

## МОДЕЛЮВАННЯ ГУМУСНОГО СТАНУ ҐРУНТОВОГО СЕРЕДОВИЩА АГРОЕКОСИСТЕМ

*Г.А. Голуб, доктор технічних наук  
С.М. Кухарець, докторант\**

*Проведено моделювання гумусного стану ґрунту на основі потоків та запасів вуглецю гумусу в ґрунті та органічного вуглецю негумусної природи – органічних решток та органічних добрив.*

***Гумус, вуглець, агроecosистема, автономність, продуктивність.***

**Постановка проблеми.** Теоретичною основою підвищення ефективності використання енергії агроecosистемою є закон максимізації енергії, згідно з яким в суперництві з іншими системами виживає та з них, яка найкраще сприяє надходженню енергії і використовує її максимальну кількість найбільш ефективним способом. З цією метою система:

- створює накопичувачі високоякісної енергії;
- витрачає частину накопиченої енергії на забезпечення надходження нової енергії (за допомогою механізмів зворотного зв'язку);
- забезпечує кругообіг речовин;
- створює механізми регулювання, що підтримують стійкість системи і її здатність пристосування до умов, що змінюються;
- налагоджує з іншими системами обмін, необхідний для забезпечення потреб в енергії спеціальних видів [1, 2, 3].

**Аналіз останніх досліджень.** Агроecosистема повинна регулюватися людиною. Будь-яке підвищення продуктивності агроecosистеми вимагає підвищення витрат енергії, в т.ч. антропогенної. Вони ідуть на підтримання енергопотенціалу агроecosистеми або на зміну умов його реалізації.

Величина потоку антропогенної енергії залежить від мети, яку ставить виробник сільськогосподарської продукції, в основному отримання максимального доходу шляхом зниження енергоємності продукції. Досягається це або зниженням енерговитрат при фіксованому рівні продуктивності, або випереджаючим приростом продуктивності до приросту енерговитрат. Перше завдання

\*Науковий консультант – доктор технічних наук Г.А. Голуб

© Г.А. Голуб, С.М. Кухарець, 2014

вирішується шляхом раціональної організації праці і виробництва, заміною енергоємних операцій менш енергоємними, друге – збільшенням рівня продуктивності системи [5].

Останнє визначається біокліматичним потенціалом, родючістю ґрунту, соціально-економічними умовами.

Зручним і оперативним показником збільшення рівня продуктивності системи є вміст гумусу в ґрунті [6]. Якщо при функціонуванні агроєкосистеми вміст гумусу підвищується, то можна говорити про збільшення рівня продуктивності системи.

Якщо вміст гумусу в процесі функціонування агроєкосистеми не змінюється, система не змінює свій рівень продуктивності, а якщо вміст гумусу знижується, система працює із зниженням рівня продуктивності. Враховуючи визначенні коефіцієнти гуміфікації гною та рослинних решток при різному загортанні їх у ґрунт, зроблений висновок, що гуміфікація анаеробний процес [7, 8].

Виходячи із цих міркувань витратним статтями гумусу є:

- використання простих речовин гідролізу гумусу (амінокислот, амінів, амідів) рослинами, для свого росту і розвитку [9];
- мінералізація гумусу мікроорганізмами;
- втрати гумусу в результаті ерозії.

Необхідно відмітити, що значний вплив на втрат гумусу за двома останніми статтями має обробіток ґрунтового середовища, з точки зору збереження агрономічно цінної структури ґрунту [10].

Статтями надходження гумусу є [9, 11]:

- внесення гною і компостів, як джерела поживних речовин;
- залишення в полі поживних решток: частини соломи, стебел сільськогосподарських культур, гички та інших подібних органічних решток;
- внесення мінеральних азотних добрив, для підвищення коефіцієнтів гуміфікації рослинних решток (8...10 кг/т поживних решток);
- коренева система, що залишилась в ґрунті після збирання основного урожаю;
- посіви сидеральних культур (зелене добриво);
- кореневі виділення органічних речовин (ескудат);
- мікроорганізми або мікрофауна ґрунту (до 14 т/га);
- мезофауна ґрунту.

**Мета досліджень.** Моделювання гумусного стану ґрунтового середовища в період функціонування агроєкосистеми, виходячи із необхідності забезпечення її енергетичної автономності та бездефіцитного балансу гумусу.

