

УДК 502.174.2
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).53](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).53)

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF AN EXPERIMENTAL BIOREMEDIANT FOR THE RESTORATION OF OIL-POLLUTED SOILS

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ЕСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО БІОРЕМЕДІАНТУ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ НАФТОЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ

Ganna G. Trokhymenko

antr@ukr.net

ORCID: 0000-0002-0835-3551

Olga G. Grushyna

olga.bidnichenko@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1209-592X

Nataliya V. Gurets

natalya.gurets@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-8859-4891

Iryna V. Remeshevska

iryna.remeshevska@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3040-3922

Г. Г. Трохименко,

докт. техн. наук, професор

О. Г. Грушина,

старший викладач

Н. В. Гурець,

старший викладач

І. В. Ремешевська,

канд. техн. наук, доцент

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. *Purpose* – to determine the possibility of remediating oil-contaminated soils by treating them with an experimental microbiological preparation, to evaluate its effectiveness and to analyze its impact on plant biotests.

Method. One of the most promising areas of remediation of contaminated soils is the use of microbiological preparations containing live strains of microorganisms capable of hydrocarbon biodegradation. The study assessed the effectiveness of an experimental biological product based on the *Bacillus amyloliquefaciens* ssp. *Plantarum* strain to accelerate the decomposition of oil products. The experimental part included phytotesting using plant test objects to determine the degree of toxicity of contamination and assess the level of remediation. The methodology was based on a comparative analysis of the germination of test plants in control and treated soil at different concentrations of the biological product.

Results. The use of a biopreparation based on the *Bacillus amyloliquefaciens* ssp. *Plantarum* strain has shown to be effective in restoring soil biota and neutralizing toxic substances. At a concentration of 1:25, the germination of plant test objects reached 80%, which exceeds the same indicator for a concentration of 1:50 (50%). It has been determined that the processes of destruction and decomposition of oil products in nature are mainly due to microorganisms contained in the soil, which are able to extract the energy necessary for the creation of new colonies and their vital activity from hydrocarbons.

Scientific novelty. Different strains of oil-oxidizing bacteria exhibit different degrees of activity depending on the environmental conditions. The efficiency and effectiveness of the experimental strain of *Bacillus amyloliquefaciens* ssp. *Plantarum* are poorly understood, and the results obtained expand the understanding of the mechanisms of hydrocarbon biodegradation under the influence of specific bacterial consortia.

Practical importance. Soil pollution by oil and oil products is one of the most critical environmental problems that negatively affect land fertility and ecosystem functioning. Traditional purification methods are not always effective, so researching biotechnological remediation methods is important for developing effective strategies for ecological restoration of degraded areas.

Key words: soil contamination; biological purification methods; oil pollution; phytotesting; plant test object.

Анотація. *Мета* – визначити можливість відновлення нафтозабруднених ґрунтів при обробці експериментальним мікробіологічним препаратом, оцінити його ефективність та проаналізувати вплив на рослинні біотести.

Методика. Одним із найбільш перспективних напрямів ремедіації забруднених ґрунтів є використання мікробіологічних препаратів, що містять живі штами мікроорганізмів, здатних до біодеградації вуглеводнів. У межах дослідження виконано оцінку ефективності експериментального біопрепарату на основі штаму *Bacillus*

amyloliquefaciens ssp. Plantarum для прискорення процесів розкладання нафтопродуктів. Експериментальна частина включала фітотестування із застосуванням рослинних тест-об'єктів для визначення ступеня токсичності забруднень та оцінки рівня рекультивації. Методика ґрунтувалася на порівняльному аналізі проростання тестових рослин у контрольному та обробленому ґрунті за різних концентрацій біопрепарату.

Результати. Використання біопрепарату на основі штаму *Bacillus amyloliquefaciens ssp. Plantarum* показало ефективність у відновленні ґрунтової біоти та нейтралізації токсичних речовин. За концентрації препарату 1:25 проростання рослинних тест-об'єктів досягло 80%, що перевищує аналогічний показник для концентрації 1:50 (50%). Визначено, що процеси руйнування і розкладання нафтопродуктів у природі йдуть в основному за рахунок мікроорганізмів, що містяться в ґрунті, які здатні витягувати з вуглеводнів енергію, необхідну для створення нових колоній та їх життєдіяльності.

