УДК 579.64:631.42:631.95 DOI: https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2026.359708

МОДЕЛЮВАННЯ БІОРЕМЕДІАЦІЙНОГО ВІДНОВЛЕННЯ БІОГЕННОСТІ ЧОРНОЗЕМУ ПІВДЕННОГО ЗА МІЛІТАРНОГО ВПЛИВУ

Т.М. Мельничук, С.В. Мідик, Ю.Ю. Вішован, О.П. Самкова, Р.П. Богданович, М.І. Феделеш-Гладинець

Національний університет біоресурсів і природокористування України (м. Київ, Україна)
e-mail: melnychuktm1962@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0465-9457
e-mail: svit.mid@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2682-2884
e-mail: anatomi1991@gmail.com; ORCID: 0000-0003-1128-593X
e-mail: samkova_op@ukr.net; ORCID: 0000-0002-2132-3357
e-mail: rbogdanovych@ukr.net; ORCID: 0009-0008-5457-3353
e-mail: fedelesh@nubip.edu.ua; ORCID: 0000-0001-7885-6392

Поглиблення проблеми деградації ґрунтів через воєнні дії на території нашої держави потребує пошуку шляхів прискореного їх відновлення. Передусім від пошкодження потерпає ґрунтова мікробіота, зменшується її чисельність та різноманіття, що негативно впливає на стан та функції ґрунтів. У статті розглянуто результати наукових досліджень показників вмісту пестицидних сполук, поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ) та родючості ґрунтів чорнозему південного Снігурівської громади Миколаївської обл. за впливу ракетного влучання в склад із агрохімікатами, а також шляхів відновлення його біогенності. Модельний дослід проведений у теплиці Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу НУБіП України зі зразками ґрунту з шару 0–20 см у посудинах об'ємом 2,5 дм^3. Встановлено, що у зразках ґрунту, відібраних поряд із зоною ракетного влучання (контроль) була більша концентрація вмісту усіх компонентів ПАВ, ніж у забрудненому ґрунті. Ця закономірність вказує на проблему забруднення ґрунтів, що знаходяться у межах впливу воєнних дій. У забрудненому ґрунті спостерігали залишки пестицидів: метрибузин, який в 3,8 раза перевищував гранично допустиму концентрацію (ГДК) — 0,2 мг/кг, та метолахлор, уміст якого в 1,6 раза був вищим ГДК — 0,02 мг/кг. У пошкодженому ґрунті відмічено зниження щільності популяцій мікроорганізмів залежно від еколого-трофічної та таксономічної групи від 2 до 7,6 раза відносно контролю. Біомаса ґрунтових мікроорганізмів зазнала зниження за мілітарного впливу в 9,0 разів, порівняно з контролем. Застосування відновлювального комплексу, що включав органічне добриво Паросток та бактеріально-метаболічний препарат Ультрачист, сприяло зростанню показників біогенності ґрунту, зокрема, його біомаси в 1,8 раза, порівняно з пошкодженим ґрунтом. Запропонований відновлювальний комплекс може розглядатися як перспективний засіб біоаугментації на початкових етапах ремедіації ґрунтів за їх багатокомпонентного забруднення.

Ключові слова: *ґрунтові мікроорганізми, деградація, токсичність, фітостимуляція, біоаугментація, відновлювальний комплекс.*

ВСТУП

Деградація ґрунтів є проблемою світового масштабу, оскільки представляє загрозу для біорізноманіття, продовольчої безпеки та сталого розвитку екосистем. Воєнні дії, що активізувались останніми роками на території нашої держави, поглибили цю проблему. Втрачають свою цінність природні ландшафти, складаються небезпечні умови для існування представників флори і фауни та життя людей. Площі деградованих ґрунтів за мілітарного впливу зростають з кожним роком. Ґрунти зазнають істотних змін на рівні фізичних, хімічних і біологічних властивостей, що несе за со-

© Т.М. Мельничук, С.В. Мідик, Ю.Ю. Вішован, О.П. Самкова, Р.П. Богданович, М.І. Феделеш-Гладинець, 2026

бою втрати їх родючості та унеможливлює одержання якісної продукції.

Пошук шляхів прискореного відновлення порушених ґрунтів є одним із пріоритетних напрямів наукових досліджень. Біоремедіаційні стратегії поновлення ґрунтів, що зазнали хімічного забруднення, включають різновиди фіторемедіації, яка стримує міграцію забруднювача осадженням (фітостабілізація) чи поглинанням (фітоакумуляція), або стимулює мікробну активність у ризосфері для розкладання полютанта (фітостимуляція), а також мікробну біоремедіацію. Остання базується на використанні мікроорганізмів для деградації агентів забруднення, яка поділяється за напрямами: створення оптимальних умов через додавання поживних речовин і вологи (біостимуляція) та внесення в ґрунт для цільового розкладання полютантів селекціонованих мікроорганізмів-деструкторів (біоагументація).

Мета роботи — дослідити елементи біоремедіаційних стратегій відновлення біогенності чорнозему південного, що зазнав забруднення внаслідок ракетного влучання в склад агрохімікатів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Воєнні дії після повномасштабного вторгнення спричинили значні руйнування природного середовища, що позначилося і на властивостях ґрунтового покриву. С.А. Балюк із колегами [1; 2] вказують на те, що вже понад 5 млн га лише чорноземів України зазнали деградації внаслідок мілітарного впливу. Потрапляння різної природи хімічних речовин призводить до довготривалого погіршення якості ґрунту та втрати його продуктивних властивостей, як зазначено в роботах О. Голубцова і J.P. Costa зі співавт. [3; 4].

