

Лекція 4

Тема: Мікробіологічні процеси перетворення карбону в ґрунті та їх агрономічне значення

План

1. Колообіг карбону й кисню в агроєкосистемах та роль мікроорганізмів у трансформації органічної речовини ґрунту.
2. Спиртове бродіння: мікробіологічні основи, збудники та значення в природних і аграрних системах.
3. Молочнокисле бродіння: мікроорганізми, механізми процесу та практичне значення в агрономії.
4. Мікробіологічна деструкція рослинних решток, гумусоутворення та секвестрація карбону в ґрунті.

Рекомендована література:

1. Векірчик К. М. Мікробіологія з основами вірусології / К. М. Векірчик. К.: Либідь, 2001. 312 с.
2. Векірчик К. М. Практикум з мікробіології / К. М. Векірчик. К.: Либідь, 2001. 142 с.
3. Бойко А. Л. Екологія вірусів рослин / А. Л. Бойко. К.: Вища школа, 1990. 164 с.
4. Мельничук М. Д. Фітовірусологія : навчальний посібник / М. Д. Мельничук. К.: Поліграфконсалтинг, 2005. 320 с.
5. Моніторинг вірусних інфекцій рослин в біоценозах України / В. П. Поліщук, І. Г. Будзанівська, С. М. Рижук та інш. / за редакцією В. П. Поліщука / К.: Фітосоціоцентр, 2001. 220 с.
6. Гуменюк, І. І. Актуальні питання біобезпеки у сучасних умовах. У О. І. Дребот, А. І. Парфенюк (Ред.), Екологічна та біологічна безпека України: моногр. 2022. Київ: Видавництво НУБіП України. С. 238–268.
7. Левішко, А., Мазур, С., & Гуменюк, І. Оцінка мікробного ценозу ґрунтів, що зазнали впливу активних військових дій. Інноваційні екологобезпечні технології рослинництва в умовах воєнного стану. 2023. Київ: ІАП. С. 95
8. Левішко, А. С. Агрономічно корисні мікроорганізми як основа біологічної безпеки сільського господарства. У С. Т. Омельчука (Ред.), Екологічні та гігієнічні проблеми сфери життєдіяльності людини. 2023. Київ: МВЦ «Медінформ». С. 125–126.
9. Віннічук Т., Коваленко О., Болоховська В. Біопрепарати проти хвороб. Пропозиція. 2013. № 4. С. 92–93.
10. Aasfar, A., Bargaz, A., Yaakoubi, K., Hilali, A., Bennis, I., Zeroual, Y., & Kadmiri, I. Nitrogen fixing Azotobacter species as potential soil biological enhancers for crop nutrition and yield stability. Frontiers in Microbiology. Sec. Microbiotechnology, 12. 2021.

11. Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology. Section Plant Pathogen Interactions*, 8. 2017.

12. Caracciolo, A. B., & Terenzi, V. Rhizosphere microbial communities and heavy metals. *Microorganisms*, 2021. №9(7), 1462 p.

Мета лекції: сформувати у здобувачів вищої освіти системне розуміння мікробіологічних процесів перетворення сполук карбону в ґрунті, ролі мікроорганізмів у колообігу карбону й кисню, процесах спиртового та молочнокислого бродіння, деструкції рослинних решток, гумусоутворенні та секвестрації карбону; розкрити значення цих процесів для формування родючості ґрунту, живлення рослин, функціонування ґрунтового мікробіому та забезпечення сталості агроєкосистем.

1. КОЛООБІГ КАРБОНУ Й КИСНЮ В АГРОЕКОСИСТЕМАХ ТА РІЛЬ МІКРООРГАНІЗМІВ У ТРАНСФОРМАЦІЇ ОРГАНІЧНОЇ РЕЧОВИНИ ҐРУНТУ

Карбон є одним із найважливіших біогенних елементів, без якого неможливе існування живих організмів. Він входить до складу білків, вуглеводів, ліпідів, нуклеїнових кислот, органічних кислот, ферментів та інших біологічно активних речовин. У ґрунтовому середовищі карбон перебуває у складі органічних решток, живої біомаси, гумусових речовин, карбонатів, вуглекислого газу та численних проміжних продуктів біохімічних реакцій.