Наукова новизна. Різні штами нафтоокиснювальних бактерій демонструють різний ступінь активності залежно від умов середовища. Дієвість та ефективність експериментального штаму *Bacillus amyloliquefaciens ssp. Plantarum* є малодослідженими, а отримані результати розширюють розуміння механізмів біодеградації вуглеводнів під впливом специфічних бактеріальних консорціумів.

Практична значимість. Забруднення ґрунту нафтою та нафтопродуктами є однією з найбільш критичних екологічних проблем, що негативно впливають на родючість земель та функціонування екосистем. Традиційні методи очищення не завжди ефективні, тому дослідження біотехнологічних способів ремедіації є важливим для розробки ефективних стратегій екологічного відновлення деградованих територій.

Ключові слова: забруднення ґрунтів; біологічні методи очищення; нафтове забруднення; фітотестування; рослинний тест-об'єкт.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Традиційні механічні та фізико-хімічні методи очищення забруднених ґрунтів часто є малоефективними або надто затратними, що обмежує їх широке застосування. Тому, актуальним напрямом дослідження є розробка біотехнологічних методів рекультивації, заснованих на використанні мікроорганізмів-деструкторів вуглеводнів нафти, здатних трансформувати шкідливі сполуки в екологічно нейтральні або дружні для екологічної системи продукти.

Одним з найбільш перспективних підходів є застосування мікробіологічних препаратів, які сприяють активному розмноженню нафтоокиснювальних бактерій у середовищах з високим вмістом вуглеводнів. Використання таких біопрепаратів може забезпечити природне очищення ґрунту від нафтових забруднень, сприяти відновленню його агрономічних характеристик та зниженню екологічних ризиків.

Для оцінки рівня забрудненості ґрунтів та ефективності біотехнологічної рекультивації широко застосовується метод фітотестування, який дозволяє визначити ступінь токсичності нафтових компонентів через їхній вплив на проростання рослин. Фітотести є ефективним інструментом для моніторингу процесів детоксикації ґрунтів та біологічного відновлення забруднених екосистем.

Таким чином, потрібно проаналізувати сучасні біотехнологічні підходи до рекультивації ґрунтів, визначити ефективність застосування мікробіологічних препаратів та оптимальні умови їх використання для екологічно безпечного очищення земель від нафтових забруднень.

Метою дослідження є визначення можливості відновлення нафтозабруднених ґрунтів за допомогою експериментальних мікробіологічних препаратів,

оцінити ефективність їх застосування у різних концентраціях та проаналізувати їхній вплив на рослинні біотести.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Дослідження забруднення ґрунтів нафтопродуктами проводиться у різних напрямках, охоплюючи фіторемердіацію, біоіндикаційні методи, оцінку екологічного стану та застосування мікроорганізмів для рекультивації.

Одним із перспективних підходів до очищення ґрунтів є фіторемердіація, тобто використання рослинних біосистем для поглинання та розкладання забруднюючих речовин. У дослідженні [1] аналізуються можливості застосування енергетичних культур для рекультивації нафтозабруднених ґрунтів. Автори підтверджують, що поєднання фіторемердіації з використанням мікробіологічних препаратів сприяє активному відновленню мікрофлори ґрунту, стимулюючи процеси біодеградації нафтопродуктів. Оцінка рівня забруднення ґрунтів потребує ефективних методів моніторингу, серед яких значне місце займає біоіндикація. Біоіндикаційні методи оцінки якості довкілля, зокрема аналіз стану ґрунтів, водних ресурсів та атмосферного повітря розглядаються в різних дослідженнях [2], також автором запропоновано системний підхід до моніторингу екологічного стану територій.