Одним із найнебезпечніших наслідків війни є забруднення ґрунтів продуктами вибухів, паливно-мастильними матеріалами та металами. Вибухові речовини після детонації частково залишаються в ґрунті у вигляді токсичних залишків, що повільно розкладаються. Ці сполуки здатні інгібувати ферментні системи мікроорганізмів, знижуючи інтенсивність дихання та мінералізації органічних сполук [3].

Поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ) є небезпечними для навколишнього середовища, оскільки володіють канцерогенними, мутагенними та тератогенними властивостями. Їх появу викликають термічні процеси, пов'язані зі спалюванням органічної сировини. Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA) було визначено список із 16-ти ПАВ (нафтален, ацетанафтен, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пірен, бенз(a)антрацен, хризен, бенз(b)флуорантен, бенз(k)флуорантен, бенз(a)пірен, дибенз(a,h)антрацен, бензо(g,h,i)перилен, індено(1,2,3-cd)пірен) пріоритетними забруднювачами з точки зору їх токсичності [5]. Цей перелік став основою для розробки аналітичних методів для визначення ПАВ у навколишньому середовищі. В цьому списку найтоксичнішою сполукою є бенз(a)пірен, тому за його вмістом в різних країнах контролюється стан компонентів екосистем та безпека харчової продукції. ГДК бенз(a)пірену для ґрунту в Україні регламентується на рівні 0,02 мг/кг [6].

На рівень накопичення та утримання ПАВ у ґрунтах впливає кілька чинників, включаючи pH, ступінь розкладання органного розчину та мінеральну фракцію, кожен різною мірою. Питання щодо поведінки та накопичення ПАВ у різних типах ґрунтів недостатньо вивчене, що підкреслює необхідність подальших досліджень. На це вказують і автори на чолі з S. Dołęgowska [7].

L. Helian зі співавт. [8] дослідили взаємозв'язок концентрацій ПАВ із вмістом загального органічного вуглецю, сажі та інших форм органічного вуглецю і показали, що існує позитивна кореляція між концентраціями ПАВ та вмістом органічного вуглецю в осадах. Встановлено найвищу загальну концентрацію ПАВ у фракції розміром 250–500 мкм, яка має високу схильність поєднуватися з природною органічною речовиною, що перешкоджає спробам відновлення.

ПАВ міцно скріплюються з ґрунтом залежно від його природи, гранулометричного складу, доступного органічного вуглецю, азоту, pH, температури та вологості. З них гранулометричний склад є найважливішим показником впливу на їх закріплення в ґрунтах. Глинистий ґрунт зв'язує ПАВ найбільше, а піщаний — найменше, це викладено в праці R. Singh [9].

Біологічна рекультивація є основним напрямом відновлення ґрунтів після мілітарних впливів. Її сутність полягає у відновленні мікробного ценозу, гумусного стану і кругообігу поживних елементів. Шляхи його відновлення можуть бути різними залежно від умов та стану ґрунту і включати внесення корисної мікробіоти чи підвищення активності аборигенної мікробіоти.

Загальна структура та формування мікробної спільноти на забруднених ділянках зазвичай залежить від цілої низки чинників, деякі бактерії часто є головними. Так, у ґрунтах, що зазнали пірогенного впливу, домінувальними можуть стати актинобактерії, як відображено в роботі S. Jiang зі співавт. [10].

Дослідження O. Muter [11] продемонстрували домінувальну чисельність типів *Proteobacteria* та *Firmicutes* у різних процесах біодеградації, що сприяють автохтонній та алохтонній біоаугментації. Дослідження біодеградації сирої нафти виявили основ ні типи ґрунтових мікроорганізмів, що належали до *Proteobacteria*, *Firmicutes*, *Bacteroidetes*, *Actinobacteria* та *Acidobacteria*, як повідомлялося в праці Y.R. Pi та M.T. Bao [12]. Деякі ключові ферменти, пов'язані з біодеградацією нафтопродуктів, були зафіксовані у *Bacillus megaterium* (алкангідроксилаза, катехол-1,2-діоксигеназа, протокатехол-3,4-діоксигеназа), *Bacillus pumilus* (естерази та ліпаза), *Pseudomonas aeruginosa* (катехол-1,2-діоксигеназа, протокатехол-3,4-діоксигеназа) та *Stenotrophomonas maltophilia* (катехол-2,3-діоксигеназа).

Біодеградація забруднювачів відбувається як за аеробних, так і анаеробних умов із залученням природної або штучно внесеної мікробіоти. Для очищення ґрунту від вибухівки, паливно-мастильних матеріалів та важких металів найчастіше використовують представників родів *Pseudomonas*, *Clostridium*, *Bacillus*, *Serratia*, *Stenotrophomonas*, *Arthrobacter*, *Rhodococcus*, *Cellulomonas* та ін., як зазначено в дослідженні М.Б. Галкіна з колегами [13]. Бактерії родів *Pseudomonas*, *Bacillus* та *Rhodococcus* можна знайти в широкому спектрі екосистем. Вони є домінувальними через мікробну сукцесію під час біодеградації і демонструють надзвичайну активність у розкладанні природних забруднювачів і ксенобіотиків та беруть участь у мікробних консорціумах. Відома роль *Rhodococcus* spp. у біодеградації органічних забруднювачів, а також у відновленні нітрифікаційної продуктивності за наявності антибактеріальних агентів в активному мулі та інших процесах, що відображено в низці публікацій [14–16]. Катаболічна активність родококів включає катаболізацію коротко- й довголанцюгових алканів, а також ароматичних (галогенованих та нітрозаміщених), гетеро- і поліциклічних ароматичних сполук.