Ґрунт є важливою ланкою глобального колообігу карбону. У його верхніх горизонтах накопичуються значні запаси органічного карбону, а їх кількість і стабільність безпосередньо залежать від характеру землекористування, рослинності, кліматичних умов та активності ґрунтової біоти.

Центральне місце у трансформації карбоновмісних речовин у ґрунті належить мікроорганізмам. Бактерії, археї, мікроскопічні гриби та інші представники ґрунтової мікробіоти забезпечують розкладання рослинних і тваринних решток, мінералізацію органічних сполук, утворення та трансформацію гумусових речовин. Вони також беруть участь у процесах бродіння, дихання, синтезу мікробної біомаси та стабілізації органічного карбону.

Для агрономії ці процеси мають принципове значення, оскільки від їх інтенсивності залежать родючість ґрунту, доступність елементів живлення, структурний стан ґрунту, активність ризосферної мікробіоти, продуктивність культур і загальна стійкість агроєкосистем.

1.1. Карбон як основа органічної речовини.

Карбон (C) є структурною основою практично всіх органічних сполук живих організмів. Його атоми здатні утворювати міцні зв'язки між собою та з атомами водню, кисню, нітрогену, фосфору, сульфуру й інших елементів.

У ґрунті карбон представлений двома основними формами:

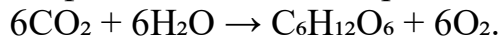
- органічним карбоном;
- неорганічним карбоном.

Органічний карбон міститься у свіжих рослинних і тваринних рештках, корневих виділеннях, живій мікробній біомасі, продуктах життєдіяльності організмів, мікробній некромасі та стабілізованій органічній речовині ґрунту.

Неорганічний карбон представлений переважно карбонатами, гідрокарбонатами та вуглекислим газом ґрунтового повітря.

Основним первинним джерелом органічного карбону в більшості агроєкосистем є рослини. У процесі фотосинтезу вони поглинають CO₂ з атмосфери та за участю сонячної енергії синтезують органічні речовини.

У спрощеному вигляді фотосинтез можна представити рівнянням:



Отже, карбон атмосфери переходить до складу рослинної біомаси. Надалі частина цієї біомаси надходить у ґрунт у вигляді коренів, стерні, соломи, опалого листя, корневих ексудатів та інших органічних матеріалів.

1.2. Основні ланки колообігу карбону

Колообіг карбону являє собою сукупність процесів переходу карбону між атмосферою, рослинами, тваринами, мікроорганізмами, ґрунтом та іншими компонентами біосфери.

В агроєкосистемі можна виділити такі основні етапи:

1. Фіксація атмосферного CO₂ рослинами. Завдяки фотосинтезу неорганічний карбон перетворюється на органічні сполуки.

2. Надходження органічного карбону в ґрунт. Відбувається через кореневі виділення, відмерлі корені, пожнивні рештки, органічні добрива, компости, сидеральну масу.

3. Використання органічних сполук мікроорганізмами. Ґрунтові мікроорганізми використовують значну частину органічних речовин як джерело карбону та енергії.

4. Мінералізація. Органічні сполуки розкладаються до простіших продуктів. За аеробних умов кінцевим карбоновмісним продуктом переважно є CO₂.

5. Імобілізація карбону. Частина карбону включається до клітин бактерій і грибів, утворюючи мікробну біомасу.

6. Стабілізація органічного карбону. Частина продуктів трансформації органічної речовини може тривалий час зберігатися в ґрунті завдяки взаємодії з мінеральною фазою, перебуванню всередині ґрунтових агрегатів та іншим механізмам фізико-хімічного захисту.

1.3. Роль мікроорганізмів у колообігу карбону.

