

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-4-21-35>

УДК 574.24

ЭФФЕКТИВНОСТЬ БИОРЕМЕДИАЦИИ ПОЧВЫ, ЗАГРЯЗНЕННОЙ НЕФТЕПРОДУКТАМИ, В КОНТЕКСТЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА

Г. А. Онерхан^{1*}, Е. Б. Баделгажы², Б. А. Капсалямов², З. К. Кыстаубаева³, Е. Т. Сыздыков⁴

¹⁾ *Казахский университет технологии и бизнеса, Астана, Казахстан*

²⁾ *Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

³⁾ *Медицинский университет Астана, Астана, Казахстан*

⁴⁾ *Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова, Кокшетау, Казахстан*

* E-mail для контактов: kapsalyatov_ba@enu.kz

Статья посвящена исследованию методов очистки почв, загрязненных нефтепродуктами в процессе экологического туризма, с целью сохранения природной среды. Для очистки почв был использован биопрепарат «Бакойл-KZ», созданный на основе гидрокарбонизирующих микроорганизмов. Применение этого препарата увеличило степень очистки почвы от нефтепродуктов с 67,8% до 97,2%, причем наиболее эффективной дозировкой оказалось 2 г/кг. Морфологический анализ и биотестирование с использованием ростков водяного кресса показали отсутствие токсичных свойств в очищенной почве. В экспериментах с добавлением «Бакойл-KZ» (1 г/кг и 5 г/кг) проросло соответственно 84–82% и 88–90% семян, что свидетельствует о очистке почвы. В загрязненной почве без добавления биопрепарата проросло всего 19–23 экземпляра семян (38–46%), что указывает на медленный процесс самоочищения. Использование «Бакойл-KZ» экологически безопасно, предотвращает экологические катастрофы, требует меньше ресурсов и позволяет очищать земельные участки различных масштабов без ущерба для экосистемы. Это делает препарат эффективным инструментом для восстановления почв в туристически активных зонах. Эффективное управление исключения загрязнения почв и использование современных методов очистки, таких как биопрепарат «Бакойл-KZ», играют ключевую роль в сохранении первозданной природы уникальных природных зон. Внедрение устойчивых туристических практик и технологий поможет минимизировать негативное воздействие на окружающую среду и способствует сохранению биоразнообразия и экосистем.

Ключевые слова: *нефтепродукты, бензин, дизельное топливо, биоремедиация, биотестирование, «Бакойл-KZ», почва, загрязнение.*

ВВЕДЕНИЕ

Туризм является значительным фактором, влияющим на окружающую среду, особенно в контексте загрязнения почв выбросами нефтепродуктов от автотранспорта. Исследования показывают, что туристический транспорт, особенно автомобили, вносит существенный вклад в атмосферные выбросы углеводородов, которые затем могут накапливаться и трансформироваться в почвенной среде [1]. Эти нефтепродукты могут оказывать токсичное воздействие на почвенную биоту и фауну, а также приводить к длительному загрязнению почвы, снижая её фертильность и способность к самоочищению [2]. Уникальная природа в Алтайском крае, привлекает своей красотой ежегодно множество туристов. Увеличение числа туристов в этом регионе сопровождается значительным увеличением транспортных потоков, особенно автомобилей. Исследования показывают, что автомобили вносят существенный вклад в загрязнение почв нефтепродуктами через выхлопные газы и вероятные их разливы, которые содержат углеводороды и другие токсичные вещества [3, 4].

Загрязнение почвы и её деградация при транспортном туризме происходит вследствие поломки или аварии транспорта, его несоответствия требованиям ГОСТ, утечек горюче-смазочных материалов и других

факторов. Если концентрация нефтепродуктов в почве увеличивается, живые организмы и растения подвергаются негативному воздействию, что приводит к деградации растительного покрова и загрязнению почвы. Вследствие этого снижается плодородие почвы, её продуктивность и почвенная функция, изменяются структура и свойства почвы [5, 6].

Очистка нефтезагрязненных почв и восстановление их плодородия являются приоритетными задачами. Наиболее прогрессивным методом восстановления считается метод биоремедиации, так как использование биотехнологических ресурсов, в частности, почвенно-деструкторных микроорганизмов, весьма актуально в настоящее время [7–9]. Этот метод позволяет эффективно разлагать нефтепродукты в почве, восстанавливая её экосистемные функции. С нефтепродуктами почва часто загрязняется из-за разливов горюче-смазочных материалов, которые происходят при дорожно-транспортных происшествиях или поломках транспортных средств [10, 11]. В таких случаях нефтепродукты проникают в почву, вызывая её деградацию.

Обзор последних литературных источников показывает эффективность биопрепарата «Бакойл-KZ», разработанного для биологической рекультивации нефтезагрязненных почв. Вот некоторые ключевые

характеристики этого препарата: «Бакойл-KZ» содержит углеводородокисляющие микроорганизмы, которые эффективно окисляют углеводороды нефти при различных условиях (рН 5,5–9,5 и температуре от +10 до +40 °С). Препарат снижает токсичность нефтезагрязненной почвы, способствует ее восстановлению и не оказывает вредного воздействия на другие экосистемы. Прост в применении: наносится на загрязненную почву методом дождевания или распыления. Биопрепарат, разработан для очистки почв, загрязненных нефтепродуктами. Основными активными компонентами этого препарата являются специфические штаммы микроорганизмов, такие как *Acinetobacter calcoaceticus*, *Microbacterium lacticum*, и *Arthrobacter terregens*. Эти микроорганизмы обладают высокой нефтеокисляющей активностью, что позволяет им эффективно разлагать углеводороды, присутствующие в нефтепродуктах. В исследовании [12] подчеркивается высокая нефтеокисляющая активность «Бакойл-KZ». Препарат показал значительное снижение содержания нефтепродуктов в почве, подтверждая его эффективность в биоремедиации. Исследование [13] демонстрирует, что оптимальная дозировка «Бакойл-KZ» составляет 2 г/кг, что обеспечивает наилучшие результаты по разложению нефтепродуктов. Применение меньших доз показало менее эффективные результаты, а избыточные дозы привели к снижению эффективности. Авторы [14] исследовали два биопрепарата: «Бакойл-KZ» и «Мико». Результаты показали, что «Бакойл-KZ» продемонстрировал более высокую эффективность в разложении нефтепродуктов и положительное влияние на восстановление почвенной микрофлоры. Исследование [15] подтвердило, что «Бакойл-KZ» в дозировке 2 г/кг является наиболее эффективным для разложения нефтепродуктов и улучшения физических и химических свойств почвы. В статье [16] описывается значимость «Бакойл-KZ» для экологического восстановления загрязненных территорий и его высокая эффективность в биоремедиации почв. В целом авторы отмечают положительные стороны биопрепарата «Бакойл-KZ», заключающиеся в эффективности разложения углеводородов, присутствующих в нефтепродуктах. Препарат содержит микроорганизмы, которые являются безопасными для окружающей среды и способствуют восстановлению почвенной микрофлоры. Применение «Бакойл-KZ» способствует улучшению структуры и состава почвы, что положительно сказывается на ее плодородии. Препарат может быть использован для очистки почв, загрязненных различными видами нефтепродуктов, включая бензин и дизельное топливо.

Целью испытаний является сохранение уникальной первозданной природы заповедных зон на примере Алтайского региона, снижение воздействия нефтезагрязнений и восстановление экосистем, а также разработка модели биоремедиации почв, загрязненных нефтепродуктами, и оценка качества почв после про-

ведения биотестирования. Это позволит определить эффективность методов очистки и разработать рекомендации по восстановлению плодородия почвы в зонах с высоким туристическим транспортом

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

На первом этапе исследований изучалось состояние горных участков, загрязненных нефтепродуктами. Для этого почвенные пробы отбирались как с загрязненных нефтепродуктами участков, так и с чистых участков для контроля. Пробы отбирались с глубины 0–10 см с использованием гигиенического оборудования для предотвращения перекрестного загрязнения. В каждой точке отбора отбирали по 3–5 проб, которые затем смешивались для получения репрезентативного образца.

Почву высушивали при комнатной температуре, удаляли крупные органические остатки и просеивали через сито с размером ячеек 2 мм. Для химического анализа брали необходимое количество подготовленной почвы и проводили экстракцию целевых соединений. Перед проведением анализа пробы гомогенизировались.

В лабораторных условиях анализы проб осуществлялись различными методами. Для определения элементной серы пробы почвы разлагались в кислотной среде, после чего измерялось содержание серы с помощью инфракрасного спектрометра. Для определения фтора пробы экстрагировали водой и анализировали с использованием иономера для определения заряда фторид-ионов. Металлы (медь, хром, марганец, ртуть, свинец, цинк, кобальт, кадмий, никель, мышьяк) выявлялись методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС). Пробы почвы подвергались кислотному разложению с использованием смесей азотной и соляной кислот, затем фильтровались и анализировались на содержание металлов с помощью ААС-спектрометра. Отдельные пробы почвы экстрагировались органическим растворителем (гексаном), затем экстракт концентрировался и анализировался с помощью газового хроматографа на содержание ксилолов (орто-, мета-, пара-). Бенз(а)пирен определялся экстракцией из проб почвы органическим растворителем, где экстракт концентрировался и анализировался. Формальдегид экстрагировался водой и определялся колориметрическим методом с использованием спектрофотометра при длине волны 410 нм.

Для изучения механизма очистки горных почв от нефтепродуктов в лабораторных условиях готовились образцы почвы, которые специально смешивали с бензином и дизельным топливом в количестве 50 г/кг. Использовалось бензиновое топливо – неэтилированное автотранспортное АИ-92 и летнее дизельное топливо.

