# ВІДНОВЛЕННЯ ЯКОСТІ ҐРУНТУ
## RESTORATION OF SOIL QUALITY

УДК 631.433.53:631.895:631.42

## Емісія $CO_2$ з ґрунту за застосування органічних та органо-мінеральних ґрунтополіпшувачів

**Є. В. Скрильник[a*], А. М. Кутова[b], О. П. Волошенюк[c], С. І. Крилач[d], М. А. Попірний[e]**

**Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського»**, *Харків, Україна*

ІНФОРМАЦІЯ

Отримано 31.10.2024
Отримано після доопрацювання 13.11.2024
Затверджено до видання 18.12.2024
Доступно онлайн 27.12.2024

*Ключові слова*:

чорнозем опідзолений; емісія $CO_2$; гідротермічний фактор; сезонна динаміка; органічний вуглець; ґрунтополіпшувач.

АНОТАЦІЯ

Описано результати польових досліджень щодо впливу внесення органічного та органо-мінерального ґрунтополіпшувачів на динаміку емісії $CO_2$ за вегетаційний період кукурудзи, вирощуваної на зерно, та вміст органічного вуглецю у ґрунті. Довгостроковий (з 1989 р.) дрібноділянковий дослід розміщено на чорноземі опідзоленому малогумусному важкосуглинковому на лесоподібному суглинку (*Luvic Chernic Phaeozem*) у дослідному господарстві ННЦ «ІҐА імені О. Н. Соколовського» у Харківській області в умовах Лівобережного Лісостепу. Варіанти досліду включають склад, спосіб і дози внесення органічного та органо-мінерального ґрунтополіпшувачів, розроблених на основі леонардиту з додаванням бентоніту, меляси і сірчанокислого заліза, (та нітроамофоски в органо-мінеральному); дози внесення — 30 і 60 кг/га за вмістом азоту. Впродовж вегетаційних періодів 2020 і 2021 рр. досліджували сезонну динаміку параметрів ґрунтових показників. Вимірювання емісії $CO_2$ проводили 4 рази за допомогою портативного газоаналізатора testo 535 з ізоляцією від атмосферного повітря. У межах шару 0-20 см визначали: вміст органічного вуглецю оксидиметричним методом, вміст вологи — гравіметричним методом; температуру ґрунту вимірювали термометром Савінова. Погодні дані взято з метеостанції. За результатами досліджень встановлено чітку сезонну динаміку здатності ґрунту продукувати $CO_2$ (від 0,1 до 2,0 кг/га за годину) з максимумом у весняний період та з поступовим послабленням до осені, що пояснюється впливом погодних умов і мікроклімату ґрунту. Запропоновано прогностичну модель залежності інтенсивності викидів $CO_2$ від параметрів температури та вологості ґрунту. Порівняно із сезонними змінами емісії $CO_2$, відмінності, викликані застосуванням двох типів ґрунтополіпшувачів, значно менші і проявляються переважно протягом першої половини вегетаційного періоду кукурудзи. Найбільшою є емісія $CO_2$ за локального внесення органічного ґрунтополіпшувача у дозі 30 кг/га. Щодо накопичення органічного вуглецю в ґрунті найбільш ефективним визнано локальний спосіб внесення гранульованого органо-мінерального грунтополіпшувача із відношенням C : N = 5, за якого емісія $CO_2$ уповільнюється, порівняно з органічним ґрунтополіпшувачем, а загальний вміст органічного вуглецю у ґрунті є найвищим порівняно з іншими варіантами досліду. Доведено, що на секвестрацію вуглецю ґрунтом, крім гідротермічних умов навколишнього середовища, впливає склад та спосіб внесення ґрунтополіпшувача, що може слугувати рекомендацією для практичного використання меліоративних та удобрювальних засобів у землеробстві.

* *E-mail*: *orgminlab@gmail.com*

*ORCID*: [a]0000-0002-8642-8547, [b]0000-0003-2680-566X, [c]0000-0001-9521-4607, [d]0000-0002-3347-6561, [e]0009-0002-0651-9324

*Форма цитування:* Скрильник Є. В., Кутова А. М., Волошенюк О. П., Крилач С. І., Попірний М. А. Емісія $CO_2$ з ґрунту за застосування органічних та органо-мінеральних ґрунтополіпшувачів. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. темат. наук. зб. / ННЦ "ІҐА ім. О. Н. Соколовського". Харків: 2024. Вип. 97. С. 31–42. doi: 10.31073/acss97-04

### 1. Вступ

Зберігання вуглецю в ґрунті є одним із рішень щодо пом'якшення негативних впливів зміни клімату. Ґрунт може утримувати вуглець упродовж тривалого часу з повільною мінералізацією органічних речовин та виділенням у формі $CO_2$. У глобальному масштабі сільськогосподарська діяльність провокує понад 24 % загальних викидів парникових газів в атмосферу без урахування непрямих викидів, пов'язаних із виробництвом добрив [1]. Для країн Європейського Союзу (ЄС) сільськогосподарські викиди вважаються другим за величиною, після згоряння викопного палива, внеском парникових газів в атмосферу,

відповідно — 10 % від загального об'єму викидів який становить 4 300 млн тонн еквіваленту $CO_2$ [2]. Глобальне дихання ґрунту та процеси розкладання щорічно додають до атмосфери Землі загалом 220 млрд тонн вуглекислого газу [3]. Частка сільського господарства у глобальних викидах парникових газів у формі $CO_2$, $N_2O$ та $CH_4$ становить близько 25–30 %. У той же час органічний вуглець ґрунту (ОВҐ) має потенціал стати «депо» для поглинання атмосферного $CO_2$ [4]. Рослини поглинають вуглекислий газ із атмосфери у кількості, що відповідає приблизно одній третині того, що викидається в атмосферу в результаті діяльності людини; з цієї третини приблизно 10–15 % надходить у ґрунт. Водночас збільшення вмісту органічного вуглецю у ґрунті призвело б до підвищення його родючості.

Протягом XX століття спостерігалося постійне зниження вмісту ОВҐ, що було зумовлено історичними змінами у землекористуванні й методах господарювання та зміною клімату. Розширення площі орних земель було, до середини XX століття, основним фактором втрати ОВҐ. Тенденція до збільшення викидів $CO_2$ із ґрунту є важливим фактором, який провокує втрати ОВҐ, що також спричинені ерозією ґрунтів та підвищенням температури повітря. Потоки вуглекислого газу з ґрунту змінюються залежно від багатьох екологічних та антропогенних факторів. Переважання процесів, спрямованих на поглинання чи виділення вуглецю, у ґрунтах сільськогосподарських земель є результатом балансу між надходженням та мінералізацією біогенного матеріалу [5]. Перше залежить від кількості та природи органічних речовин, що надходять [6], а друге — від педокліматичного контексту [4]. Ці умови корегуються такими сільськогосподарськими практиками, як удобрення та модернізація сільського господарства новітніми моделями виробництва продуктів харчування та кормів, а також історично-соціальними траєкторіями агропродовольчих систем країни, які й визначають поточну динаміку вмісту вуглецю у ґрунтах [7].