Мікроорганізми є головною біологічною ланкою, що забезпечує повернення карбону органічних речовин до загального біогеохімічного циклу.

До основних груп мікроорганізмів, що беруть участь у перетворенні карбону, належать:

- бактерії;

- актинобактерії;
- мікроскопічні гриби;
- дріжджі;
- археї;
- фототрофні та хемолітотрофні мікроорганізми.

Бактерії особливо активно використовують прості та легкодоступні органічні речовини — моноцукри, органічні кислоти, амінокислоти.

Мікроскопічні гриби мають важливе значення для розкладання складніших рослинних полімерів, зокрема целюлози, геміцелюлоз та лігніновмісних субстратів.

Актинобактерії беруть участь у трансформації більш стійких органічних речовин і особливо активні на пізніших етапах розкладання рослинних решток.

Таким чином, у ґрунті функціонує складний мікробний комплекс, представники якого послідовно або одночасно використовують різні компоненти органічної речовини.

1.4. Колообіг кисню та його зв'язок із карбоновим циклом.

Колообіг кисню тісно пов'язаний із колообігом карбону.

Під час фотосинтезу рослини виділяють молекулярний кисень. Натомість під час аеробного дихання рослин, тварин і мікроорганізмів кисень використовується як кінцевий акцептор електронів.

Спрощене рівняння аеробного окиснення глюкози:



У добре аерованих ґрунтах переважають аеробні процеси розкладання органічної речовини.

За перезволоження, ущільнення або затоплення ґрунту дифузія кисню різко обмежується. У таких мікрозонах активізуються факультативно анаеробні та облигатно анаеробні мікроорганізми.

У результаті замість повного окиснення органічних речовин можуть відбуватися процеси бродіння та анаеробного дихання.

1.5. Ризосфера як зона інтенсивного карбонового обміну.

Особливе значення для агрономії має ризосфера — зона ґрунту, що безпосередньо зазнає впливу кореневої системи рослин.

Корені виділяють у ґрунт:

- цукри;
- амінокислоти;
- органічні кислоти;
- фенольні сполуки;
- слизові речовини;
- ферменти;
- інші низькомолекулярні сполуки.

Ці речовини є легкодоступним джерелом карбону та енергії для ризосферних мікроорганізмів. Тому чисельність і метаболічна активність мікроорганізмів

поблизу коренів часто істотно відрізняються від показників ґрунту поза безпосереднім впливом кореневої системи.

Ризосферний мікробіом бере участь не лише у трансформації карбону, а й у мобілізації фосфору, перетворенні сполук нітрогену, утворенні фітогормонів та інших біологічно активних речовин.

1.6. Агрономічне значення колообігу карбону

Для агронома важливо розуміти, що карбон у ґрунті — це не лише запас органічної речовини. Він є енергетичною основою функціонування значної частини ґрунтового мікробіому.

Інтенсивність його трансформації залежить від:

- температури;
- вологості;
- аерації;
- реакції ґрунтового розчину;
- гранулометричного складу;
- кількості та якості рослинних решток;
- співвідношення С;
- способу обробітку ґрунту;
- системи удобрення;
- структури сівозміни.

Надмірно швидка мінералізація може спричинити зменшення запасів органічної речовини. Водночас надто повільна деструкція решток може затримувати повернення елементів живлення у доступні для рослин форми.

Тому завдання сучасного землеробства полягає не у максимальному прискоренні мінералізації, а у підтриманні збалансованого кругообігу органічної речовини.

2. СПИРТОВЕ БРОДІННЯ: МІКРОБІОЛОГІЧНІ ОСНОВИ, ЗБУДНИКИ ТА ЗНАЧЕННЯ В ПРИРОДНИХ І АГРАРНИХ СИСТЕМАХ

2.1. Загальна характеристика бродіння.

Бродіння — це сукупність анаеробних або частково анаеробних ферментативних процесів перетворення органічних речовин, під час яких мікроорганізми отримують енергію без використання молекулярного кисню як кінцевого акцептора електронів.

