учетом влияния природно-климатических и литогенных факторов на развитие растительного и почвенного покрова. Образцы пород, отходов и почв исследовали в аналитических лабораториях СибГИУ, ИПА СО РАН, в аккредитованных лабораториях АО «ЗСИЦ», в лабораториях НИОХ СО РАН.

Для изучения образцов вскрышных и вмещающих пород, отходов углеобогащения, техноземов и эмбриоземов в лабораторных и полевых условиях

были использованы следующие методы: спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, атомно-эмиссионной, атомно-абсорбционной спектрометрии, фотометрии, потенциометрии, кондуктометрии, гравиметрии, титриметрии. Содержание органического углерода в породах, отходах и техноземах находили методом определения органического вещества по ГОСТ 26213 – 2021. Содержание общего углерода в отходах углеобогащения определяли с использованием анализатора ELTRA CHS 580. Для определения токсичного (мутагенного) эффекта пород, отходов, техноземов использовали методы биотестирования с разными тест-объектами: определение токсичности с использованием в качестве тест-объекта ракообразных *Daphnia magna* Straus и водорослей *Scenedesmus quadricauda*. Минеральный состав пород изучали под стереомикроскопом ЛабоСтеми-4 зум, а также в отраженном и проходящем свете под микроскопом ЛабоПол-2 РПО. Краевой угол смачивания определяли методом статической капли на DSA100. Физические свойства техноземов и эмбриоземов определяли стандартными методами. Влажность почв определялась в соответствии с ГОСТ 28268 – 89. Для определения подвижности влаги в техноземах и эмбриоземах использовали шкалу, предложенную А.А. Роде. Среднюю плотность вскрышных пород определяли по ГОСТ 8269.0 – 97. Исследования теплового режима в техноземах, эмбриоземах и естественных почвах проводились с использованием портативных датчиков температурного режима «Термохрон». Для определения типовой принадлежности техноземов и эмбриоземов в работе использовали профильно-генетическую классификацию почв техногенных ландшафтов (В.М. Курачев, В.А. Андроханов). Почвенно-экологическое состояние участков рассчитывали в соответствии с методическими рекомендациями по проведению почвенно-экологического обследования техногенно нарушенных территорий. С целью мониторинга состояния формирующегося растительного покрова были проведены геоботанические описания на учетных площадках размером 10 × 10 м (в 2021–2025 гг.), на которых проведен учет видового состава с оценкой обилия каждого вида по стандартной методике. Выбор видового разнообразия лесных культур, травосмесей и посадочных схем осуществлялся с использованием методических рекомендаций по созданию природоподобных лесных экосистем на отвалах угольной промышленности в Кузбассе (В.И. Уфимцев, А.Н. Куприянов, Ю.А. Манаков, О.М. Легощина). Для выявления особенностей в распределении и аккумуляции ПАУ в техноземах и инициальном эмбриоземе, сформированных на отходах углеобогащения, и оценки их экологической безопасности проводили анализ на газовом хроматографе. В экстрактах определяли 19 индивидуальных ПАУ. Для апробации в полевых условиях использования литогенных и техногенных ресурсов для рекультивации земель были созданы экспериментальные участки на внешних отвалах. В соответствии с эколого-географическим районированием научные исследования приводили в двух подзонах Кузбасса: в горно-таежной подзоне Кузбасса на территориях АО «Разрез Распадский» (г. Междуреченск), филиала АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Калтанский угольный разрез» (г. Осинники) и лесостепной подзоне на участках поверхности внутренних отвалов, заполненных отходами углеобогащения (г. Ленинск-Кузнецкий). Исследования осуществляли с 2013 по 2025 гг.

Экологический полигон АО «Разрез Распадский»

Для проведения в полевых условиях апробации был создан экологический полигон (далее полигон) с экспериментальными участками, созданными с

использованием разных технологий рекультивации земель. На полигоне заложено 10 экспериментальных участков (участки размером 50×50 м), на каждом участке созданы мониторинговые площадки в трехкратной повторности (размером 10×10 м). Участки № 1 – 8 /Т 1 – 8 сложены из ППП (из смеси суглинков с включением слабоокатанной гальки, щебня коренных пород и выветрелого песчаника); участок № 9/ Т 9 сформирован из смеси ПСП и ППП (из покровных суглинков); участок № 10/ Т10 сформирован из обломков основных вскрышных пород песчаников, аргиллитов и алевролитов различного диаметра. В соответствии с классификацией почв техногенных ландшафтов на участках рекультивации представлены следующие участки: №№ 1 – 8 – техноземы литогенные недифференцированные (далее техноземы литогенные, ТЛ); № 9 – техноземы гумусогенные недифференцированные (далее техноземы гумусогенные, ТГН); № 10 – эмбриоземы инициальные (ЭИ). Мощность корнеобитаемого слоя на участках полигона изменяется от 1,0 до 1,5 м. Также на полигоне заложен экспериментальный участок № 11 микроделяночным способом из смеси суглинков с включением слабоокатанной гальки, щебня коренных пород и выветрелого песчаника четвертичных отложений и почвоулучшителя (смесь из золошлаковых материалов и окисленного угля). В соответствии с классификацией почв техногенных ландшафтов участок представлен техноземом модифицированным (ТМ). Площадь экспериментальной делянки 2×2 м. Для выявления наиболее перспективных растений в данных условиях перед проведением эксперимента на основе геоботанического описания были выбраны разные виды растений и схемы посадки. В 2023 г. на полигоне высажено около 6000 растений разного видового состава с закрытой корневой системой и был проведен посев клевера и мятлика.

Участки рекультивации угольного разреза (филиал АО «УК» «Кузбассразрезуголь» «Калтанский угольный разрез»)

Ключевые экспериментальные участки располагаются на внешних отвалах на относительно ровной поверхности и имеют следующие характеристики.

Внешний автотранспортный отвал «Центральный» представляет собой платообразную поверхность и имеет высоту 50 – 60 м, состоит из двух ярусов по 20 – 30 м каждый. Корнеобитаемый слой сформирован из покровных суглинков мощностью более 3 м, площадь всего отвала 3,9 га, возраст отвала 48 лет. Биологический этап с посадкой растений не проводился. В соответствии с классификацией почв техногенных ландшафтов почвенный покров исследуемого участка представлен эмбриоземом гумусово-аккумулятивным (ЭГА) (участок 1 К).

Внешний автотранспортный отвал «Приконтурный» имеет платообразную поверхность. Высота отвала, который представлен одним ярусом, составляет 30 м. Основание и тело отвала сложено прочной полускальной и скальной породами. Корнеобитаемый слой сформирован из покровных суглинков мощностью чуть более 1 м, площадь всего отвала 70 га. Формирование корнеобитаемого слоя было выполнено в рамках технического этапа рекультивации в 2011 г. В процессе биологического этапа рекультивации была осуществлена посадка сосны обыкновенной. Возраст отвала составляет 13 лет. В соответствии с классификацией почв техногенных ландшафтов почвенный покров исследуемого участка представлен эмбриоземом дерновым (ЭД) (участок 2 К). В качестве контрольного варианта был выбран участок с естественными почвами. Основание и тело отвалов сложено из основной вскрышной породы. Рельеф поверхности участков

относительно ровный, с мелкобугристым слабонаклонным рельефом (не более 5 градусов).

Участки рекультивации в лесостепной подзоне Кузбасса, сформированные на отходах углеобогащения

Для оценки влияния отходов углеобогащения на развитие растительного и почвенного покрова на участках рекультивации, сформированных на отходах углеобогащения, а также для возможности использовать отходы углеобогащения как техногенный ресурс для экологически безопасного размещения в выработанных пространствах карьеров созданы экспериментальные участки с использованием разных технологий рекультивации земель. На поверхности участков рекультивации сформированы искусственные почвы (техноземы) на отходах углеобогащения (отходы флотационного обогащения «кек» и породы после обогащения). В соответствии с классификацией почв техногенных ландшафтов земли под рекультивацию представлены следующими участками: № 1/Т 1 (верхний корнеобитаемый слой представлен отходами углеобогащения) – эмбриозем инициальный (ЭИ), возраст участка более 10 лет; № 2/Т 2 (верхний, корнеобитаемый слой участка сформирован путем нанесения на поверхность ППП (покровные суглинки) – технозем литогенный (ТЛ), возраст участка 4 года; № 3/Т 3 (верхний, корнеобитаемый слой участка сформирован путем нанесения на поверхность смеси ППП (покровных суглинков) и ПСП) – технозем гумусогенный недифференцированный (ТГН), возраст участка 9 лет; № 4/Т 4 (верхний, корнеобитаемый слой участка сформирован путем нанесения на поверхность ПСП с примесью ППП (покровных суглинков)) – технозем гумусогенный недифференцированный (ТГН), возраст участка 9 лет; участок № 5/Т 5 (верхний, корнеобитаемый слой участка сформирован путем нанесения на поверхность ППП (покровные суглинки) и последующим послойным перекрытием их ПСП) – технозем гумусогенный дифференцированный (ТГД), возраст участка 10 лет. В качестве контрольного варианта был выбран участок с естественными почвами.

В третьей главе работы представлены исследования природных (климатических и биологических (растительность)) ресурсов и оценка их значимости в восстановлении нарушенных земель. Климатические ресурсы представлены следующими величинами: температурные показатели тепла (среднемесячные, среднегодовые температуры теплого и холодного периодов года; сумма биологически активных температур выше 10 °С; продолжительность безморозного периода года); количество атмосферных осадков; коэффициент увлажнения; мощность снежного покрова и другие климатические параметры. Биологические ресурсы (видовой состав растительного покрова) обеспечивают развитие внутрипочвенных биоценозов, тем самым трансформируют исходный субстрат вскрышных пород в молодые почвы. Рассматриваемые ресурсы являются значимыми факторами, влияющими на восстановление растительного и почвенного покрова, а также на выбор технологии рекультивации земель (строения и оптимальной мощности корнеобитаемого слоя на поверхности техногенных ландшафтов, подбора видового состава растений и травосмесей для биологической рекультивации земель). Показано, что климатических и биологических (растительность) ресурсов в районе горно-таежной подзоны Кузбасса (в районе расположения филиала АО «УК» «Кузбассразрезуголь» «Калтанский угольный разрез», АО «Разрез Распадский») достаточно для создания устойчивых растительных сообществ на нарушенных территориях. В лесостепной

подзоне Кузбасса наблюдаются другие климатические условия. Можно отметить, что на рассматриваемой территории наблюдается дефицит атмосферных осадков. Среднеголетняя сумма биологически активных температур выше 10 °С на естественных территориях является достаточной для благоприятного развития почвенного и растительного покрова, отмечается богатое видовое разнообразие фитоценозов.

В четвертой главе работы представлены исследования почвенного покрова горно-таежной, лесостепной подзоны Кузбасса, основных вскрышных и вмещающих пород, отходов углеобогащения. На основании полученных данных выявлено, что по запасам ПСП горно-таежная подзона является остродефицитной. Кроме того, почвы сформированы под пологом черневой тайги с сильно всхолмленным, практически горным рельефом, имеют маломощный профиль, поэтому их селективно не снимают и не используют для создания верхнего, корнеобитаемого слоя на техногенных ландшафтах при проведении рекультивации нарушенных земель. Потенциально плодородных пород (покровных суглинков), обладающих благоприятными свойствами для развития растительного покрова, в районе Алардинского месторождения достаточно для реализации разных целей рекультивации нарушенных земель. В районе расположения АО «Разрез Распадский» и других прилегающих территорий угледобывающих предприятий наблюдается острый дефицит ППП. Почвенный покров в лесостепной подзоне Кузбасса представлен самыми ценными почвами – черноземами выщелоченными. Результаты научных данных и исследований почвенного покрова изучаемой территории показали, что по запасам плодородного слоя почвы исследуемый район является достаточным для создания техноземов и осуществления любых целей рекультивации земель. С целью научного обоснования эффективных решений проблемы восполнения недостатка литогенных ресурсов (ПСП и ППП (покровные суглинки)) для экологически эффективной рекультивации нарушенных земель и рационального использования техногенных ресурсов для создания устойчивого, экологически безопасного рельефа были проведены лабораторные комплексные исследования. На основании результатов исследований выявлено, что во всех четвертичных отложениях, независимо от горизонта залегания пород, преобладают кварц и глинистые минералы (гидрослюда, гидромусковит, хлорит, смешаннослойные минералы и минералы монтмориллонитовой группы), имеющие высокую дисперсность, значительную поглотительную способность, что оказывает существенное влияние на гидрофизические свойства, гидрофильность, а именно способность создавать «депо» доступной влаги для растений; это благоприятно сказывается на водообеспечении фитоценозов. На основании результатов комплексных исследований вскрышных и вмещающих пород показано, что основными критериями применимости пород для биологической рекультивации земель (создания техноземов), которые обеспечивают стабильное развитие растительного покрова, процессов почвообразования и обладают потенциалом к закреплению органического вещества (гумуса) в почвенном профиле, являются следующие величины: содержание глинистых минералов, фракций физической глины и мелкозема, основных элементов питания в доступной форме для растений; благоприятный показатель pH; плотность пород. В соответствии с критериями пригодности вскрышные и вмещающие породы ранжированы на категории. Категория пригодности пород показывает наилучшие литогенные ресурсы для рекультивации земель (таблицы 1 и 2).

Таблица 1 – Разновидности вскрышных пород по основным агрохимическим показателям для горно-таежной подзоны Кузбасса

Месторождение	Горизонт/ глубина отбора проб	Органический углерод, %	Азотобий (N), %	Подвижный фосфор (P ₂ O ₅), мг/кг	Подвижный калий (K ₂ O), мг/кг
Группа пригодности для создания техноземов – пригодные (ППП – четвертичные отложения I категории)					
<i>Четвертичные отложения (покровные суглинки)</i>					
Распадское месторождение*	до 0,7 м от ЗП	1,3 – 1,6	0,15 – 0,19	146,0 – 411,0	213 – 235
Алардинское месторождение*	до 2,0 м от ЗП	1,0 – 1,4	0,08 – 0,11	141,0 – 160,0	125 – 142
Группа пригодности для создания техноземов – пригодные (ППП – четвертичные отложения II категории)					
Целесообразно использовать при дефиците пригодных вскрышных пород (четвертичные отложения I категории)					
<i>Четвертичные отложения (смесь суглинков с включением слабоокатанной гальки, щебня коренных пород и выветрелого песчаника)</i>					
Распадское месторождение*	до 3,0 – 5,0 м	0,8 – 1,5	0,14 – 0,16	88,4 – 124,0	132 – 229
Связные сцементированные и несцементированные осадочные породы, группа пригодности для создания техноземов – малопригодные и непригодные					
<i>Переслаивание песчаника и алевролита</i>					
Распадское месторождение**	+200	2,6 – 3,1	0,12 – 0,19	41,2 – 46,1	237 – 285
<i>Песчаник</i>					
Алардинское месторождение***	+320	3,7 – 3,8	0,05 – 0,07	Менее 12,5	129 – 144
<i>Алевролит</i>					
Алардинское месторождение***	+300	1,7 – 2,6	0,13 – 0,15	41,4 – 46,7	244 – 248
<i>Аргиллит карбонатно-глинистый с примесью углистого вещества</i>					
Распадское месторождение**	+100	4,8 – 5,4	0,14 – 0,16	48,6 – 51,5	279 – 294

П р и м е ч а н и е: * – четвертичные отложения; ** – отложения кольчугинской серии пермского возраста; *** – отложения балахонской серии пермского возраста.