Компенсація втраченого ОВҐ шляхом секвестрації пов'язана, перш за все, зі змінами землекористування та посиленням керованості агроекосистем. Було встановлено, що за перетворення природних ландшафтів із цілинними ґрунтами на агровиробничі об'єкти спостерігається зниження вмісту ОВҐ на 15–40 % у шарі до одного метра протягом 2–8 років [8, 9]. Інколи, за тривалого сільськогосподарського використання, зниження емісії $CO_2$ з ґрунту залежало від внесення вуглецевмісних добрив [10, 11]. Наразі багато уваги приділяється вивченню механізму дії тривалого внесення добрив на динаміку емісії $CO_2$ з ґрунту. В науковій праці C. Xiao [12], було доведено можливість скоротити викиди $CO_2$ на 20 % за рахунок збільшення поглинання вуглецю орними ґрунтами. Органічні добрива є важливим засобом для підтримки динаміки дихання ґрунту, необхідним фактором формування і підтримування стабільного гумусового стану, а також регулятором мікробіологічних процесів. Однак секвестрація вуглецю також залежить від змін хімічних характеристик ґрунту, що відбуваються за різних сільськогосподарських практик [13]. Встановлено, що за збільшення доз органічних добрив або ґрунтополіпшувачів збільшується й емісія $CO_2$ з ґрунту [14, 15].

Отже, аналізуючи опубліковані результати численних досліджень, можемо констатувати, що потребує подальшого вивчення ефективність заходів, спрямованих на активізацію процесів закріплення, секвестрації у ґрунті вуглецю, який утворюється після розкладання органічних речовин.

Метою написання статті є оприлюднення результатів дослідження сезонної динаміки інтенсивності викидів вуглекислого газу з орного чорнозему опідзоленого протягом вегетаційного періоду кукурудзи, вирощуваної на зерно, за внесення різних доз органічного та органо-мінерального ґрунтополіпшувачів — комбінованих засобів для посилення закріплення органічного вуглецю у ґрунті.

Результатом дослідження є встановлення закономірностей секвестрації $CO_2$ чорноземом опідзоленим шляхом визначення зміни емісії $CO_2$ з ґрунту залежно від застосування різних доз та способів внесення спеціально створених органічного та органо-мінерального ґрунтополіпшувачів. Запропоновано прогностичну модель залежності інтенсивності викидів $CO_2$ від параметрів температури та вологості ґрунту.

## 2. Об'єкти (матеріали) і методи досліджень

Динаміку емісії $CO_2$ за внесення різних доз органічних та органо-мінеральних ґрунтополіпшувачів (ҐП) вивчали протягом вегетаційного періоду кукурудзи, вирощуваної на зерно у довгостроковому стаціонарному досліді «Вплив різних рівнів біологізації землеробства на родючість ґрунту» (зареєстрований за № 07 у Реєстрі «Стаціонарні польові досліди України») на дослідному полі ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського», ДП «ДГ «Граківське». Дослід було закладено у 1989 році поблизу с. Новий Коротич Харківського району Харківської області. Природно-кліматична зона — Лівобережний Лісостеп. Метеорологічні умови на території дослідного поля наведено в таблиці 1 за даними метеостанції у м. Мерефа Харківського району.

***Таблиця 1***
*Метеорологічні умови у 2020-2021 роках (за даними метеостанції у м. Мерефа)*

| Місяць | Температура, $^0$C | | Опади, мм | | Швидкість вітру, м/с | | Атмосферний тиск, мм. рт. ст. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *2020* | *2021* | *2020* | *2021* | *2020* | *2021* | *2020* | *2021* |
| Січень | -0,1 | -2,5 | 27 | 70 | 4 | 4,3 | 749,5 | 746,6 |
| Лютий | 0,2 | -5 | 67 | 60 | 4,2 | 3,8 | 744,3 | 749,5 |
| Березень | 6,2 | 1,1 | 18 | 18 | 4,5 | 4 | 749,2 | 748,6 |
| Квітень | 14 | 8,3 | 22 | 42 | 7,4 | 4,5 | 743,7 | 747,5 |
| Травень | 13,5 | 15,8 | 137 | 52 | 3,7 | 3,9 | 745,6 | 745,6 |
| Червень | 22,1 | 20,6 | 68 | 68 | 3,9 | 3,6 | 745,4 | 745,9 |
| Липень | 22,7 | 24,8 | 107 | 7,3 | 2,8 | 3 | 746,1 | 746 |
| Серпень | 20,9 | 23,8 | 6,3 | 21 | 2,7 | 3,1 | 746,9 | 745,9 |
| Вересень | 18,4 | 13,3 | 0,6 | 22 | 4,6 | 2,9 | 750,1 | 748,5 |

Ґрунт дослідного поля — чорнозем опідзолений малогумусний (*Luvic Chernic Phaeozem*) важкосуглинковий на лесоподібному суглинку. Вміст органічного вуглецю у ґрунті в шарі 0–20 см — 2,37 % (за методом Тюріна), гумусу — 4,1 %, мінерального азоту ($N\text{-}NH_4$ + $N\text{-}NO_3$) — 24 мг/кг ґрунту, рухомих сполук фосфору — 111 мг/кг ґрунту, рухомих сполук калію — 90 мг/кг ґрунту (за методом Чирикова).

У схемі дрібноділянкового досліду (Табл. 2) передбачено сім варіантів; повторність — чотирикратна. Облікова площа однієї ділянки — 4 м$^2$. Сільськогосподарська культура — кукурудза, вирощувана до повної стиглості, на зерно. Глибина внесення мінеральних добрив і ҐП — 20 см.

Органічний і органо-мінеральний ґрунтополіпшувачі були розроблені на основі леонардиту з такими його характеристиками: вологість 55,8 %, вміст вуглецю 48,3 %, загальний вміст азоту — 0,06 %, фосфору — 0,001 %, калію 0,02 % на суху речовину, pH 5,3.

Леонардит — матеріал, який видобувають у близьких до поверхні шарах покладів бурого вугілля; має високі ознаки окиснення та вмісту органічних речовин, і перебуває у процесі мінералізації. Для посилення удобрювальних якостей леонардиту застосовували бентоніт, мелясу та сірчанокисле залізо ($FeSO_4$). Бентоніт ($Si_8Al_4O_2(OH)_4 \times nH_2O$) — природний глинистий мінерал, складається в основному з мінералів групи монтморилоніту; меляса — побічний продукт виробництва цукру з цукрових буряків; сірчанокисле залізо — хімічний препарат.

За результатами попередньо проведеного спеціального модельного експерименту було визначено найефективніші масові співвідношення компонентів у складі ґрунтополіпшувачів з огляду на їхні фізико-хімічні характеристики, що й застосовано у досліді.

В органічному ҐП (варіанти 4 і 5) співвідношення маси компонентів було таким: 1,0 леонардит : 0,5 бентоніт : 0,5 меляса : 0,01 $FeSO_4$; співвідношення C : N = 35; загальний вміст азоту становить 1,6 %; співвідношення макроелементів — 1,0 N : 0,1 P : 2,7 K.

