

РОЛЬ ШТУЧНО СФОРМОВАНОГО МІКРОБІОМУ ҐРУНТУ В ЦИКЛІ ВУГЛЕЦЮ

А. А. Бунас, <https://orcid.org/0000-0003-4806-7004>,

О. В. Шерстобова, <https://orcid.org/0000-0001-8239-0847>,

Є. Д. Ткач, <https://orcid.org/0000-0002-0666-1956>,

І. П. Мовчан, <https://orcid.org/0009-0002-0647-6133>,

В. В. Дворецький, <https://orcid.org/0000-0001-8427-7813>

Інститут агроекології і природокористування НААН
вул. Метрологічна, 12; м. Київ, 03143, Україна; e-mail: bio-206316@ukr.net

Мета. Провести аналіз наукової літератури стосовно ролі та впливу штучно сформованого мікробіому на процеси трансформації вуглецю в агроєкосистемах. **Методи.** Збір, аналіз і синтез. **Результати.** Цикл вуглецю є фундаментальним процесом, що визначає баланс елемента в біосфері та впливає на кліматичну стабільність планети. Ґрунт є одним із основних резервуарів вуглецю, містячи його більше, ніж атмосфера та рослинність разом узяті. У цьому контексті мікробіом ґрунту — сукупність бактерій, архей, стептоміцетів, мікроміцетів та інших організмів, що населяють ґрунтове середовище, у т. ч. й ризосферу рослин — відіграє ключову роль у трансформації, збереженні та мобілізації вуглецю. Мікроорганізми каталізують процеси гуміфікації органічної речовини, наслідком чого є утворення стабільних форм ґрунтового вуглецю, здатних залишатися в ґрунті впродовж сотень і навіть тисяч років. Наприклад, завдяки підсиленню формування мікробної біомаси у ґрунтах чорноземного типу щороку може стабілізуватися близько 2–4 тон органічного вуглецю на гектар. Штучно сформовані за допомогою біотехнологічних методів мікробіоми ґрунту, відкривають нові можливості для управління процесами трансформації вуглецю та пом'якшення наслідків змін клімату. **Висновки.** Штучно сформовані мікробіоми ґрунту є перспективним інструментом в управлінні вуглецевим циклом, пом'якшенні наслідків глобальних змін клімату. Широкомасштабне впровадження біотехнологічних заходів, спрямованих на зміну складу й функціонування мікробіому ґрунту, сприятиме не лише підвищенню якісних показників ґрунту, а й збереженню органічного вуглецю та зменшенню викидів парникових газів. Подальші дослідження та розробки в цій галузі є необхідними для реалізації потенціалу штучно сформованих мікробіомів у практиці сталого землеробства.

Ключові слова: мікробіом, біопрепарати, цикл вуглецю, агроєкосистеми, ґрунтові агрегати, «мікробний вуглецевий насос», ґрунтовий органічний вуглець (SOC).

Вуглець (С) — хімічний елемент, основа органічних речовин усіх живих організмів. На Землі вуглець циркулює у так званому карбоновому або вуглецевому циклі з різною швидкістю, зупинками й запусками. Наприклад, якщо розглянути один атом вуглецю, то він за декілька днів може пройти через

рослину, тварину й атмосферу, але залишитися фіксованим на мільйони років у нафті, гірських породах, корисних копалинах, ґрунті [1; 2]. Вважається, що в біосфері міститься понад 12 млрд тон вуглецю, отже, в середньому на 1 см² земної поверхні припадає 580 мг сухої органічної речовини. До складу цієї

органічної маси входить біомаса рослин, тварин, лишайників, мікроміцетів, бактерій. У біосфері біомаса розподілена нерівномірно і змінюється від нуля (крига Антарктиди) до 60 кг/м² (тропічні ліси). Рослини в процесі фотосинтезу синтезують органічні речовини (глюкоза, крохмаль, целюлоза, геміцелюлоза та ін.). Щорічно вищі рослини й водорості поглинають при фотосинтезі близько 200 млрд т вуглецю. Ще один шлях повернення вуглецю в атмосферу — дихання еукаріот. Відмерлі рослинні й тваринні організми розкладаються редуцентами до CO₂, який також повертається в атмосферу. Повний цикл обміну атмосферного вуглецю здійснюється за 300 років [3].

Найбільшим обмінним резервуаром вуглецю на планеті є ґрунти, які містять у три рази більше цього елемента, ніж атмосфера, і є другим за величиною після Світового океану. У ґрунтах зосереджено 2300 Гт вуглецю, що перевищує сумарний запас цього хімічного елемента в атмосфері (800 Гт) та фітомасі (550 Гт) [4; 5]. Потік CO₂ з поверхні ґрунту становить 60 Гт вуглецю за рік, що на порядок більше, ніж надходить в атмосферу внаслідок спалювання викопного палива. Еквівалентна кількість діоксиду вуглецю щороку поглинається фітомасою у процесі фотосинтезу. Вважається, що майже 99 % всієї органічної речовини у біосфері утворюється автотрофами, і лише близько 1 % припадає на хемосинтетики [5]. Рослини фіксують вуглець з атмосфери для створення біомаси, і значна частина її надходить у ґрунт у вигляді стебел, листя й коренів. Попри те, що численні дослідження зосереджені на надземному надходженні, коріння вносить у ґрунт у 2,5 рази більше С, ніж стебла та пагони [6]. Отже, коріння потужно впливає на накопичення вуглецю у ґрунті та зворотний зв'язок з атмосферою, має вирішальне значення для розуміння й моделювання глобального циклу вуглецю. В умовах сьогодення дослідники визнають, що підземні частини рослин (коренева система) недостатньо представлені в С-моделях, проте саме кореневі ресурси значною мірою впливають і змінюють запаси С у ґрунті [7–9]. Наприклад, надходження корневих ексудатів у ґрунт і маса корневих систем широколистяних бореальних лісів є особливо важливою, оскільки підземна частина таких лісів становить 39 %

рослинної біомаси. До речі, підземна частина широколистяних бореальних лісів має більшу частку, ніж у голчастих бореальних, помірних або тропічних лісах. Функціональні типи рослин істотно впливають на вертикальний розподіл ґрунтового органічного вуглецю (SOC) [7].

Фундаментальним рушієм глобального циклу вуглецю є ґрунтові мікроорганізми. Вони беруть участь у процесах деградації рослинних решток та органічної речовини, синтезу гумусових речовин, виділенні та фіксації вуглекислого газу, метану та інших парникових газів. Відомо, що в 1 г ґрунту (0–20 см) міститься 10⁹–10¹⁰ прокариотичних клітин (бактерій та архей), 10⁴–10⁷ протистів, близько 100 м гіф грибів і 10⁸–10⁹ вірусів. Біомаса прокариот сягає 5 тон (і більше) на гектар у деяких ґрунтах, а біомаса грибів перебуває у діапазоні від 1 до 15 тон. Ґрунти також характеризуються значним генетичним різноманіттям. Загальне геномне різноманіття бактеріальних угруповань із не порушених ґрунтів пасовищ на три порядки перевищує різноманітність водних мікроорганізмів. Так, різноманітність прокариотичних видів коливається від тисяч до мільйонів на грам ґрунту [10].

Мікробіологічні процеси в ґрунтах щорічно вивільняють більше ніж 60 Гт CO₂, але також здатні утримувати значну частку вуглецю через довготривалі форми зберігання. Показано [11], що основним компонентом SOC є мікробний вуглець (MDC), частка якого складає приблизно 50 % від SOC. За окремими твердженнями [12], частка MDC значно вища, оскільки мікроорганізми трансформують 85–90 % всіх наявних у ґрунті органічних матеріалів. Склад мікробіому варіюється залежно від типу ґрунту, кліматичних умов, рослинного покриву та антропогенного впливу. Результати досліджень [13] показали, що кожне підвищення температури на 1 °C спричиняє глобальне зменшення запасів MDC у ґрунті на 6,7 Pg, що еквівалентно 1,4 % від загального запасу MDC або 0,9 % від атмосферного пулу вуглецю. Проте розуміння просторової та часової динаміки запасів MDC обмежене через мінливість мікробіому й високу чутливість до погодних умов. Низкою досліджень показано критичну роль, яку ґрунтові мікроорганізми відіграють не лише у втраті органічного вуглецю

шляхом мікробного розкладання, але й у формуванні та персистенції SOC, що підтверджується коваріацією між мікробною біомасою, некромасою та вмістом SOC. Хоча існує багато шляхів, через які мікроорганізми впливають як на накопичення, так і на втрату органічної речовини ґрунту, ефективність використання мікробного вуглецю (CUE) є інтегральним показником, який відображає баланс цих процесів [14–16]. Розуміння зазначених процесів та управління ними є ключовими для пом'якшення наслідків змін клімату [16–18].

