

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2617>
<https://elibrary.ru/MGDYNH>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Динамика формирования растительного покрова техногенно нарушенных участков в зависимости от мощности почвенной закладки и биологической активации (на примере угольного разреза)



М. А. Осинцева*, Е. А. Жидкова

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 26.09.2025

Принята после рецензирования: 01.11.2025

Принята к публикации: 11.11.2025

*e-mail: k1marial@inbox.ru

© М. А. Осинцева, Е. А. Жидкова, 2025



Аннотация.

Рекультивация нарушенных земель является критически важным этапом горнодобывающей деятельности, направленным на восстановление экологического баланса и продуктивности ландшафтов. Выбор стратегии рекультивации существенно влияет на скорость и эффективность восстановления почв, как показали исследования, сравнивающие различные подходы к восстановлению свойств почв и их водопроницаемости. Целью данного исследования являлась оценка влияния мощности почвенной закладки и биологической активации на эффективность восстановления растительного покрова на техногенно нарушенных территориях отвала угольного разреза.

В ходе трехлетнего полевого эксперимента (2023–2025 гг.) на территории отвала угольного разреза (Кемеровская область – Кузбасс, Россия) созданы три типа экспериментальных участков, моделирующих различные подходы к рекультивации: технозем гумусогенный, технозем литогенный и эмбриозем инициальный. На каждом участке высаживались древесно-кустарниковые культуры и высевались травосмеси. Приживаемость древесных растений учитывалась визуально по принципу «наличие–выпадение», с фиксацией критериев гибели и успешной приживаемости. Проективное покрытие трав оценивалось с помощью дистанционного определения индекса NDVI, рассчитанного по данным аэрофотосъемки и обработанного в Agisoft Metashape Professional. Биопрепарат создан на основе консорциума штаммов *Bacillus subtilis*, отобранных по высокой антиоксидантной и фитогормональной активности, показавшего максимальное стимулирующее действие на прорастание травосмеси.

Эффективность биопрепарата существенно зависела от условий субстрата. На благоприятном техноземе гумусированном препарат не оказывал положительного действия: приживаемость сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., 1753) в варианте с биопрепаратом составила 66,7 %, что было ниже контрольных 85,3 %. На техноземе литогенном эффект был видоспецифичным: приживаемость тополя пирамидального (*Populus nigra* L., 1753) достигла 100,0 %, тогда как у жимолости сизой (*Lonicera dioica* L., 1753) снизилась до 63,6 % к 2025 г. против 84,1 % в контроле. Наиболее негативные результаты получены на эмбриоземе, где применение препарата приводило к значительному снижению приживаемости, по сравнению с контролем, например, у аронии черноплодной (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott, 1821) – 52,9 против 70,6 %. Проективное покрытие травосмесей во всех вариантах к 2024 г. достигало 100,0 %, однако в первый год в вариантах с биопрепаратом оно часто было ниже.

Применение биопрепарата не являлось универсальным решением и его эффективность детерминирована типом почвенного субстрата и видовой специфичностью растений. Наилучшие перспективы использования выявлены для промежуточных по плодородию техноземов литогенных, в то время как в оптимальных условиях его применение нецелесообразно, а в экстремальных – может оказывать негативный эффект.

Ключевые слова. Рекультивация нарушенных земель, биопрепарат, технозем, микробные консорциумы, приживаемость растений, проективное покрытие, NDVI, угольный разрез, фиторемедиация, техногенный субстрат

Финансирование. Работа выполнена в рамках Распоряжения Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р, комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» («Чистый уголь – зеленый Кузбасс»), мероприятие 3.1 «Экополигон мирового уровня технологий рекультивации и ремедиации». При финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2022-1200 от 28.09.2022 г.).

Для цитирования: Осинцева М. А., Жидкова Е. А. Динамика формирования растительного покрова техногенно нарушенных участков в зависимости от мощности почвенной закладки и биологической активации (на примере угольного разреза). Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 885–902. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2617>

Dynamics of Vegetation Development on Post-Mining Areas: Soil Thickness and Bioactivation

Maria A. Osintseva*^{ID}, Elena A. Zhidkova^{ID}Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, RussiaReceived: 26.09.2025
Revised: 01.11.2025
Accepted: 11.11.2025*e-mail: k1marial@inbox.ru
© M.A. Osintseva, E.A. Zhidkova, 2025

Abstract.

Reclamation of disturbed lands restores the post-mining ecosystem and land use. It is an essential stage of any mining operation. The appropriate reclamation strategy improves the speed and effectiveness of soil reclamation. For instance, the soil thickness and the bioactivation method determine the effectiveness of plant reclamation on depleted open-pit coal mines.

This three-year field experiment (2023–2025) focused on an open-pit coal mine wasteland in the Kemerovo Region, Russia. It involved three types of experimental plots that simulated different reclamation approaches: humus-producing technosol, lithogenic technosol, and initial embryozem. Each plot was planted with trees, shrubs, and grass. The survival of woody plants was assessed visually, with mortality and survival criteria recorded. The grass cover status was assessed by Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), obtained from aerial photography and processed in Agisoft Metashape Professional. The biopreparation included a consortium of *Bacillus subtilis* strains selected for high antioxidant and phytohormonal activity, which demonstrated the greatest stimulating effect on grass seed germination.

The effectiveness of the biopreparation depended significantly on the substrate conditions. The humus-rich technosol failed to improve the biopreparation: the survival rate of Scots pine (*Pinus sylvestris* L., 1753) was 66.7%, which was below the control (85.3%). The lithogenic technosol had a species-specific effect: the survival rate of pyramidal poplar (*Populus nigra* L., 1753) reached 100.0% while that of blue honeysuckle (*Lonicera dioica* L., 1753) dropped to 63.6% by 2025 versus 84.1% in the control. The embryozem demonstrated the lowest results: the survival rate for black chokeberry (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott, 1821) was 52.9% versus the initial 70.6%. The projective grass cover reached 100.0% by 2024 on all three plots but was much lower during the first year.

The biopreparation failed to become a universal solution, and its effectiveness depended on the type of soil substrate and plant species. It proved rather effective for lithogenic technosols of intermediate fertility. However, its use seems impractical under optimal conditions and even inhibiting under extreme conditions.

Keywords. Land reclamation, biopreparation, technosol, microbial consortia, plant survival, projective cover, NDVI, coal mine, phytoremediation, technogenic substrate

Funding. The research was part of a comprehensive scientific innovative program initiated by Russian Federation Government Decree No. 1144-r, May 11, 2022: Developing and implementing new technologies in the E&P of solid minerals, industrial safety, bioremediation, and product development of deep coal processing: A consistent reduction of environmental impact and hazards (Clean Coal – Green Kuzbass), Stage 3.1: An ecological test-site of world-class reclamation and remediation technologies (Agreement No. 075-15-2022-1200, September 28, 2022).

For citation: Osintseva MA, Zhidkova EA. Dynamics of Vegetation Development on Post-Mining Areas: Soil Thickness and Bioactivation. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):885–902. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2617>

Введение

Рекультивация нарушенных земель является критически важным этапом горнодобывающей деятельности, направленным на восстановление экологического баланса и продуктивности ландшафтов [1–3]. Исследования показывают, что выбор стратегии рекультивации существенно влияет на скорость и эффективность восстановления почв. В работе J. Hu *et al.* [4], проведенной в условиях северной части Лессового плато в Китае, сравнивалось влияние различных моделей

рекультивации – растительной (смешанные кустарниково-травяные сообщества) и сельскохозяйственной – на свойства почвы и ее водопроницаемость. В результатах отражено, что растительная рекультивация, особенно смешанные посадки люцерны и облепихи, приводит к более значительному улучшению физических свойств почвы (плотность, пористость, стабильность агрегатов) и инфильтрационной способности, по сравнению с сельскохозяйственным использованием. При этом использование тяжелой сельскохозяйственной

техники оказывает негативное влияние на почвенную структуру и инфильтрацию. Ключевым фактором, определяющим водопроницаемость, выступает состояние почвенной пористости [4].

В исследовании В. Čížková *et al.*, проведенном на отвалах после добычи бурого угля в Чешской Республике, сравнивалось развитие химических и микробных свойств почвы на рекультивированных и самозарастающих лугах [5]. Нанесение потенциально-плодородного слоя создало более благоприятные условия для накопления органического вещества и питательных элементов. На рекультивированных участках наблюдалось значительное увеличение запасов углерода и азота с возрастом, в то время как на самозарастающих территориях существенных изменений не происходило. Потенциал секвестрации углерода на рекультивированных лугах с нанесением почвенного слоя оценивался до 1,6 т/га в год, что превышало аналогичные показатели для лесистых территорий в том же регионе [5]. Это подчеркивает важность начальных условий и управленческих решений для долгосрочного накопления органического вещества в почве.