***Таблиця 2***
*Схема дрібноділянкового досліду*

| Варіант | Ґрунтополіпшувач (ҐП) | | Спосіб внесення | Доза | |
|---|---|---|---|---|---|
| | *тип* | *склад* | | *за масою* | *за вмістом азоту,* |
| 1 | Без добрив і ҐП – контроль | — | — | — | — |
| 2 | Мінеральне добриво | $N_{16}P_{16}K_{16}$ (нітроамофоска) | врозкид | 375 кг/га (0,15 кг/4 м$^2$) | $N_{60}$ |
| 3 | Мінеральне добриво | | локально | 187 кг/га (0,08 кг/4 м$^2$) | $N_{30}$ |
| 4 | Органічний ҐП | леонардит; бентоніт; меляса; $FeSO_4$ | врозкид | 3,7 т/га (1,48 кг/4 м$^2$) | $N_{60}$ |
| 5 | Органічний ҐП | | локально | 1,8 т/га (0,72 кг/4 м$^2$) | $N_{30}$ |
| 6 | Органо-мінеральний ҐП | леонардит; бентоніт; меляса; $FeSO_4$; $N_{16}P_{16}K_{16}$ | врозкид | 3,7 т/га (1,48 кг/4 м$^2$) | $N_{60}$ |
| 7 | Органо-мінеральний ҐП | | локально | 1,8 т/га (0,72 кг/4 м$^2$) | $N_{30}$ |

У гранульованому органо-мінеральному ҐП (варіанти 6 і 7) співвідношення маси компонентів: 1,0 леонардит : 0,5 бентоніт : 0,7 меляса : 0,01 $FeSO_4$ : 0,7 нітроамофоска ($N_{16}P_{16}K_{16}$); співвідношення C : N = 5; загальний вміст азоту — 1,6 %; співвідношення макроелементів — 1,0 N : 0,86 P : 0,95 K.

Вимірювання емісії $CO_2$ з ґрунту проводили 4 рази кожного року (травень, червень, серпень і вересень 2020 і 2021 рр.) упродовж вегетаційного періоду кукурудзи на зерно. Інструментальний контроль інтенсивності виділення вуглекислого газу з ґрунту проводили за допомогою портативного газоаналізатора testo 535 з ізоляцією від атмосферного повітря за допомогою респіраційної камери. Для підвищення точності та об'єктивності результатів вимірювань обирали експозицію до 15 хвилин, робочу камеру із середнім об'ємом поглинання 2–3 дм$^3$ із вертикальним закріпленням інфрачервоного зонду на відстані від поверхні ґрунту 1,5–2,0 см [16].

Камеру для визначення інтенсивності емісії $CO_2$ з ґрунту розміщували у міжрядді. На початку вимірювання фіксували початкові значення величин концентрації газу, температури повітря, атмосферного тиску всередині камери та температури самої камери. Наприкінці експозиції проводили повторне вимірювання параметрів концентрації газу, температури повітря та атмосферного тиску, врахування яких дозволяє визначити величину поправки α на значення інтенсивності дихання ґрунту. Одночасно фіксували час експозиції. Розрахунки проводили за формулами 1 або 2 [17]:

$$\mathrm{E} = \mu \frac{H - h_Z}{Rt}\left(\frac{P_2}{T_2}C_2 - \frac{P_1}{T_1}C_1\right), \text{ якщо } \alpha \le 0, \qquad (1)$$

або

$$\mathrm{E} = \mu \frac{(H - h_Z)P_1}{RtT_1}\left(C_2 - C_1\right), \text{ якщо } \alpha > 0, \qquad (2)$$

де: E – інтенсивність емісії газів з ґрунту;

$P_1$, $T_1$ та $P_2$, $T_2$ – початкове та кінцеве значення тиску і температури повітря всередині респіраційної камери, відповідно;

$\mu$ – молярна маса газу;

$H$ – висота камери;

$h_z$ – глибина занурення камери в ґрунт;

$C_1$, $C_2$ – початкова та кінцева концентрації газу, (в одиницях ppm та ppb) відповідно;

$R$ – універсальна газова стала;

*t* – час, за який проводиться вимірювання;

α – коефіцієнт, що відображає зміну початкового об'єму газу в камері в результаті зміни початкових величин тиску і температури та визначається як:

$$\alpha = \frac{P_1 T_2}{P_2 T_1} - 1 \qquad (3)$$

Вимірювання інтенсивності виділення діоксиду вуглецю проводили 3–5 разів на день; одночасно визначали температуру повітря та вміст вологи у шарі ґрунту 0–20 см. Результати вимірювання були усереднені та оброблені за допомогою програми Statistica 10.0.

Проби ґрунту відбирали з шару 0–20 см за ДСТУ 4287:2004[1], попереднє обробляння зразків для фізико-хімічного аналізу — за ДСТУ ISO 11464:2007[2]. Вміст органічного вуглецю у ґрунті визначали оксидиметричним методом Тюріна за ДСТУ 4289:2004[3], вміст вологи у ґрунті визначали гравіметричним методом — за ДСТУ ISO 11465:2001[4], температуру ґрунту вимірювали термометром Савінова — за ДСТУ ISO 1771:2006[5], аналізування проводили в атестованій лабораторії ННЦ ІГА (свідоцтво про атестацію № 01-0084/2020).

### 3. Результати досліджень

Кількість і якість внесених ҐП у ґрунт є важливим фактором для процесів мінералізації та гуміфікації. Органічний та органо-мінеральний ҐП впливали на зміни досліджуваних параметрів ґрунту впродовж вегетаційного періоду кукурудзи — емісію $CO_2$ та вміст органічного вуглецю. Співвідношення C і N у внесених у ґрунт ҐП є важливим параметром для прогнозування швидкості мінералізації органічного вуглецю та побудови динамічних моделей вивільнення поживних речовин. У середньому за період вимірювання з травня до вересня 2020 року об’єм емісії $CO_2$ за одну годину із ґрунту за локального внесення органічного ҐП в дозі 30 кг/га за вмістом азоту (варіант 5, з найбільшим співвідношенням C і N), був більшим на 0,335 кг/га порівняно з контролем та на 0,181 кг/га порівняно з мінеральним фоном з такою самою дозою за вмістом азоту (Рис. 1).

На фоні збільшення емісії $CO_2$ із ґрунту на варіантах (4 і 5) із внесенням органічного ҐП спостерігається підвищення вмісту в ґрунті органічного вуглецю на 0,04 і 0,08 % порівняно з мінеральним фоном і контролем. За локального внесення органо-мінерального ҐП з дозою азоту $N_{30}$ (варіант 7) емісія $CO_2$ з ґрунту була близькою до мінерального фону, але вміст органічного вуглецю був найбільшим серед досліджуваних варіантів.

Таким чином можна стверджувати, що леонардит, на основі якого створено органічний і органо-мінеральний ҐП, із високим вмістом органічного вуглецю (48,3 %) та доданим бентонітом ($Si_8Al_4O_2$ $(OH)_4 \times nH_2O$), позитивно впливають на формування органо-мінеральних комплексів у ґрунті, сприяючи збільшенню загального вмісту органічного вуглецю. За локального внесення гранульованого органо-мінерального ҐП, який має нижче відношення C : N (варіант 7), створюються умови для накопичення органічного вуглецю в ґрунті за помірної емісії $CO_2$.