У глобальному масштабі відносний розподіл SOC з глибиною мав дещо сильніший зв'язок із рослинністю, ніж з кліматом, але навпаки для абсолютної кількості SOC [7; 13]. Загальний вміст SOC збільшувався з опадами й вмістом глини та зменшувався за підвищення температури. У цьому аналізі вплив типу рослинності був важливішим, ніж прямий вплив опадів. Отримані дані свідчать, що співвідношення пагони/корені у поєднанні з вертикальним розподілом коренів впливає на розподіл SOC із глибиною. Глобальне зберігання SOC у верхніх 3 м ґрунту становило 2344 Pg C ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ г}$), або на 56 % більше, ніж 1502 Pg, оцінені для першого метра. Глобальні суми для другого і третього метрів становили 491 і 351 Pg C, а біоми з найбільшою кількістю SOC на глибині 1–3 м були тропічними вічнозеленими лісами (158 Pg C) і тропічними луками / саванами (146 Pg C) [7; 19]. Отже, однією з найбільших невизначеностей у земному циклі вуглецю є час і величина реакції SOC на параметри клімату та рослинності. Ця невизначеність заважає створенням моделям адекватно фіксувати динаміку SOC і ставить під сумнів оцінку впливу управління та зміни клімату на ґрунти. Зменшення зазначених невизначеностей потребує одночасного дослідження чинників, що контролюють кількість (поширеність SOC) і тривалість (стійкість SOC) [9]. Порівняно нещодавно запропоновано концепцію ґрунтового «мікробного вуглецевого насоса» (MCP) [18; 20], згідно з якою біомаса і некрома мікроорганізмів відіграють ключову роль у формуванні SOC унаслідок постійної мікробної трансформації органічного C з лабільних у стійкі анаболічні форми.

Жива біомаса бактерій та мікроміцетів активізує розкладання некромаси, сприяючи утворенню стабільних форм вуглецю в ґрунті [21]. Мікробіом агроєкосистем може бути природним, як результат довготривалої екологічної сукцесії, або штучно сформованим, який створюється через інтродукцію представників різних груп мікроорганізмів, інокуляцію пробіотиками, біовуглем та іншим [22; 23].

Мікробна некрома складає значну частину стабільного органічного вуглецю (SOC) в ґрунті, особливо в агроєкосистемах з багаторічними культурами [18; 19; 21]. Дослідження Zhou et al. [24] показують, що застосування азотних добрив збільшує вміст вуглецю загальної мікробної некромаси на 12 %, покривні культури — на 14 %, відсутність або скорочення обробітку ґрунту — на 20 %, гною — на 21 %; соломи — на 21 %. Накопичення мікробної некромаси не залежало від додавання біовугілля. В іншому досліді встановлювали закономірності впливу додавання поживних речовин, потепління, CO₂, посухи на біомаркери мікробної некромаси у ґрунтах під сільськогосподарськими угіддями, лісами й луками. Додавання азоту в поєднанні з P і K збільшило вміст мікроміцетів (+ 21 %), бактерій (+ 22 %) та загальних аміноцукрів (+ 9 %), що призвело до збільшення утворення SOC. Додавання лише азоту збільшило виключно бактеріальну некромасу (+ 10 %), оскільки зменшення обмеження N стимулювало ріст бактерій більше, ніж мікроміцетів [25].

Детально зосередимось на двох ключових функціях мікробного угруповання в циклі вуглецю — взаємодії з рослинами та деструкції органічних речовин агроєкосистем і утворенні SOC. У сучасному сільськогосподарському виробництві дедалі більшого значення набуває цілеспрямоване формування та коригування мікробних угруповань агроценозів через інтродукцію агрономічно цінних мікроорганізмів, що зі свого боку дозволяє як оптимізувати біогеохімічні процеси в ґрунті, так і підвищити адаптивний потенціал агроєкосистем до кліматичних викликів. Ефективний мікробіом забезпечує результативний обмін вуглецевими сполуками між кореневими ексудатами й метаболітами мікроорганізмів та посилює секвестрацію

вуглецю [21; 27; 28]. Відомо, що мікроорганізми беруть участь у стабілізації органічного вуглецю через формування ґрунтових агрегатів. Такі структури утворюються внаслідок об'єднання мінеральних частинок і органічної речовини, зокрема гумусу та мікробних метаболітів. Так забезпечується фізичний захист органічного вуглецю від мінералізації внаслідок обмеження доступу мікроорганізмів і ферментів до органічної речовини. Дослідження показують, що до 90 % органічного вуглецю у верхньому шарі ґрунту зберігається в агрегатах [29; 30].

Рослинно-мікробні взаємодії. Штучно сформовані чи модифіковані мікробіоми ґрунту шляхом інтродукції специфічних функціонально активних мікроорганізмів — це не лише нові горизонти, а й найбільш економічно доцільні підходи в управлінні ґрунтовим вуглецем.

Взагалі взаємодія між рослинами та ґрунтовими мікроорганізмами є ключовим чинником в адаптації до навколишнього середовища та вегетації рослин [30; 37]. Основою інтенсивного хімічного діалогу між рослиною та ґрунтовими мікроорганізмами є специфічна область навколо кореня рослини, ризосфера [31–37]. Ризобактерії, що стимулюють ріст рослин (PGPR) взаємодіють з рослиною організмом за допомогою двох типів механізмів: прямих та непрямих. Прямі механізми пов'язані зі збільшенням доступності поживних речовин (фіксація азоту, розчинення неорганічних сполук фосфору і калію), синтезом фітогормонів (ауксинів, гіберелінів, цитокінів) [32; 33] та АСС-дезамінази (1-аміноклопропан-1-карбоксилат-дезамінази), ферменту, який пригнічує біосинтез стресового фітогормону етилену [34]. Непрямі механізми сприяють онтогенезу рослин через пригнічення фітопатогенів (синтез антибіотиків, сидерофорів, лізоцимів та ін.) і покращення стійкості до стресів за рахунок активізації імунної системи рослин [34; 37]. Серед різних PGPR представники родини *Bacillus* (роди *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Brevibacillus*, *Lysinibacillus* та *Viridiibacillus*) є одними з найбільш широко вивчених ризобактерій, що сприяють росту й розвитку рослин [36].

Рослини виділяють широкий спектр сполук різних класів, таких як флавоноїди, кумарини та ліпіди, для кондиціонування бак-

теріальних угруповань, а деякі метаболіти, такі як бензоксазиноїди, можуть метаболізуватися мікроорганізмами в антимікробні сполуки [31]. Взаємодія між рослинами та мікроорганізмами опосередковується сигнальними сполуками, які контролюють життєво важливі функції рослин, такі як, наприклад, утворення бульбочок, захист та аллопатія. Проведено дослідження, які свідчать, що органічний вуглець у ґрунті зменшує час існування флавоноїдів, що перебувають в основі взаємодії рослин та мікроорганізмів. Виявлено, що підвищений вміст органічного вуглецю у ґрунтах пригнічує сигнали флавоноїдів до 70 %. До 63 % репресії сигналізації відбувається між розчиненим органічним вуглецем і флавоноїдами, а не через сорбцію флавоноїдів на тверді частинки органічного вуглецю [22].

Аналіз низки вітчизняних та зарубіжних досліджень [34; 36; 38–50], присвячених впливу PGPR на онтогенез сільськогосподарських культур, урожайність та якість продукції, фотосинтетичну діяльність тощо, свідчить, що мікроміцети родів *Penicillium* та *Chaetomium* сприяли збільшенню біомаси рослин на 10–15 %, як порівняти з контролем [38]. Іншими дослідженнями показано, що інтродукція штамів бактерій *Pseudomonas putida* S1Pfl і *Pseudomonas* spp. 5Vm1K шляхом передпосівної обробки насіння цукіні сприяла збільшенню тривалості цвітіння і кількості квіток та плодів [41]. Хоміна зі співавт. [42] показали, що інокулянт на основі *Rhizobium japonicum* сприяв збільшенню надземної та кореневої системи рослин сої на 50 %, що дозволило збільшити вміст азоту в тканинах на 45 %. Водночас інокулянти на основі *Azospirillum brasilense* на сої сприяли підвищенню вмісту азоту в рослинах на 25 %, але без утворення бульбочок. Отже, це дослідження і подібні до нього свідчать, що рівень азотфіксації в рослинно-мікробних асоціаціях і симбіозах впливає на цикл вуглецю, а саме потік органічного вуглецю в ґрунті через накопичення біомаси, синтез корневих ексудатів та інтенсивність фотосинтезу.

