

## ОПТИМІЗАЦІЙНА МОДЕЛЬ КРУГООБІГУ ВУГЛЕЦЮ В СИСТЕМІ “ГРУНТ–РОСЛИНА”

*На основі запропонованої концептуальної моделі трансформації органічного вуглецю в системі “фітоценоз–гумусові речовини ґрунту” встановлені конкретні параметри для чорнозему типового: мінімально необхідна кількість вуглецю, яка щорічно повинна поступати в ґрунт з усіма потоками органічних речовин; коефіцієнт гуміфікації органічних речовин ( $K_d$ ), а також оптимальне значення величини відчуження органічної речовини, які забезпечують стабільність функціонування екосистеми.*

### Постановка проблеми

Постійно зростаючий антропогенний тиск на біосферу на сьогодні досягнув рівня, за яким настають структурні зміни як в природних, так і в штучних екосистемах. Вони призводять до дестабілізації функціонування однієї з основних підсистем біосфери – рослинний покрив–детритно-гумусовий комплекс. При цьому відбуваються серйозні порушення і зміни як локальних, так і глобальних характеристик біосфери [14, 20]. В процесі своєї діяльності, спрямованої перш за все на створення та підтримання високої стійкості й продуктивності агроекосистем, що супроводжувалось привнесенням в біосферу значної кількості антропогенної енергії, людина порушила динамічну рівновагу між синтезом і розкладанням органічної речовини, яка склалась віками. На це порушення адекватно відреагували агроекосистеми, як менш стійкі утворення, значно зменшивши кількість гумусу в ґрунті, що, в свою чергу, посилило екологічну напруженість: знизило санітарну і буферну його функції [8, 9], сприяло руйнуванню структури, розвитку переущільнення, порушенню водно–повітряного та поживного режимів [11, 12].

Виходячи з вказаного, можна констатувати той факт, що проблема стійкого функціонування як природних, так і штучних екосистем шляхом

регулювання продукційно-відновлювальної функції ґрунту і, особливо, режиму його органічної речовини стає все більш актуальною [13, 15, 17]. Одним із пріоритетних напрямків у галузі агроекології є також виявлення меж стійкості функціонування агроєкосистем, граничнодопустимих рівнів антропогенного навантаження на ґрунт та нових можливих станів ґрунтової екосистеми при посиленні цього навантаження.

Для успішного вирішення питань управління режимами і процесами такої складної полідисперсної, відкритої і динамічної системи як ґрунт і оцінки можливого впливу на її стійкість антропогенного фактора, неминуче необхідна побудова динамічних моделей з подальшим “програванням” на них різноманітних варіантів антропогенного впливу. Наукова література з ґрунтознавства та агроекології містить значну кількість відомостей про опис тих чи інших ґрунтових процесів за допомогою математичних моделей [6, 13, 19]. Значного поширення набуло також і вивчення трансформації органічної речовини ґрунту шляхом застосування концептуальних моделей з наступним їх описом у вигляді окремих рівнянь чи серії рівнянь [5, 15]. Останнім часом успішно робляться спроби побудови моделей, які спираються на теорію катастроф [3, 10, 13]. Моделі цього типу застосовують щодо екосистем ґрунту, які характеризуються дисипативністю енергетичних і матеріальних потоків [3]. Прикладом таких моделей є модель кругообігу оксиду вуглецю (ІУ) в системі “фітоценоз–гумусові речовини ґрунту” [10]. Інша актуальна проблема, яка постала сьогодні – перевірка дієздатності (валиабельності) даного роду моделей, чому й присвячені наші дослідження.

*Завдання досліджень.* У ході виконання досліджень ставилось завдання перевірити дієздатність (валиабельність) раніше розробленої концептуальної моделі трансформації органічного вуглецю в системі фітоценоз–гумусові речовини ґрунту [9].