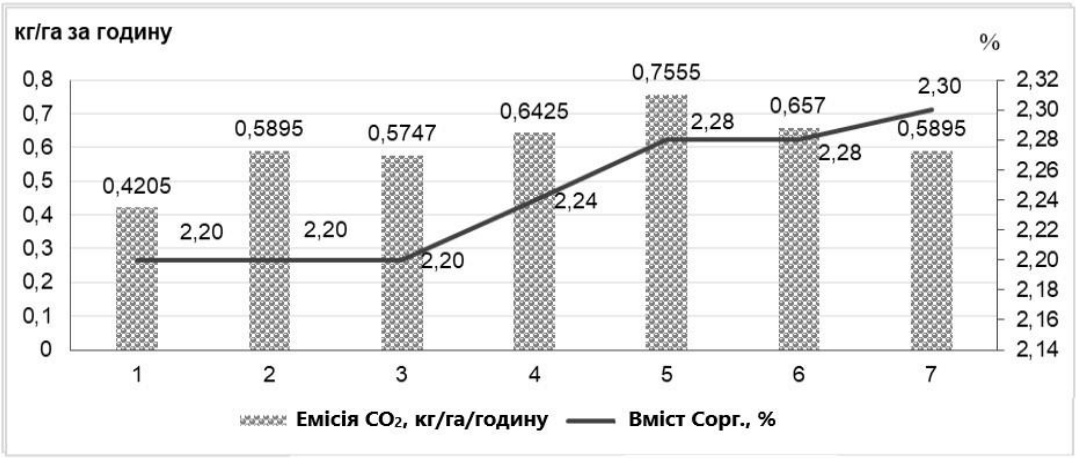
[1] ДСТУ 4287:2004. Якість ґрунту. Відбирання проб : [Чинний від 2004-30-04] Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 5 с.

[2] ДСТУ ISO 11464:2007. Якість ґрунту. Попереднє обробляння зразків для фізико-хімічного аналізу: [Чинний від 2009-01-10] Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 12 с.

[3] ДСТУ 4289:2004. Якість ґрунту. Методи визначання органічної речовини. [Чинний від 2005–07–01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 13 с.

[4] ДСТУ ISO 11465:2001. Якість ґрунту. Визначання сухої речовини та вологості за масою. Гравіметричний метод. [Чинний від 2001–12–28]. Київ: Держспоживстандарт України, 2001. 9 с.

[5] ДСТУ ISO 1771:2006 Термометри загальної призначеності з вкладеною шкалою [Чинний від 2006–06–29]. Київ: : Держспоживстандарт України, 2001. 8 с.




*Позначення варіантів досліду*: 1 — контроль (без добрив); 2 — мінеральне добриво ($N_{60}$) врозкид; 3 — мінеральне добриво ($N_{30}$) локально; 4 — органічний ґрунтополіпшувач (ҐП) ($N_{60}$) врозкид; 5 — органічний ҐП ($N_{30}$) локально; 6 — органо-мінеральний ҐП ($N_{60}$) врозкид; 7 — органо-мінеральний ҐП ($N_{30}$) локально.

***Рис. 1.*** *Емісія вуглекислого газу з чорнозему опідзоленого та вміст органічного вуглецю (середні значення за період вимірювання з травня до вересня 2020 р)*

За нашими спостереженнями, виділення вуглекислого газу з ґрунту у 2020 р. було більшим ніж у 2021, чому сприяли метеорологічні умови (Табл. 1). Оскільки з наближенням холодного періоду року мікробіологічна активність у ґрунті згасає, негативний вплив низьких осінніх значень вологості та температури ґрунту виступають обмежувальними факторами «дихання ґрунту». Під час досліджень прослідковувалось зниження негативного впливу низьких значень вологості та температури ґрунту на виділення вуглекислого газу на всіх варіантах із внесенням ҐП порівняно з контрольною ділянкою. Інтенсивність викидів $CO_2$ залежала також від норми внесення ҐП, що так само було встановлено в науковій роботі [15]. Емісія $CO_2$ протікала з меншою інтенсивністю за внесення органо-мінерального ҐП порівняно з органічним. Незалежно від типу ҐП та доз їх внесення емісія $CO_2$ була вищою на початку експерименту (2020 р.), а потім поступово знижувалася.

Кількість $CO_2$, що виділяється з ґрунту, зумовлюється як біологічними факторами (швидкістю росту рослин, активністю мікроорганізмів), так і гідротермічним фактором, який визначається, перш за все, погодними умовами [15, 18, 19]. Через залежність біологічних процесів від погоди викиди $CO_2$ із ґрунту мають добову та сезонну динаміку, зумовлену коливаннями температури та вологості ґрунту, змінами тиску, швидкості вітру, фізичного стану поверхні ґрунту тощо.

Вплив вологості та температури ґрунту позначається як на фізико-хімічних процесах у ґрунті, так і на інтенсивності біологічних процесів, збільшення температури стимулює кумулятивну частоту дихання [20]. Супутні спостереження за температурою та вологістю ґрунту показали, що вони є визначальними факторами значного посилення дихання ґрунту після дощів у травні-червні (Рис. 2), після чого вологість ґрунту знижується майже до критичної — тимчасове в'янення рослин (≤20 %).

Найвищі значення емісії $CO_2$, у зв'язку зі збільшенням вологості ґрунту, було простежено наприкінці весни 2020 р. після сильних дощів. Посилення посухи в останні літні місяці призвело до зменшення потоків $CO_2$ на всіх досліджуваних варіантах.

В умовах недостатнього зволоження ґрунту зв'язок між інтенсивністю емісії $CO_2$ і температурою був помітним і обернено пропорційним. У літній період емісія $CO_2$ з ґрунту знижувалася на всіх варіантах досліду порівняно з весняним періодом, чому істотно сприяли високі літні температури. Слід зазначити, що найістотніші відмінності між варіантами досліду щодо дихання ґрунту спостерігали переважно у першій половині вегетаційного періоду кукурудзи.

