

УДК 504.054:66.098

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.15>

АНАЛІЗ ЧИННИКІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРОЦЕС БІОРЕМЕДІАЦІЇ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ НАФТОПРОДУКТАМИ

Наконечний І.В., Літвак О.А., Літвак С.М., Маринець О.М.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Героїв України, 9, 54007, м. Миколаїв
ihor.nakonechnyi@nuos.edu.ua, olya.litvak@gmail.com,
sergiy.litvak@nuos.edu.ua, marinets.aleks@gmail.com

Для зниження несприятливих впливів нафтового забруднення на навколишнє середовище необхідне знання закономірностей біохімічної трансформації забруднюючих речовин у різних природних умовах, прогноз їхньої зміни в часі та в просторі, наукове обґрунтування заходів щодо відновлення забруднених ґрунтів, з урахуванням вимог екологічної безпеки. Тому дедалі більшої актуальності набувають біологічні методи, які є екологічно безпечними та відносно недорогими. При цьому біологічні методи дають змогу не тільки знизити початкову концентрацію вуглеводнів, а й активізувати метаболічний потенціал біологічних компонентів ґрунтових екосистем. Мета дослідження полягає в визначенні основних чинників, що мають значний вплив на обґрунтування та ефективність технологічного процесу біоремедіації ґрунтів, забруднених нафтопродуктами. Обґрунтовано, що головний раціональний принцип відновлення забрудненої екосистеми – це створення оптимальних умов, в яких екосистема буде сама прагнути до відновлення функцій складових компонентів і зв'язків між ними. В результаті важливо розуміти роль біологічних чинників (кількість, тип і склад популяцій мікроорганізмів, форми симбіотичних взаємин тощо) та фізико-хімічних чинників (температура, рН ґрунту, аерація, окисно-відновний потенціал, поживні речовини у ґрунті, фізико-хімічні властивості забруднювачів, їх здатність до біорозкладання) для ефективного видалення вуглеводнів. Тому виникає необхідність у проведенні попереднього обстеження забрудненої ділянки для уточнення технологічних режимів з урахуванням зазначених чинників для забезпечення успішного росту та метаболізму мікроорганізмів. Ці чинники особливо важливі у випадку біоремедіації *in situ*. Деякі з них можна певним чином оптимізувати та врегулювати для більш повного використання потенціалу біодеградації забруднень. Визначено важливість майбутніх досліджень, спрямованих на створення консорціумів мікроорганізмів, які здатні впливати на широкий спектр вуглеводнів, включаючи ароматичні поліциклічні вуглеводні, смоли та асфальтени. Це відповідним чином буде сприяти підвищенню ефективності та прискоренню процесу біоремедіації. *Ключові слова*: забруднення ґрунтів, нафтопродукти, біологічні методи, біоремедіація, мікроорганізми, біологічні чинники, фізико-хімічні чинники.

Analysis of factors influencing the process of bioremediation of soils contaminated with oil products. Nakonechnyi I., Litvak O., Litvak S., Marynets O.

To reduce the adverse environmental impacts of oil pollution, it is necessary to know the patterns of biochemical transformation of pollutants in different natural conditions, forecast their changes in time and space, and provide scientific justification for measures to restore contaminated soils, taking into account the requirements of environmental safety. Therefore, biological methods, which are environmentally friendly and relatively inexpensive, are becoming increasingly relevant. At the same time, biological methods allow not only to reduce the initial concentration of hydrocarbons, but also to activate the metabolic potential of biological components of soil ecosystems. The aim of the study is to identify the main factors that have a significant impact on the justification and efficiency of the technological process of bioremediation of soils contaminated with oil products. It is substantiated that the main rational principle of restoring a contaminated ecosystem is to create optimal conditions under which the ecosystem itself will strive to restore the functions of its components and the links between them. As a result, it is important to understand the role of biological factors (number, type and composition of microbial populations, forms of symbiotic relationships, etc.) and physical and chemical factors (temperature, soil pH, aeration, redox potential, nutrients in the soil, physical and chemical properties of pollutants, their ability to biodegrade) for effective hydrocarbon removal. Therefore, there is a need to conduct a preliminary survey of the contaminated area to clarify the technological regimes, taking into account these factors to ensure successful growth and metabolism of microorganisms. These factors are especially important in the case of *in situ* bioremediation. Some of them can be optimised and regulated in a certain way to make fuller use of the potential of pollution biodegradation. The importance of future research aimed at creating consortia of microorganisms that can affect a wide range of hydrocarbons, including aromatic polycyclic hydrocarbons, resins and asphaltenes, is identified. This will accordingly increase the efficiency and accelerate the bioremediation process. *Key words*: soil contamination, oil products, biological methods, bioremediation, microorganisms, biological factors, physical and chemical factors.

Постановка проблеми. Одним з важливих компонентів природного середовища є ґрунт. Це сфера, де екологічні чинники мають вирішальний вплив на зміну складу та властивостей самого ґрунту, а також на чисельність мікроорганізмів у ньому. Незважаючи на те, що ґрунтовий покрив має значні резерви стій-

кості та саморегуляції, він надзвичайно чутливий до антропогенного впливу. Швидкість і ступінь взаємодії ґрунтів із навколишнім середовищем постійно збільшується, що сильно змінює їх фізичні та біологічні властивості. Результатом є зниження біорізноманіття, погіршення функціонування природних екосистем.