Залежно від кінцевих продуктів розрізняють:

- спиртове;
- молочнокисле;
- маслянокисле;
- пропіоновокисле;
- змішане та інші типи бродіння.

У природних умовах процеси бродіння особливо характерні для субстратів, багатих на легкодоступні вуглеводи, за обмеженого доступу кисню.

2.2. Сутність спиртового бродіння.

Спиртове бродіння — це біохімічний процес анаеробного перетворення цукрів, переважно глюкози, з утворенням етилового спирту, вуглекислого газу та енергії.

У спрощеному вигляді:



На першому етапі глюкоза в процесі гліколізу перетворюється на піруват. Надалі піруват декарбоксилюється з утворенням ацетальдегіду та CO_2 , після чого ацетальдегід відновлюється до етанолу.

2.3. Основні збудники спиртового бродіння.

Найбільш відомими збудниками спиртового бродіння є дріжджі.

Класичним прикладом є представники роду **Saccharomyces**, зокрема *Saccharomyces cerevisiae*.

Здатність до утворення етанолу мають також окремі представники інших груп дріжджів і бактерій.

Дріжджі поширені:

- на поверхні рослин;
- плодах і ягодах;
- у ґрунті;
- на рослинних рештках;
- у кореневій зоні;
- у субстратах, багатих на цукри.

Їх поширення тісно пов'язане з наявністю доступних вуглеводів.

2.4. Умови спиртового бродіння

На інтенсивність процесу впливають:

Температура. Для більшості мезофільних дріжджів сприятливими є помірно теплі умови.

Реакція середовища. Багато дріжджів добре розвиваються у слабнокислому середовищі.

Концентрація цукрів. Вуглеводи є основним субстратом процесу.

Доступ кисню. За його дефіциту посилюється ферментативний шлях використання цукрів.

Наявність елементів живлення. Для побудови клітинної біомаси дріжджам необхідні сполуки нітрогену, фосфору, сульфуру та мікроелементи.

2.5. Спиртове бродіння в ґрунті.

У добре структурованих орних ґрунтах спиртове бродіння зазвичай не є домінуючим процесом. Проте воно може відбуватися в анаеробних мікрозонах.

Такі умови виникають:

- у перезволожених ґрунтах;
- після затоплення;
- у сильно ущільнених горизонтах;
- у великих ґрунтових агрегатах із недостатньою аерацією;

- у місцях накопичення свіжої органічної речовини.

Поява продуктів анаеробного метаболізму є показником зміни окисно-відновного режиму ґрунту.

Для кореневої системи культур тривалий дефіцит кисню небезпечний, оскільки порушує кореневе дихання та поглинання елементів живлення.

2.6. Практичне значення спиртового бродіння.

У сільському господарстві спиртове бродіння має як природне, так і технологічне значення.

Дріжджі та продукти їхнього метаболізму використовуються в харчових і біотехнологічних виробництвах. Перспективним напрямом є також біоконверсія рослинної сировини та аграрних відходів із високим вмістом вуглеводів.

Для агронома спиртове бродіння є важливим передусім як приклад альтернативного шляху мікробного перетворення карбону за дефіциту кисню.

3. МОЛОЧНОКИСЛЕ БРОДІННЯ: МІКРООРГАНІЗМИ, МЕХАНІЗМИ ПРОЦЕСУ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ В АГРОНОМІЇ.

3.1. Загальна характеристика.

Молочнокисле бродіння – це процес анаеробного перетворення вуглеводів, під час якого одним із основних кінцевих продуктів є молочна кислота.

Цей процес здійснюють молочнокислі бактерії, які широко поширені в природі.

Вони трапляються:

- на поверхні рослин;
- у ґрунті;
- на плодах;
- у кореневій зоні;
- у рослинній сировині;
- у кормах;
- у травному тракті тварин.

3.2. Основні групи молочнокислих бактерій.