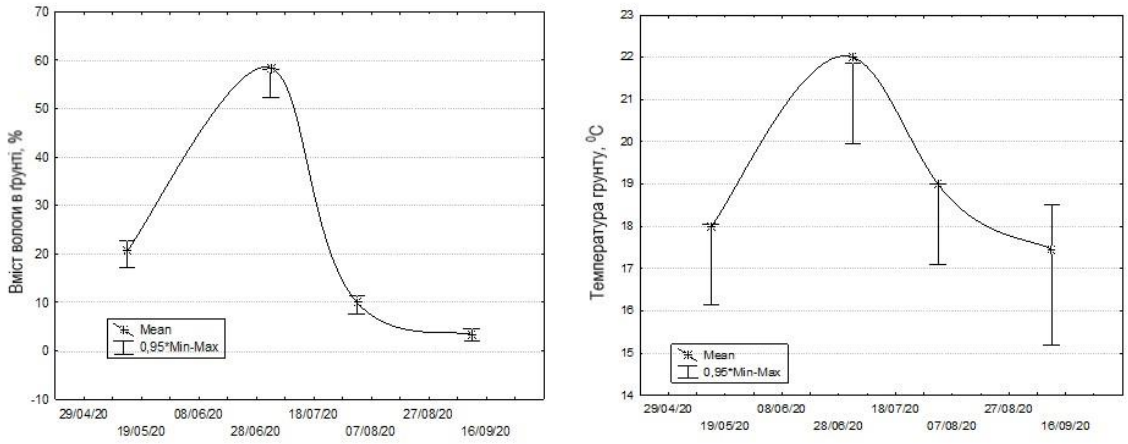
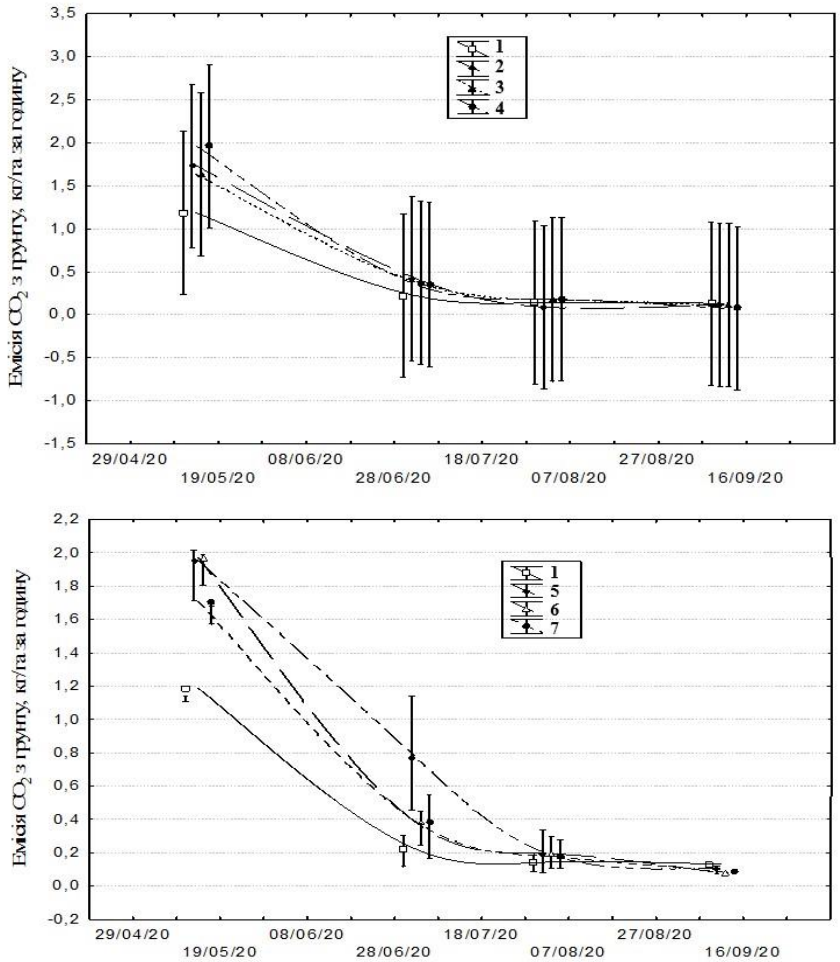



***Рис. 2.*** *Динаміка вологості і температури ґрунту в період вегетації кукурудзи на зерно у 2020 р. на варіанті 1 — контроль (без добрив) (шар 0-20 см)*

Дані емісії $CO_2$ з чорнозему опідзоленого у сезонній динаміці (за вегетаційний період кукурудзи) демонструють істотну різницю варіантів із внесенням ҐП та мінерального добрива порівняно з контролем (Рис. 3).




Позначення варіантів досліду: 1 — контроль (без добрив); 2 — мінеральне добриво ($N_{60}$) врозкид; 3 — мінеральне добриво ($N_{30}$) локально; 4 — органічний ґрунтополіпшувач (ҐП) ($N_{60}$) врозкид; 5 — органічний ҐП ($N_{30}$) локально; 6 — органо-мінеральний ҐП ($N_{60}$) врозкид; 7 — органо-мінеральний ҐП ($N_{30}$) локально.

***Рис. 3****. Сезонна динаміка емісії вуглекислого газу з чорнозему опідзоленого*

Максимум емісії $CO_2$ з ґрунту, за всіма строками вимірювання, демонструє варіант 5 із локальним внесенням органічного ҐП в одинарній дозі $N_{30}$. Варіанти з органо-мінеральним ҐП (6 і 7) поступаються за інтенсивністю емісійного потоку. На нашу думку, причина цього полягає у тому, що удобрення рослин мінеральними добривами пришвидшує інтенсивність розкладу органічних решток, що провокує швидку їх мінералізацію з поверхні, тим самим змінюючи емісійний потік. У наукових дослідженнях, опублікованих різними авторами, були виявлені відмінності в процесі гумусоутворення залежно від технології внесення мінеральних добрив [3, 17, 19]. Тривале систематичне внесення туків локальним способом активізує процеси мінералізації органічної речовини через підвищену мікробіологічну активність, в результаті чого загальний вміст органічного вуглецю у ґрунті знижується.

Результати досліджень вологості і температури ґрунту в орному шарі використано для побудови квадратичної моделі залежності інтенсивності викидів $CO_2$ від їхніх параметрів (Рис. 4).

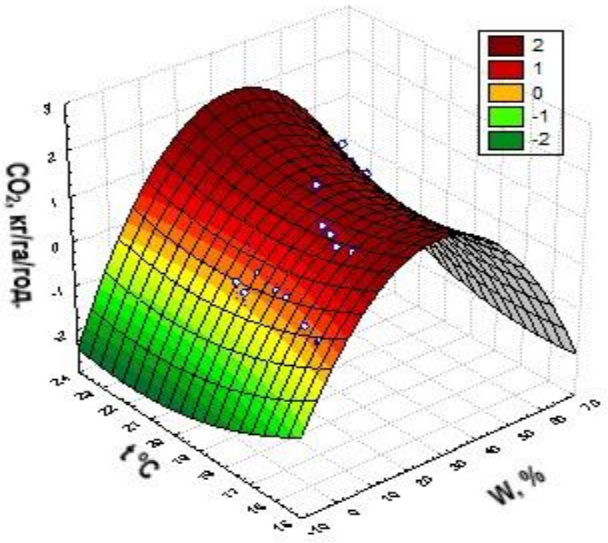



***Рис. 4.*** *Залежність викидів $CO_2$ з чорнозему опідзоленого від температури та вологості ґрунту в середньому за 2020-2021 рр.*

Графічною моделлю прогнозується поступове збільшення потоків $CO_2$ за підвищення температури ґрунту, навіть на фоні низької вологості за рівнянням залежності:

$$z = CO_2 = -CO_2 = -11{,}8094+0{,}0055*x+1{,}2206*y-0{,}0017*x*x+0{,}0046*x*y-0{,}0312*y*y \quad (4)$$

де z – Інтенсивність викидів $CO_2$, кг/га/год.;
x – вологість ґрунту, W, %;
y – температура ґрунту, t, ºС.

У подальших дослідженнях математичну модель буде вдосконалено та доповнено новими даними (вплив добрив, способу обробітку ґрунту, врожаю), проте наразі її можна застосовувати для прогнозу емісії $CO_2$ з чорноземів опідзолених за різних гідротермічних умов.

