

БІОЛОГІЧНА АКТИВНІСТЬ ДЕРНОВО-ПІДЗОЛИСТИХ ҐРУНТІВ ЗА РІЗНИХ РІВНІВ РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ

І.В. Волкогон

Національний університет біоресурсів і природокористування України (м. Київ, Україна)
e-mail: i_volkogon@ukr.net; ORCID: 0000-0003-2987-2235

Досліджено біологічну (ферментативну) активність дерново-підзолистих ґрунтів у зоні безумовного (обов'язкового) відселення та в зоні відчуження Чорнобильської АЕС (ЧАЕС) за дії іонізуючої радіації. Використовували газохроматографічний ацетиленовий метод (для визначення потенційної азотфіксувальної (нітрогеназної) активності); біохімічні — для дослідження активності гідролітичних ферментів (целюлази і протеази), відповідальних за розкладання у ґрунті рослинних решток, а також ензимів, що беруть участь в окисно-відновних реакціях трансформації органічної речовини (каталази і поліфенолоксидази); статистичні. Результати проведених досліджень свідчать, що відносно невисоке зростання сумарної потужності дози у місці радіоактивного забруднення (від 0,2 до 1,6 мкГр/год) на полігоні № 1 (зона безумовного (обов'язкового) відселення — біля с. Христинівка Народицького р-ну Житомирської обл.) забезпечувало стимулювання потенційної нітрогеназної активності ґрунтових діазотрофів та активності як гідролітичних ферментів, так і оксидоредуктаз. Високі потужності доз радіоактивного забруднення (до 22,2, 61,6 і, особливо, до 84,0 мГр/год) на полігоні № 2, розташованому в зоні відчуження ЧАЕС безпосередньо в районі колишнього Рудого лісу, призводили до зниження ферментативної активності ґрунту. Отже, отримані результати однозначно свідчать про різний характер впливу рівнів іонізуючої радіації на біологічну активність дерново-підзолистих ґрунтів. Через більш ніж три десятиліття після аварії на ЧАЕС відносно невисокий рівень радіоактивного забруднення ґрунту у зоні безумовного (обов'язкового) відселення стимулює ферментативну активність ґрунтової мікробіоти. У зоні відчуження ЧАЕС за високого радіоактивного забруднення зберігається негативний вплив іонізуючої радіації на прояв активності ґрунтових мікроорганізмів. Одержані результати значною мірою корелюють із показниками чисельності у досліджуваних ґрунтах азотфіксаторів, а також мікроорганізмів-представників сахаролітичного (мікроміцети і целюлозоруйнівної бактерії) і пептолітичного (амоніфікатори) шляхів деструкції рослинних решток, що показано нами раніше.

Ключові слова: Чорнобильська АЕС, потужність дози поглиненої радіації, зона безумовного (обов'язкового) відселення, зона відчуження, ферментативна активність.

ВСТУП

Як відомо, ґрунтові мікроорганізми беруть безпосередню участь у формуванні родючості ґрунту, збагачуючи його Нітрогеном, розчиняючи важкорозчинні сполуки Фосфору, Калію та інших біогенних елементів, продукуючи фізіологічно активні сполуки, необхідні як для підтримки гомеостазу в ґрунті, так і для регулювання росту і розвитку рослин [1; 2]. Саме мікроорганізми відповідальні за ферментативне розкладання рослинної мортмаси і синтез високомолекулярних речовин у складних гумусових сполуках, акумулюючи в складних високомолекулярних речовинах основну кількість поживних для рослин речовин

[3]. Під час здійснення процесів розкладання мікробна біомаса отримує (імобілізує) і вивільняє (мінералізує) поживні речовини. Без цієї життєво важливої діяльності мертва рослинна маса або детрит накопичувалися б і обмежували доступні поживні речовини для рослин. Розкладання мортмаси є ключовим процесом, який підтримує численні функції екосистем, серед яких: колообіг Карбону; формування та стабілізація структури ґрунту; надходження поживних речовин (передусім сполук Нітрогену); баланс парникових газів і якість атмосфери; деградація агрохімікатів; пригнічення хвороб та захист рослин [4].

На стан угруповань ґрунтової мікробіоти можуть впливати різноманітні чинники як хімічної, так і фізичної природи, в т. ч. й іонізуюче випромінювання, яке здатне негативно позначитися практично на всіх біологічних процесах у ґрунті [5].

Важливим показником стану угруповань мікроорганізмів забруднених ґрунтів є не лише чисельність представників окремих еколого-трофічних груп, але і їхня активність. У зв'язку з вищезазначеним, **метою роботи** було з'ясування залежності ферментативної активності ґрунтів від рівня радіоактивного забруднення.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Дози іонізуючої радіації, за яких відбувається пригнічення життєздатності мікроорганізмів та їхня загибель, варіюють у дуже широкому діапазоні [6; 7], тому теоретично виживання мікроорганізмів та їхня активність, наприклад, у ґрунті, буде залежати від градієнта радіоактивного забруднення. У цьому контексті зони безумовного (обов'язкового) відселення та відчуження після аварії на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС) стали своєрідними природними лабораторіями з просторово змінними рівнями забруднення. Ці місця дають можливість здійснювати дослідження, які допоможуть відповісти на низку питань.

Однак, незважаючи на досить інтенсивні дослідження впливу радіації на довкілля після аварій на ЧАЕС та АЕС «Фукусіма-1», питанням реакції ґрунтових мікроорганізмів, і особливо тих, що беруть участь у трансформації органічної речовини, на радіоактивне забруднення присвячено небагато робіт. Більшість досліджень у цьому напрямі проведено в перші роки після аварії [8–11]. Основними висновками цих робіт є твердження про домінування мікроміцетів в угрупованнях ґрунтових мікроорганізмів і зменшення в ґрунті чисельності як грибів, так і бактерій за високих рівнів радіоактивного забруднення.