Особый интерес представляют комплексные подходы к рекультивации в условиях тропиков, обобщенные в обзоре Pratiwi *et al.* по Индонезии [6]. В работе подчеркивалось, что успешное лесовосстановление на нарушенных землях требует не только технических мероприятий (планировка ландшафта, размещение вскрышных пород, контроль кислотного дренажа), но и тщательного подбора видов растений. Рекомендуются многоэтапная стратегия, включающая посев бобовых покровных культур для борьбы с эрозией и улучшения почвенного плодородия, последующую высадку быстрорастущих видов-пионеров для создания микроклимата и интродукцию местных (аборигенных) видов для восстановления биоразнообразия и экосистемных функций. Особую роль играет применение микробных технологий, таких как инокуляция арбускулярной микоризы и клубеньковых бактерий (*Rhizobium*), что значительно повышало приживаемость и рост саженцев в стрессовых условиях нарушенных почв [6].

Мониторинг и оценка эффективности рекультивации являются неотъемлемой частью процесса. В разных юрисдикциях существуют различные системы оценки, учитывающие такие параметры, как проектирование земной поверхности, успешность лесовосстановления, контроль эрозии и седиментации. Например, в Индонезии для участков в лесном фонде особый вес при оценке придается показателям лесовосстановления (50 % от общей оценки), включая площадь, приживаемость и видовой состав [6]. Успешные кейсы продемонстрировали, что рекультивированные территории могут не только выполнять экологические функции, но и становиться центрами биоразнообразия, средой обитания для охраняемых видов (таких как орангутанги и носачи) [6], а также использоваться для рекреации, водоснабжения и научной деятельности.

С. Tu *et al.* [7] изучали эффективные методы восстановления почв, загрязненных тяжелыми металлами, что особенно актуально для рекультивации таких объектов, как угольные шламы. Работа посвящена оценке применения биоугля, а также биоугля, обогащенного специальными бактериями, для иммобилизации кадмия и меди в почве. Результаты продемонстрировали, что оба подхода значительно снижали подвижность и доступность этих опасных металлов, тем самым уменьшая их токсическое воздействие. Параллельно с этим авторы зафиксировали положительное влияние применяемых материалов на биологическую активность почвы, что выразилось в усилении ферментативных процессов. Таким образом, комбинированное использование растений и бактерий с носителем в виде биоугля представляется высокоперспективной и экологичной технологией очистки загрязненных территорий.

Спонтанная сукцессия рассматривается как эффективный подход к ремедиации нарушенных местообитаний в восстановительной экологии Центральной Европы [8]. Исследования в Чешской Республике показали, что на большинстве нарушенных территорий, за исключением экстремально токсичных субстратов, естественные процессы приводят к формированию непрерывного растительного покрова в течение 15 лет. Успешное восстановление, характеризующееся появлением местных, в том числе редких видов, наиболее вероятно на участках с умеренными условиями, окруженных природной растительностью.

В рамках исследования потенциала фитостабилизации загрязненных почв горных выработок юго-востока Испании [9] изучалась эффективность применения горчицы сарептской (*Brassica juncea* L. Czern) и ежи сборной (*Dactylis glomerata* L.) в сочетании с органическими мелиорантами – компостом и биоуглем. Оба компонента способствовали улучшению качества почвы и иммобилизации потенциально токсичных элементов, таких как кадмий, свинец и цинк; при этом компост оказал более выраженное положительное влияние на микробную биомассу и рост растений. Важно отметить, что оба вида растений продемонстрировали способность накапливать загрязняющие вещества преимущественно в корневой системе, что подтверждалось коэффициентом транслокации меньше единицы.

Исследование последствий просадки грунта вследствие подземной добычи угля в аридных условиях районов Северо-Западного Китая [10] показало значительное нарушение почвенных свойств и структуры бактериального сообщества. Нарушение целостности пород привело к потерям влаги, питательных веществ и снижению микробной биомассы, что особенно выражено в маргинальной зоне просадки. Это отразилось на таксономическом составе, сократив долю ключевых родов, таких как *Sphingomonas* и *Pseudomonas*, участвующих в цикле питательных веществ, и изменило метаболический потенциал сообщества. Так, для предотвращения

дальнейшей деградации авторы рекомендуют своевременное заполнение трещин в зоне просадки.

Современные исследования свидетельствуют о том, что успешная рекультивация нарушенных земель – комплексный процесс, эффективность которого зависит от учета местных почвенно-климатических условий, применения научно обоснованных методов восстановления почвенного плодородия и биоразнообразия, а также непрерывного мониторинга. Сравнительный анализ работ, проведенных в разных регионах мира, позволил выявить общие закономерности (важность растительного покрова, органического вещества и почвенной биоты).

Целью данного исследования являлась оценка влияния мощности почвенной закладки и биологической активации на эффективность восстановления растительного покрова на техногенно нарушенных территориях отвала угольного разреза.

Объекты и методы исследования

В рамках проведения эксперимента, направленного на разработку и оптимизацию технологий восстановления нарушенных промышленной деятельностью земель, на базе специализированного научно-технического полигона, расположенного на территории отвала угольного разреза Кемеровской области – Кузбасса (Россия), организован комплексный полевой опыт.

Ключевым моментом эксперимента стало создание трех обособленных экспериментальных участков, каждый из которых представляет собой уникальную модель формирования корнеобитаемого слоя (табл. 1). Принципиальное различие между участками заключалось в применяемой методике рекультивации, характере используемых почвообразующих материалов и их послойной структуре.

Первый экспериментальный участок (Участок 1) создан по принципу наиболее технологически сложной

Таблица 1. Характеристики экспериментальных участков рекультивации

Table 1. Experimental reclamation plots

Характеристика	Участок 1 (сектора 1.1, 1.2)	Участок 2 (сектора 2.1, 2.2)	Участок 3 (сектора 3.1, 3.2, 3.3)
Метод рекультивации	Многослойное нанесение	Однослойная отсыпка	Без завоза сторонних пород (естественное восстановление)
Структура и мощность слоев	1 потенциально-плодородный слой почвы (40–70 см); 2 плодородный слой почвы (20–40 см) сверху	Только потенциально-плодородный слой почвы (50–80 см)	Техногенный элювий (естественная смесь пород отвала)
Сформированный тип почвы	Технозем гумусогенный дифференцированный	Технозем литогенный недифференцированный	Эмбриозем инициальный
Ключевые свойства почвы	Четкая генетическая горизонтность, наличие гумусового горизонта, свойства близки к естественным почвам	Однородный профиль, слабая выраженность горизонтов, свойства унаследованы от породы	Отсутствие горизонтов, минимальное содержание органики, зачаточные признаки почвообразования



Рисунок 1. Послойное нанесение потенциально-плодородного и плодородного слоев почвы

Figure 1. Layer-by-layer application of potentially fertile and fertile soil layers

и ресурсоемкой методики, предполагающей послойное нанесение потенциально-плодородного и плодородного слоев почвы (рис. 1).

Мощность нанесенного потенциально-плодородного слоя почвы варьировалась в диапазоне от 40 до 70 см, что обеспечивало создание геохимического барьера и резервуара для развития корневых систем растений. Поверх данного слоя уложен плодородный слой почвы мощностью от 20 до 40 см, выступающий в качестве непосредственной среды для прорастания семян и начального развития фитоценоза. В результате такого последовательного нанесения сформировался полноценный почвенный покров – технозем гумусогенный дифференцированный. Данный тип антропогенной почвы характеризуется четко выраженной генетической горизонтностью, наличием аккумулярованного гумусового горизонта и свойствами, приближенными к условиям естественных зональных почв, что с теоретической точки зрения создает наиболее благоприятные предпосылки для быстрого становления устойчивой и продуктивной экосистемы.

Второй участок (Участок 2) представляет собой альтернативную, менее затратную модель восстановительных работ, в рамках которой применен метод однослойной отсыпки (рис. 2).