До молочнокислих бактерій належать представники різних родів, зокрема:

- *Lactobacillus* та споріднені сучасні таксони;
- *Lactococcus*;
- *Leuconostoc*;
- *Pediococcus*;
- *Streptococcus* та ін.

Спільною функціональною рисою цих мікроорганізмів є здатність утворювати значну кількість молочної кислоти з вуглеводів.

Більшість молочнокислих бактерій є грампозитивними, неспороутворювальними мікроорганізмами. Серед них трапляються паличкоподібні та кулясті форми.

3.3. Гомоферментативне молочнокисле бродіння.

За гомоферментативного типу основна частина глюкози перетворюється на молочну кислоту.

Спрощена схема:



Такий тип метаболізму забезпечує швидке накопичення молочної кислоти та зниження рН середовища.

3.4. Гетероферментативне молочнокисле бродіння.

За гетероферментативного типу поряд із молочною кислотою утворюються інші продукти, наприклад вуглекислий газ, етанол або ацетат залежно від виду мікроорганізму й умов середовища.

Отже, молочнокисле бродіння являє собою не один універсальний шлях, а групу метаболічних процесів.

3.5. Екологічне значення молочнокислих бактерій.

Молочнокислі бактерії здатні швидко використовувати доступні цукри. Унаслідок накопичення органічних кислот знижується рН середовища.

Це може обмежувати розвиток низки інших мікроорганізмів.

В аграрних субстратах така властивість має велике практичне значення, оскільки дозволяє спрямовувати мікробіологічні процеси в бажаному напрямі.

3.6. Молочнокисле бродіння під час силосування.

Одним із найважливіших прикладів використання молочнокислого бродіння в сільському господарстві є силосування.

Після закладання рослинної маси у сховище необхідно максимально обмежити надходження повітря.

На початковому етапі залишковий кисень використовується рослинними клітинами та аеробними мікроорганізмами. Після його вичерпання формуються анаеробні умови.

Молочнокислі бактерії використовують водорозчинні вуглеводи рослинної маси та продукують органічні кислоти. Унаслідок цього рН знижується, що сприяє стабілізації корму.

Ефективність силосування залежить від:

- вмісту сухої речовини;
- кількості розчинних вуглеводів;
- ступеня подрібнення;
- ущільнення рослинної маси;
- швидкості створення анаеробних умов;
- видового складу епіфітної мікробіоти;
- температури;
- буферної здатності рослинної сировини.

Якщо анаеробні умови створені недостатньо швидко, можуть активно розвиватися небажані мікроорганізми, що спричиняє втрати поживних речовин і погіршення якості корму.

3.7. Агрономічне значення.

Молочнокисле бродіння демонструє можливість цілеспрямованого використання мікроорганізмів для біологічної консервації рослинної продукції.

Для агрономії цей процес має значення при:

- заготівлі кормів;
- збереженні рослинної сировини;
- управлінні мікробіологічними процесами в органічних субстратах;
- біотехнологічній переробці рослинної продукції.

Знання закономірностей молочнокислого бродіння дає змогу контролювати якість рослинної сировини та зменшувати втрати органічної речовини.

4. МІКРОБІОЛОГІЧНА ДЕСТРУКЦІЯ РОСЛИННИХ РЕШТОК, ГУМУСОУТВОРЕННЯ ТА СЕКВЕСТРАЦІЯ КАРБОНУ В ҐРУНТІ

4.1. Рослинні рештки як джерело органічного карбону.

Після збирання сільськогосподарських культур у ґрунті та на його поверхні залишаються:

- корені;
- стерня;
- солома;
- листки;
- частини стебел;
- генеративні органи;
- кореневі виділення та продукти відмирання ризодепозитів.

Рослинні рештки є важливим джерелом органічного карбону та елементів живлення для ґрунтової біоти.

Їхній хімічний склад істотно впливає на швидкість деструкції.