Серед сучасних біотехнологій, що застосовуються для рекультивації забруднених ґрунтів, особливе місце займає мікробіологічне очищення. У роботах [3, 4] проаналізовано ефективність використання мікроорганізмів роду *Bacillus* у процесах біоремердіації. Автори встановили, що *Bacillus amyloliquefaciens* та *Bacillus subtilis* активізують

деградацію нафтопродуктів, сприяючи швидшому відновленню екологічного балансу ґрунту. У дослідженнях [5, 6, 7] розглядається застосування рослинних тест-систем для оцінки рівня забруднення ґрунтів нафтою, проаналізовано ефективність фітотестування як методу біомоніторингу. Поряд із біотехнологічними методами, важливу роль відіграють гігієнічні аспекти застосування рекультиваційних технологій. У статті [8] розглянуто новітні способи ліквідації нафтового забруднення за допомогою біотехнології «ДУКАТм». Дослідженнями підтверджується безпечність технології та її позитивний вплив на біологічну активність ґрунту. Біотестування також виступає ключовим методом у визначенні рівня забруднення ґрунтів. Важливу роль у наукових дослідженнях відіграють методи екологічної оцінки ґрунтів, що містять дані про фізико-хімічні властивості забрудненого середовища. Представлено методику оцінювання нафтозабруднених ґрунтів, що включає аналіз їхньої структури та хімічного складу [9].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значний прогрес у дослідженні біотехнологічних методів рекультивації нафтозабруднених ґрунтів, низка питань залишається відкритою. Зокрема, недостатньо досліджено вплив зовнішніх екологічних факторів, таких як температура, вологість та склад ґрунту на ефективність мікробіологічних препаратів. Відомо, що різні штами нафтоокиснювальних бактерій демонструють різний ступінь активності залежно від умов середовища, проте оптимальні параметри для кожного типу забруднення потребують подальшого уточнення. Крім того, існує проблема стабільності штамів у ґрунтовій екосистемі: штучне внесення мікроорганізмів не завжди призводить до їх тривалого збереження та функціонування, що ставить під сумнів довготривалий ефект біоремедіації. Також актуальною залишається проблема підвищення стійкості біопрепаратів до змін у складі забруднення, що дозволить їх застосовувати у реальних екологічних умовах без значного зниження ефективності.

Окрім біологічного аспекту, важливим є питання технічної реалізації та економічної доцільності застосування біотехнологічних методів рекультивації. Незважаючи на значний потенціал мікробіологічних препаратів, їхнє широкомасштабне використання обмежене високою собівартістю виробництва та необхідністю контролю їхньої стабільності під час зберігання та транспортування. Розробка ефективних та економічно вигідних технологій внесення біопрепаратів є важливим напрямом подальших досліджень.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для визначення рівня забруднення ґрунтів нафтопродуктами у даному дослідженні було застосовано

метод біотестування, який дозволяє оцінити реакцію біологічних систем на токсичні речовини. Біотестування базується на використанні тест-об'єктів, які реагують на зміни навколишнього середовища незалежно від природи забруднювача. Цей метод широко застосовується для аналізу впливу токсичних речовин на біологічні системи та оцінки рівня забруднення ґрунтів. Визначення показників токсичності ґрунту здійснюється через спостереження за змінами життєдіяльності тест-об'єктів, що дозволяє отримати інформацію про наявність забруднювачів та їхній вплив на екосистему.

У процесі проведення досліджень було використано метод фітотестування, який є одним із найбільш ефективних методів біотестування забруднених ґрунтів. Цей метод ґрунтується на оцінюванні змін у розвитку рослин, які вирощуються у забрудненому та контрольному середовищах. Рослини, як первинні продуценти екосистем, здатні абсорбувати полутанти та реагувати на їхній вплив через зміни фізіологічних параметрів. Аналіз таких показників як швидкість сходження насіння, інтенсивність росту коренів і пагонів, маса рослин дозволяє визначити рівень фітотоксичності ґрунту. Для фітотестування найчастіше використовуються рослини зі швидким процесом сходження та зростання, а саме крес-салат. Цей вид рослин дає змогу достатньо в невеликі строки оцінити забрудненість ґрунту нафтопродуктами.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Забруднення ґрунтів нафтопродуктами є однією з найгостріших екологічних проблем, що значно впливають на біологічну активність ґрунтових екосистем та агрохімічні властивості ґрунтів. Зростання обсягів видобутку, транспортування, переробки та використання нафтопродуктів спричинило збільшення частоти аварійних розливів, що призводить до масштабної деградації ґрунтового покриву.

