

Характеристика ґрунтовірних процесів рекультоземів шляхом аналізу сканування оцифрованих знімків

О.А. Демидов, кандидат сільськогосподарських наук
Департамент землеробства Міністерства аграрної політики та продовольства
України, м. Київ

Запропоновано оцінку гумусоутворення за методом оцифрованих знімків, який дозволив високоточний розв'язок досліджуваної задачі. Це сприяло пошаровому розкриттю динаміки процесу в часі й просторі та отриманню прогнозної моделі утворення гумусу.

Роботи зі сільськогосподарської рекультивациі порушених земель у степовій зоні України було розпочато у 1962 р. на відпрацьованих відвалах Олександрійського кар'єру Орджонікідзевського ГЗК під керівництвом проф. М.О. Бекаревича. За 50-річний період в ДДАУ створена наукова школа зі сільськогосподарської рекультивациі земель [3, 8]. Установлено азональність техногенних територій та зональний тип ґрунтоутворювального процесу, визначено асортимент рослин для господарського використання в різних регіонах та роль багаторічних бобових трав у біологізації гірських порід. Однак специфіка ґрунтогенезу техногенних ландшафтів постійно потребує уваги у їх посттехногенну фазу розвитку для з'ясування закономірностей природного ґрунтоутворення у часі та просторі. Саме це й стало **метою наших досліджень**.

Виконана робота базується на польових морфологічних обстеженнях, камеральних обробках зразків за загальноприйнятими методиками в ґрунтознавстві та на методі статистичного аналізу цифрових значень, отриманого від віртуального комп'ютерного сканування оцифрованих знімків [1, 2, 9, 10]. Згідно з методом цифрових значень:

1. На знімку, відтвореному за спеціально розробленою для досліджень оригінальною програмою, обирали віртуальний трек по всій глибині розрізу. За результатами сканування треку сформували двовимірну матрицю значень, що чисельно дорівнює коефіцієнтам відбиття у відповідному місці знімка. Загальна кількість цифрових значень становила $\sim 4,5 \cdot 10^4$.

2. Цифрову матрицю нормували до максимального значення (щоб виключити вплив умов освітлення за подальшого порівняння знімків), після чого максимальний коефіцієнт відбиття відповідав одиниці.

3. Горизонтальні цифрові значення отриманої матриці усереднювали з метою формування профільного графічного зображення розподілу. Для інтегрального згладжування отриманої кривої використали сингулярний (векторний) аналіз із виділенням і подальшою інтеграцією основних гармонік, після чого розподіл мав вигляд згладженої кривої.

4. Детальний характер розподілу в розрізі основних структур і тих, що утворилися, проводили побудувавши інтегральну криву розподілу щільності ймовірності появи того або іншого (нормованого) значення коефіцієнта світлового відбиття у двовимірній матриці. Весь інтервал від 0 до 1 розбивали на сто підінтервалів.

5. Використовуючи властивість нормального розподілу (розподіл Гаусса) мати в логарифмічному поданні квадратичну залежність, розробили процедуру поетапного виділення складових, які входять до інтегральної кривої розподілу щільності ймовірності ознаки,

$$P(x) = A \cdot \exp \left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\delta^2} \right]; \quad (1)$$

$$\ln p(x) = \frac{-x^2}{2\delta^2} + \frac{\bar{x}}{\delta^2} \cdot x + \left[\ln A - \frac{\bar{x}^2}{2\delta^2} \right],$$

де $P(x)$ – щільність імовірності ознаки x ;

A – амплітуда розподілу Гаусса;

\bar{x} – середнє значення ознаки;

δ – середньоквадратичне відхилення ознаки x від середнього \bar{x} .

6. Використовуючи квадратичну регресію до рівняння (1), де коефіцієнт для змінної другого порядку становить $1/2\delta^2$, змінної першого порядку – \bar{x}/δ^2 , вільний член – $(\ln A - \bar{x}^2/2\delta^2)$, визначали всі параметри нормального розподілу граничної ділянки інтегральної кривої. Послідовне вилучення виділених гауссіан дозволило відтворити всі складові інтегрального розподілу. Кожна компонента має свій максимум, що відповідає середньому значенню, й площу (нормовану до одиниці), яка у відсотковому вираженні відбиває сумарний компартмент того або іншого компонента ґрунту, який міститься у насипці.

7. Виділені інтегральні розподіли дозволили зробити ряд висновків про рівновагомість структур, розглянутих у конкретному розрізі в кількісному вираженні – функції статистичної ваги, тобто ентропії.

Якщо припустити наявність зв'язку між організацією того або іншого групового компонента, який присутній у розрізі, й формуванням нормального розподілу коефіцієнта, то, використавши відому формулу [5, 6, 10], запишемо

$$\omega(x) = \text{const} e^{S(x)}, \quad (2)$$

де ω – імовірність появи ознаки $S'(x)$ – значення ентропії системи (підсистеми) у цілому в стані x . Оскільки ентропія сягає свого максимуму з досягненням системою усереднених значень, то розкладання $S(x)$ у ряд до другого члена має вигляд

$$S'(x) = S'(\bar{x}) + \frac{\partial S(x)}{\partial x} \Big|_{x=\bar{x}} (x-\bar{x}) + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 S(x)}{\partial x^2} \Big|_{x=\bar{x}} (x-\bar{x})^2. \quad (3)$$

Похідна першого порядку в точці $x = \bar{x}$ дорівнює нулю, оскільки $S(\bar{x})$ досягає максимуму. Тоді

$$\omega(x) = \text{const} e^{\frac{(x-\bar{x})^2}{2} \cdot \beta}, \quad (4)$$

де $\beta = \partial^2 S(\bar{x}) / \partial x^2 < 0$.

Використовуючи умову нормування $\int_{-\infty}^{\infty} \omega(x) dx = 1$ і розрахувавши середньоквадратичне відхилення δ зі співвідношення

$$(x - \bar{x})^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 \omega(x) dx, \quad (5)$$

одержали відоме співвідношення для нормального розподілу

$$\omega(x) = \frac{L}{\sqrt{2\pi\delta^2}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\delta^2}}, \quad (6)$$

де L – відсоток відповідної складової в інтегральному розподілі.

З огляду на співвідношення (3) і (4) можна записати розкладання в ряд з точністю до другої похідної значення ентропії відповідного компоненти (підсистеми в структурній організації насипку):

$$S(x) = \ln \left[\frac{L}{\sqrt{2\pi\delta^2}} \right] - \frac{(x - \bar{x})^2}{2\delta^2}. \quad (7)$$

Ця характеристика дозволить оцінити напрям подальшого розвитку системи й виконати порівняльний аналіз між природними й модельними (експериментальними) розрізами. Оскільки ентропія в цьому випадку пов'язана зі статистичною вагою співвідношенням $S(x) = \ln \Delta\Gamma$, де $\Delta\Gamma$ – статистична вага реалізації системи, вона представляється як безрозмірна величина. Ентропія завжди позитивна, тому в наближенні (7) має значення тільки та частина переверненої параболи, що перебуває над віссю абсцис. Ентропія дорівнює площі відповідної ділянки параболи.