Данная технология заключалась в формировании корнеобитаемой толщи исключительно за счет нанесения потенциально-плодородного слоя почвы мощностью от 50 до 80 см без последующего покрытия плодородным слоем почвы. Отсутствие верхнего гумусированного горизонта предопределило иные почвообразовательные процессы. Сформировавшийся здесь почвенный покров идентифицирован как технозем литогенный недифференцированный. Основными диагностическими признаками данного грунта являются однородность строения профиля на значительную глубину, слабая выраженность или полное отсутствие

генетических горизонтов, а также свойства, в значительной степени унаследованные от исходной почвообразующей породы. Такой субстрат требует более длительного периода для естественного почвообразования и менее благоприятен для немедленного внедрения растительных сообществ без дополнительной мелиоративной поддержки.

Третий экспериментальный участок (Участок 3) организован с целью изучения процессов спонтанного почвообразования и является моделью наиболее экономного подхода к рекультивации. Он сформирован непосредственно на поверхности предварительно спланированного отвала, без завоза сторонних потенциально-плодородных пород (рис. 3).

Почвообразующий субстрат на данном участке представлен естественной смесью вскрышных и вмещающих пород, слагающих тело самого отвала, что делало его максимально приближенным к условиям ненарушенных промышленностью территорий. В этих условиях начальные стадии почвообразования протекают аутохтонно, что приводит к формированию почвы, классифицируемой как эмбриозем инициальный. Этот тип почвы находится на самой начальной стадии своего развития, для которой характерно отсутствие выраженной горизонтальной дифференциации, минимальное содержание органического вещества и лишь зачаточные признаки биогенной трансформации субстрата. Изучение динамики развития данного участка представляет значительный научный интерес для понимания фундаментальных процессов сукцессии в техногенных ландшафтах.

На подготовленных участках посеяны травосмеси и высажены древесно-кустарниковые виды растений. Видовой состав растений на участках варьировался в соответствии с задачами отработки технологий рекультивации, проводимых на экспериментальном полигоне, и не учитывался в данном исследовании.



Рисунок 2. Отсыпка потенциально-плодородного слоя почвы

Figure 2. Potentially fertile soil layer: Backfilling



Рисунок 3. Участок техногенного элювия

Figure 3. Man-made eluvium area

С целью биологической активации процесса восстановления растительного покрова использовался биологический препарат, созданный на основе штаммов микроорганизмов, предварительно выделенных из грунта экспериментального участка. Из образцов грунта данного участка выделено и охарактеризовано по морфолого-культуральным признакам 60 штаммов. На последующем этапе скрининга, в качестве ключевых критериев отбора промышленно ценных штаммов рассматривались показатели биологической активности: антиоксидантная и антимикробная активность, а также способность к синтезу фитогормонов – индолил-3-уксусной и гиббереллиновой кислот. По совокупности этих признаков отобрано 20 наиболее перспективных изолятов.

Для точной идентификации отобранных штаммов проведена генетическая характеристика методом секвенирования гена 16S рПНК. В результате определены следующие таксоны: *Bacillus subtilis* (штаммы № 1, 10, 16, 37), *Pseudomonas cremoricolorata* (№ 2), *Bacillus thuringiensis* (№ 6), *Lelliottia amnigena* (№ 7), *Enterobacter cloacae* (№ 9, 20), *Klebsiella pasteurii* (№ 13, 43), *Acinetobacter geminorum* (№ 24), *Pseudomonas donghuensis* (№ 27, 29), *Acinetobacter pittii* (№ 32, 44), *Acinetobacter calcoaceticus* (№ 50), *Serratia marcescens* (№ 51, 53) и *Pantoea vagans* (№ 52).

На следующем этапе работы, на основе анализа биосовместимости выделенных штаммов, сконструировано 10 микробных консорциумов. Комплексная оценка их биологической активности (по уровню антиоксидантной и антимикробной активности, а также по способности продуцировать индолил-3-уксусную и гиббереллиновую кислоты) позволила выявить наиболее функциональные ассоциации. Наибольшей активностью характеризовались консорциумы № 1 (*P. cremoricolorata*, *E. cloacae*, *K. pasteurii*), № 2 (*B. subtilis*, *B. subtilis*, *B. subtilis*), № 3 (*A. calcoaceticus*, *S. marcescens*,

P. vagans, *S. marcescens*), № 4 (*E. cloacae*, *E. cloacae*, *A. pittii*, *A. pittii*) и № 5 (*P. cremoricolorata*, *E. cloacae*, *E. cloacae*, *A. geminorum*, *K. pasteurii*, *A. pittii*). Лабораторные испытания показали, что максимальное стимулирующее действие на прорастание травосмеси оказывает консорциум № 2, на основе которого инициирована разработка биопрепарата. Для культивирования данного консорциума подобран оптимальный состав питательной среды следующего состава, г/л: бульон Лурия-Бертани – 25,0; $MgSO_4$ – 0,1; сахароза – 3,0; глюкоза – 6,0; L-триптофан – 0,1 и K_2HPO_4 – 3,0.

По принципу «наличие–выпадение» был проведен учет приживаемости древесно-кустарниковых растений, который представляет собой систему количественной оценки, основанную на фиксации доли сохранившихся экземпляров по отношению к общему числу первоначально высаженных растений. Учет был проведен путем визуального осмотра и подсчета живых и погибших растений на отдельных секторах экспериментальных участков в конце каждого вегетационного периода.

Первые два-три года после посадки являются критическим периодом. В это время растения проходят фазу адаптации и наиболее уязвимы к воздействию абиотических и биотических стрессоров, поэтому в этот период проводилось наиболее интенсивное наблюдение.

Ключевым критерием отнесения растения к категории «выпадение» является наличие необратимых признаков гибели: полное отсутствие листового аппарата в период вегетации, усохшие и ломкие надземные части, а также разрушение корневой системы, приводящее к потере устойчивости. Напротив, индикаторами успешной приживаемости служат такие морфофизиологические показатели, как образование сильных побегов, соответствие листовых пластин видовым стандартам по размеру и окраске, а также соблюдение сезонного ритма развития.

Результаты учета оформлялись в виде ведомости, содержащей сведения о месте и дате проведения наблюдений, видовом составе растений, исходной и текущей численности, а также расчетном проценте приживаемости (отношение числа живых растений к исходному количеству).

Оценку проективного покрытия для травосмесей проводили с использованием нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI). Методика основывается на дифференциальной отражательной способности фотосинтезирующих растительных тканей в различных участках спектра. Здоровые растения характеризуются интенсивным поглощением излучения в красной области спектра (0,6–0,7 мкм) вследствие фотосинтетической активности хлорофилла и высоким отражением в ближней инфракрасной области (0,7–1,1 мкм) из-за рассеяния света внутренней структурой мезофилла. NDVI рассчитан по формуле:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

где NIR – отражение в ближнем инфракрасном диапазоне; Red – отражение в красном диапазоне. NDVI количественно выражает наблюдаемый контраст. Значения индекса варьировались от –1 до +1, причем более высокие значения в диапазоне (0,2 до 1,0) коррелировали с увеличением плотности и жизнеспособности растительного покрова.

Процедура оценки включала последовательные этапы сбора и обработки данных. Первичные данные получали с помощью аэрофотосъемки в видимом спектре, выполненной с применением беспилотного летательного аппарата модели DJI Phantom 4 Pro+ с установленным бортовым ГНСС-приемником.

Обработка данных осуществлялась в программном комплексе Agisoft Metashape Professional. Исходными материалами для обработки являлись фотоснимки и координаты центров проекций аэрофотоснимков. Производилась радиометрическая калибровка сырых данных, совмещение спектральных каналов и построение ортомозаики. На основе калиброванных значений яркости рассчитывался растровый слой NDVI.

Переход от значений индекса к количественной оценке проективного покрытия осуществлялся методом классификации. Ключевой задачей являлось определение порогового значения NDVI, которое сегментирует изображение на классы «растительность» и «фон» (открытый грунт, влажные участки, неорганические поверхности). Порог устанавливался эмпирически на основе анализа гистограммы распределения значений индекса, подкрепленного данными наземных наблюдений. После бинаризации раstra, где пиксели, соответствующие растительности, получают значение 1, а фоновые – 0, расчет проективного покрытия выполнялся как отношение количества пикселей класса «растительность» к общему количеству пикселей в пределах исследуемого полигона.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования, проводившиеся в течение 3-х вегетационных периодов с 2023 по 2025 гг. на территории отвала угольного разреза, представляли собой масштабный научный проект, нацеленный на оценку эффективности применения биологического препарата, созданного на основе штаммов микроорганизмов, выделенных непосредственно из грунта экспериментального участка, для стимуляции приживаемости и развития древесно-кустарниковых растений и травосмесей. Ключевой особенностью методологии стала организация трех принципиально различных экспериментальных участков. Каждый из них моделировал один из реально существующих подходов к формированию корнеобитаемого слоя в практике рекультивации, что позволяло изучать процессы начального почвообразования и становления пионерных фитоценозов в экстремальных техногенных условиях.