Основними джерелами забруднення є підприємства та інфраструктурні об'єкти нафтової галузі, включаючи нафтосховища, нафтопроводи, свердловини та транспортні засоби, що використовують нафтопродукти. Потрапляючи в ґрунтове середовище, нафтопродукти поступово накопичуються у верхніх шарах, змінюючи його фізико-хімічні властивості, зокрема зменшуючи водо- і повітропроникність та порушуючи природний баланс поживних речовин. Високі концентрації вуглеводнів спричиняють загибель мікроорганізмів, необхідних для підтримки ґрунтової родючості, а також порушують механізми поглинання води і мінеральних елементів рослинами.

Забруднення ґрунту нафтопродуктами може мати серйозні наслідки та обернутися для довкілля значною катастрофою. При наявності нафтопродуктів у ґрунті змінюється співвідношення між наявними в ньому

мікроорганізмами, що стає причиною пригнічення життєво важливих процесів дихання та самоочищення ґрунту. Забруднений нафтою ґрунт майже неспроможний очиститися від цього негативного впливу. Природне розкладання нафтопродуктів у звичайних умовах проходить дуже повільно, і в результаті в екосистемі накопичуються стійкі продукти, які надзвичайно складно окислюються та серйозно заважають самоочищенню та відновленню природних балансів.

Одним із основних напрямків дослідження ґрунтів, які забруднені нафтопродуктами, є розробка та використання методів визначення та оцінки забруднення навколишнього середовища нафтою. Для досягнення цієї мети найбільш розповсюдженими є методи біотестування, які дають можливість проаналізувати реакцію організмів на наявність нафтопродуктів у ґрунті для визначення ступеня його забруднення та аналізу дії токсичних речовин на довкілля. Метод біотестування не передбачає визначення концентрації забруднювача в середовищі, а визначає ступінь забруднення шляхом спостереження за реакцією тест-об'єктів на полутанти, що саме і було проведено у даному дослідженні.

Під час оцінки рівня забруднення ґрунтів вуглеводнями нафти зазвичай у біотестуванні застосовується багато рослин різних видів. Для комплексної оцінки впливу нафтового забруднення використовуються фізіологічні показники рослинних тест-систем. Для проведення досліджень тест-об'єктом було обрано насіння крес-салату (*Lepidium sativum*). За контрольні показники тест-функцій у фітотестуванні рослин визначають такі параметри, як схожість насіння, довжина коренів і стебла парості, швидкість росту відростків, фітомаса рослин та інші параметри. Вимірювання динаміки параметрів рослин дозволяє чисельно визначити тестові функції рослинних організмів та виявити реакцію рослин на зовнішні подразники. За критерій токсичності приймається значення досліджуваного показника та рівень його відхилення від контрольного зразка.

Під час проведення дослідження процесу проростання рослин рекомендовано використовувати декілька показників. Перш за все, важливо оцінювати схожість між видами рослин, які обрано в якості тестових зразків. Також важливим параметром є енергія проростання, яка вказує на життєздатність рослини та її здатність до росту і розвитку. Крім цього слід визначити кількість пророслого насіння, що дозволить оцінити успішність проростання. Під час фітотестування оцінюється початок ростових процесів пагонів, які формуються з насіння. Цей параметр допомагає оцінити стан та життєздатність рослинного об'єкта. Загалом, використання цих показників у тестуванні рослинних організмів дозволяє здійснювати об'єктивну оцінку їхньої витривалості, життєздатності та реакції на вплив нафтопродуктів.

У якості тест-об'єкта для дослідження забруднення ґрунту нафтою використовувався крес-салат, який був висаджений у 34 однакові склянки (пронумеровані від 1 до 30 та K1, K2, K3, K4). Нафтодеструктором під час дослідження виступає біологічний концентрат, який вносився через однакові проміжки часу (через кожні 7 днів), тривалість дослідження складала 21 день.