1. Агрохімічні показники ґрунтових еталонного та модельного зразків по профілю розрізу

№ зразка	Глибина, см	Фактичне значення показника					
		рН водне	гідролітична кислотн., ммоль/100 г ґрунту	органічна речовина, %	мг/кг ґрунту		
						N-NO ₃ б/к	P ₂ O ₅
<i>Еталонний розріз</i>							
1	0–25	6,7		1,97	6,9	120	135
2	25–50	7,7		1,31	< 3,0	130	37
3	50–81	8,7		0,47	< 3,0	102	37
4	81–200	8,8		0,35	< 3,0	89	43
Нормативні документи на використані методи		ГОСТ 26423-85	ГОСТ 26212-91	ДСТУ 4289:2004	ГОСТ 26951-86	ДСТУ 4115:2002	ДСТУ 4115:2002
<i>Модельний розріз</i>							
1	0–5	8,3	0,17	1,83	5,5	214	554
2	5–10	8,4	0,15	1,18	< 3,0	134	324
3	10–15	8,6	0,10	0,60	< 3,0	124	151
4	15–20	8,7	0,08	0,60	< 3,0	134	65
5	20–25	8,7	0,08	0,60	3,5	169	57
6	25–30	8,7	0,08	0,47	6,9	240	58
7	30–35	8,7	0,08	0,22	6,6	101	47
8	35–40	8,6	0,11	0,10	6,8	93	51
9	40–50	8,4	0,15	0,10	4,0	100	60
10	50–60	8,6	0,10	0,05	< 3,0	98	59
11	60–115	7,9	0,37	0,10	< 3,0	95	134
12	115–195	8,3	0,17	1,06	3,3	42	45
13	195–255	8,3	0,17	0,95	< 3,0	114	77

2. Агрохімічний аналіз ґрунтових зразків еталонного та модельного розрізів на засолення й осолонцювання

Глибина відбору, см	Ємність поглинання	Ввібрані основи			Гідролітична кислотність	рН водне	Щільний залишок, %	Склад водної витяжки								Карбонатність, % (CO ₂)
		Ca	Mg	Na				Аніони та катіони, ммоль/100 г ґрунту/%								
								HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺		
ммоль/100 г ґрунту																
Еталонний розріз																
0–25	22,19	16,5	3,5	0,32	1,37	6,7	0,034	<u>0,20</u> 0,012	<u>0,15</u> 0,005	<u>0,12</u> 0,006	<u>0,25</u> 0,005	<u>0,12</u> 0,001	<u>0,08</u> 0,002	<u>0,02</u> 0,001	н/в	
25–50	23,07	18,0	4,0	0,12	0,45	7,7	0,050	<u>0,60</u> 0,037	<u>0,15</u> 0,005	<u>0,09</u> 0,004	<u>0,50</u> 0,010	<u>0,25</u> 0,003	<u>0,08</u> 0,002	<u>0,01</u> 0,001	н/в	
50–81	29,50	25,0	3,6	0,32	0,08	8,7	0,056	<u>0,65</u> 0,040	<u>0,20</u> 0,007	<u>0,12</u> 0,006	<u>0,50</u> 0,010	<u>0,38</u> 0,004	<u>0,08</u> 0,002	<u>0,01</u> 0,001	3,0	
81–200	33,88	28,0	5,0	0,32	0,06	8,8	0,058	<u>0,65</u> 0,040	<u>0,15</u> 0,005	<u>0,16</u> 0,008	<u>0,50</u> 0,010	<u>0,38</u> 0,004	<u>0,08</u> 0,002	<u>0,01</u> 0,001	4,7	
Модельний розріз																
0–5	29,29	28,0	0,50	0,12	0,17	8,3	0,078	<u>0,75</u> 0,046	<u>0,30</u> 0,011	<u>0,20</u> 0,010	<u>0,75</u> 0,015	<u>0,25</u> 0,003	<u>0,08</u> 0,002	<u>0,17</u> 0,007	0–5	
25–30	34,5	31,0	2,80	0,12	0,08	8,7	0,060	<u>0,60</u> 0,037	<u>0,25</u> 0,009	<u>0,12</u> 0,006	<u>0,50</u> 0,010	<u>0,38</u> 0,008	<u>0,08</u> 0,002	<u>0,01</u> 0,001	25–30	
50–60	28,37	25,0	2,70	0,06	0,11	8,6	0,062	<u>0,55</u> 0,034	<u>0,20</u> 0,007	<u>0,26</u> 0,012	<u>0,62</u> 0,012	<u>0,25</u> 0,003	<u>0,14</u> 0,003	<u>0</u> 0	50–60	
195–255	34,3	28,7	3,33	1,60	0,17	8,3	0,356	<u>0,55</u> 0,034	<u>0,45</u> 0,016	<u>4,30</u> 0,206	<u>1,62</u> 0,032	<u>0,75</u> 0,009	<u>2,90</u> 0,067	<u>0,03</u> 0,001	195–255	

Грунтовий розріз на прилеглих сільськогосподарських угіддях. На сільськогосподарських угіддях тривалої (понад 50 років) експлуатації проведена ідентифікація просторової локалізації виділених компонентів з відповідним відсотковим розподілом у цілому по розрізу (рис. 1–3). Саме утворення виділених підгруп пов'язане зі змінами гранулометричного складу ґрунтоутворюючої породи, вмістом органічної речовини, карбонатів, поглинених основ, розподілу катіонів й аніонів по профілю розрізу. Дана аргументація добре підтверджується результатами агрохімічного аналізу (табл. 1) і аналізу водної витяжки, зразків, відібраних на різних глибинах (табл. 2).

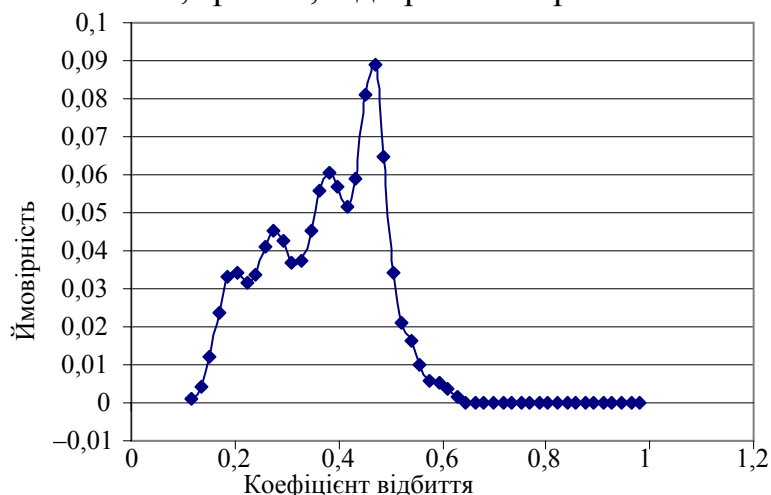


Рис. 1. Розподіл щільності ймовірності значень нормованих коефіцієнтів відбиття світла за щільністю еталонного розрізу

