



РЕМ-АНАЛІЗ МІКРОСТРУКТУРИ ДЕРНОВО-ПІДЗОЛИСТИХ ҐРУНТІВ

Рассматриваются вопросы проведения микроморфологических исследований почв с использованием фотограмметрических методов цифровой обработки РЭМ-изображений. Предложена схема количественного РЭМ-анализа образцов почв.

The issues of micromorphological research of soils with use of photogrammetrical methods of digital processing of REM-images are considered. The scheme of quantitative REM analysis of soil samples is proposed.

Постановка наукової проблеми та її значення. Дослідження мікроструктури ґрунтів дає змогу виявити особливості не тільки ґрунтоутворення, а й ґрунтоутворювальних порід. Ґрунтові процеси (фізичні, хімічні, біологічні) значною мірою визначаються такими чинниками, як клімат, порода, рельєф, ґрунтова флора і фауна. Від цих чинників залежать особливості вивітрювання ґрунтів, вторинне утворення глинистих мінералів, характер розкладу підстилки, гуміфікація, формування структури. Зокрема, структура характеризується наявністю багатьох рівнів організації ґрунту та визначає різномасштабну систему порового простору. Ґрунтові пори є складноорганізованими й динамічними об'єктами, що містять інформацію про морфологію та геометрію ґрунтової структури [6]. Отже, морфологічна будова порового простору розглядається як прямиий структурно-організаційний носій ґрунтової пам'яті, яка потребує всебічного вивчення із використанням сучасних технологій візуалізації та РЕМ-аналізу знімків.

Аналіз останніх досліджень із цієї проблеми. Проведенню микроморфологічних досліджень приділено багато уваги в наукових публікаціях з проблем ґрунтознавства, геології, біології, медицини тощо. Зокрема, тему дослідження морфології піщано-пилюватих фракцій ґрунтів та методів дослідження мінерального скелету ґрунтів як носіїв пам'яті ґрунтів розглянуто у працях С. М. Седова, С. О. Шоби [5, 6]. На особливу увагу заслуговують дослідження О. Б. Скворцової, яка проаналізувала микроморфологічні типи порового простору циліндричних і розорюваних суглинкових ґрунтів. Вона зазначає, що показники порового простору містять просторово-організаційну інформацію про ґрунтоутворення, що розшифрування записів у поровому просторі може бути основою для реконструкції чинників і процесів структуротворення [7, 8]. Т. В. Турсіна, досліджуючи особливості мікробудови текстурно-диференційованих ґрунтів Росії та Франції, виявила полігенетичність будови більшості профілів таких ґрунтів, наявність численних і різноманітних педореліктів; вона поділила основні микроморфологічні ознаки на реліктові та сучасні, охарактеризувала антропогенні риси мікробудови [10]. Вітчизняні вчені микроморфологічними методами вивчають екологічні питання ґрунтоутворен-

ня [9] та основні компоненти мікробудови ґрунтів [12]. Відносно новим напрямом досліджень є застосування РЕМ-аналізу морфометричних і геометричних характеристик мікроструктури ґрунтів із розробленням теорії та практики фотограмметричних методів у РЕМ-дослідженнях [3, 4].

Мета та завдання дослідження – висвітлити особливості микроморфологічного вивчення дерново-підзолистих ґрунтів, що є типовими для Волинського Полісся, із застосуванням цифрових методів оброблення РЕМ-зображень та виявити морфogeометричні особливості їх порового простору.

Матеріали і методи дослідження: вивчення фізичних характеристик дослідних зразків типових ґрунтів Волині; електронно-мікроскопічні методи їх аналізу та застосування методів цифрового оброблення РЕМ-зображень.

Виклад основного матеріалу. Наявні на сьогодні методи визначення фільтраційних властивостей ґрунтів трудомісткі й досить тривалі за часом, тому особливого значення набули методи оцінювання структури порового простору за допомогою растрового електронного мікроскопа (РЕМ), що дають змогу виявляти проникність ґрунтів за зразками малого розміру (не більше 1 см³). Метод передбачає аналіз РЕМ-зображень спеціально підготовлених поверхонь зразків.