Експерименти в умовах польових господарств Канади та Німеччини засвідчили, що застосування мікробних інокулянтів (наприклад, *Bacillus megaterium* у поєднанні з АМФ-грибами) може підвищити фіксацію

органічного вуглецю в ґрунті до 15–20 % упродовж 3–5 років, як порівняти з контрольними ділянками без мікробного втручання [36; 37; 43–45]. Практично доведено, що інокуляція AMF підвищувала чисту фотосинтетичну активність чотирьох видів рослин на 15,3–33,1 % та збільшила накопичення вуглецю в ґрунті в середньому на 17,2 % проти контролю [45]. Іншими дослідженнями показано, що симбіотичні зв'язки між AMF та рослинами-господарями безпосередньо впливають на зберігання SOC у ґрунті. На основі даних із 2296 польових ділянок у луках Китаю встановлено, що симбіоз мікоризних грибів посилює зберігання SOC в орному та підорному шарах ґрунту за рахунок збільшення підземної частини, а саме співвідношення коренів до пагонів [45]. Оліферчук зі співавт. [39] вивчено вплив різних способів внесення мікоризного препарату Міковітал, біоагентом якого є мікроміцет *Tuber melanosporum* IMB F-100106, на ріст, розвиток та продуктивність фундука сорту Шедевр. Зафіксовано, що діаметр кореневої шийки рослин зріс на 10,2 %, кількість основних коренів збільшилася на 12,2 % та довжина коренів — на 13,9 %. Відзначено також зростання загальної кількості листків на 14,0 %, довжини річного приросту — на 14,4 % та висоти саджанців — на 12,9 %. Кореневе підживлення 2–5 %-ми розчинами Міковітал забезпечило підвищення рівнів урожайності фундука до 21,7–22,4 ц/га з отриманням приросту врожаю на 10,2–13,7 %. Найвірогідніше, високий рівень ефективності від інокуляції мікоризними грибами (AMF) залежить від того, що мікроміцети функціонують на межі розділу між корінням рослин та ґрунтом, діють як основний канал для рослинного вуглецю, розподіляючи його через свої гіфи в навколишню ґрунтову матрицю. Окрім того, мікоризні екsudати та оновлення грибних гіф сприяють формуванню мікробної некромаси, що є домінантним чинником утворення та стабілізації органічної речовини [46].

Дослідженнями Averill et al. [47] показано, що інтродукція мікроорганізмів, типових для досліджуваного типу ґрунту, дозволяє відновити екосистеми в середньому на 64 % незалежно від регіону дослідження, оскільки безпосередньо сприяє збільшенню первинного виробництва та запасів вуглецю в ґрунті. Інші дослідження, зокрема Maddhe-

siya et al. [48], підтверджують позитивний вплив консорціуму PGPR (*Pseudomonas protegens*, *Bacillus paramycoides*) при вирощуванні багаторічних ароматичних трав (ветивер, лемонграс) на покращення секвестрації вуглецю в ґрунті завдяки підвищенню співвідношення C:N та активізації мікробіологічної активності.

Отже, резюмуючи викладене, вважаємо, що інтродукція PGPR у кореневу систему рослин впливає на вміст, накопичення та трансформацію SOC опосередкованим шляхом, через низку взаємопов'язаних механізмів:

- коригування аборигенних угруповань мікроорганізмів за штучного їх збагачення представниками мікробіоти з високою метаболічною активністю → утворення агрегатів «мікроорганізми – ґрунт», де вуглець зв'язується в органо-мінеральні комплекси, внаслідок чого і зменшуються його втрати;

- збільшення біомаси рослин в агроценозі → збільшення кількості надземних і підземних органічних залишків → зростання вуглецевого потоку в ґрунті;

- надходження корневих екsudатів рослин у ґрунт → створення трофічного ресурсу для мікроорганізмів, які формують гумус;

- підвищення рівня доступності поживних речовин ґрунту → сприяння онтогенезу рослин і активізації фотосинтезу, внаслідок чого зростає рослинна біомаса і, відповідно, кількість органічних сполук;

- синтез фітогормонів, антистресантів → підвищення стресостійкості і адаптивності рослин → закріплення вуглецю в органічних сполуках рослин.

Деструкція органічних речовин агроєкосистем за дії мікроорганізмів є ключовим процесом, що забезпечує колообіг поживних речовин, покращує структуру ґрунту, створює нові мікробіоти та сприяє сталому сільському господарству. Застосування біопрепаратів, що містять специфічні мікроорганізми, дозволяє прискорити розкладання органічних залишків, підвищити продуктивний потенціал ґрунту за рахунок інтродукції агрономічно корисних мікроорганізмів і збільшення ферментативної активності ґрунту та зменшити потребу в хімічних добривах.

Процеси деструкції охоплюють: перетворення органічних сполук у неорганічні форми, доступні для рослин (мінералізація),

утворення стабільних гумусових речовин, що покращують структуру ґрунту (гуміфікація). За експертними оцінками, глобальне виробництво органічних / поживних залишків в агроєкосистемах оцінюється в 3,8 мільярда тонн на рік, де 74 % — від зернових культур, 10 % — від цукрових рослин, 8 % — від бобових, 5 % — від бульб та 3 % — від олійних культур [49]. Відомо, що близько 75–80 % органічної речовини, яка щорічно потрапляє в ґрунт (органічні добрива, рослинні й тваринні рештки), проходить процеси мінералізації, і лише 20–25 % її трансформується в нові стабільні органічні сполуки [50; 51]. Доведено, що заорювання соломи та інших органічних решток у ґрунт упродовж 7–8 років підвищує вміст гумусу в дерново-підзолистому ґрунті на 0,24 %, південному чорноземі — на 0,2 % [52; 53]. У періодичних виданнях з'явилась інформація, що за використання комплексних біопрепаратів для деструкції органічних решток спостерігається ефект мікробіологічного вирівнювання ґрунтових умов (МВГУ). Автори дослідження наголошують, що мікробні препарати створюють, а подекуди й індукують нові ефективні мережі мікроорганізмів, які дозволяють зберегти енергетичні ресурси й поживні речовини, розподіливши їх рівномірно в ґрунті [54]. Рослинні залишки спричиняють швидку іммобілізацію азоту, що впливає на чисельність мікроорганізмів та активність мікробної біомаси ґрунту. Одна частина перетвореної речовини засвоюється мікробами і трансформується в їхні тканини, а інша використовується для окислення, для отримання енергії (дисиміляція). Коефіцієнт дисиміляції до асиміляції залежить від типу мікроорганізму [55]. У цих заємопов'язаних процесах ключові ролі належать целюлозолітичним бактеріям (*Cellulomonas*, *Cellvibrio*, *Bacillus*, *Clostridium*) [49; 56], геміцелюлолітичним (*Bacillus*, *Streptomyces*, *Actinomyces*) [49; 57] та лігнінолітичним мікроорганізмам (*Azotobacter*, *Pseudomonas*, *Trichoderma*, *Ganoderma*) [49; 58; 59]. Всі ці мікроорганізми здатні синтезувати низку ферментів, таких як целюлази, геміцелюлази та лігнінази, які розщеплюють складні органічні молекули на простіші сполуки.

Мікроорганізми під час мінералізації речовини вивільняють азот і вуглець для своїх конструктивних метаболічних процесів.

Водночас збільшення чисельності мікроорганізмів та мікробної біомаси в ґрунті супроводжується накопиченням біологічно активних речовин і ферментів, які забезпечують перебіг основних ґрунтоутворних процесів. Варто зауважити, що співвідношення C:N у поживних рештках сільськогосподарських культур різне і є ключовим регулятором швидкості та напрямку колообігу вуглецю в агроєкосистемах. Так, у пшениці C:N близько 80:1, кукурудзи — C:N 50:1, сої — C:N 30:1. У ґрунті найчастіше можна зустріти співвідношення C:N 10–12:1. Встановлено, що солома сільськогосподарських культур найкраще піддається деструкції за співвідношення C:N, що складає 20–25:1 [25; 52; 53]. Оскільки високе співвідношення C:N (наприклад, у солomé злаків) уповільнює мінералізацію органічної речовини, через те що мікроорганізми при розкладанні потребують додаткового азоту для синтезу біомаси, це сприяє більшій стабілізації вуглецю у складі гумусу. Натомість низьке співвідношення C:N (наприклад, у бобових рештках чи молодих рослинних тканинах) призводить до швидкої мінералізації та викидів CO₂ [60; 61].

Низкою досліджень показано позитивний вплив внесення соломи в ґрунт на вміст SOC та загального азоту [62; 63]. Так, застосування соломи, збагаченої аміачним добривом, у середньому збільшувало вміст SOC у ґрунті на глибині 0–10 см на 14,2–17,2 % і вміст загального азоту — на 18,3–27,3 %. На глибині 10–20 см відзначали також збільшення вмісту SOC на 12,4–19,2 % і загального азоту — на 19,4–27,8 %. Окрім того, фіксували позитивні зв'язки між змінами врожайності пшениці та вмістом SOC і загального азоту. Liu et al. [64] на основі метааналізу 176 опублікованих польових досліджень дійшли висновку, що додавання соломи в ґрунт збільшувало вміст вуглецю в ґрунті орних земель на 13 %.

Застосування біопрепаратів на основі мікроорганізмів різних еколого-трофічних та таксономічних груп із целюлозолітичними властивостями є одним із дієвих та ефективних способів деструкції органічного матеріалу в агроєкосистемах з подальшим підвищенням урожайності сільськогосподарських культур та якості продукції [52; 54; 65–70]. Численними дослідженнями показано, що

використання деструкторів на основі бактерій, грибів або комплексу мікроорганізмів сприяє підвищенню целюлозолітичної активності в 1,5–3,0 раза залежно від діючих мікроорганізмів, погодних умов та вологозабезпеченості агроєкосистем. Використання деструкторів дозволяє знизити фітопатогенний фон агроценозу, за рахунок антагоністичних властивостей агентів біопрепаратів, підвищується загальна біологічна активність ґрунту [51–54; 66–70].