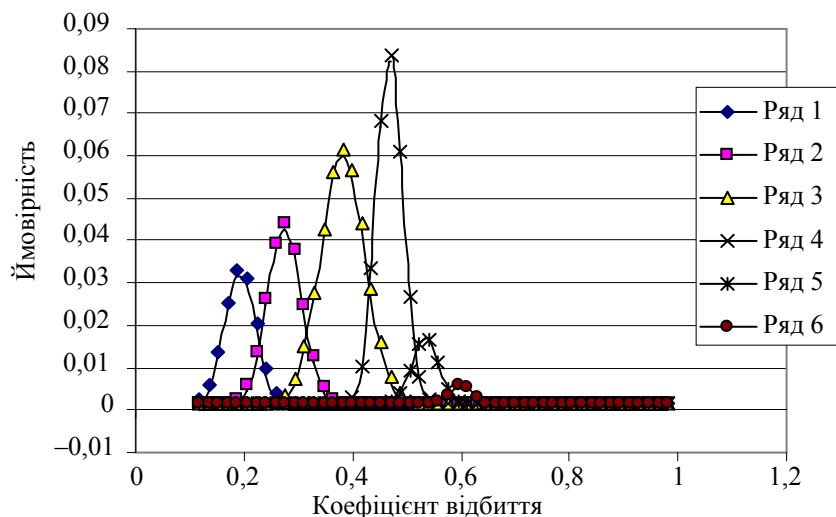


Рис. 2. Виділені компоненти нормальних розподілів з інтегральної кривої щільності ймовірності: 1 – 13,3 %; 2 – 20,0 %; 3 – 35,4 %; 4 – 28,3 %; 5 – 0,55 %; 6 – 1,3 %

Зазначимо, що дані утворення реалізуються через специфічні ґрунтові агрегати різних розмірів і значень водостійкості. Просторова перевага певних фізико-хімічних структур, реалізованих у згаданих ґрунтових агрегатах, формує виділені складові інтегрального розподілу. Варто також наголосити, що присутнім є просторове взаємопроникнення даних формувань, тобто перехідні

зони. Але запропонований статистичний аналіз дозволяє виділити їх у виокремленості, згруповані навколо відповідних середніх значень нормованих коефіцієнтів відбиття.

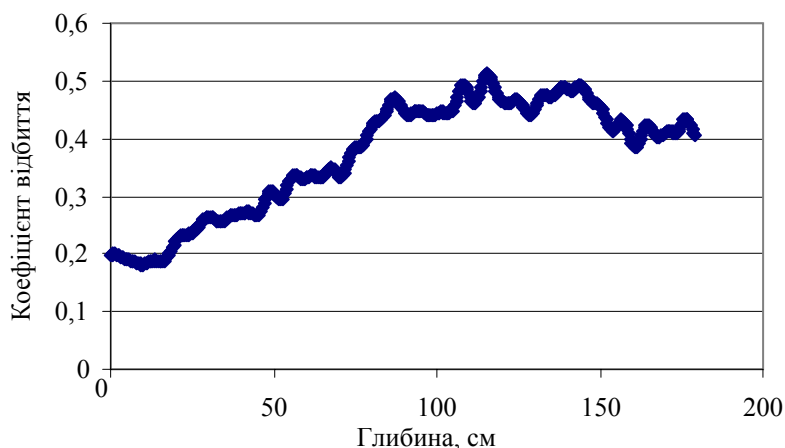


Рис. 3. Згладжена трендова крива розподілу коефіцієнтів відбиття світла по профілю розрізу

Зіставляючи середні значення виділених компонент з розподілом значень коефіцієнтів відбиття по профілю розрізу, можна встановити відповідність компонент ділянкам розрізу (рис. 2).

1. Перша компонента: $X = 0,187$; 13,3 % – зосереджена у верхньому горизонті ~ 20 см. Містить найбільший відсоток органіки (гумусу) $\sim 1,8\text{--}2,2$ %; рН 6,7; $\text{HCO}_3 - 0,20$ ммоль/100 г. Має найбільш темне забарвлення.

2. Друга компонента: $X = 0,270$; 20 %; гумус $\sim 1,10\text{--}1,30$ %; рН 7,7; $\text{HCO}_3 - 0,6$ ммоль/100 г. Відповідає глибині 30–50 см.

3. Третя компонента: $X = 0,387$; 35,4 %; рН 8,7; гумус $\sim 0,30\text{--}0,40$ %; $\text{HCO}_3 - 0,65$ ммоль/100 г.; карбонатність – 3,0 %. Відповідає глибині 120 см.

4. Четверта компонента: $X = 0,49$; 28,3 %; рН 8,8; гумус $\sim 0,20\text{--}0,35$ %; $\text{HCO}_3 - 0,65$ ммоль/100 г; карбонатність – 4,7 %. Розподіляється по глибині 120–190 см.

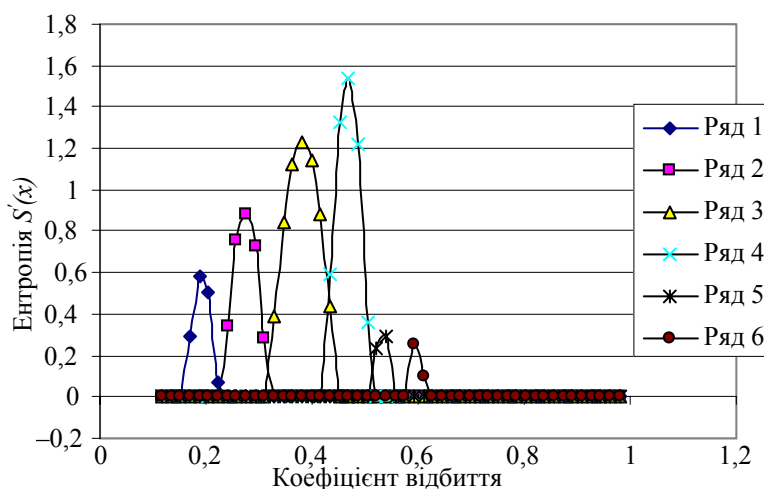


Рис. 4. Розподіл значень статистичної ентропії по компонентах інтегральної кривої ймовірності: 1 – 1,45; 2 – 2,99; 3 – 6,05; 4 – 5,04; 5 – 0,52; 6 – 0,35; сумарна по системі – 16,4

5. П'ята компонента: $X = 0,54; 5,5 \%$. Відповідає включенням лесоподібних суглинків, не містить органічної речовини.

6. Шоста компонента – найбільш світла: $X = 0,610; 1,3 \%$. Відповідає включенням білозірки.

На користь зміни гранулометричного складу насамперед свідчить зростання рН із глибиною. Це властиво підвищенню відсоткового складу фізичної глини, що у свою чергу відбивається на відсотковому співвідношенні щільного залишку й розподілу аніонів і катіонів (табл. 2). Розрахункові значення статистичної ентропії використовуються в порівняльному аналізі експериментальних ґрунтових розрізів (рис. 4).

Використовуючи графічну інтерпретацію відновленої (згладженої) з основних гармонік кривої коефіцієнтів відбиття світла по профілю розрізу, вважаємо за можливе виконати корисні модельні побудови для одержання інтегральних характеристик процесу ґрунтоутворення в еталонному розрізі, аби зробити порівняльний аналіз стосовно модельних об'єктів.