**Результати досліджень.** Згідно із дослідженнями [7, 8, 9, 11] моделювання гумусного стану можна провести на основі потоків та запасів вуглецю гумусу в ґрунті та органічного вуглецю негумусної природи (органічних решток та органічних добрив) (рис. 1).

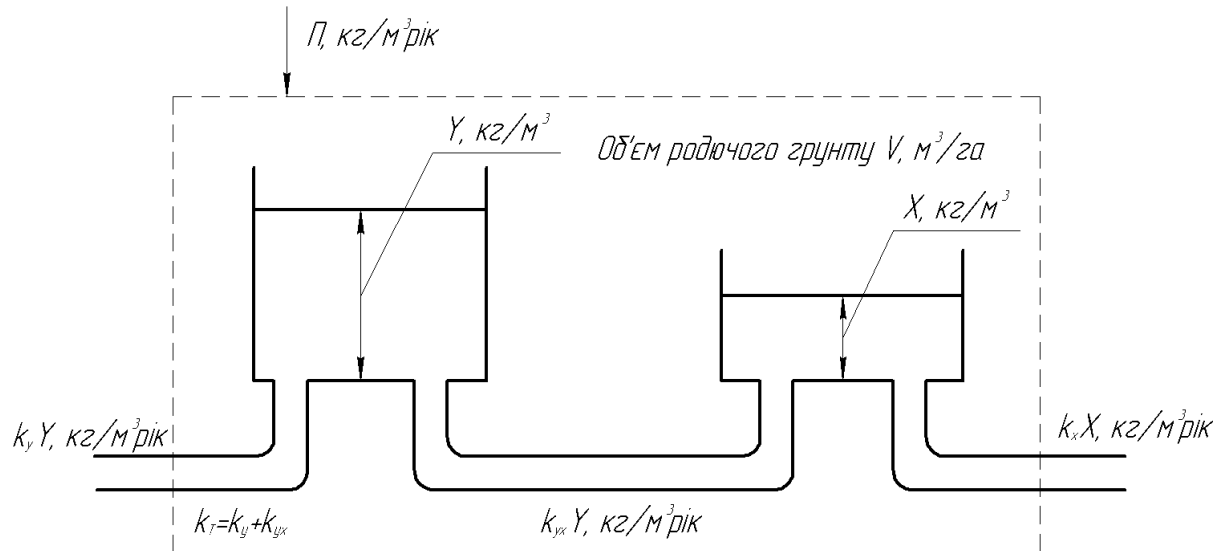


Рис. 1. Розрахунок зміни вмісту вуглецю в ґрунті:  $\Pi$  – щорічне надходження вуглецю негумусової природи в ґрунт,  $\text{кг/м}^3$  в рік;  $Y$  – вміст вуглецю негумусової природи в ґрунті,  $\text{кг/м}^3$ ;  $X$  – вміст вуглецю гумусу в ґрунті,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V$  – об’єм родючого шару ґрунту,  $\text{м}^3/\text{га}$ ;  $k_y$  – коефіцієнт щорічної мінералізації вуглецю негумусової природи в ґрунті, відн. од./рік;  $k_{yx}$  – коефіцієнт щорічної гуміфікації вуглецю негумусової природи в ґрунті, відн. од./рік;  $k_x$  – коефіцієнт щорічної мінералізації вуглецю гумусу в ґрунті, відн. од./рік;  $k_T$  – коефіцієнт щорічної трансформації вуглецю негумусової природи в ґрунті, відн. од./рік.

Зміна вмісту вуглецю гумусу в ґрунті може бути визначена згідно системи рівнянь:

$$\begin{cases} V \frac{dY}{dt} = \Pi V - k_y Y V - k_{yx} Y V = \Pi V - Y V (k_y + k_{yx}) = \Pi V - k_T Y V; \\ V \frac{dX}{dt} = k_{yx} Y V - k_x X V; \end{cases} \quad (1)$$

або

$$\begin{cases} \frac{dY}{dt} = \Pi - k_y Y - k_{yx} Y = \Pi - Y (k_y + k_{yx}) = \Pi - k_T Y; \\ \frac{dX}{dt} = k_{yx} Y - k_x X; \end{cases} \quad (2)$$