Основними компонентами є:

- прості цукри;
- крохмаль;
- білки;
- пектинові речовини;
- целюлоза;
- геміцелюлози;
- лігнін;
- ліпіди;
- воски;
- фенольні сполуки.

Легкодоступні речовини використовуються мікроорганізмами першими. Целюлоза, геміцелюлози й особливо лігнін розкладаються повільніше та потребують складніших ферментних систем.

4.2. Послідовність мікробної деструкції.

Деструкція рослинних решток є багатоступеневим процесом.

На початкових стадіях активно використовуються водорозчинні сполуки.
Потім починається інтенсивніше розкладання полісахаридів.

На пізніших стадіях зростає відносна частка важкодоступних компонентів, зокрема лігніфікованих тканин.

У процесі розкладання відбувається сукцесія мікробних угруповань — зміна домінуючих груп мікроорганізмів відповідно до зміни хімічного складу субстрату.

4.3. Розкладання целюлози.

Целюлоза є одним із найпоширеніших органічних полімерів рослинного походження.

Для її розщеплення необхідний комплекс целюлолітичних ферментів.

Целюлолітичну активність мають різні бактерії та гриби.

У загальному вигляді процес можна представити як:

целюлоза → олігосахариди → целобіоза → глюкоза → продукти мікробного метаболізму.

За аеробних умов кінцевими продуктами повної мінералізації карбону є переважно CO₂ та вода.

За анаеробних умов можуть утворюватися органічні кислоти, спирти, газоподібні продукти та інші метаболіти.

4.4. Розкладання геміцелюлоз.

Геміцелюлози є гетерогенними полісахаридами клітинної стінки рослин.

Для їх розкладання мікроорганізми продукують комплекс гідролітичних ферментів.

Порівняно з лігніном багато геміцелюлоз розкладаються відносно швидко, хоча швидкість залежить від ботанічного походження решток та умов середовища.

4.5. Трансформація лігніну.

Лігнін є складним ароматичним полімером, який забезпечує механічну міцність рослинних тканин.

Його розкладання є значно складнішим порівняно з більшістю вуглеводів.

Важливу роль у трансформації лігніну відіграють гриби, здатні продукувати позаклітинні окиснювальні ферменти.

Лігнін та лігніновмісні комплекси впливають на швидкість розкладання рослинних решток, оскільки можуть обмежувати доступ ферментів до целюлози та інших компонентів клітинних стінок.

4.6. Значення співвідношення C.

Одним із найважливіших показників якості органічного субстрату є співвідношення карбону до нітрогену – C.

Мікроорганізмам карбон необхідний як джерело енергії та структурний компонент, а нітроген – для синтезу білків, нуклеїнових кислот та інших клітинних речовин.

Рештки з широким співвідношенням С, наприклад солома багатьох зернових культур, можуть спричиняти тимчасову іммобілізацію мінерального нітрогену.

Мікроорганізми активно використовують доступні мінеральні форми нітрогену для побудови власної біомаси. Унаслідок цього тимчасово зменшується його доступність для культурних рослин.

Після відмирання та лізису мікробних клітин частина іммобілізованих елементів знову включається в процеси мінералізації.

Отже, іммобілізація та мінералізація є взаємопов'язаними процесами.

4.7. Умови мікробіологічної деструкції решток.

Швидкість розкладання визначається комплексом факторів.

Температура.

Підвищення температури в межах фізіологічного оптимуму зазвичай активізує мікробний метаболізм. За низьких температур розкладання сповільнюється.

Вологість.

Недостатня кількість води обмежує життєдіяльність мікроорганізмів.

Надлишкова вологість, навпаки, погіршує аерацію і може змінити аеробний тип розкладання на анаеробний.

Аерація.

Кисень є одним із визначальних факторів повної аеробної мінералізації органічної речовини.

pH

Реакція ґрунтового середовища впливає на структуру мікробного угруповання та активність ферментів.

Хімічний склад решток.

Матеріали з високим вмістом легкодоступних вуглеводів і нітрогену переважно розкладаються швидше, ніж лігніфіковані субстрати.