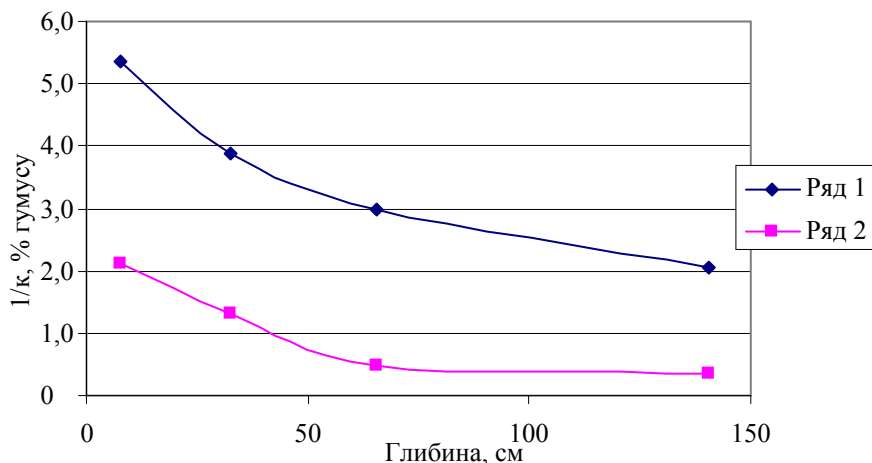


Рис. 5. *Зміни зворотної величини коефіцієнта відбиття (1) та вмісту гумусу (2) по глибині розрізу*

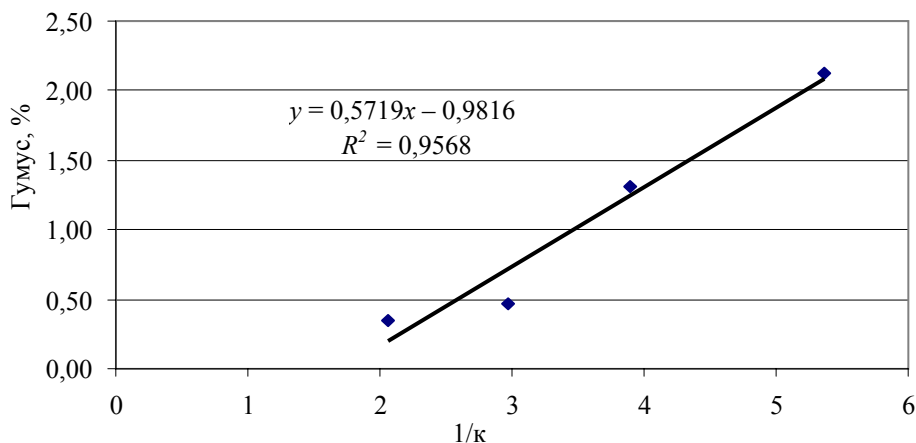


Рис. 6. *Лінійний кореляційний зв'язок вмісту гумусу в об'ємі й зворотному значенні коефіцієнта відбиття*

У разі зіставлення значень відсоткового вмісту органічної речовини на відповідній глибині зі зворотними значеннями нормованих коефіцієнтів

світловідбиття відзначається добре виражений кореляційний (близький до лінійного) зв'язок $R^2 = 0,96$ (рис. 5, 6). Використовуючи коефіцієнти лінійної регресії (рис. 6), можна відновити криву розподілу органічної речовини по всьому профілю розрізу (рис. 7). Дані отриманого розподілу органічної речовини (гумусу) по профілю розрізу добре узгоджуються з експериментальними значеннями й з основними закономірностями дифузійно-конвективних процесів у пористих субстратах. Відзначаються чітко виражені зони вмивання (у верхніх і нижніх шарах), близький до експонентного спадаючий профіль, незначна осциляція навколо трендової кривої.

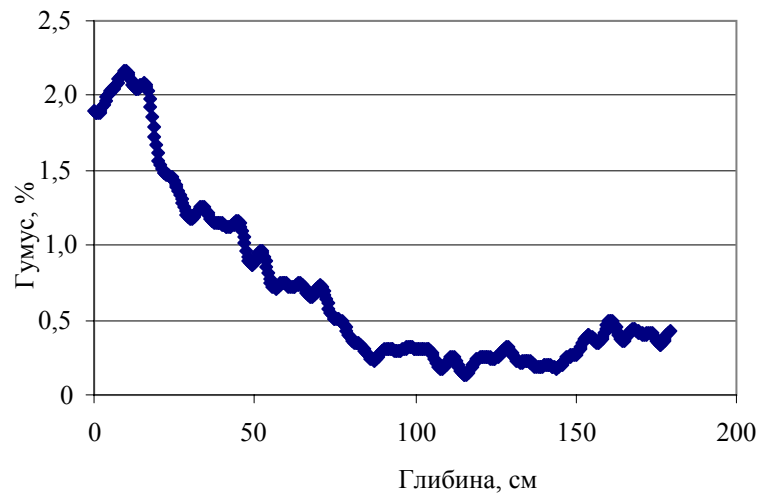


Рис. 7. Розрахований розподіл вмісту гумусу по профілю розрізу

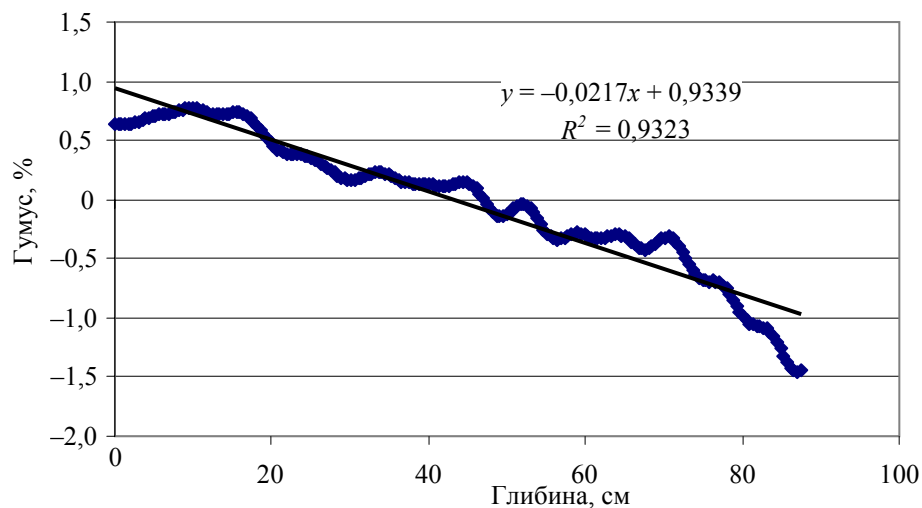


Рис. 8. Логарифмічне зображення розрахованої кривої розподілу гумусу в метровому шарі еталонного розрізу

Процеси конвективної дифузії в пористих субстратах, у присутності розподілених джерел утворення аналізованого з'єднання, добре описуються рівняннями балансу в частинних похідних параболічного типу.

$$\alpha \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + \gamma v(x,t) = \frac{\partial v(x,t)}{\partial t}, \quad (9)$$

де $v(x,t)$ – функція концентрації речовини (гумусу), що залежить від лінійної координати й часу;

α – коефіцієнт дифузії;

β – коефіцієнт, що відбиває швидкість усереднених за часом конвективних потоків (промивання опадами);

γ – коефіцієнт, що відбиває процес автокаталізу формування гумусу з рослинних решток, маса утворення яких пропорційна концентрації локалізованої в даній точці органічної речовини.

Використовуючи підстановку

$v(x,t) = e^{\mu x + \lambda t} u(x,t)$; $\mu = -\beta / 2\alpha$; $\lambda = \gamma - (\beta^2 / 4\alpha)$ у рівняння (9), отримаємо

$$\alpha \frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}. \quad (10)$$

Розв'язок виразу (10) шукаємо за нульових граничних умов по профілю розрізу й у присутності початкового розподілу, що в цілому формалізується записом:

$$\begin{aligned} U(0,t) &= 0 \\ U(L,t) &= 0 \\ U(x,0) &= \varphi(x), \end{aligned} \quad (11)$$

де L – глибина розрізу; $L \sim 200$ см;

$\varphi(x)$ – початковий розподіл органіки в профілі ґрунтоутворювальної породи – нехай навіть у край незначне й практично все зосереджене у верхньому шарі.