Таблица 2 – Разновидности вскрышных пород по основным физико-химическим показателям для горно-таежной подзоны Кузбасса

Месторождение	Горизонт/ глубина отбора проб	Средняя плотность, г/см ³	Минеральный состав (содержание глинистых минералов), %	Доля фракций диаметром (мм) менее 0,01 %/ доля фракций диаметром (мм) менее 1 %	Ёмкость катионного обмена, мг- экв/100 г	Водный рН	Общая сумма растворимых в воде веществ (сухой остаток), %
Группа пригодности для создания техноземов – пригодные (ППП - четвертичные отложения I категории)							
<i>Четвертичные отложения (покровные суглинки)</i>							
Распадское месторождение*	до 0,7 м от ЗП	1,71	Гидромусковит – 28; смешаннослойные гидрослюда- монтмориллонит – 10; хлорит – 8	51 – 68/ 100	24 – 27	6,9 – 7,1	0,07
Алардинское месторождение*	до 2 м от ЗП	1,77	Гидрослюда – 28; монтмориллонит – 10	44 – 57/ 100	23 – 28	6,7 – 7,1	0,03
Группа пригодности для создания техноземов – пригодные (ППП – четвертичные отложения II категории)							
Целесообразно использовать при дефиците пригодных вскрышных пород (четвертичные отложения II категории)							
<i>Четвертичные отложения (смесь суглинков с включением слабоокатанной гальки, щебня коренных пород и выветрелого песчаника)</i>							
Распадское месторождение*	от 3 до 5 м от ЗП	1,94	Гидромусковит – 28; смешаннослойные гидрослюда- монтмориллонит – 16; хлорит – 10	34 – 36/ не менее 50,0	21 – 23	6,8 – 7,2	0,04
Связные сцементированные и несцементированные осадочные породы, группа пригодности для создания техноземов – малопригодные и непригодные							
<i>Песчаник</i>							
Распадское месторождение**	+500	2,41	Гидромусковит – 18; смешаннослойные гидрослюда-монтмориллонит – 7 (минералы в виде цемента)	–	5,2 – 6,1	6,8 – 7,1	0,08

Продолжение таблицы 2

<i>Песчаник</i>							
Алардинское месторождение***	+375	2,38	Гидрослюда и хлорит – 29 (минералы в виде цемента)	–	5,1 – 6,5	6,7 – 6,8	0,07
<i>Алевролит</i>							
Распадское месторождение**	+400	2,44	Не определен	–	5,1 – 7,0	8,5 – 8,7	0,09
<i>Алевролит</i>							
Распадское месторождение**	+450	2,39	Не определен	–	5,3 – 6,8	8,3 – 8,6	0,08
<i>Переслаивание песчаника и алевролита</i>							
Распадское месторождение**	+300	2,60	Не определен	–	4,2 – 5,6	8,2 – 8,4	0,09
<i>Переслаивание песчаника и алевролита</i>							
Распадское месторождение**	+200	2,61	Гидрослюда и хлорит – 28 (минералы в виде цемента)	–	4,2 – 5,5	8,7 – 9,1	0,10
<i>Песчаник</i>							
Алардинское месторождение***	+320	2,47	Не определен	–	4,1 – 7,1	8,2 – 8,7	0,08
<i>Алевролит</i>							
Алардинское месторождение***	+300	2,60	Не определен	–	4,8 – 6,1	8,2 – 8,5	0,09
<i>Аргиллит карбонатно-глинистый с примесью углистого вещества</i>							
Распадское месторождение**	+100	2,67	Гидрослюда и хлорит – 34	–	12,8 – 14,0	8,6 – 8,9	0,10

П р и м е ч а н и е: * – четвертичные отложения; ** – отложения кольчугинской серии пермского возраста; *** – отложения балахонской серии пермского возраста.

Таким образом, результаты исследований показали, что наилучшими литогенными ресурсами для биологической рекультивации земель и создания искусственных почв (техноземов) на поверхности техногенных ландшафтов в горно-таежной подзоне Кузбасса являются ПСП и ППП (четвертичные отложения I категории, покровные суглинки). При дефиците четвертичных отложений I категории для создания искусственных почв (техноземов) целесообразно использование ППП (четвертичных отложений II категории, смесь суглинков с включением слабоокатанной гальки, щебня коренных пород и выветрелого песчаника). Содержание валовых и подвижных форм токсичных элементов во всех исследуемых образцах находится в концентрациях ниже ПДК, ОДК и не превышает нормируемых показателей; также этот факт подтверждается результатами биотестирования с разными тест-объектами: определение токсичности с использованием в качестве тест-объекта ракообразных *Daphnia magna* Straus и водорослей *Scenedesmus quadricauda*.

Результаты исследований состава свежих отходов с обогатительной фабрики показали, что они представлены смесью из породы после углеобогащения и отходами флотационного обогащения (кек). По содержанию основных элементов питания азота, калия и фосфора наилучшие показатели выявлены в породе после углеобогащения. В отходах углеобогащения реакция среды щелочная, немного превышает 10,0 – 10,1 ед. Величина pH обусловлена минералогическим составом породы.

Из результатов исследований элементов, входящих в группу тяжелых металлов, в отходах углеобогащения установлено, что валовые концентрации элементов (ванадия, меди, хрома, свинца, никеля, кадмия, цинка, ртути, сурьмы, кобальта, марганца, молибдена) не превышают ПДК и ОДК для почв. Содержание элементов в подвижных формах (кобальт, марганец, медь, никель, свинец, цинк) не превышает нормируемых показателей ПДК.

На основании результатов исследований оценки экологической опасности отходов углеобогащения с использованием методов биотестирования с разными тест-объектами установлено, что водная вытяжка из свежих отходов углеобогащения не оказывает токсического действия на живые организмы.

Таким образом, результаты лабораторных исследований свежих отходов углеобогащения показывают, что основными лимитирующими показателями использования отходов для биологической рекультивации земель, а именно для создания искусственных почв (техноземов), является высокая плотность и щелочная реакция среды.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований технологии рекультивации участков, созданных в процессе ведения горных работ (селективного отвалообразования), и оценка их экологической эффективности восстановления растительного и почвенного покрова.

Почвенно-экологическое состояние (ПЭС) рекультивированных участков оценивали в соответствии с профильно-генетической классификацией почв техногенных ландшафтов. Дополнительно в работе была выполнена количественная диагностика почвенно-экологического состояния исследуемых участков рекультивации на основе бонитировочного подхода. Почвенно-экологическое состояние участков рассчитывали по формуле (В.А. Андроханов, В.М. Курачев):

$$\text{ПЭС}_{6.6.} = B_{\pi} K_{\sigma}, \quad (1)$$

где B_n – балл бонитета фоновой почвы, составляет 100; K_c – коэффициент специфичности свойств исследуемых почв по отношению к свойствам зональной ненарушенной почвы, доли ед.

В проведенных расчетах коэффициент специфичности представлен в процентах, балл бонитета эмбриоземов равен коэффициенту специфичности в процентах. Коэффициент специфичности почвы определяется по основным почвенным показателям: содержание физической глины ($K_{с.ф.г.}$), плотность сложения субстрата ($K_{с.п.}$), содержание гумуса ($K_{с.гум.}$). Если исследуемые участки находятся на склоне или ровной поверхности, необходимо учитывать коэффициент специфичности рельефа ($K_{с.рел.}$). Чем меньше почвенные показатели отличаются от свойств естественных почв, тем больше значение K_c и выше ПЭС.

На основании результатов исследований показано, что сохранение и рациональное использование литогенных ресурсов в процессе ведения горных работ для рекультивации земель, а именно использование селективного отвалообразования и формирование искусственных почв (техноземов) из литогенных ресурсов ППП (четвертичных отложений I категории) с учетом критериев пригодности пород, обеспечивающих почвенно-экологическую эффективность рекультивации, а также создание благоприятного ландшафта на поверхности отвала (мелкобугристого слабонаклонного рельефа на относительно ровной площадке) способствуют устойчивому развитию фитоценозов на участках рекультивации и укоренному почвообразованию. Это диагностируется улучшением почвенно-экологического состояния и уровнем сингенетического развития растительного и почвенного покрова техногенных ландшафтов. Из результатов исследования следует, что техноземы, сформированные с использованием покровных суглинков, за 48-летний период под воздействием процессов почвообразования в естественных условиях трансформировались в ЭГА (участок 1 К). Результаты исследования почвенного покрова в динамике (13 лет) показали, что благодаря хорошему развитию растительного покрова (проективное покрытие 95 %, видовой состав растительности представлен 27 видами высших сосудистых растений) происходит накопление органического углерода, общего азота и элементов питания. Отмечается увеличение органического углерода по всему почвенному профилю, максимальный прирост фиксируется в слое 0 – 5 см, наблюдается увеличение азота и доступных биогенных элементов для растений. Аккумуляция азота, элементов питания в верхнем слое обусловлена увеличением органического вещества, оптимальным содержанием фракции физической глины (49,8 %) и хорошей структурностью почвы (плотность сложения 1,1 г/см³) (рисунок 1). ЭГА по основным агрохимическим свойствам близки к естественным почвам.

Результаты исследования почвенного покрова через 13 лет на участке рекультивации № 2 К показали, что активное развитие фитоценозов (проективное покрытие 95 %, представлено 29 видами высших сосудистых растений) на поверхности молодых почв также способствовали накоплению органического углерода и элементов питания (таблица 3).

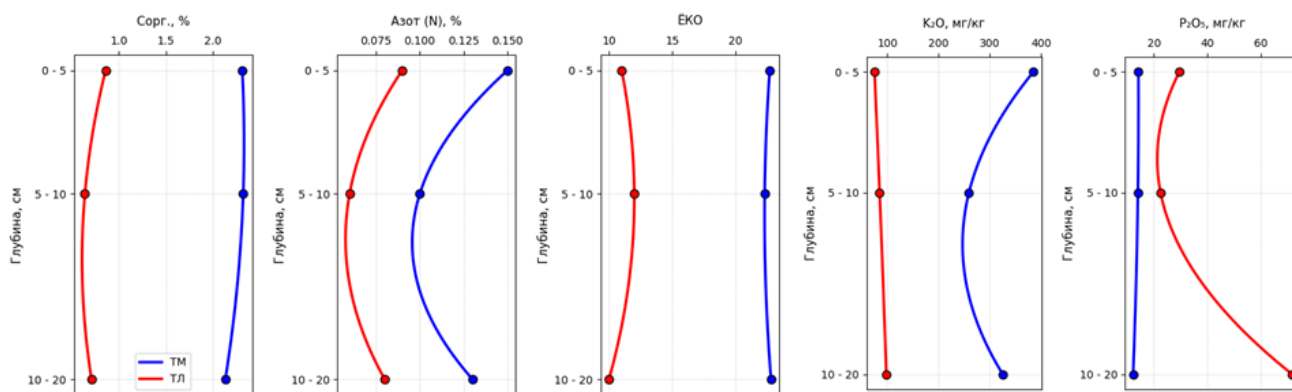


Рисунок 1 – Динамика основных агрохимических свойств ЭГА (48 лет)

Таблица 3 – Основные агрохимические свойства ЭД (13 лет)

Тип эмбриозема	Глубина, см	Сорг., %	Н _{общ} , %	Р ₂ О ₅ , мг/кг почвы	К ₂ О, мг/кг почвы
Дерновый	0 – 5	3,3	0,14	328	409
	5 – 10	2,5	0,11	161	143
	10 – 20	1,5	0,08	135	135

Показатели ПЭС участков после рекультивации земель характеризуются хорошим и очень хорошим состоянием от 79 % (ЭД) до 91 % (ЭГА) по отношению к естественным почвам. Таким образом, сохранение и рациональное использование литогенных ресурсов в процессе ведения горных работ (селективное отвалообразование) для формирования искусственных почв (техноземов), а также создание благоприятного ландшафта на поверхности отвалов обеспечило устойчивое развитие фитоценозов на участках рекультивации и укоренное почвообразование.

В шестой главе представлены результаты апробации в полевых условиях использования литогенных ресурсов для создания искусственных почв (техноземов) на экологическом полигоне с применением разных технологий рекультивации в составе из ПСП и четвертичных отложений I категории в смешанном виде, а также четвертичных отложений II категории (рисунок 2). Для определения направленности процессов почвообразования исследования физических свойств почв имеют важное научное значение. Из результатов исследования техноземов и эмбриоземов (в первый год исследования) следует, что в почвенном профиле присутствует значительное количество каменистых отдельностей и почвы сильно переуплотнены горнотранспортной техникой. Показано, что содержание физической глины от общей массы почвенного образца во всех техноземах и эмбриоземах разное, в поверхностном слое оно варьируется от 0,6 до 14,9 %. По гранулометрическому составу искусственные почвы характеризуются как песок связный.

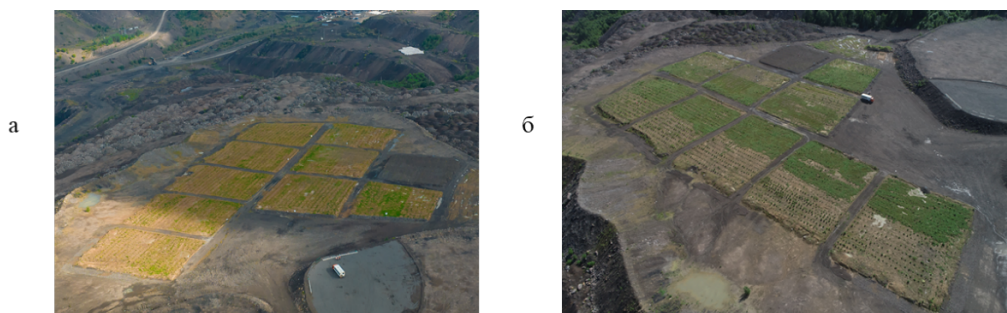


Рисунок 2 – Экологический полигон: а и б – 2024 и 2025 гг.

Результаты исследований плотности сложения (в слое 0 – 5 см) показывают, что плотность изменяется от 1,7 до 1,8 г/см³ и характеризуется как очень плотная почва, соответственно порозность почв оценивается как чрезмерно низкая.

Через два года функционирования почв были выявлены изменения компонентов твердой фазы. Практически во всех техноземах на участках произошло разуплотнение как в верхнем слое, так и в нижнем по всему профилю почв (рисунок 3).

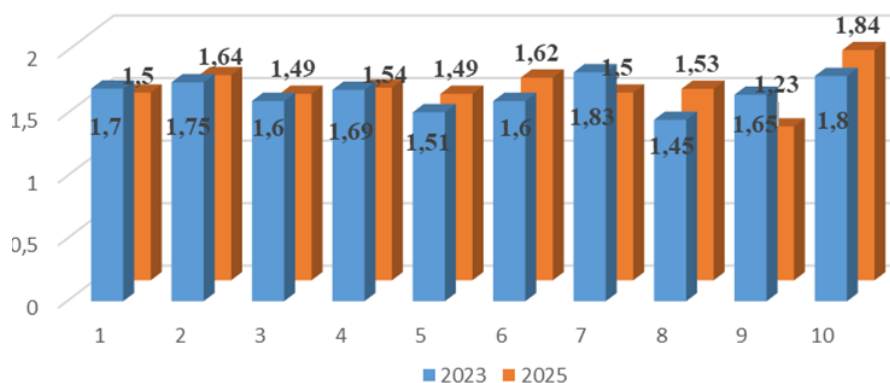


Рисунок 3 – Плотность сложения почв на экспериментальных участках в поверхностном слое (0 – 5 см): № 1 – 8 – ТЛ; № 9 – ТГН; № 10 – ЭИ

Особенно заметны изменения в ТГН (участок № 9), показатели плотности сложения в поверхностном слое (0 – 5 см) изменились с 1,65 до 1,23 г/см³. Показатели порозности почв закономерно увеличились. На некоторых участках полигона (участки №№ 5, 6 и 8) наблюдается уплотнение в верхних слоях, увеличение содержания каменистых фракций и снижение мелкозема.