де  $Y$  – вміст вуглецю 23е гумусової природи в ґрунті,  $\text{кг/м}^3$ ;  $X$  – вміст вуглецю гумусу в ґрунті,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V$  – об’єм родючого шару ґрунту,  $\text{м}^3/\text{га}$ ;  $\Pi$  – щорічне надходження вуглецю 23е гумусової природи в ґрунт,  $\text{кг/м}^3$  в рік;  $k_y YV$  – щорічна мінералізація вуглецю 23е гумусової природи в ґрунті,  $\text{кг/га}$  рік;  $k_{yx} YV$  – щорічна гуміфікація вуглецю 23е гумусової природи в ґрунті,  $\text{кг/га}$  рік;  $k_x XV$  – щорічна мінералізація вуглецю гумусу в ґрунті,  $\text{кг/га}$  рік;  $k_y$  – коефіцієнт щорічної мінералізації вуглецю 23е гумусової природи в ґрунті, відн. од./рік;  $k_{yx}$  – коефіцієнт щорічної гуміфікації вуглецю 23е гумусової природи в ґрунті, відн. од./рік;  $k_x$  – коефіцієнт щорічної мінералізації вуглецю гумусу в ґрунті, відн. од./рік;  $k_T = k_y + k_{yx}$  – коефіцієнт щорічної трансформації вуглецю 23е гумусової природи в ґрунті, відн. од./рік.

Із другого рівняння системи:

$$Y = \frac{1}{k_{yx}} \frac{dX}{dt} + \frac{k_x}{k_{yx}} X; \quad \frac{dY}{dt} = \frac{1}{k_{yx}} \frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{k_x}{k_{yx}} \frac{dX}{dt}. \quad (3)$$

Підставивши вираз (3) в рівняння (1) одержимо:

$$\frac{1}{k_{yx}} \frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{k_x}{k_{yx}} \frac{dX}{dt} = \Pi - \frac{k_T}{k_{yx}} \frac{dX}{dt} - \frac{k_T k_x}{k_{yx}} X; \quad (4)$$

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + (k_x + k_T) \frac{dX}{dt} + k_T k_x X = \Pi k_{yx}. \quad (5)$$

Однорідне рівняння буде мати вигляд:

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + (k_x + k_T) \frac{dX}{dt} + k_T k_x X = 0. \quad (6)$$

Характеристичне рівняння і його розв’язок матимуть вигляд:

$$\lambda^2 + (k_x + k_T) \lambda + k_T k_x = 0; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{1,2} &= -\frac{(k_x + k_T)}{2} \pm \sqrt{\frac{k_x^2 + 2k_x k_T + k_T^2}{4} - k_x k_T} = \\ &= -\frac{(k_x + k_T)}{2} \pm \sqrt{\frac{k_x^2 + 2k_x k_T + k_T^2 - 4k_x k_T}{4}} = \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} &= -\frac{(k_x + k_T)}{2} \pm \sqrt{\frac{(k_x - k_T)^2}{4}} = -\frac{(k_x + k_T)}{2} \pm \frac{(k_x - k_T)}{2}; \\ &\begin{cases} \lambda_1 = -\frac{(k_x + k_T)}{2} + \frac{(k_x - k_T)}{2} = -k_T; \\ \lambda_2 = -\frac{(k_x + k_T)}{2} - \frac{(k_x - k_T)}{2} = -k_x. \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

Розв’язок однорідного рівняння (6) матиме вигляд:

$$X_{од} = C_1 \exp(-k_T t) + C_2 \exp(-k_x t). \quad (10)$$

Один із розв’язків (частковий розв’язок) матиме вигляд:

$$X_{\text{чр}} = \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi. \quad (11)$$

Загальний розв'язок диференційного рівняння (5) матиме вигляд:

$$X = C_1 \exp(-k_T t) + C_2 \exp(-k_x t) + \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi. \quad (12)$$

При початкових умовах:

$$t=0 \Rightarrow X = X_0; \quad t=0 \Rightarrow \frac{dX}{dt} = \left( \frac{dX}{dt} \right)_0;$$