Розв'язати питання конверсії соломи / післяжнивних решток допомагають сучасні біологічні препарати, які містять агрономічно корисні мікроорганізми й продукти їх культивування. У переліку пестицидів і агрохімікатів України на початок 2025 року [69] зареєстровано більше ніж 25 біодеструкторів, які дозволяють прискорити розкладання органічного матеріалу в агроєкосистемах і відрізняються за діючим агентом та рівнем активності. Найчастіше серед запропонованих біопрепаратів застосовуються Екостерн, Целюлад Л, Polymix, MicoCell, Вермистим Д, Біонорма Деструктор, Деструктор Стерні (ДЦ), Plantonit Destrutor, Біокомплекс-БТУ, Біосистемс, Органік Баланс, Лінгогумат, Ризобакт Гуміфікатор та багато інших.

Науковцями Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН [72] доведено, що застосування *Chaetomium globosum* 377 як деструктора пшеничної соломи сприяє зниженню в ризосфері рослин кукурудзи чисельності представників родів *Fusarium* Link. та *Bipolaris* Shoemaker. Отже, внесення в агроєкосистеми *C. globosum* 377 дозволяє підвищити антагоністичний потенціал ризосферного ґрунту кукурудзи та захистити рослини від збудників захворювань. Іншими дослідженнями показано, що застосування мікробних препаратів у поєднанні з системою удобрення НРК + гній + сидерат здатні збільшити вміст гумусу на 0,16 т/га за ротацію сівозміни [72]. Встановлено, що поєднання оранки з біодеструкторами дозволяє отримати суттєве збільшення вмісту гумусу. Позитивний ефект автори пов'язують із покращенням діяльності мікроорганізмів за рахунок кращого розподілу по орному шару, поліпшення водного й поживного режимів ґрунту та наявності збільшеної кількості органічної речовини [54]. Іншими дослідженнями показано, що

інтродукція целюлозоруйнівних мікроорганізмів у ґрунт і розкладання органічних решток пов'язані безпосередньо з біосинтезом целюлаз, геміцелюлаз, лігніназ, які прискорюють розкладання соломи та вивільнення розчинних органічних сполук. Останні є базовим трофічним ресурсом для мікробіому. Експериментально доведено, що застосування *Trichoderma* spp. + *Bacillus subtilis* підвищує активність β -глюкозидази на 45 %, що зі свого боку сприяє зростанню SOC на 12 % за сезон [73].

Як підсумок: мікробна деструкція органічних речовин є важливою складовою циклу вуглецю в агроєкосистемах, що визначає не тільки здоров'я ґрунту, а й продуктивність сільськогосподарських культур. Отже, застосування біопрепаратів для деструкції органічних речовин в агроєкосистемах є важливим кроком до сталого розвитку сільського господарства, який дозволяє значно підвищити ефективність використання ресурсів, зберегти екологічну рівновагу й зменшити вплив традиційних хімічних методів на довкілля.

Висновки. Штучно створені мікробіоти у ґрунтах агроєкосистем дають змогу стабілізувати вуглецеві потоки, поліпшити родючість ґрунтів, підвищити стійкість сільськогосподарських культур до екстремальних погодних умов.

Ґрунтові мікроорганізми є центральним рушієм формування стабільного ґрунтового органічного вуглецю (SOC). Значна частина SOC представлена біомасою і некримасою мікроорганізмів. Але визначальними чинниками у формуванні стабільного ґрунтового органічного вуглецю є підземна біомаса рослин і їхні кореневі ексудати (склад, кількість). Фундаментальним регулятором як кількісної, так і якісної динаміки SOC є рослинно-мікробні взаємодії, які виникають між рослиною і аборигенними чи інтродукованими мікроорганізмами.

Потенціал штучно сформованих мікробіотів для управління циклом вуглецю є значним, водночас це потребує подальших досліджень. Зокрема, важливо дослідити, як такі мікробіоти взаємодіють із різними типами ґрунтів і кліматичними умовами, а також із різними агрохімікатами, що використовуються в сільському господарстві. Враховуючи те, що агроєкосистеми є складними

і багатофакторними середовищами, подальші розробки дозволять створити адаптовані рішення для різних регіонів, що сприятимуть максимальному використанню потенціалу мікробіомів для поліпшення екологічних і агрономічних характеристик ґрунтів.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Кругообіг вуглецю: характеристики, стадії, значення та зміни. Режим доступу: <https://www.jardineriaon.com/uk/ciclo-del-carbono.html>
2. The ocean and the carbon cycle. Режим доступу: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/689-the-ocean-and-the-carbon-cycle>
3. Zehnder C., Manoylov K., Mutiti S., Mutiti Ch., VandeVoort A., Bennett D. Climate Change. *Introduction to Environmental Science: 2nd Edition*. Athens : University System of Georgia, 2018. 160 p. <https://oer.galileo.usg.edu/biology-textbooks/4>
4. Heimann M. Dynamics of the carbon cycle. *Nature*. 1995. № 375. P. 629–630 <https://doi.org/10.1038/375629a0>
5. Бедернічек Т. Ю. Резервуари і потоки карбону в наземних екосистемах України. *Вісник Національної академії наук України*. 2017. № 1. С. 98–106. <https://doi.org/10.15407/visn2017.01.098>
6. Moore J. A. M., Sulman B. N., Mayes M. A., Patterson C. M., Classen A. T. Plant roots stimulate the decomposition of complex, but not simple, soil carbon. *Funct Ecol*. 2020. № 34. P. 899–910. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13510>
7. Jobbagy E. G., Jackson R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*. 2000. Vol. 10, Is. 2. P. 423–436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)
8. Phillips R. P., Meier I. C., Bernhardt E. S., Grandy A. S., Wickings K., Finzi A. C. Roots and fungi accelerate carbon and nitrogen cycling in forests exposed to elevated CO₂. *Ecology Letters*. 2012. Vol. 15, Is. 9. P. 1042–1049. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01827.x>
9. Purohit H. J., Pandit P., Pal R., Warke R., Warke G. M. Soil microbiome: An intrinsic driver for climate smart agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2024. Vol. 18. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101433>
10. Tecon R., Or D. Biophysical processes supporting the diversity of microbial life in soil. *FEMS Microbiology Reviews*. 2017. Vol. 41, Is. 5. P. 599–623. <https://doi.org/10.1093/femsre/fux039>
11. Liang Y., Hu H., Crowther T. W., Jørgensen R. G., Liang C., Chen J. ... Zhang J. Global decline in microbial-derived carbon stocks with climate warming and its future projections. *National Science Review*. 2024. № 11. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwae330>
12. Ekschmitt K., Kandeler E., Poll C., Brune A. Buscot F., Friedrich M., Gleixner G. ... Wolters V. Soil-carbon preservation through habitat constraints and biological limitations on decomposer activity. *J. Plant Nutr. Soil Sci*. 2008. Vol. 171. P. 27–35. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700051>
13. Liang C. Soil microbial carbon pump: Mechanism and appraisal. *Soil Ecol. Lett*. 2024. № 2. P. 241–254. <https://doi.org/10.1007/s42832-020-0052-4>
14. Kallenbach C., Frey S., Grandy A. Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. *Nat Commun*. 2016. № 7. <https://doi.org/10.1038/ncomms3630>
15. Woolf D., Lehmann J. Microbial models with minimal mineral protection can explain long-term soil organic carbon persistence. *Sci. Rep*. 2019. № 9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43026-8>
16. Tao F., Huang Y., Hungate B. A., Manzoni S., Frey S. D., Schmidt M. W. I. ... Luo Y. Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage. *Nature*. 2023. № 618. P. 981–985. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06042-3>
17. Fierer N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*. 2017. № 15. P. 579–590. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87>
18. Qin H., Liu Y., Chen C., Chen A., Liang Y., Cornell C. R. ... Zhu B. Differential contribution of microbial and plant-derived organic matter to soil organic carbon sequestration over two decades of natural revegetation and cropping. *Sci Total Environ*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174960>
19. von Fromm S. F., Hoyt A. M., Sierra C. A., Georgiou K., Doetterl S., Trumbore S. E. Controls and relationships of soil organic carbon abundance and persistence vary across pedo-climatic regions. *Glob Chang Biol*. 2024. Vol. 30, Is. 5. e17320. <https://doi.org/10.1111/gcb.17320>
20. Liang C., Schimel J. P., Jastrow J. D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology*. 2017. № 2. 17105. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2017.105>
21. Frac M., Hannula E. S., Belka M., Salles J. F., Jedryczka M. Soil mycobiome in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1033824>
22. Del Valle I., Webster T. M., Cheng H. Y., Thies J. E., Kessler A., Miller M. K. ... Lehmann J. Soil organic matter attenuates the efficacy of flavonoid-based plant-microbe communication. *Sci Adv*. 2020. Vol. 6, Is. 5. eaax8254. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aax8254>
23. Zhu X., Min K., Feng K., Xie H., He H., Zhang X. ... Liang C. Microbial necromass contri-