Представники родів *Bacillus*, *Pseudomonas* та *Rhodococcus* використовують як інокулят для біоаугментації, про що описано в колективних працях на чолі з I. Ahmad та A. Lara-Moreno [17; 18]. Відомо про варіації та сукцесії мікробних спільнот після біоаугментаційної ремедіації, де введений мікробний біоагент зникає під час процесу ремедіації. Однак було виявлено позитивний вплив на динаміку біодеградації, що може бути результатом післядії метаболітів.

Для покращання ефективності біоаугментації необхідно насамперед вирішити проблеми тривалого перебування спеціальних функціональних бактерій та підтримки взаємодії серед мікробних угруповань, на це вказує робота Y. Chen зі співавт. [19]. Як відомо з напрацювань колективу авторів на чолі з G. Vasilyeva [20], додавання природних сорбентів, серед яких органічні речовини, до забруднених ґрунтів зумовило зниження токсичності ґрунту, зменшення гідрофобності ґрунту, оптимізації pH ґрунту та водно-повітряного режиму, що значно стимулювало деградацію нафти. Як роз-

крито в дослідженні N. M. Jabbar зі співавт., за умови неможливого повного розщеплення залишків забруднювачів, іммобілізація та зниження біодоступності органічних їх форм у ґрунтах є критично важливими, що потребує регулярного моніторингу активності ґрунтової мікробіоти [21].

У працях останніх двох років науковцями ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського» представлені концептуальні засади відновлення родючості та здоров'я чорноземів, де розкриваються аспекти інформаційного забезпечення щодо стану окремих ділянок, заходи прискореної реабілітації та запровадження живих ґрунтових лабораторій [1; 2].

Дослідження деградованих внаслідок воєнних дій ґрунтів набули широких масштабів, охоплюючи різні типи ґрунтів, характер впливу, їх стан та умови і перспективи відновлення. Потрапляння вибухових речовин, важких металів, нафтопродуктів і продуктів горіння в орний шар призвели до порушення мікробіологічної рівноваги, зниження активності ґрунтових мікроорганізмів і деградації гумусного стану. Стан ґрунту, який є потужним біогеохімічним резервуаром і забезпечує стале функціонування екосистем, визначається активністю мікроорганізмів і спрямованістю процесів, що відбуваються за їх впливу. Тому пошук шляхів відновлення біогенності порушених ґрунтів є важливим аспектом біоремедіаційних стратегій.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження відбирали зразки ґрунту в с. Киселівка Снігурівської ОТГ, яка є однією з найбільш постраждалих територій Миколаївської обл. від воєнних дій під час повномасштабного вторгнення. Обрана ділянка зазнала негативного впливу ще й від потрапляння пестицидів, оскільки було ракетне влучання в склад агрохімікатів. Лабораторні дослідження здійснювались в Українській лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу НУБіП України, модельний дослід був закладений у теплиці. Досліджуваний ґрунт — чорнозем південний, відбір зразків ґрунту проводили з шару 0–20 см безпосереднього місця ракетного влучання в склад з агрохімікатами та з локації поряд (контроль).

Скринінговий пошук залишків хімічних сполук, що є діючою речовиною пестицидів та їх метаболітів, за базою мас-спектрів ГХ/МС виконували в автоматичному режимі та за переліком цільових компонентів із застосуванням системи Agilent Technologies 7890-MSD 5977C з моноквадрупольним мас-селективним детектором. Аналіз здійснювали шляхом зіставлення отриманих мас-спектрів із базою даних NIST, що інтегрована з програмним забезпеченням приладу DRS-AMDIS та згідно з переліком пестицидних сполук. Підготовку проб для аналізу проводили відповідно до DIN EN 15662:2018-07.

Визначення поліциклічних ароматичних вуглеводнів у ґрунтах виконували відповідно до ДСТУ ISO 13877:2005 Якість ґрунту. Визначення багатоядерних ароматичних вуглеводнів методом високоефективної рідинної хроматографії. Масові частки окремих ПАВ розраховували за методом абсолютного градуювання (зовнішнього стандарту) за допомогою програмного забезпечення Chromeleon і виражали у мкг/кг.

Хіміко-аналітичні дослідження здійснені згідно з нормативною базою: вміст гумусу ДСТУ 4289:2004; обмінна кислотність — ISO 10390:2005; уміст амонійного і нітратного азоту — ISO 11261:1995; рухомого фосфору та обмінного калію — ДСТУ 4114-2002 за Мачигіним.

У модельних дослідах як фітостимулятори було використано низку видів рослин: *Elytrigia intermedia* (Host.) Nevski., *Brassica napus* L., *Hordeum vulgare* L., *Pisum sativum* L., *Sorghum sudanense* (Piper.) Stapf. Висів насіння проводили в посудини об'ємом 2,5 дм^3 в 3-разовому повторенні, по 4 рослини на 1 ємність. Дослід тривав 50 діб, рослини були у фазі кущення. Біомасу рослини визначали ваговим методом у висушених зразках.