Контакт із ґрунтом.

Подрібнення та контакт рослинних решток із ґрунтовою біотою можуть прискорювати їх колонізацію та розкладання.

4.8. Гумусоутворення.

Традиційно гумусоутворення розглядають як сукупність складних біохімічних і фізико-хімічних процесів трансформації органічних решток у відносно стійкі форми ґрунтової органічної речовини.

Сучасне розуміння стабілізації ґрунтового органічного карбону значну увагу приділяє не лише утворенню специфічних «гумусових» макромолекул, а й:

- продуктам мікробної переробки органічної речовини;
- мікробній некромасі;
- зв'язуванню органічних молекул із поверхнями мінералів;
- фізичному захисту органічної речовини всередині ґрунтових агрегатів;
- просторовій недоступності субстрату для мікроорганізмів та їхніх ферментів.

Отже, мікроорганізми можуть одночасно сприяти як втратам карбону у формі CO₂, так і його стабілізації у ґрунті.

Це одна з ключових особливостей сучасного розуміння ґрунтового карбонового циклу.

4.9. Роль мікробної біомаси.

Мікробна біомаса є порівняно невеликою, але надзвичайно активною частиною органічної речовини ґрунту.

Вона виконує функцію тимчасового резерву:

- карбону;
- нітрогену;
- фосфору;
- сульфору та інших елементів.

Після відмирання мікроорганізмів їхні клітинні компоненти стають субстратом для інших організмів або можуть стабілізуватися у взаємодії з мінеральною частиною ґрунту.

Таким чином, мікробна некробіомаса розглядається як важливе джерело стабілізованого ґрунтового органічного карбону.

4.10. Секвестрація карбону.

Секвестрація карбону в ґрунті – це процес накопичення і відносно тривалого збереження карбону в ґрунтових пулах.

Карбон, зафіксований рослинами з атмосфери, надходить до ґрунту через корені, кореневі екsudати та післяжнивні рештки. Частина його швидко повертається в атмосферу внаслідок дихання, а частина може стабілізуватися.

Основними механізмами стабілізації є:

1. фізичний захист органічної речовини всередині ґрунтових агрегатів;
2. взаємодія органічних сполук із мінеральними частинками;
3. утворення мікробних продуктів і некробіомаси;
4. надходження карбону в глибші горизонти ґрунту;
5. обмежена доступність окремих органічних субстратів для мікроорганізмів.

Секвестрація не означає, що карбон залишається у ґрунті назавжди. Ґрунтова органічна речовина постійно трансформується, тому її запаси визначаються співвідношенням між надходженням і втратами карбону.

4.11. Вплив агротехнологій на карбоновий баланс.

Агрономічні заходи істотно змінюють умови функціонування ґрунтового мікробіому.

Обробіток ґрунту.

Інтенсивний механічний обробіток змінює структуру ґрунту, аерацію, температурний і водний режими та може збільшувати доступ мікроорганізмів до раніше фізично захищеної органічної речовини.

Повернення рослинних решток.

Залишення частини післязжнивної біомаси на полі забезпечує додаткове надходження органічного карбону.

Проте ефект залежить від культури, кількості та якості решток, ґрунтово-кліматичних умов і системи обробітку.

Органічні добрива.

Гній, компости та інші органічні матеріали є джерелом карбону й елементів живлення для ґрунтового мікробіому.

Сидеральні культури.

Використання сидератів збільшує надходження свіжої органічної речовини та підтримує біологічну активність ґрунту.

Покривні культури.

Вони подовжують період наявності живих коренів у ґрунті, забезпечуючи надходження ризодепозитів та підтримуючи активність ризосферного мікробіому.

Сівозміна.

Через чергування культур змінюється кількість і хімічний склад рослинних решток та кореневих виділень, а отже, і структура мікробних угруповань.

4.12. Мікробіом ґрунту як об'єкт сучасного агрономічного управління.