Выявлено, что практически во всех техноземах по профилю за два года функционирования почв наблюдается существенное увеличение содержания мелкозема в почвенном профиле. В поверхностном слое (0 – 5 см) отмечается увеличение мелкозема в 1,13 – 2,6 раз. По результатам исследований гранулометрического состава отмечается изменение содержания физической глины в ТЛ (участок № 1) и ТГН (участок № 9). При пересчете на всю массу почвы содержание фракции физической глины по профилю возрастает в сравнении с первым годом функционирования техноземов (в слое 0 – 5 см составляет от 22,98 до 24,83 %). В соответствии с гранулометрическим составом поверхностные слои рассматриваемых техноземов характеризуются уже как суглинок легкий. В ЭИ (участок № 10), сложенных из смеси вскрышных и вмещающих пород, в профиле содержатся крупные каменистые отдельности (выше 90 %), а содержание

мелкозема составляет менее 10 % от общей массы почвенного образца; существенной динамики по изменению физических свойств не наблюдается.

Из результатов исследования химических и физико-химических свойств техноземов и эмбриоземов следует, что почвы по содержанию органического углерода характеризуются от низких до средних значений (рисунок 3). По распределению питательных веществ в доступной форме техноземы и эмбриоземы характеризуются следующими величинами: по содержанию фосфора от очень низких (ЭИ – до 14,1 мг/кг) до очень высоких (ТГН – до 208,8 мг/кг); по содержанию калия практически все почвы характеризуются средней и высокой обеспеченностью (рисунок 4). Также по всем техноземам наблюдаются благоприятные показатели реакции почвенного раствора – от нейтральной до слабощелочной. В эмбриоземах инициальная реакция почвенного раствора характеризуется как сильнощелочная, изменяется по почвенному профилю от 8,96 до 9,08.

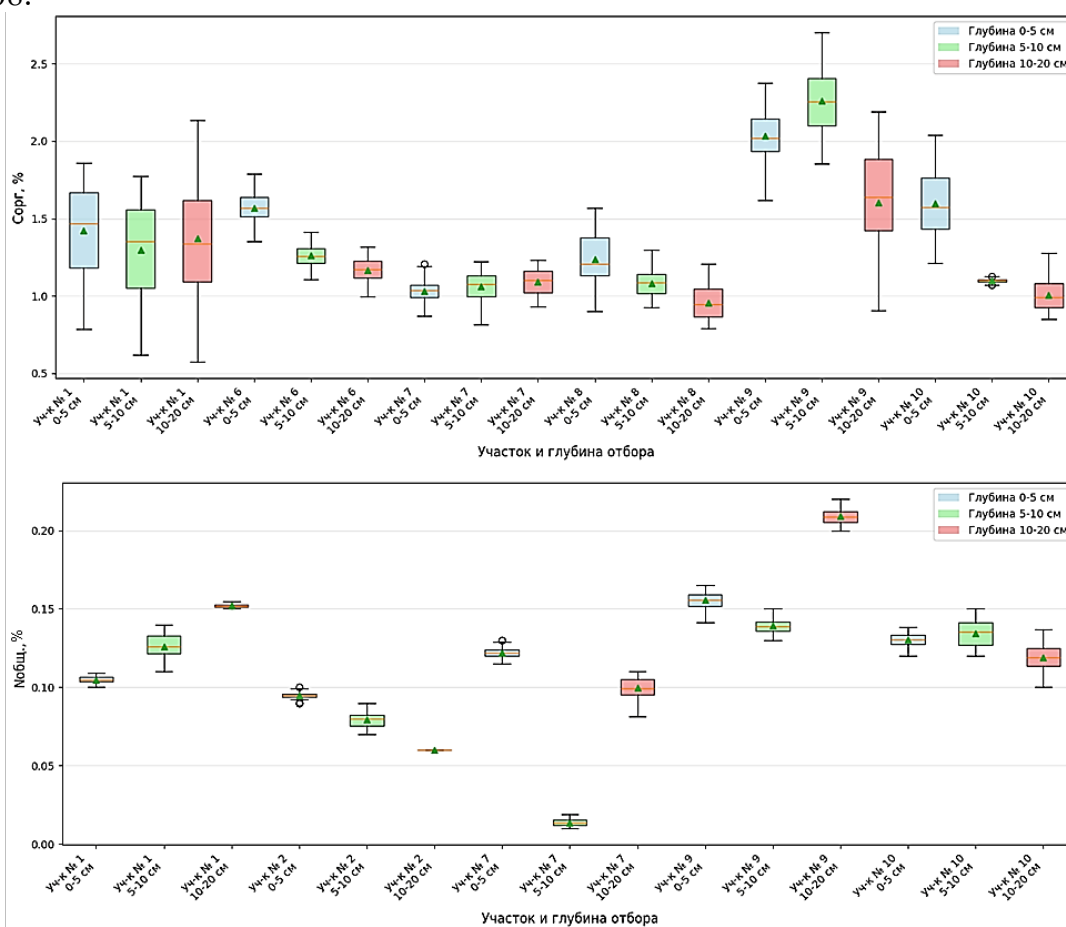


Рисунок 3 – Содержание основных агрохимических и физико-химических показателей почв (средние значения):
а и б – содержание C_{орг}, % и N_{общ}, %

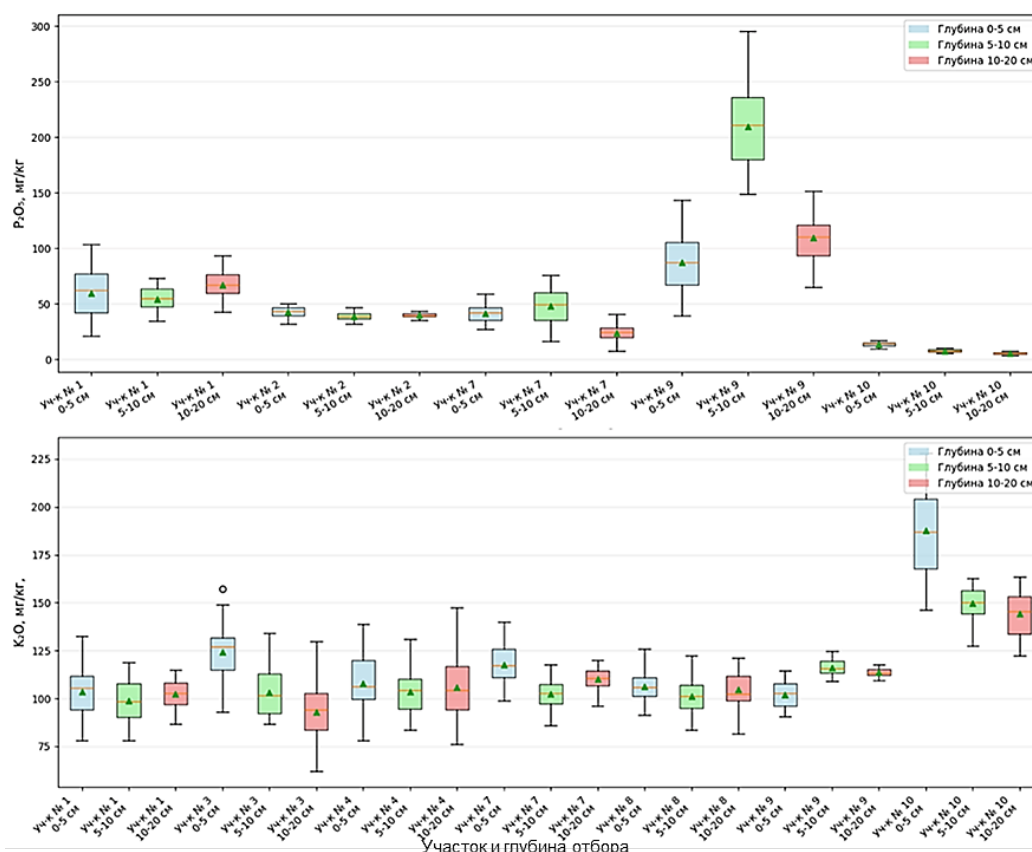


Рисунок – 4 Содержание основных биогенных элементов в почвах:
а и б – содержание $P_{\text{подв}}$ и $K_{\text{подв}}$.

В результате оценки влияния технологий рекультивации на тепловой режим искусственных почв, сформированных на поверхности полигона, было установлено, что все они характеризуются более высокой обеспеченностью в сравнении с естественными почвами. В сравнении с естественными почвами среднегодовая температура в поверхностных слоях выше на 1,4 – 3,7 °С.

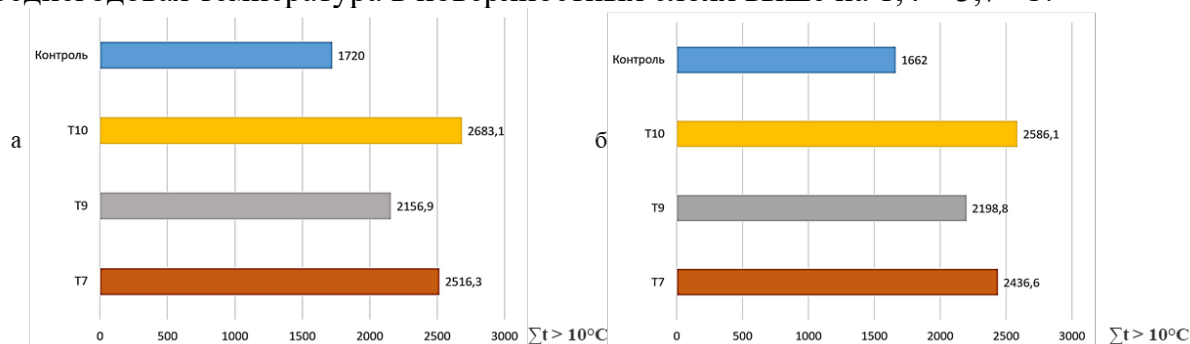


Рисунок 5 – Сумма биологически активных температур почв на глубине 5 (а) и 10 см (б)

Среднегодовая температура воздуха приземного слоя над полигоном выше на 1,2 °С, а в летний период выше на 3,4 °С, чем в аналогичных условиях естественных ландшафтов (рисунок 5). Сумма биологически активных температур ($\Sigma t > 10^\circ C$) в верхнем пятисантиметровом слое ТЛ (Т 7) и ЭИ (Т 10) варьируется в широких

пределах. Максимальные значения зафиксированы в ЭИ и составляют 2683,1 °С, что на 963 °С выше, чем в поверхностном слое естественных почв.

Минимальные (2156,9 °С) значения температуры установлены в ТГН (Т 9), данные значения приближены к температуре поверхностного слоя естественных почв. Результаты оценивания суммы биологически активных температур показали снижение ее значений с глубиной вниз по профилю. Максимальное снижение суммы биологически активных температур с глубиной вниз по профилю наблюдается в ЭИ (Т 10). Этот факт свидетельствует о сильном нагреве каменистой поверхности ЭИ в теплый период года. Установлено, что ЭИ в течение всего периода наблюдений за тепловым режимом имели положительные температуры. На тепловой режим ЭИ в летнее время оказывает существенное влияние высокая каменистость (содержание мелкозема в поверхностном слое не более 5 %); темно-серый цвет почв; минералогический состав (преобладание кварца); высокая плотность сложения (до 1,84 г/см³). Все перечисленные факторы влияют на нагрев поверхности почв и высокую теплопроводность. В течение всего вегетационного периода запасы влаги в ЭИ находились в диапазоне труднодоступной влаги ВЗ (влажность завядания) – ВРК (влажность разрыва капилляров), а в определенные периоды запасы влаги снижались до уровня ВЗ и были в недоступной форме для растений. Неблагоприятные физические свойства ЭИ приводят к значительному нагреву и сильному иссушению поверхностных слоев ЭИ, что впоследствии приводит к нарастанию ксероморфизма. Показано, что водный режим ТЛ, сформированных из четвертичных отложений II категории, практически весь вегетационный период находился в диапазоне легкодоступной влаги для растений в диапазоне НВ – ВРК, за исключением нескольких месяцев (июль и август) (рисунок 6).

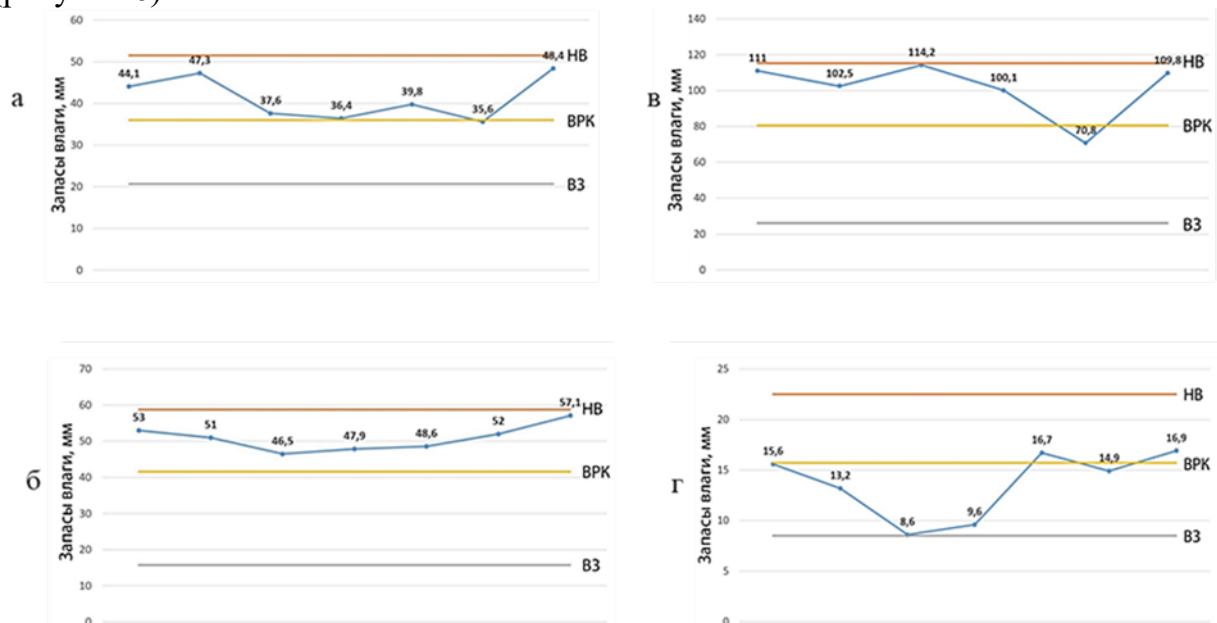


Рисунок 6 – Динамика влагозапасов в период с мая по сентябрь:
а – ТГН (Т 9); б – ТЛ (Т 8); в – естественные почвы; г – ЭИ (Т 10)

Слабое развитие растительности и значительный нагрев поверхности техноземов способствуют непродуктивной потере влаги. Несмотря на то, что в почвенном профиле ТЛ низкое (от 14 до 63 %) содержание мелкозема, запасы влаги в течение всего периода не опускались ниже предела влажности завядания и были доступны для растений. Этот факт свидетельствует о положительном

влиянии минералогического (наличие глинистых минералов) и гранулометрического (содержание фракции физической глины) составов на водный режим техноземов (рисунок 7).