Забруднення ґрунтів часто пов'язане з використанням сирої нафти та продуктів її переробки, таких як бензин, дизельне паливо, мінеральні мастила. Відмінною особливістю нафтового забруднення від інших антропогенних впливів є те, що воно створює миттєве навантаження на компоненти екосистеми, викликаючи такі ж швидкі реакції, пов'язані з біодеградацією екосистеми [1]. Джерела потенційного забруднення ґрунту загалом можна розділити на дві групи:

– об'єкти, що становлять ризик довгострокового забруднення (нафтотранспортні трубопроводи, нафтопереробні та хімічні заводи, автозаправні станції, маршрути курсування наземного транспорту, обладнання для видобутку нафти тощо);

– аварійні розливи нафти, що дають максимальне одноразове навантаження на ґрунтові екосистеми. Однією з найпоширеніших причин розливів нафти є аварії під час видобутку, зберігання та транспортування сировини. Випадкові аварії можуть бути спричинені спробами крадіжки палива, стихійними лихами або локальними збройними конфліктами. Колишні і теперішні військові полігони, також є великою проблемою. Джерелом забруднення цих територій найчастіше є незахищені і технічно неконтрольовані сховища пального [2].

Випадкові аварійні розливи нафти потребують вжиття термінових заходів для їх ліквідації, залучення спеціальної техніки, технології, значної кількості працівників. Ліквідація цього виду забруднення, як правило, поділяється на два етапи: перший – збір нафти, що розлилася, другий – доочищення території від забруднювача, який залишився.

При поступовому багаторічному забрудненні ґрунту нафта і нафтопродукти потрапляють углиб, порушуючи сформовану екологічну рівновагу. У разі проникнення в глибші горизонти відбувається забруднення ґрунтових вод, а за певних умов – утворення техногенних скупчень вуглеводнів. Органогенна природа нафтового забруднення спричиняє зміну геохімічних, агрохімічних, фізико-хімічних характеристик, активності ґрунтового біоценозу, газового режиму ґрунтів. Такі зміни можуть бути незворотними і настільки серйозними, що іноді під сумнів ставиться перспектива повернення екосистеми до її стійкого колишнього стану [3]. У разі незначного порушення цих параметрів, порівняно з фоном, зростає ймовірність відновлення ґрунтами екологічної рівноваги шляхом самоочищення або застосування технологій ремедіації.

Актуальність дослідження. Для зниження несприятливих впливів нафтового забруднення на навколишнє середовище необхідне знання закономірностей біохімічної трансформації забруднюючих речовин у різних природних умовах, прогноз їхньої зміни в часі та в просторі, наукове обґрунтування заходів щодо знешкодження нафтозабруднених територій з урахуванням вимог екологічної безпеки.

Однак на сьогодні не існує універсального методу з відновлення порушеної екосистеми, оскільки забруднювачі мають різну структурну форму та різне джерело походження, тобто для їх усунення потрібні індивідуальні методи і технології з обробки та утилізації. У світовій практиці для очищення довкілля від вуглеводнів нафти використовують переважно механічні, термічні, фізико-хімічні та хімічні методи (спалювання, екскавація пластів ґрунту з подальшим складуванням, механічна ізоляція, високотемпературна екстракція, промивання, обробка електричним струмом, екстракція розчинниками, окисно-відновні реакції) [4]. Особливо небажаними є методи, пов'язані з переміщенням нафтозабруднених субстратів. До основних недоліків усіх перелічених вище методів належать їхня висока вартість, потреба в складному обладнанні, можливість забруднення субстратів промивними розчинами і знищення аборигенної біоти, що перешкоджає здійсненню процесів самоочищення.

З біологічної та екологічної точки зору основним недоліком механічних, хімічних і фізико-хімічних методів ліквідації нафтового забруднення ґрунтів є або пригнічення, або повне знищення біотичного потенціалу ґрунтової екосистеми. Для відновлення нафтозабруднених ґрунтів кращими є методи, засновані на використанні біотичного потенціалу біологічних об'єктів. Активізація діяльності мікрофлори, здатної до окислення вуглеводнів нафти, а також створення оптимальних умов для її життєдіяльності та зростання, збільшення метаболічного потенціалу субстратів дає змогу проводити спрямований і керований процес біодеградації нафти [5].

Тому дедалі більшої актуальності набувають біологічні методи, які є екологічно безпечними та відносно недорогими. При цьому біологічні методи дають змогу не тільки знизити початкову концентрацію вуглеводнів, а й активізувати метаболічний потенціал біологічних компонентів ґрунтових екосистем. Для прискорення процесу самоочищення ґрунтів від нафти використовуються всі природні резерви екосистеми, зокрема й біологічні. Біологічні методи очищення ґрунтів здатні доповнювати різні технології відновлення забруднених ґрунтів, а у певних ситуаціях їм немає аналогів [6].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Обмеженість земельних ресурсів ставить невідкладне завдання повернення у господарське використання порушених та деградованих ґрунтів. Організація Об'єднаних Націй розробила кілька глобальних ініціатив щодо покращення стану ґрунтів на планеті, в тому числі було оголошено загальносвітову програму дій «Десятиліття ООН з відновлення екосистем» (2021–2030 роки) [7]. Ця програма передбачає відновлення наземних, прибережних та морських екосистем, включаючи просування стійких методів управління ґрунтами.

Для України ця проблема ще більш загострилася в умовах воєнного стану, коли економічні, екологічні й соціальні питання продовольчого забезпечення України та світу значно ускладнилися. Одним із цих викликів є істотне посилення й до того актуальної проблеми деградації земель і ґрунтів, спричинене збройною агресією. Ґрунтові ресурси України зазнають масштабної руйнації, погіршення якості, посилення процесів деградації [8]. У ґрунти проникають важкі метали, залишки пального та хімікатів від бос-припасів та ракет [9].