Для выяснения механизма очищения почвы, загрязненной нефтепродуктами под воздействием микроорганизмов, в образцы почвы внедряли биопрепарат «Бакойл-KZ» в количестве 1 г/кг, 2 г/кг и 5 г/кг.

Этот препарат для микробиологической очистки почвы на основе окисляющих микроорганизмов выпускается в виде пасты и содержит *Acinetobacter calcoaceticus* 2A, *Mixrobacterium lacticum* 41-3, *Arthrobacter terregens*, штаммы P1 и *Misgosossis roseus* 49 [17].

Внесение препарата «Бакойл-KZ» в почву проводилось следующим образом. Препарат «Бакойл-KZ», представленный в виде пасты, растворяли в воде. Необходимое количество пасты добавляли в воду и тщательно перемешивали до получения однородного раствора. Подготовленный раствор равномерно наносили на поверхность почвы. После нанесения раствора почву тщательно перемешивали для обеспечения равномерного распределения препарата. Обработанные пробы почвы тщательно перемешивались для обеспечения однородности. Загрязненные и обработанные биопрепаратом пробы помещались в лабораторные условия с контролируемой температурой и влажностью. Эксперимент длился 30 суток, в течение которых почва периодически увлажнялась для поддержания постоянной влажности.

Дальнейшая экстракция углеводов из обработанных почв производилась следующим образом. Около 10 г почвы помещалось в стеклянный контейнер и добавлялось 50 мл гексана. Смесь встряхивалась в течение 1 часа для экстракции углеводов. Далее она фильтровалась через бумажный фильтр для отделения почвы от экстракта. Экстракт упаривался до небольшого объема (около 1 мл) при низкой температуре для удаления гексана. Концентрированный экстракт анализировался методом газовой хроматографии (ГХ) с использованием хроматографа Agilent 7890A, оснащенного детектором пламени-ионизации (FID). Проба вводилась в хроматограф, где происходило разделение компонентов смеси. Содержание бензина и дизельного топлива определялось по площади пиков на хроматограмме, сопоставляемой с калибровочными стандартами. Результаты выражались в процентах от исходного содержания углеводов в почве, рассчитываемых на основе сравнения с контрольными образцами.

Для моделирования процессов биодegradации использовали комбинацию программных средств и ручных расчетов. Программный комплекс Microsoft Excel применялся для обработки экспериментальных данных, построения графиков и выполнения статистического анализа. Для расчета степени деструкции использовались формулы, учитывающие начальную и конечную концентрации углеводов в почве.

Основной формулой было определение степени деструкции углеводов, рассчитываемой на основе изменения концентрации углеводов в почве до и после обработки методом газовой хроматографии. Расчет осуществлялся по формуле:

$$n = \left(\frac{C_n - C_k}{C_n} \right) \cdot 100,$$

где n – степень деструкции, %; C_n – начальная концентрация; C_k – конечная концентрация.

Для экологической оценки почвы, очищенной от нефтепродуктов, было проведено биотестирование с использованием кресс-салата (*Lepidium sativum*) [18]. Работа проводилась с использованием теоретических, аналитических и лабораторно-исследовательских методов [19–21].

В процессе исследовательской работы, нами были проведены химические анализы плодородного чернозема и чистой горной земли без нефтепродуктов и загрязненной ими. Были использованы следующие методы анализа. Гравиметрический метод для определения содержания общего углерода и углеводов в почве. Этот метод позволяет точно измерить массу остатка после испарения и прокалывания, что важно для оценки углеводородного загрязнения [22]. Газовая хроматография широко используется для анализа сложных смесей, таких как почвенные экстракты, содержащие углеводороды [23]. Спектрофотометрия – определение концентрации тяжелых металлов и других токсичных веществ. Метод позволяет определить наличие и концентрацию различных элементов в почве путем измерения поглощения света при определенных длинах волн [24]. Биотестирование для использования ростков водяного кресса для оценки фитотоксичности почвы. [25]. Почвенные тесты для оценки pH, электропроводности и других физических и химических свойств почвы. Все эти тесты помогают определить основные физико-химические параметры почвы, которые важны для понимания её состояния и степени загрязнения [26–31].

ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 1 представлены предельные концентрации химических веществ в почве (ПДК) и химические показатели почвы, взятые для анализа из района загрязнения и их вероятное негативное влияние на окружающую среду. Пробы отбирали в Монгольском Алтае, в районе дороги, при подъеме на гору Беш Богда.

Анализ таблицы показывает, что в почве имеется значительное превышение ПДК для нескольких токсичных веществ, что требует применения эффективных методов очистки, таких как биоремедиация с использованием биопрепаратов. Эти данные подчеркивают необходимость дальнейших исследований и мониторинга состояния почвы для обеспечения экологической безопасности. Эти источники предоставляют обширную информацию о химических веществах, их влиянии на окружающую среду и здоровье человека, а также методах исследования и контроля за их концентрациями в почвах.

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ БИОРЕМЕДИАЦИИ ПОЧВЫ, ЗАГРЯЗНЕННОЙ НЕФТЕПРОДУКТАМИ,
В КОНТЕКСТЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА**

Таблица 1. Химические показатели почвы и предельно допустимая концентрация (ПДК) химических веществ в почве

№	Название вещества	Средняя концентрация	Превышение ПДК на	Примечания
1	Элементарная сера	173	10,81	Высокие концентрации серы могут привести к закислению при наличии влаги, что негативно влияет на почву и растительность [32]
2	Фтор	3,5	1,25	Фтор может вызвать флюороз у животных и растений, нарушая их нормальное развитие [33]
3	Медь	4,1	1,37	Медь может ингибировать рост растений и микробиологическую активность в почве [34]
4	Хром	6,9	1,15	Хром VI может проникать в растения, вызывая мутационные изменения и снижая их продуктивность [35]
5	Марганец	1580	1,05	Марганец в высоких концентрациях может быть токсичен для растений, вызывая хлороз и некроз листьев [36]
6	Ртуть	2,4	1,14	Ртуть может накапливаться в пищевых цепях, вызывая тяжелые отравления [37]
7	Свинец	35	1,09	Свинец может вызывать когнитивные нарушения и задержку развития у детей, а также поражать нервную систему взрослых [38]
8	Цинк	18	0,78	Цинк является важным микроэлементом для растений, однако его избыточное количество может быть токсичным [39]
9	Кобальт	2,7	0,54	Кобальт в почве необходим для роста некоторых растений, но его высокие концентрации могут быть токсичными [40]
10	Кадмий	0,7	1,4	Кадмий накапливается в органах и тканях, вызывая хронические заболевания [41]
11	Никель	4,5	1,13	Никель может вызывать аллергические реакции и нарушения функции дыхательной системы [42]
12	Ксилолы (орто-, мета-, пара-)	0,001	0,003	Ксилолы могут вызывать раздражение кожи и дыхательных путей при высоких концентрациях [43]
13	Бенз(а)пирен	0,03	1,5	Бенз(а)пирен, входящий в состав ПАУ, является мощным канцерогеном, вызывающим опухоли при длительном воздействии [44]
14	Мышьяк	2,1	1,05	Мышьяк может накапливаться в организме, вызывая хронические заболевания и рак [45]
15	Формальдегид	7,5	1,07	Формальдегид является сильным раздражителем, вызывающим аллергические реакции и заболевания дыхательных путей [46]

Таблица 2. Результаты обработки почвы, загрязненной бензином, биопрепаратами

№	Пробы	Начальное количество, %	Содержание в результате эксперимента, %	Степень деструкции бензина, %
1	Контроль: почва + бензин	5	3,02	39,6
2	почва + бензин + Бакойл-KZ (1 г/кг)	5	1,26	74,8
3	почва + бензин + Бакойл-KZ (2 г/кг)	5	0,14	97,2
4	почва + бензин + Бакойл-KZ (5 г/кг)	5	0,18	83

В ходе дальнейшего исследования в лабораторных условиях, была проанализирована эффективность биопрепарата «Бакойл-KZ» в очистке почв, загрязненных нефтепродуктами. Исследование включало оценку химических и биологических свойств почвы, а также ее реакции на внесение различных доз биопрепарата. В рамках исследования проводился анализ чистой плодородной темно-коричневой почвы, не содержащей нефтепродуктов, и тяжелых металлов, вероятно поступающих при загрязнении и которые могли бы негативно повлиять на почвенную экосистему.

Незагрязненная почва имела кислотность $pH=7,1$ и содержание гумуса 9%, что соответствует показателям плодородной почвы

В исследуемой группе почв не обнаружено нефтепродуктов, а также тяжелых металлов, влияющих на почвенную экосистему.

При добавлении биопрепарата «Бакойл-KZ» в загрязненную почву, отобранных для лабораторного анализа, были исследованы его влияние на очистку

почвы от нефтепродуктов и изменения биологических показателей почвы.

Исследование проводилось с трехкратным повторением в течение 30 суток, что позволило получить надежные и воспроизводимые результаты. Время, отведенное на исследование, было признано оптимальным на основе предыдущих работ других ученых, которые также изучали процессы биоремедиации почв [47, 48].

В таблице 2 представлены результаты биоремедиации почвы, загрязненной бензином.

Для оценки эффективности различных доз биопрепарата «Бакойл-KZ» и его аналогов были проведены исследования по очистке почв, загрязненных бензином и дизельным топливом.