На рисунке 8 показана зависимость доступных запасов влаги в профиле рекультивированных почв от содержания фракции физической глины. Полученные данные свидетельствует о решающем влиянии минералогического (наличие глинистых минералов) и гранулометрического (содержание фракции физической глины) составов на водный режим рекультивационных участков.

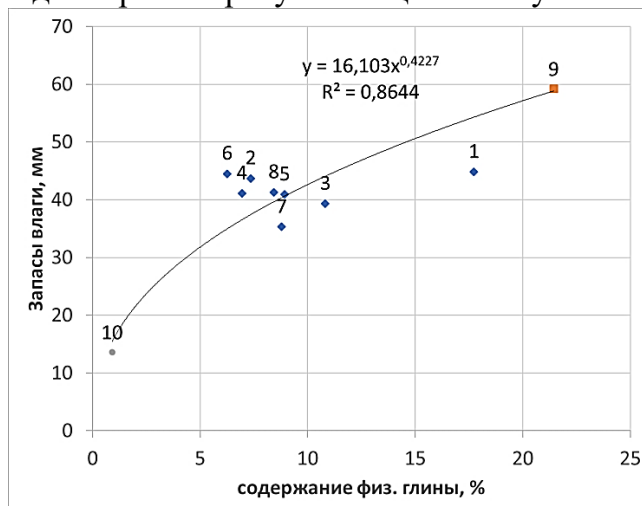


Рисунок 7 – Зависимость порозности почв от плотности сложения (участки № 1 – 8 – ТЛ; № 9 – ТГН; № 10 – ЭИ)

На основании результатов оценки почвенно-экологического состояния участков полигона установлено, что за трехлетний период функционирования техноземов почвенно-экологическое состояние по отношению к естественным почвам изменилось в лучшую сторону и варьирует в диапазоне от 22 до 50 %. Прежде всего, это обусловлено тем, что техноземы сформированы из литогенных ресурсов, в которых активно происходит процесс трансформации твердой фазы почвы, особенно в поверхностном слое. Уже в первые годы функционирования молодых почв наблюдается изменение плотности сложения почвенного профиля за счет процессов физического выветривания и активного развития растительного покрова, а также увеличения фракции мелкозема и физической глины. Более благоприятным состоянием (в порядке убывания) обладает участок, где почвенный покров представлен ТГН (участок № 9), корнеобитаемый слой которого сложен из плодородного слоя почвы и четвертичных отложений I категории (ПЭС – 50 %) (рисунок 8). Наибольшие показатели ПЭС достигаются при сильном увеличении содержания физической глины в почвах (участки № 1 и 9) и/или при снижении плотности сложения.

В связи с высокой каменистостью почв, незначительным содержанием фракции физической глины и, соответственно, слабым развитием растительного покрова на участке № 10 (ЭИ) почвенно-экологическое состояние оценивается как низкое (16 %), и оно не изменилось за время исследований (рисунок 8). В среднем изменения значений ПЭС рекультивированных почв за два года увеличились на 26,3 %. Однако на некоторых участках отмечается снижения ПЭС, что связано с увеличением каменистости почв в поверхностном слое.

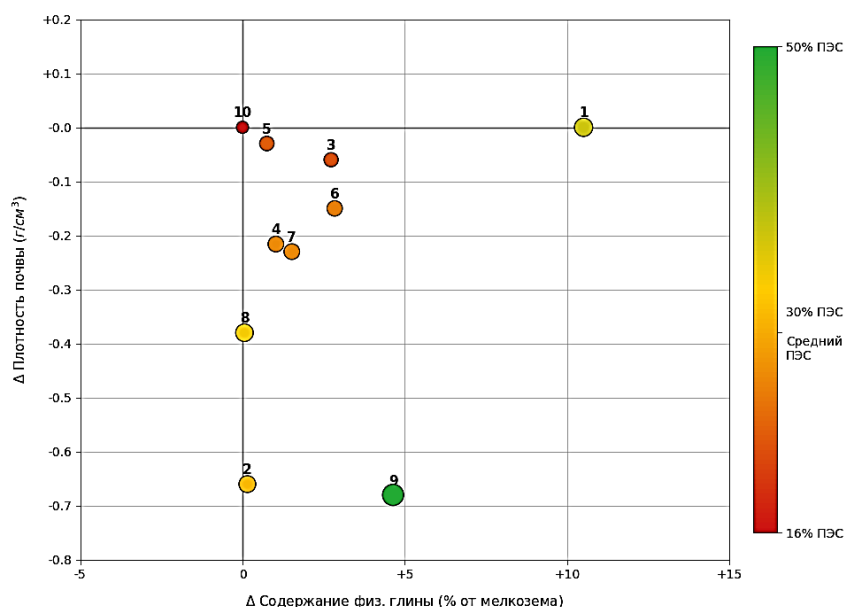


Рисунок 8 – Зависимость изменения физических свойств почв и ПЭС рекультивированных участков в 2023–2025 гг.

Анализ развития фитоценозов на экспериментальных участках экологического полигона показал, что у большинства высаженных растений наблюдается в 2025 г. годичный прирост побегов, свидетельствующий об адаптации растений к новым условиям среды. Однако в период адаптации (первый год после посадки (2023–2024 гг.)), в 2024 г., по сравнению с 2023 г. отмечается у некоторых видов незначительное снижение средней высоты, обусловленное гибелью некоторых экземпляров или вымерзанием верхушек у некоторого количества более рослых экземпляров. Помимо высаженных древесных и кустарниковых видов растений за два года после проведения высадки растений на большинстве участков отмечается активная стадия восстановления растительного покрова.

Проективное покрытие травянистыми растениями на большинстве участков в среднем увеличилось с менее 1 % в 2023 г. до 10 – 25 % в 2024 г. и 55 – 75 % в 2025 г., исключение составляет участок № 10, характеризующийся проективным покрытием в 2024 году не более 1 %, а в 2025 году не более 2 %. В видовом разнообразии (рисунок 10) также отмечаются изменения в 2023 г. (варьировалось от 3 до 11 видов растений), в 2024 г. – от 23 до 37, а в 2025 г. – от 27 до 53 видов; также исключением являются участки № 10 (минимальное количество видов растений возросло с 6 до 8) и № 9 (максимальное количество видов растений возросло с 35 до 52). Следует отметить, что количество видов существенно не изменилось и общее значение увеличилось несущественно, однако изменился сам видовой состав, также в структуре растительного покрова прослеживается уменьшение доли однолетних, а также сорных видов растений (рисунок 9). Это может свидетельствовать о том, что идет адаптация фитоценоза, выпадают неустойчивые, а появляются более приспособленные к этим условиям виды растений.

Наилучшие показатели развития растительности на рекультивированных участках получены на участке № 9 (ТГН), который характеризуется наибольшим видовым разнообразием (52 вида), минимальной долей сорных видов (15 %), а также наибольшей зеленой фитомассой травянистого яруса (59,2 ц/га).

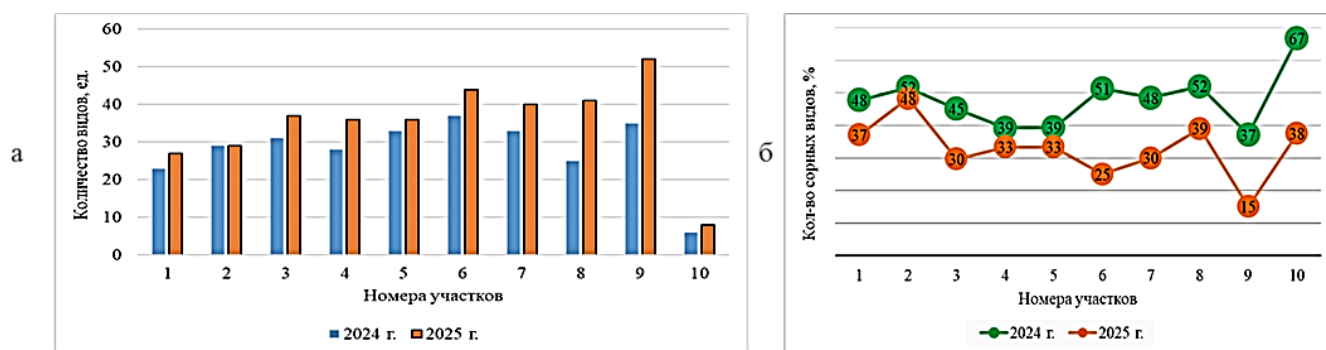


Рисунок 9 – Количество (а) и доля (б) сорных видов растений на участках по годам

В 2025 г. участок № 10 (ЭИ) характеризуется очень низким видовым разнообразием (8 видов), малым проективным покрытием, не превышающим 2 % и, как следствие, низкой надземной продуктивностью травянистого яруса (0,4 ц/га), что обусловлено высокой каменистостью субстрата и жестким гидротермическим режимом почв. Полученные новые данные были использованы для расчета содержания запасов углерода на рекультивированных участках с целью оценки перспектив использования нарушенных земель для формирования экологических полигонов для долгосрочного депонирования углерода в восстанавливающихся экосистемах. Результаты исследований показали, что общий запас углерода на экспериментальных площадках в 2025 г. составляет 41,6 т/га.

Таким образом, формирование искусственных почв (техноземов) из ПСП и четвертичных отложений I категории в смешанном виде является наиболее экологически эффективной технологией рекультивации земель в горно-таежной подзоне Кузбасса. Установлено, что уже в первые годы функционирования рекультивированных участков по рассматриваемой технологии наблюдается активное восстановление фитоценозов, участок характеризуется наибольшим видовым разнообразием (52 вида), минимальной долей сорных видов растений (15 %), наибольшей продуктивностью (59,2 ц/га), почвенно-экологическое состояние оценивается как благоприятное. Показано, что при дефиците ПСП и четвертичных отложений I категории возможно применять менее благоприятные породы (четвертичные отложения II категории) для создания техноземов. При этом почвенно-экологическое состояние участков характеризуется как удовлетворительное (ПЭС от 22 до 37 % по отношению к естественным почвам).

Также в шестой главе представлены результаты использования техногенных ресурсов (золашлаковых материалов, окисленных каменных углей) для рекультивации земель. Оценка биологической продуктивности почвогрунтов с использованием золашлаковых материалов, окисленных каменных углей, полученных Г. Шайхислам, показала, что внесение 10 % почвогрунтов в состав четвертичных отложений существенно повысило всхожесть семян, а также увеличило высоту стебля растений и длину корневой системы. Анализ результатов апробации модифицированных техноземов, сформированных из этих материалов в полевых условиях, показал улучшение агрохимических свойств в корнеобитаемом слое ТМ по сравнению с отсыпанным суглинком в ТЛ (контроль), отмечается увеличение содержания органического углерода, общего азота и доступного фосфора для растений (таблица 4). В слое 0 – 5 см фиксируется высокое содержание подвижного калия. Емкость катионного обмена (ЕКО) изменяется незначительно и с глубиной варьируется от 22,7 до 22,8 мг-экв/100 г. (таблица 4).

Таблица 4 – Основные агрохимические показатели

Тип эмбриоземов	Глубина, см	C _{орг.} , %	N _{общ.} , %	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг	ЁКО, мг- экв/100 г	pH _{водн.}
Технозем модифицированный (ТМ)	0 – 5	2,3	0,15	14,2	385	22,7	8,4
	5 – 10	2,3	0,10	14,0	259	22,3	8,4
	10 – 20	2,1	0,13	12,2	325	22,8	8,4
Технозем литогенный (ТЛ)	0 – 5	0,8	0,09	29,5	75	11,0	6,8
	5 – 10	0,6	0,06	22,4	85	12,0	6,6
	10 – 20	0,7	0,08	71,5	98	10,0	7,0

Расчетная оценка почвенно-экологического состояния участка с ТМ более благоприятная по сравнению с ТЛ (контроль) и составляет 44 %. Применение золошлаковых материалов и окисленных каменных углей при рекультивации земель способствует более интенсивному развитию растительности на ТМ. В 2023 г. зеленая фитомасса травянистого яруса на участке с ТМ составляла 6,2 ц/га, в 2025 г. – 25,4 ц/га. По сравнению с ТЛ (контроль) продуктивность травянистого яруса увеличилась практически в 4 раза. Также развитие фитоценозов на поверхности ТМ способствовало сглаживанию среднемесячных температур в почвах в летний период.

Таким образом, создание ТМ на поверхности техногенных ландшафтов на основе техногенных ресурсов для рекультивации нарушенных земель будет способствовать накоплению органического углерода, повышению ЁКО в почвах и развитию растительного покрова. Следует отметить, что такой способ рекультивации нарушенных земель особенно актуален для территорий с дефицитом плодородного слоя почвы, четвертичных отложений I категории (покровных суглинков), низким содержанием органического углерода в естественных почвах, четвертичных отложениях, а также в районах с избыточным увлажнением, так как за счет увеличения органического углерода и ЁКО элементы питания растений будут удерживаться и не будут вымываться в нижние слои почв.

В седьмой главе представлены результаты многолетних исследований развития растительного и почвенного покрова на участках рекультивации с использованием разной технологии, сформированных на отходах углеобогащения, выполнена оценка их влияния на фитоценоз и молодые почвы и показана возможность использования отходов углеобогащения как техногенного ресурса для экологически безопасного размещения в выработанных пространствах с последующей рекультивацией. В результате выполненных исследований установлено, что на участках с рекультивированными почвами ТГН с формированием корнеобитаемого слоя из смеси ППП и ПСП (участки № 3 и 4) и ТГД с послойным нанесением на поверхность отвала ППП и ПСП (участок № 5) сформировался устойчивый растительный покров. Показано, что на этих участках формируются благоприятные условия в корнеобитаемом слое, что способствует устойчивому восстановлению растительного покрова и процессов почвообразования. Развитие травянистой растительности на рекультивированных участках восстанавливает почвенное плодородие, что фиксируется по накоплению элементов питания и улучшению физических свойств рекультивационного слоя. Максимальные значения содержания гумуса и элементов питания фиксируются в верхнем горизонте ТГН (участок № 4) и ТГД (участок № 5). Благоприятный

минералогический и гранулометрический составы в этих почвах способствуют не только накоплению органического вещества, но и увеличению ёмкости катионного обмена. Поглотительная способность техноземов приближена к естественным почвам (таблица 5). Содержание органического углерода, общего азота и элементов питания в верхнем слое почвенного профиля ТЛ с отсыпкой суглинков (участок № 2) незначительное и варьируется с глубиной (таблица 5). Этот факт обусловлен небольшой мощностью отсыпанного слоя на поверхности участка (не более 25 см) и слабым развитием растительного покрова, дерновый процесс слабо развит (таблица 8).