Пізніше у дослідженнях Ґу з співавт. [12] впливу радіоактивного забруднення на популяційну різноманітність та метаболіч-

ні характеристики мікроорганізмів ґрунту із забруднених радіоактивними речовинами зон показано, що радіація змінила структуру й функції мікробного угруповання. Зі збільшенням рівня радіоактивного забруднення чисельність бактерій, як і їхня активність, поступово зменшувалися. Подібні результати отримано під час вивчення зразків із найбільш забруднених радіоактивним цезієм районів префектури Фукусіми [13].

На противагу цьому, в ґрунтових зразках із високим рівнем радіоактивності виявлено більше різноманіття бактеріальних таксонів порівняно зі слабо забрудненим ґрунтом [14].

За результатами досліджень із використанням комбінованого таксономічного і метагеномного підходу визначено, що у зразках ґрунтів, відібраних із забруднених радіонуклідами територій ЧАЕС і префектури Фукусіми, угруповання прокариотів у ґрунтах із високими рівнями радіонуклідів мають функціональні профілі, які дають змогу їм справлятися з радіоактивним забрудненням [15].

У нашій попередній публікації [16] показано, що відносно невисокі рівні радіоактивного забруднення дерново-підзолистого ґрунту (потужність дози на ділянці до 1,57 мкГр/год) у зоні безумовного (обов'язкового) відселення (Житомирська обл.) стимулювали розвиток представників сахаролітичного і пептолітичного шляхів деструкції мортмаси (мікроміцетів і целюлозоруйнівних бактерій та амоніфікаторів, відповідно). Натомість у зоні відчуження сильне забруднення радіонуклідами дерново-підзолистого ґрунту призводило до значного зменшення чисельності мікробіоти як порівнювати з показниками дослідженого полігону в Житомирській обл.

Отже, існують значні наукові розбіжності щодо масштабів впливу іонізуючої радіації на довкілля в регіонах, забруднених радіонуклідами. Особливо гострі наукові дебати точаться щодо тривалого, хронічного впливу помірному рівню іонізуючої радіації на біорізноманіття та метаболічну активність мікробіоти [17; 18]. Саме тому

проведення додаткових досліджень необхідне для розуміння впливу радіоактивних викидів на довкілля. Це підсилюється розумінням того, що протягом більш ніж трьох десятиліть із часу Чорнобильської трагедії у ґрунті відбулися певні зміни ступеня радіоактивності, зумовлені природними процесами (насамперед, унаслідок розпаду довговічних радіонуклідів ^{90}Sr і ^{137}Cs , їхньої вертикальної міграції по ґрунтовому профілю та іммобілізації ^{137}Cs глинистими мінералами ґрунту) [19].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження здійснювали на двох полігонах. Агрохімічні показники дерново-підзолистих ґрунтів полігонів наведені у нашій попередній публікації [16]. Вони близькі за значеннями і, на нашу думку, задовольняють умови проведення експерименту. Полігон № 1 розташований у зоні безумовного (обов'язкового) відселення (поблизу с. Христинівка Народицького р-ну Житомирської обл.) на місці покинутих у 90-х роках сільськогосподарських угіддях і характеризується градієнтом радіоактивного забруднення (відповідно, потужність радіаційного фону в точках Народичі-1, Народичі-2 і Народичі-3 становила 0,20, 1,00 і 1,57 мкГр/год). Полігон № 2 знаходиться у зоні відчуження ЧАЕС безпосередньо біля колишнього Рудого лісу і характеризується фоном від 3,70

до 84,00 мкГр/год (точки ЧЗВ-1, ЧЗВ-2, ЧЗВ-3 і ЧЗВ-4 із потужністю фону 3,70, 22,20, 61,60 і 84,00, відповідно) (табл. 1).

Отже, потужність дози у різних точках варіює від 0,2 мкГр/год до 84,0 мкГр/год, тобто відрізняється більш ніж у 420 разів. Такий градієнт у радіологічних характеристиках ґрунтів, на нашу думку, дає можливість оцінити вплив на стан ґрунтової мікробіоти саме рівнів іонізуючого випромінювання.

У динаміці досліджували потенційну активність процесу азотфіксації (потенційну нітрогеназну активність) у ґрунтах. Потенційна активність забезпечує можливість, за створення оптимальних умов вологозабезпечення, температури і живлення мікроорганізмів, рельєфно відстежити вплив досліджуваного чинника [20] (у нашому випадку – рівнів радіоактивного забруднення) на активність мікробіоти.

Потенційну нітрогеназну активність визначали ацетиленовим методом [21] у модифікації М. Умарова [20]. До наважок ґрунту (5,0±0,01 г) у посудинах (медичних флаконах) об'ємом 40 см³, додавали воду (60% від ППВ), розчин D-глюкози (2% від маси ґрунту). Одночасно відбирали зразки для визначення вологості ґрунту. Посудини з ґрунтом закривали ватними пробками і витримували впродовж 72 год у термостаті за температури 26±2°C. Після завершення інкубації в посудинах замінювали ватні пробки на гумові, вводили

Таблиця 1. Значення радіологічних показників у місцях відбору ґрунтових зразків

Місця відбору зразків ґрунту	Питома активність ґрунту ^{137}Cs , кБк/кг	Питома активність ґрунту ^{90}Sr , кБк/кг	Сумарна потужність дози, мкГр/год
Полігон № 1 (зона безумовного (обов'язкового) відселення)			
Народичі-1	0,6±0,04	0,03±0,004	0,20
Народичі-2	2,9±0,08	0,2±0,01	1,00
Народичі-3	4,6±0,1	0,3±0,01	1,57
Полігон № 2 (зона відчуження Чорнобильської АЕС)			
ЧЗВ-1	10,4±0,2	0,8±0,1	3,7
ЧЗВ-2	62,4±0,6	5,0±0,4	22,2
ЧЗВ-3	149,3±1,4	25,0±0,3	61,6
ЧЗВ-4	203,8±4,1	34,0±0,3	84,0

ацетилен у кількості 10% від об'єму газової фази (3,5 см³). Після експозиції зразків з ацетиленом протягом 1 год шприцом відбирали газові проби і аналізували на газовому хроматографі «Chrom-5» (Чехія) з полум'яно-іонізаційним детектором (колонка сталева завдовжки 3 м, заповнена сорбентом Parapak Q 60–80 mesh (Waters Corporation, USA); температура термостата 40°C; витрати газів: водню – 15 см³/хв, азоту – 100 см³/хв, повітря – 500 см³/хв).