Таблица демонстрирует, как различные концентрации биопрепарата «Бакойл-KZ» влияют на степень деструкции бензина в почве. Начальное содержание бензина было одинаковым во всех пробах (5%), а после обработки биопрепаратом произошло значительное снижение содержания бензина, что от-

ражается в высокой степени разложения, особенно при использовании более высоких концентраций биопрепарата. Анализ результатов исследования показал, что наибольший процесс очистки был достигнут при внесении биопрепарата «Бакойл-KZ» в дозировке 2 г/кг. В этом случае почва была очищена на 97,2% от нефтепродуктов. Внесение биопрепарата «Бакойл-RU» в дозировке 5 г/кг обеспечило очистку почвы на 83%, а применение «Бакойл-KZ» в дозировке 1 г/кг дало результат в 74,8% очистки. Таким образом, эффективность очистки почвы биопрепаратом «Бакойл-KZ» существенно зависит от дозировки. Оптимальная дозировка для достижения наибольшей степени очистки составляет 2 г/кг. Это подтверждает гипотезу о том, что количество вносимого в почву биопрепарата должно быть тщательно подобрано для достижения максимальной эффективности очистки. Результаты исследования демонстрируют высокую эффективность биопрепарата «Бакойл-KZ» в очистке почв, загрязненных нефтепродуктами. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение долгосрочных эффектов использования биопрепаратов и их влияния на экосистемы. [49–54]

Деструкция бензина в почве при использовании биопрепарата «Бакойл-KZ» происходит благодаря активности микроорганизмов, входящих в состав препарата, которые обладают способностью метаболизировать углеводороды. Ароматические углеводороды, такие как бензин (содержащий бензол, толуол, ксилолы и другие), подвергаются биодegradации микроорганизмами, которые используют их в качестве источника углерода и энергии. Например, бактерии из рода *Pseudomonas* могут окислять бензол до бензойной кислоты, которая дальше разлагается до биогенных соединений. В присутствии кислорода и активных ферментов микроорганизмов происходит гидроксигирование бензина, что приводит к образованию гидроксibenзольных соединений. Эти промежуточные продукты затем могут окисляться до более простых и малотоксичных соединений, таких как муравьиная и уксусная кислоты. В конечном итоге, микроорганизмы могут превращать углеводородные соединения в неорганические продукты, такие как углекислый газ (CO₂), вода и минеральные соли, которые могут быть включены в естественные биохимические циклы почвенной экосистемы.

Однако механизмы деструкции бензина могут различаться в зависимости от конкретных видов микроорганизмов, входящих в состав биопрепарата, и ус-

ловий окружающей среды (температура, влажность, доступность кислорода). Эти процессы основываются на биохимических путях, которые эффективно уменьшают содержание токсичных углеводов в почве, способствуя её очистке и восстановлению естественной биологической активности. Гидрокарбонкисляющие бактерии способны окислять углеводороды, включая бензин и его компоненты, используя их как источник углерода и энергии для своего метаболизма. Некоторые грибы также могут участвовать в биодegradации углеводов, что делает их важными компонентами для биоремедиации загрязненных почв. Если рассматривать бактерии из рода *Pseudomonas*, входящие в состав биопрепарата «Бакойл-KZ», следует отметить, что они способны эффективно окислять бензин и его компоненты, такие как бензол. Они используют эти углеводороды в качестве источника углерода и энергии для своего метаболизма. Процесс начинается с окисления бензола до бензойной кислоты при участии ферментов и других биохимических механизмов, активизированных микроорганизмами *Pseudomonas*. Бензойная кислота в свою очередь может дальше разлагаться до более простых и биологически доступных соединений, таких как диоксины, фенолы и другие биогенные продукты, которые менее токсичны для окружающей среды. Присутствие бактерий *Pseudomonas* в биопрепарате «Бакойл-KZ» способствует эффективной биоремедиации почв, загрязненных бензином, путем разложения этого токсичного углеводорода на более безопасные компоненты, что способствует восстановлению экологического баланса и сохранению природной среды.

При изучении влияния микробиологического препарата на почву, загрязненную дизельным топливом, в лабораторных условиях наблюдалось снижение количества дизельного топлива в образцах почвы, содержащих биопрепарат, изготовленный на основе углеводородокисляющих микроорганизмов (таблица 3).

Таблица отображает эффективность биоремедиации почвы, загрязненной дизельным топливом, при использовании различных концентраций биопрепарата «Бакойл-KZ». Высокие значения степени деструкции в пробах с биопрепаратом указывают на эффективность микроорганизмов в препарате в разложении дизельного топлива до менее токсичных или биологически доступных соединений, способствуя тем самым очистке загрязненных почв.

Таблица 3. Результаты обработки почвы, загрязненной дизельным топливом, биопрепаратами

№	Пробы	Начальное количество, %	Содержание в результате эксперимента, %	Степень деструкции дизельного топлива, %
1	Контроль: почва + дизельное топливо	5	3,67	30,6
2	почва + дизельное топливо + Бакойл-KZ (1 г/кг)	5	1,61	67,8
3	почва + дизельное топливо + Бакойл-KZ (2 г/кг)	5	0,23	95,4
4	почва + дизельное топливо + Бакойл-KZ (5 г/кг)	5	1,03	79,4

Наиболее эффективная очистка почвы, загрязненной дизтопливом, была достигнута при дозировке «Бакойл-KZ» 2 г/кг. В этом случае содержание диз. топлива в почве уменьшилось с 95,4% до 67,8%. Применение дозировки 5 г/кг обеспечило очистку почвы на 83%, тогда как дозировка 1 г/кг показала результат в 74,8% очистки. Контрольная группа продемонстрировала самоочищение почвы лишь на 30,6%.

Эти результаты подтверждают, что биопрепарат «Бакойл-KZ» значительно ускоряет процесс разложения нефтепродуктов в почве по сравнению с естественными процессами самоочищения. Это связано с активной деятельностью нефтеокисляющих микроорганизмов, входящих в состав препарата. Под их воздействием нефтепродукты трансформируются в более простые соединения, которые затем включаются в круговорот углерода.

Микроорганизмы, входящие в состав биопрепарата, способствуют интенсивному разложению нефтепродуктов, что делает этот метод перспективным для применения в биоремедиации загрязненных почв, отмеченное также подтверждается и другими подобными исследованиями.[55–59]. Как было замечено в горных условиях наиболее эффективной методикой для очистки нефтезагрязненных почв обычно является биоремедиация. Очевидно это объясняется несколькими факторами:

1) *Естественная среда для микроорганизмов:* Горные почвы могут обладать уникальной биоразнообразной микрофлорой, которая может быть адаптирована к разложению углеводов. Это обеспечивает более высокую активность микроорганизмов в процессе биоремедиации.

2) *Меньшие механические воздействия:* В отличие от физических и химических методов, которые могут потребовать значительных механических воздействий (например, перемещение почвы), биоремедиация требует меньше вмешательства в естественные условия.

3) *Экологическая безопасность:* Биоремедиация использует естественные процессы разложения нефтепродуктов микроорганизмами без добавления химических соединений, что способствует сохранению экосистемы горных регионов.

4) *Адаптация к условиям:* Микроорганизмы, используемые в биоремедиации, могут быть адаптированы к специфическим условиям горных районов, таким как низкие температуры, высокая влажность или специфические составы почв.

Исходя из этих причин, биоремедиация видимо предпочтительна для очистки нефтезагрязненных почв в горных условиях, так как она сочетает высокую эффективность с минимальным воздействием на природные условия и экосистемы. На рисунке 1 представлено влияние биопрепарата на снижение загрязненности почвы.

В результате проведенных исследований отмечено снижение количества нефти в исследованных в лабораторных условиях образцах почвы, содержащих биопрепараты, изготовленные на основе углеводородокисляющих микроорганизмов. То есть интенсивность разложения нефтепродуктов в почве возросла. Так, за 30 суток очистки интенсивность разложения бензина и дизельного топлива в почве составила от 67,8% до 97,2%, тогда как в контрольном образце она составляла всего 30,6%. Деструкцию углеводов в почве можно наблюдать на рисунке 2.

Исследование эффективности биопрепарата «Бакойл-KZ» для очистки нефтезагрязненных почв показало, что его эффективность зависит от дозировки. В частности, использование препарата в количестве 2–3 г/кг продемонстрировало высокую эффективность в разложении нефтепродуктов, таких как бензин и диз. топливо, на уровне 97,2% и 95,4% соответственно. Это свидетельствует о том, что оптимальная дозировка способствует более полному и быстрому разложению загрязнителей.