Враховуючи всю серйозність та небезпеку ситуації, що склалася в Україні, вже зараз потрібна активізація наукових досліджень і пошук шляхів вирішення проблеми забруднення ґрунтів внаслідок війни, розробка комплексу заходів, впровадження яких дозволить мінімізувати наслідки воєнних дій у подальші роки. Це вимагатиме значних зусиль і це не буде універсальним рішенням [10]. Однією з можливостей для вилучення певних токсичних хімічних речовин, їх знешкодження та реабілітації пошкоджених війною ґрунтів є використання біологічних методів – біоремедіації та фіторемедіації.

Вирішення проблеми відновлення ґрунту за допомогою екологічно безпечних біологічних методів має вирішальне значення для забезпечення продовольчої безпеки та благополуччя майбутніх поколінь.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зіткнувшись із серйозними екологічними проблемами, пов'язаними із забрудненням ґрунту нафтою, дедалі більша увага приділяється розробці та впровадженню інноваційних технологій видалення нафти з ґрунту. Проблемам підвищення рівня екологічної безпеки паливно-енергетичного комплексу України присвячено праці таких науковців, як: Л.Я. Побережний, О.М. Мандрик, Я.М. Семчук, Б.О. Клюк, О.М. Адаменко, П.Г. Дригулич, О.І. Романюк. Питання розробки та впровадження сучасних методів та технологій ліквідації нафтових забруднень та відновлення ґрунтів висвітлені в роботах Н.М. Гринчишина, Л.З. Шевчик, О.І. Терек, Н.М. Джури та інших вчених.

В останні роки було проведено багато лабораторних і польових досліджень для розробки методів ремедіації, які можуть ефективно видаляти нафтове забруднення з ґрунту. Біологічні методи, які включають використання рослин і мікроорганізмів для видалення забруднень із навколишнього середовища, привернули значну увагу як найбільш перспективні методи очищення нафтових розливів. Незважаючи на те, що це вимагає більше часу, методи біоремедіації та фіторемедіації, завдяки їхньому екологічно безпечному підходу, економічній доцільності, відсутності вторинного забруднення та досить високій ефективності для відновлення забрудненого ґрунту, наразі широко відомі та мають практичне застосування [11, 12, 13].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Вибір методу очищення нафтозабруднених ґрунтів повинен проводитися з урахуванням особливостей самого забруднення (типу нафти, давності, площі забруднення, рельєфу), а також з урахуванням конкретних ґрунтово-кліматичних умов регіону. Тому виявлення ключових чинників та механізмів, що впливають на швидкість деградації забруднювачів, для подальшої розробки високоефективної екологічно безпечної технології відновлення ґрунтів є проблемою, яка потребує подальших досліджень.

Новизна дослідження полягає в визначенні основних чинників, що мають значний вплив на обґрунтування та ефективність технологічного процесу біоремедіації ґрунтів, забруднених нафтопродуктами.

Методологічне та загальнонаукове значення. Нафта являє собою складну багатоконпонентну систему, що складається в основному з вуглеводнів різної будови, таких як алкани, циклоалкани, ароматичні сполуки (бензол, толуол, етилбензол, ксилол), поліциклічні ароматичні сполуки (нафталін, фенантрен, антрацен, бенз(а)пірен), смоли, асфальтени, азотовмісні сполуки. Конкретний склад залежить від геологічного віку, розташування та глибини нафтового родовища. Після переробки сирової нафти одержувані продукти набувають нових фізико-хімічних властивостей, що збільшує їх складність і може перешкоджати їх біорозкладанню [14].

Важливою характеристикою нафти є співвідношення в ній легких і важких фракцій. Підвищену токсичність для мешканців ґрунту становлять легкі фракції нафти, але вплив їх короткочасний. Легкі фракції швидко розкладаються мікробними деструкторами або мігрують із ґрунту. А важкі фракції нафти є малорухливими, тому створюються сталі осередки забруднення. Компоненти нафти, такі як смоли, асфальтени, парафіни, закупорюють пори та канали ґрунту і зв'язують ґрунтові частинки, граючи роль цементу [15].

ґрунт покривається нафтовою плівкою і забарвлення ґрунтового профілю змінюється на сіре та темно-коричневе. Зміна кольору призводить до зниження світловідбиваючих властивостей ґрунту, що сприяє більш ефективному прогріву таких ґрунтів. Частинки ґрунту, покриті гідрофобними плівками високомолекулярних компонентів нафти, втрачають здатність поглинати та утримувати вологу. Це призводить до значної втрати провідності та ємності води. В результаті сильно підвищеної гідрофобності, верхні забруднені шари висихають, а чистіші нижні шари страждають від надмірної вологості, що призводить до неправильних повітряно-водних умов і розвитку анаеробних процесів [16].

У більшості проведених досліджень виявлено, що під впливом важких фракцій нафти у багатьох рослин проявляються різні виражені анома-

лії, як у біологічних, так і в морфологічних змінах. Прикладом таких ознак рослин можуть бути, як карликовість, викривлення стебел, скручування листя. Поясненнями таких змін є накопичення в клітинах рослин поліциклічних ароматичних вуглеводнів, що мають канцерогенні та мутаційні властивості [17].

Таким чином, забруднення вуглеводнями призводить до погіршення функціонування екосистеми, її живих і неживих компонентів. Ґрунти вважаються забрудненими нафтою та нафтопродуктами, якщо їх концентрація досягає рівня, при якому: починається пригнічення або деградація рослинного покриву; скорочується якісний та кількісний склад ґрунтових мікроорганізмів та безхребетних тварин; відбувається вимивання нафти та нафтопродуктів із ґрунтів у підземні або поверхневі води. Деградація поверхневого біологічно активного шару ґрунту може мати декілька ступенів, що наведені в табл. 1.