Потенційну нітрогеназну активність у ґрунті у наномолях C₂H₄ на 1 г ґрунту за годину розраховували за формулою:

$$ПНА = E \cdot V_1 \cdot K / V_2 \cdot m,$$

де E – кількість етилену в газовій пробі, яка вводиться в хроматограф, нмоль; V_1 – об'єм газової фази в посудині, см³; K – коефіцієнт вологості ґрунту; V_2 – об'єм проби, що вводиться в хроматограф, см³; m – маса наважки ґрунту, г.

Крім дослідження впливу радіоактивного забруднення ґрунтів на нітрогеназну активність, у динаміці визначали активність ферментів, які беруть участь у процесах трансформації органічної речовини у ґрунті: гідролаз (целюлази та протеази) та оксидоредуктаз (каталази і поліфенолоксидази) [22; ДСТУ 7928:2015].

Целюлазну активність (активність 1,4-β-Д-глюкан-4-глюкангідролази) відзначали методом інкубування ґрунту з ацетатним буфером, толуолом і карбоксиметилцелюлозою (КМЦ). Активність целюлази виражали у мкг глюкози на 10 г ґрунту за 48 год. Протеазну активність визначали за використання нінгідрину. Показники окреслювали у міліграмах гліцину на 1 г ґрунту за 24 год. Каталазну активність ґрунту з'ясовували за розщепленням H₂O₂ і титруванням пероксиду розчином КМпО₄. Активність каталази виражали в мл 0,1 н КМпО₄ на 1 г сухого ґрунту за 20 хв. Поліфенолоксидазну активність ґрунту визначали за методикою, яка базується на йодометричному титруванні реакційної суміші, що містить як субстрат пірокатехін, після його взаємодії з ґрунтовою суспензією.

Для оцінки відмінностей показників між варіантами розраховували середнє арифметичне і стандартні відхилення ($X + Sx$). Для розрахунків використовували програму Statistica 6.0 (StatSoft Inc., USA).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Важливою характеристикою діяльності ґрунтової мікробіоти є її нітрогеназна (азотфіксувальна) активність. Високоточний газохроматографічний метод її визначення, що базується на здатності бактеріального нітрогеназного ферментного комплексу відновлювати ацетилен до етилену як аналог відновлення N₂ до NH₃ (Hardy et al., 1968), дає можливість визначити зміни активності на рівні 10⁻⁹ моля C₂H₄, що практично властиве для діяльності однієї бактеріальної клітини. Отже, нітрогеназна активність ґрунту може бути індикаторним показником його стану. Це підтверджують отримані нами результати (табл. 2).

Так, у ґрунті полігону № 1 потенційна нітрогеназна активність зростала у міру збільшення радіоактивного навантаження. Найвищі показники отримано у точці Народичі-3, вони відрізнялися у 3,6–3,9 раза від значень у точках Народичі-1 і Народичі-2.

У зоні відчуження ЧАЕС активність азотфіксації була значно меншою за показники першого полігону. В межах полігону № 2 діяльність азотфіксувальних бактерій зменшувалася у міру зростання радіаційного навантаження, і в точці ЧЗВ-4 сягала найменшого, критичного рівня.

Відомо [22], що спрямованість процесів мінералізації і синтезу органічної ґрунтової речовини може відображати активність окремих специфічних ферментів. Найважливіші у ґрунтах біохімічні процеси, такі як розкладання целюлози і лігніну, синтез і деструкція гумусових сполук, тобто основні ланки ґрунтоутворного процесу, проходять за безпосередньої участі ферментів. У такому випадку було досліджено активність ферментів, які належать до гідролаз – тих, що каталізують реакції гідро-

Таблиця 2. Потенційна нітрогеназна (азотфіксувальна) активність у дерново-підзолистих ґрунтах залежно від рівня радіоактивного забруднення, нмоль С₂Н₄/г ґрунту за 1 год (2021 р.)

Місця відбору зразків	I*	II	III
Полігон № 1			
Народичі-1	15,35+1,12	21,51+2,16	13,08+1,05
Народичі-2	18,41+1,45	28,45+2,12	15,24+1,30
Народичі-3	54,62+3,10	81,90+3,35	32,50+2,45
Полігон № 2			
ЧЗВ-1	10,18+1,00	12,45+1,17	6,14+0,23
ЧЗВ-2	9,54+1,29	10,58+0,65	6,30+0,19
ЧЗВ-3	8,95+1,22	10,15+0,42	6,05+0,47
ЧЗВ-4	2,10+0,15	3,12+0,10	1,18+0,09

Примітка: I – квітень 2021 р., II – липень 2021 р., III – вересень 2021 р.

літичного розщеплення внутрішньомолекулярних зв'язків у сполуках (целюлази як ферменту, відповідального за руйнування целюлози, а також протеази як ферменту, що здійснює деструкцію білкових речовин, у т. ч. й у рослинних рештках). Окрім того, визначали активність ензимів, що відносяться до оксидоредуктаз (каталази і поліфенолоксидази) – каталізаторів окисно-відновних реакцій, важливе значення яких відоме не лише як відображення загальної ґрунтової біодинаміки, але й у синтезі ґумусових сполук.

Слід зазначити, що вплив іонізуючої радіації на ферментативну активність ґрунтів у реальних умовах є маловивченим. Із доступної нам літератури відомо лише про дослідження впливу радіоактивного забруднення наземної екосистеми радіонуклідом ⁹⁰Sr (в умовах регіонального сховища радіоактивних відходів) на активність каталази, інвертази, дегідрогенази та уреаз [23]. Авторами не виявлено достовірних змін активності інвертази, дегідрогенази та уреаз за різних рівнів забруднення порівняно з контролем. Чутливим ензимом на дію радіоактивного забруднення у зазначених дослідженнях виявилася лише каталаза.