### 4. Обговорення результатів досліджень

Ґрунтовий покрив із сільськогосподарськими культурами відіграє важливу роль у динаміці емісії $CO_2$, що є часткою глобального вуглецевого циклу [7, 9]. В умовах мінливого клімату викиди парникових газів, включаючи емісію $CO_2$, швидко збільшуються через підвищення температури. Фізіологічні процеси, що відбуваються в рослинах (фотосинтез) також впливають на викиди та поглинання вуглецю залежно від добових та сезонних коливань погодних параметрів, а також від гідрологічних та кліматичних змін (сонячної енергії, температури ґрунту та повітря, вологості ґрунту). Результати досліджень, проведених нами упродовж двох вегетаційних періодів кукурудзи вказують на сезонну динаміку викидів $CO_2$ з

максимумом у весняний період з поступовим послабленням до осені, від 2,0 до 0,1 кг/га за годину. Результати наших досліджень узгоджуються з даними, опублікованими іншими авторами, стосовно застосуванням органічних ҐП за вирощування овочевих культур [11, 15].

Збалансована система застосування добрив позитивно впливає на функціонування мікробіологічної складової ґрунту, яка, своєю чергою, впливає на ґрунтове дихання в цілому [19]. У будь-якому разі виділення ґрунтом $CO_2$ може слугувати своєрідним індикатором інтенсивності малого біологічного кругообігу речовин, який здебільшого пришвидшується за застосування добрив. Процеси ґрунтового дихання також тісно пов'язані з активністю та чисельністю мікробіоти і структурою мікробіоценозу, які змінюються протягом року. Визначено, що в чорноземних ґрунтах присутні мікроорганізми, які окиснюють $CO_2$, або метанотрофи, які періодично споживають $CO_2$ [18]. Зміни трофічного режиму, інтенсивності кореневих виділень та накопичення мікробної біомаси протягом першої половини вегетаційного періоду є не менш важливими факторами сезонної динаміки викидів $CO_2$ ніж метеорологічні умови.

Органічні добрива, або органічні та органо-мінеральні ҐП є особливо значущими для динаміки дихання ґрунту у зв’язку з тим, що вони впливають на загальний вміст органічного вуглецю ґрунту через зміну мікробіологічних процесів, виступаючи джерелом живлення для мікроорганізмів [11, 18, 20]. Показники біологічної активності ґрунту, не будучи прямими чинниками формування врожаю, характеризують сприятливість ґрунтових умов для живлення та розвитку сільськогосподарських рослин. Процеси продукування $CO_2$ ґрунтом можуть посилюватися не тільки за рахунок розкладу більшого об’єму кореневих і пожнивних решток вищих рослин та посилення загальної мікробіологічної активності, але й за рахунок внесення органічних та мінеральних добрив. Контрольовані та адаптивні способи ведення сільського господарства, що базуються на знаннях про обсяги викидів $CO_2$ з орних ґрунтів, допоможуть підвищити врожаї вирощуваних культур та знизити відсоток загальних викидів парникових газів у атмосферу. Наукові дослідження, що проведені, вказують на посилення емісії $CO_2$ з чорнозему опідзоленого, як відповідь на внесення органічних та органо-мінеральних компонентів у ґрунт, що важливо для розвитку сучасних методів в управлінні родючістю ґрунтів, особливо в частині контролю вмісту у ґрунті органічного вуглецю. Швидкість розкладання органічних речовин у ґрунті пов'язана з умістом азоту, оскільки низький вміст цього макроелементу обмежує засвоєння вуглецю мікроорганізмами, а також впливає на співвідношення лабільних і стійких органічних сполук. У наукових працях інших дослідників наголошено про накопичення загального органічного вуглецю ґрунтом за підвищеного надходження азоту [6, 14, 18]. Нашими дослідженнями також підтверджено, що за внесення органо-мінерального ҐП, із співвідношенням C : N – 5, емісія $CO_2$ з ґрунту уповільнюється, що сприяє секвестрації вуглецю ґрунтом.

Встановлено чітку сезонну динаміку здатності ґрунту продукувати $CO_2$ з максимумом у весняний період та з поступовим послабленням до осені. Порівняно із сезонними змінами емісії $CO_2$, відмінності, викликані застосуванням двох типів ґрунтополіпшувачів, значно менші і проявляються переважно протягом першої половини вегетаційного періоду кукурудзи.

Внесення органічного та органо-мінерального ҐП позитивно впливало на накопичення органічного вуглецю в ґрунті. Найбільш ефективним визнано локальний спосіб внесення гранульованого органо-мінерального ґрунтополіпшувача із відношенням C/N = 5, за якого рівень емісії $CO_2$ уповільнюється і збільшується загальний вміст органічного вуглецю ґрунту порівняно з іншими варіантами досліду.

### 5. Висновки

Гідротермічні чинники відіграють значну роль у змінах динаміки емісії вуглекислого газу з ґрунту, що зафіксовано протягом двох вегетаційних періодів кукурудзи, вирощуваної на зерно. Встановлено чітку сезонну динаміку потенційної здатності ґрунту продукувати $CO_2$ з максимумом у весняний період та з поступовим послабленням до осені. Запропонована математична модель дозволяє прогнозувати обсяги викидів $CO_2$ з чорноземних ґрунтів за

різних погодних умов упродовж теплого періоду з внесенням змін у систему удобрення сільськогосподарських культур.

Застосування органічних ҐП у комплексі з мінеральними добривами суттєво впливає на динаміку емісії $CO_2$ з ґрунту. Порівняно із сезонними змінами емісії $CO_2$, ці відмінності значно менші і проявляються переважно протягом першої половини вегетаційного періоду кукурудзи на зерно, коли спостерігається чітка тенденція до збільшення інтенсивності дихання ґрунту. Внесення органічного та органо-мінерального ҐП позитивно впливало на накопичення органічного вуглецю в орному шарі чорнозему опідзоленого. Інтенсивність акумуляції вуглецю залежала від складу, дози та способу внесення ҐП. Найвищою ефективністю відзначається локальний спосіб внесення гранульованого органо-мінерального ҐП із співвідношенням C : N = 5 за якого рівень емісії $CO_2$ уповільнюється, що сприяє збільшенню загального вмісту органічного вуглецю в ґрунті.

Для максимізації поглинання вуглецю орними чорноземами в метеорологічних умовах Лівобережного Лісостепу України ефективним є впровадження в систему удобрення кукурудзи на зерно органо-мінерального ҐП із таким співвідношенням компонентів: 1,0 леонардит : 0,5 бентоніт : 0,7 меляса : 0,01 $FeSO_4$ : 0,7 NPK в дозі 30 кг N/га локальним способом внесення на глибину 20 см.

Оскільки емісія $CO_2$ з ґрунту була найвищою на варіантах із застосуванням органічних ҐП, пропонується проведення подальших досліджень зі збільшенням глибини їх загортання у ґрунт з 20 см до 30–40 см. Рекомендується оцінити вплив органічних та органо-мінеральних ҐП за різних доз внесення на врожайність олійних та овочевих культур із одночасним проведенням вимірювання інтенсивності емісії $CO_2$ та активності мікробіологічної діяльності в різних ґрунтово-кліматичних умовах України.

*Фінансування.* Дослідження фінансувалися спеціальними коштами в рамках проєкту «Технологія виробництва та застосування органічних та органо-мінеральних ґрунтополіпшувачів для управління ґрунтовим вуглецем» для Плану впровадження Євразійського ґрунтового партнерства GSP/GLO/853 між Продовольчою та Сільськогосподарською Організацією Об'єднаних Націй («ФАО») та Національним науковим центром «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського».