При низькому та помірному ступені деградації відновлення властивостей ґрунтів може бути проведено шляхом активізації процесів самоочищення агротехнічними прийомами (поверхневою обробкою та глибоким розпушуванням, внесенням добрив тощо). При високому та дуже високому ступені деградації ґрунтів нафтове забруднення може бути ліквідовано шляхом проведення спеціальних заходів, що сприяють створенню аеробних умов та активізації вуглеводневих процесів. Отже, ремедіації підлягають ґрунти, забруднені нафтовими речовинами настільки, що вони обмежують вегетацію рослин або погіршують їх харчові чи технологічні якості [19].

Заходи по відновленню ґрунтового середовища, тобто його ремедіації, полягають у видаленні забруднюючих речовин і поновленні первісних фізико-хімічних та біологічних властивостей ґрунту. Тоді як проблему нейтралізації екологічно шкідливих забруднювачів можна вирішити за допомогою різноманітних фізико-хімічних методів, повна реконструкція умов природного середовища досягається лише за допомогою біологічних технологій.

Виклад основного матеріалу дослідження. Значну роль у процесах очищення ґрунтів від нафти та нафтопродуктів грають мікроорганізми. Оскільки представники мікрофлори мають високу метабо-

лічну активність, то, очевидно, що дана форма життя здатна знешкоджувати забруднення. Тому нині дедалі більше уваги приділяється дослідженню методів ремедіації, заснованих на застосуванні чистих чи змішаних культур мікроорганізмів.

Біоремедіація – це процес, в результаті якого нафтопродукти розкладаються мікроорганізмами за допомогою ферментативних реакцій, що перетворюють їх на вуглекислий газ, біомасу та водорозчинні сполуки [20]. Порівняно з іншими живими організмами, мікроорганізми можуть успішно розвиватися в широкому діапазоні природно-техногенних умов та мають унікальну здатність адаптуватися до нових умов навколишнього середовища.

Найважливішою умовою старту процесу біоремедіації є ліквідація поверхневого нафтового бар'єру, а також зниження загальної концентрації нафти в ґрунті до рівня, який забезпечує життєдіяльність живих організмів у ґрунті. На ділянках із застарілими забрудненнями більш висока ймовірність адаптації біоти до поллютантів, появи організмів, стійких до них, здатних трансформувати та розкласти їх. Тому при застарілих забрудненнях доцільні методи біологічної очистки, засновані на стимулюванні активності аборигенних мікроорганізмів-деструкторів.

Підходи до біоремедіації зазвичай класифікуються як *in situ* та *ex situ*. Біоремедіація *in situ* передбачає обробку забрудненого матеріалу на місці, тоді як *ex situ* передбачає видалення забрудненого матеріалу для обробки в іншому місці в контрольованих умовах. Крім того, швидкість біодеградації та постійність результатів процесу відрізняються між методами біоремедіації *in situ* та *ex situ*.

Методам *in situ* віддають перевагу, коли неможливо видалити забруднений ґрунт, наприклад, на ділянках, призначених для будівництва, на ділянках протипожежних насипів, доріг, локальних провалів під трубопроводами і установок, забруднення великих територій тощо. Використання способів очищення *in situ* найбільш ефективно, якщо забруднення розчинне у воді та біодоступне, і ґрунти мають високу проникність та гомогенність. У ряді випадків методи *in situ* дозволяють продовжувати використання території, що містить забруднені зони безпосередньо в ході ремедіаційних заходів [21]. Методи

Таблиця 1

Ступінь деградації біологічно активного шару ґрунту, забрудненого нафтопродуктами [18]

Ступінь деградації	Процеси, що відбуваються з рослинністю
Низький	Відсутність негативного впливу на природну рослинність з можливим вмістом вуглеводнів у поверхневому шарі ґрунту.
Середній	Точкове відмирання трав'янистої рослинності, явне ослаблення росту та розвитку культур.
Високий	Часткове відмирання трав'янистої рослинності, зниження врожайності приблизно на 50%.
Дуже високий	Зникнення або повне зникнення трав'янистої рослинності, неможливість вегетації сільськогосподарських культур без застосування меліоративних заходів

in situ складно застосовувати для очищення ґрунтів від біологічно стійких, нелетких та нерозчинних сполук, якими є, наприклад, бензпірени, важкі метали та радіонукліди. Ліквідація забруднення за допомогою цього методу вимагає знання геологічної структури ґрунту, розподілу забруднення та напрямку руху ґрунтових вод.

Методи *ex situ* використовуються для свіжих забруднень, які характеризуються відносно високою концентрацією, а також якщо об'єм або територія забрудненої зони невеликі. Такий підхід перешкоджає поширенню забруднення, і перш за все, його проникненню в ґрунтові води [22]. Ці методи забезпечують можливість створення оптимальних умов для очищення та прискорюють ремедіацію, проте вимагають додаткових витрат на збирання, складування та обробку матеріалу.

Технології біологічного очищення *ex situ* включають: біовентилювання, обробіток ґрунту в біореакторах, компостування. Біотехнології, які можуть бути проведені як *ex situ* так *in situ*, включають біостимуляцію та біоаугментацію.

Біостимуляція є однією з основних стратегій біоремедіації для знешкодження забрудненого нафтою ґрунту, при якій за допомогою регулювання умов довкілля (температура, вологість, рН, окисно-відновний потенціал, аерація, мінеральне живлення) посилюється ріст та метаболічна активність місцевих популяцій мікроорганізмів, які розкладають нафту [23].