де  $X_0$  – вміст вуглецю в ґрунті в момент часу  $t=0$ ,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\left( \frac{dX}{dt} \right)_0$  – швидкість зміни вмісту гумусу в ґрунті у момент часу  $t=0$ ,  $\text{кг/м}^3$  рік, визначимо постійні диференціювання:

$$\frac{dX}{dt} = -k_T C_1 \exp(-k_T t) - k_x C_2 \exp(-k_x t);$$

$$\begin{cases} X_0 = C_1 + C_2 + \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi; \\ \left( \frac{dX}{dt} \right)_0 = -k_T C_1 - k_x C_2 \exp(-k_x t); \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = X_0 - \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi; \\ -k_T C_1 - k_x C_2 \exp(-k_x t) = \left( \frac{dX}{dt} \right)_0; \end{cases}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -k_T & -k_x \end{vmatrix} = k_T - k_x;$$

$$\Delta C_1 = \begin{vmatrix} X_0 - \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi & 1 \\ \left( \frac{dX}{dt} \right)_0 & -k_T \end{vmatrix} = -X_0 k_x + \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi - \left( \frac{dX}{dt} \right)_0;$$

$$\Delta C_2 = \begin{vmatrix} 1 & X_0 - \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi \\ -k_T & \left( \frac{dX}{dt} \right)_0 \end{vmatrix} = \left( \frac{dX}{dt} \right)_0 + X_0 k_x - \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi;$$

$$C_1 = \frac{\Delta C_1}{\Delta} = \frac{-X_0 k_x + \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi - \left( \frac{dX}{dt} \right)_0}{k_T - k_x};$$

$$C_2 = \frac{\Delta C_2}{\Delta} = \frac{\left( \frac{dX}{dt} \right)_0 + X_0 k_x - \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi}{k_T - k_x}.$$

Загальний розв'язок диференційного рівняння (5) матиме вигляд:

$$X = \frac{1}{k_T - k_x} \left( -X_0 k_x + \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi - \left( \frac{dX}{dt} \right)_0 \right) \exp(-k_T t) + \frac{1}{k_T - k_x} \left( \left( \frac{dX}{dt} \right)_0 + X_0 k_x - \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi \right) \exp(-k_x t) + \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi. \quad (13)$$

При  $t=0$  вміст вуглецю гумусу становить  $X_t = X_0$ , а при  $t = \infty$  вміст гумусу становить:

$$X_t = \frac{k_{yx}}{k_x k_T} \Pi. \quad (14)$$

Щоб не допустити дегуміфікації цілиного ґрунту і утримати початковий вміст гумусу, необхідно щорічно вносити в ґрунт вуглець негумусової природи в кількості:

$$\Pi = \frac{k_x k_T}{k_{yx}} X_0. \quad (15)$$

При вище вказаних значеннях коефіцієнтів та товщині родючого шару ґрунту 1 м, необхідно вносити 63,4 т вуглецю на один гектар в рік.

На основі вищевикладеного є підстави вважати, що диференційне рівняння, що описує зміну гумусу можна записати наступним чином:

$$\frac{dX}{dt} = k_{zym} \Pi - k_x X; \quad (16)$$

де  $X$  – вміст гумусу в ґрунті, т/га;  $\Pi$  – щорічне надходження органічної речовини в ґрунт, т/га рік;  $k_{zym}$  – коефіцієнт гуміфікації органічної речовини, що надходить в ґрунт, відн. од.;  $k_x$  – коефіцієнт щорічної мінералізації гумусу в ґрунті, відн. од./рік.

Загальний розв'язок диференційного рівняння (16) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{k_{zym} \Pi - k_x X} &= dt; \quad -\frac{1}{k_x} \ln \frac{k_{zym} \Pi - k_x X}{k_{zym} \Pi - k_x X_0} = t; \quad \frac{k_{zym} \Pi - k_x X}{k_{zym} \Pi - k_x X_0} = \exp(-k_x t); \\ k_{zym} \Pi - k_x X &= (k_{zym} \Pi - k_x X_0) \exp(-k_x t); \\ X &= \frac{k_{zym}}{k_x} \Pi + \left( -\frac{k_{zym}}{k_x} \Pi + X_0 \right) \exp(-k_x t); \\ X &= \frac{k_{zym}}{k_x} \Pi [1 - \exp(-k_x t)] + X_0 \exp(-k_x t). \end{aligned}$$

При  $t=0$  вміст вуглецю гумусу становить  $X_t = X_0$ , а при  $t = \infty$  вміст гумусу становить:

$$X_t = \frac{k_{zym}}{k_x} \Pi. \quad (17)$$

Завдання біологічного землеробства забезпечити відтворення родючості ґрунту, що математично виражається виразом:

$$k_x X_t \leq k_{эм} П. \quad (18)$$

Виконання цієї умови може бути забезпечено за рахунок раціонального землевикористання та використання соломи.