Кількісний аналіз структури порового простору зразків проводився за допомогою пакета прикладних програм STIMAN (ПП STIMAN), розробленого у Московському державному університеті імені М. В. Ломоносова. Основною відмінністю цього методу є те, що він дає змогу вирішити проблему одночасного оброблення кількох різномасштабних зображень (до 10-ти). Автоматизовані аналізатори зображення типу "Квантімет", SIAMS такої можливості не дають, що є істотним обмеженням, оскільки часто у досліджуваних зразках розміри структурних елементів (пор і часток) змінюються в широкому діапазоні: від часток мікрометра до сотень мікрометрів. За допомогою ПП STIMAN можна отримати такі характеристики: розмір і форма структурних елементів, їх орієнтація, площа, периметр, пористість, питома поверхня тощо. Спеціальна програма статистичної обробки дає можливість будувати відповідні гістограми, а модифікований варіант пакета – отримувати таку важливу характеристику, як фільтраційний коефіцієнт ґрунту.

Кількісний РЕМ-аналіз мікроструктури ґрунту здійснюється за певною схемою. Розглянемо її.



1. Перевірка однорідності мікроструктури.

Суть цієї операції полягає в отриманні експериментальної кривої розподілу пор (часток) за розмірами при малому збільшенні M_1 , у побудові на основі цієї кривої прогнозованого розподілу на наступне збільшення M_2 ($M_2 > M_1$), в отриманні при збільшенні M_2 експериментальної кривої розподілу й оцінюванні збігу теоретичної та експериментальної кривих (при M_2) за критерієм Смирнова – Колмогорова (F). Перевірка триває від найменшого до максимального збільшення, причому інтервали зміни збільшень, а також інтервали розмірів на кривих розподілу (A_1, A_2, \dots, A_n) відповідають геометричній прогресії ($M_2/M_1 = q$ – це знаменник геометричної прогресії). Якщо критерій F знаходиться в діапазоні не нижче 0,1, то мікробудова вважається однорідною і отримані результати передають усереднені значення для цього зразка. Якщо критерій $F < 0,10$, то мікробудова є неоднорідною і результати аналізу відображають мікробудову тільки у конкретному місці.

2. Кількісний аналіз передбачає такі операції:

1) вибір випадкової ділянки, номер якої задається генератором випадкових чисел; 2) вибір режиму роботи і типу елемента зображення, що вивчається (пора або частка); 3) знімання та дискретне цифрування РЕМ-зображення; 4) послідовне прослідкування на РЕМ-зображенні кожного структурного елемента, вимірювання його периметра і площі, формування масивів даних про площі, периметри і кількість пор (часток). Отримані масиви даних є вихідними для подальшого статистичного оброблення.

У випадку, коли якийсь досліджуваний діапазон розмірів структурних елементів не може бути проаналізований при одному збільшенні, існує спеціальна підпрограма, яка дає змогу проводити “зшивання” різномасштабних кривих розподілів в одне сумарне.

Інтегральна характеристика структури зразка передбачає також оцінювання орієнтації (за методом градієнта інтенсивності сигналу) та графічну інтерпретацію у вигляді рози орієнтації структурних елементів, форма якої міняється від круга (для ізотропних структур) до витягнутого еліпса (у сильноанізотропних).

3. “Зшивання” (resampling) РЕМ-зображень.

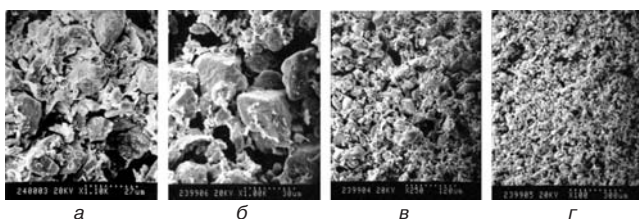
У багатьох випадках коректного (достовірного) оцінювання мікроструктури ґрунту не можна провести на основі лише одного вибіркового РЕМ-зображення. Для цього потрібна серія (з двох і більше) різномасштабних РЕМ-зобра-

жень (табл. 1; мал. 1, 2), з яких на основі “зшивання” формується генеральна статистична вибірка. На мал. 2 наведено приклад інтегральної гістограми розподілу пор за еквівалентним діаметром. Як видно з цього малюнка, гістограма не може бути апроксимована за нормальним законом розподілу.