Біоаугментація – стратегія біоремедіації, при якій застосовується інокуляція екзогенних мікроорганізмів у забруднені ґрунти для розкладання цільових забруднювачів [24]. Інокульований мікроорганізм може бути одним штамом або консорціумом мікробних штамів з різною здатністю до функціонального розкладання.

Ефективність використання тих чи інших методів ремедіації визначається насамперед цілями та завданнями очищення та залежить від локальних чинників, таких як, ґрунтово-кліматичні умови, фізико-хімічні властивості забрудненого середовища, характеру та рівня забруднень, рівня технічних та екологічних вимог до ремедіаційних робіт (рис. 1).



Рис. 1. Групи чинників, які мають вплив на процеси біологічного розкладання забруднюючих речовин у ґрунті

Технологія біоремедіації коректуються та модифікуються в залежності від індивідуальних особливостей місця забруднення та властивостей забруднювача, тому перед початком біологічного очищення важливо оцінити біологічні та фізико-хімічні чинники, які мають значний вплив на успішне проходження процесів очищення ґрунтів та визначити комплекс заходів для підвищення ефективності технології відновлення ґрунту. Ці чинники особливо важливі у випадку біоремедіації *in situ*. Деякі з цих чинників можна значною мірою оптимізувати та врегулювати, що буде сприяти повному використанню потенціалу біодеградації забруднень (табл. 2).

Щільність популяції мікроорганізмів, що розкладають вуглеводні, є ключовим чинником деградації нафтозабруднених ґрунтів. Для успішної біодеградації вуглеводнів кількість ґрунтових бактерій зазвичай знаходиться в межах 10^4 - 10^7 КУО на грам ґрунту, тоді як менше 10^3 КУО на грам ґрунту має менший потенціал біодеградації [33]. Активно зростаюча популяція бактерій, що розкладають вуглеводні, значно збільшує швидкість деструкції. Тому для ефективного процесу біоремедіації важливо визначити кількість потенційних мікроорганізмів на забруднених ділянках.

Мікроорганізми-деструктори нафти, що часто використовуються як активні члени біоремедіацій-

Таблиця 2

Характеристика чинників, що впливають на ефективність процесів біоремедіації ґрунтів, забруднених нафтопродуктами

Чинник	Вплив на процес біоремедіації	Заходи для підвищення ефективності біоремедіації
1	2	3
Мікробні співтовариства	Вуглеводні розкладаються різними видами гетеротрофних мікроорганізмів в аеробних та анаеробних умовах. Жоден із видів бактерій у природних умовах не може розкласти всі компоненти сирої нафти. Повне розкладання нафти залежить від комплексних зв'язків між різними видами мікроорганізмів. Для синергетичного розкладання складних сумішей забруднювачів потрібен бактеріальний консорціум (суміш потенційних бактерій) із широкими ферментативними здібностями [25].	Поєднання в одному бактеріальному штамі або в синтетичному бактеріальному консорціумі, різних деградаційних здібностей.
Температура	Забруднювачі довше зберігаються при низькій температурі. При низьких температурах в'язкість нафти збільшується, а летючість токсичних низькомолекулярних вуглеводнів зменшується, що затримує початок біодеградації. Підвищена температура збільшує розчинність вуглеводневих забруднювачів, зменшує в'язкість і переводить довголанцюгові n-алкани з твердої фази у водну. Найвищі швидкості деградації зазвичай відбуваються в діапазоні 30-40°C у ґрунтовому середовищі. Високі температури і солоність перешкоджають розвитку мікроорганізмів [27].	Контроль температури в біореакторі або використання процесів компостування при проведенні ремедіації <i>ex situ</i> .
Вологість	Вода забезпечує розчинення вуглеводнів і зменшує адсорбцію погано розчинних поліциклічних ароматичних вуглеводнів на поверхні мінеральних частинок ґрунту. Оптимальний діапазон вологість поверхні ґрунту для біологічного розкладання вуглеводнів – 50-80 % повної вологоємності ґрунту.	Зволоження ґрунту.
pH ґрунту	Нафтопродукти можуть спричинити зниження pH ґрунту (кислоти утворюються при розпаді вуглеводнів). Мікроорганізми та ферменти проявляють pH-залежну активність. Оптимальне значення pH знаходиться в межах від 6 до 8.	Вапнування ґрунту для підвищення pH.
Доступність кисню	Наявність кисню в ґрунті може бути обмежена внаслідок поганої проникності ґрунту. Нафтопродукти часто викликають у ґрунті великі безкисневі зони. В умовах зниженого або відсутнього кисню частково переривається метаболізм аеробних мікроорганізмів, а також знижується біодоступність та ефективність деградації полуютанту.	Механічна обробка ґрунту (перемішування, розпушування, оранка, боронування, дискування).
Поживні речовини	При нестачі поживних речовин у мікроорганізмів спостерігається різке зниження вуглеводнеокислюючої активності, що призводить до зупинки процесу біоремедіації. Нафтопродукти викликають збільшення співвідношення вуглецю до азоту, що несприятливо для метаболізму бактерій. Для ефективного деградації вуглеводнів необхідно регулювати співвідношення вуглець/азот/фосфор (C/N/P) від 100:10:1 до 100:20:1 [28].	Збагачення ґрунту мінеральними або органічними добривами для підтримання оптимального вмісту азоту та фосфору.