Застосовано новий біологічний препарат на основі концентрату суспензій мікроорганізмів експериментального штаму 531C *Bacillus amyloliquefaciens* ssp. *plantarum*. Штам 531C володіє активною ростостимулюючою властивістю та високою резистентністю до важких металів Cd, Pb, Ni, Zn, що позитивно впливає на покращення екологічного стану ґрунту. Даний препарат розробляється для покращення продуктивності і якості сільськогосподарської продукції в районах з інтенсивним сільськогосподарським використанням земель. Оскільки у нафті присутні метали Cd, Pb, Ni, Zn було обрано саме цей препарат для проведення експерименту, з метою сприяння активному росту рослин при забрудненому ґрунті.

До контрольної групи зразків увійшли перші три склянки (1–3) з ґрунтом, який не містить нафтопродуктів, та склянки під номерами K1, K2, K3 і K4 із забрудненим ґрунтом. Всі інші склянки містили забруднений нафтопродуктами ґрунт. Під час експерименту у склянки 4–15 вносився нафтодеструктор у концентрації 1:50, а у склянках 16–30 його концентрація складала 1:25. Склянки 16–18 не містили нафту, вони також є контрольними, куди вносився препарат з концентрацією 1:25.

Результати дослідження з проростанням тестового зразка (крес-салату) наведено на рис. 1–3.

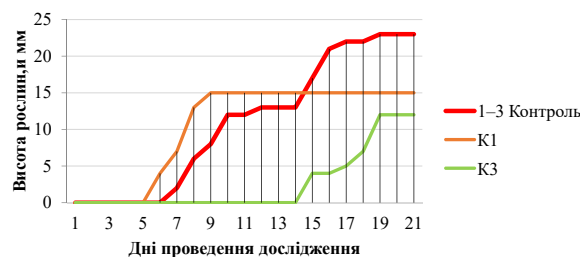


Рис. 1. Результати проростання контрольної групи крес-салату

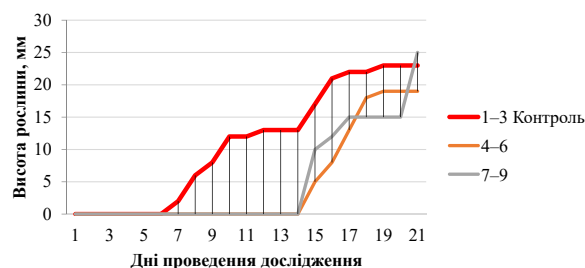


Рис. 2. Результати проростання крес-салату на забрудненому ґрунті при обробці препаратом у співвідношенні 1:50

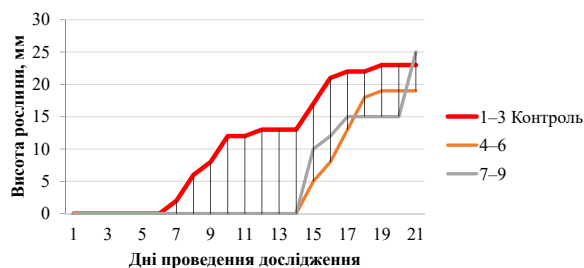


Рис. 3. Результати проростання крес-салату на забрудненому ґрунті при обробці препаратом у співвідношенні 1:25

У контрольній групі проріст паростків відбувся для всіх рослин, окрім K2 і K4 (рис. 1). В склянці K1 паростки зійшли на 6 день, випередивши контрольну групу на 1 день. Під час росту та розвитку рослин на них можуть впливати такі фактори як зменшення кисню, вологі та поживних речовин, що пов'язано зі змінами зовнішніх умов. Наявність нафти за концентрацією 5 % має стимулюючий ефект на проростання деяких видів насіння, наприклад родини злакових. Такий ефект можна пояснити адаптивною реакцією досліджуваної рослини та високим ступенем стійкості до токсичних компонентів нафти. Однак даний факт не можна застосувати до крес-салату, оскільки ця рослина відноситься до родини капустяних. Контрольна група, паростки якої зійшли на 1 день пізніше за забруднений зразок нафтою можна прийняти за випадкову ймовірність. Зразки в склянках K2 та K4 не вижили. В склянці K3 насіння проросло на 14 день. Найбільший розмір мали зразки у контрольних склянках 1 – , їх середній розмір склав 23 мм, а розмір рослин, що проростали у ґрунті, забрудненому нафтою K1 – 15 мм та K3 – 12 мм.