У сучасній агрономії ґрунтову мікробіоту дедалі частіше розглядають не просто як природний компонент ґрунту, а як функціональну складову агроєкосистеми.

Перспективним напрямом є формування агротехнологій, які підтримують:

- високе різноманіття мікробних угруповань;
- активність деструкторів рослинних решток;
- функціонування корисної ризосферної мікробіоти;
- мікоризні асоціації;
- ефективний кругообіг елементів живлення;
- формування стабільної структури ґрунту;
- накопичення та збереження органічного карбону.

Однак активність мікроорганізмів не слід оцінювати за принципом «чим більше, тим краще». Надмірна стимуляція мінералізації може прискорювати втрати ґрунтового органічного карбону.

Тому основною метою є формування збалансованої системи, у якій надходження органічної речовини компенсує або перевищує її втрати.

4.13. Сучасні показники оцінювання мікробної трансформації карбону.

Для оцінювання стану карбонового циклу в ґрунті використовують низку біологічних показників:

- карбон мікробної біомаси;
- базальне дихання ґрунту;
- субстрат-індуковане дихання;
- активність ферментів;

- швидкість деструкції рослинних решток;
- структуру мікробного угруповання;
- співвідношення грибною та бактеріальною біомаси;
- ефективність використання карбону мікроорганізмами;
- вміст мікробної некромаси.

Сучасні молекулярно-біологічні методи дають змогу встановлювати склад мікробіому та виявляти функціональні групи мікроорганізмів, пов'язані з окремими етапами трансформації карбону.

Це відкриває можливості для переходу від загальної оцінки «біологічної активності» ґрунту до функціонального аналізу його мікробіому.

АГРОНОМІЧНЕ ЗНАЧЕННЯ МІКРОБІОЛОГІЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ КАРБОНУ

Мікробіологічні процеси трансформації карбону мають комплексне значення для агроєкосистем:

- вони забезпечують деструкцію післяжнивних решток і повернення елементів живлення до біологічного кругообігу.
- через мінералізацію та іммобілізацію регулюється доступність нітрогену, фосфору, сульфуру та інших елементів для культурних рослин.
- мікробні продукти беруть участь у формуванні й стабілізації ґрунтових агрегатів.
- трансформація органічної речовини впливає на водоутримувальну здатність, аерацію, буферність та інші властивості ґрунту.
- ризосферний обмін карбону визначає характер взаємодії між рослиною та її мікробіомом.
- мікроорганізми регулюють співвідношення між мінералізацією та стабілізацією органічного карбону.
- управління органічною речовиною ґрунту є важливою складовою адаптивного та ґрунтозберігального землеробства.

Тому агрономічна система повинна забезпечувати постійне надходження органічних субстратів до ґрунту, збереження сприятливого водно-повітряного режиму та мінімізацію необґрунтованих втрат органічного карбону.

Питання для контролю знань

1. Яке значення має карбон у функціонуванні ґрунтових екосистем?
2. Яку роль відіграють мікроорганізми в колообігу карбону й кисню?
3. Які основні джерела надходження органічного карбону до ґрунту?
4. У чому полягає сутність процесу спиртового бродіння та які мікроорганізми його здійснюють?
5. Чим відрізняються гомоферментативне та гетероферментативне молочнокисле бродіння?
6. Яке практичне значення має молочнокисле бродіння в аграрному виробництві?
7. Які групи мікроорганізмів беруть участь у деструкції рослинних решток?

8. Як співвідношення С впливає на мінералізацію та іммобілізацію елементів живлення?
9. Які фактори визначають швидкість мікробіологічного розкладання органічної речовини ґрунту?
10. Яку роль відіграють мікробна біомаса та мікробна некромаса у формуванні ґрунтової органічної речовини?
11. Що таке секвестрація карбону та які механізми сприяють стабілізації органічного карбону в ґрунті?
12. Як системи обробітку ґрунту, сівозміни, сидеральні та покривні культури можуть впливати на карбоновий баланс агроєкосистем?