Відновлювальний комплекс (ВК) вносили в ґрунт перед посівом шляхом об'єднання його компонентів відповідно до рекомендованої дози внесення: органічне добриво Паросток — 4 т/га, Ультрачист — 10 $см^3$ робочого розчину на 1 $дм^3$ ґрунту в перерахунку на 1 посудину. Застосований нами біопрепарат Ультрачист містить природні штами мікроорганізмів (*Pseudomonas*, *Bacillus*, *Dietzia*, *Rhodococcus*). Він ефективно розкладає органічні забруднювачі (пестициди, нафтопродукти, харчові відходи) та сприяє відновленню екологічного балансу у ґрунті. Інший компонент відновлювального комплексу — органічне добриво Паросток містить високу концентрацію макро- та мікроелементів, біологічно активних речовин та збалансований симбіотичний консорціум ефективних мікроорганізмів.

Дослідження біогенності ґрунту проводили у варіантах, де росли рослини ячменю, згідно з загальноприйнятими у ґрунтовій мікробіології методиками [22], а також відповідно до вимог ДСТУ ISO 14240-2:2003 Якість ґрунту. Визначання ґрунтової мікробної біомаси. Част. 2. Фумігаційно-екстракційний метод (ISO 14240-2:1997, IDT).

Встановлення швидкості базального дихання ґрунтових мікроорганізмів здійснювали відповідно до вимог ДСТУ ISO 16072:2005 Якість ґрунту. Лабораторні методи визначення мікробного дихання ґрунту та OECD Guidelines for the Testing of Chemicals. Test No. 217: Soil Microorganisms: Carbon Transformation Test.

Статистичну обробку даних для виявлення достовірності розбіжностей між варіантами виконували за допомогою програми Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA) встановлено 16 пріоритетних найбільш токсичних ПАВ. Дослідження вмісту поліароматичних вуглеводнів у відібраних зразках виявило значно вищу концентрацію 15 ПАВ на контролі, ніж у забрудненому зразку ґрунту, де концентрація бенз(а)пірену становила 0,367 мг/кг, що є значно вищим показником, ніж ГДК його для ґрунту (0,02 мг/кг) (*табл. 1*; *рис. 1*).

В іншому зразку, що відібраний безпосередньо із зони ракетного влучання в склад з агрохімікатами, концентрація бенз(а)пірену була нижчою ГДК і становила 0,012 мг/кг (*рис. 2*).

Агрохімічні дослідження зразків вказували на дуже високий вміст нітратних і амонійних форм азоту, рухомих форм калію і фосфору, як на контролі, так і у забрудненому ґрунті. Всі зразки ґрунту мали слаболужну реакцію за pH водної витяжки. Вміст гумусу різко відрізнявся від дуже високого (>5,0%) на контролі до дуже низького (<1,1%) в ґрунті, що зазнав мілітарного впливу.

У забрудненому ґрунті визначені залишки таких пестицидів, як метрибузин, який у 3,8 раза перевищував ГДК — 0,2 мг/кг, та метолахлор, вміст якого в 1,6 раза був вищим ГДК — 0,02 мг/кг. Ґрунт контролю мав типове фонове забруднення залишками поліароматичних сполук та метаболітів ДДТ, які відзначаються високою стабільністю, особливо за наявності високого вмісту органічної речовини, а також інших пестицидів, але з концентрацією меншою 0,01 мг/кг. У результаті досліджень спостерігалася така закономірність, що у фоновому ґрунті (контроль) була більша концентрація вмісту усіх компонентів ПАВ, ніж у забрудненому ґрунті (*рис. 3*).

Така закономірність може бути пов'язана з тим, що контроль має вищий вміст гумусу — 5,16%, ніж зразок після безпосереднього ракетного влучання — 0,75%. Тому знову підтверджується здатність гумусових речовин зв'язувати полютанти. Цю закономірність доведено науковими даними [8; 9], яка вказує на проблему забруднення ґрунтів, що знаходяться в межах впливу воєнних дій.

З метою фітостимуляції активності мікроорганізмів, здатних до деградації забруднювачів, було використано різні види рослин: *Elytrigia intermedia* (Host.) Nevski.,

Таблиця 1. **Визначення поліароматичних вуглеводнів у ґрунтах методом рідинної хроматографії**

Найменування показників, одиниці вимірювань	Ґрунт (контроль)(1)	Ґрунт забруднений(1)	Межа кількісного визначення, LOQ(2)
Нафтален, мг/кг	0,036	0,033	0,001
Аценафтен, мг/кг	0,225	0,015	0,002
Флуорен, мг/кг	0,029	0,002	0,003
Фенантрен, мг/кг	0,342	0,023	0,002
Антрацен, мг/кг	0,038	0,003	0,002
Флуорантен, мг/кг	1,002	0,048	0,002
Пірен, мг/кг	1,013	0,048	0,002
Бенз(а)нтрацен, мг/кг	0,394	0,017	0,001
Хризен, мг/кг	0,459	0,018	0,002
Бенз(б)флуорантен, мг/кг	0,792	0,021	0,002
Бенз(к)флуорантен, мг/кг	0,290	0,009	0,002
Бенз(а)пірен, мг/кг	0,367	0,012	0,002
Дибенз(a,h)антрацен, мг/кг	0,066	0,002	0,001
Бенз(g,h,i)перилен, мг/кг	0,383	0,011	0,002
Індено(1,2,3-cd)пірен мг/кг	0,346	0,011	0,002

Примітки: (1) Результати подано на повітряно-суху речовину; (2) Розширена невизначеність отримана шляхом множення стандартного відхилення відтворюваності, обчисленого за уточненим рівнянням Горвіца-Томпсона, на коефіцієнт охоплення k=2, що визначає інтервал із рівнем довіри, який приблизно дорівнює 95% за допустимого нормального розподілу.