Таблица 5 – Содержание основных агрохимических и физико-химических показателей почв

Тип почвы	Горизонт/глубина, см	C _{орг.} , %	Гумус, %	N _{общ.} , %	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг	ЁКО, мг-экв/100 г	Плотность, г/см ³	Физ. глина (< 0,01 мм), %
Т 1 ЭИ	0 – 8	16,3	–	0,04	29,8	170	14,5	1,56	16,68
	C ₂ /8 – 20	26,5	–	0,06	4,4	170	13,1	1,87	20,91
Т 2 ТЛ	I/0 – 6	1,3	2,3	0,06	1,6	70	14,5	1,38	23,09
	II/6 – 12	1,2	2,0	0,04	1,1	65	13,0	1,42	27,62
	D ₁ /12 – 28	2,6	4,5	0,05	5,4	65	9,18	2,22	20,21
	D ₂ /28 – 45	9,1	–	0,02	6,5	90	8,71	2,34	28,44
Т 3 ТГН	A ₁ /0 – 10	2,8	4,8	0,32	20,7	130	22,3	1,24	56,00
	II/20 – 30	2,6	4,5	0,24	11,4	100	23,5	1,38	55,49
	D ₁ /30 – 40	5,7	–	0,16	8,7	100	17,7	2,06	47,73
	D ₂ /40 – 50	6,4	–	0,02	0,5	130	14,1	2,10	39,84
Т 4 ТГН	A _д /0 – 5	4,8	8,3	0,57	47,0	270	28,4	1,27	57,43
	A ₁ /5 – 18	3,7	6,4	0,43	59,6	125	25,5	1,35	56,67
	D ₁ /20 – 30	20,1	–	0,06	8,5	180	9,13	2,10	49,11
Т 5 ТГД	A _д /0 – 11	4,7	8,1	0,38	45,8	185	30,0	1,20	57,68
	II/20 – 30	1,1	1,9	0,14	1,1	75	19,4	1,39	51,90
	D ₁ /32 – 50	11,2	–	0,03	3,3	130	11,5	2,03	49,84
Т 6 ЧВ (контр.)	A/5 – 15	5,8	10,0	0,73	47,4	170	37,2	1,18	57,99
	A/17 – 28	5,7	9,8	0,50	58,3	100	27,4	1,34	56,62
	AB/28 – 35	2,4	4,1	0,34	34,8	90	28,5	1,42	52,72
	B/35 – 50	1,1	1,9	0,18	89,9	65	24,1	1,46	51,08

Установлено, что на ЭИ (участок 1) на поверхности отходов углеобогащения (без отсыпки потенциально плодородной породы и проведения биологической рекультивации) полностью отсутствуют макроморфологические признаки дифференциации почвенного профиля, проективное покрытие растительностью составляет не более 7 %, растения находятся в угнетенном состоянии. Такое состояние растительного покрова и молодых почв вызвано, прежде всего, высокой каменистостью субстрата, низким содержанием фракции физической глины, что определяет неблагоприятный тепловой и водный режимы, а также щелочной реакцией среды (pH 9,06 – 9,19).

Результаты исследований гидротермического режима показали, что все исследуемые рекультивированные участки, сформированные на отходах углеобогащения, в сравнении с естественными почвами характеризуются более высокой теплообеспеченностью. Показано, что сумма температур выше 10 °С в верхнем пятисантиметровом слое техноземов и эмбриоземов изменяется в

широком диапазоне. Максимальные значения зафиксированы в ЭИ (участок 1) и превышают 2500 °С. В ТЛ (участок 2) сумма температур выше 10 °С приближается к 2400 °С (рисунок 10). В ТГН (точка 4) корнеобитаемый слой сложен из смеси ППП и ПСП, сумма биологически активных температур ниже, она максимально приближена к таковой температуре зональных почв.

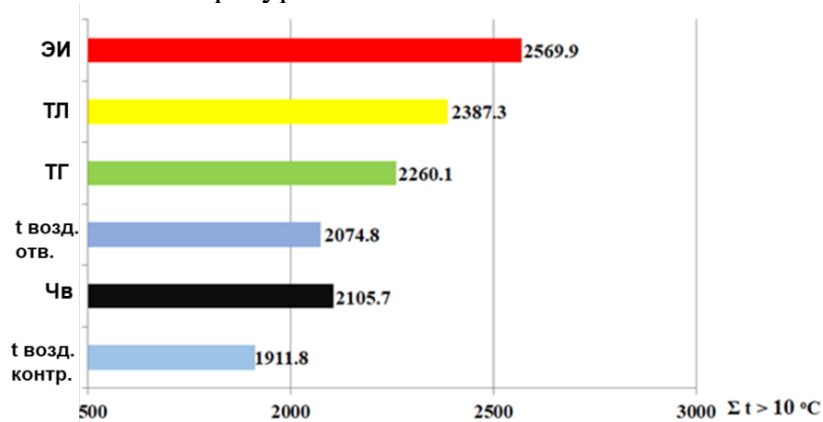


Рисунок 10 – Сумма температур выше 10 °С воздуха и почв на глубине 5 см

Следует особо отметить, что все рекультивированные участки с техноземами и эмбриоземом в зимний период времени с глубиной теплее, чем естественные почвы, однако мощность снежного покрова на рекультивированных участках значительно меньше, чем на участках с естественной растительностью. С одной стороны, отходы углеобогащения можно рассматривать как тепловые ресурсы рекультивации, что немаловажно для Кузбасса, где природно-климатические условия характеризуются дефицитом теплообеспеченности, с другой – высокая теплообеспеченность участков рекультивации на отходах углеобогащения может быть следствием окислительных процессов в теле внутреннего отвала, в результате которых выделяется тепло.

Анализ водного режима исследуемых почв на участках рекультивации показал значительные отличия рекультивированных участков от естественных почв. Это проявляется в дефиците влажности корнеобитаемого слоя, причем на участках № 1 (ЭИ, верхний слой отсыпан отходами углеобогащения) и № 2 (ТЛ, верхний слой отсыпан легкими супесями) в корнеобитаемом слое (0 – 20 см) дефицит влаги наблюдается на протяжении всего вегетационного периода. В ТГН (участок № 5) запасы влаги приближены к естественной почве. Таким образом, создание на поверхности отходов из гумусированного плодородного слоя почвы и ППП способствует улучшению почвенно-физических условий и водного режима исследуемых почв. Для получения высокой почвенно-экологической эффективности рекультивационных работ мощность отсыпанного слоя суглинистого состава (с фракцией физической глины не менее 50 %) в рассматриваемой природно-климатической зоне должна составлять не менее двух метров. Наблюдения за молодыми почвами и растительным покровом показали, что свойства корнеобитаемого слоя ТГН и ТГД постепенно приближаются к показателям зональных почв и растительных покровов, причем максимальная мощность верхнего слоя из ППП составляет всего 35 см, а слой из ПСП – не более 10 см (участок 5/Т 5, ТГД). Однако при такой мощности может произрастать ограниченный набор травянистых видов, устойчивый к засушливым почвенным условиям, поэтому для обеспечения водоудерживающей способности техноземов и

стабильного функционирования фитоценозов минимальная мощность отсыпанного слоя из суглинистого материала должна составлять не менее 0,8 м и не менее 0,2 м из плодородного слоя почвы (при наличии).

Для оценки влияния отходов углеобогащения (свежих и лежалых) на развитие растительного покрова и окружающую среду были проведены исследования ПАУ в техноземах и эмбриземах, сформированных на данных отходах. Результаты исследований позволили выявить особенности в распределении и аккумуляции ПАУ в свежих отходах углеобогащения (кек и пород после обогащения) и в молодых почвах, сформированных на лежалых отходах (рисунок 11).

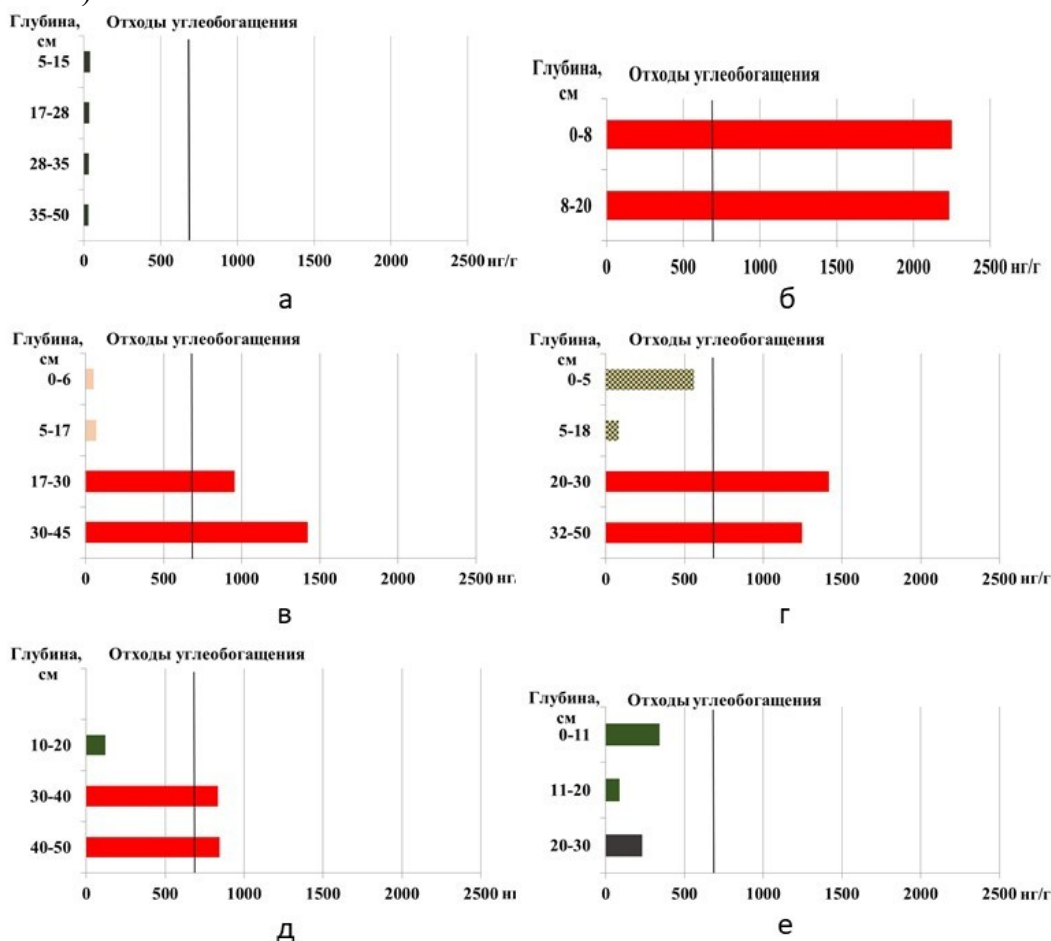


Рисунок 11 – Суммарное содержание ПАУ в верхней части профиля ЧВ (Т6) (а); ЭИ (Т1) (б); ТЛ (Т2) (в); ТГН (Т4) (г); ТГН (Т3) (д); ТГД (Т5) (е)

При этом в почвенных горизонтах, сформированных при отсыпке субстратов естественных почв, содержание полиаренов составляет 25,5 – 559,0 нг/г, в горизонтах D, сложенных отходами углеобогащения, составляет 831,6 – 2248,8 нг/г (рисунок 11). Наиболее активно эти процессы протекают в ЭИ (точка 1), где отходы углеобогащения экспонированы на поверхности. В меньшей степени выражены процессы высвобождения ПАУ в техноземах (особенно в ТГД), в которых отходы углеобогащения экранированы от поверхности слоями суглинистого (ППП) и гумусосодержащего (ПСП) материалов.

В составе полиаренов исследуемых образцов преобладают легкие 2- и 3-ядерные соединения. Доминирующим среди ПАУ в молодых почвах (техноземов и эмбриоземов), а также в отходах углеобогащения является нафталин, доля которого в техногенных почвах составляет 26,3 – 68,5 %.

Кластерный анализ, осуществляемый по наличию 19 индивидуальных ПАУ, входящих в список Европейского сообщества, позволил сгруппировать исследуемые объекты в зависимости от специфики процессов трансформации органического вещества в почвах. При этом обособление ЭИ обусловлено преобладанием процессов активной трансформации органического вещества отходов углеобогащения. Выделение в отдельные группы техноземов связано со снижением интенсивности этих процессов, а также возможным влиянием атмосферных источников ПАУ. Результаты анализа главных компонент показывают, что наиболее тесную положительную связь с первой главной компонентой имеют тяжелые (4 – 6-ядерные) ПАУ, а также нафталин. Вторая компонента надежно коррелирует с легкими (2 – 3-ядерными) соединениями и пиреном. Локализация областей проб исследуемых почв в пространстве главных двух компонент определяется, во-первых, характером процессов трансформации отходов углеобогащения; во-вторых, влиянием атмосферных источников ПАУ; в-третьих, происхождением и условиями хранения ПСП, используемого при формировании техноземов (рисунок 12).

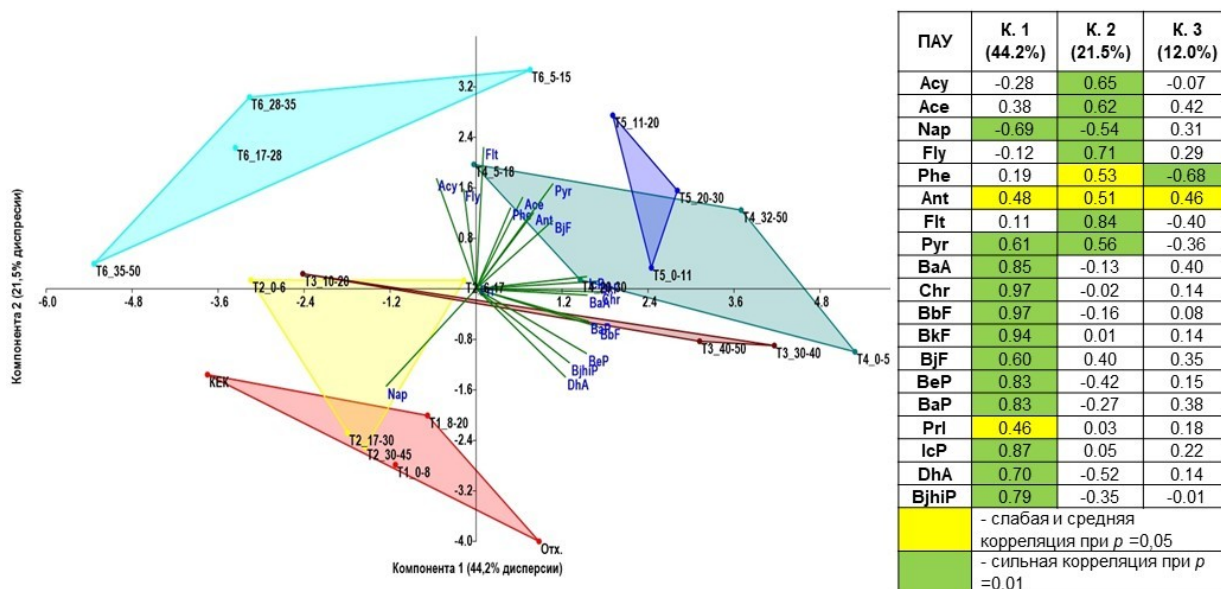


Рисунок 12 – Распределение объектов исследований в пространстве двух главных компонент

Оценка экологической безопасности исследуемых почв, проводимая с использованием подхода эквивалентов канцерогенности бенз(а)пирена (Б(а)Пэкв), показала, что все исследуемые почвы не являются токсичными. Величина Б(а)Пэкв техноземов и эмбриоземов изменяется в пределах 0,1 до 62,4 нг/г, что более чем на порядок ниже установленного безопасного уровня (600 нг/г).