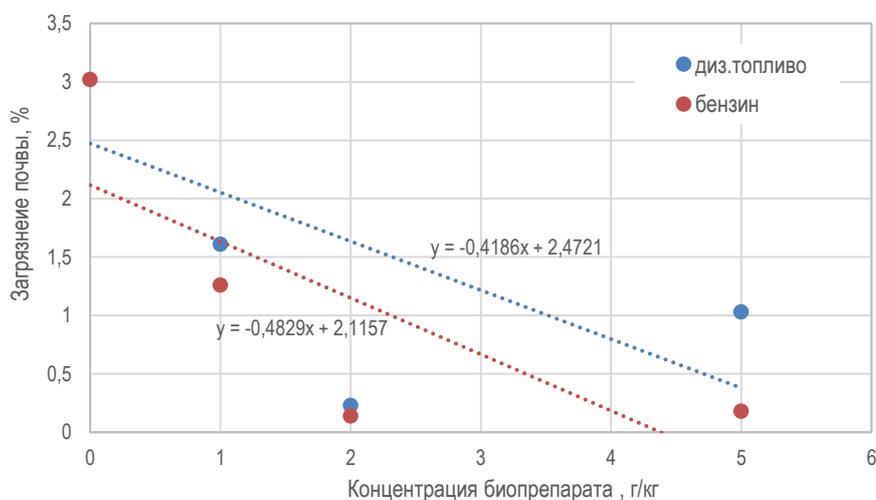


Рисунок 1. Влияние биопрепарата на снижение загрязненности почвы

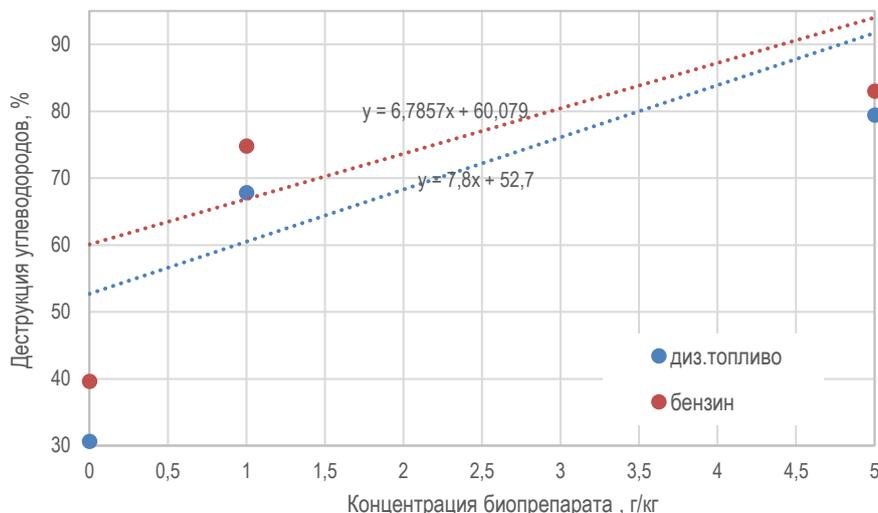


Рисунок 2. Влияние биопрепарата на деструкцию углеводородов в почве

С другой стороны, использование нижних доз (1 г/кг) не показало такой высокой эффективности, с разложением на уровне 74,8% для бензина и 67,8% для диз. топлива. Выявлено также, что чрезмерное количество препарата (5 г/кг) может привести к отрицательным последствиям для процесса очистки из-за снижения эффективности микроорганизмов, содержащихся в препарате.

Как видно биопрепарат «Бакойл-KZ» содержит микроорганизмы, способные разлагать углеводороды в почве, загрязненной нефтепродуктами.

Для бензина зависимость степени деструкции от концентрации биопрепарата (C) описывается функцией:

$$D_b = 6,7857 \cdot C + 60,079$$

Для дизельного топлива зависимость описывается следующей функцией:

$$D_d = 7,8 \cdot C + 52,7$$

Таким образом биопрепарат «Бакойл-KZ» эффективно ускоряет процесс деградации бензина и дизельного топлива в почве. Оптимальная концентрация биопрепарата составляет 2 г/кг, при которой достигаются наивысшие показатели степени деградации. Превышение этой концентрации приводит к снижению эффективности биодegradации из-за возможного перенаселения микроорганизмов и дефицита ресурсов.

Итого, на основании проведенного исследования можно сделать вывод о высокой эффективности биоремедиации с использованием препарата «Бакойл-KZ» в условиях нефтезагрязненных горных почв, при условии оптимальной дозировки, что не противоречит также [60, 61].

Исследование результатов посева семян кресс-салата в очищенной группе с использованием биопрепарата «Бакойл-KZ» через две недели показало следующие результаты:

Очистка почвы: Семена кресс-салата, посеянные в почву, очищенную препаратом «Бакойл-KZ» (2 г/кг), успешно проросли без проявления токсичности. В этой группе было отмечено, что биопрепарат эффективно разложил нефтепродукты (бензин и дизельное топливо), что способствовало созданию благоприятных условий для роста и развития растений.

Рост кресс-салата: Рост кресс-салата в группе, где почва была обработана препаратом «Бакойл-KZ», был заметно лучше по сравнению с контрольной группой, где почва оставалась загрязненной нефтепродуктами. Это указывает на положительное воздействие биоремедиации на почвенную среду и способность растений к нормальному развитию в очищенной почве.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что использование биопрепарата «Бакойл-KZ» способствует не только эффективной очистке почвы от нефтепродуктов, но и созданию условий для здорового роста растений, что является важным аспектом в экологическом и сельскохозяйственном контекстах.

Исследование эффективности биопрепарата «Бакойл-KZ» для очистки почв от бензина и дизельного топлива показало, что наиболее эффективная дозировка составляет 2 г/кг. В данном случае препарат продемонстрировал высокую способность к биоремедиации, обеспечивая прорастание почти всех семян без проявления токсичности. Это свидетельствует о полной очистке почвы от нефтепродуктов, что подтверждается результатами исследования (рисунок 3).

Как видно, использование «Бакойл-KZ» положительно влияет на всхожесть семян кресс-салата и количество проростков на загрязненной бензином почве. Наиболее эффективная дозировка составляет 2 г/кг, при которой достигаются максимальные показатели всхожести (100%) и количества проростков.

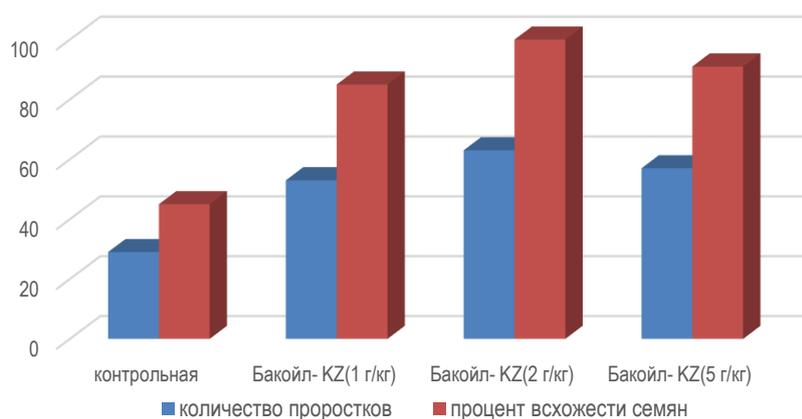


Рисунок 3. Результаты фитотеста с использованием кресс-салата на почве, загрязненной бензином

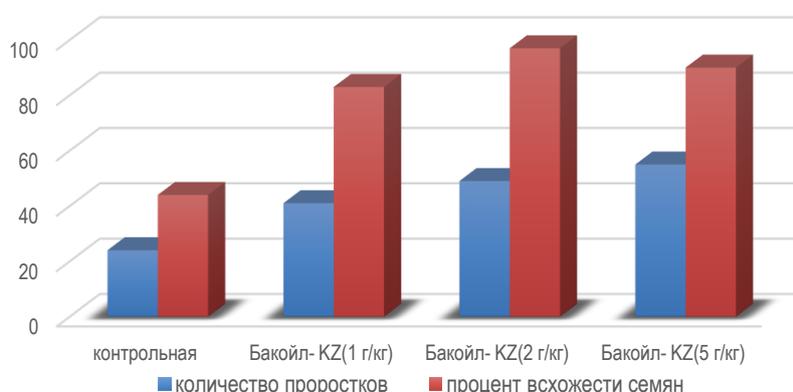


Рисунок 4. Результаты фитотеста с использованием кресс-салата на почве, загрязненной дизельным топливом

Увеличение дозировки до 5 г/кг незначительно снижает показатели, однако они остаются выше, чем в контрольной группе. Эти результаты подтверждают целесообразность применения «Бакойл-KZ» для биоремедиации нефтезагрязненных земель. Снижение эффективности было отмечено при использовании нижних доз (1 г/кг), где прорастание семян составило 84–82%, а также при чрезмерном количестве препарата (5 г/кг), где прорастание было выше, но не наблюдалось полной очистки почвы. Это указывает на важность оптимальной дозировки для достижения максимальной эффективности биоремедиации.

На рисунке 4 показаны результаты фитотеста с использованием кресс-салата на почве, загрязненной дизельным топливом.

Аналогичным образом микроорганизмы, содержащиеся в «Бакойл-KZ», разлагают углеводороды дизельного топлива до менее токсичных соединений, таких как углекислый газ и вода. Этот процесс биодegradации уменьшает токсичность почвы, что благоприятно влияет на прорастание семян и рост растений и не противоречит [62]. Результаты показывают, что оптимальная концентрация «Бакойл-KZ» составляет 2 г/кг, при которой достигаются максимальные показатели всхожести семян (97%) и значительное

количество проростков. При этой концентрации микроорганизмы наиболее эффективно разлагают углеводороды, улучшая условия для роста растений. Увеличение дозировки до 5 г/кг может приводить к перенаселению микроорганизмов, что вызывает конкуренцию за питательные вещества и кислород. Это может негативно сказаться на росте растений, несмотря на более высокое количество проростков [62, 63]. Использование «Бакойл-KZ» доказало свою эффективность в улучшении условий для роста растений на почве, загрязненной дизельным топливом. Наиболее эффективная дозировка составляет 2 г/кг, при которой достигаются лучшие показатели всхожести семян и количества проростков.

Таким образом, на основе проведенного исследования можно сделать вывод о высокой эффективности препарата «Бакойл-KZ» при концентрации 2 г/кг для биоремедиации почв, загрязненных бензином и дизельным топливом.

В целом механизм деградации нефтяных углеводородов подпадает под действие наиболее быстрой и полной деградации большинства органических загрязнителей. Опыты показывают, что биоремедиация является основным природным механизмом, который может очистить загрязнители нефтяных углево-

дородов из окружающей среды. В этом процессе используются микроскопические организмы (в основном бактерии), живущие в почве, и «съедают» нефтяные углеводороды.