- bution to soil carbon storage via community assembly processes. *Sci Total Environ.* 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175749>
24. Zhou R., Liu Y., Dungait J. A. J., Kumar A., Wang J., Tiemann L. K. ... Tian J. Microbial necromass in cropland soils: A global meta-analysis of management effects. *Glob Chang Biol.* 2024. Vol. 29, Is. 7. P. 1998–2014. <https://doi.org/10.1111/gcb.16613>
25. Hu J., Du M., Chen J., Tie L., Zhou S., Buckeridge K. M. ... Kuzyakov Y. Microbial necromass under global change and implications for soil organic matter. *Glob Chang Biol.* 2023. Vol. 29, Is. 12. P. 3503–3515. <https://doi.org/10.1111/gcb.16676>
26. Wu H., Cui H., Fu Ch., Li R., Qi F., Liu Z. ... Qiao M. Unveiling the crucial role of soil microorganisms in carbon cycling: A review. *Science of The Total Environmen.* 2024. № 909. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.1686272017.105>
27. Zhu X., Jackson R. D., DeLucia E. H., Tiedje J. M., Liang C. The soil microbial carbon pump: From conceptual insights to empirical assessments. *Glob Change Biology.* 2020. Vol. 26, Is. 11. P. 6032–6039. <https://doi.org/10.1111/gcb.15319>
28. Zhao Z., Mao Y., Gao S., Lu C., Pan C., Li X. Organic carbon accumulation and aggregate formation in soils under organic and inorganic fertilizer management practices in a rice–wheat cropping system. *Sci Rep.* 2023. № 13. 3665. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30541-y>
29. Zhou M., Liu C., Wang J., Meng Q., Yuan Y., Ma X. ... Du W. Soil aggregates stability and storage of soil organic carbon respond to cropping systems on Black Soils of Northeast China. *Sci Rep.* 2020. № 10. 265. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57193-1>
30. Cosme M. Mycorrhizas drive the evolution of plant adaptation to drought. *Commun Biol.* 2023. № 6. 346. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-04722-4>
31. McLaughlin S., Zhalnina K., Kosina S., Northen T. R., Sasse J. The core metabolome and root exudation dynamics of three phylogenetically distinct plant species. *Nat. Commun.* 2023. № 14. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37164-x>
32. Fitzpatrick C. R., Salas-Gonzalez I., Conway J. M., Finkel O. M., Gilbert S., Russ D. ... Dangl J. L. The Plant Microbiome: From Ecology to Reductionism and Beyond. *Annual Review of Microbiology.* 2020. Vol. 74. P. 81–100. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-022620-014327>
33. Bennett J. A., Klironomos J. Mechanisms of plant–soil feedback: interactions among biotic and abiotic drivers. *New Phytologist.* 2019. № 222. P. 91–96. <https://doi.org/10.1111/nph.15603>
34. Kelbessa B. G., Dubey M., Catara V., Ghadamgahi F., Ortiz R., Vetukuri R. R. Potential of plant growth-promoting rhizobacteria to improve crop productivity and adaptation to a changing climate. *CABI Reviews.* 2023. <https://doi.org/10.1079/cabreviews.2023.0001>
35. Ajijah N., Fiodor A., Pandey A. K., Rana A., Pranaw K. Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB) with Biofilm-Forming Ability: A Multifaceted Agent for Sustainable Agriculture. *Diversity.* 2023. Vol. 15, Is. 1. 112. <https://doi.org/10.3390/d15010112>
36. Tiwari S., Prasad V., Lata Ch. Bacillus: Plant Growth Promoting Bacteria for Sustainable Agriculture and Environment (Chapter 3). J. Sh. Singh, D. P. Singh (Eds.). *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering.* Elsevier, 2019. P. 43–55. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64191-5.00003-1>
37. Dutta P., Muthukrishnan G., Gopalasubramaiam S. K., Dharmaraj R., Karuppaiah A., Loganathan K. ... Mishra A. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and its mechanisms against plant diseases for sustainable agriculture and better productivity. *Biocell.* 2022. Vol. 46, Is. 8. P. 1843–1859. <https://doi.org/10.32604/biocell.2022.019291>
38. Zhang E., Wang Y., Crowther T. W., Sun W., Chen S., Zhou D. ... Yu G. Mycorrhiza increases plant diversity and soil carbon storage in grasslands. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2025. Vol. 122, № 7. e2412556122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2412556122>
39. Оліферчук В. П., Федорович Д. В. Вплив мікоризного гриба *Tuber melanosporum* на біорізноманіття мікроміцетів ризосфери та ріст і продуктивність фундука. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2021. Т. 31, № 2. С. 28–34. <https://doi.org/10.36930/40310204>
40. Gul S., Javed S., Azeem M., Aftab A., Anwaar N., Mehmood T., Zeshan B. Application of *Bacillus subtilis* for the Alleviation of Salinity Stress in Different Cultivars of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy.* 2023. Vol. 13, Is. 2. 437. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020437>
41. Маслоїд А. П. Вплив систем удобрення та передпосівної інокуляції на фосфатмобілізувальні бактерії ризосфери цукрового буряку. *Збалансоване природокористування.* 2021. № 4. С. 135–143. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2021.253100>
42. Хоміна В., Лапчинський В., Пустова З., Небаба К., Плахтій Д. Мікробні інокулянти як засіб підвищення врожайності ґрунту та сільськогосподарських культур. *Наукові горизонти.* 2024. Т. 27, № 10. С. 79–90. <https://doi.org/10.48077/scihor10.2024.79>
43. Marulanda-Aguirre A., Azcon R., Ruiz-Lozano J. M., Aroca R. Differential Effects of a *Bacillus megaterium* Strain on *Lactuca sativa*. Plant Growth Depending on the Origin of the Arbuscular

- Mycorrhizal Fungus Coinoculated: Physiologic and Biochemical Traits. *J. Plant Growth Regul.* 2008. № 27. P. 10–18. <https://doi.org/10.1007/s00344-007-9024-5>
44. Nanjundappa A., Bagyaraj D. J., Saxena A. K., Kumar M., Chakdar H. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus* spp. in soil enhancing growth of crop plants. *Fungal Biology & Biotechnology.* 2019. № 6. 23. <https://doi.org/10.1186/s40694-019-0086-5>
45. Wang Z. G., Bi Y. L., Jiang B., Zhakypbek Y., Peng S.-P., Liu W.-W., Liu H. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance soil carbon sequestration in the coalfields, northwest China. *Sci Rep.* 2016. № 6. 34336. <https://doi.org/10.1038/srep34336>
46. Mason A. R. G., Salomon M. J., Lowe A. J., Cavagnaro T. R. Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation and biochar application enhance soil carbon and productivity in wheat and barley. *Science of The Total Environment.* 2025. Vol. 977. 179230. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179230>
47. Averill C., Anthony M. A., Baldrian P., Finkbeiner F., Hoogen J., Kiers T. ... Crowther T. W. Defending Earth's terrestrial microbiome. *Nat. Microbiol.* 2022. Vol. 7. P. 1717–1725. <https://doi.org/10.1038/s41564-022-01228-3>
48. Grover M., Bodhankar S., Sharma A., Sharma P., Singh J., Nain L. PGPR Mediated Alterations in Root Traits: Way Toward Sustainable Crop Production. *Front. Sustain. Food Syst.* 2021. Vol. 4. 618230. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.618230>
49. Копилов Є. П., Шаховніна О. О., Надкєрнична О. В., Новікова Т. П., Тарасов, В. В. Мікроріцети кореневої зони рослин сої культурної та їхня функціональна дія на рослини. *Сільськогосподарська мікробіологія.* 2022. Вип. 36. С. 13–27. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.36.13-27>
50. Писаренко В. М., Піщаленко М. А., Чайка Т. О., Логвиненко В. В., Крупська Н. Ю., Королев'ят Я. І., Кіреєв Ю. О. Вплив біостимуляторів на рослини цукіні за умови передпосівної обробки насіння. *Scientific Progress & Innovations.* 2023. Т. 26, № 4. P. 9–13. <https://doi.org/10.31210/spi2023.26.04.02>
51. Grzyb A., Wolna-Maruwka A., Niewiadomska A. Environmental Factors Affecting the Mineralization of Crop Residues. *Agronomy.* 2020. Vol. 10, № 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121951>
52. Pikula D., Ciotucha O. The Composition of the Organic Matter Fractions of Loamy Sand after Long-Term FYM Application without Liming. *Agronomy.* 2022. Vol. 12, № 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102385>
53. Rowinska P., Gutarowska B., Janas R., Szulc J. Biopreparations for the decomposition of crop residues. *Microbial Biotechnology.* 2024. Vol. 17, Is. 8. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14534>
54. Гадзало Я. М., Вожегова Р. А., Лікар Я. О. Ефективність застосування мікробних препаратів деструкторів на рослинних рештках у процесі їх мінералізації після збирання. *Аграрні інновації.* 2023. № 19. С. 24–33. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.19.4>
55. Токмакова Л., Трепач А. Мікробіологічна деструкція органічної речовини в агроценозах. *Вісник аграрної науки.* 2022. Т. 100, № 2. С. 19–26. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202202-03>
56. Бунас А. А., Ткач Є. Д., Дворецький В. В., Дворецька О. М. Ефективність застосування препарату Біосистем Power, КС (Biosistem Power, SC) для прискорення деструкції післяжнивних решток. *Агроекологічний журнал.* 2022. № 3. С. 119–125. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266417>
57. Przulj N., Tunguz V. Significance of harvest residues in sustainable management of arable land I. Decomposition of harvest residues. *Archives for Technical Sciences.* 2022. № 26. P. 61–70. <https://doi.org/10.7251/afts.2022.1426.061p>
58. Hema J. N., Shobha, Shruthi S. D. Isolation and characterization of cellulose-degrading bacteria from decomposing plant matter. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences.* 2023. Vol. 15, Is. 4. P. 22–27. <https://doi.org/10.22159/ijpps.2023v15i4.47019>
59. Robl D., Mergel C. M., Costa P. S., Pradel-la J. G. C., Padilla G. Endophytic actinomycetes as potential producers of hemicellulases and related enzymes for plant biomass degradation. *Brazilian Archives of Biology and Technology.* 2019. № 62. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2019180337>
60. Li H., Qiu Y., Yao T., Ma Y., Zhang H., Yang X. Effects of PGPR microbial inoculants on the growth and soil properties of *Avena sativa*, *Medicago sativa*, and *Cucumis sativus* seedlings. *Soil and Tillage Research.* 2020. Vol. 199. 104577. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104577>
61. Cotrufo M. F., Haddix M. L., Kroeger M. E., Stewart C. E. The role of plant input physical-chemical properties, and microbial and soil chemical diversity on the formation of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry.* 2022. Vol. 168. 108648. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108648>
62. Berhane M., Xu M., Liang Z., Shi J., Wei G., Tian X. Effects of long-term straw return on soil organic carbon storage and sequestration rate in North China upland crops: A meta-analysis. *Glob Chang Biol.* 2020. Vol. 26, Is. 4. P. 2686–2701. <https://doi.org/10.1111/gcb.15018>
63. Li Y., Feng H., Dong Q., Xia L., Li J., Li Ch. ... Chen J. Ammoniated straw incorporation increases wheat yield, yield stability, soil organic carbon and soil total nitrogen content. *Field Crops*