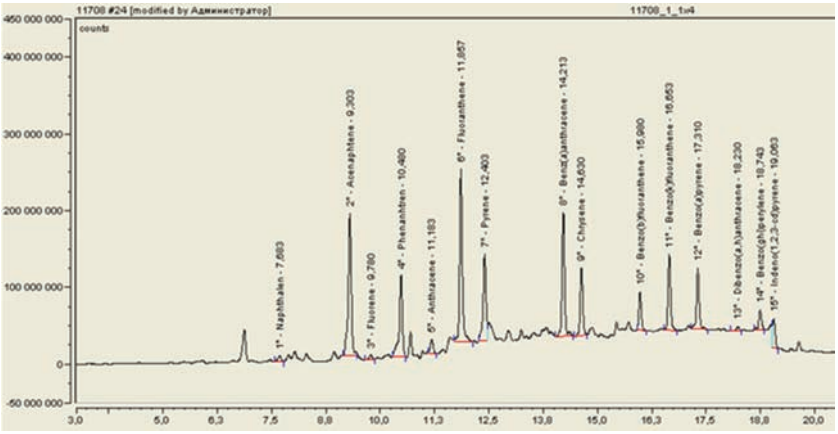

Рис 1. Хроматограма зразка контрольного ґрунту (с. Киселівка, Снігурівська ОТГ, Миколаївська обл.)

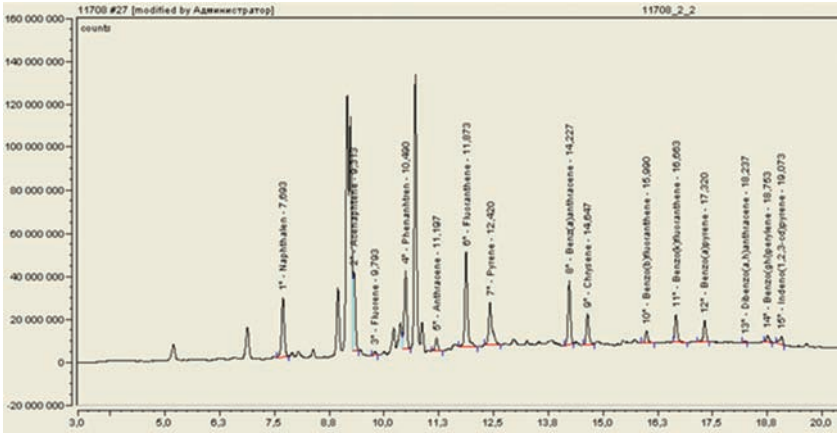

Рис. 2. Хроматограма зразка забрудненого ґрунту (с. Киселівка, Снігурівська ОТГ, Миколаївська обл.)

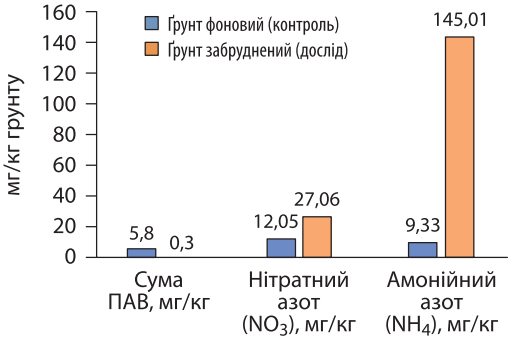

Рис. 3. Залежність накопичення ПАВ від показників родючості ґрунту

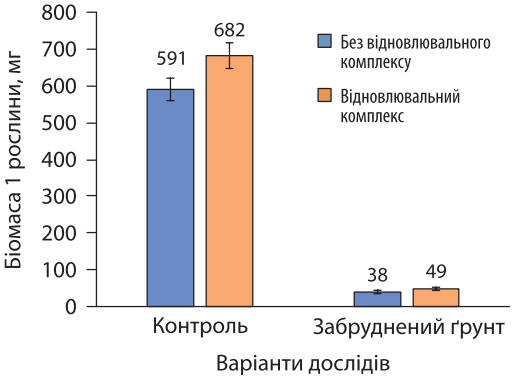

Рис. 4. Вплив забруднення та відновлювального комплексу (ВК) на біомасу сухої рослини *Hordeum vulgare* L., мг

Brassica napus L., *Hordeum vulgare* L., *Pisum sativum* L., *Sorghum sudanense* (Piper.) Stapf. Однак умови забрудненого ґрунту не були сприятливими для розвитку сходів досліджуваних культур. У багатьох варіантах спостерігалось зупинення росту пагонів після сходів, або їх відсутність. Лише рослини *Hordeum vulgare* досягли прийнятних для обліку розмірів. Встановлено пригнічення біомаси рослини за впливу забруднення в 15,5 раза, порівняно з контролем, де маса сухої рослини становила 591 мг (*рис. 4*). Застосування відновлювального комплексу позитивно вплинуло на збільшення біомаси на 15,4% на контролі та на 28,9% у забрудненому ґрунті.