Целюлоза є домінантним компонентом рослинних решток і одним із основних субстратів у процесах трансформації орга-

нічних сполук ґрунту. Гідроліз целюлози здійснює целюлаза – фермент, що каталізує гідроліз бета (1,4)-глікозидних зв'язків у целюлозі з утворенням глюкози або целобіози, тобто розщеплює молекулу целюлози на моносахариди. Оскільки целюлаза безпосередньо впливає на швидкість розкладу рослинних решток, вивчення активності цього ензиму є одним із першочергових завдань під час дослідження біологічної активності ґрунтів.

Результати проведених досліджень показують чітку залежність активності ферменту від рівня радіоактивного забруднення (табл. 3).

Так, у ґрунті полігону № 1 активність целюлази зростає зі збільшенням поглиненої мікроорганізмами дози радіації, і є найбільшою у точці Народичі-3. Активність ферменту у ґрунті полігону № 2 є відносно невисокою, до того ж найменші показники відмічено у точці ЧЗВ-4.

Іншим важливим гідролітичним ферментом у ґрунті є протеаза. У результаті послідовного протеолітичного розщеплення сполук за участі протеаз до амінокислот і наступного процесу їх дезамінування у ґрунті формується пул доступних для рослин мінеральних азотних сполук (процес, відомий як амоніфікація).

Проведені нами дослідження протеазної активності ґрунтів свідчать про високі

Таблиця 3. Целюлазна активність у дерново-підзолистих ґрунтах залежно від рівня радіоактивного забруднення, 2021 р.

Місяця відбору зразків	Активність целюлази, мкг глюкози / 10 г ґрунту / 48 год		
	I*	II	III
Полігон № 1			
Народичі-1	12,05+2,10	14,21+2,18	11,28+3,00
Народичі-2	17,40+2,15	18,75+3,02	15,04+1,10
Народичі-3	24,71+3,06	31,92+2,15	20,55+2,38
Полігон № 2			
ЧЗВ-1	9,13+2,00	11,45+1,27	7,14+0,33
ЧЗВ-2	7,54+2,19	9,88+2,67	8,35+1,18
ЧЗВ-3	7,92+1,21	10,05+0,75	6,25+2,57
ЧЗВ-4	4,00+1,15	5,22+1,12	4,12+1,00

Примітка: I – квітень 2021 р., II – липень 2021 р., III – вересень 2021 р.

показники у ґрунті полігону № 1 (з найвищим рівнем у точці Народичі-3) і низькі значення у ґрунті полігону № 2. До того ж найнижчу активність відзначено у точці ЧЗВ-4 (табл. 4).

Активність каталази – відомого ферменту, який бере участь в окисно-відновних реакціях, також була істотно вищою у ґрунті полігону № 1, якщо порівнювати з полігоном № 2.

Найвищі показники каталазної активності відзначено у всі строки проведення

досліджень у точці Народичі-3. Найнижчі значення активності ензиму отримано у точці ЧЗВ-4 (табл. 5).

Ензими, які беруть безпосередню участь у перетворенні органічних сполук ароматичного ряду в компоненти гумусу, відносяться до поліфенолоксидаз. У зв'язку з цим, для визначення спрямованості процесів мінералізації-синтезу органічної речовини у ґрунті у ферментному комплексі найчастіше досліджують активність цих ензимів.

Таблиця 4. Протеазна активність ґрунтів залежно від рівня радіоактивного забруднення, 2021 р.

Місяця відбору зразків	Протеазна активність, мг гліцину/г ґрунту/24 год		
	I*	II	III
Полігон № 1			
Народичі-1	2,08+0,15	3,20+0,28	2,72+0,14
Народичі-2	2,45+0,27	3,75+0,32	3,10+0,10
Народичі-3	3,22+0,18	5,36+0,45	4,61+0,26
Полігон № 2			
ЧЗВ-1	0,90+0,05	1,55+0,08	1,11+0,08
ЧЗВ-2	0,74+0,10	1,64+0,02	0,87+0,02
ЧЗВ-3	0,75+0,05	1,17+0,04	0,65+0,03
ЧЗВ-4	0,22+0,01	0,25+0,02	0,28+0,02

Примітка: I – квітень 2021 р., II – липень 2021 р., III – вересень 2021 р.

Таблиця 5. Каталазна активність ґрунтів залежно від рівня радіоактивного забруднення, 2021 р.

Місяця відбору зразків	Каталазна активність, мл 0,1 н KMnO_4 / г ґрунту / 20 хв		
	I*	II	III
Полігон № 1			
Народичі-1	2,88+0,10	3,65+0,18	2,58+0,04
Народичі-2	3,15+0,14	4,32+0,20	2,90+0,08
Народичі-3	4,22+0,21	5,10+0,33	3,77+0,19
Полігон № 2			
ЧЗВ-1	1,24+0,08	2,55+0,10	1,10+0,04
ЧЗВ-2	0,94+0,10	1,94+0,05	0,95+0,03
ЧЗВ-3	0,85+0,07	1,38+0,01	0,75+0,03
ЧЗВ-4	0,14+0,02	0,44+0,01	0,19+0,01

Примітка: I – квітень 2021 р., II – липень 2021 р., III – вересень 2021 р.

Проведені дослідження свідчать про зростання поліфенолоксидазної активності у ґрунті полігону № 1 у міру збільшення поглиненої дози. До того ж найвищі показники відмічено у точці Народичі-3. Натомість, у зоні відчуження ЧАЕС активність ферменту є невисокою, а у точці ЧЗВ-4 показники відрізняються від усіх інших на 1–2 порядки (табл. 6).