Закінчення табл. 2

1	2	3
Органічна речовина	Органічна речовина є основним компонентом ґрунту, який сорбує та десорбує гідрофобні органічні забруднювачі. У деяких випадках можуть формуватись дуже стійкі комбінації забруднювачів з органічними речовинами ґрунту. Внаслідок цього молекули забруднювача дуже повільно надходять у водну фазу ґрунту і стають недоступними для мікроорганізмів. Тому вміст органічної речовини обернено пропорційний швидкості біологічного розкладання вуглеводнів [30].	Застосування методів іммобілізації забруднень у ґрунті. Ефективними є методи механічного фракціонування.
Окисно-відновна реакція	Мікроорганізми використовують вуглеводневі забруднювачі як джерело енергії, каталізуючи перенесення електронів від донорів електронів до акцепторів електронів під час аеробної або анаеробної біоремедіації. Це явище залежить від окисно-відновного потенціалу, який є важливим для управління окисленням вуглеводнів, що є сприятливими донорами електронів для росту бактерій. В аеробних умовах кисень діє як кінцевий акцептор електронів, а також важливий для ферментативного перетворення вуглеводнів. В анаеробних умовах речовини з високим відновним потенціалом (перхлорати, хлорати) є ідеальними акцепторами електронів. Відносне переважання акцепторів електронів є важливим чинником, що впливає на швидкість біодеградації [29].	Внесення в ґрунт акцепторів електронів (кисень, нітрат, сульфат, залізо (III), марганець, хлорат, перхлорат тощо).
Здатність вуглеводнів до біологічного розкладання	Забруднювачі як субстрати повинні бути доступними або для мікроорганізмів, або для їхніх позаклітинних ферментів для метаболізму. За здатністю до біологічного розкладання вуглеводні можна ранжувати наступним чином: лінійні алкани > розгалужені алкани > моноароматичні вуглеводні > циклічні алкани > поліциклічні ароматичні вуглеводні > асфальтени [31].	Використання біосурфактантів для збільшення десорбції та розчинності важких вуглеводнів.
Гранулометричний склад ґрунту	Розмір частинок ґрунту визначає проникність ґрунту та швидкість біодеградації вуглеводнів. Дрібні частинки (глинисті ґрунти з невеликими проміжками) утримують вуглеводні на поверхні ґрунту та знижують доступність поживних речовин та кисню. Великі частинки ґрунту (піщаний ґрунт з великими проміжками) відводять забруднювачі через ґрунт у ненасичену зону [26]. Піщані ґрунти з низьким вмістом органічного вуглецю мають менше різноманіття мікроорганізмів. Все це негативно позначається на швидкості деградації вуглеводнів.	Додаткова обробка ґрунтів для підвищення їх проникності.
Концентрація забруднюючої речовини	Надзвичайно високі концентрації надають гострого токсичного впливу на мікроорганізми. Концентрація вуглеводнів >5% знижує активність мікробної деградації та може порушувати співвідношення C:N:P і доступність кисню [32]. Надзвичайно низькі концентрації вуглеводнів обмежують біодеградацію, спричиняють низьке надходження або недоступність вуглецю для підтримки мікробного росту.	Потрібно визначитись, чи доречна біоремедіація.
Супутній забруднювач або наявність інгібіторів	Може спричинити токсичний вплив на мікроорганізми та значно знижувати ефективність процесу біоремедіації.	Вибір оптимальної стратегії ремедіації.

них консорціумів, є звичайними представниками біоценозів водойм і ґрунтів забруднених нафтою, що належать в основному до родів:

- бактерій: *Micrococcus*, *Brevibacterium*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Nocardia*, *Coryne*;
- грибів: *Aspergillus*, *Penicillium*, *Streptomyces*, *Actinomicor*;
- дріжджів: *Candida*, *Torulopsis*, *Cryptococcus* тощо [34].

Видове розмаїття мікроорганізмів пояснюється тим, що такий субстрат, як нафта, є складною сумішшю широкого ряду вуглеводнів з елементами сірки, кисню, азоту, несприятливий для зростання

монокультур. Повне розкладання нафти залежить від комплексних зв'язків між різними видами мікроорганізмів. Деякі з них можуть розкласти широку гаму речовин, тоді як інші здатні утилізувати лише один вид вуглеводнів і використовувати його для свого зростання при одночасному окисненні іншого вуглеводню [35]. При цьому в спільнотах мікроорганізмів співтовариство та конкуренція є життєво важливою умовою для виживання та стабільності екосистеми. Мікроорганізми, що розкладають вуглеводні, існують у співпраці (з синергетичним ефектом) та/або конкуренції (з антагоністичним ефектом) за своє виживання в середовищі. Однак конкурен-

ція як міжвидова (між бактеріями та грибами), так і внутрішньовидова (між самими видами бактерій) є чинником, що обмежує ефективність біодеградації. Крім того, деякі види мікроорганізмів, що розкладають вуглеводні, також виділяють метаболіти, які пригнічують ріст та розвиток інших видів бактерій, що розкладають вуглеводні.

Основними критеріями відбору штамів, що використовуються для біодеградації нафтопродуктів, є: здатність штаму швидко адаптуватися до росту в забрудненому середовищі; швидкість асиміляції субстрату; нетоксичні продукти біологічного розкладання.