Спостереження за проростанням крес-салату в ґрунті з концентрацією препарату 1:50 показують, що сходження насіння відбулося в склянках 4–6 та 7–9, не відбулося росту в склянках 10–12 та 13–14. Сходження насіння в склянках 4–6 та 7–9 відбулося одночасно на 15 день, середній розмір крес-салату у склянках 4–6 становить 19 мм, для склянок 7–9 – 25 мм. За графіком (рис. 2) спостерігаємо стрімкий ріст рослин в склянках 4–6, який відбувся з 14 по 19 день, таку саму ситуацію можна побачити і в склянках 7–9 з 14 по 17 та з 20 по 21 дні. У переважній кількості випадків забруднення нафтою (від 1 до 25 % маси ґрунту) призводить до зменшення активності ґрунтових ферментів. При невеликому забрудненні нафтопродуктами (1 %), рівень активності ферментів в землі згодом відновлюється. Однак, при значному забрудненні (10 %), активність ґрунтових ферментів збільшується. Забруднення нафтовими вуглеводнями може змінювати окислювально-відновні процеси в ґрунті у бік відновлювальних процесів. Це пояснюється тим, що вуглеводні нафти заповнюють пори

ґрунту, покриваючи частинки ґрунту і зменшуючи їх повітропроникність. Це призводить до виникнення анаеробних умов та знижує окислювально-відновний потенціал ґрунту.

Забруднення нафтопродуктами створює шкідливий вплив на рослини. Це викликано змінами фізико-хімічних властивостей ґрунту, зокрема підвищенням гідрофобності та закупорюванням ґрунтових капілярів нафтопродуктами. Крім того, нафта має токсичну дію, яка зумовлена розвитком грибкових організмів, що виникають через вміст токсинів.

У результатах експерименту проростання крес-салату з концентрацією препарату 1:25 не відбулося тільки в склянках 28–30 з найвищою концентрацією нафти. Склянки 16–18 контрольні, але після додавання препарату їх сходження відбулося вже на 4 день, такий самий результат мають склянки 19–21. Зразки в стаканах 22–24 зійшли на 6 день, склянки 25–27 на 9 день відповідно. На графіку (рис. 3) видно, що зразки 16–18 досягли середнього розміру в 33 мм, більше за контрольної групи, зразки 19–21 сягнули такого ж розміру як і контрольні – 23 мм. В стаканах 22–24 середній розмір стебла досягнув 19 мм, а зразки 25–27 показали найгірший результат росту – 4 мм, та на 21 день загинули. Таку поведінку рослин можна пояснити високим вмістом нафти в 15 мл, це єдині зразки з такою кількістю нафти, які проросли саме за концентрації препарату в 1:25. Можна висунути припущення, що наявність нафти у ґрунтах призводить до зниження надходження мінеральних елементів до рослин. Це може статися через огортання частинок ґрунту вуглеводнями нафти, що заважає міграції рухомих елементів.

Крім цього, нафтове забруднення значно впливає на дихання ґрунту. Коли мікрофлора вражена великою кількістю вуглеводнів, інтенсивність дихання зменшується, що має негативний вплив на розвиток рослин. За концентрації препарату в співвідношенні 1:25 відбулося найбільше зростання рослин, навіть за високих концентрацій нафти. Наявність нафти в ґрунті суттєво гальмує проростання насіння. Цей негативний чинник пояснюється не лише високою токсичністю нафти, але й набуттям ґрунтом гідрофобних властивостей. Вуглеводні нафти, які огортають поверхню насіння, заважають надходженню води.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

У дослідженні визначено, що процеси руйнування і розкладання нафтопродуктів у природі йдуть в основному за рахунок мікроорганізмів, що містяться в ґрунті, які здатні витягувати з вуглеводнів енергію, необхідну для створення нових колоній та їх життєдіяльності. За допомогою методу біоре mediaції можна вносити в забруднене середовище біологічні біопрепарати, які містять мікроорганізми-нафтодеструктори, що здатні за короткий проміжок часу розкласти

нафту у забрудненому середовищі без негативних наслідків для цього середовища.