Первый экспериментальный участок, расположенный на секторах 1.1 и 1.2, сформирован с применением наиболее интенсивной и ресурсоемкой технологии. Она предполагает послойное нанесение потенциально плодородных пород мощностью от 40 до 70 см с последующим покрытием этого слоя полноценным плодородным слоем почвы мощностью от 20 до 40 см. Сформированный в результате этих мероприятий почвенный покров классифицирован как технозем гумусогенный дифференцированный. Этот тип искусственной почвы характеризовался наличием четко выраженных генетических горизонтов, благоприятными водно-физическими свойствами (оптимальная влагоемкость и водопроницаемость), а также сбалансированным агрохимическим составом, обеспечивающим стартовый запас питательных элементов для растений. Изначально такие условия можно было считать близкими к оптимальным для укоренения и последующего развития большинства видов древесно-кустарниковой растительности.

Результаты трехлетнего мониторинга полностью подтвердили высокую эффективность данного подхода к рекультивации. На секторе 1.1, где высаживались основные древесные культуры, приживаемость в варианте с применением биопрепарата к завершающему 2025 г. достигла весьма высоких показателей. Так, для сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., 1753) этот показатель составил 66,7 %, для тополя пирамидального (*Populus nigra* L., 1753) – 71,1 %, для ивы желтокорой (*Salix caprea* L., 1753) – 47,5 %, для караганы древовидной (*Caragana arborescens* Lam., 1785) – 63,3 %, для аронии черноплодной (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott, 1821) – 37,5 %, а для барбариса Тунберга (*Berberis thunbergii* DC., 1821) – 70,0%. Аналогичная положительная динамика зафиксирована и на участке 1.2, где изучались другие кустарниковые виды: приживаемость смородины альпийской (*Ribes alpinum* L., 1753) достигла 73,3 %, шиповника сизого (*Rosa glauca* Pourr., 1788) – 75,0 %, а жимолости сизой (*Lonicera dioica* L., 1753) – 35,3 %.

Однако наиболее интересным наблюдением стало то, что в контрольных группах, где растения не обрабатывались биопрепаратом, показатели приживаемости по большинству изучаемых культур оказались статистически значимо выше. Наглядной иллюстрацией этого явления служат данные, представленные в таблице 2 – приживаемость сосны обыкновенной в контроле составила 85,3 %, что почти на 20 процентных пунктов выше, чем в варианте с биопрепаратом, а приживаемость ивы желтокорой в контроле достигла 70,0 %, что также существенно превышало показатель в 47,5 % на экспериментальном участке.

Данное наблюдение, по всей видимости, указывало на то, что в условиях благоприятного, насыщенного органикой и питательными веществами технозема гумусового, дополнительный стимулирующий эффект от биопрепарата нивелирован или же не проявился в полной мере на фоне изначально высокого фона естественной приживаемости. Можно предположить, что аутохтонная почвенная микробиота в таком субстрате уже была высокоактивной и конкурентоспособной, что не позволила интродуцированным штаммам из биопрепарата эффективно колонизировать ризосферу и оказать заметное положительное воздействие.

В отношении травосмесей, высеваемых методом гидропосева на секторе 1.1 и классическим ручным посевом на секторе 1.2 (табл. 3), к 2024 г. отмечено достижение 100,0 % проективного покрытия почвы как в вариантах с применением биопрепарата, так и на контрольных делянках. Это свидетельствовало о том, что травостой в конечном счете сомкнулся независимо от применяемой обработки. В самый первый год вегетации (2023 г.) наблюдалась иная картина: проективное покрытие в варианте с биопрепаратом было ниже (63,0 % для гидропосева и 58,0 % для ручного посева), чем в соответствующих контрольных группах (72,0 и 63,0 %). Это может говорить о более медленном стартовом развитии надземной массы травяного покрова под влиянием препарата. Вероятным объяснением являлось то, что биопрепарат в начальный период направлял основные ресурсы растения не на формирование вегетативных органов, а на усиленное развитие корневой системы, что является классическим механизмом действия многих ризосферных микроорганизмов. Такая стратегия, хотя и замедляла видимый рост в первый сезон, в последующие годы компенсировалось более мощной корневой системой, способной эффективнее усваивать воду и питательные вещества, что в итоге и привело к выравниванию показателей проективного покрытия ко второму году наблюдений.

Второй экспериментальный участок, включавший сектора 2.1 и 2.2, создан с применением менее затратного метода рекультивации, который заключался в отсыпке потенциально-плодородных пород мощностью от 50 до 80 см без последующего нанесения плодородного слоя почвы. Сформированный здесь почвенный

покров классифицирован как технозем литогенный недифференцированный. Этот тип субстрата существенно отличался от предыдущего: он характеризовался отсутствием четкой горизонтности, более бедным питательным режимом (поскольку лишен гумусированного слоя), а также менее благоприятными водно-физическими свойствами, такими как пониженная влагоемкость и потенциальная склонность к уплотнению. Именно в этих условиях, промежуточных между оптимальными и экстремальными, влияние биопрепарата проявилось наиболее контрастно и избирательно.

На секторе 2.1 (табл. 4) приживаемость древесных культур в варианте с биопрепаратом к 2025 г. демонстрировала значительный разброс, явно указывающий на видоспецифичность эффекта. Показатели варьировали от 74,0 % у сосны обыкновенной (*P. sylvestris*) до 100,0 % у тополя пирамидального (*P. nigra*). Высокую приживаемость также показали карагана древовидная (*C. arborescens*) – 77,8 %, смородина альпийская (*R. alpinum*) – 80,8 %, арония черноплодная (*A. melanocarpa*) – 78,9 %, барбарис Тунберга (*B. thunbergii*) – 97,1 % и пузыреплодник калинолистный (*Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim., 1879) – 95,8 %. При этом в контрольных группах показатели по ряду культур сопоставимы или даже незначительно выше, что опять же подчеркивало сложность взаимодействия в системе «растение–микроорганизм–субстрат». Особый интерес представляла динамика аронии черноплодной: если в контроле ее приживаемость к 2025 г. снизилась до 84,2 %, то в варианте с биопрепаратом она стабилизировалась на отметке 78,9 %. Хотя абсолютный показатель в контроле остался выше, тенденция к снижению в нем при стабилизации в опыте могла косвенно указывать на положительную роль биопрепарата в смягчении стрессовых условий для данной культуры.

На секторе 2.2 (табл. 5) рассмотрим динамику жимолости сизой. В варианте с биопрепаратом ее приживаемость прогрессивно и заметно снижалась с 89,5 % в 2023 г. до 63,6 % в 2025 г. В то же время в контрольной группе снижение было менее выраженным – с 95,5 до 84,1 %.

Такая негативная динамика может говорить о недостаточной эффективности конкретных штаммов микроорганизмов, входящих в состав препарата, именно для данного вида растения в специфических условиях литогенного субстрата. Альтернативным объяснением может служить повышенная чувствительность жимолости сизой к каким-либо метаболитам интродуцированных микроорганизмов или изменение химизма ризосферы, оказавшееся для нее неблагоприятным.