Як уже зазначалося [1; 2], мікробні угруповання мають вирішальне значення для підтримки функцій екосистеми зав-

дяки їхній ролі в колообігу, утриманні та вивільненні основних поживних речовин і Карбону в ґрунті. Відповідно, хронічна дія іонізуючого випромінювання, може поставити під загрозу різноманітність і склад ґрунтової мікробіоти, що негативно позначиться практично на всіх біологічних процесах у ґрунті.

Однак наші попередні дослідження [16] свідчать про стимулювання розвитку представників практично всіх досліджених еколого-трофічних груп мікроорганізмів –

Таблиця 6. Поліфенолоксидазна активність ґрунтів залежно від рівня радіоактивного забруднення, 2021 р.

Місяця відбору зразків	Поліфенолоксидазна активність, мл 0,01 Н I_2 /г ґрунту/2 хв		
	I	II	III
Полігон № 1			
Народичі-1	0,280+0,014	0,335+0,021	0,229+0,014
Народичі-2	0,335+0,008	0,359+0,018	0,307+0,010
Народичі-3	0,368+0,023	0,403+0,023	0,345+0,015
Полігон № 2			
ЧЗВ-1	0,182+0,011	0,231+0,016	0,130+0,004
ЧЗВ-2	0,140+0,009	0,186+0,013	0,096+0,006
ЧЗВ-3	0,144+0,016	0,157+0,015	0,093+0,003
ЧЗВ-4	0,031+0,002	0,056+0,004	0,004+0,001

Примітка: I – квітень 2021 р., II – липень 2021 р., III – вересень 2021 р.

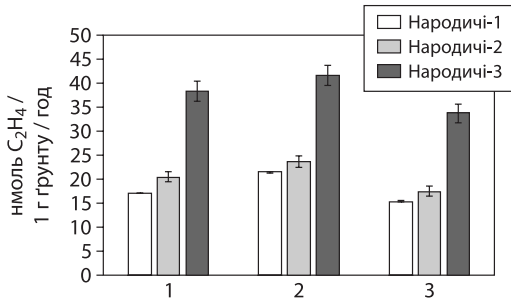


Рис. 1. Потенційна нітрогеназна активність у ґрунті полігону № 1 залежно від рівня радіоактивного забруднення, 2023 р.

Примітка: I – травень 2023 р., II – липень 2023 р., III – вересень 2023 р.

їхня чисельність істотно зростала у ґрунті точці Народичі-3 полігону № 1. Отримані результати ферментативної активності ґрунтів підтверджують ефект стимулювання діяльності мікробіоти за відносно невисокого рівня радіоактивного забруднення.

Можна припустити, що за цих умов протягом понад 35 років після аварії на ЧАЕС відбулися певні адаптаційні зміни мікроорганізмів. Не виключено також, що могла змінитися і структура їхніх угруповань із домінуванням радіотолерантних видів, що потребує додаткових досліджень.

Не можна також не враховувати такий радіобіологічний ефект, як радіаційне стимулювання, або радіаційний гормезис.

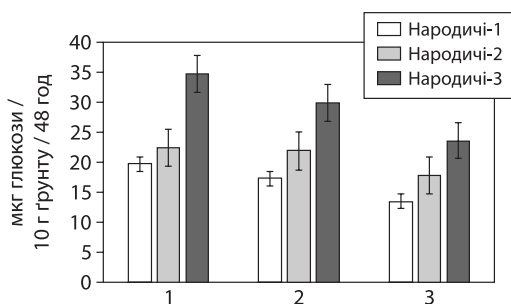


Рис. 2. Целюлазна активність у ґрунті полігону № 1 залежно від рівня радіоактивного забруднення, 2023 р.

Примітка: I – травень 2023 р., II – липень 2023 р., III – вересень 2023 р.

Відомо, що за деяких, порівняно невеликих доз опромінення можна спостерігати прискорення поділу клітин мікроорганізмів, скорочення їхнього клітинного циклу, формування колоній та інших процесів, які характеризують загалом прискорення росту й розвитку [24]. Саме на цьому, зокрема, базуються деякі радіаційно-біологічні технології прискорення процесів бродіння.

Слід зазначити, що об'єкти наших досліджень перебували в умовах хронічної дії іонізуючого випромінювання, тому цілком можливим є реалізація кожного з вищезазначених сценаріїв.

Повторне проведення досліджень біологічної активності ґрунту полігону № 1 у 2023 р. підтвердило зроблені нами висновки щодо стимулювального ефекту відносно невисоких рівнів радіації. Так, потенційна нітрогеназна активність ґрунту у всі строки проведення аналізів зростала від точки Народичі-1 до точки Народичі-3 у 1,3–1,4 раза (рис. 1). Отже, показники активності ферментного нітрогеназного комплексу як відображення метаболічної активності діазотрофів, свідчать про формування сприятливих умов у точці Народичі-3.

За дослідження активності інших ферментів у ґрунті полігону № 1 також підтверджено зроблені нами раніше висновки щодо позитивного впливу на ці показники відносно невисоких доз радіоактивного забруднення ґрунту через 36 років після аварії на ЧАЕС. Так, відмічено достовірне зростання целюлазної активності у ґрунті точки Народичі-3 (рис. 2).

Схожі залежності отримано також під час визначення активності іншого гідролітичного ферменту – протеази (рис. 3).

За визначення активності ферментів, що належать до класу оксидоредуктаз, також показано зростання показників у ґрунті точки Народичі-3. Активність каталази збільшується за цих умов у 1,5–1,7 раза (рис. 4) порівняно з показниками точки Народичі-1, а поліфенолоксидазна активність – в 1,1–1,2 раза (рис. 5).

Отже, проведені через 35–37 років після аварії на ЧАЕС дослідження біологічної

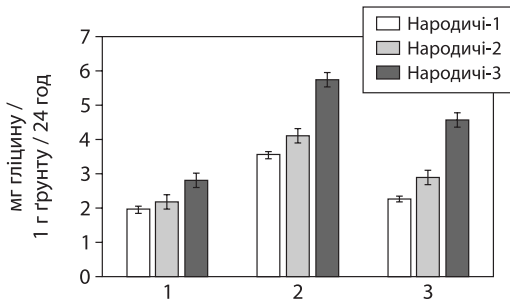


Рис. 3. Протеазна активність ґрунту (полігон № 1) залежно від рівня радіаційного забруднення, 2023 р.