Забруднені ґрунти, можуть бути малодоступними для процесів біодеградації мікроорганізмами, коли важкі вуглеводні міцно з'єднуються з ґрунтовими частинками, утворюючи гідрофобні плівки. З метою підвищення біодоступності вуглеводнів використовують поверхнево-активні речовини (сурфактанти) [36]. Хімічно синтезовані поверхнево-активні речовини використовуються для поліпшення розчинності вуглеводнів шляхом емульгування. Однак синтетичні сурфактанти є екологічно небезпечними речовинами з високим ступенем токсичності, які накопичуються в ґрунтових біоценозах. У зв'язку з цим перспективним є використання біосурфактантів, отриманих з природних джерел (рослин або мікроорганізмів), які мають низьку токсичність, стійку активність в екстремальних умовах і більше підходять для розкладання вуглеводнів.

Мікроорганізми продукують ці поверхнево-активні біологічні молекули позаклітинно, щоб емульгувати та легко поглинати вуглеводневі забруднювачі. Існує багато видів біосурфактантів, таких як гліколіпіди (рамноліпіди, емульсії, ліпосани, софороліпіди та трегалоліпіди), ліпопептиди та ліпопротеїни, сурфактин, ліхенізин, жирні кислоти, полімерні біосурфактанти, фосфоліпіди. Вони виготовляються з різних мікроорганізмів, таких як *Bacillus sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Aeromonas sp.*, *Enterobacter sp.*, *Burkholderia sp.*, *Acinetobacter sp.*, *Micrococcus sp.*, *Rhodococcus sp.* і деякі види галофілів [37].

Біосурфактант посилює деградацію вуглеводнів багатьма способами, у тому числі шляхом солубілізації та десорбції забруднюючих речовин, а також зміни властивостей поверхні клітин бактерій. Біосурфактанти здатні знижувати поверхневий натяг

і міжфазний натяг на межі вода/повітря або вода/нафта. Таким чином, площа поверхні вуглеводневого субстрату збільшується, що полегшує емульгування, і всі ці явища роблять субстрат легко доступним для поглинання та метаболізму [38]. Загалом біосурфактанти здатні підвищувати розчинність, рухливість, дисперсію, біодоступність та здатність до розкладання вуглеводневих забруднювачів. Тому для ефективної біоремедіації вуглеводнів крім оптимізації параметрів росту бактерій необхідно враховувати здатність мікроорганізмів продукувати відповідні біосурфактанти.

Головні висновки. Головний раціональний принцип відновлення забрудненої екосистеми – це створення оптимальних умов, в яких екосистема буде сама прагнути до відновлення функцій складових компонентів і зв'язків між ними.

Таким чином, основу сучасних біологічних методів очищення становить використання біотичного потенціалу ґрунтової біоти. Головною проблемою розглянутих біологічних методів є необхідність забезпечення відповідних екологічних умов для життєдіяльності мікрофлори за рахунок оптимізації чинників навколишнього середовища.

В результаті важливо розуміти роль біологічних чинників (кількість, тип і склад популяцій мікроорганізмів, форми симбіотичних взаємин тощо) та фізико-хімічних чинників (температура, рН ґрунту, аерація, окисно-відновний потенціал, поживні речовини у ґрунті, фізико-хімічні властивості забруднювачів, їх здатність до біорозкладання) для ефективного видалення вуглеводнів. Тому виникає необхідність у проведенні попереднього обстеження забрудненої ділянки для уточнення технологічних режимів з урахуванням зазначених чинників для забезпечення успішного росту та метаболізму мікроорганізмів.

Крім того, розробка нових біосурфактантів, що покращують біодоступність вуглеводнів, є перспективною стратегією подолання бар'єру на шляху відновлення ґрунтів, забруднених нафтопродуктами. Майбутні дослідження також мають бути спрямовані на створення консорціумів мікроорганізмів, які здатні впливати на широкий спектр вуглеводнів, включаючи ароматичні поліциклічні вуглеводні, смоли та асфальтени. Це відповідним чином буде сприяти підвищенню ефективності та прискоренню процесу біоремедіації.

Література

1. Жолобак Г.М., Дугін С.С., Сибірцева О.М., Дорофей Є.М. Дослідження нафтозабрудненого ґрунту і рослинного покриву, вирощеного на ньому, методом гіперспектрального дистанційного зондування із застосуванням спектрорадіометра ASD FieldSpec@3FR. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2019. № 19. С. 12–29.
2. Nowak J. Bioremediacja gleb z ropy i jej produktów. *Biotechnologia*, 2008, № 1 (80). P. 97–108.
3. Patel V., Shah K. Petroleum hydrocarbon pollution and its biodegradation. *International Journal of Chemtech Applications*, 2014. № 2. P. 63–80.
4. Гринчишин Н.М. Реабілітація ґрунтів, забруднених аварійними виливами нафтопродуктів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Вип. 22.7. С. 43-49.
5. Біологічні методи охорони навколишнього середовища від забруднення нафтопродуктами: монографія / Шаповров В. П., Шестопапов О. В., Мамедова О. О., Бахарєва Г. Ю. та ін. Харків: НТУ «ХП», 2015. 216 с.