Таким образом, рекультивация, осуществляемая при послойном нанесении на поверхность суглинистого (ППП) и гумусосодержащего (ПСП) материалов, способствует консервации отходов углеобогащения. Необходимо также отметить, что техногенное накопление ПАУ происходит не только в нижних частях профиля техноземов, но и на поверхности, где оно вероятнее всего связано с влиянием атмосферных источников ПАУ. Отходы углеобогащения целесообразно использовать как техногенный ресурс и размещать их в выработанном пространстве карьеров для создания благоприятного, устойчивого ландшафта. Технология создания техноземов из покровных суглинков и ПСП в послойном виде

на поверхности долговременных размещенных отходов препятствует возникновению негативных последствий в окружающей среде и способствует устойчивому развитию растительного и почвенного покрова.

По результатам многолетних полевых обследований растительного покрова на участках рекультивации, сформированных на отходах углеобогащения, в сравнении с естественным, ненарушенным участком, расположенным на близлежащей территории, было установлено, что участки (ТГН – участок № 3 (проективное покрытие равно 90 % с видовым разнообразием в 21 вид), № 4 (проективное покрытие равно 90 % с видовым разнообразием в 24 вида) и ТГД – участок № 5 (представлен 26 видами травянистых растений (незначительное увеличение количества видов по сравнению с 2020 г. – 18 видов) с проективным покрытием в 80 – 85 %) характеризуются интенсивно протекающими в них процессами восстановления растительного покрова; наблюдается постепенное увеличение доли аборигенных видов по отношению к рудеральным видам, а также постепенное увеличение видового разнообразия. Кроме того, данные участки по структуре надземной фитомассы характеризуются преобладанием мортмассы над зеленой фитомассой, что свидетельствует о формировании дернового горизонта. На участке № 1 (геоботаническое описание – ЭИ) за период 2020–2022 гг. наблюдается тенденция к незначительному увеличению видового разнообразия (с 20 до 23 видов с проективным покрытием не более 7 %).

Древесный и кустарниковый ярусы представлены несколькими экземплярами: клен американский (*Acer negundo* L.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), тополь черный (*Populus nigra* L., в 2022 г. не был встречен) и облепиха крушиновидная (*Hippophae rhamnoides* L.), а в травянистом ярусе – разнотравье рудеральных видов. Однако необходимо подчеркнуть тот факт, что все представленные на этом участке растения находятся в угнетенном состоянии.

Результаты оценки почвенно-экологического состояния участков показали, что все исследуемые участки можно разделить на три группы: с очень хорошим почвенно-экологическим состоянием, с удовлетворительным и неудовлетворительным состоянием. К первой группе относятся участки № 3 – 5 возрастом менее 20 лет с ТГН и ТГД (60 – 68 %), несмотря на то, что они имеют разную мощность отсыпанного корнеобитаемого слоя. Причем вариант с послойным размещением ПСП и ППП, несмотря на большую мощность нанесенного слоя, характеризуется меньшими показателями ПЭС, что обусловлено меньшим содержанием гумуса. В связи с малым содержанием гумусовых веществ в насыпном горизонте ТЛ (участок № 2), его малой мощностью нанесенного слоя из ППС и высокой плотностью субстрата, ПЭС характеризуется как удовлетворительное (39 %).

Самыми неблагоприятными свойствами и слабым развитием почвообразовательного процесса характеризуются ЭИ на участке № 1. Рассматриваемый участок представляет собой вариант, на котором была проведена грубая планировка поверхности без нанесения ПСП и ППС, а поверхностный субстрат представлен смесью из отходов углеобогащения. Здесь практически отсутствует растительность, ПЭС этого участка характеризуется как неудовлетворительное (26 %). Необходимо подчеркнуть, что это один из самых старых участков (более 10 лет после отсыпки). Поэтому можно предположить, что без проведения рекультивационных работ по улучшению агрофизических и

агрохимических свойств субстрата рассматриваемого участка его неблагоприятное ПЭС может сохраняться в течение длительного времени.

В восьмой главе представлены научно-технологические основы рационального использования природных и техногенных ресурсов для реализации экологически эффективных технологий рекультивации земель в экономике замкнутого цикла предприятий, которые учитывают специфику техногенных ландшафтов и влияние природно-климатических и литогенных факторов на скорость развития растительного и почвенного покрова.

Представлены способы сохранения литогенных ресурсов в процессе ведения горных работ, которые дополняют существующие способы (П.И. Томаков, В.С. Коваленко). Показано, что сохранить и рационально использовать литогенные ресурсы (ПСП, ППП) для создания техноземов на техногенных ландшафтах можно только в процессе ведения горных работ.

В работе предложено несколько способов сохранения и рационального использования литогенных ресурсов для рекультивации земель. Одним из наиболее экологически эффективных вариантов рационального использования ресурсов является формирование внешних отвалов с отсыпкой всех ярусов одновременно с рекультивацией земель в непосредственной близости к разрабатываемым участкам горных работ. Рассматриваемый способ отвалообразования следует осуществлять в два этапа. Особенность первого этапа заключается в том, чтобы часть внешнего отвала (I этап) в кратчайшие сроки смогла достигнуть своей проектной высоты. При формировании первого яруса на первом этапе отвалообразования часть вынутых четвертичных отложений (не более 20 %) смешивают с отвальной массой коренных пород, размещенных в теле отвала, или, если есть возможность, размещают вблизи внешнего отвала. Техническая рекультивация осуществляется после достижения предельной высоты части отвала (выполаживание откосов ярусов). Далее при развитии горных работ из карьерной выемки литогенные ресурсы (ПСП и ППП, четвертичные отложения) транспортируются автосамосвалами на отвал для отсыпки рекультивационного, корнеобитаемого слоя. После формирования корнеобитаемого слоя на поверхности отвала осуществляется биологический этап рекультивации. Второй этап: после достижения предельной высоты части отвала (I этап) вскрышные породы транспортируются на оставшуюся часть отвала (II этап), далее часть отвала также подлежит технической и биологической рекультивации. Такая технология позволяет совмещать процесс отвалообразования и рекультивации с сохранением ценных литогенных ресурсов (почвенных и четвертичных отложений) для рекультивации поверхности (плато) и откосов отвала, кроме того, отсыпка рекультивационного слоя из ПСП и ППП четвертичных отложений на поверхности отвала обеспечит ему более устойчивое положение, так как в теле отвала будет снижена доля четвертичных отложений в общем объеме всех вскрышных пород, что особенно актуально в природно-климатических условиях с избыточным увлажнением. Важно отметить, что такие работы следует планировать при соблюдении всех требований безопасности ведения горных работ открытым способом и работ, включенных в проектную документацию. На рисунках 13, 14 показан пример плана горных работ по формированию внешнего отвала, этапы отсыпки отвала, техническая и биологическая рекультивация отвала.

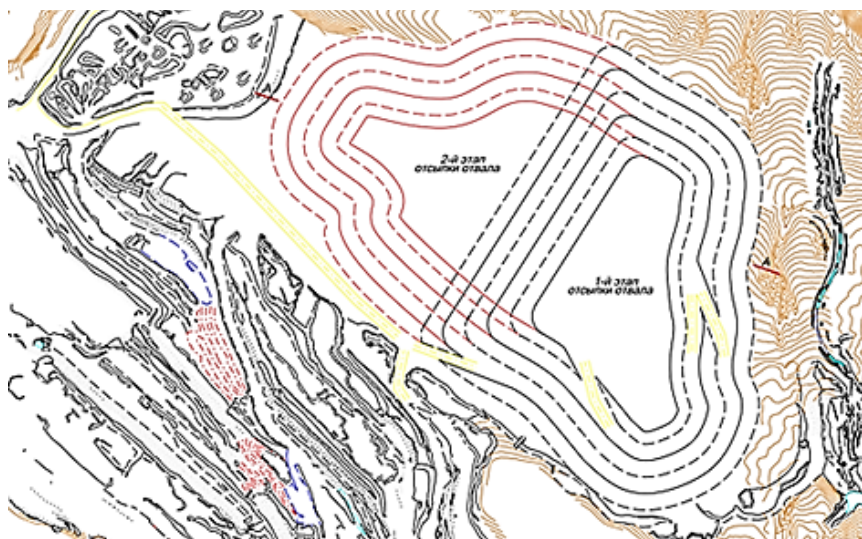


Рисунок 13 – План горных работ по формированию отвала

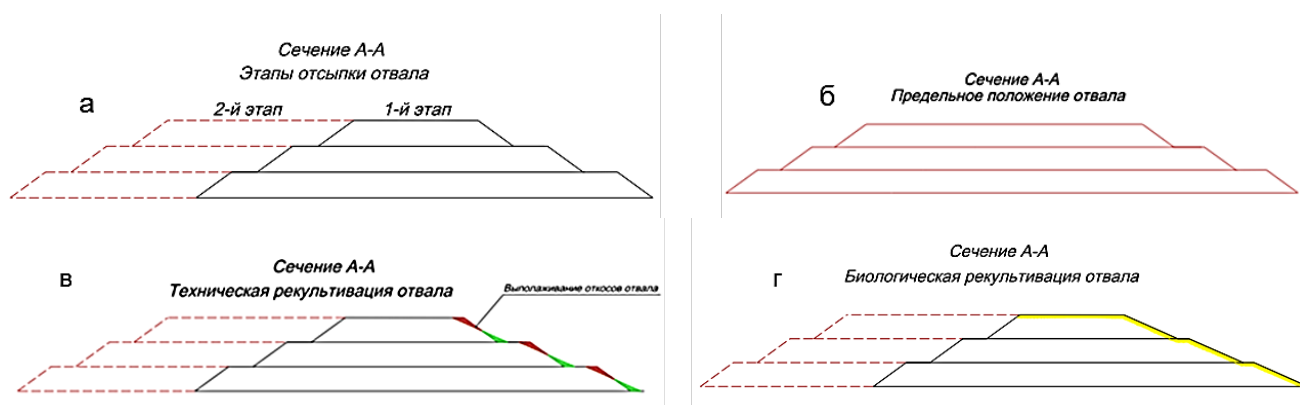


Рисунок 14 – Формирование внешнего отвала вблизи разрабатываемого участка:
а – этапы отсыпки отвала; б – предельное положение отвала; в – техническая рекультивация отвала; г – биологическая рекультивация отвала

Важнейшим условием создания благоприятных условий для развития растительного и почвенного покрова является предварительная подготовка поверхности отвалов до этапа формирования техноземов. Высокая плотность почв отрицательно влияет на развитие растений на отвалах. Поэтому рекомендуется перед нанесением и формированием рекультивационного слоя взрыхлить поверхность отвалов на глубину не менее 0,5 м мощным рыхлителем (это может быть клык бульдозера). Благодаря рыхлению каменистого, плотного техногенного элювия четвертичные отложения проникают вглубь отвала по трещинам, тем самым происходит обогащение субстрата техногенного элювия фракцией физической глины. При этом увеличивается мощность корнеобитаемого слоя и площадь контакта ППП с каменистыми породами отвала. Содержание глинистых минералов в субстрате техногенного элювия увеличится, и со временем будет формироваться благоприятная среда для развития биохимического выветривания. Кроме того, будет создана возможность для развития корневой системы древесных растений до необходимой глубины (2,0 – 2,5 м). После проведения предварительного рыхления на поверхность отвала следует отсыпать четвертичные отложения в смеси или послойно (ПСП и четвертичные отложения I и II категории), затем сформировать техноземы. Техноземы следует формировать гусеничным бульдозером или погрузчиком, не уплотняя, с благоприятным рельефом

(планировка поверхности с уклоном не более 5°). Из проведенных исследований следует, что откосная часть с уклоном более 25° и длиной склона более 50 м на рассматриваемой территории без отсутствия террас приводит к процессам соллюфлюкции, эрозионным и оползневым явлениям (глубокие впадины, овраги). Для повышения почвенно-экологической эффективности рекультивации откосы рекомендуется покрывать четвертичными отложениями II категории мощностью не более 0,2 м. Четвертичные отложения следует укладывать при отсыпке последней отвальной заходки по всему периметру яруса, под воздействием активных атмосферных осадков четвертичные отложения будут попадать в пустоты техногенного элювия и способствовать его задержанию. Отсыпку поверхности откосной части отвалов следует проводить в сухой период времени. Для рекультивации откосов с ускоренным задержанием травянистым покровом после завершения покрытия откосной части четвертичными отложениями предлагается использовать гидропосев полосным способом с травосмесями из низового злака – мятлика лугового (*Poa angustifolia* L.), бобовых – клевера белого (*Amoria repens* (L.) C. Presl.), костреца безостого (*Bromus inermis*) (рисунок 15). Результаты исследований показали, что использование гидропосева полосным способом на откосах внешних отвалов с нанесением четвертичных отложений со временем способствует активному распространению растительного покрова на прилегающие участки без гидропосева.

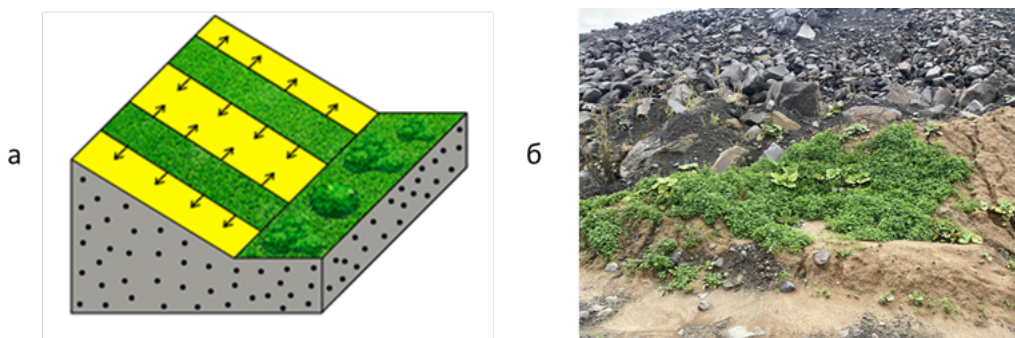


Рисунок 15 – Использование гидропосева полосным способом на откосах внешних отвалов с нанесением четвертичных отложений II категории

На откосной части отвала рекомендуется высаживать 100 % семян с закрытой корневой системой (1- и 2-летние сеянцы) разного видового состава в зависимости от экспозиции склона отвала.

По результатам многолетних исследований (приживаемости, прироста биомассы) предложены наиболее предпочтительные схемы посадки и отбора видов лесных культур на разных смесях из ПСП и **четвертичных отложений I категории** (техноземы гумусогенные недифференцированные), а также четвертичных отложений II категории (техноземы литогенные).

Максимальная экологически эффективная мощность корнеобитаемого слоя в зависимости от среднегодового количества осадков (за 10 лет) в районе угледобывающего предприятия АО «Разрез Распадский» составляет 83 см, в районе филиала АО «УК» «Кузбассразрезуголь» «Калтанский угольный разрез» – 100 см. Результаты режимных наблюдений за водно-физическими параметрами показали, что для природно-климатических условий нахождения угледобывающего предприятия АО «Разрез Распадский» с целью обеспечения водоудерживающей способности техноземов и стабильного функционирования фитоценозов

минимальная мощность корнеобитаемого слоя из смеси плодородного слоя почвы и четвертичных отложений I категории должна составлять не менее 0,4 м. Мощность корнеобитаемого слоя из четвертичных отложений II категории – 0,6 м.