Примітка: I – травень 2023 р., II – липень 2023 р., III – вересень 2023 р.

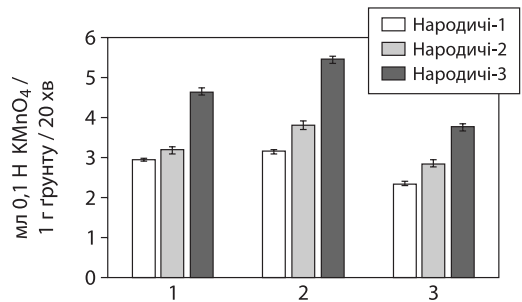


Рис. 4. Каталазна активність ґрунту (полігон № 1) залежно від рівня радіоактивного забруднення, 2023 р.

Примітка: I – травень 2023 р., II – липень 2023 р., III – вересень 2023 р.

активності ґрунтів, забруднених радіонуклідами, свідчать, що невисокі дози поглиненої радіації (до 1,57 мкГр/год) стимулюють метаболічну діяльність ґрунтової мікробіоти.

Визначення у наших дослідках активності ферментів нітрогенази, целюлази, протеази, каталази та поліфенолоксидази демонструють надзвичайно високу чутливість зазначених ензимів до дії іонізуючої радіації. Вважаємо, що дослідження активності зазначеного комплексу ферментів є надійним інструментарієм щодо встановлення реакції ґрунтової мікробіоти на забруднення ґрунтів радіонуклідами.

ВИСНОВКИ

Результати досліджень перебігу загальної біологічної та специфічної ферментативної активності у ґрунтах показують, що через 35–37 років після аварії на ЧАЕС відносно невисокі рівні радіоактивного забруднення ґрунту радіонуклідами ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr, які формують на території сумарну

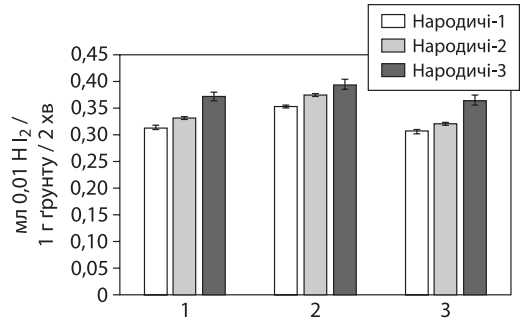


Рис. 5. Поліфенолоксидазна активність ґрунту (полігон № 1) залежно від рівня радіоактивного забруднення, 2023 р.

Примітка: I – травень 2023 р., II – липень 2023 р., III – вересень 2023 р.

потужність дози до 1,57 мкГр/год, можуть стимулювати метаболічну діяльність ґрунтової мікробіоти. Натомість, високі рівні забруднення, за яких потужність дози досягає 22,2, 61,6 і, особливо, 84,0 мкГр/год, значною мірою гальмують функціональну активність мікроорганізмів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Newton R.J., Jones S.E., Eiler A., McMahon K.D. and Bertilsson S. A guide to the natural history of freshwater lake bacteria. *Microbiol. Molecular Biol. Rev.* 2011. Vol. 75. P. 14–49. DOI: <https://doi.org/10.1128/MMBR.00028-10>.
2. McKenney E.A., Koelle K., Dunn R.R. and Yoder A.D. The ecosystem services of animal microbiomes. *Molecular Ecology.* 2018. Vol. 27. P. 2164–2172. DOI: <https://doi.org/10.1111/mec.14532>.
3. Singh R., Rani A., Kumar P., Shukla G. and Kumar A. Cellulolytic activity in microorganisms. *Bull. Pure and Appl. Sc.* 2017. Vol. 36(1). P. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.5958/2320-3196.2017.00004.0>.
4. Stockdale E.A. and Murphy D.V. Managing soil microbial biomass for sustainable agro-ecosystems. *Microbial Biomass: A Paradigm Shift in Terrestrial Biogeochemistry.* World Scientific, London. 2017. P. 67–101.