Этот результат биотестирования подтверждает высокую эффективность биоремедиации при использовании биопрепарата «Бакойл-KZ» в очистке загрязненных почв от продуктов нефтяных загрязнений, таких как бензин и дизельное топливо.

Результаты предыдущих исследований показывали эффективность биопрепарата, однако новое биотестирование в условиях нефтезагрязненных горных почв дополнительно укрепило эти выводы, продемонстрировав полное отсутствие токсичности для семян кресс-салата и успешное прорастание в очищенной почве. Это свидетельствует о способности «Бакойл-KZ» не только разлагать нефтепродукты, но и создавать благоприятные условия для роста и развития растений после очистки.

Таким образом, результаты данного исследования подчеркивают значимость биоремедиации в восстановлении загрязненных экосистем и подтверждают, что использование биопрепарата «Бакойл-KZ» является эффективным методом для устранения последствий нефтяных загрязнений в горных условиях.

В составе препарата «Бакойл-KZ» находятся следующие микроорганизмы: *Acinetobacter calcoaceticus* 2A, *Mixrobacterium lacticum* 41-3, *Arthrobacter terregens* и штаммы P1 и *Misgosossis roseus* 49.

Ниже нами рассмотрена эффективность каждого из микроорганизмов, входящих в состав препарата «Бакойл-KZ», при деструкции нефтепродуктов. Микроорганизм *Acinetobacter calcoaceticus* 2A широко известен своей способностью разлагать нефтепродукты, такие как бензин и дизельное топливо, благодаря его высокой активности гидролиза и окисления углеводородов. Изучение *Acinetobacter calcoaceticus* 2A и его способностей в области обработки ДНК выявляет несколько ключевых аспектов, которые могут быть релевантны для его потенциального применения в биоремедиации нефтепродуктов, таких как бензин и дизельное топливо. *Acinetobacter calcoaceticus* 2A проявляет строгую связь между конверсией двунической ДНК в одноническую и её захватом, что является критическим для эффективности биоремедиации, так как этот механизм способствует активной адаптации к изменяющимся окружающим условиям. Анализируя ряд статей в исследуемой нами области [64–67] можно видеть разнообразие подходов к изучению *Acinetobacter calcoaceticus* и связанных с ним видов. Исследования охватывают молекулярную биологию, геномику, эпидемиологию и экологическую адаптацию, что подчеркивает важность этих бактерий как в клиническом, так и в экологическом контексте. *Acinetobacter calcoaceticus* обладает уникальными способностями к биоразложению различных органических загрязнителей, таких как фенол и его производные. Это делает его ценным микроорга-

низмом для биоремедиации, процесса очистки загрязненной среды с использованием живых организмов. Исследования показывают, что различные штаммы *Acinetobacter calcoaceticus* обладают уникальными генетическими особенностями, которые могут включать гены, связанные с обработкой углеводородов, что является ключевым фактором их эффективности в биоремедиации. Таким образом, *Acinetobacter calcoaceticus* 2A демонстрирует потенциал для использования в процессах биоремедиации углеводородных загрязнений, так как он обладает необходимыми генетическими и биохимическими свойствами для эффективного разложения бензина и дизельного топлива в окружающей среде. Исследования [68] показали, что микроорганизм *Mixrobacterium lacticum* 41-3 может эффективно использоваться для биоремедиации нефтяных загрязнений благодаря его способности к разложению углеводородов и адаптации к условиям загрязненных почв. Своей способностью к биоремедиации загрязненных почв, включая углеводороды, благодаря высокой активности гидролиза и метаболической пластичности известен и микроорганизм *Arthrobacter terregens*. Информация о конкретных штаммах P1 и *Misgosossis roseus* 49 ограничена, однако штаммы рода *Pseudomonas*, к которым, возможно, относятся эти микроорганизмы, известны своей способностью к биоремедиации различных углеводородов, включая бензин и дизельное топливо, через окисление их до более легко разлагаемых соединений [69]. В целом эти микроорганизмы эффективно взаимодействуют с нефтепродуктами в почве, ускоряя их деструкцию и улучшая состояние загрязненных территорий. Очистка нефтезагрязненных земель с помощью внесения микроорганизмов, известная как биоаугментация, действительно является доказанно целесообразным и эффективным методом. Микроорганизмы, которые могут разлагать углеводороды, внедряются в загрязненные участки, где они начинают процесс биодеградации, разрушая нефтепродукты до менее вредных веществ. Преимущества этих методов заключается в использовании природных микроорганизмов и минимизирует риски для окружающей среды по сравнению с химическими методами очистки. Биоаугментация может быть особенно эффективной в случаях, когда другие методы не дают результатов. В некоторых случаях биоаугментация может быть более экономически выгодной, чем физические или химические методы. Порой биоаугментация является единственным возможным вариантом, особенно в случаях с тяжелыми и длительными загрязнениями, где другие методы очистки не подходят из-за своей неэффективности или высокого риска для окружающей среды.

В таблице 4 показана эффективность микроорганизмов, входящих в состав препарата «Бакойл-KZ», при деструкции бензина и дизельного топлива в горных условиях.

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ БИОРЕМЕДИАЦИИ ПОЧВЫ, ЗАГРЯЗНЕННОЙ НЕФТЕПРОДУКТАМИ,
В КОНТЕКСТЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА**

Таблица 4. Эффективность микроорганизмов, входящих в состав препарата «Бакойл-KZ», при деструкции бензина и дизельного топлива

№	Микроорганизм	Способность к деструкции нефтепродуктов	Химические реакции	Особенности
1	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> 2A	Высокая способность к разложению бензина и дизельного топлива	$C_nH_{2n+2} + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ (окисление алканов)	Обладает высокой активностью гидролиза и окисления углеводородов; критическая связь между конверсией ДНК и её захватом
2	<i>Mixrobacterium lacticum</i> 41-3	Эффективное разложение углеводов	$C_7H_{16} + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ (окисление гептана)	Способность к адаптации к условиям загрязненных почв
3	<i>Arthrobacter terregens</i>	Высокая активность гидролиза и метаболической пластичности	$C_6H_5OH + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ (окисление фенола)	Известен способностью к биоремедиации загрязненных почв, включая углеводороды
4	<i>Pseudomonas</i> spp. (штаммы P1 и <i>Misgosossis roseus</i> 49)	Эффективное разложение бензина и дизельного топлива	$C_8H_{18} + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ (окисление октана)	Окисление углеводородов до более легко разлагаемых соединений

Таким образом исследования показали, что все микроорганизмы, входящие в состав препарата «Бакойл-KZ», демонстрируют высокую эффективность в деструкции нефтепродуктов, и делают данный препарат перспективным для использования в процессах биоремедиации загрязненных почв, включая территории, подвергающиеся воздействию транспортного туризма. В частности, касательно микроорганизмов следует отметить:

1) *Acinetobacter calcoaceticus* 2A: Изучение способностей этого микроорганизма выявило его уникальные генетические особенности, связанные с обработкой углеводов, что делает его эффективным в биоремедиации.

2) *Mixrobacterium lacticum* 41-3: Исследования показали, что этот микроорганизм эффективно разлагает нефтяные загрязнения и адаптируется к условиям загрязненной среды.

3) *Arthrobacter terregens*: Высокая активность гидролиза и способность к метаболической пластичности позволяют этому микроорганизму эффективно разлагать углеводороды в загрязненной почве.

4) *Pseudomonas* spp. (штаммы P1 и *Misgosossis roseus* 49): Эти штаммы известны своей способностью окислять углеводороды, включая бензин и дизельное топливо, до более легко разлагаемых соединений, что способствует эффективной биоремедиации.

Далее нами предлагается методика применения препарата «Бакойл-KZ» для биоремидизации загрязненных почв, в контексте экологического туризма

Лабораторные исследования показали, что для эффективной биоремедиации загрязнённых углеводородами почв оптимальная дозировка препарата «Бакойл-KZ» составляет 2 г/кг почвы. Для переноса этой методики в реальные условия необходимо учитывать плотность почвы и способы внесения препарата, обеспечивающие его равномерное распределение. Средняя плотность почвы на исследуемом участке определяется методом взвешивания и объёмного измерения. Учитывая, что для большинства сельскохозяйственных и лесных почв плотность составляет около 1,3–1,5 т/м³, рассчитаем массу почвы на 1 гектар.

Масса почвы на глубину 10 см (0,1 м) на площади 1 м² определяется по формуле:

$$m = \text{плотность почвы} \cdot \text{объём почвы.}$$

При плотности почвы 1,5 т/м³ масса почвы на 1 м² на глубину 10 см составит: $m = 1,5 \text{ т/м}^3 \cdot 0,1 \text{ м} = 150 \text{ кг/м}^2$.

Для площади 1 гектар (10 000 м²) масса почвы на глубину 10 см составляет:

$$m_{\text{гектар}} = 150 \text{ кг/м}^2 \cdot 10\,000 \text{ м}^2 = 1\,500\,000 \text{ кг} = 1\,500 \text{ т.}$$

Определение необходимого количества препарата

Лабораторная дозировка 2 г/кг почвы преобразуется в дозировку на гектар: $m_{\text{препарата}} = 2 \text{ г/кг} \cdot 1\,500\,000 \text{ кг} = 3\,000\,000 \text{ г} = 3\,000 \text{ кг}$.

Таким образом, для обработки 1 гектара почвы на глубину 10 см требуется 3 000 кг препарата «Бакойл-KZ».

Методы внесения препарата

1. Растворение препарата в воде

Препарат растворяется в воде до получения рабочей концентрации. Полученный раствор равномерно распределяется по поверхности почвы с помощью системы опрыскивания, обеспечивающей точный контроль дозировки.

Рассчитанное количество препарата (3 000 кг) растворяется в объёме воды, обеспечивающем равномерное покрытие всей площади (1 гектар).