Досліджено вплив препарату на основі концентрату суспензій штаму мікроорганізму 531C *Bacillus amyloliquefaciens* ssp. *Plantarum* для рекультивациі нафтозабруднених ґрунтів при різному ступені забруднення. Отримані дані свідчать про перспективність застосування даного експериментального препарату в рекультивациі ґрунтів. Однак необхідно враховувати зовнішні фактори, такі як вологість, температура та склад ґрунту, які можуть впливати на ефективність біопрепаратів. Подальші дослідження необхідні для вдосконалення методів застосування біопрепаратів.

ВИСНОВКИ

Дослідження проводилося на зразках ґрунту з різними концентраціями нафтозабруднення (5–20 мл нафти). До них додавали біопрепарат у співвідношеннях 1:50 та 1:25. Результати показали, що найбільш ефективним виявився біопрепарат у співвідношенні

1:25, що забезпечило проростання рослин до 80 %, у порівнянні з 50 % при співвідношенні 1:50.

Аналіз підтвердив, що внесення експериментального біоремедіанту позитивно впливає на проростання рослин, сприяє біодеградації нафтопродуктів та покращенню фізико-хімічних характеристик ґрунту.

Наукові дослідження демонструють, що експериментальні мікроорганізми здатні активно розкладати нафтопродукти, сприяючи природному очищенню ґрунтів. У різних дослідженнях встановлено, що мікроорганізми здатні прискорювати процеси біодеградації нафтопродуктів, сприяючи утворенню екологічно безпечних сполук.

Біоремедіанти успішно застосовуються в рекультивациі, питання їхньої ефективності за різних рівнів забруднення, умов середовища та механізму дії залишаються недостатньо вивченими. Особливо важливо визначити оптимальні концентрації препаратів та оцінити вплив екологічних факторів на процес біоремедіації.