Для травосмесей на втором участке также выявлена неоднозначная картина. На секторе 2.1, где применялся гидропосев, вариант с биопрепаратом показал в первый год более низкое проективное покрытие (87,0 %), по сравнению с контрольной делянкой (98,0 %). Однако к 2024 г. эти различия полностью

Таблица 2. Приживаемость травосмеси и древесно-кустарниковых культур на секторе 1.1 участка 1 (использован гидропосев смеси трав)

Table 2. Grass (hydroseeded), trees, and shrubs in Sector 1.1, Plot 1: Survival rate

Состав травосмеси / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт				Приживаемость, %*	
			2023	2024	2025		2023	2024
Овсяница красная (<i>Festuca rubra</i> L., 1753) не менее 7 % Кострец безостый (<i>Bromopsis inermis</i> (Leyss.) Holub, 1973) не менее 7 % Донник желтый (<i>Melilotus officinalis</i> (L.) Pall., 1776) не менее 7 % Пырей (<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski, 1933) не менее 7 % Фестулолиум (× <i>Festulolium</i> Asch. & Graebn., 1902) не менее 7 % Тимофеевка луговая (<i>Phleum pratense</i> L., 1753) не менее 10 % Житняк гребенчатый (<i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn., 1770) не менее 7 % Ежа сборная (<i>Dactylis glomerata</i> L., 1753) не менее 7 % Клевер белый (<i>Trifolium repens</i> L., 1753) не менее 7 % Люпин многолетний (<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl., 1827) не менее 13 % Эспарцет песчаный (<i>Onobrychis arenaria</i> (Kit.) DC., 1813) не менее 7 % Вика яровая (<i>Vicia sativa</i> L., 1753) не менее 7 % Люцерна сингибридная (<i>Medicago sativa</i> L. (основной вид), 1753) не менее 7 % Основа – смесь GrowMix + мульча	Биопрепарат	500 м ²	–	–	–	63,0	100,0	100,0
	Контроль	500 м ²	–	–	–	72,0	100,0	100,0
	Биопрепарат	75 шт	53	53	50	70,7	70,7	66,7
Сосна обыкновенная <i>Pinus sylvestris</i> L., 1753	Контроль	75 шт	64	64	64	85,3	85,3	85,3
	Биопрепарат	45 шт	34	34	32	75,6	75,6	71,1
	Контроль	45 шт	39	39	38	86,7	86,7	84,4
Ива желтокорая <i>Salix caprea</i> L., 1753	Биопрепарат	40 шт	26	20	19	65,0	50,0	47,5
	Контроль	40 шт	28	28	28	70,0	70,0	70,0
	Биопрепарат	30 шт	20	19	19	66,7	63,3	63,3
Карагана древовидная <i>Caragana arborescens</i> Lam., 1785	Контроль	30 шт	22	21	20	73,3	70,0	66,7
	Биопрепарат	40 шт	16	15	15	40,0	37,5	37,5
	Контроль	40 шт	24	24	24	60,0	60,0	60,0
Арония черноплодная <i>Aronia melanocarpa</i> (Michx.) Elliott, 1821	Биопрепарат	60 шт	42	42	42	70,0	70,0	70,0
	Контроль	60 шт	51	51	51	85,0	85,0	85,0
	Биопрепарат	60 шт	42	42	42	70,0	70,0	70,0
Барбарис Тунберга <i>Berberis thunbergii</i> DC., 1824	Контроль	60 шт	51	51	51	85,0	85,0	85,0
	Биопрепарат	60 шт	42	42	42	70,0	70,0	70,0
	Контроль	60 шт	51	51	51	85,0	85,0	85,0

Примечание: * – в случае посева травосмесей учитывается проективное покрытие засеянного участка.

Note: * – the grass plot accounted for projective cover.

Таблица 3. Приживаемость травосмеси и древесно-кустарниковых культур на секторе 1.2 участка 1 (использован ручной посев смеси трав)

Table 3. Grass (manual sowing), trees, and shrubs in Sector 1.2, Plot 1: Survival rate

Состав травосмеси / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт			Приживаемость, %*		
			2023	2024	2025	2023	2024	2025
Овсяница луговая (<i>Festuca pratensis</i> Huds., 1762) не менее 23 % Клевер белый (<i>Trifolium repens</i> L., 1753) не менее 10 % Люцерна синегридная (<i>Medicago sativa</i> L., 1753) не менее 23 % Мятлик луговой (<i>Poa pratensis</i> L., 1753) не менее 10 % Люпин многолетний (<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl., 1827) не менее 34 %	Биопрепарат (обработка биопрепаратом семян перед посевом)	1000 м ²	–	–	–	–	–	–
	Контроль	1000 м ²	–	–	–	63,0	100,0	100,0
	Биопрепарат	15 шт	11	11	11	73,3	73,3	73,3
	Контроль	15 шт	13	13	13	86,7	86,7	86,7
Шиповник сизый <i>Rosa glauca</i> Poir., 1788	Биопрепарат	12 шт	9	9	9	75,0	75,0	75,0
	Контроль	12 шт	11	11	11	91,7	91,7	91,7
Жимолость сизая <i>Lonicera dioica</i> L., 1753	Биопрепарат	17 шт	12	11	6	70,59	64,71	35,29
	Контроль	17 шт	13	13	11	76,47	76,47	64,71

Примечание: * – в случае посева травосмесей учитывается проективное покрытие засеянного участка.

Note: * – the grass plot accounted for projective cover.

Таблица 4. Приживаемость травосмеси и древесно-кустарниковых культур на секторе 2.1 участка 2 (использован гидропосев трав)

Table 4. Grass (hydroseeded), trees, and shrubs in Sector 2.1, Plot 2: Survival rate

Состав травосмеси / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт			Приживаемость, %*		
			2023	2024	2025	2023	2024	2025
Кострец безостый (<i>Bromopsis inermis</i> (Leyss.) Holub, 1973), овсяница красная (<i>Festuca rubra</i> L., 1753), донник желтый (<i>Melilotus officinalis</i> (L.) Pall., 1776), пырей ползучий (<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski, 1933), фестулолиум (× <i>Festulolium</i> Asch. & Graebn., 1902), тимopheвка луговая (<i>Phleum pratense</i> L., 1753) не менее 51 % Мятлик луговой (<i>Poa pratensis</i> L., 1753) не менее 7 % Житняк гребенчатый (<i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn., 1770) не менее 7 % Клевер белый (<i>Trifolium repens</i> L., 1753) не менее 7 % Эспарцет песчаный (<i>Onobrychis arenaria</i> (Kit.) DC., 1813) не менее 7 % Люпин многолетний (<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl., 1827) не менее 7 % Вика яровая (<i>Vicia sativa</i> L., 1753) не менее 7 % Люцерна синегридная (<i>Medicago sativa</i> L., 1753) не менее 7 % Основа – смесь GrowMix + мульча	Биопрепарат (внесение в основу)	1000 м ²	–	–	–	87,0	100,0	100,0
			–	–	–	–	–	–
			–	–	–	–	–	–
			–	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 4

Состав травосмесей / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт			Приживаемость, %*		
			2023	2024	2025	2023	2024	2025
Кострец безостый (<i>Bromopsis inermis</i> (Leyss.) Holub, 1973), овсяница красная (<i>Festuca rubra</i> L., 1753), донник желтый (<i>Melilotus officinalis</i> (L.) Pall., 1776), пырей ползучий (<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski, 1933), фестулолиум (× <i>Festulolium</i> Asch. & Graebn., 1902), тимopheвка луговая (<i>Phleum pratense</i> L., 1753) не менее 51 %	Контроль	1000 м ²	–	–	–	98,0	100,0	100,0
Мятлик луговой (<i>Poa pratensis</i> L., 1753) не менее 7 %								
Житняк гребенчатый (<i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn., 1770) не менее 7 %								
Клевер белый (<i>Trifolium repens</i> L., 1753) не менее 7 %								
Эспарцет песчаный (<i>Onobrychis arenaria</i> (Kit.) DC., 1813) не менее 7 %								
Люпин многолетний (<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl., 1827) не менее 7 %	Контроль	73 шт	55	54	54	75,3	74,0	74,0
Вика яровая (<i>Vicia sativa</i> L., 1753) не менее 7 %								
Люцерна синегридная (<i>Medicago sativa</i> L., 1753) не менее 7 %								
Основа – смесь GrowMix + мульча								
Карагана древовидная <i>Caragana arborescens</i> Lam., 1785								
Смородина альпийская <i>Ribes alpinum</i> L., 1753	Биопрепарат	36 шт	31	30	28	86,1	83,3	77,8
	Контроль	36 шт	32	32	31	88,9	88,9	86,1
Сосна обыкновенная <i>Pinus sylvestris</i> L., 1753	Биопрепарат	26 шт	24	24	21	92,3	92,3	80,8
	Контроль	26 шт	26	25	25	100,0	96,2	96,2
Тополь пирамидальный <i>Populus nigra</i> L., 1753	Биопрепарат	59 шт	59	54	54	100,0	91,5	91,5
	Контроль	24 шт	24	24	24	100,0	100,0	100,0
Арония черноплодная <i>Aronia melanocarpa</i> (Michx.) Elliott, 1821	Биопрепарат	24 шт	24	24	24	100,0	100,0	100,0
	Контроль	19 шт	19	15	15	100,0	78,9	78,9
Барбарис Тунберга <i>Berberis thunbergii</i> DC., 1824	Биопрепарат	19 шт	19	18	16	100,0	94,7	84,2
	Контроль	34 шт	33	33	33	97,1	97,1	97,1
Пузыреплодник калинолистный <i>Physocarpus opulifolius</i> (L.) Maxim., 1879	Биопрепарат	34 шт	32	32	32	94,1	94,1	94,1
	Контроль	24 шт	24	23	23	100,0	95,8	95,8
	Контроль	24 шт	24	22	22	100,0	91,7	91,7

Примечание: * – в случае посева травосмесей учитывается проективное покрытие засеянного участка.