**Висновок.** Раціональне використання соломи передбачає такі заходи:

– солома залишається на полі і піддається гуміфікації з використанням компенсаційних доз азотних та фосфорних добрив;

– солома використовується для підстилки в корівниках і в подальшому солومистий гній вноситься на поля як органічне добриво;

– солома використовується для підстилки в свинарниках і пташниках і в подальшому піддається компостуванню в штучних умовах для забезпечення знезараження та інактивації насіння бур'янів. Отриманий компост вноситься на поля як органічне добриво або використовується в технології вермикомпостування.

### Список літератури

1. Одум Ю. Основы экологии / Ю. Одум // Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 740 с.
2. Одум Г. Энергетический базис человека и природы / Г. Одум, Э. Одум / Пер. с англ. ; Под ред. А.П. Огурцова. – М.: Прогресс, 1978. – 380 с.
3. *Енергетична оцінка агроєкосистеми: [навчальний посібник]* / О.Ф. Смаглій, А.С. Малиновський, А.Т. Кардашов. – Житомир: ДВНЗ ЖНАЕУ, 2002. – 111 с.
4. Щербаков А.П. Новые подходы к развитию фундаментальных исследований в земледелии / А.П. Щербаков, В.М. Володин // Земледелие. – 1989. – № 9. – С. 2–4 ; № 11– 2. – С. 2–5.
5. Булаткин Г.А. Энергетическая эффективность земледелия и агроэкосистем: взаимосвязи и противоречия / Г.А. Булаткин, В.В. Ларионов // Агрехимия. – 1997. – № 3. – С. 63–66.
6. Шидула М.К. Вирощування екологічно безпечної продукції рослинництва в ґрунтозахисному землеробстві // Відтворення родючості ґрунтів в ґрунтозахисному землеробстві / М.К. Шидула. – К.: Оранта, 1998. – С. 453–459.
7. *Ґрунтозахисна біологічна система землеробства в Україні : монографія* / [М.К. Шидула, С.С. Антонець, А.Д. Балаєв та ін. ; за ред. М.К. Шидули]. – К.: Оранта, 2000. – 389 с.
8. *Відтворення родючості ґрунтів у ґрунтозахисному землеробстві : монографія* / [М.К. Шидула, С.С. Антонець, В.О. Андрієнко та ін. ; за ред. М.К. Шидули]. – К.: Оранта, 1998. – 680 с.
9. Шидула М.К. Біохімічний механізм відтворення гумусу і саморегуляції ґрунтової родючості / М.К. Шидула, Д.О. Мельничук, Н.М. Рідей, С.П. Роговський // Відтворення родючості ґрунтів в ґрунтозахисному землеробстві / За ред. проф. М.К. Шидули. – К.: Оранта, 1998. – С. 453–459.
10. Кухарець С.М. Результати комп'ютерного аналізу параметрів роботи ротаційних робочих органів / С.М. Кухарець // Науковий вісник Національного аграрного університету. – К., 2006. – Вип. 95, ч. II. – С. 222–230.

11. Голуб Г.А. Техніко-технологічне забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем / Г.А. Голуб // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2010. – Вип. 144, ч. 4. – С. 303–312.

*Проведено моделювання гумусного стану ґрунту на основі потоків і запасів вуглецю гумусу в ґрунті і органічного вуглецю негумусної природи – органічних решток і органічних добрив.*

**Гумус, вуглець, агроєкосистема, автономність, продуктивність.**

*The modeling humus soil based flows and stocks of carbon in soil humus and organic carbon don't humus source – organic residues and organic fertilizers.*

**Humus, carbon, agroecosystem, autonomy, productiveness.**