Поясненням негативного впливу на сходи та розвиток рослин є високі концентрації забруднювачів, що гальмують їх ріст та спричиняють загибель. Цей чинник обмежує вибір рослин як фітостимуляторів у процесі біоремедіації, про що свідчать і праці Т.О. Бойко [23].

Біогенність ґрунту є важливим показником його стану. Результати ракетного влучання в склад агрохімікатів позначились на зменшенні щільності популяцій мікроорганізмів досліджуваних еколого-трофічних та таксономічних груп чорнозему південного. Чисельність ґрунтової мікробіоти зменшувалась від 2 до 7,6 раза порівняно з контролем (*табл. 2*).

Таблиця 2. **Чисельність ґрунтових мікроорганізмів основних еколого-трофічних груп в зразках чорнозему південного**

Варіанти	Чисельність мікроорганізмів, млн КУО/г сухого ґрунту				
	амоніфікувальні	амілолітичні	педотрофні	оліготрофні	актинобактерії
Контроль — фоновий ґрунт поблизу зони впливу ракетного влучання	42,5±2,56	12,1±0,45	39,2±8,02	8,6±0,07	1,02±0,05
Контроль + відновлювальний комплекс (ВК)	37,8±4,49	16,0± 1,01	77,0±10,17	8,3±0,15	1,55±0,01
Ґрунт, забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання	14,5±2,56	1,6± 0,16	12,3±0,64	2,0±0,23	0,26±0,01
Ґрунт забруднений + ВК	24,3±1,34	1,9±0,31	14,7±3,3	1,4±0,04	0,29±0,004

Найчутливішою до негативного впливу виявилась амілолітична група, зменшення кількості мікроорганізмів сягало 10,5 млн КУО/г ґрунту. Тоді як внесення відновлювального комплексу сприяло зростанню чисельності мікроорганізмів на контролі на 32,2%, у пошкодженому ґрунті — на 18,7%. Мікроорганізми, що трансформують переважно органічні форми азоту, також відреагували на воєнні дії зниженням чисельності в 3,9 раза. Реакція мікроорганізмів цієї групи на внесення відновлювального комплексу була позитивною, збільшення на контролі становило 51,9%, у забрудненому ґрунті — 12,5%.

Такі самі тенденції спостерігались на чисельності педотрофів, її зниження в 3,2 раза встановлено від ракетного влучання. Застосування відновлювального комплексу сприяло збільшенню представників цієї групи вдвічі на контролі і на 19,5% у ґрунті, що зазнав мілітарного впливу.

Кількість оліготрофних мікроорганізмів зменшувалась за впливу ракетного влучання у 4,3 раза, порівняно з контролем, до того ж і внесення ВК викликало її зниження у забрудненому ґрунті на 30%. Актинобактерії реагували зниженням на воєнні дії в 2,9 раза до контролю та збільшенням у пошкодженому ґрунті на внесення відновлювального комплексу в 1,7 раза, порівняно зі зразком від ракетного влучання.

Чисельність мікроміцетів зазнала зменшення від мілітарного впливу вдвічі, порівняно з контролем (84,6 тис. КУО/г ґрунту), а також у 1,5 раза за додавання відновлювального комплексу до зразка, де відбулося влучання ракети в склад з отрутохімікатами (*рис. 5*). Тоді як на контролі внесення ВК сприяло зростанню кількості мікроскопічних грибів на 48,9% щодо контролю.

Дослідження В.П. Оліферчук зі співавт. [24] вказують на те, що в деградованих ґрунтах збільшується частота трапляння токсиноутворювальних мікроміцетів. Зни-

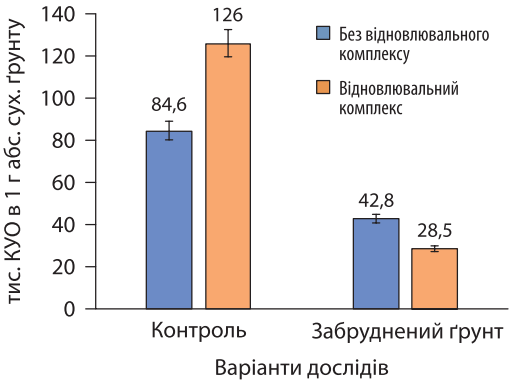

Рис. 5. Чисельність мікроміцетів у чорноземі південному за впливу забруднення та відновлювального комплексу (ВК), тис. КУО в 1 г абсолютно сухого ґрунту

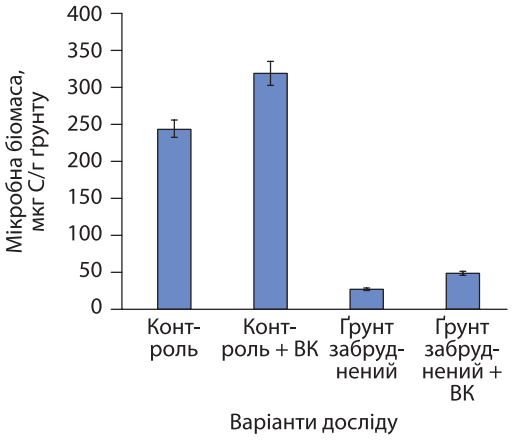

Рис. 6. Вплив забруднення та відновлювального комплексу (ВК) на мікробну біомасу чорнозему південного, мкг С/г абсолютно сухого ґрунту

ження мікроміцетів під впливом відновлювального комплексу в умовах чорнозему південного, що зазнав забруднення пестицидами внаслідок ракетного влучання в склад агрохімікатів, можуть бути пов'язані з контролем чисельності токсиноутворювальних форм, оскільки серед компонентів Ультрачисту є чинники їх пригнічення.