2. Прямое внесение порошка

Препарат может вноситься в сухом виде с использованием специализированного оборудования, способного равномерно распределить препарат по поверхности почвы.

3. Периодическое внесение

Для больших площадей возможно многократное внесение препарата с использованием техники, обеспечивающей равномерное распределение препарата по почве.

Дополнительные рекомендации

Для обеспечения точного распределения препарата рекомендуется использовать GPS-системы и соответствующую технику (например, тракторы с распределительными установками).

Важно учитывать влажность почвы: при её недостатке необходимо провести дополнительное увлаж-

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ БИОРЕМЕДИАЦИИ ПОЧВЫ, ЗАГРЯЗНЕННОЙ НЕФТЕПРОДУКТАМИ,
В КОНТЕКСТЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА**

нение перед внесением препарата для улучшения проникновения активных веществ.

Таблица 5 Расчёт количества применяемого препарата «Бакойл-KZ» для обработки 1 га загрязнённой площади в условиях экологического туризма

Параметр	Значение
Плотность почвы, т/м ³	1,5
Глубина обработки, см	10
Площадь обработки, га	1
Масса 1 м ² почвы на глубину 10 см, кг	150
Масса 1 га почвы на глубину 10 см, кг	1 500 000
Дозировка препарата «Бакойл-KZ», т/кг	2
Общее количество препарата, кг	3 000
Стоимость препарата «Бакойл-KZ», тг/кг	3 000
Общие затраты на препарат, тг	9 000 000
Дополнительные затраты на внесение, тг	600 000
Общие затраты на обработку 1 га, тг	96 00 000
Потенциальный доход от экотуризма, тг/год	30 000 000
Прирост дохода за счёт улучшения экологии, %	15
Прирост дохода в результате обработки, тг/год	4 500 000

Таблица 6. Эколого-экономическая эффективность экотуризма

Параметр	Значение
Экологические показатели	
Улучшение качества почвы после обработки, %	30
Увеличение биоразнообразия, %	20
Снижение уровня загрязнённости углеводородами, %	90
Повышение привлекательности территории	высокое
Уровень восстановления экосистемы	значительный
Экономические показатели	
Площадь обработки, га	1
Плотность почвы, т/м ²	1,5
Масса почвы на глубину 10 см, т	1 500
Необходимое количество препарата «Бакойл-KZ», кг	3 000
Стоимость препарата «Бакойл-KZ», тг/кг	3 000
Общие затраты на препарат, тг	9 000 000
Дополнительные затраты на внесение, тг	600 000
Общие затраты на обработку, тг	9 600 000
Потенциальный доход от экотуризма, тг/год	3 000 000
Прирост дохода за счёт улучшения экологии, %	15
Прирост дохода в результате обработки, тг/год	4 500 000
Окупаемость инвестиций, год	2,13
Социальные показатели	
Создание новых рабочих мест	10
Обучение и повышение квалификации, чел.	20
Улучшение условий проживания	значительное
Повышение уровня экологической осведомлённости	высокое

Применение данной методики позволит обеспечить равномерное распределение препарата «Бакойл-KZ» по поверхности почвы и точное дозирование, что способствует эффективной биоремедиации за-

грязнённых углеводородами почв на территории площадью 1 гектар.

В таблице 5 приведены расчёты количества применяемого препарата «Бакойл-KZ» для обработки 1 га загрязнённой площади в условиях экологического туризма.

Внедрение препарата «Бакойл-KZ» для биоремедиации может оказаться эффективным при комплексном подходе, включающем дополнительные меры по привлечению туристов и оптимизации затрат. Применение препарата «Бакойл-KZ» на территории площадью 1 гектар демонстрирует высокую эколого-экономическую эффективность. Улучшение экологического состояния почвы, увеличение биоразнообразия и снижение уровня загрязнённости способствует привлекательности территории для экотуризма, что в свою очередь приводит к значительному приросту доходов и социальным улучшениям. В таблице 6 приведена эколого-экономическая эффективность экотуризма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение биопрепарата «Бакойл-KZ» для очистки почвы, загрязнённой нефтепродуктами, не только эффективно решает проблему загрязнения, но и имеет значительные преимущества в контексте экологического туризма. Биоремедиация с использованием «Бакойл-KZ» может обеспечить значительное улучшение экологического состояния почвы. Так на примере опытов за 30 дней разложения углеводородов интенсивность их деструкции составила от 67,8% до 97,2%, что значительно превышает результаты традиционных методов очистки (которые в контроле составили только 30,6%), что демонстрирует высокую эффективность биопрепарата в восстановлении загрязнённых экосистем.

Как видно, очистка почвы с использованием «Бакойл-KZ» способствует улучшению её качества, восстановлению биоразнообразия и снижению уровня токсичности, что играет ключевую роль в создании устойчивых экосистем. Например, восстановление экосистемы позволяет растениям, без проблем прорасти на очищенной почве, что подтверждает её безопасность для роста и развития флоры. Это также снижает угрозу для фауны и местных экосистем, создавая благоприятные условия для их возрождения.

Данные экологические улучшения прямо способствуют повышению привлекательности территории для экотуризма. Экологически чистые и восстановленные территории становятся привлекательными для туристов, ориентирующихся на отдых в природных и экологически безопасных условиях. С ростом интереса к экотуризму возрастает потребность в таких зонах, что приводит к увеличению потока туристов. Например, восстановленные территории могут стать частью экологических маршрутов, где туристы могут изучать процесс восстановления природы и участвовать в экологически ориентированных активностях.

Кроме того, развитие экотуризма в восстановленных зонах имеет экономические преимущества. Обработанный 1 гектар почвы требует 3 000 кг препарата, что обойдётся в 9,6 млн тенге. Однако при успешном восстановлении экосистемы и повышении привлекательности территории для экотуристов, прирост дохода от экотуризма может составить до 4,5 млн тенге в год. Это подтверждает высокую экономическую эффективность биоремедиации с использованием «Бакойл-KZ», где инвестиции в экологическую реабилитацию обеспечивают быстрый возврат и создание новых источников дохода.

Социальные выгоды также неоспоримы. Восстановление загрязнённых территорий с помощью биопрепарата создаёт новые рабочие места, связанные с обслуживанием экотуризма, образовательными программами и экологическими проектами. Местные жители получают возможность участвовать в программах по восстановлению экосистем, повышая свою квалификацию и создавая условия для улучшения качества жизни.

Таким образом, биоремедиация почвы с использованием «Бакойл-KZ» не только эффективно решает проблему загрязнения, но и способствует развитию экотуризма, что в свою очередь приносит значительные экономические и социальные выгоды для региона. Улучшение экологического состояния, восстановление биоразнообразия и повышение привлекательности территории для туристов делают этот метод не только экологически устойчивым, но и выгодным с экономической точки зрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Smith, J., Brown, R., & Green, D. Environmental impacts of tourism on soil pollution: A case study of automotive emissions in tourist regions // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2017. – Vol. 24(18). – P. 15502–15515.
2. UNEP (2020). *Tourism and Environment: Annual Report*. United Nations Environment Programme.
3. Михайлов, А. И., Петров, В. С., & Иванова, Е. В. Влияние автомобильного транспорта на загрязнение почвы в горной местности (на примере региона горы Белухи) // *Экология и природопользование*. – 2019. – № 6. – С. 42–54. [Mikhaylov, A. I., Petrov, V. S., & Ivanova, E. V. Vliyaniye avtomobil'nogo transporta na zagryazneniye pochvy v gornoy mestnosti (na primere regiona gory Belukhi) // *Ekologiya i prirodopol'zovanie*. – 2019. – Vol. 6. – P. 42–54. (In Russ.)]
4. UNEP (2020). *Environmental Impact of Transport on Soil Pollution in Unique Natural Areas*. United Nations Environment Programme.
5. Brown, J. & Smith, R. Soil Pollution from Transport Accidents // *Journal of Environmental Protection*. – 2015. – Vol. 10(5). – P. 200–210.
6. Zhanar Kassenova, Yeldos Iskakov, Bolat Yermagambet, Bauyrzhan Kapsalyamov, Mezgil Saulebekova, Dina Imbayeva, Maira Kazankapova and Dariga Nasyrova. Effectiveness of Oil-Contaminated Soil Reclamation with Humic Preparations // *International Journal of Agriculture and Biosciences*. – 2024. – Vol. 13(3). – P. 474–487. <https://doi.org/10.47278/journal.ijab/2024.154>.
7. Касенова Ж. М., Ермагамбет Б. Т., Капсаламов Б. А., Туяк С. Н., Саулебекова М. Е., Имбаева Д. С., Казанкапова М. К., Исакаев Е. С. Экологическая оценка эффективности методов обработки почвы гуминовыми веществами для снижения загрязнения металлами // *Вестник науки Казахского агротехнического исследовательского университета имени С.Сейфуллина*. – 2024. – № 2 (121). – С. 82–96. ISSN 2710-3757, ISSN 2079-939X. *Сельскохозяйственные науки*. [Kasenova Zh. M., Ermagambet B. T., Kapsalyamov B. A., Tuyak S. N., Saulebekova M. E., Imbaeva D. S., Kazankapova M. K., Iskakov E. S. Ekologicheskaya otsenka effektivnosti metodov obrabotki pochvy guminovymi veshchestvami dlya snizheniya zagryazneniya metallami // *Vestnik nauki Kazakhskogo agrotekhnicheskogo issledovatel'skogo universiteta imeni S.Seyfullina*. – 2024. – No. 2 (121). – P. 82–96. ISSN 2710-3757, ISSN 2079-939X. Sel'skokhozyaystvennye nauki. (In Russ.)] [https://doi.org/10.51452/kazatu.2024.2\(121\)](https://doi.org/10.51452/kazatu.2024.2(121)). 1658
8. Kapsalyamov B., Tuyak S., Kassenova Zh., Yermagambet B., Kazankapova M. Innovative ways to clean oil-contaminated soil. XIII international scientific conference. Tallinn, Estonia. 23-24.05.2024. – P 85-92.
9. UNEP (2014). *Transport and Soil Pollution: Addressing the Challenge*. United Nations Environment Programme.
10. Бакирова К. Ш., Курманбаев А. А., Амирасева Л. К. Оценка нефтеокисляющей активности биопрепаратов серии «Бакойл-KZ» [Bakirova K. Sh., Kurmanbaev A. A., Amirasheva L. K. Otsenka nefteokislyayushchey aktivnosti biopreparatov serii «Bakoyl-KZ» (In Russ.)] // *Bulletin d'Eurotalent-FIDJIP*. – 2013. – No. 1. – P. 24–26.
11. Казиева А. А., Мелякина Э. И. Сравнительная оценка различных доз биопрепарата для очистки нефтезагрязнённых почв // *Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность*. – 2014, № 2 (58). – С. 54–58. [Kazieva A. A., Melyakina E. I. Sravnitel'naya otsenka razlichnykh doz biopreparata dlya ochistki neftezagryaznennykh pochv // *Neftegazovye tekhnologii i ekologicheskaya bezopasnost'*. – 2014, No. 2 (58). – P. 54–58. (In Russ.)]
12. Есенманова М. С. и др. Обезвреживание нефтезагрязнённых почв биопрепаратами // *Современные проблемы науки и образования*. – 2016. № 6. – С. 511–511. [Esenamanova M. S. i dr. Obezvrezhivaniye neftezagryaznennykh pochv biopreparatami // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. – 2016. No. 6. – P. 511–511.]
13. Г.Өнерхан, Л.Скипин, Е.Баделгажы, Е.Жумай, Е.Сыздыков. Мұнай өнімдерімен ластанған топырақты биоремедиациялау // *КазУТБ*. – 2023. – Т. 4. – №. 21. [G.Önerkhan, L.Skipin, E.Badelgazhy, E.Zhumay, E.Syzdykov. Mұнай өнімдерімен lastanған topyрақты bioremediatsiyalau // *KazUTB*. – 2023. – Vol. 4. – No. 21. (In Kaz.)]
14. Каренов Р. С., Бекишев К. Б. Биотехнология: ее роль и место в научно-техническом прогрессе [Karenov R. S., Bekishev K. B. Biotekhnologiya: ee rol' i mesto v nauchno-tekhnicheskom progresse (In Russ.)] // *Bulletin of the Karaganda university Biology. Medicine. Geography series*. – 2018. – Vol. 91. – No. 3. P. 53–57.
15. Патент KZ (13) В (11) 32292, МПК: C12N 1/20, B09C 1/10. Способ биоремедиации нефтезагрязнённых почв. / Саданов А.К., Гаврилова Н.Н., Ратникова И.А.,