***Подяка.*** Автори висловлюють подяку Секретаріату GSP, Міжурядовій технічній групі експертів з ґрунтознавства (ITPS) та Євразійському центру безпеки харчових продуктів (ECFS), членам Наукового комітету за технічну та наукову підтримку надану на етапах підготовки та реалізації наукових досліджень.

### Список використаних джерел

1. Allen M. R., Babiker M., Chen Y., de Coninck H., Connors S., van Diemen R., … K. Zickfeld. Global Warming of 1.5 °C. Summary for Policymakers, approved at the First Joint Session of Working Groups I, II and III of the IPCC and accepted by the 48th Session of the IPCC, Incheon, Republic of Korea, 6 October 2018. 33 p. ISBN 978-92-9169-151-7. URL: https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/

2. European Environment Agency. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2016 and inventory report 2018 Submission to the UNFCCC Secretariat. 27 May 2018:955. URL: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/european-union-greenhouse-gas-inventory-2018

3. Mátyás B., Lowy D. A., Singla A., Melendez J., Zsolt S. Comparison of effects exerted by bio-fertilizers, NPK fertilizers, and cultivation methods on soil respiration in Chernozem soil. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. 2020. 32(2). P. 7-17. https://doi.org/10.17163/lgr.n32.2020.01

4. Stockmann U., Adams M. A., Crawford J. W. Field D. J., Henakaarchchi N. Jenkins M., … Zimmermann M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2013. 164. P. 80–99. https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001

5. Poulton P., Johnston J., Macdonald A., White R., Powlson D. Limitations to achieving "4 per 1000" increases in soil organic carbon stock in temperate regions: evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom. *Global Change Biology*. 2018. 24. P. 2563–2584. https://doi.org/10.1111/gcb.14066

6. Autret B., Mary B., Chenu C., Balabane M., Girardin C., Bertrand M., … Beaudoin N. Alternative arable cropping systems: a key to increase soil organic carbon storage? Results from a 16 year field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 2016. 232. P. 150–164. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.008

7. Le Noë J., Billen G., Mary B., Garnier J. Drivers of long-term carbon dynamics in cropland: a bio-political history (France, 1852-2014). *Environmental Science and Pollution Research.* 2019. 93. P. 53–65. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.027

8. Ingram J. S. I., Fernandes E. C. M. Managing carbon sequestration in soils: concepts and terminology. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2001. 87(1). P. 111-117. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00145-1

9. Lal R. Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *Bio Science*. 2010. 60(9). P. 708-721. https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.8

10. Lamptey S., Xie J., Li L., Coulter J. A., Jagadabhi P. S. Influence of organic amendment on soil respiration and maize productivity in a semi-arid environment. *Agronomy*. 2019. 9(10). P. 611. https://doi.org/10.3390/agronomy9100611

11. Luan H., Gao W., Huang S., Tang J., Li M., Zhang H., … Masiliūnas D. Organic amendment increases soil respiration in a greenhouse vegetable production system through decreasing soil organic carbon recalcitrance and increasing carbon-degrading microbial activity. *Journal of Soils and Sediments.* 2020. 20. P. 2877–2892. https://doi.org/10.1007/s11368-020-02625-z

12. Xiao C. Soil Organic Carbon Storage (Sequestration) Principles and Management. Potential Role for Recycled Organic Materials in Agricultural Soils of Washington State. *Waste 2 Resources Program Washington State Department of Ecology Olympia*, Washington, 2015. 90 p.

13. Chaker R., Gargouri K., Mbarek H. B. Maktouf S., Palese A. M., Celani G., Bouzid J. Carbon and nitrogen balances and $CO_2$ emission after exogenous organic matter application in arid soil. *Carbon Management*. 2019. 10(1). P. 23-36. https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1544829

14. Brenzinger K., Drost S. M., Korthals G., Bodelieret P. L. E. Organic residue amendments to modulate greenhouse gas emissions from agricultural soils. *Frontiers in Microbiology.* 2018. 9. P. 3035. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03035

15. Ray R. L., Griffin R. W., Fares A. Elhassan A., Awal R., Woldesenbet S., Risch E. Soil $CO_2$ emission in response to organic amendments, temperature, and rainfall. *Scientific Reports*. 2020. 10. 5849. P. 1-14. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62267-6

16. Трофименко П., Сябрук О., Борисов Ф., Веремеєнко С. *Метод визначення інтенсивності виділення газів із ґрунту (на прикладі $CO_2$)*. Харків: ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського», 2019. 29 с.

17. Трофименко П., Трофименко Н., Веремеєнко С., Борисов Ф. Методологія визначення інтенсивності дихання ґрунтів та емісійні втрати вуглецю агроландшафтами Лівобережного Полісся наприкінці періоду вегетації рослин. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія: Агрономія*. 2019. 90. С. 238-243. https://doi.org/10.31734/agronomy2019.01.238

18. Bautista G., Mátyás B., Carpio I., Vilches R., Pazmino K. Unexpected results in Chernozem soil respiration while measuring the effect of a bio-fertilizer on soil microbial activity. *F1000Research*. 2017. 6:1950. P. 195-207. https://doi.org/10.12688/f1000research.12936.2

19. Гаврилюк В. А., Мелимука Р. Я. Емісія вуглекислого газу та мікробіологічна активність ґрунтів за різного сільськогосподарського призначення в умовах Західного Полісся. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Агрономія і біологія.* 2022. 47(1). С. 42-47. https://doi.org/10.32845/agrobio.2022.1.6

20. Ali R. S., Poll C., Kandeler E. Dynamics of soil respiration and microbial communities: Interactive controls of temperature and substrate quality. *Soil Biology and Biochemistry.* 2018. 127. P. 60-70. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.09.010

UDC 631.433.53:631.895:631.42

## Soil $CO_2$ emission in response to organic and organo-mineral amendments

**Ye. V. Skrylnyk*, A. M. Kutova, O. P. Volosheniuk, S. I. Krylach, M. A. Popirny**

**National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky",**
*Kharkiv, Ukraine*
*Corresponding author: *orgminlab@gmail.com*

Received 31.10.2024, Revised 13.11.2024, Accepted 18.12.2024, Available online 27.12.2024

**Abstract**

The results of field studies on the impact of applying organic and organo-mineral amendments on the dynamics of $CO_2$ emissions during the growing season of grain corn and the content of organic carbon in the soil are described. A long-term (since 1989) small-plot experiment was conducted on podzolized low-humus heavy loamy chernozem on loess-like loam (Luvic Chernic Phaeozem) in the experimental farm of the National Scientific Center "Institute for soil science and agrochemistry research named after O. N. Sokolovsky" in the Kharkiv region in the conditions of the Left Bank Forest-Steppe. The experimental options include the composition, method, and doses of organic and organo-mineral amendments developed on the basis of leonardite with the addition of bentonite, molasses, and iron sulfate (and nitroammofoska in the organo-mineral) - 30 and 60 kg/ha in terms of nitrogen content. During the growing seasons of 2020 and 2021, we studied the seasonal dynamics of the following soil parameters: carbon dioxide emission intensity; organic carbon content; moisture content; temperature. Weather data taken from a weather station. $CO_2$ emission measurements were carried out 4 times each year during the growing season using a portable testo 535 gas analyzer with isolation from atmospheric air. Within the arable layer (0-20 cm), the following were determined: the content of organic carbon in the soil by the oxidimetric method, the moisture content by the gravimetric method; the soil temperature measured with a Savinov thermometer. The results of the research have established a clear seasonal dynamics of the soil's ability to produce $CO_2$ (from 0.1 to 2.0 kg/ha per hour) with a maximum in the spring and a gradual weakening by autumn, which is explained by the influence of weather conditions and the soil microclimate. A predictive model of the dependence of the intensity of $CO_2$ emissions on the parameters of soil temperature and humidity is proposed. Compared to seasonal changes in $CO_2$ emissions, the differences caused by the use of the two types of amendments are much smaller and manifest themselves mainly during the first half of the corn-growing season. The highest $CO_2$ emission is with local application of organic amendment at a dose of 30 kg N/ha. The application of organic and organo-mineral amendment had a positive effect on the accumulation of organic carbon in the soil. The most effective method was recognized as the local method of applying a granular organo-mineral amendment with a C/N ratio of 5, in which the level of CO2 emission slows down compared to an organic amendment, and the total organic carbon content of the soil is the highest compared to other experimental options. It has been proven that carbon sequestration by soil, in addition to hydrothermal environmental conditions, is influenced by the composition and method of amendment, which can serve as a recommendation for the practical use of land improvement and fertilization agents in agriculture.