Research. 2022. Vol. 284. 108558. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108558>

64. Liu E., Yan Ch., Mei X., He W., Bing S. H., Ding L. ... Fan T. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China. *Geoderma*. 2010. Vol. 158, Is. 3–4. P. 173–180. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.029>

65. Rehman J. U., Joe E., Yoon H. Y., Kwon S., Oh M. S., Son E. J. ... Jeon J. Lignin Metabolism by Selected Fungi and Microbial Consortia for Plant Stimulation: Implications for Biologically Active Humus Genesis. *Microbiol Spectr*. 2022. <https://doi.org/10.1128/spectrum.02637-22>

66. Yang J., Zhao J., Jiang J., Xu H., Zhang N., Xie J., Wei M. Isolation and characterization of *Bacillus* sp. capable of degrading alkali lignin. *Frontiers in Energy Research*. 2021. № 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.807286>

67. Центило Л. В. Біологічна активність ґрунту за різних систем удобрення соняшнику та обробітку ґрунту. *Таврійський науковий вісник*. 2019. № 108. С. 117–122. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.108.16>

68. Мовчан І. П., Ткач Є. Д., Бунас А. А., Дворецький В. В. Мікробіоценоз ґрунту сільськогосподарських культур за дії біодеструкторів. *Збалансоване природокористування*. 2024. № 4. С. 129–135. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2024.319386>

69. Потапенко Л. В., Скачок Л. М., Горбаченко Н. І. Вплив тривалого застосування добрив та мікробних препаратів на баланс гумусу в дерново-підзолистому ґрунті. Актуальні питання сільськогосподарської мікробіології: матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (м. Чернігів, 4–5 вересня 2019 р.). Чернігів, 2019. С. 151–154.

70. Коваленко А. М., Новохижній М. В., Тимошенко Г. З., Сергєєва Ю. О. Особливості застосування деструкторів стерні в умовах степової зони. *Вісник аграрної науки*. 2020. Т. 98, № 2. С. 44–51. <https://doi.org/10.31073/agroviznyk202002-07>

71. Перелік пестицидів і агрохімікатів України. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/content/derzhavniy-reestr-pesticidiv-i-agrohimiaktiv-dozvolenih-do-vikoristannya-v-ukraini-dopovnennya-z-01012017-zgidno-vimog-postanovikabinetu-ministriv-ukraini-vid-21112007--1328.html>

72. Копилов Є. П., Скуловатов О. В. Мікоценоз кореневої зони рослин кукурудзи за використання *Chaetomium globosum* як деструктора соломи. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2017. Вип. 25. С. 31–35. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.25.31-35>

73. Shamshitov A., Kadziene G., Suproniene S. The Role of Soil Microbial Consortia in Sustainable Cereal Crop Residue Management. *Plants*. 2024. Vol. 13, № 6. 766. <https://doi.org/10.3390/plants13060766>

Отримано: 03.03.2025

Прийнято до друку: 12.05.2025

Опубліковано онлайн: 17.09.2025

THE ROLE OF THE ARTIFICIALLY FORMED SOIL MICROBIOME IN THE CARBON CYCLE

A. A. Bunas, <https://orcid.org/0000-0003-4806-7004>,

O. V. Sherstoboieva, <https://orcid.org/0000-0001-8239-0847>,

Ye. D. Tkach, <https://orcid.org/0000-0002-0666-1956>,

I. P. Movchan, <https://orcid.org/0009-0002-0647-6133>,

V. V. Dvoretzkyi, <https://orcid.org/0000-0001-8427-7813>

Institute of Agroecology and Environmental Management, NAAS, Kyiv
e-mail: bio-206316@ukr.net

Objective. To analyse the scientific literature on the role and impact of the artificially formed microbiome on the processes of carbon transformation in agroecosystems. **Methods.** Collection, analysis and synthesis. **Results.** The carbon cycle is a fundamental process that determines the balance of the element in the biosphere and affects the climate stability of the planet. Soil is one of the main carbon reservoirs, containing more carbon than the atmosphere and vegetation combined. In this context, the soil microbiome — a collection of bacteria, archaea, streptomycetes, micromycetes and other organisms that inhabit the soil medium, including the plant rhizosphere — plays a key role in the transformation, storage and mobilisation of carbon. Microorganisms catalyse the humification of organic matter, which results in the formation of stable forms of soil carbon that can remain in the soil for hundreds or even thousands of years. For example, by enhancing the formation of microbial biomass, about 2–4 tonnes of organic carbon per hectare can be stabilised annually in chernozem soils. Soil microbiomes artificially created using biotechnological methods open up new opportunities for managing carbon transformation and decreasing climate change consequences. **Conclusions.** Artificially created soil microbiomes are a promising tool for managing the carbon cycle and decreasing the effects of global climate change consequences. The large-scale implementation of biotechnological measures aimed at changing the composition and functioning of the soil microbiome will not only improve soil quality, but also conserve organic carbon and reduce greenhouse gas emissions. Further researches and developments in this area are necessary to fulfil the potential of artificially created microbiomes in sustainable agriculture.

Key words: microbiome, biological products, carbon cycle, agroecosystems, soil aggregates, “microbial carbon pump”, soil organic carbon (SOC).

REFERENCES

1. Kruhoobih vuhlecu: kharakterystyky, stadii, zna-chennia ta zminy [Carbon cycle: characteristics, stages, significance and changes]. (2025) [in Ukrainian]. URL: <https://www.jardineriaon.com/uk/ciclo-del-carbono.html>
2. The ocean and the carbon cycle. (2025). URL: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/689-the-ocean-and-the-carbon-cycle>
3. Zehnder, C., Manoylov, K., Mutiti, S., Mutiti, Ch., VandeVoort, A., & Bennett, D. (2018). Climate Change. *Introduction to Environmental Science: 2nd Edition*. Athens: University System of Georgia. <https://oer.galileo.usg.edu/biology-textbooks/4>
4. Heimann, M. (1995). Dynamics of the carbon cycle. *Nature*, 375, 629–630 <https://doi.org/10.1038/375629a0>
5. Bedernichek, T. Yu. (2017). Rezervuary i potoky karbonu v nazemnykh ekosystemakh Ukrainy [Carbon reservoirs and flows in terrestrial ecosystems of Ukraine]. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy — Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 1, 98–106 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/visn2017.01.098>
6. Moore, J. A., Sulman, B. N., Mayes, M. A., Patterson, C. M., & Classen, A. T. (2020). Plant roots stimulate the decomposition of complex, but not simple, soil carbon. *Funct Ecol*, 34, 899–910. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13510>
7. Jobbagy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Appli-*