Таблиця 1. Зведені результати структурного аналізу*

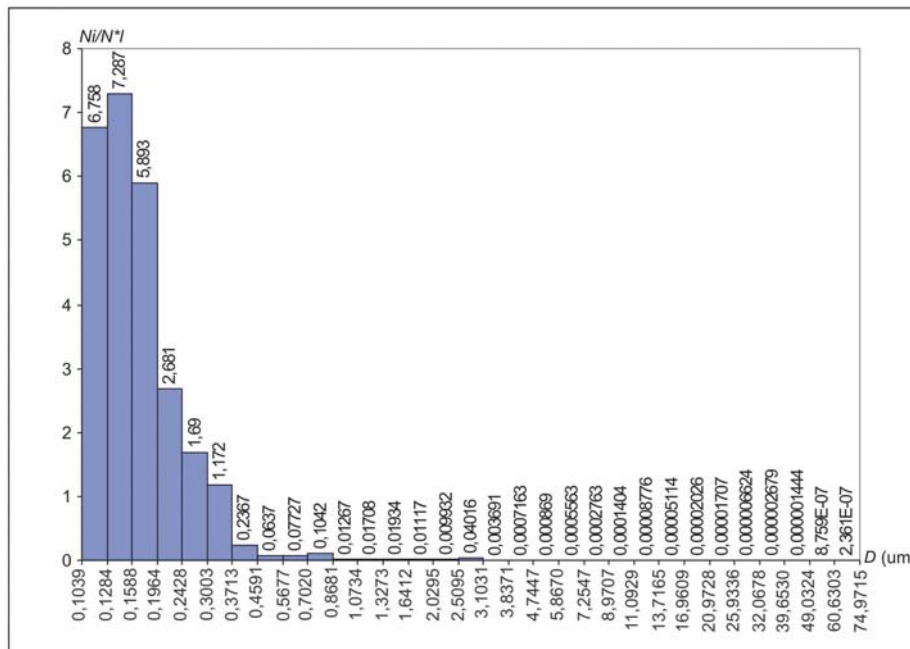
Specimen = mspec							
SEM magnification (M) and pixel size (Lx):							
M	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Lx (:m)	1,125	0,563	0,281	0,141	0,070	0,035	0,018
Number of pores	295311						
Porosity (%)	40,4345						
Total pore area (sq. um)	134334,5625						
Total pore perimeter (um)	696753,0625						
Average diameter (um) / dispersion	0,2836 / 0,4987						
Average area (sq. um) / dispersion	0,4549 / 235,6505						
Average perimeter (um) / dispersion	2,3594 / 81,4683						
Specific area (1 / um)	2,1001						

* Таблицю подано відповідно до ПП STIMAN.



Мал. 1. Характеристика мікроструктури зразка ґрунту, яку отримано з допомогою РЕМ “Hitachi S-800” при збільшеннях (крат): а – 1100^x; б – 1000^x; в – 250^x; г – 100^x

Distribution according to equivalent diameters
Specimen=mspec
Min=0,1092 (um), Max=74,9714 (um), Mid=0,2836 (um)
Disp=0,7062, Nse=295322



Мал. 2. Гістограма розподілу пор (часток) за еквівалентним діаметром (виконано у ПП STIMAN)



Для таких випадків коректнішим є апроксимування γ -розподілом (розподілом Ерланга), який характеризується швидким зростанням до максимального значення щільності ймовірності в області малих значень аргументу та її спад (зменшення) майже за експоненціальним законом в області середніх та великих значень. Розподіл Ерланга має вигляд [1]:

$$f(x) = \frac{x^{N-1}}{(N-1)!} \nu^N \exp(-x\nu), \quad (1)$$

де ν і N – параметри розподілу.

Для ерлангового розподілу справедливе таке твердження [1]. Якщо випадкова величина x має розподіл Ерланга, тоді $M(x)=N/D$ і $D(x)=N/D^2$, де $M(x)$ – математичне очікування; $D(x)$ – дисперсія випадкової величини X .