*Об’єкти і методика досліджень.* Для перевірки валиабельності в якості об’єкта досліджень була використана концептуальна модель трансформації органічного вуглецю в системі “фітоценоз–гумусові речовини ґрунту”, побудована на принципах теорії біфуркацій і катастроф [1, 2]. Математична структура моделі являє собою систему з чотирьох звичайних диференціальних рівнянь, що описують балансний тип кругообігу вуглецю в даній системі:

$$\frac{dX_2}{dt} = K_2 X_3 - K_2 X_2 + C_d; \quad (1.1)$$

$$\frac{dX_3}{dt} = P_0 K_0 \frac{X_2}{A_0 + X_2} - (K_3 + K_{31} + K_{32}) X_3; \quad (1.2)$$

$$\frac{d(X_1 - X_2)}{dt} = (K_{31} + K_{32})X_3 - K_1X_1 - K_2X_2 + C_2 \quad (1.3)$$

$$\frac{dX_3}{dt} = P_0K_0 \frac{(X_1 + X_2)}{A_2 + X_1 + X_2} - (K_3 + K_{31} + K_{32})X_3 \quad (1.4)$$

Визначення символів, використовуваних у рівняннях, наведене в табл. 1.

Таблиця 1. Символи концептуальної моделі трансформації органічного вуглецю в системі “фітоценоз–гумусові речовини ґрунту”

Символ	Визначення
$X_1, X_2, X_3$	Вуглець гумусових речовин, детритної частини гумусу і мортмаси ґрунту відповідно
$X_r = X_1 + X_2$	Вуглець гумусу
$K_1, K_2, K_3$	Коефіцієнт мінералізації щодо гумусових речовин, детритної частини гумусу і мортмаси
$P_0$	Продуктивність фотосинтезу
$K_0$	Частка органічної продукції, яка щороку включається в деструктивний цикл
$C_d, C_r$	Сума швидкостей щодо абіотичного надходження (H) і виносу (B) органічного вуглецю детритної частини гумусу і вуглецю гумусу
$A_d, A_r$	Константа Міхаеліса – параметр, що дорівнює запасу вуглецю детритної частини гумусу і вуглецю гумусу ґрунту, при якому досягається $\frac{1}{2} P_0$
$K_{21}$	Коефіцієнт гуміфікації детритної частини гумусу в гумусовій речовині
$K_{31}$	Коефіцієнт гуміфікації мортмаси в гумусовій речовині
$K_{32}$	Коефіцієнт гуміфікації мортмаси в детритну частину гумусу
$K_r = K_{31} + K_{32}$	Загальний коефіцієнт гуміфікації мортмаси
$K_{рд} = K_2 + K_{21}$	Коефіцієнт розкладання детритної частини гумусу
$K_{рм} = K_3 + K_{31} + K_{32}$	Коефіцієнт розкладання мортмаси

### Результати досліджень

Розв’язання звичайних диференційних рівнянь, яке описане в роботі [9], дало можливість установити критерії стійкості функціонування системи “фітоценоз–гумусові речовини ґрунту” (табл. 2).

Схема концептуальної моделі трансформації органічного вуглецю в системі “фітоценоз–гумусові речовини ґрунту” наведена на рис. 1. В якості прикладу можливого використання поданої моделі були визначені основні параметри стійкості системи “біоценоз–гумусові речовини чорнозему типового слабо гумусованого”. В таблиці 3. представлені три найбільш важливих параметри, які в кінцевому результаті й визначають стійкість аналізованої системи.