Розв'язком рівняння (10) з урахуванням (11) є функція:

$$U(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-a\left(\frac{\pi n}{L}\right)^2 t} \sin \frac{\pi n}{L} x, \quad (12)$$

де $C_n = \frac{1}{L} \int_0^L \varphi(\xi) \sin \frac{\pi n}{L} \xi d\xi$.

Значення коефіцієнтів швидко зменшуються зі збільшенням порядкового номера ряду n . Тому у ряді (12) можна залишити не більше трьох перших членів, які в цілому й свідчать про ті незначні осциляції навколо трендової кривої (рис. 7).

У цілому через малі значення коефіцієнтів $C_n \sim 0,1-0,3$ складова $U(x,t)$ загальної функції $V(x,t)$ може бути опущена з подальших оцінок величин, що характеризують процес ґрунтоутворення.

Залишковий компонент

$$V(x,t) \approx e^{\mu x + \lambda t} \quad (13)$$

добре описує сформований розподіл у метровому шарі. Припустимо, що за той тривалий період процесу ґрунтоутворення чорноземів південних склався деякий, нехай навіть квазістійкий, баланс, оскільки процеси, хоч і повільно, але йдуть у бік деградації чорноземів, то в логарифмічному поданні залишковий компонент (13) повинен мати вигляд:

$$\ln V(x,t) = \mu x + \lambda t \quad (14)$$

І якщо прологарифмувати значення вмісту гумусу в метровому шарі (практично весь запас) – рис. 7, то спостерігається лінійна залежність з високим ступенем значимості: $R^2 \sim 0,93$ (рис. 8). Тут комплексні коефіцієнти регресії

відповідають: $\mu = -0,0217 = -\beta / 2\alpha$; $\lambda t = 0,9323 = (\gamma - (\beta^2 / 4\alpha)) \cdot t$. Аналізуючи ці співвідношення і, якщо взяти до уваги величезне значення t – час утворення чорноземів південних, близькість до одиниці самого добутку λt , то варто дійсно визнати практичну стаціонарність у даному едафотопі, оскільки різниця $\gamma - (\beta^2 / 4\alpha) \ll 1$. Тобто різниця між утворенням гумусових з'єднань, яка обумовлена коефіцієнтом γ і комплексним виносом (включаючи дифузію й вимивання $\sim \beta^2 / 4\alpha$), є величиною малого порядку, набагато меншою за одиницю.

Отримані в результаті лінійної регресії значення комплексних коефіцієнтів досить корисні, як еталонні показники, для порівняльного аналізу й оцінки динамічних показників у модельних системах, коли процеси ґрунтоутворення далекі від досягнення стаціонарного стану.

У цілому, аналізуючи систему еталонного розрізу, його варто розглядати як добре стабілізовану систему, що перебуває на значній відстані в динамічному фазовому просторі від початку біфуркації. Про стаціонарний стан свідчить і профільний розподіл аніонів і катіонів (табл. 2), що цілком укладається в розуміння сорбційно-обмінних процесів конвективної дифузії. Розподіли кислоторозчинних форм мікроелементів і токсичних металів відповідають нормам кларкового розподілу (табл. 3).

3. Розподіл рухливих форм мікроелементів і токсичних металів по еталонному та модельному розрізам, мг/кг

Глибина, см	Co	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb
Еталонний профіль розрізу						
0–25	0,03	18,65	0,10	0,37	0,11	8,28
25–50	0,18	7,9	0,04	1,19	0,09	7,20
50–81	1,82	12,61	0,54	0,53	0,41	10,13
81–200	2,33	12,28	0,71	0,69	0,52	12,28
Модельний профіль розрізу						
0–10	0,89	31,37	0,66	1,04	0,53	12,45
10–40	2,09	23,68	0,89	1,12	0,62	12,81
40–115	2,63	14,56	0,96	1,49	0,86	14,77
115–195	0,03	10,50	0,08	0,68	0,35	9,54
195–255	2,58	133,62	0,55	1,14	0,72	12,56

Використовуючи логарифмічну інтерпретацію розподілу гумусу в профілі розрізу (рис. 7), можна зробити висновок про природу надходження органічної речовини у відповідний шар. Так, регресійна пряма перетинає вісь абсцис при значенні ~ 43 см і набуває від'ємного знаку (рис. 8), тобто нижче органічна речовина в основному надходить з фільтраційними потоками опадів та протікають незначні процеси розкладання залишків кореневої системи (стрижневої), але в загальному балансі вони не відіграють провідної ролі.

Досліджувана модель з насипкою лесоподібного суглинку. Інтегральна крива розподілу щільності ймовірності нормованих до одиниці коефіцієнтів відбиття світла в площині розрізу наведена на рис. 9. По результатах

досліджень побудовані й представлені відповідні компоненти інтегрального розподілу, графічний розрахунок значень статистичних (рис. 10, 11), трендова крива розподілу коефіцієнтів відбиття за профілем розрізу (рис. 12).

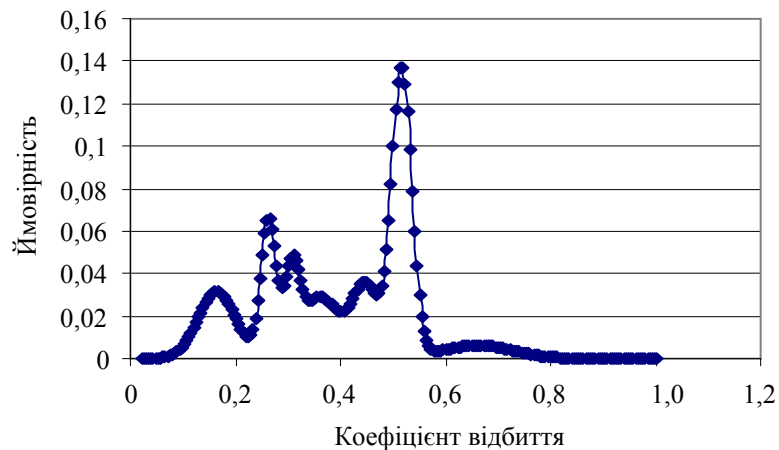


Рис. 9. Розподіл щільності ймовірності значень коефіцієнтів відбиття світла по щільності модельного розрізу (лесоподібний суглинок)

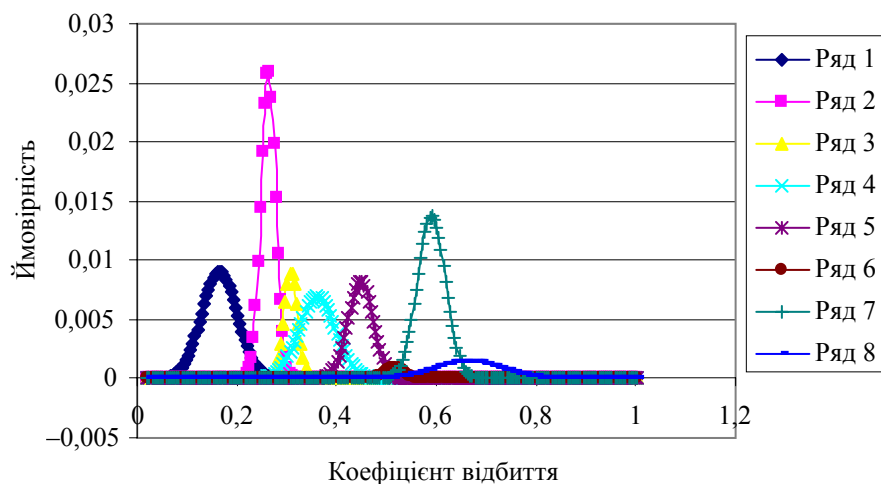


Рис. 10. Виділені компоненти нормальних розподілів з інтегральної кривої щільності ймовірності