- cations*, 10(2), 423–436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)
8. Phillips, R., Meier, I., Bernhardt, E., Grandy, A., Wickings, K., & Finzi, A. (2012). Roots and fungi accelerate carbon and nitrogen cycling in forests exposed to elevated CO₂. *Ecology Letters*, 15(9), 1042–1049. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01827.x>
 9. Purohit, H. J., Pandit, P., Pal, R., Warke, R., & Warke, G. M. (2024). Soil microbiome: An intrinsic driver for climate smart agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101433>
 10. Tecon, R., & Or, D. (2017). Biophysical processes supporting the diversity of microbial life in soil. *FEMS Microbiology Reviews*, 41(5), 599–623. <https://doi.org/10.1093/femsre/fux039>
 11. Liang, Y., Hu, H., Crowther, T. W., Jørgensen, R. G., Liang, C., Chen, J. ... Zhang, J. (2024). Global decline in microbial-derived carbon stocks with climate warming and its future projections. *National Science Review*, 11. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwae330>
 12. Ekschmitt, K., Kandeler, E., Poll, C., Brune, A. Buscot, F., Friedrich, M. ... Wolters, V. (2008). Soil-carbon preservation through habitat constraints and biological limitations on decomposer activity. *J. Plant Nutr. Soil Sci*, 171, 27–35. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700051>
 13. Liang, C. (2024). Soil microbial carbon pump: Mechanism and appraisal. *Soil Ecol. Lett*, 2, 241–254. <https://doi.org/10.1007/s42832-020-0052-4>
 14. Kallenbach, C., Frey, S., & Grandy, A. (2016). Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. *Nat Commun*, 7. <https://doi.org/10.1038/ncomms13630>
 15. Woolf, D., & Lehmann, J. (2019). Microbial models with minimal mineral protection can explain long-term soil organic carbon persistence. *Sci. Rep*, 9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43026-8>
 16. Tao, F., Huang, Y., Hungate, B. A., Manzoni, S., Frey, S. D., Schmidt, M. W. I. ... Luo, Y. (2023). Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage. *Nature*, 618, 981–985. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06042-3>
 17. Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10), 579–590. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87>
 18. Qin, H., Liu, Y., Chen, C., Chen, A., Liang, Y., Cornell C. R. ... Zhu B. (2024). Differential contribution of microbial and plant-derived organic matter to soil organic carbon sequestration over two decades of natural revegetation and cropping. *Sci Total Environ*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174960>
 19. von Fromm, S. F., Hoyt, A. M., Sierra, C. A., Georgiou, K., Doetterl, S., & Trumbore, S. E. (2024). Controls and relationships of soil organic carbon abundance and persistence vary across pedo-climatic regions. *Glob Chang Biol*, 30(5). e17320. <https://doi.org/10.1111/gcb.17320>
 20. Liang, C., Schimel, J. P., & Jastrow, J. D. (2017). The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology*, 2, 17105. <https://doi.org/10.1111/gcb.17320>
 21. Frac, M., Hannula, E. S., Belka, M., Sallés, J. F., & Jedryczka, M. (2022). Soil mycobiome in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1033824>
 22. Del Valle, I., Webster, T. M., Cheng, H. Y., Thies, J. E., Kessler, A., Miller, M. K. ... Lehmann, J. (2020). Soil organic matter attenuates the efficacy of flavonoid-based plant-microbe communication. *Sci Adv*, 6(5). eaax8254. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aax8254>
 23. Zhu, X., Min, K., Feng, K., Xie, H., He, H., Zhang, X. ... Liang, C. (2024). Microbial necromass contribution to soil carbon storage via community assembly processes. *Sci Total Environ*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175749>
 24. Zhou, R., Liu, Y., Dungait, J., Kumar, A., Wang, J., Tiemann L. K. ... Tian J. (2024). Microbial necromass in cropland soils: A global meta-analysis of management effects. *Glob Chang Biol*, 29(7), 1998–2014. <https://doi.org/10.1111/gcb.16613>
 25. Hu, J., Du, M., Chen, J., Tie, L., Zhou, S., Buckeridge, K. M. ... Kuzyakov, Y. (2023). Microbial necromass under global change and implications for soil organic matter. *Glob Chang Biol*, 29(12), 3503–3515. <https://doi.org/10.1111/gcb.16676>
 26. Wu, H., Cui, H., Fu, Ch., Li, R., Qi, F., Liu, Z. ... Qiao, M. (2024). Unveiling the crucial role of soil microorganisms in carbon cycling: A review. *Science of The Total Environmen*, 909. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.1686272017.105>
 27. Zhu, X., Jackson, R., DeLucia, E., Tiedje, J., & Liang C. (2020). The soil microbial carbon pump: From conceptual insights to empirical assessments. *Glob Change Biology*, 26(11), 6032–6039. <https://doi.org/10.1111/gcb.15319>
 28. Zhao, Z., Mao, Y., Gao, S. Lu, C., Pan, C., & Li, X. (2023). Organic carbon accumulation and aggregate formation in soils under organic and inorganic fertilizer management practices in a rice–wheat cropping system. *Sci Rep*, 13. 3665. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30541-y>
 29. Zhou, M., Liu, C., Wang, J., Meng, Q., Yuan, Y., Ma, X. ... Du, W. (2020). Soil aggregates stability and storage of soil organic carbon respond to cropping systems on Black Soils of Northeast China. *Sci Rep*, 10. 265 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57193-1>

30. Cosme, M. (2023). Mycorrhizas drive the evolution of plant adaptation to drought. *Commun Biol*, 6, 346. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-04722-4>
31. McLaughlin, S., Zhalnina, K., Kosina, S., Northen, T. R., & Sasse, J. (2023). The core metabolome and root exudation dynamics of three phylogenetically distinct plant species. *Nat Commun*, 14, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37164-x>
32. Fitzpatrick, C. R., Salas-Gonzalez, I., Conway, J. M., Finkel, O. M., Gilbert, S., Russ, D. ... Dangl, J. L. (2020). The Plant Microbiome: From Ecology to Reductionism and Beyond. *Annual Review of Microbiology*, 74, 81–100. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-022620-014327>
33. Bennett, J. A., & Klironomos, J. (2019). Mechanisms of plant–soil feedback: interactions among biotic and abiotic drivers. *New Phytologist*, 222, 91–96. <https://doi.org/10.1111/nph.15603>
34. Kelbessa, B. G., Dubey, M., Catara, V., Ghadamgahi, F., Ortiz, R., & Vetukuri, R. R. (2023). Potential of plant growth-promoting rhizobacteria to improve crop productivity and adaptation to a changing climate. *CABI Reviews*. <https://doi.org/10.1079/cabreviews.2023.0001>
35. Ajjah, N., Fiodor, A., Pandey, A., Rana, A., & Pranaw, K. (2023). Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB) with Biofilm-Forming Ability: A Multifaceted Agent for Sustainable Agriculture. *Diversity*, 15(1), 112. <https://doi.org/10.3390/d15010112>
36. Tiwari, S., Prasad, V., & Lata, Ch. (2019). Bacillus: Plant Growth Promoting Bacteria for Sustainable Agriculture and Environment. In J. Sh. Singh, D. P. Singh (Eds.). *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 43–55). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64191-5.00003-1>
37. Dutta, P., Muthukrishnan, G., Gopalasubramaiam, S. K., Dharmaraj, R., Karuppaiah, A., Loganathan K. ... Mishra A. (2022). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and its mechanisms against plant diseases for sustainable agriculture and better productivity. *Biocell*, 46(8), 1843–1859. <https://doi.org/10.32604/biocell.2022.019291>
38. Zhang, E., Wang, Y., Crowther, T. W., Sun, W., Chen, S., Zhou, D. ... Yu, G. (2025). Mycorrhiza increases plant diversity and soil carbon storage in grasslands. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 122(7). e2412556122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2412556122>
39. Oliferchuk, V. P., & Fedorovych, D. V. (2021). Influence of tuber melanospore mycorrhizal mushrooms on the biodiversity rhizosphere micromycetes and growth and productivity of hazelnut. *Scientific Bulletin of UNFU*, 31(2), 28–34. <https://doi.org/10.36930/40310204>
40. Gul, S., Javed, S., Azeem, M., Aftab, A., Anwaar, N., Mehmood, T., & Zeshan, B. (2023). Application of *Bacillus subtilis* for the Alleviation of Salinity Stress in Different Cultivars of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy*, 13(2), 437. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020437>
41. Masloid, A. P. (2021). Vplyv system udobrennia ta peredposivnoi inokuliacii na fosfatmobilizovalni bakterii ryzosfery tsukrovoho buriaku [The influence of fertilization systems and pre-sowing inoculation on phosphate-mobilizing bacteria of the sugar beet rhizosphere]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia — Balanced Nature Management*, 4, 135–143 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2021.253100>
42. Khomina, V., Lapchynskyi, V., Pustova, Z., Nebaba, K., & Plakhtii, D. (2024). Mikrobnii inokulianty yak zasib pidvyshchennia vrozhaivosti gruntu ta silskohospodarskykh kultur [Microbial inoculants as a means of increasing soil and crop productivity]. *Naukovi horyzonty — Scientific Horizons*, 27(10), 79–90 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.48077/scihor10.2024.79>
43. Marulanda-Aguirre, A., Azcon, R., Ruiz-Lozano, J. M., & Aroca, R. (2008). Differential Effects of a *Bacillus megaterium* Strain on *Lactuca sativa*. Plant Growth Depending on the Origin of the Arbuscular Mycorrhizal Fungus Coinoculated: Physiologic and Biochemical Traits. *J. Plant Growth Regul*, 27, 10–18. <https://doi.org/10.1007/s00344-007-9024-5>
44. Nanjundappa, A., Bagyaraj, D. J., Saxena, A. K., Kumar, M., & Chakdar, H. (2019). Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus* spp. in soil enhancing growth of crop plants. *Fungal Biology & Biotechnology*, 6(23). <https://doi.org/10.1186/s40694-019-0086-5>
45. Wang, Z. G., Bi, Y. L., Jiang, B., Zhakypbek, Y., Peng, S.-P., Liu, W.-W., & Liu, H. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance soil carbon sequestration in the coalfields, northwest China. *Sci Rep*, 34336. <https://doi.org/10.1038/srep34336>
46. Mason, A., Salomon, M., Lowe, A., & Cavnar, T. (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation and biochar application enhance soil carbon and productivity in wheat and barley. *Science of The Total Environment*, 977. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179230>
47. Averill, C., Anthony, M. A., Baldrian, P., Finkbeiner, F., Hoogen, J., Kiers, T. ... Crowther, T. W. (2022). Defending Earth's terrestrial microbiome. *Nat. Microbiol*, 7, 1717–1725. <https://doi.org/10.1038/s41564-022-01228-3>
48. Grover, M., Bodhankar, S., Sharma, A., Sharma, P., Singh, J., & Nain, L. (2021). PGPR Mediated Alterations in Root Traits: Way Toward Sustainable Crop Production. *Front. Sustain. Food Syst*, 4, 618230. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.618230>
49. Kopylov, Ye. P., Shakhovkina, O. O., Nadkernychna, O. V., Novikova, T. P., & Tarasov, V. V.