У роботі С.Г. Корсун зі співавт. [25] представлені результати впливу застосування як меліоранта азотно-фосфорного мінерального добрива, соломи як органічного добрива та біологічного препарату на поліпшення агрохімічних властивостей ґрунту та оптимізацію спрямованості мікробіологічних процесів. Аналіз процесів, що відбуваються в циклі вуглецю чорнозему південного, свідчить про їх пригнічення за мілітарного впливу. Показники інтенсивності базального дихання ґрунту знизились у 1,6 раза відносно контролю (6,8 мкг $CO_2 \cdot г^{-1} \cdot год^{-1}$). Біомаса ґрунтових мікроорганізмів є одним з найбільш важливих характеристик деградації ґрунту та інтегральним показником його біогенності. Внаслідок ракетного влучання в склад агрохімікатів ґрунту відбулось різке зниження біомаси ґрунтових мікроорганізмів, що в 9 разів менше від контролю — 244 мкг С/г ґрунту (*рис. 6*).

Використання відновлювального комплексу не впливало на показники базального дихання в досліджуваних зразках, проте забезпечило зростання мікробної біомаси ґрунту поряд із зоною ракетного влучання (контроль) у 1,3 раза та пошкодженого — в 1,8 раза.

Дослідження токсичності ґрунту, шляхом обростання його грудочок азотобактером, виявили 100% токсичність пошкодженого ґрунту, яку не вдалось змінити застосуванням відновлювального комплексу (*табл. 3*).

У ґрунті поблизу зони впливу ракетного влучання в склад агрохімікатів (контроль) токсичність була незначною та становила 15%, а внесення ВК сприяло її зменшенню в 2,5 раза.

Таблиця 3. **Токсичність зразків чорнозему південного, визначена за допомогою азотобактера**

Варіанти	Наявність азотобактера, %	Токсичність, %
Контроль — фоновий ґрунт поблизу зони впливу ракетного влучання	85	15
Контроль+ відновлювальний комплекс (ВК)	94	6
Ґрунт, забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання	0	100
Ґрунт, забруднений пестицидами та вибуховими речовинами після ракетного влучання + ВК	0	100

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження чорнозему південного Снігурівської громади Миколаївської обл., що зазнав впливу внаслідок ракетного влучання в склад агрохімікатів, вказують на залишки таких пестицидів, як метрибузин, який в 3,8 раза перевищував ГДК — 0,2 мг/кг, та метолахлор, уміст якого в 1,6 раза був вищим ГДК — 0,02 мг/кг, а також на наявність15 поліароматичних вуглеводнів, що є небезпечними для навколишнього середовища.

У пошкодженому ґрунті відмічено зниження його біогенності: щільності популяцій мікроорганізмів від 2 до 7,6 раза, залежно від еколого-трофічної та таксономічної групи, їх біомаси в 9,0 разів, порівняно з контролем. В умовах модельного досліду використання відновлювального комплексу, що включав органічне добриво Паросток та бактеріально-метаболічний препарат Ультрачист, сприяло зростанню показників біогенності ґрунту, зокрема мікробної біомаси до 1,8 раза.

Під час розроблення біоремедіаційних стратегій відновлення біогенності забруднених ґрунтів слід враховувати стійкість фітостимуляторів до полютантів. Біоаугментація може бути найбільш дієвою і важливою на початкових етапах ремедіації ґрунтів за їх багатокомпонентного забруднення.

Для відновлення біологічної активності та родючості деградованих ґрунтів доцільно застосовувати органо-біологічні добрива та мікробні біопрепарати, які є ефективною біотехнологічною стратегією реабілітації екологічно порушених ґрунтів, що зазнали комплексного забруднення за впливу воєнних дій, оскільки поєднує властивості біодеструкції та мікробної стимуляції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Балюк, С. А., & Кучер, А. В. (Ред.). (2025). *Оцінка впливу збройної агресії на стан чорноземних ґрунтів і заходи з його відновлення*. Київ: Аграрна наука. DOI: https://doi.org/10.31073/978-966-540-641-9.
2. Балюк, С. А., Кучер, А. В., Солоха, М. О., & Соловей, В. Б. (2024). Оцінювання впливу збройної агресії рф на ґрунтовий покрив України. *Український географічний журнал, 1*, 7–18. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2024.01.007.
3. Голубцов, О., Сорокіна, Л., Сплодитель, А., & Чумаченко, С. (2023). *Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів*. Київ: ГО «Центр екологічних ініціатив «Екодія».
4. Costa, J. P., Silva, A. L., Barcelo D., & Rocha-Santos T. (2023). Threats to sustainability in face of post-pandemic scenarios and the war in Ukraine. *Sci Total Environ., 892*, 164509. DOI: https://doi.org/10.1016/j. scitotenv.2023.164509.
5. U.S. EPA. Priority pollutant list. *Federal Register (1979). 44*, 69514–69517.
6. Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин: Постанова Кабінету Міністрів України № 1325 (2025). (Україна). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021.
7. Dołęgowska, S., Sołtys, A., Krzciuk, K., Wideł, D., & Michalik, A. (2025). Variability of PAH Patterns in Upper Forest Soil (Sub) horizons — A Case Study From South-Central Poland. *Land Degradation and Development, 36*(1), 90–108. DOI: https://doi.org/10.1002/ldr.5346.
8. Helian, L., Jiajun, C., Wei, W., & Xuesong, P. (2010). Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in different size fractions of soil from a coke oven plant and its relationship to organic carbon content. *Journal of Hazardous Materials, 176*(1–3), 729–734. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.095.
9. Singh, R. K., & Singh, S. K. (2025). Persistent polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soil, its bioremediation, and health effects. *Environmental Sciences Europe, 37*, 187. DOI: https://doi.org/10.1186/s12302-025-01230-6.
10. Jiang, S., Qu, H., Cheng, Z., Fu, X., Yang, L., & Zhou, J. (2025). Actinobacteria emerge as novel dominant soil bacterial taxa in long-term post-fire recovery of taiga forests. *Microorganisms, 13*(6), 1262. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms13061262.
11. Muter, O. (2023). Current Trends in Bioaugmentation Tools for Bioremediation: A Critical Review of Advances and Knowledge Gaps. *Microorganisms, 11*, 710. DOI: https://doi.org/10.3390/ microorganisms11030710.
12. Pi, Y. R. & Bao, M. T. (2022). Investigation of kinetics in bioaugmentation of crude oil via high-throughput sequencing: Enzymatic activities, bacterial community composition and functions. *Petroleum Science, 19*, 1905–1914. DOI: https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.01.022.
13. Галкін, М. Б., Страшнова, І. В., & Андрющенко, А. В. (2024). Використання мікроорганізмів у біоремедіації ґрунтів. *Мікробіологія і біотехнологія, 2*, 28–55. DOI: https://doi.org/10.18524/2307-4663.2024.2(61).310553.