Зіставляючи середні значення виділених компонент (рис. 10) і розподілу їх по профілю розрізу (рис. 12), проведено відповідну просторову ідентифікацію:

- компоненти зі середнім значенням коефіцієнтів відбиття 0,175 та 0,265 відповідають нижнім – темним межам розрізу, сумарна відсоткова складова яких 39,5 %;

- компоненти з середніми значеннями 0,311 % відповідають перехідній ділянці й у відсотковому відношенні дорівнюють 6,9;

- 0,370 й 14,1 % – насипному шару червоно-бурої глини;

- 0,456 й 11,3 % – насипному шару від темно-коричневої до червоно-бурої глини;

- 0,596 й 21,3 % – насипному шару лесоподібних суглинків;

- 0,523 і вкрай малим відсотком (1,2) – утвореній гумусованій частині лесоподібних суглинків;

- найбільш яскрава компонента із середнім значенням 0,391 і відсотковим вмістом 5,6 відповідає включенням білозірки.

Підкреслимо, що в нижніх шарах сполуки вуглецю безумовно присутні, ймовірно з моменту формування (табл. 1). Розподіл органічної речовини у верхньому шарі лесоподібного суглинку [7] добре корелює зі зворотними значеннями коефіцієнтів відбиття (рис. 12–14). Така залежність відмінна від лінійної регресії в еталонному розрізі, але досить добре описується ступеневою функцією $R^2 \sim 0,84$ (рис. 15).

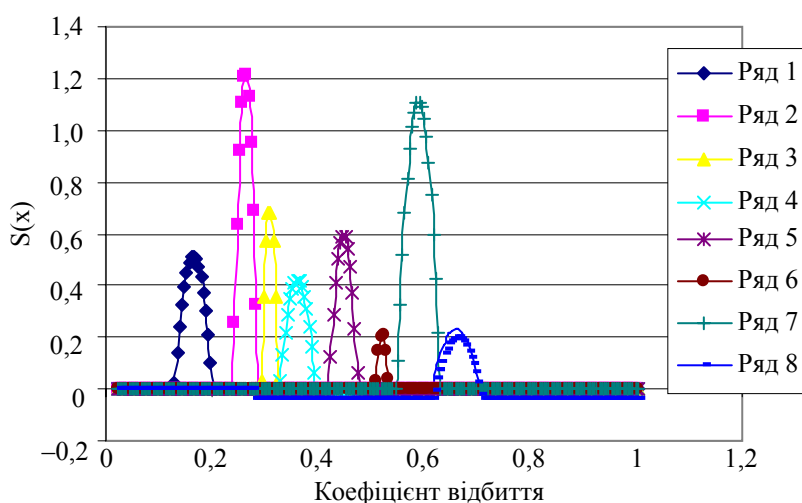


Рис. 11. Розподіл значень статистичної ентропії по компонентах інтегральної кривої: 1 – 5,5; 2 – 8,44; 3 – 3,28; 4 – 4,18; 5 – 4,75; 6 – 0,78; 7 – 13,64; 8 – 3,12; сумарний – 43,70

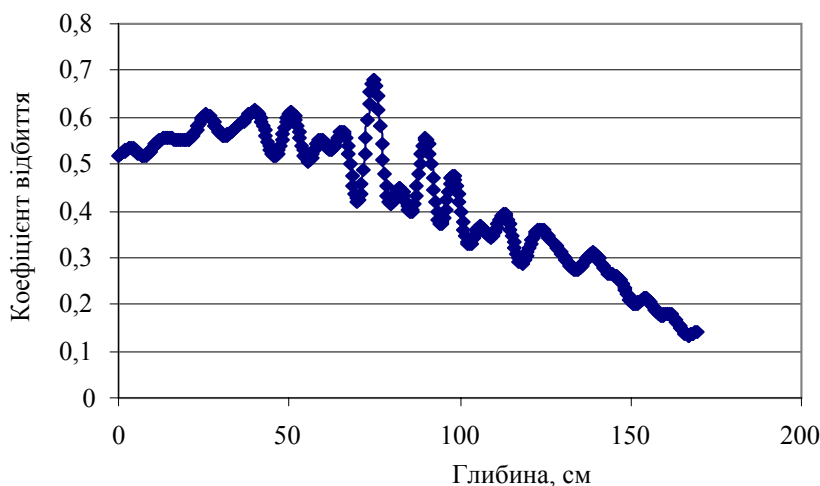


Рис. 12. Згладжена трендова крива розподілу коефіцієнтів відбиття світла по профілю модельного розрізу (лесоподібний суглинок)

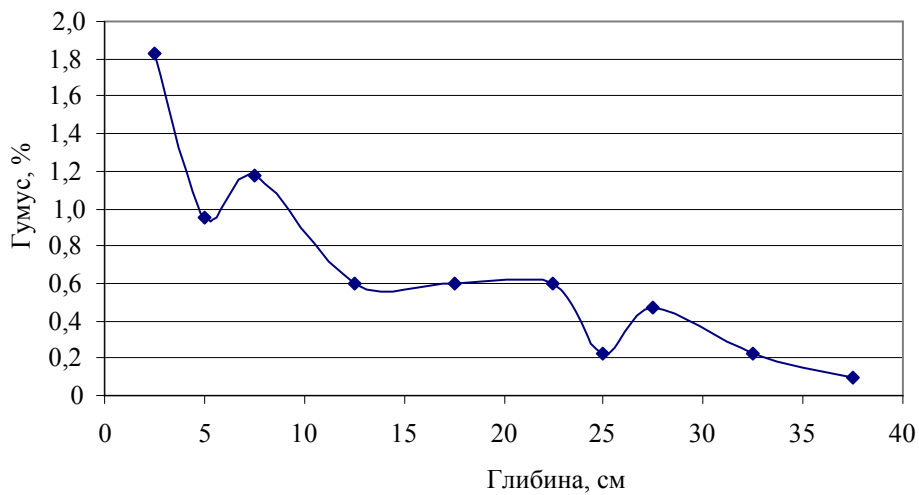


Рис. 13. Розподіл вмісту органічної речовини в лесоподібному суглинку

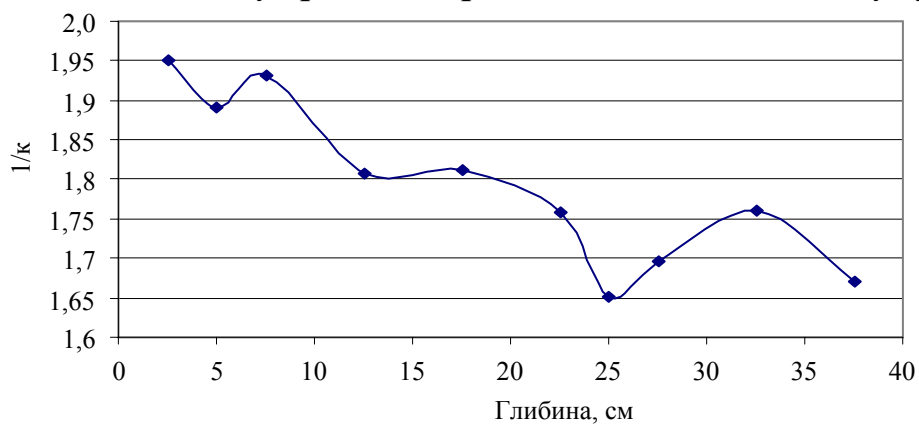


Рис. 14. Розподіл зворотних значень коефіцієнтів відбиття по профілю лесоподібного суглинку