- (2022). Mikromitsety korenevoi zony roslyn soi kulturnoi ta yikhnia funktsionalna diia na roslyny [Micromycetes of the root zone of cultivated soybean plants and their functional effect on plants]. *Silskohospodarska mikrobiolohiia — Agricultural Microbiology*, 36, 13–27 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.36.13-27>
50. Pysarenko, V., Pischalenko, M., Chaika, T., Lohvynenko, V., Krupska, N., Koroleviat, Y., & Kirieiev, Y. (2023). Vplyv biostymulatoriv na roslyny tsukini za umovy peredposivnoi obrobky nasinnia [The impact of bio-stimulators on zucchini plants under pre-sowing seed treatment]. *Scientific Progress & Innovations*, 26(4), 9–13 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31210/spi2023.26.04.02>
51. Grzyb, A., Wolna-Maruwka, A., & Niewiadomska, A. (2020). Environmental Factors Affecting the Mineralization of Crop Residues. *Agronomy*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/agronomy10121951>
52. Pikula, D., & Ciotucha, O. (2022). The Composition of the Organic Matter Fractions of Loamy Sand after Long-Term FYM Application without Liming. *Agronomy*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy12102385>
53. Rowinska, P., Gutarowska, B., Janas, R., & Szulc, J. (2024). Biopreparations for the decomposition of crop residues. *Microbial Biotechnology*, 17(8). <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14534>
54. Hadzalo, Ya. M., Vozhehova, R. A., & Likar, Ya. O. (2023). Efektyvnist zastosuvannia mikrobnikh preparativ destruktoriv na roslynnykh reshtkakh u protsesi yikh mineralizatsii pislia zbyrannia [The effectiveness of the use of microbial preparations of destructors on plant residues in the process of their mineralization after harvesting]. *Ahrarni innovatsii — Agrarian Innovations*, 19, 24–33 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32848/agraar.innov.2023.19.4>
55. Tokmakova, L., & Trepach, A. (2022). Mikrobiolohichna destruktsiia orhanichnoi rehovyny v ahrotsenozakh [Microbiological destruction of organic matter in agrocenoses]. *Visnyk ahrarnoi nauky — Bulletin of Agricultural Science*, 100(2), 19–26 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk.202202-03>
56. Bunas, A. A., Tkach, Ye. D., Dvoretzkyi, V. V., & Dvoretzka, O. M. (2022). Efektyvnist zastosuvannia preparatu Biosystem Power, KS (Biosystem Power, SC) dlia pryskorennia destruktsii pisliashnyvnykh reshtok [The effectiveness of using the drug Biosystem Power, KS (Biosystem Power, SC) to accelerate the destruction of post-harvest residues]. *Ahroekolohichniy zhurnal — Agroecological Journal*, 3, 119–125 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266417>
57. Przulj, N., & Tunguz, V. (2022). Significance of harvest residues in sustainable management of arable land I. Decomposition of harvest residues. *Archives for Technical Sciences*, 1(26), 61–70. <https://doi.org/10.7251/afts.2022.1426.061p>
58. Hema, J. N., Shobha, & Shruthi, S. D. (2023). Isolation and characterization of cellulose-degrading bacteria from decomposing plant matter. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 15(4), 22–27. <https://doi.org/10.22159/ijpps.2023v15i4.47019>
59. Robl, D., Mergel, C., Costa, P., Pradella, J., & Padilla G. (2019). Endophytic actinomycetes as potential producers of hemicellulases and related enzymes for plant biomass degradation. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 62. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2019180337>
60. Li, H., Qiu, Y., Yao, T., Ma, Y., Zhang, H., & Yang, X. (2020). Effects of PGPR microbial inoculants on the growth and soil properties of *Avena sativa*, *Medicago sativa*, and *Cucumis sativus* seedlings. *Soil and Tillage Research*, 199, 104577. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104577>
61. Cotrufo, M. F., Haddix, M. L., Kroeger, M. E., & Stewart, C. E. (2022). The role of plant input physical-chemical properties, and microbial and soil chemical diversity on the formation of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 168, 108648. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108648>
62. Berhane, M, Xu, M., Liang, Z., Shi, J., Wei, G., & Tian, X. (2020). Effects of long-term straw return on soil organic carbon storage and sequestration rate in North China upland crops: A meta-analysis. *Glob Chang Biol*, 26(4), 2686–2701. <https://doi.org/10.1111/gcb.15018>
63. Li, Y., Feng, H., Dong, Q., Xia, L., Li, J., Li, Ch. ... Chen, J. (2022). Ammoniated straw incorporation increases wheat yield, yield stability, soil organic carbon and soil total nitrogen content. *Field Crops Research*, 284, 108558. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108558>
64. Liu, E., Yan, Ch., Mei, X., He, W., Bing, S. H., Ding, L. ... Fan, T. (2010). Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China. *Geoderma*, 158(3–4), 173–180. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.029>
65. Rehman, J., Joe, E., Yoon, H., Kwon, S., Oh, M., Son, E. ... Jeon, J. (2022). Lignin Metabolism by Selected Fungi and Microbial Consortia for Plant Stimulation: Implications for Biologically Active Humus Genesis. *Microbiol Spectr*. <https://doi.org/10.1128/spectrum.02637-22>
66. Yang, J., Zhao, J., Jiang, J., Xu, H., Zhang, N., Xie, J., Wei, M. (2021). Isolation and characterization of *Bacillus* sp. capable of degrading alkali lignin. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.807286>

67. Tsentylo, L. V. (2019). Biologichna aktyvnyk gruntu za riznykh system udobrennia soniashnyku ta obrobtku gruntu [Biological activity of soil under different systems of sunflower fertilization and soil cultivation]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk — Tavria Scientific Bulletin*, 108, 117–122 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.108.16>
68. Movchan, I. P., Tkach, Ye. D. Bunas, A. A., & Dvoretzkyi, V. V. (2024). Mikrobiotsenoz gruntu silskohospodarskykh kultur za dii biodestruktoriv [Microbiocenosis of soil of agricultural crops under the action of biodestructors]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia — Sustainable use of nature*, 4, 129–135 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2024.319386>
69. Potapenko, L. V., Skachok, L. M., & Horbachenko, N. I. (2019). Vplyv tryvaloho zastosuvannia dobryv ta mikrobnnykh preparativ na balans humusu v dernovo-pidzolystomu gruntu [The influence of long-term use of fertilizers and microbial preparations on the humus balance in sod-podzolic soil]. Proceedings of the All-Ukrainian scientific-practical internet conference Current issues of agricultural (pp.151–154). Chernihiv [in Ukrainian].
70. Kovalenko, A. M., Novokhyzhnii, M. V., Tymoshenko, H. Z., & Serhieieva, Yu. O. (2020). Osoblyvosti zastosuvannia destruktoriv sterni v umovakh stepovoi zony [Peculiarities of the use of stubble destroyers in the conditions of the steppe zone]. *Visnyk ahrarnoi nauky — Bulletin of Agrarian Science*, 98(2), 44–51 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202002-07>
71. Perelik pestytsydiv i ahrokhimikativ Ukrainy [List of pesticides and agrochemicals of Ukraine] (2025) [in Ukrainian]. URL: <https://mepr.gov.ua/content/derzhavniy-reestr-pestytsydiv-i-agrokhimikativ-dozvoleni-dopovnennya-v-ukraini-dopovnennya-z-01012017-zgidno-vimog-postanovi-kabinetu-ministriv-ukraini-vid-21112007--1328.html>
72. Kopylov, Ye. P., & Skulovatov, O. V. (2017). Mikotsenoz korenevoi zony roslyn kukurudzy za vykorystannia Chaetomium globosum yak destruktor solomy [Mycocenosis of the root zone of corn plants when using Chaetomium globosum as a straw destroyer.]. *Silskohospodarska mikrobiolohiia — Agricultural Microbiology*, 25, 31–35 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.25.31-35>
73. Shamshytov, A., Kadžienė, G., & Supronienė, S. (2024). The Role of Soil Microbial Consortia in Sustainable Cereal Crop Residue Management. *Plants*. 13(6). 766. <https://doi.org/10.3390/plants13060766>

Received: 03.03.2025

Accepted: 12.05.2025

Published online: 17.09.2025