REFERENCES

- [1] Boretska I.Iu., Dzhura N.M., Romaniuk O.I. (2020). Fitoremediatsiia tekhnogenno zabrudnennykh gruntiv z vykorystanniam enerhetychnykh kultur. [Phytoremediation of technologically contaminated soils using energy crops]. *Ekolohichni nauky* 6 (39), pp. 72–76. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11>
- [2] Hrytsak L. R. (2017). Bioindykatsiini metody dlia potreb systemnoho analizu yakosti dovkilliu. [Bioindication methods for the needs of systematic analysis of environmental quality]. *Heohrafiia*. № 2. pp. 153–165.
- [3] Trokhymenko H. H., Nedoroda V. M. (2023). Tekhnolohichni etapy bioremediatsii zabrudnennykh naftoproduktamy gruntiv na osnovi mikroorhanizmiv rodu Bacillus. [Technological stages of bioremediation of oil-contaminated soils based on microorganisms of the genus Bacillus]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK*. № 2–3. pp. 167–177. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2023.2-3\(491-492\).20](https://doi.org/10.15589/znp2023.2-3(491-492).20)
- [4] Trokhymenko H. H., Nedoroda V. M. (2023). Analiz destruktyvnogo potentsialu mikroorhanizmiv rodu Bacillus u kombinatsii z fulvokyslotamy dlia ryzodehradatsii naftovykh vuhlevodniv. [Analysis of the destructive potential of microorganisms of the genus Bacillus in combination with fulvic acids for the rhizodegradation of petroleum hydrocarbons]. *Ekolohichni nauky: naukovopraktychnyi zhurnal*. № 1(46). pp. 85–91. DOI <https://doi.org/10.32846/23069716/2023.eco.1-46.15>
- [5] Dzhura N.M. (2011). Mozhlyvosti vykorystannia roslynnykh test-system dlia biomonitorynhu naftozabrudnennykh gruntiv. [Possibilities of using plant test systems for biomonitoring of oil-contaminated soils]. *Biolohichni studii / Studia Biologica*. № 3. pp. 183–196.
- [6] Hrodzynskiy D. M., Shylina Yu. V., Kutsokon N. K. (2006). Zastosuvannia roslynnykh test-system dlia otsinky kombinovanoi dii faktoriv riznoi pryrody. [Application of plant test systems to assess the combined effect of factors of different nature]. *Fitosotsiotsentr*. 60 p.
- [7] Babadzhanova O. F., Sukach Yu. H., Sukach R. Yu. (2017). Fitotoksychnist gruntiv, zabrudnennykh dyzelnym palyvom. [Phytotoxicity of soils contaminated with diesel fuel]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, t. 27, № 3, pp. 92–94.
- [8] Stankevych V. V. (2012). Hihienichni aspekty vprovadzhennia novitnikh sposobiv likvidatsii naftozabrudnen gruntiv na prykladi biotekhnolohii «DUKATm». [Hygienic aspects of implementing the latest methods of eliminating oil contamination of soil on the example of the DUKATm biotechnology]. *Hihiiena naselenykh mist*. № 59. pp. 107–113.
- [9] Romaniuk O. I., Shevchyk L.Z., Oshchapovskiy I.V., Zhak T.V. (2016). Metodyka ekolohichnoho otsiniuvannia naftozabrudnennykh gruntiv. [Methodology for environmental assessment of oil-contaminated soils]. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Biolohiia, ekolohiia*. № 24(2). pp. 264–269.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Борецька І.Ю., Джура Н.М., Романюк О.І. (2020). Фіторемедіація техногенно забруднених ґрунтів з використанням енергетичних культур. *Екологічні науки*, 6(39), С. 72–76. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11>
- [2] Грицак Л. Р. (2017). Біоіндикаційні методи для потреб системного аналізу якості довкілля. *Географія*. № 2. С. 153–165.
- [3] Трохименко Г. Г., Недорода В. М.. (2023). Технологічні етапи біоремедіації забруднених нафтопродуктами ґрунтів на основі мікроорганізмів роду Bacillus. *Збірник наукових праць НУК*. № 2–3. С. 167–177. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2023.2-3\(491-492\).20](https://doi.org/10.15589/znp2023.2-3(491-492).20)

- [4] Трохименко Г. Г., Недорода В. М. (2023). Аналіз деструктивного потенціалу мікроорганізмів роду *Bacillus* у комбінації з фульвокислотами для ризодеградації нафтових вуглеводнів. *Екологічні науки: науковопрактичний журнал*. № 1(46). С. 85–91. DOI <https://doi.org/10.32846/23069716/2023.eco.1-46.15>
- [5] Джура Н.М. (2011). Можливості використання рослинних тест-систем для біомоніторингу нафтозабруднених ґрунтів. *Біологічні студії / Studia Biologica*. № 3. С. 183–196.
- [6] Гродзинський Д. М., Шиліна Ю. В., Куцоконь Н. К. (2006). Застосування рослинних тест-систем для оцінки комбінованої дії факторів різної природи. *Фітосоціоцентр*. 60 с.
- [7] Бабаджанова О. Ф., Сукач Ю. Г., Сукач Р. Ю. (2017). Фітотоксичність ґрунтів, забруднених дизельним паливом. *Науковий вісник НЛТУ України*, т. 27, № 3, С. 92–94.
- [8] Станкевич В. В. (2012). Гігієнічні аспекти впровадження новітніх способів ліквідації нафтозабруднень ґрунту на прикладі біотехнології «ДУКАТм». *Гігієна населених місць*. № 59. С. 107–113.
- [9] Романюк О. І., Шевчик Л.З., Ощиповський І.В., Жак Т.В. (2016). Методика екологічного оцінювання нафтозабруднених ґрунтів. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія, екологія*. № 24(2). С. 264–269.

© Трохименко Г. Г., Грушина О. Г., Гурець Н. В., Ремешевська І. В.
Дата надходження статті до редакції: 26.05.2025
Дата затвердження статті до друку: 12.06.2025