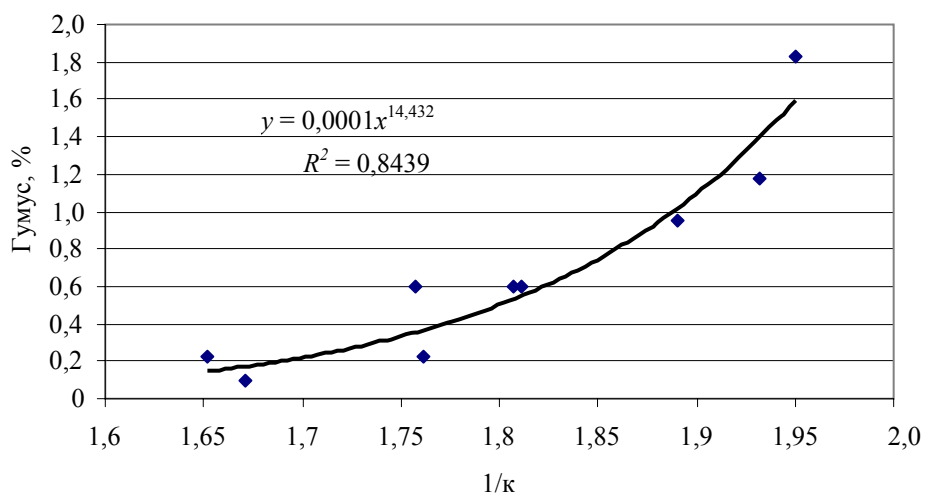


Рис. 15. Регресійна залежність розподілу гумусу від 1/к

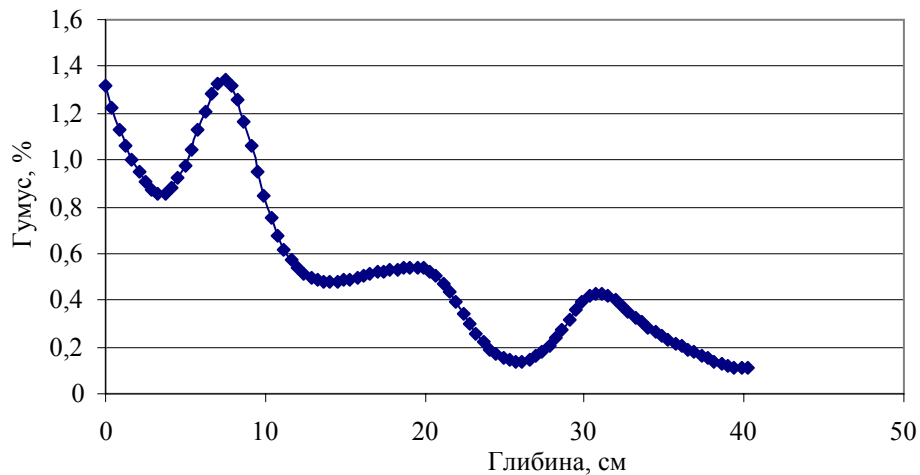


Рис. 16. Розрахунковий розподіл вмісту гумусу в профілі лесоподібного суглинку

З використанням коефіцієнтів ступеневої регресії був відновлений профіль розподілу органічної речовини в шарі лесоподібного суглинку (рис. 16). Одержана залежність дуже добре узгоджується з розв'язком модельного рівняння конвективної дифузії гумусу, яке враховує процеси гуміфікації органічних залишків, тобто синтезу гумусових речовин. Такий розв'язок має вигляд:

$$V(x, t) = e^{\mu x + \lambda t} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\alpha \left(\frac{\pi n}{L}\right)^2 t} \sin \frac{\pi n}{L} x; \quad (15)$$

$$\mu = \beta / 2\alpha; \quad \lambda = \gamma - (\beta^2 / 4\alpha),$$

де β – узагальнена швидкість конвективного вимивання опадами;

α – коефіцієнт дифузії гумусових з'єднань;

C_n – коефіцієнт за n -ої гармоніки;

L – товщина шару лесоподібного суглинку.

Видаливши з розподілу трендову складову $e^{\mu x + \lambda t}$ (рис. 16), отримаємо осцилюючий залишок (рис. 17). Оскільки спостерігається суворі періодичність у положенні максимуму осцилюючого залишку $\sim 11,6$ см, зробимо висновок: можна залишити тільки один (перший) член нескінченного ряду у виразі (5)

$$N(x, t) \cdot C_1 e^{-\alpha \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 t} \sin \pi / Lx. \quad (16)$$

Значення $\pi/L \sim (3,14/40 \text{ см}) = 0,078$ відіграє роль частоти у рівнянні і дуже близьке до отриманого в експерименті $\sim 1/t = 1/11,6 \text{ см} = 0,086$. Такий результат свідчить про прийнятність тих положень, які закладені в основу математичної моделі.

Використовуючи значення максимумів в осцилюючому залишку (рис. 17), можна оцінити й сам показник в експонентному члені $\alpha(\pi/L)^2 t = -0,0695$, де α – коефіцієнт дифузії; t – час із початку експерименту (~ 35 років). Коефіцієнт дифузії компонентів гумусових сполук у середовищі лесовидного суглинку становитиме $3,67 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{год}$.

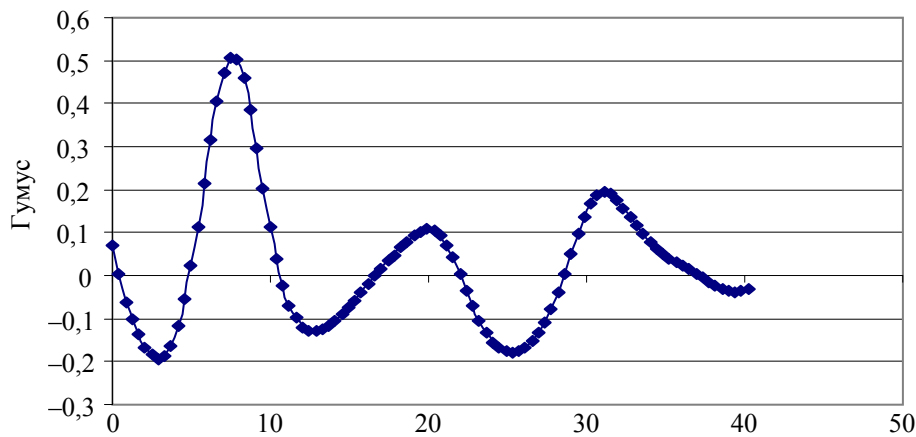


Рис. 17. Розподіл гумусу в профілі лесоподібного суглинку після виділення трендової (експонентної) складової