5. Ager D., Evans S., Li H., Lilley A.K. and Van Der Gast C.J. Anthropogenic disturbance affects the structure of bacterial communities. *Environ. Microbiol.* 2010. Vol. 12. P. 670–678. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2009.02107.x>.
6. Al-Najjar M.A.A. and Albokari M.M. Shifts in microbial community composition in tannery-contaminated soil in response to increased gamma radiation. *Ann. Microbiol.* 2019. Vol. 69. P. 1567–1577. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13213-019-01541-z>.
7. Ryabova A., Kozlova O., Kadirov A. et al. DetR DB: A database of ionizing radiation resistance determinants. *Genes*. 2020. Vol. 11. 1477. DOI: <https://doi.org/10.3390/genes11121477>.
8. Жданова Н.М., Захарченко В.О., Василевська А.Т. та ін. Особливості складу мікробіоти в ґрунтах зони впливу Чорнобильської АЕС. *Укр. ботан. журн.* 1994. № 51(2/3). С. 134–144.
9. Тугай Т.И., Жданова Н.Н., Желтоножский В.А. и др. Ответные реакции грибов, выделенных из различных по уровню радиоактивного загрязнения помещений объекта «Укрытие», на действие ионизирующего излучения. *Зб. наук. праць Інституту ядерних досліджень*. 2005. С. 128–136.
10. Романовская В.А., Соколов И.Г., Рокитко П.В., Чорная Н.А. Экологические последствия радиоактивного загрязнения для почвенных бактерий в 10 км зоне ЧАЭС. *Микробиология*. 1998. № 67(2). С. 274–280.
11. Ерусалимская Л.Ф., Корчак Г.И. Особенности микробных ценозов почвы в условиях длительного хронического загрязнения радионуклидами. *Гигиена населенных мест*. 1999. № 2 (1). С. 125–136.
12. Gu M., Zhang Z., Wang W. et al. The Effects of Radiation Pollution on the Population Diversities and Metabolic Characteristics of Soil Microorganisms. *Water Air Soil Pollut.* 2014. Vol. 225. P. 2133. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2133-4>.
13. Ihara H., Kumagai A., Hori T. et al. Direct comparison of bacterial communities in soils contaminated with different levels of radioactive cesium from the first Fukushima nuclear power plant accident. *Sci Total Environ.* 2021. Vol. 756. P. 143844. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143844>.
14. Theodorakopoulos N., Fevrier L., Barakat M. et al. Soil prokaryotic communities in Chernobyl waste disposal trench T22 are modulated by organic matter and radionuclide contamination. *FEMS Microbiology Ecology*. 2017. Vol. 93. fix079. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsec/fix079>.
15. Hoyos-Hernandez C., Courbert C., Simonucci C. et al. Community structure and functional genes in radionuclide contaminated soils in Chernobyl and Fukushima. *FEMS Microbiol. Letters*. 2019. Vol. 366(21). fnz180. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsle/fnz180>.
16. Gudkov I.M., Volkohon I.V., Illienko V.V. et al. Impact of radioactive contamination of soils on the diversity of micropopulation and the transformation of organic substances. *Agricultural Science and Practice*. 2022. Vol. 9(3). P. 3–15. DOI: <https://doi.org/10.15407/agrisp9.03.003>.
17. Smith J. Field evidence of significant effects of radiation on wildlife at chronic low dose rates is weak and often misleading. A comment on «Is non-human species radiosensitivity in the lab a good indicator of that in the field? Making the comparison more robust» by Beaugelin-Seiller et al. *J. Environ. Radioact.* 2019. P. 105895. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.01.007>.
18. Beresford N., Horemans N., Raines K.E. et al. Towards solving a scientific controversy — The effects of ionising radiation on the environment. *J. Environ. Radioactivity*. 2019. P. 106033. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106033>.
19. Гудков І.М., Лазарев М.М. Проблеми реабілітації та повертання до використання забруднених радіонуклідами ґрунтів. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2018. Спецвип. С. 83–91.
20. Волкогон В.В., Надкернична О.В., Токмакова Л.М. та ін. Експериментальна ґрунтова мікробіологія. Київ: Аграрна наука, 2010. 464 с.
21. Hardy R.W.F., Holsten R.D., Jackson E.K. and Burns R.C. Application of the acetylene-ethylene assay for N₂-fixation: laboratory and field evolution. *Plant Physiol.* 1968. Vol. 43(8). P. 1185–1207.
22. Bilen S. and Turan V. Enzymatic Analyses in Soils. In: Amaresan, N., Patel, P., Amin, D. (Eds.). *Practical Handbook on Agricultural Microbiology*. Springer Protocols Handbooks. Humana, New York, NY. 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1724-3_50.
23. Lavrentyeva G.V., Zaharova V.R., Mirzeabasov O.A. and Synzynys B.I. Influence of Radioactive Contamination of the Sr-90 Terrestrial Ecosystems on the Enzymatic Activity of the Soil. *Future of atomic energy — AtomFuture 2017: XIII International Youth Scientific and Practical Conference*. 2017. P. 137–142. DOI: <https://doi.org/10.18502/keg.v3i3.1613>.
24. Миллер Д.Р., Глазбрук А.Д., Муллен Б.М. и др. Предсказание выживаемости бактерий при УФ-облучении. *Жизнеспособность клеток, облученных в малых дозах: теоретические и клинические аспекты*. Москва: Медицина, 1980. С. 157–165.

REFERENCES

1. Newton, R.J., Jones, S.E., Eiler, A., McMahon, K.D. & Bertilsson, S. (2011). A guide to the natural history of freshwater lake bacteria. *Microbiol. Molecular Biol. Rev.*, 75, 14–49. DOI: <https://doi.org/10.1128/MMBR.00028-10> [in English].
2. McKenney, E.A., Koelle, K., Dunn, R.R. & Yoder, A.D. (2018). The ecosystem services of animal microbiomes. *Molecular Ecology*, 27, 2164–2172. DOI: <https://doi.org/10.1111/mec.14532> [in English].
3. Singh, R., Rani, A., Kumar, P., Shukla, G. & Kumar, A. (2017). Cellulolytic activity in microorganisms. *Bull. Pure and Appl. Sc.*, 36 (1), 28–37. DOI: <https://doi.org/10.5958/2320-3196.2017.00004.0> [in English].
4. Stockdale, E.A. & Murphy, D.V. (2017). Managing soil microbial biomass for sustainable agro-ecosystems. *Microbial Biomass: A Paradigm Shift in Terrestrial Biogeochemistry*. (pp. 67–101). World Scientific, London [in English].
5. Ager, D., Evans, S., Li, H., Lilley, A.K. & Van Der Gast, C.J. (2010). Anthropogenic disturbance affects the structure of bacterial communities. *Environ. Microbiol.*, 12, 670–678. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2009.02107.x> [in English].
6. Al-Najjar, M.A.A. & Albokari, M.M. (2019). Shifts in microbial community composition in tannery-contaminated soil in response to increased gamma