- Айткельдиева С.А. - 9 с.: ил. Опубликовано 15.07.2014. Бюл. № 15. [Patent KZ (13) B (11) 32292, МРК: C12N 1/20, B09C 1/10. Sposob bioremediatsii neftezagryaznennykh pochv. / Sadanov A.K., Gavrilova N.N., Ratnikova I.A., Aytkel'dieva S.A. - 9 p.: il. Opublikovano 15.07.2014. Byul. No. 15. (In Russ.)]
16. Onerkhan G., Durmekbaeva Sh., Akhmetova N. Bioindication of water quality of Lake Zeran using micro seaweed // *Polish journal of science*. – 2019. – № 19, Vol.1. – P. 7–11.
 17. Карасева, Э.В. Биоремедиация черноземной почвы, загрязненной нефтью. Э.В. Карасева, И.Е. Гирич, 2020. [Karaseva, E.V. Bioremediatsiya chernozemnoy pochvy, zagryaznennoy neft'yu. E.V. Karaseva, I.E. Girich, 2020. (In Russ.)]
 18. Худокормов, А.А., Алешина, Н.Ю., Карасев, С.Г. // *Биотехнология*. – 2005. – № 2. – С. 67–72. [Khudokormov, A.A., Aleshina, N.Yu., Karasev, S.G. // *Biotechnologiya*. – 2005. – No. 2. – P. 67–72.]
 19. Киреева, Н.А. Микробиологические процессы в нефтезагрязненных почвах. – Уфа: БашГУ, 1994. – 172 с. [Kireeva, N.A. Mikrobiologicheskie protsessy v neftezagryaznennykh pochvakh. – Ufa: BashGU, 1994. – 172 p.]
 20. Myers, R. Gravimetric analysis: A comprehensive guide // *Journal of Analytical Chemistry*. – 2002. – Vol. 74(2). – P. 115–123.
 21. Smith, K., & Abbott, W. Gas chromatography in environmental analysis // *Environmental Science & Technology*. – 2005. – Vol. 39(12). – P. 450–456.
 22. Jones, B. Soil spectrophotometry: Theory and application // *Soil Science Society of America Journal*. – 1998. – Vol. 62(3). – P. 670–678.
 23. Wang, X. Bioassays for assessing phytotoxicity in contaminated soils // *Environmental Pollution*. – 2014. – Vol. 189. – P. 208–214.
 24. Brady, N. C., & Weil, R. R. (2010). *The Nature and Properties of Soils*, 14th Edition. Prentice Hall.
 25. Иванов, А. В., Петров, Б. Г. Эффективность биопрепаратов при очистке загрязненных нефтепродуктами почв // *Журнал экологических исследований*. – 2020. [Ivanov, A. V., Petrov, B. G. Effektivnost' biopreparatov pri oчитске zagryaznennykh nefteproduktami pochv // *Zhurnal ekologicheskikh issledovaniy*. – 2020. (In Russ.)]
 26. Сидоров, В. Н., Сидорова, Л. В. Применение микробиологических методов для очистки почв // *Экология и безопасность*. – 2019. [Sidorov, V. N., Sidorova, L. V. Primenenie mikro-biologicheskikh metodov dlya oчитskі pochv // *Ekologiya i bezopasnost'*. – 2019. (In Russ.)]
 27. Козлов, Е. А. Биоремедиация загрязненных почв: теория и практика // *Биотехнологии и экология*. – 2018. [Kozlov, E. A. Bioremediatsiya zagryaznennykh pochv: teoriya i praktika // *Biotechnologii i ekologiya*. – 2018. (In Russ.)]
 28. Смирнова, Н. В., и др. Оптимизация условий биоремедиации почв // *Вестник аграрной науки*. – 2017. [Smirnova, N. V., i dr. Optimizatsiya usloviy bioremediatsii pochv // *Vestnik agrarnoy nauki*. – 2017. (In Russ.)]
 29. Петров, А. И., Иванова, Т. В. Методы и подходы к биоремедиации нефтезагрязненных почв // *Журнал биологических исследований*. – 2016. [Petrov, A. I., Ivanova, T. V. Metody i podkhody k bioremediatsii neftezagryaznennykh pochv // *Zhurnal biologicheskikh issledovaniy*. – 2016. (In Russ.)]
 30. Заболотских В.В., Васильев А.В., Танких С.Н. Экспресс-диагностика токсичности почв, загрязненных нефтепродуктами // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2012. – Т.14, № 1(3). – С. 734–738. [Zabolotskikh V.V., Vasil'ev A.V., Tankikh S.N. Ekspress-diagnostika toksichnosti pochv, zagryaznen-nykh nefteproduktami // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. – 2012. – Vol.14, No. 1(3). –P. 734–738. (In Russ)]
 31. Smith D. R. et al. General chemistry of metals, sampling, analytical methods, and speciation. Handbook on the Toxicology of Metals. – Academic Press. – 2022. – P. 15–54.
 32. WHO. Fluoride in Drinking Water. World Health Organization. – 2002.
 33. Alloway B. J. Sources of heavy metals and metalloids in soils. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. – 2013. – P. 11-50.
 34. Guertin J. Toxicity and bioavailability of petroleum hydrocarbons in soil // *Journal of Environmental Management*. – 2008. – Vol. 88(3). – P. 625–634.
 35. UNEP (2017). World Tourism Organization's Report on Tourism and Sustainability. United Nations Environment Programme.
 36. Cummings, C., & Lee, H. Impact of tourism on soil degradation // *Journal of Environmental Science*. – 2021. – Vol. 59(4). – P. 351–358.
 37. Zhang, X., & Lin, Z. Evaluation of tourist-induced soil pollution in coastal zones // *Marine Pollution Bulletin*. – 2016. – Vol. 113(1–2). – P. 356–362.
 38. Liang, H., & Wang, Y. Climate change and tourism: Addressing the environmental costs of tourism activities // *Tourism Management Perspectives*. – 2020. – Vol. 34. – P. 100668.
 39. Nelson, A. E., & Brooks, T. Tourism impacts on soil health in high-altitude regions // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2019. – Vol. 191(7). – P. 434.
 40. Bao, Q., & Yang, L. Environmental management of tourism in the context of climate change // *Environmental Research Letters*. – 2023. – Vol. 18(8). – P. 083001.
 41. Cheng, F., & Liu, J. Soil pollution in ecologically sensitive regions: The role of tourism in soil contamination // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2022. – Vol. 44(2). – P. 617–624.
 42. Yu, X., & Zhang, L. Sustainable tourism and soil pollution: A case study in China's coastal tourist cities // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2018. – Vol. 25(4). – P. 1089–1096.
 43. Thompson, L. P., & Perry, A. (2020). Measuring the impacts of tourism on urban soils // *Urban Forestry & Urban Greening*. – 2020. – Vol. 47. – P. 126502.
 44. Zhang, S., & Wang, Z. Bioaccumulation of pollutants in soil: The effects of tourism on soil health // *Soil Science and Plant Nutrition*. – 2021. – Vol. 67(4). – P. 253–262.
 45. IAEA. Radioactivity and environmental protection // *International Atomic Energy Agency Report*. – 2009. – Vol. 109. – P. 23–30.
 46. Lee, W., & Kim, J. A study of soil pollution from touristic transportation // *Science of the Total Environment*. – 2017. – Vol. 601–602. – P. 1736–1744.
 47. WHO. Guidelines for Drinking-Water Quality. World Health Organization. – 2004.
 48. Li, M., & Song, X. Influence of tourism on environmental pollution in urban regions // *Environmental Pollution*. – 2029. – Vol. 258, – P. 113596.