***Keywords*:** amendments; podzolized chernozem; $CO_2$ emission; hydrothermal factors; seasonal dynamics; organic carbon.

***Citing*:** Skrylnyk Ye. V., Kutova A. M., Volosheniuk O. P., Krylach S. I., Popirny M. A. (2024). Soil $CO_2$ emission in response to organic and organo-mineral amendments**.** *AgroChemistry and Soil Science,* 97, 31-42. doi: 10.31073/acss97-04 [in Ukrainian]

## References

1. Allen, M. R., Babiker, M., Chen, Y. de Coninck, H., Connors, S., van Diemen, R., … Zickfeld, K. (2018). Global Warming of 1.5 °C. *Summary for Policymakers, approved at the First Joint Session of Working Groups I, II and III of the IPCC and accepted by the 48th Session of the IPCC*, Incheon, Republic of Korea, 6 October 2018. 33 p. Retrieved from https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/

2. European Environment Agency. (2018). *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2016 and inventory report 2018* Submission to the UNFCCC Secretariat. 27 May 2018:955. Retrieved from https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/european-union-greenhouse-gas-inventory-2018

3. Mátyás, B., Lowy, D. A., Singla, A., Melendez, J., & Zsolt, S. (2020). Comparison of effects exerted by bio-fertilizers, NPK fertilizers, and cultivation methods on soil respiration in Chernozem soil. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida,* 32(2), 7-17. https://doi.org/10.17163/lgr.n32.2020.01

4. Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W. Field, D. J., Henakaarchchi, N. Jenkins, M., … Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment,* 164, 80–99. https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001

5. Poulton P., Johnston J., Macdonald A., White R., & Powlson D. (2018). Limitations to achieving “4 per 1000” increases in soil organic carbon stock in temperate regions: evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom. *Global Change Biology,* 24, 2563–2584. https://doi.org/10.1111/gcb.14066

6. Autret, B., Mary, B., Chenu, C., Balabane, M., Girardin, C., Bertrand, M., … Beaudoin, N. Alternative arable cropping systems: a key to increase soil organic carbon storage? Results from a 16 year field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment,* 232, 150–164. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.008

7. Le Noë, J., Billen, G., Mary, B., & Garnier, J. (2019). Drivers of long-term carbon dynamics in cropland: a bio-political history (France, 1852-2014). *Environmental Science and Pollution Research,* 93, 53–65. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.027

8. Ingram, J. S. I.,& Fernandes, E. C. M. (2001). Managing carbon sequestration in soils: concepts and terminology. *Agriculture, Ecosystems & Environment,* 87(1), 111-117. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00145-1

9. Lal, R. (2010). Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *Bio Science,* 60(9), 708-721. https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.8

10. Lamptey, S., Xie, J., Li, L., Coulter, J. A., & Jagadabhi, P. S. (2019). Influence of organic amendment on soil respiration and maize productivity in a semi-arid environment. *Agronomy,* 9(10), 611. https://doi.org/10.3390/agronomy9100611

11. Luan, H., Gao, W., Huang, S., Tang, J., Li, M., Zhang, H., … Masiliūnas, D. (2020). Organic amendment increases soil respiration in a greenhouse vegetable production system through decreasing soil organic carbon recalcitrance and increasing carbon-degrading microbial activity. *Journal of Soils and Sediments,* 20, 2877–2892. https://doi.org/10.1007/s11368-020-02625-z

12. Xiao, C. (2015). *Soil Organic Carbon Storage (Sequestration) Principles and Management. Potential Role for Recycled Organic Materials in Agricultural Soils of Washington State.* Waste 2 Resources Program Washington State Department of Ecology Olympia, Washington.

13. Chaker, R., Gargouri, K., Mbarek, H. B. Maktouf, S., Palese, A. M., Celani, G., & Bouzid, J. (2019). (2019). Carbon and nitrogen balances and $CO_2$ emission after exogenous organic matter application in arid soil. *Carbon Management,* 10(1), 23-36. https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1544829

14. Brenzinger, K., Drost, S. M., Korthals, G., & Bodelieret, P. L. E. (2018). Organic residue amendments to modulate greenhouse gas emissions from agricultural soils. *Frontiers in Microbiology,* 9, 3035. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03035

15. Ray, R. L., Griffin, R. W., Fares, A. Elhassan, A., Awal, R., Woldesenbet, S., & Risch, E. (2020). Soil $CO_2$ emission in response to organic amendments, temperature, and rainfall. *Scientific Reports,* 10, 5849, 1-14. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62267-6

16. Trofymenko, P., Syabruk, O., Borysov, F., & Veremeyenko, S. (2019). *The method of determining the intensity of emission of gases from the soil (on the example of $CO_2$)*. Kharkiv: NSC "Institute for Soil Science and Agrochemistry Resrarch named after O. N. Sokolovsky" [in Ukrainian].

17. Trofymenko, P, Trofimenko, N, Veremeyenko, S, & Borysov, F. (2019). Methodology of determination of intensity of soil burial and emission loss of carbon agro-landscapes of left bank in Polissya the event of a plane vegetation period. *Bulletin of Lviv National Environmental University*. *Series «Agronomy».* 2019. 90. P. 238-243. https://doi.org/10.31734/agronomy2019.01.238 [in Ukrainian].

18. Bautista, G., Mátyás, B., Carpio, I., Vilches, R., & Pazmino, K. (2017). Unexpected results in Chernozem soil respiration while measuring the effect of a bio-fertilizer on soil microbial activity. *F1000Research,* 6:1950, 195-207. https://doi.org/10.12688/f1000research.12936.2

19. Gavryliuk, V. A., & Melymuka, R. Y. (2022). Carbon gas emissions and microbiological actitvity of soils under different agricultural purposes in conditions of Western Polissia. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Agronomy and Biology,* 47(1), 42-47. https://doi.org/10.32845/agrobio.2022.1.6 [in Ukrainian].

20. Ali, R. S., Poll, C., & Kandeler, E. (2018). Dynamics of soil respiration and microbial communities: Interactive controls of temperature and substrate quality. *Soil Biology and Biochemistry,* 127, 60-70. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.09.010