Note: * – the grass plot accounted for projective cover.

Таблица 5. Приживаемость травосмеси и древесно-кустарниковых культур на секторе 2.2 участка 2 (использован ручной посев смеси трав)

Table 5. Grass (manual sowing), trees, and shrubs in Sector 2.2, Plot 2: Survival rate

Состав травосмеси / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт			Приживаемость, %*		
			2023	2024	2025	2023	2024	2025
Овсяница луговая (<i>Festuca pratensis</i> Huds., 1762) не менее 10 % Тимофеевка луговая (<i>Phleum pratense</i> L., 1753) не менее 10 % Клевер белый (<i>Trifolium repens</i> L., 1753) не менее 50 % Люцерна синегридная (<i>Medicago sativa</i> L., 1753) не менее 30 %	Биопрепарат (обработка биопрепаратом семян перед посевом)	500 м ²	–	–	–	85,0	100,0	100,0
	Контроль	500 м ²	–	–	–	81,0	100,0	100,0
	Биопрепарат	60 шт	51	50	48	85,0	83,3	80,0
	Контроль	75 шт	71	70	68	94,7	93,3	90,7
Береза повислая <i>Betula pendula</i> Roth, 1788	Биопрепарат	80 шт	51	50	50	63,8	62,5	62,5
	Контроль	80 шт	64	64	63	80,0	80,0	78,8
	Биопрепарат	22 шт	19	19	19	86,4	86,4	86,4
	Контроль	13 шт	13	13	12	100,0	100,0	92,3
Карагана древовидная <i>Caragana arborescens</i> Lam., 1785	Биопрепарат	87 шт	74	73	73	85,1	83,9	83,9
	Контроль	87 шт	78	76	76	89,7	87,4	87,4
	Биопрепарат	8 шт	7	7	7	87,5	87,5	87,5
	Контроль	8 шт	8	8	8	100,0	100,0	100,0
Смородина альпийская <i>Ribes alpinum</i> L., 1753	Биопрепарат	12 шт	12	10	10	100,0	83,3	83,3
	Контроль	12 шт	12	12	11	100,0	100,0	91,7
	Биопрепарат	44 шт	38	35	28	86,4	79,5	63,6
	Контроль	44 шт	42	39	37	95,5	88,6	84,1

Примечание: * – в случае посева травосмесей учитывается проективное покрытие засеянного участка.

Note: * – the grass plot accounted for projective cover.

нивелировались, и покрытие достигло 100,0 % в обоих вариантах. Напротив, на секторе 2.2, где использовался ручной посев с предпосевной обработкой семян биопрепаратом, зафиксирована противоположная тенденция: стартовое проективное покрытие в опыте было немного выше (85,0 %), чем в контроле (81,0 %). Это явное расхождение свидетельствовало о высокой вариабельности эффекта биопрепарата, которая зависит не только от видового состава травостоя, но и от технологического приема посева, определяющего плотность контакта семян с препаратом и почвой.

Третий экспериментальный участок (сектора 3.1, 3.2 и 3.3) создан в наиболее суровых и экстремальных условиях – непосредственно на поверхности спланированного отвала вскрышных пород, без какого-либо дополнительного нанесения почвенных или почвообразующих материалов. Почва здесь классифицировалась как эмбриозем инициальный – самая начальная стадия почвообразования. Такой субстрат характеризовался крайне низким содержанием органического вещества и доступных форм азота, фосфора и калия, неблагоприятными физическими свойствами (часто тяжелый гранулометрический состав, склонность к заплыванию или, наоборот, каменистость), отсутствием структуры и, как следствие, недостаточной влагоемкостью. Результаты, полученные на этом участке, наиболее ярко демонстрировали реакцию растений на острый стресс, а применение биопрепарата в таких условиях показало свою наименьшую эффективность.

Показатели приживаемости древесно-кустарниковых видов в варианте с биопрепаратом здесь в среднем были существенно ниже, чем на первых двух участках, а какой-либо статистически значимый положительный эффект от его применения проявился лишь эпизодически и был крайне неустойчив. Например, на секторе 3.1 (табл. 6) приживаемость сосны обыкновенной (*P. sylvestris*) в варианте с биопрепаратом составила 66,0 %, тогда как в контроле она была равна 70,7 %. Еще более показательная разница наблюдалась у аронии черноплодной (*A. melanocarpa*): 52,9 % в опыте против 70,6 % в контроле. Аналогичная негативная для биопрепарата картина отмечена и для других культур: приживаемость караганы древовидной (*C. arborescens*) составила 87,5 % в варианте с биопрепаратом против 93,8 % в контроле, а ивы желтокорой (*S. caprea*) – 70,6 % против 82,4 % соответственно.

На секторе 3.2 (табл. 7) жимолость сизая в варианте с биопрепаратом показала катастрофически низкую приживаемость, которая к 2025 г. упала до 50,0 %, в то время как в контрольной группе этот показатель оставался на относительно высоком уровне – 83,3 %.

Наиболее критичные данные получены на секторе 3.3 (табл. 8), где в варианте с биопрепаратом к 2025 г. отмечены случаи полной гибели некоторых видов, в частности, шиповника сизого *R. glauca* (0 % сохранности), чего на контрольных делянках не наблюдалось.

Для травосмесей на третьем участке также была характерна более низкая стартовая скорость набора проективного покрытия в вариантах с биопрепаратом (76,0; 64,0 и 51,0 % на секторах 3.1, 3.2 и 3.3 соответственно), по сравнению с контролем (89,0; 75,0 и 63,0 %). Однако к 2024 г., благодаря высокой семенной продуктивности и самосеву, везде в конечном итоге достигалось 100,0 % покрытие.

Полученные на третьем участке данные позволили выдвинуть предположение, что в условиях эмбриозема инициального, где абиотические стрессы являются лимитирующим фактором, биопрепарат не только не оказывал положительного воздействия на первоначальное укоренение растений, но, вероятно, создавал дополнительную нагрузку на них в критический период адаптации. Это могло происходить по нескольким причинам: во-первых, интродуцированные микроорганизмы вступали в жесткую конкурентную борьбу с немногочисленной, но, возможно, высокоспециализированной аборигенной микробиотой за крайне ограниченные ресурсы (остатки органического вещества, влага); во-вторых, сами растения, находящиеся в состоянии сильнейшего стресса, могли не обладать достаточным энергетическим ресурсом для установления эффективного симбиоза с микроорганизмами, который всегда является энергозатратным процессом; в-третьих, не исключено, что препарат вызывал кратковременные изменения pH ризосферы или продуцировал метаболиты, которые в условиях острого дефицита других элементов питания оказывали на ослабленные растения токсическое воздействие.

Обобщая весь массив полученных за трехлетний период данных, можно с уверенностью констатировать, что эффективность применения исследуемого биопрепарата находилась в прямой и сильной зависимости от исходных почвенно-экологических условий, созданных тем или иным методом рекультивации.

Наиболее благоприятный технозем гумусогенный (участок 1), характеризующийся оптимальными агрофизическими и агрохимическими параметрами, фактически минимизировал положительный эффект от препарата. В этих условиях решающее значение для успешной приживаемости и роста растений имели традиционные факторы: качество посадочного материала, тщательность проведения посадки и последующего ухода. Применение же биопрепарата в такой ситуации не только экономически не оправдано, но в некоторых случаях может даже приводить к незначительному снижению показателей по не до конца выясненным причинам, возможно, связанным с микробной конкуренцией.