В работе предложена геоэкологическая схема предпроектного анализа и оценки природных ресурсов для рекультивации земель с использованием природных и техногенных ресурсов в экономике замкнутого цикла предприятий с учетом воздействия природно-климатических факторов на развитие растительного и почвенного покрова на примере горно-таежной подзоны Кузбасса (рисунок 16).

1 этап. Формулирование цели рекультивации

Определяется направление и вид угодий, которые необходимо восстановить в процессе рекультивации земель.

2 этап. Обоснование способов рекультивации земель с учетом цели, природных условий, пригодности и достаточности ресурсов для выполнения работ по восстановлению техногенных ландшафтов

На втором этапе необходимо оценить существующие условия и ресурсы на исследуемой территории: литогенные (качественный состав ПСП и ППП, четвертичные отложения I и II категории), климатические (основные климатические параметры, влияющие на обеспечение влагой и теплом рекультивационных участков, что определяет условия развития биоценозов и перспективы восстановления почв и экосистем на нарушенных ландшафтах). В соответствии с горно-геологическими условиями и техническими возможностями горнодобывающего предприятия определяются возможности использования литогенных ресурсов для рекультивации земель в процессе ведения горных работ. После выполнения анализа природных (литогенные, климатические и биологические (растительность)) ресурсов выполняется обоснование направления рекультивации земель с учетом цели, природных условий, пригодности и достаточности ресурсов для выполнения работ по восстановлению техногенных ландшафтов.

3 этап. Выбор технологий рекультивации земель с заданной почвенно-экологической эффективностью

На данном этапе осуществляется расчет разных технологий рекультивации с заданной почвенно-экологической эффективностью рекультивации земель. При достаточном объеме собственных литогенных ресурсов (ПСП, четвертичных отложений I категории (покровных суглинков)) на территории горнодобывающего предприятия выполняется расчет разных вариантов почвенно-экологической эффективности рекультивации земель с учетом мощности рекультивационного слоя на поверхности техногенных ландшафтов. При дефиците ПСП и четвертичных отложений I категории целесообразно использовать четвертичные отложения II категории и почвогрунты из золошлаковых материалов, окисленных углей. Мощность рекультивационного слоя имеет важное значение в последующем восстановлении экологических почвенных функций и существенно зависит от климатических параметров района выполнения рекультивации; следовательно, в каждом эколого-географическом районе присутствия горнодобывающего предприятия мощность насыпного, рекультивационного слоя будет индивидуальной, в зависимости от среднегодового количества атмосферных осадков. Для выбора оптимальных технологий рекультивации земель с заданной почвенно-экологической эффективностью необходимо рассчитать коэффициент содержания физической глины в сформированном рекультивационном слое на

поверхности техногенного ландшафта. Расчет коэффициента осуществляется по формуле, предложенной В.А. Андрохановым, В.М. Курачевым.

$$K_{ф.г.}(ср) = (h_1/M \cdot K_{ф.г.}(м) + h_2/M \cdot K_{ф.г.}(п.п.)), \quad (2)$$

где $K_{ф.г.}(ср.)$ – коэффициент содержания физической глины в сформированном рекультивационном слое на поверхности техногенного ландшафта: h_1 – мощность планируемого рекультивационного слоя; M – оптимальная необходимая мощность рекультивационного слоя для предприятия по добыче угля в зависимости от количества атмосферных осадков; $K_{ф.г.}(м)$ – поправочный коэффициент на определенное количество фракции физической глины в насыпном, рекультивационном слое от общей массы породы (при тяжелосуглинистом гранулометрическом составе равен 1); $h_2 = M - h_1$ – мощность подстилающей вскрышной породы; $K_{ф.г.}(п.п.)$ – поправочный коэффициент на определенное количество фракции физической глины в подстилающей вскрышной породе от общей массы породы (при тяжелосуглинистом гранулометрическом составе равен 1). Почвенно-экологическая эффективность рекультивации земель рассчитывается по формуле:

$$ПЭР = Б \cdot K_{ф.г.}(ср) \cdot 100/Б, \quad (3)$$

где $Б$ – балл бонитета зональной почвы эталона (в связи с тем, что в районе исследования рассматриваются технологии без нанесения плодородного слоя почвы, выбран балл бонитета распространенной почвообразующей породы в Кузбассе (покровных суглинков) и составляет 68 баллов).

$$ПЭР = 68 \cdot K_{ф.г.}(ср) \cdot 100/68.$$

Такой подход позволяет рассчитать почвенно-экологическую эффективность разных технологий на стадии предпроектного анализа планируемых работ по рекультивации земель, оценить экономические затраты и выбрать оптимальную технологию с учетом имеющихся собственных ресурсов на предприятии. В работе представлены подходы к оценке почвенно-экологической эффективности участков после проведения работ по рекультивации с учетом мощности рекультивационного слоя и экономические затраты разных технологий рекультивации земель.

4 этап. Мониторинг (оценка почвенно-экологического состояния проведенной рекультивации на техногенных ландшафтах по разным технологиям (ПЭР), %)

Почвенно-экологическое состояние рекультивированных земель оценивается по тем же параметрам, что и почвенно-экологическая эффективность рекультивации с учетом биологической продуктивности и проективного покрытия участка растительностью. Проводится оценка уровня развития растительного покрова и процессов почвообразования с определением стадии развития растительной сукцессии и молодых почв. Мониторинг участков рекультивации должен выполняться через 3–5 лет. В этот период можно объективно оценить состояние почв и растительности на участках рекультивации. Оцениваются основные показатели плодородия корнеобитаемого слоя, его морфологические особенности и состояние сформированного растительного покрова.

Также в работе представлены научно-технологические рекомендации по рациональному использованию техногенных ресурсов (отходов углеобогащения) и последовательности действий их использования для размещения в выработанном пространстве карьеров с последующей рекультивацией (на примере лесостепной подзоны Кузбасса) (рисунок 17).

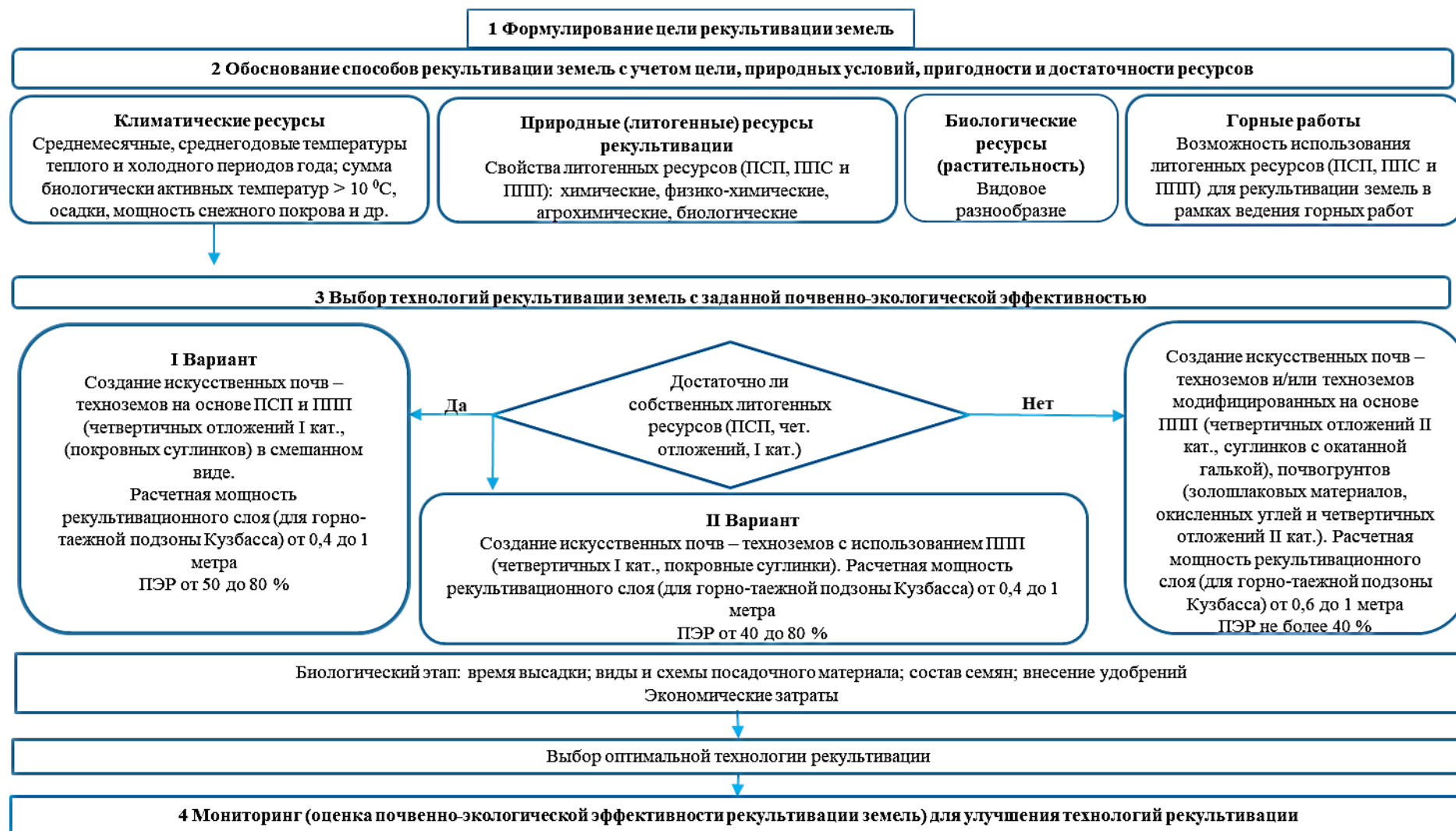


Рисунок 16 – Геоэкологическая схема предпроектного анализа и оценки природных ресурсов для рекультивации земель с использованием природных ресурсов, которые учитывают воздействие природно-климатических факторов на скорость развития растительного и почвенного покрова (на примере горно-таежной подзоны Кузбасса)

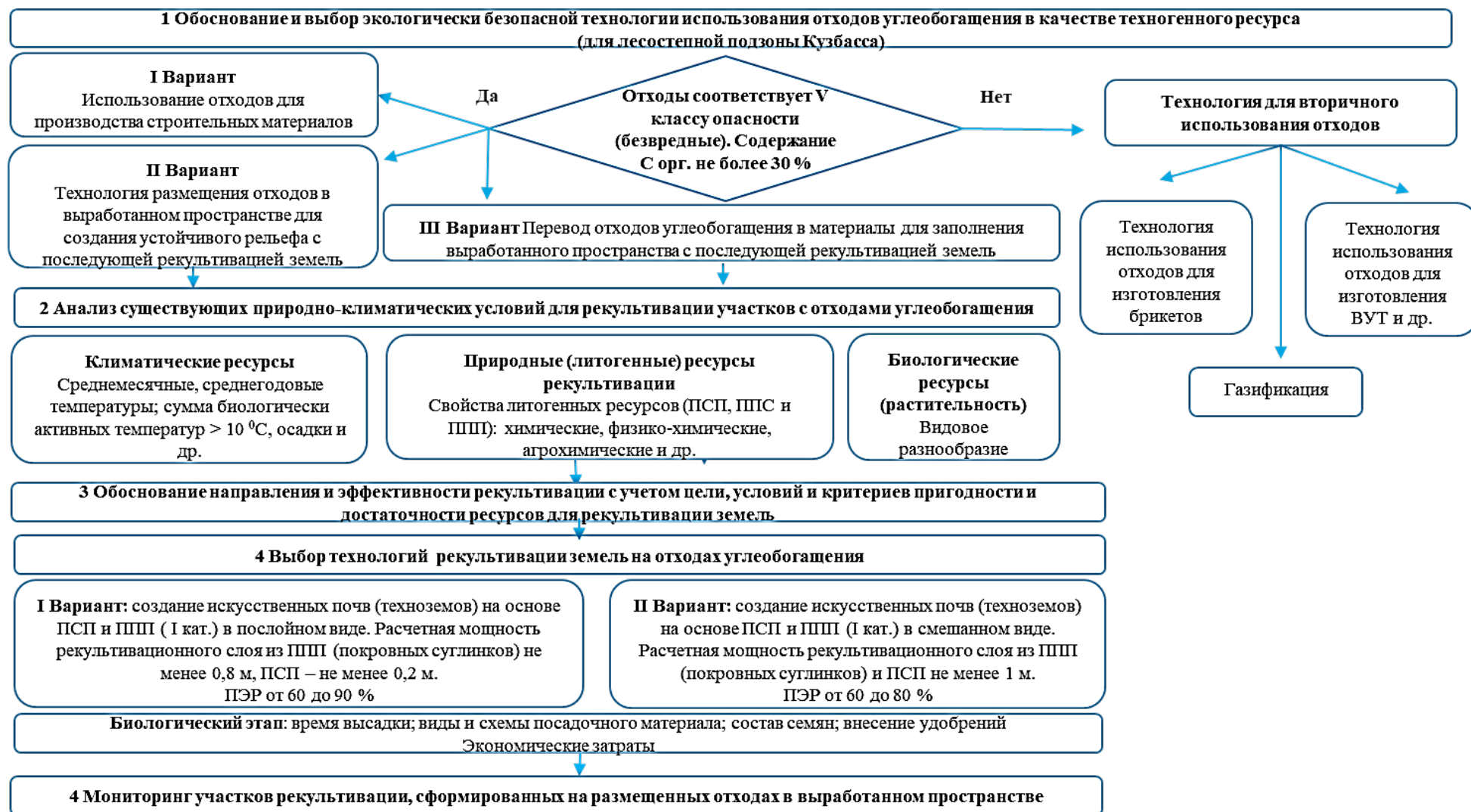


Рисунок 17– Геоэкологическая схема использования отходов углеобогащения в качестве техногенного ресурса для экологически безопасного размещения в выработанном пространстве с последующей рекультивацией земель (на примере лесостепной подзоны Кузбасса)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании теоретических, экспериментальных лабораторных и полевых исследований, установленных закономерностей комплексного влияния природно-климатических, литогенных факторов и геоморфологии (рельефа) горнопромышленных ландшафтов на развитие растительного и почвенного покрова решена научная проблема разработки экологически эффективных технологий рекультивации земель, нарушенных деятельностью угледобывающих предприятий. Работа имеет важное хозяйственное значение для обеспечения устойчивого развития горнодобывающих регионов.

Основные результаты, полученные лично автором

1. На основании результатов комплексных почвенно-экологических исследований основных вскрышных и вмещающих пород в горно-таежной подзоне Кузбасса установлено, что основными критериями применимости пород и техногенных субстратов для биологической рекультивации земель (создания искусственных почв – техноземов) являются показатели минералогических (содержание глинистых минералов), агрохимических (содержание основных элементов питания в доступной для растений форме), физико-механических свойств (содержание фракций физической глины и мелкозема, благоприятные показатели рН и плотности пород), обеспечивающие стабильное развитие растительного покрова и процессов почвообразования и обладающие потенциалом к закреплению органического вещества (гумуса) в почвенном профиле.