6. Chen S., Zhong M. Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil. *Environmental Chemistry and Recent Pollution Control Approaches*, 2019. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/70249>.
7. Soil pollution a risk to our health and food security. United Nations Environment Programme (UNEP), 2020. URL: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/soil-pollution-risk-our-health-and-food-security>
8. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу / О. Голубцов, Л. Сорокіна, А. Сплодитель, С. Чумаченко. Київ: ГО «Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. 32 с.
9. The toxic legacy of the Ukraine war. URL: <https://www.bbc.com/future/article/20230221-the-toxic-legacy-of-the-ukraine-war>.
10. Корогод О. Врятувати українську землю. Як війна впливає на стан ґрунтів і що чекає на органічне виробництво. Економічна правда. 2023. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/05/11/700021/>
11. Azubuike CC, Chikere CB, Okpokwasili GC. Bioremediation techniques-classification based on site of application: Principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2016. 32. 180.
12. Michael-Igolima U., Abbey S.J., Ifelebuegu A.O. A systematic review on the effectiveness of remediation methods for oil contaminated soils. *Environmental Advances*. 2022. № 9. 100319.
13. Lim M.W., Lau E.V., Poh P.E. A comprehensive guide of remediation technologies for oil contaminated soil – Present works and future directions. *Marine Pollution Bulletin*. 2016. № 109. P. 14–45.
14. Шевчик-Костюк Л.З., Романюк О.І., Ощাপовський І.В. Особливості забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами: огляд. *Acta Biologica Ukrainica*. 2022. № 1. С. 32–40.
15. Процько Я. І. Вплив нафти та нафтопродуктів на ґрунтовий покрив. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2010. № 2. С. 189–191.
16. Rushton DG, Ghaly AE, Martinell K. Assessment of Canadian regulations and remediation methods for diesel oil contaminated soils. *American Journal of Applied Sciences*. 2007. № 4. P. 465–578.
17. Pala D.M., de Carvalho D.D., Pinto J.C., Sant'Anna Jr G.L. A suitable model to describe bioremediation of a petroleum contaminated soil. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 2006. Vol. 58. P. 254–260.
18. Gałazka A. Zanieczyszczenia gleb substancjami ropopochodnymi z uwzględnieniem biologicznych metod ich oczyszczenia. *Kosmos. Problemy nauk biologicznych*. 2015. T.64. № 1(306). S. 145–164.
19. Atlas R. M. Petroleum biodegradation and oil spill bioremediation. *Marine Pollution Bulletin*. 1995. № 31, P. 178–182.
20. Hoff R.Z. Bioremediation: an overview of its development and use for oil spill cleanup. *Marine Pollution Bulletin*. 1993. Vol. 26. P. 476–481.
21. Aislabe J., Saul D., Foght J. 2006 Bioremediation of hydrocarbon-contaminated polar soils *Extremophiles*. 2006. Vol. 10. P. 171–179.
22. Cerqueira V.S., Peralba M.R., Camargo F.A.O., Bento F.M. Comparison of bioremediation strategies for soil impacted with petrochemical oily sludge. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2014. Vol. 95. P. 338–345.
23. Shahi A., Aydin S., Ince B., Ince O. Evaluation of microbial population and functional genes during the bioremediation of petroleum-contaminated soil as an effective monitoring approach. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016. Vol. 125. P. 153–160.
24. Ruffini Castiglione M., Giorgetti L., Becarelli S., Siracusa G., Lorenzi R., Di Gregorio S. Polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated soils: Bioaugmentation of autochthonous bacteria and toxicological assessment of the bioremediation process by means of *Vicia faba* L. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2016. Vol. 23. P. 7930–7941.
25. Diaz E. Bacterial degradation of aromatic pollutants: a paradigm of metabolic versatility. *International Microbiology*. 2004. Vol. 7. P. 173–180.
26. Scherr K., Aichberger H., Braun R., Loibner A.P. Influence of soil fractions on microbial degradation behavior of mineral hydrocarbons. *European Journal of Soil Biology*. 2007. Vol. 43. P. 341–350.
27. Yuniati M.D. Bioremediation of petroleum-contaminated soil: A Review. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. 2018. 118 012063.
28. Kebede G. Tafese T., Abda E.M., Kamaraj M., Fassil Assefa F. Factors Influencing the Bacterial Bioremediation of Hydrocarbon Contaminants in the Soil: Mechanisms and Impacts. *Journal of Chemistry*. 2021. Vol. 2021. 9823362.
29. Weelink S.A.B., van Eekert M.H.A., Stams A.J.M. Degradation of BTEX by anaerobic bacteria: physiology and application. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 2010. Vol. 9. № 4. P. 359–385.
30. Varjani S.J., Upasani V.N. A new look on factors affecting microbial degradation of petroleum hydrocarbon pollutants. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2017. Vol.120. P. 71–83.
31. Leahy J.H., Colwell R. Microbial degradation of hydrocarbons in the environment. *Microbiological Reviews*. 1990. Vol. 54(3). P. 305–315.
32. Sonawdekar S. Bioremediation: a boon to hydrocarbon degradation. *International Journal of Environmental Sciences*. 2012. Vol. 2. № 4. P. 2408–2424.
33. Sihag S., Pathak H., Jaroli D. P. Factors affecting the rate of biodegradation of polyaromatic hydrocarbons. *International Journal of Pure and Applied Bioscience*. 2014. Vol. 2. № 3. P. 185–202.
34. Lv Y., Bao J., Zhu L. A comprehensive review of recent and perspective technologies and challenges for the remediation of oil-contaminated sites. *Energy Reports*. 2022. № 8. P. 7976–7988.
35. Maliji D., Olama Z., Holail H., Environmental studies on the microbial degradation of oil hydrocarbons and its application in Lebanese oil polluted coastal and marine ecosystem. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2013. Vol. 2. № 6. P. 1–18.
36. Ossai C., Ahmed A., Hassan A., Hamid F.S. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: a review. *Environmental Technology and Innovation*, 2020. Vol. 17. P. 1–42.
37. Ukiwe L.N., Egereonu U.U., Njoku P.C., Nwoko C.I.A., Allinor J.I. Polycyclic aromatic hydrocarbons degradation techniques. *International Journal of Chemistry*. 2013. Vol. 5. № 4. P. 43–55.
38. Das N., Chandran P. Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. *Biotechnology Research International*. 2011. Vol. 2011. P. 1–13.