Таблиця 2. Критерії стійкості функціонування системи  
”фітоценоз–гумусові речовини ґрунту”

Індекс критерію	Умова стійкості
$K$	$\geq \frac{K_{pm}}{K_z} (A_z K_{mz} + C_{oz} + 2\sqrt{K_{mz} + C_{oz} A_z})$
$K_{mg}$	$\leq \frac{1}{K_{pm} A_z} (K_{pm} C_{oz} + KK_z + 2\sqrt{K_{pm} + C_{oz} KK_z})$
$K_2$	$\leq \frac{1}{K_{pm} A_d} (\sqrt{C_{od}^*} + \sqrt{C_{od} + KK_{32} - K_{pm} C_{od}})^2$
$K_r$	$\geq \frac{1}{K} (K_{pm} K_{mz} A_z + K_{pm} C_{oz}^{**} + 2K_{pm} \sqrt{K_{mz} C_{oz} A_z})$
$K_{pm}$	$\geq KK_2 (K_{pm} A_z + C_{oz} - 2\sqrt{K_{mz} C_{oz} A_z})^{-1}$
$A_r$	$\leq \frac{1}{K_{pm} K_{mz}} (\sqrt{K_{pm} C_{oz}} + \sqrt{KK_z})^2$
$A_d$	$\leq \frac{1}{K_{pm} K_2} (\sqrt{K_{pm} C_{od}} + \sqrt{KK_{32}})^2$
$K_{32}$	$\geq \frac{K_{pm}}{K} (C_{od} - K_2 A_d + 2\sqrt{K_2 C_{od} A_d})$

\* $C_{od} = -C_d$ ; \*\* $C_{oz} = -C_r$

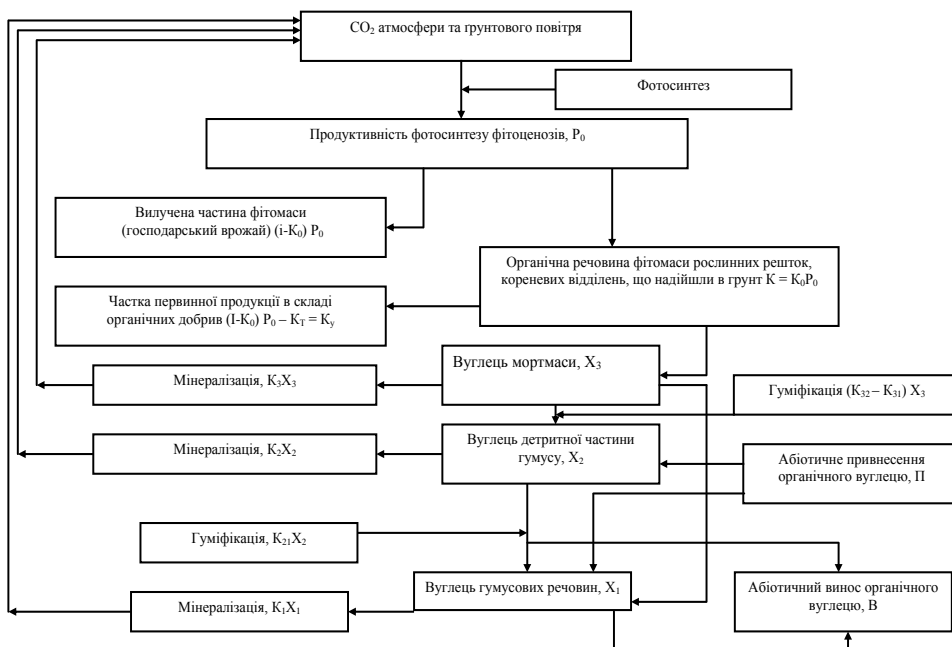


Рис. 1. Концептуальна модель трансформації органічного вуглецю в системі  
”фітоценоз – гумусові речовини ґрунту”

Таблиця 3. Параметри моделі та деякі розрахункові значення критеріїв стійкості функціонування системи “фітоценоз–гумусові речовини чорнозему типового”