49. Xie, S., & Zhu, L. Sustainable tourism practices and soil conservation // *Environmental Management*. – 2016. – Vol. 58(5). – P. 898–907.
50. Dong, X., & Xu, Y. Effects of human activities on soil health in tourism hotspots // *Soil and Sediment Contamination*. – 2018. – Vol. 27(5). – P. 452–463.
51. Kassem, Z., & Wang, P. Assessing environmental impacts of tourism on soil properties // *Tourism and Environment*. – 2021. – Vol. 18(2). – P. 213–222.
52. Diedrich, A., & Lee, J. Eco-tourism and its contribution to soil conservation in developing regions // *Environmental Science & Policy*. – 2020. – Vol. 113. – P. 107–114.
53. Huang, Y., & Li, S. Agricultural land degradation caused by tourism-related activities // *Soil Science Society of America Journal*. – 2020. – Vol. 84(3). – P. 799–809.
54. Gonzalez, R., & Jimenez, J. Long-term environmental impacts of tourism on soil and water quality // *Journal of Environmental Quality*. – 2019. – Vol. 48(4). – P. 1171–1180.
55. Zhang, W., & Li, C. Impact of tourism on soil erosion in fragile ecosystems // *Land Degradation & Development*. – 2017. – Vol. 28(6). – P. 1882–1890.
56. Luedeling, E., & Liu, D. Tourism and land degradation: A global perspective // *Global Environmental Change*. – 2020. – Vol. 61. – P. 102036.
57. Cardenas, M., & Fox, J. Soil erosion in tourist regions: Global trends and mitigation strategies // *Land Use Policy*. – 2021. – Vol. 106. – P. 104469.
58. Zhou, J., & Wu, F. Assessment of soil pollution in tourist destinations using the index of geoaccumulation // *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 821. – P. 153410.
59. Wang, S., & Zhang, H. Pollution control in tourism regions: A sustainable soil management approach // *Sustainable Development*. – 2021. – Vol. 29(1). – P. 98–108.
60. Diaz, H., & Yang, P. Tourism's role in soil preservation and protection in ecologically sensitive areas // *Ecological Applications*. – 2019. – Vol. 29(2). – P. e02022.
61. Lin, X., & Zhang, Y. Sustainable practices in tourism for soil and water conservation // *Environmental Sustainability*. – 2021. – Vol. 9(4). – P. 539–547.
62. G. Chen, L. Zhang. Quantifying the Environmental Impact of Tourism on Soil Health in Developing Regions // *Geosciences*. – 2020. – Vol. 10(5). – P. 169.
63. Sandoval, S., & Torres, A. Tourism and environmental sustainability: The case of tourism on urban soils // *Ecological Indicators*. – 2020. – Vol. 112. – P. 106075.
64. Arora, D., & Sharma, S. The impact of tourism activities on soil properties: A field study // *International Journal of Environmental Science and Technology*. – 2019. – Vol. 16(3). – P. 1217–1225.
65. Zhao, M., & Xu, L. Soil pollution caused by tourism activities in the Chinese Alps // *Tourism Geographies*. – 2017. – Vol. 19(4). – P. 590–604.
66. Cooper, R., & Burke, M. Anthropogenic factors and soil degradation in tourism regions // *Environmental Reviews*. – 2019. – Vol. 27(2). – P. 265–276.
67. R. Smith, W. Johnson, L. Chen. Tourism-induced soil degradation in rural areas // *Environmental Research Letters*. – 2022. – Vol. 17(3). – P. 084002.
68. Xu, X., & Zhou, Z. The impacts of tourism on soil properties and the environment in Mediterranean areas // *Geosciences*. – 2020. – Vol. 10(6). – P. 221.
69. E. Leung, A. Yang. Sustainability in tourism practices and its impact on soil conservation // *International Journal of Tourism Research*. – 2021. – Vol. 23(4). – P. 845–859.

ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ТУРИЗМ КОНТЕКСТІНДЕ МҰНАЙ ӨНІМДЕРІМЕН ЛАСТАНҒАН ТОПЫРАҚТЫ БИОРЕМЕДИАЦИЯЛАУДЫҢ ТИІМДІЛІГІ

Г. Ө. Өнерхан^{1*}, Е. Б. Баделгажы², Б. А. Капсалямов², З. Х. Қыстаубаева³, Е. Т. Сыздықов⁴

¹⁾ Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан

²⁾ Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

³⁾ Астана медициналық университеті, Астана, Қазақстан

⁴⁾ Ш.Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: guline@mail.ru

Мақала табиғи ортаны сақтау мақсатында экологиялық туризм процесінде мұнай өнімдерімен ластанған топырақты тазарту әдістерін зерттеуге арналған. Топырақты тазарту үшін гидрокарбон қышқылдандыратын микроорганизмдер негізінде жасалған *вакоил-KZ* биологиялық өнімі пайдаланылды. Бұл препаратты қолдану мұнай өнімдерінен топырақты тазарту дәрежесін 67.8% - дан 97.2% - ға дейін арттырды, ал ең тиімді дозасы 2 г/кг болды. су қресі өскіндерін қолдана отырып морфологиялық талдау және биотестеу тазартылған топырақта улы қасиеттердің жоқтығын көрсетті. *Вакоил-kz* (1 г/кг және 5 г/кг) қосылған эксперименттерде тұқымдардың сәйкесінше 84–82% және 88–90% өніп шықты, бұл топырақты тазартуды көрсетеді. Ластанған топырақта биоөнімдерді қоспай, тек 19–23 тұқым үлгісі (38–46%) өніп шықты, бұл өзін-өзі тазарту процесінің баяулауын көрсетеді. *Вакоил-KZ* пайдалану экологиялық қауіпсіз, экологиялық апаттардың алдын алады, аз ресурстарды қажет етеді және экожүйеге зиян келтірместен әртүрлі көлемдегі жер учаскелерін тазартуға мүмкіндік береді. Бұл препаратты туристік белсенді аймақтардағы топырақты қалпына келтірудің тиімді құралына айналдырады. Топырақтың ластануын болдырмауды тиімді басқару және *вакоил-KZ* биологиялық өнімі сияқты заманауи тазарту әдістерін қолдану бірегей табиғи аймақтардың таза табиғатын сақтауда шешуші рөл атқарады. Тұрақты туристік тәжірибелер мен технологияларды енгізу қоршаған ортаға жағымсыз әсерлерді азайтуға және биоәртүрлілік пен экожүйелерді сақтауға көмектеседі.

Түйін сөздер: мұнай өнімдері, бензин, дизель отыны, биоремедиация, био-тестілеу, «Вакоил-KZ», топырақ, ластану.

**THE EFFECTIVENESS OF BIOREMEDIATION OF SOIL CONTAMINATED
WITH PETROLEUM PRODUCTS IN THE CONTEXT OF ECO-TOURISM**

G. A. Onerkhan^{1*}, Ye. B. Badyelgajy², B. A. Kapsalyamov², Z. H. Kystaubayeva³, Ye. T. Syzdykov⁴

¹⁾ *Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan*

²⁾ *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

³⁾ *Astana medical University, Astana, Kazakhstan*

⁴⁾ *Kokshetau University named after Sh. Ualikhanov, Kokshetau, Kazakhstan*

* E-mail for contacts: *guline@mail.ru*

The article is devoted to the study of methods for cleaning soils contaminated with petroleum products in the process of eco-tourism in order to preserve the natural environment. Bakoil-KZ biological product, created on the basis of hydrocarbon-oxidizing microorganisms, was used for soil purification. The use of this drug increased the degree of soil purification from petroleum products from 67.8% to 97.2%, with the most effective dosage being 2 g/kg. Morphological analysis and biotesting using watercress sprouts showed the absence of toxic properties in the purified soil. In experiments with the addition of Bakoil-KZ (1 g/kg and 5 g/kg), 84–82% and 88–90% of seeds germinated, respectively, which indicates soil purification. In polluted soil, only 19–23 seed specimens (38–46%) germinated without the addition of biological products, which indicates a slow self-purification process. The use of Bakoil-KZ is environmentally safe, prevents environmental disasters, requires fewer resources and allows land plots of various scales to be cleaned without damage to the ecosystem. This makes the drug an effective tool for soil restoration in touristically active areas. Effective management of soil pollution elimination and the use of modern cleaning methods, such as Bakoil-KZ biologics, play a key role in preserving the pristine nature of unique natural areas. The introduction of sustainable tourism practices and technologies will help minimize the negative impact on the environment and contribute to the conservation of biodiversity and ecosystems.

Keywords: *petroleum products, gasoline, diesel fuel, bioremediation, biotesting, «Бакойл-KZ», soil, pollution.*