На техноземе литогенном (участок 2), представляющем собой модель промежуточных по плодородию условий, эффект биопрепарата проявился наиболее ярко, но оказался резко видоспецифичным и неоднозначным. Для одних культур, таких как тополь пирамидальный, барбарис Тунберга и пузыреплодник калинолистный, он, по всей видимости, стал стабилизирующим

Таблица 6. Приживаемость травосмеси и древесно-кустарниковых культур на секторе 3.1 участка 3 (использован гидропосев смеси трав)

Table 6. Grass (manual sowing), trees, and shrubs in Sector 3.1, Plot 3: Survival rate

Состав травосмеси / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт				Приживаемость, %*		
			2023	2024	2025		2023	2024	2025
Тимофеевка луговая (<i>Phleum pratense</i> L., 1753) не менее 50 % Мятлик луговой (<i>Poa pratensis</i> L., 1753) не менее 7 % Житняк гребенчатый (<i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn., 1770) не менее 7 % Клевер белый (<i>Trifolium repens</i> L., 1753) не менее 7 % Эспарцет песчаный (<i>Onobrychis arenaria</i> (Kit.) DC., 1813) не менее 7 % Люпин многолетний (<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl., 1827) не менее 7 % Вика яровая (<i>Vicia sativa</i> L., 1753) не менее 7 % Люцерна синегридная (<i>Medicago sativa</i> L., 1753) не менее 7 % Основа – смесь GrowMix + мульча	Биопрепарат (внесение в основу)	1000 м ²	–	–	–		76,0	100,0	100,0
	Контроль	1000 м ²	–	–	–		89,0	100,0	100,0
	Биопрепарат	50 шт	33	33	33		66,0	66,0	66,0
	Контроль	75 шт	53	53	53		70,7	70,7	70,7
	Биопрепарат	23 шт	18	17	17		78,3	73,9	73,9
Тополь пирамидальный <i>Populus nigra</i> L., 1753	Контроль	23 шт	20	18	18		87,0	78,3	78,3
	Биопрепарат	32 шт	28	28	28		87,5	87,5	87,5
	Контроль	32 шт	30	30	30		93,8	93,8	93,8
	Биопрепарат	34 шт	26	24	24		76,5	70,6	70,6
	Контроль	34 шт	29	29	28		85,3	85,3	82,4
Арония черноплодная <i>Aronia melanocarpa</i> (Michx.) Elliott, 1821	Биопрепарат	17 шт	9	9	9		52,9	52,9	52,9
	Контроль	17 шт	12	12	12		70,6	70,6	70,6
	Биопрепарат	37 шт	25	25	25		67,6	67,6	67,6
	Контроль	37 шт	31	31	31		83,8	83,8	83,8
	Биопрепарат	5 шт	4	4	4		80,0	80,0	80,0
Смородина альпийская <i>Ribes alpinum</i> L., 1753	Контроль	5 шт	5	5	4		100,0	100,0	80,0
	Биопрепарат	5 шт	4	4	4		80,0	80,0	80,0
	Контроль	5 шт	4	4	4		80,0	80,0	80,0
	Биопрепарат	5 шт	5	5	4		100,0	100,0	80,0
	Контроль	5 шт	5	5	4		100,0	100,0	80,0

Примечание: * – в случае посева травосмесей учитывается проективное покрытие засеянного участка.

Note: * – the grass plot accounted for projective cover.

Таблица 7. Приживаемость травосмеси и древесно-кустарниковых культур на секторе 3.2 участка 3 (использован ручной посев травосмеси)

Table 7. Grass (manual sowing), trees, and shrubs in Sector 3.2, Plot 3: Survival rate

Состав травосмеси / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт				Приживаемость, %*		
			2023	2024	2025		2023	2024	2025
Овсяница луговая (<i>Festuca pratensis</i> Huds., 1762) не менее 10 % Тимофеевка луговая (<i>Phleum pratense</i> L., 1753) не менее 10 % Клевер белый (<i>Trifolium repens</i> L., 1753) не менее 10 % Люцерна снегибридная (<i>Medicago sativa</i> L., 1753) не менее 10 % Солянка Комарова (<i>Salsola komarovii</i> Ijima, 1936) не менее 10 %	Биопрепарат (обработка биопрепаратом семян перед посевом)	1000 м ²	–	–	–		64,0	100,0	100,0
	Контроль	1000 м ²	–	–	–		75,0	100,0	100,0
	Биопрепарат	65 шт	49	49	49		75,4	75,4	75,4
	Контроль	65 шт	58	58	58		89,2	89,2	89,2
Береза повислая <i>Betula pendula</i> Roth, 1788	Биопрепарат	91 шт	52	49	48		57,1	53,8	52,7
	Контроль	91 шт	54	50	50		59,3	54,9	54,9
Карагана древовидная <i>Caragana arborescens</i> Lam., 1785	Биопрепарат	23 шт	19	19	19		82,6	82,6	82,6
	Контроль	23 шт	21	21	21		91,3	91,3	91,3
Черемуха обыкновенная <i>Prunus padus</i> L., 1753	Биопрепарат	13 шт	11	11	9		84,6	84,6	69,2
	Контроль	13 шт	13	12	12		100,0	92,3	92,3
Смородина альпийская <i>Ribes alpinum</i> L., 1753	Биопрепарат	8 шт	6	6	5		75,0	75,0	62,5
	Контроль	8 шт	8	7	7		100,0	87,5	87,5
Жимолость сизая <i>Lonicera dioica</i> L., 1753	Биопрепарат	6 шт	3	3	3		50,0	50,0	50,0
	Контроль	6 шт	5	5	5		83,3	83,3	83,3
Шиповник сизый <i>Rosa glauca</i> Poir., 1788	Биопрепарат	8 шт	6	4	4		75,0	50,0	50,0
	Контроль	8 шт	8	8	8		100,0	100,0	100,0

Примечание: * – в случае посева травосмесей учитывается проективное покрытие засеянного участка.

Note: * – the grass plot accounted for projective cover.

Таблица 8. Приживаемость травосмеси и древесно-кустарниковых культур на секторе 3.3 участка 3 (использован ручной посев травосмеси)

Table 8. Grass (manual sowing), trees, and shrubs in Sector 3.3, Plot 3: Survival rate

Состав травосмеси / вид растения	Вариант эксперимента	Площадь посева / количество растений	Количество растений на конец вегетационного периода, шт			Приживаемость, %*		
			2023	2024	2025	2023	2024	2025
Эспарлет песчаный (<i>Onobrychis arenaria</i> (Kit.) DC., 1813) не менее 70 % Мятлик луговой (<i>Poa pratensis</i> L., 1753) не менее 15 % Донник желтый (<i>Melilotus officinalis</i> (L.) Pall., 1776) не менее 10 % Щавель конский (<i>Rumex confertus</i> Willd., 1809) не менее 5 %	Биопрепарат (обработка биопрепаратом семян перед посевом)	1000 м ²	–	–	–	51,0	100,0	100,0
	Контроль	1000 м ²	–	–	–	63,0	100,0	100,0
	Биопрепарат	52 шт	45	45	44	86,5	86,5	84,6
Лиственница сибирская <i>Larix sibirica</i> Ledeb., 1833	Контроль	75 шт	73	71	71	97,3	94,7	94,7
	Биопрепарат	78 шт	32	29	29	41,0	37,2	37,2
Береза повислая <i>Betula pendula</i> Roth, 1788	Контроль	78 шт	46	46	46	59,0	59,0	59,0
	Биопрепарат	26 шт	23	23	23	88,5	88,5	88,5
Сосна обыкновенная <i>Pinus sylvestris</i> L., 1753	Контроль	52 шт	48	48	48	92,3	92,3	92,3
	Биопрепарат	13 шт	10	10	10	76,9	76,9	76,9
Пузыреплодник калинолистный <i>Physocarpus opulifolius</i> (L.) Maxim., 1879	Контроль	13 шт	12	12	12	92,3	92,3	92,3
	Биопрепарат	8 шт	6	6	6	75,0	75,0	75,0
Вяз мелколистный <i>Ulmus parvifolia</i> Jacq., 1798	Контроль	12 шт	10	10	9	83,3	83,3	75,0
	Биопрепарат	3 шт	2	2	0	66,7	66,7	0
Шиповник сизый <i>Rosa glauca</i> Poir., 1788	Контроль	4 шт	3	2	2	75,0	50,0	50,0
	Биопрепарат	3 шт	2	1	1	66,7	33,3	33,3
Жимолость сизая <i>Lonicera dioica</i> L., 1753	Контроль	3 шт	2	2	2	66,7	66,7	66,7
	Биопрепарат	3 шт	2	2	2	66,7	66,7	66,7
Смородина альпийская <i>Ribes alpinum</i> L., 1753	Контроль	3 шт	3	3	3	100,0	100,0	100,0
	Биопрепарат	3 шт	3	3	3	100,0	100,0	100,0

Примечание: * – в случае посева травосмесей учитывается проективное покрытие засеянного участка.

Note: * – the grass plot accounted for projective cover.