Параметр	Одиниці виміру	Прийняте в моделі значення або його розрахункова величина	Літературне джерело
<i>Параметри моделі</i>			
Потенційна продуктивність фітоценозу	т С/га рік	10,0	[16]
Константа Міхаеліса	т С/га	8,9	Отримано нами
Коефіцієнт розкладу мортмаси	рік <sup>-1</sup>	0,7	[16]
Коефіцієнт гуміфікації	рік <sup>-1</sup>	0,05	[15]
Коефіцієнт мінералізації гумусу	рік <sup>-1</sup>	0,007	[15]
Сума швидкостей абіотичного внесення–виносу органічного вуглецю	т С/га рік	0-0,03 і більше	[17]
Надходження С <sub>орг.</sub> з рослинними залишками у агроценозі	т С/га рік	2,6–2,7	Отримано нами
<i>Розрахункові значення критеріїв стійкості</i>			
Надходження вуглецю мортмаси в ґрунт (X <sub>3</sub> )	т С/га рік	$\geq 6,23$ $\geq 7,29$	
Коефіцієнт мінералізації гумусу (K <sub>мг.</sub> )	рік <sup>-1</sup>	$\leq 0,01$	
Коефіцієнт гуміфікації (K <sub>г.</sub> )	рік <sup>-1</sup>	$\leq 0,01$	

Примітка: Над ризикою розрахункові значення при С<sub>орг.</sub> = 0, під ризикою – при С<sub>орг.</sub> = 0,005 т С/га рік

Такими параметрами є:

- мінімально необхідна кількість вуглецю (X<sub>3</sub>), яка щорічно повинна поступати в ґрунт з усіма потоками органічних речовин;
- коефіцієнт мінералізації органічних речовин (K<sub>мг.</sub>);
- коефіцієнт гуміфікації органічних речовин (K<sub>г.</sub>).

Значення (X<sub>3</sub>) розраховували як для умов функціонування агроценозів, коли абіотичні потоки дуже малі і ними можна знехтувати (С = 0), так і для випадку з переважанням можливості С < 0.

На основі концептуальної моделі трансформації органічного вуглецю в системі фітоценоз–гумусові речовини ґрунту, наявних літературних даних та власних досліджень встановлено, що кількість вуглецю, яка щорічно повинна поступати в ґрунт з усіма потоками (при відсутності абіотичного привнесення – виносу) для підтримки бездефіцитного сальдо балансу гумусу має становити не менше 6,2 т/га. Враховуючи те, що в умовах Лісостепу України максимальна продуктивність природних фітоценозів може досягати 10 т/га органічного вуглецю [16], то для подальшого

нормального функціонування екосистеми можна відчувувати лише 38 % органічного вуглецю від утворюваного щорічно в процесі фотосинтезу. У випадку, коли щорічні втрати органічного вуглецю від процесів ерозії зростають, кількість внесення його в ґрунт повинна бути суттєво збільшена. Наприклад, при величині абіотичного виносу, рівній всього лише 9–10 кг гумусу на 1 га, кількість органічного вуглецю, який повинен поступити в ґрунт, має зрости до 7,3 т/га. Проведені нами розрахунки переконливо свідчать, що протиерозійні заходи можуть бути одним із дієвих засобів управління стійкістю ґрунтових екосистем.

Характерною ознакою валиабельності концептуальної моделі трансформації органічного вуглецю в системі “фітоценоз–гумусові речовини ґрунту” є також співпадання визначених значень коефіцієнтів гуміфікації і мінералізації органічної речовини з літературними даними [18].

### Висновки

1. Запропонована модель кругообігу вуглецю спрощує реальну картину функціонування системи “агроценоз–гумусові речовини чорнозему типового” з одночасним урахуванням основних етапів процесу розкладання – синтезу органічної речовини в агроекосистемах.

2. Наявність відповідних об’єктивних параметрів моделі для конкретних умов дає можливість без проведення складного експерименту прослідкувати за динамікою процесу мінералізації органічного вуглецю, а також одержати конкретну інформацію для оперативного управління процесом оптимізації режиму органічної речовини ґрунту і продуктивності агроценозів.