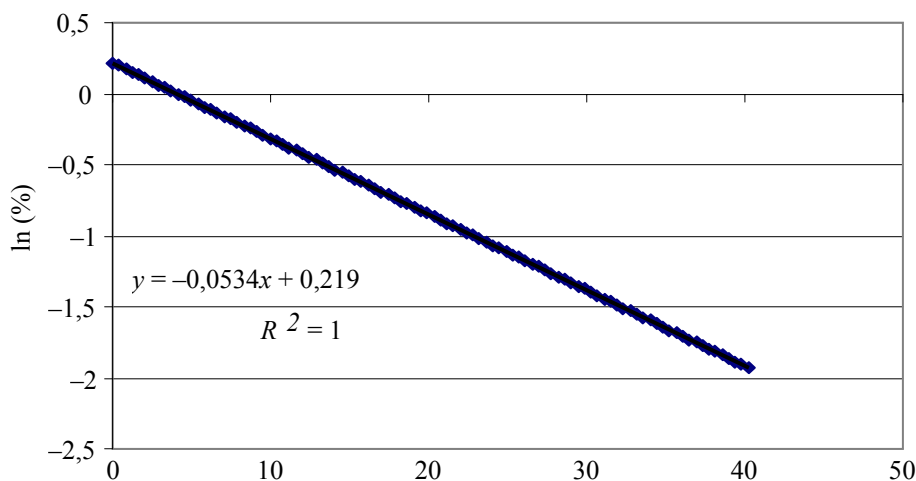


Рис. 18. Логарифмічне зображення трендової (експонентної) складової розподілу гумусу в профілі лесоподібного суглинку

Із подання трендової компоненти $e^{\mu x + \lambda t}$ в логарифмічному вигляді (рис. 18) можна зробити висновок: основний процес утворення гумусових з'єднань зосереджений в поверхневому шарі (5–8 см).

Висновки

Отримані оцінки дозволяють зробити ряд прогнозів (рис. 19) про те, яким буде згодом розподіл гумусу в даному шарі лесоподібного суглинку, а саме: загальна кількість гумусу зростає в 1,7 раза (у середньому 0,92 % у шарі 40 см через десять років проти 0,54 % натепер).

Сумарна ентропія такої гетерогенної системи, якою є аналізований розріз, у 2,66 раза більше відповідного значення еталонного розрізу. Це обумовлено адитивністю такого показника, як ентропія, і оскільки структура модельного розрізу містить більше компонент, то й сумарна ентропія буде більшою. Але в цілому цього недостатньо для пояснення з'ясованих розходжень. Тому варто визнати той факт, що аналізований модельний розріз

є системою, яка менш упорядкована, ніж еталонна, а процес упорядкування структури наближає модельні системи до вихідних екотопів.

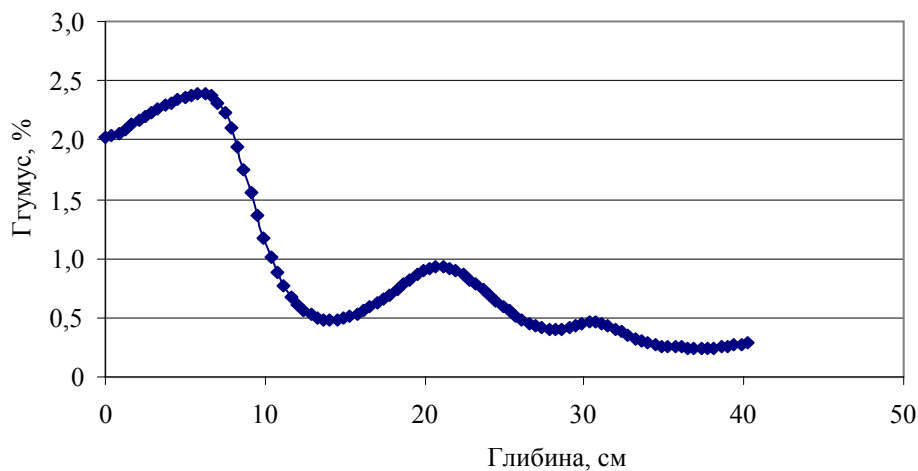


Рис. 19. Прогнозований через 10 років розподіл гумусу в насипному шарі лесоподібного суглинку

Як вважають дослідники [4, 11] профіль рекультоземів неадекватний сучасним умовам ґрунтоутворення. Рекультоземи зберігають у собі властивості, набуті на попередніх етапах розвитку. При цьому велике значення має встановлення віку ґрунтового профілю, оцінки географічної і екологічної відповідності виду ґрунтоутворення умовам. До того ж виникає питання про формування і положення ґрунтосумішей на траєкторії філоценогенезу даного біогеоценозу.

Сьогодні, коли розширюються роботи з рекультивациі порушених земель, досконалі знання екологічної сутності процесів ґрунтоутворення є невід’ємною частиною рекультознавства – важливого розділу екології.

Бібліографія

1. Башев В.Ф. Статистический анализ микроструктуры композиционных материалов / В.Ф. Башев, Е.В. Суховая, Ю.В. Сыроватко // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. ПГАСА. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 64. – С. 53–57.

2. Зайцева І.О. Біоекологічні механізми адаптації деревних інтродуцентів у Степовій зоні України: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня доктора біол. наук / І.О. Зайцева. – Дніпропетровськ, 2012. – 40 с.

3. Концептуальные основы устойчивого развития нарушенных природных экосистем / [Демидов А.А., Кобец А.С., Волох П.В. и др.]. – Днепропетровск: Изд-во “Свидлер А.Л.”, 2012. – 124 с.

4. Концепція рекультивациі земель, порушених за відкритого та підземного видобутку корисних копалин / [Балюк С.А., Стеревська Л.В., Травлєєв А.П. та ін.]. – Харків, 2012. – 46 с.

5. Ландау Л.Д. Статистическая физика / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. – М. : Физматлит, 2002. – Ч. 1. – 615 с. – (Серия: “Теоретическая физика”, т. V).

6. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: учеб. пособ. [для вузов]: в 10 т. Т. V. Статистическая физика / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. [5-е изд., стереот.]. – М. : Физматлит, 2002. – Ч. I. – 616 с.

7. Масюк Н.Т. Экологический подход к оценке биологических ресурсов естественных и искусственно созданных экотопов / Н.Т. Масюк // Биогеохимический круговорот веществ: тез. докл. всесоюз. конф. – М. : Наука, 1982. – С. 85–86.

8. Панас Р.М. Рекультивация земель: навч. посібник / Р.М. Панас. – [вид., 2-ге, стереотипн.]. – Львів : Новий світ–2000, 2011. – 224 с.

9. Суховая Е.В. Моделирование процессов растворения эвтектических фаз в зонах контактного взаимодействия композиционных материалов при пропитке / Е.В. Суховая, Ю.В. Сыроватко // Сучасні проблеми фізики конденсованого стану: праці Міжнародн. наук. конф. (10–13 жовтня, 2012 р.). – К., 2012.

10. Сыроватко В.А. Динамические системы почвенного потенциала воды / В.А. Сыроватко, С.И. Жученко // Агроэкологічний журнал. – 2008. – № 3. – С. 59–64.

11. Травлєєв А.П. Основні методологічні принципи проведення лісової рекультивациі / А.П. Травлєєв, Н.А. Білова // Рекультивациа складних техноекосистем у новому тисячолітті: ноосферний аспект: матер. Міжнародн. наук.-практ. конф. / ДДАУ. – Дніпропетровськ, 2012. – С. 23–27.