фактором, способствуя высокой и стабильной приживаемости. Для других, в частности, для жимолости сизой и, отчасти, аронии черноплодной, его влияние было нейтральным или откровенно негативным в долгосрочной перспективе. Это полностью согласовывалось с общебиологическими данными, что эффективность микробных инокулянтов сильно зависит от конкретного растения-хозяина и его генетически обусловленной симбиотической специфичности. Не все растения одинаково готовы к сотрудничеству с одними и теми же штаммами микроорганизмов.

Наименее эффективным, а в большинстве случаев и негативным, применение биопрепарата оказалось в наиболее суровых условиях эмбриозема инициального (участок 3). Здесь совокупность абиотических стрессов, таких как острый дефицит основных питательных веществ, недостаточная влагоемкость субстрата и нестабильный температурный режим, была настолько сильна, что потенциальный положительный эффект от микробного препарата не мог быть реализован в принципе. Более того, в таких экстремальных условиях интродуцированные микроорганизмы, сами находящиеся в стрессе, могли вступать в обостренную конкуренцию как с аборигенной микробиотой, так и непосредственно с растениями за критически ограниченные ресурсы, прежде всего за влагу и легкодоступный углерод, тем самым усугубляя и без того тяжелое состояние фитоценоза.

Таким образом, полученные данные позволяют сделать фундаментальный вывод, что применение биопрепаратов для рекультивации нарушенных земель не должно рассматриваться как универсальное или самостоятельное решение. Их следует рассматривать исключительно как один из элементов комплексной адаптивной технологии, эффективность которого жестко детерминирована двумя ключевыми факторами: типом формируемого почвенного субстрата и конкретным видовым составом высаживаемых растений. Наилучшие перспективы для использования подобных биопрепаратов связаны именно с промежуточными условиями по плодородию, какими и являются техноземы литогенные. В таких ситуациях он может выступать в роли важного стабилизирующего фактора, нивелирующего часть стрессовых воздействий для восприимчивых к нему видов. В благоприятных же условиях его применение экономически нецелесообразно, а в крайне неблагоприятных – требует не простого внесения, а глубокой предварительной научно обоснованной адаптации самого препарата к специфике эмбриоземов, например, через селекцию особо толерантных штаммов, либо его сочетания с другими, более мощными мерами по мелиорации (внесение органических удобрений, мелиорантов, структурообразователей) субстрата.

Дальнейшие исследовательские изыскания в этом направлении должны быть сфокусированы на целенаправленном подборе специфических штаммов микро-

организмов, проявляющих высокую толерантность к условиям конкретных техногенных субстратов (высокий pH, наличие тяжелых металлов, дефицит органики), и на углубленном изучении их взаимодействия не только с растениями, но и с комплексом аборигенной почвенной микробиоты. Только такой системный подход позволит создать следующее поколение высокоэффективных и узкоспециализированных биопрепаратов для рекультивации.

Выводы

На основе проведенного трехлетнего исследования по рекультивации техногенно нарушенных территорий угольного разреза можно сделать следующие выводы.

Эффективность применения биопрепарата на основе штаммов микроорганизмов продемонстрировала сильную зависимость от типа формируемого почвенного субстрата и видового состава высаживаемых растений. На участке с наиболее благоприятными условиями – техноземом гумусогенным дифференцированным, созданным послойным нанесением плодородного и потенциально-плодородного слоев, – биопрепарат не оказал значимого положительного влияния на приживаемость древесно-кустарниковых видов. Более того, в ряде случаев показатели приживаемости в контрольных группах были выше, что, вероятно, связано с высокой естественной микробиологической активностью субстрата и конкуренцией с интродуцированными штаммами.

На участке с техноземом литогенным недифференцированным, где плодородный слой отсутствовал, действие биопрепарата проявилось наиболее контрастно и избирательно. Для таких культур, как тополь пирамидальный (*Populus nigra* L., 1753), барбарис Тунберга (*Berberis thunbergii* DC., 1824) и пузыреплодник калинолистный (*Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim., 1879), отмечена стабильно высокая приживаемость, тогда как для других видов, например жимолости сизой (*Lonicera dioica* L., 1753), влияние препарата было нейтральным или даже отрицательным. Это подчеркивало видоспецифичность взаимодействия между растениями и микробным консорциумом. В наиболее экстремальных условиях эмбриозема инициального, сформированного на отвале вскрышных пород, применение биопрепарата не только не способствовало улучшению приживаемости, но в ряде случаев усугубляло стресс растений. Высокая конкуренция за ограниченные ресурсы между интродуцированными микроорганизмами и аборигенной микробиотой, а также энергетическая затратность симбиоза для ослабленных растений, вероятно, стали основными причинами низкой эффективности препарата в таких условиях.

Таким образом, использование биопрепаратов для рекультивации не является универсальным решением и должно применяться избирательно. Наилучшие

результаты достигаются в условиях техноземов литогенных, где препарат может выступать стабилизирующим фактором. В благоприятных условиях его применение нецелесообразно, а в экстремальных – требует дополнительной адаптации штаммов или сочетания с другими мерами мелиорации. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку специализированных микробных комплексов, толерантных к специфике техногенных субстратов.

Критерии авторства

Авторы заявляют о равнозначном вкладе в подготовку и написание статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциальных конфликтов интересов в отношении исследования, авторства и / или публикации данной статьи.

Contribution

The authors contributed equally to the research and bear equal responsibility for any potential plagiarism.

Conflict of interest

The authors declared no potential conflict of interest regarding the research, authorship, and/or publication of this article.

References / Список литературы

1. Степанюк Г. Я., Заушинцева А. В., Буренков С. С., Свиркова С. В., Гаврилов А. А. и др. Оценка развития растительности техногенного отвала. Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 4. С. 807–818. [Stepanyuk GYa, Zaushintsena AV, Burenkov SS, Svirskova SV, Gavrilov AA, et al. Evaluating the vegetation development of coal-mine dumps. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(4):807–818. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2407>
2. Asyakina LK, Vorob'eva EE, Proskuryakova LA, Zharko MYu. Evaluating extremophilic microorganisms in industrial regions. Foods and Raw Materials. 2023;11(1):162–171. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-556>
3. Осинцева М. А., Дюкова Е. А., Ульянова Е. Г., Осинцев А. М. Изучение способности аккумуляции тяжелых металлов растениями в процессе рекультивации отвала угольного разреза. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 4. С. 897–908. [Osintseva MA, Dyukova EA, Ulyanova EG, Osintsev AM. Heavy metals accumulation in plants during coal mine reclamation. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(4):897–908. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2551>
4. Hu J, Zhu S, Yang K, Ren Y, Zhang Z, et al. Effects of different reclaimed mine land use patterns on the soil properties and water infiltration of opencast coal mines in the northern Loess Plateau, China. Catena. 2024;243:108193. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108193>
5. Čížková B, Woš B, Pietrzykowski M, Frouz J. Development of soil chemical and microbial properties in reclaimed and unreclaimed grasslands in heaps after opencast lignite mining. Ecological Engineering. 2018;123:103–111. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.09.004>
6. Pratiwi, Narendra BH, Siregar CA, Turjaman M, Hidayat A, et al. Managing and reforesting degraded post-mining landscape in Indonesia: A Review. Land. 2021;10(6):658. <https://doi.org/10.3390/land10060658>
7. Tu C, Wei J, Guan F, Liu Y, Sun Y, et al. Biochar and bacteria inoculated biochar enhanced Cd and Cu immobilization and enzymatic activity in a polluted soil. Environment International. 2020;137:105576. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105576>
8. Prach K, Pyšek P. Using spontaneous succession for restoration of human-disturbed habitats: Experience from Central Europe. Ecological Engineering. 2001;17(1):55–62. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(00\)00132-4](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00132-4)
9. Visconti D, Álvarez-Robles MJ, Fiorentino N, Fagnano M, Clemente R. Use of *Brassica juncea* and *Dactylis glomerata* for the phytostabilization of mine soils amended with compost or biochar. Chemosphere. 2020;260:127661. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127661>
10. Guo J, Zhang Y, Huang H, Yang F. Deciphering soil bacterial community structure in subsidence area caused by underground coal mining in arid and semiarid area. Applied Soil Ecology. 2021;163:103916. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103916>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Осинцева Мария Алексеевна / Maria A. Osintseva ORCID 0000-0002-4045-8054; eLIBRARY SPIN 8266-5409
Жидкова Елена Анатольевна / Elena A. Zhidkova ORCID 0000-0002-7658-0254; eLIBRARY SPIN 5805-7999