- radiation. *Annals of Microbiology*, 69, 1567–1577. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13213-019-01541-z> [in English].
7. Ryabova, A., Kozlova, O., Kadirov, A. et al. (2020). DetR DB: A database of ionizing radiation resistance determinants. *Genes*, 11, 1477. DOI: <https://doi.org/10.3390/genes11121477> [in English].
 8. Zhdanova, N.M., Zakharchenko, V.O., Vasylev's'ka, A.T. et al. (1994). Osoblyvosti skladu mikrobioty v gruntakh zony vplyvu Chornobyl'skoyi AES [Peculiarities of the composition of microbiota in the soils of the zone affected by the Chernobyl NPP]. *Ukr. botan. zhurnal — Ukraine nerd journal*, 51 (2/3), 134–144 [in Ukrainian].
 9. Tugai, T.I., Zhdanova, N.N., Zheltonozhsky, V.A. et al. (2005). Zvnytnyye reaktsii gribov, vydelennykh iz razlichnykh po urovnyu radioaktivnogo zagryazneniya pomeshcheniy ob'yekta «Ukrytiye», na deystviye ioniziruyushchego izlucheniya [Responses of fungi isolated from rooms of the Shelter object with different levels of radioactive contamination to the action of ionizing radiation]. *Zb. nauk. prats' Institutu yadernikh doslidzhen' — Coll. of science works of the Institute of Nuclear Research*, 128–136 [in Russian].
 10. Romanovskaya, V.A., Sokolov, I.G., Rokitko, P.V. & Chornaya, N.A. Z. (1998). Ekologicheskoye posledstviya radioaktivnogo zagryazneniya dlya pochvennykh bakteriy v 10 km zone ChAES [Ecological consequences of radioactive contamination for soil bacteria in the 10 km zone of the Chernobyl nuclear power plant]. *Mikrobiologiya — Microbiology*, 67 (2), 274–280 [in Russian].
 11. Yerusalimskaya, L.F. & Korchak, G.I. (1999). Osobennosti mikrobynykh tsezozov pochvy v usloviyakh dlitel'nogo khronicheskogo zagryazneniya radionuklidami [Features of soil microbial cenoses under conditions of long-term chronic contamination with radionuclides]. *Gigiyena naseleennykh mest — Hygiene of populated areas.*, 2 (1), 125–136 [in Russian].
 12. Gu, M., Zhang, Z., Wang, W. et al. (2014). The Effects of Radiation Pollution on the Population Diversities and Metabolic Characteristics of Soil Microorganisms. *Water Air Soil Pollut.*, 225, 2133. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2133-4> [in English].
 13. Ihara, H., Kumagai, A., Hori, T. et al. (2021). Direct comparison of bacterial communities in soils contaminated with different levels of radioactive cesium from the first Fukushima nuclear power plant accident. *Sci Total Environ.*, 756, 143844. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143844> [in English].
 14. Theodorakopoulos, N., Fevrier, L., Barakat, M. et al. (2017). Soil prokaryotic communities in Chernobyl waste disposal trench T22 are modulated by organic matter and radionuclide contamination. *FEMS Microbiology Ecology*, 93, fix079. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsec/fix079> [in English].
 15. Hoyos-Hernandez, C., Courbert, C., Simonucci, C. et al. (2019). Community structure and functional genes in radionuclide contaminated soils in Chernobyl and Fukushima. *FEMS Microbiol. Letters*, 366 (21), fnz180. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsle/fnz180> [in English].
 16. Gudkov, I.M., Volkohon, I.V., Illienko, V.V. et al. (2022). Impact of radioactive contamination of soils on the diversity of micropopulation and the transformation of organic substances. *Agricultural Science and Practice*, 9 (3), 3–15. DOI: <https://doi.org/10.15407/agrisp9.03.003> [in English].
 17. Smith, J. (2019). Field evidence of significant effects of radiation on wildlife at chronic low dose rates is weak and often misleading. A comment on «Is non-human species radiosensitivity in the lab a good indicator of that in the field? Making the comparison more robust» by Beaugelin-Seiller et al. *J. Environ. Radioact.*, 105895. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.01.007> [in English].
 18. Beresford, N.A., Horemans, N., Raines, K.E. et al. (2019). Towards solving a scientific controversy — The effects of ionising radiation on the environment. *J. Environ. Radioactivity*, 106033. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106033> [in English].
 19. Gudkov, I.M. & Lazarev, M.M. (2018). Problemy reabilitatsiyi ta povertannya do vykorystannya zabrudnennykh radionuklidamy gruntiv [Problems of rehabilitation and return to use of soil contaminated with radionuclides]. *Ahrokhimiya i gruntoznavstvo. Spets-vypusk — Agrochemistry and soil science. Special issue*, 83–91 [in Ukrainian].
 20. Volkogon, V.V., Nadkernychna, O.V., Tokmakova, L.M. et al. (2010). *Ekspyrymental'na gruntova mikrobiologiya [Experimental soil microbiology]*. Kyiv: Ahrarna nauka [in Ukrainian].
 21. Hardy, R.W.F., Holsten, R.D., Jackson, E.K. & Burns, R.C. (1968). Application of the acetylene-ethylene assay for N₂-fixation: laboratory and field evolution. *Plant Physiol.*, 43 (8), 1185–1207 [in English].
 22. Bilen, S., Turan, V., Amaresan, N., Patel, P. & Amin, D. (Eds.). (2022). *Enzymatic Analyses in Soils. Practical Handbook on Agricultural Microbiology. Springer Protocols Handbooks*. Humana, New York, NY. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1724-3_50 [in English].
 23. Lavrentyeva, G.V., Zaharova, V.R., Mirzeabasov, O.A. & Synzynyns, B.I. (2017). Influence of Radioactive Contamination of the Sr-90 Terrestrial Ecosystems on the Enzymatic Activity of the Soil. *Future of atomic energy — AtomFuture 2017: XIII International Youth Scientific and Practical Conference*. (pp. 137–142). DOI: <https://doi.org/10.18502/keg.v3i3.1613> [in English].
 24. Miller, D.R., Glasbrook, A.D., Mullen, B.M. et al. (1980). Predskazaniye vyzhivayemosti bakteriy pri UF-oblucheniі [Prediction of bacterial survival under UV irradiation]. *Zhiznesposobnost' kletok, obluchennykh v malykh dozakh: teoreticheskiye i klinicheskiye aspekty [Viability of cells irradiated in low doses: theoretical and clinical aspects]*. (pp. 157–165). Moskva: Meditsina [in Russian].

Стаття надійшла до редакції журналу 15.01.2024