2. В соответствии с критериями пригодности научно обосновано ранжирование основных вскрышных и вмещающих пород на категории. Показано, что наилучшими литогенными ресурсами для биологической рекультивации земель и создания искусственных почв (техноземов) на поверхности техногенных ландшафтов в горно-таежной подзоне Кузбасса являются плодородный слой почвы и ППП (четвертичные отложения I категории – покровные суглинки), которые имеют высокую дисперсность, значительную поглотительную способность, что оказывает существенное влияние на водообеспечение фитоценозов. При дефиците четвертичных отложений I категории для создания искусственных почв (техноземов) целесообразно использование ППП (четвертичных отложений II категории с наличием каменистости до 50 %).

3. На основании результатов исследований научно подтверждена почвенно-экологическая эффективность технологии рекультивации земель, осуществляемая в процессе ведения горных работ (селективное отвалообразование). Показано, что за 48 и 13 лет функционирования искусственных почв (техноземов) из литогенных ресурсов (четвертичные отложения I категории), сформированных на относительно ровной площадке с мелкобугристым слабонаклонным рельефом, сформировались экосистемы, приближенные по своим параметрам к естественным лесным фитоценозам и зональным почвам. Оценка почвенно-экологического состояния участков после рекультивации земель характеризуется хорошим и очень хорошим состоянием (ПЭС от 79 до 91 %).

4. На основе режимных наблюдений за водно-физическими параметрами техноземов научно обоснована мощность корнеобитаемого слоя на поверхности техногенных ландшафтов. Установлено, что для повышения водоудерживающей способности техноземов для стабильного функционирования фитоценозов в горно-таежной подзоне Кузбасса минимальная мощность корнеобитаемого слоя на

поверхности техногенных ландшафтов из ПСП и четвертичных отложений I категории в смешанном виде должна составлять не менее 0,4 м, мощность корнеобитаемого слоя техноземов из четвертичных отложений II категории – не менее 0,6 м. Минимальная мощность отсыпанного корнеобитаемого слоя на участках рекультивации, сформированного на отходах углеобогащения в лесостепной подзоне Кузбасса из ППП (покровных суглинков), должна составлять не менее 0,8 и 0,2 м из ПСП (при наличии). Такой подход обеспечивает стабильный уровень запасов продуктивной влаги для растений.

5. Научно обоснована экологически эффективная технология рекультивации земель в условиях недостатка плодородного слоя почвы в горно-таежной подзоне Кузбасса (состав и строение корнеобитаемого слоя техноземов из ПСП и четвертичных отложений I категории, оптимальная мощность, подбор видового состава растений и наиболее предпочтительных схем посадки лесных культур; состав травосмесей; применение органоминеральных удобрений). Установлено, что уже в первые годы функционирования рекультивированных участков по рассматриваемой технологии наблюдается активное восстановление фитоценозов, участок характеризуется наибольшим видовым разнообразием (52 вида), минимальной долей сорных видов растений (15 %), наибольшей продуктивностью (59,2 ц/га). Почвенно-экологическое состояние оценивается как благоприятное и составляет 50 % по отношению к естественным почвам. Показано, что при дефиците ПСП и четвертичных отложений I категории возможно применять менее благоприятные породы (четвертичные отложения II категории). При этом почвенно-экологическое состояние участков характеризуется как удовлетворительное (ПЭС от 22 до 37 %).

6. Показано, что технология создания искусственных почв (техноземов модифицированных) на поверхности техногенных ландшафтов из техногенных ресурсов и их внесение в составе 10 % в четвертичные отложения способствует увеличению содержания органического углерода в техногенных почвах и повышению емкости катионного обмена, а также активному развитию растительного покрова. Это препятствует вымыванию элементов питания из корнеобитаемого слоя.

7. Получены закономерности в распределении и аккумуляции ПАУ в отходах углеобогащения, искусственных почвах (техноземах и эмбриоземах). Показано, что в составе полиаренов исследуемых образцов преобладают легкие, 2- и 3-ядерные соединения. Доминирующим среди ПАУ в молодых почвах (техноземах и эмбриоземах), а также в отходах углеобогащения является нафталин, доля которого в техногенных почвах составляет 26,3 – 68,5 %. Оценка экологической безопасности исследуемых почв, проводимая с определением бенз(а)пиренового эквивалента, показала, что все исследуемые почвы не являются опасными.

8. Результаты исследований показали, что технология формирования на поверхности отходов углеобогащения техногенных почв (техноземов гумусогенных дифференцированных) с послойным нанесением на поверхность отвала ППП и ПСП способствует формированию устойчивого растительного покрова, безопасному размещению и консервации отходов углеобогащения, что фиксируется значительным снижением содержания ПАУ в корнеобитаемом слое по сравнению с эмбриоземами, образованными непосредственно на отходах углеобогащения.

9. Получены новые количественные данные по исследованию запасов углерода в пулах биомассы растений (включая надземную и подземную древесную биомассу, надземную и подземную биомассу травянистой растительности и подстилки) и техноземах, сформированных из литогенных ресурсов разной категории. Полученные данные можно использовать для моделирования результатов климатических проектов на техногенных ландшафтах в горно-таежной подзоне Кузбасса.

10. На основе многолетних и комплексных исследований научно обоснованы научно-технологические основы рационального использования природных и техногенных ресурсов для экологически эффективных технологий рекультивации земель в экономике замкнутого цикла предприятий, которые учитывают воздействие природно-климатических факторов на скорость развития растительного и почвенного покрова.

По теме настоящей диссертационной работы перспективным направлением дальнейших исследований является:

– исследование закономерностей функционирования искусственных почв (техноземов), сформированных на основе литогенных и техногенных ресурсов предприятий, под воздействием природных, техногенных факторов и разных фитоценозов (экспериментальные участки экологического полигона).

Основные положения научно-квалификационной работы (диссертации) опубликованы в следующих работах:

В изданиях, входящих в перечень ВАК, Scopus и RSCI по защищаемой специальности:

1. **Семина, И. С.** Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов / И. С. Семина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № S4-20. – С. 3–11.

2. **Семина, И. С.** Исследования температурного режима эмбриоземов на отвалах Калтанского угольного разреза / И. С. Семина, В. А. Андроханов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 9. – С. 50–55.

3. **Семина, И. С.** Оценка экологической безопасности функционирования техногенных ландшафтов на основе исследования изменения температурного режима молодых почв / И. С. Семина, И. П. Беланов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № S4-20. – С. 12–24.

4. **Семина, И. С.** О рекультивации нарушенных земель на разрезах Кузбасса / И. С. Семина, В. А. Андроханов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 12. – С. 307–314.

5. **Семина, И. С.** Опыт использования отходов углеобогащения для рекультивации нарушенных участков / И. С. Семина, В. А. Андроханов, Е. Д. Куляпина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 9. – С. 159–175.

6. **Семина, И. С.** Оценка современного восстановления биогеоценозов на рекультивированных территориях отходами углеобогащения / И. С. Семина, С. В. Соловьев, В. А. Андроханов, В. Б. Костерев // Экология и промышленность России. – 2024. – Т. 28. – № 8. – С. 54–59.

7. **Шайхислам, Г.** Получение почвогрунтов на основе окисленного каменного угля для биологической рекультивации нарушенных земель / Г. Шайхислам,

Т. М. Соловьев, С. А. Эпштейн, И. В. Пестряк, **И. С. Семина** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 8. – С. 5–18.

8. Шайхислам, Г. Оценка состава и свойств горных пород, окисленного каменного угля и золошлаковых отходов как материалов для биологической рекультивации / Г. Шайхислам, Т. М. Соловьев, С. А. Эпштейн, **И. С. Семина** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 7. – С. 21–37.

9. **Семина, И. С.** Сопряженный анализ результатов почвенно-экологических, геоботанических исследований и оценка возможности использования отходов углеобогащения для рекультивации нарушенных земель / И. С. Семина, В. А. Андроханов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2025. – № 1. – С. 20–33.

10. **Семина, И. С.** Оценка современного почвенно-экологического состояния участков рекультивации в горно-таежной подзоне Кузбасса / И. С. Семина, И. Н. Госсен, А. Баранов, А. Е. Червяков // Экология и промышленность России. – 2025. – Т. 29. – № 1. – С. 66–71.

11. **Семина, И. С.** Комплексные исследования минеральных ресурсов в горно-таежной подзоне Кемеровской области – Кузбасса, оценка их пригодности для рекультивации нарушенных земель / И. С. Семина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2026. – № 1. – С. 85–110.

12. **Семина, И. С.** Научное обоснование рационального использования природных ресурсов для рекультивации нарушенных земель в горно-таежной подзоне Кемеровской области – Кузбасса / И. С. Семина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2026. – № 3 (специальный выпуск 7). – 40 с.

13. **Семина, И. С.** Полициклические ароматические углеводороды в техногенных почвах на участках рекультивации с использованием отходов углеобогащения / И. С. Семина, Д. А. Соколов, С. В. Морозов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2026. – № 2 (специальный выпуск 3). – 20 с.

14. **Семина, И. С.** Рациональное использование литогенных ресурсов для ускоренного восстановления растительного и почвенного покрова на участках рекультивации / И. С. Семина // Экология и промышленность России. – 2026. – Т. 30. – № 7. – С. 58–65.

В изданиях, входящих в перечень Scopus:

15. **Семина, И. С.** Рациональное использование литогенных ресурсов рекультивации как основа для экологически безопасного развития техногенных ландшафтов / И. С. Семина // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 11. – С. 36–38.

16. **Семина, И. С.** Почвенно-экологическое обследование участков, рекультивированных отходами углеобогащения, на примере Кемеровской области – Кузбасса / И. С. Семина, В. А. Андроханов // Уголь. – 2021. – № 7 (1144). – С. 57–62.

17. **Семина, И. С.** Геохимический фон в молодых почвах на рекультивированных участках с использованием отходов углеобогащения / И. С. Семина, В. А. Андроханов // Уголь. – 2022. – № 6 (1155). – С. 74–79.

18. **Семина, И. С.** Температурный режим рекультивированных почв с использованием отходов углеобогащения в Кузбассе / И. С. Семина, В. А. Андроханов, А. М. Шипилова // Уголь. – 2022. – № 7 (1156). – С. 60–65.

19. **Семина, И. С.** Мониторинговые исследования по учету видового состава лесных насаждений, численности экземпляров на пробных площадках экологического полигона / И. С. Семина, С. В. Соловьев, В. А. Андроханов, А. Е. Червяков // Уголь. – 2025. – № 2 (1190). – С. 119–124.

Монография:

20. **Семина, И. С.** Природно-техногенные комплексы Кузбасса: свойства и режимы функционирования / И. С. Семина, И. П. Беланов, А. М. Шипилова, В. А. Андроханов. – Новосибирск, 2013. – 396 с.

Публикации в прочих журналах

21. **Семина, И. С.** Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов / И. С. Семина // Проблемы региональной экологии. – 2012. – № 6. – С. 154–157. – EDN PLRRPJ.

22. **Семина, И. С.** Рациональное использование литогенных ресурсов в рекультивации с целью устойчивого функционирования техногенных ландшафтов Кузбасса / И. С. Семина // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2015. – № 2(12). – С. 84–88. – EDN VDNTNP.

23. **Семина, И. С.** Экологическая значимость вскрышных пород в техногенных ландшафтах Кузбасса / И. С. Семина, В. В. Чаплыгин // Экология урбанизированных территорий. – 2016. – № 1. – С. 103–109.

24. **Семина, И. С.** Экологическая значимость вскрышных и вмещающих пород в рекультивации нарушенных земель / И. С. Семина, А. М. Шипилова. В кн.: Природно-техногенные комплексы: современное состояние и перспективы восстановления. Сборник материалов международной научной конференции, Новосибирск; Новокузнецк, 13–18 июня 2016 г. – Новосибирск; Новокузнецк: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2016. – С. 216–224. – EDN WIJOFB.

25. **Семина, И. С.** Почвенно-экологическое состояние рекультивированных участков с использованием отходов углеобогащения / И. С. Семина, В. А. Андроханов, Е. Д. Куляпина // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – № 6. – С. 439–444.

26. **Семина, И. С.** Рекультивация техногенно нарушенных земель Кузбасса с использованием отходов углеобогащения / И. С. Семина, Е. Д. Куляпина. В кн.: Почвы – стратегический ресурс России. Тезисы докладов VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв. Отв. редакторы С. А. Шоба, И. Ю. Савин. – Москва – Сыктывкар, 2021. – С. 891–892.

27. **Семина, И. С.** Оценка восстановления растительного покрова на рекультивированных участках отходами углеобогащения в Кемеровской области – Кузбассе / И. С. Семина, С. В. Соловьев, В. А. Андроханов, А. М. Шипилова // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2021. – № 7. – С. 394–399.

28. **Semina, I. S.** Soil and ecological state of reclaimed sites with the use of waste coal / I. S. Semina, V. A. Androkhonov, E. D. Kulyapina. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 2020 International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources, Novokuznetsk, Virtual, 08 – 11 September 2020 year. – IOP

Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 012046. – DOI 10.1088/1755-1315/823/1/012046. – EDN FQJPJO.

29. Soloviev, S. Restoration of vegetation cover in reclaimed areas with coal preparation waste in Kuzbass / S. Soloviev, V. Androkhanov, **I. Semina**, A. Shipilova. In: E3S Web of Conferences. 22. Сер. "22nd International Scientific Conference on Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies, EMMFT 2020", 2021.

30. **Semina, I.** Assessment of revegetation with waste coal on the reclaimed sites in the Kemerovo region – Kuzbass / I. Semina, V. Androkhanov, S. Solovyev. In: E3S WEB OF CONFERENCES. URM 2021 - International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources. – 2021. – P. 04011.

31. **Семина, И. С.** Почвенно-экологическое состояние молодых почв на рекультивированных участках с использованием отходов углеобогащения / И. С. Семина, В. А. Андроханов. В кн.: Углекислота и экология Кузбасса. Сборник тезисов докладов XI Международного Российско-Казахстанского Симпозиума, Кемерово, 04–06 июня 2022 года. – Кемерово: Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. – С. 82. – DOI 10.53650/9785902305651_82. – EDN OUDILW.

32. **Семина, И. С.** Мониторинг биогеоценозов на рекультивированных территориях отходами углеобогащения / И. С. Семина, С. В. Соловьев, В. А. Андроханов, В. Б. Костерев. В кн.: Рекультивация нарушенных земель: технологии, эффективность и биоразнообразие. Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк, 2024. – С. 270–276.

33. **Семина, И. С.** Учет видового состава растений на мониторинговых (пробных) площадках экологического полигона (первый год создания полигона) / И. С. Семина, С. В. Соловьев, Е. А. Бобренок. В кн.: Рекультивация нарушенных земель: технологии, эффективность и биоразнообразие. Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк, 2024. – С. 277–283.

34. **Семина, И. С.** Оценка литогенных ресурсов и их рациональное использование в рекультивации нарушенных земель / И. С. Семина, В. А. Андроханов. В кн.: Развитие производительных сил Кузбасса: история, современный опыт, стратегия будущего. Материалы Международной научно-практической конференции. В 4-х томах. – Москва, 2024. – С. 332–336.

35. **Семина, И. С.** Оценка эффективности техноземов, модифицированных при биологической рекультивации нарушенных земель / И. С. Семина, Е. А. Жарких // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 19–20 мая 2026 г. / Сибирский государственный индустриальный университет; под общ. ред. С. В. Коновалова. – Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2026. – Вып. 30, ч.2. – С. 3–5.