3. В умовах природних фітоценозів Лісостепу для забезпечення сталої продуктивності і нормального функціонування екосистем з біологічного кругообігу доцільно відчувувати не більше 38 % вуглецю, фотосинтезованого в органічну речовину протягом річного циклу.

Напрямок подальших досліджень має бути зосереджений на отриманні характеристичних показників трансформації органічного вуглецю в інших ґрунтово–кліматичних умовах для розробки достовірних критеріїв стійкості системи фітоценоз–органічна речовина ґрунту.

### Література

1. Арнольд В. И. Теория катастроф. – М.: Наука, 1990. – 128 с.
2. Арнольд В. И., Афраймович В. С., Ильяшенко Ю. С. Теория бифуркаций. Современные проблемы математики. Фундаментальные направления. – Т. 5. – М., 1986. – С. 5–218.
3. Джефферс Дж. Введение в системный анализ: применение в экологии / Пер. с англ. – М.: Мир, 1981.
4. Заславский М. Н. Эрозиоведение. Основы противоэрозионного земледелия. – М.: Высшая школа, 1987. – 375 с.

5. Корженцев А. С. О разработке экологической концепции в почвоведении // Почвоведение. – 1995. – №7. – С. 811–816.
6. Крапивин В. Ф., Свирижев Ю. М., Тарко А. М. Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. – М.: Наука, 1982. – 272 с.
7. Мамыхин С. В., Тихомиров С. К. Математическое моделирование многолетней динамики органического углерода в черноземе типичном агроценозов // Почвоведение. – 1984. – 38. – С. 98–102.
8. Надточий П. П. Управление плодородием почв Лесостепи Украины в условиях экологического кризиса // Вісник аграрної науки. – 1996. – № 11. – С. 10–14.
9. Надточий П. П., Вольвач В. Ф. Модель круговорота углерода и критерии устойчивости системы фитоценоз – гумусовые вещества почвы // Доклады АН Украины. – 1993. – № 8. – С. 165–171.
10. Надточий П. П., Вольвач Ф. В., Гермашенко В. Г. Екологія ґрунту та його забруднення. К.: Аграрна наука, 1997. – 286 с.
11. Орлов Д. С. Химия почв. М.: Изд – во Московского ун-та, 1985. – 376 с.
12. Родючість ґрунтів: моніторинг та управління / Медведєв В. В., Чесняк Г. Я., Полупан М. І. та ін. Під ред. В. В. Медведєва. – К.: Урожай, 1992. – 248 с.
13. Рыжева И. М. Анализ устойчивости системы гумус почвы – растительный покров на основе нелинейной модели круговорота углерода // Вестник МГУ. – Сер. 17. – 1992. 0 № 3. – С. 12–18.
14. Свирижев Ю. М. Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. – М.: Наука, 1987. – 356 с.
15. Тейт Р. Ш. Органическое вещество почвы. – М.: Мир, 1991. – 156 с.
16. Титлянова А. А., Тихомирова Н. А., Шатохина Н. Г. Продукционный процесс в агроценозах. – Новосибирск: Наука. – Сибирское отделение, 1982. – 184 с.
17. Фокин А. Д. Балансовый подход к проблеме воспроизводства органического вещества в агроэкосистемах // Концепция оптимизации режима органического вещества почв в агроландшафтах. – М.: зд-во МСХА, 1993. – С. 34–39.
18. Фокин А. Д. Методические подходы и рекомендации по оценке главных составляющих гумусового баланса почв // Органическое вещество пахотных почв. Научн. труды Почвенного ин – та им. В. В. Докучаева. М., 1987. – С. 36–44.
19. Фрид А. С. Система моделей и плодородия почв // Плодородие почв проблемы, исследования, модели. М., 1995. – С. 37–43.
20. Экосистемы в критических состояниях / Отв. ред. Ю. Г. Пузаченко. М.: Наука, 1989. – 157 с.