14. Zhu, G., Zhang, H., Yuan, R., Huang, M., Liu, F., Li, M., Zhang, Y., & Rittmann, B. E. (2023). How Comamonas testosteroni and *Rhodococcus ruber* enhance nitrification in the presence of quinoline. *Water Research, 229*(19), 119455 DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119455.
15. Guo, Y., Gao, J., Zhao, Y., Liu, Y., Zhao, M., & Li, Z. (2023). Mitigating the inhibition of antibacterial agent chloroxylenol on nitrification system — The role of *Rhodococcus ruber* in a bioaugmentation system. *Journal of Hazardous Materials, 447*(5), 130758. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130758.
16. Fuliang, B., Hui, T., Chunguang, W., & Jun, M. (2023). Treatment of nanofiltration concentrate of landfill leachate using advanced oxidation processes incorporated with bioaugmentation. *Environmental Pollution, 318*, 120827. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120827.
17. Ahmad, I., Abdullah, N., Iwamoto K., Yuzir, A., Mohamad, S. E., Show, P. L., ... Khoo, K. S. (2022). The role of restaurant wastewater for producing bioenergy towards a circular bioeconomy: A review on composition, environmental impacts, and sustainable integrated management. *Environmental Research, 214*, 113854. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113854.
18. Lara-Moreno, A., Morillo, E., Merchán, F., Madrid, F., & Villaverde, J. (2022). Bioremediation of a trifluralin contaminated soil using bioaugmentation with novel isolated bacterial strains and cyclodextrin. *Science of The Total Environment, 840*, 156695. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156695.
19. Chen, Y., Wang, S., Geng, N., Wu, Z., Xiong, W., & Su, H. (2022). Artificially constructing mixed bacteria system for bioaugmentation of nitrogen removal from saline wastewater at low temperature. *J. Environ Manage, 324*, 116351. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116351.
20. Vasilyeva, G., Mikhedova, E., Zinnatshina, L., Strijakova, E., Akhmetov, L., Sushkova, S., & Ortega-Calvo, J.-J. (2022). Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil. *Sci. Total Environ., 850*, 157952. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157952.
21. Jabbar, N. M., Alardhi, S. M., Mohammed, A. K., Salih, I. K., & Albayati, T. M. (2022). Challenges in the implementation of bioremediation processes in petroleum-contaminated soils. *Environmental Nanotechnology Monitoring & Management, 18*(1), 100694. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100694.
22. Волкогон, В. В. (Ред.), Надкернична, О. В., Токмакова, Л. М., Мельничук, Т. М., Чайковська, Л. О., Надкерничний, С. П., ... Комок, М. С. (2010). *Експериментальна ґрунтова мікробіологія: моногр*. Київ: Аграрна наука.
23. Бойко, Т. О. (2025). Можливості використання рослин-фіторемедіантів для відновлення урбанізованих територій. *Таврійський науковий вісник, 144*, 299–305. DOI: https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.144.37.
24. Оліферчук, В. П., Кендзьора, Н. З., Шукель, І. В., Олейнюк-Пухняк, О. Р., & Самарська, М. І. (2023). Мікобіота ґрунтів різного ступеня деградації в багаторічних плодових насадженнях. *Збалансоване природокористування, 1*, 104–122. DOI: https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2023.278546.
25. Корсун, С. Г., Болоховська, В. А., Болоховський, В. В., Хоменко, Т. О., Борко, Ю. П., Дем'янюк, О. С., & Костина, Т. П. (2024). Агроекологічне обґрунтування меліоративних чинників для відновлення ґрунтів, порушених воєнними діями. *Агроекологічний журнал, 2*, 100–112. DOI: https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2024.305663.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 12.01.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.02.2026
Дата публікації: 10.04.2026