Згідно з цим твердженням, для знаходження параметрів ν і N необхідно розв'язати систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \nu &= nN / \sum_{i=1}^n x_i; \\ N &= E[\nu(\prod_{i=1}^n x_i)^{1/n}] + 1, \end{aligned} \quad (2)$$

де $E[\cdot]$ – ціла частина.

Припустимо, що для досліджуваних зразків ґрунту ці параметри дорівнюють ν_0 і N_0 , тоді, використовуючи критерій χ^2 , узгодженням значень розмірів x_i , $i=1, n$ перевіряється гіпотеза про те, що випадкова величина x розподілена за законом Ерланга з параметрами ν_0 і N_0 . Якщо ця гіпотеза не спростовується (не відкидається), то в результаті отримується “аналітичний опис” мікроструктури ґрунту.

Проілюструємо зазначене конкретним прикладом.

У результаті аналізу РЕМ-зображення модельного зразка одержано такі розміри пор (часток) у відносних одиницях:

61,1; 67,9; 48,4; 47,1; 11,2; 20,0; 17,1; 27,7; 15,4; 29,2; 30,3; 19,6; 15,3; 89,1; 21,3; 18,9; 37,2; 30,1; 17,7; 3502; 42,2; 21,4; 21,2; 10,2; 59,2; 64,3; 71,5; 14,3; 19,8; 24,3; 48,2; 41,2; 36,5; 43,2; 13,1; 54,1; 11,3; 39,2; 14,9; 30,2; 16,1; 36,6; 34,4; 43,1; 53,4; 73,4; 13,2; 51,2; 18,9; 25,9.

За цими даними отримано гістограми розподілу пор досліджуваного зразка і такі конкретні результати:

$$\sum_{i=1}^{50} x_i = 1605; \quad (\prod_{i=1}^{50} x_i)^{1/50} = 23,8975.$$

Підставляючи ці значення в систему, де $n=50$, одержуємо:

$$\begin{aligned} \nu &= 50N/1605; \\ N &= E(\nu \cdot 23,89) + 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Звідси маємо: параметри ν і N , які задовольняють систему, дорівнюють: $\nu_0 = 0,0629$; $N_0 = 2$.

Остаточний емпіричний розподіл пор цього зразка має вигляд:

$$f(x) = \frac{x^{N_0-1}}{(N_0-1)!} \nu_0^{N_0} \exp(-x\nu_0) = x \cdot 0,06^2 \exp(-0,06x).$$

Одержавши аналітичний вираз розподілу розмірів пор (часток) і використовуючи критерій χ^2 для фіксованого рівня значимості, перевіряємо узгодженість емпіричної вибірки (ν_0 , N_0) з теоретичним розподілом Ерланга. На цій підставі зробимо остаточні висновки про репрезентативність такого статистичного розподілу.

4. Мікроструктурне оцінювання за фактором форми. У дослідженні мікроструктури різних типів ґрунтів особливе місце має оцінювання фактора форми пор (часток). Для цього пропонується використовувати такі безрозмірні фактори, що характеризують пору – форма, компактність, видовженість [11].

1. *Форма* – це відношення периметра кола, рівновеликого площі досліджуваної фігури, до периметра цієї фігури:

$$F_S = 2\sqrt{\pi S/P}, \quad (4)$$

де S – площа пори; P – периметр пори. Чим ближче числове значення цього фактора до 1, тим ближче форма пори до кола.

2. *Компактність* – це відношення площі пори до площі описаного довкола пори кола:

$$F_C = \frac{4S}{\pi F_{avr}^2}, \quad (5)$$

де F_{avr}^2 – середній діаметр Ферре. Чим більше значення цього фактора, тим компактніша пора. Діаметри Ферре – це довжина проекції пори.

ПП STIMAN, як і автоматичні аналізатори мікробіоображення типу "Квантімет", SIAMS, дає змогу вимірювати діаметри за 64-ма напрямками ($\pi k/64$, $k=0...63$). Тож обчислюємо максимальний та середній діаметр Ферре із 64-х проєкцій.

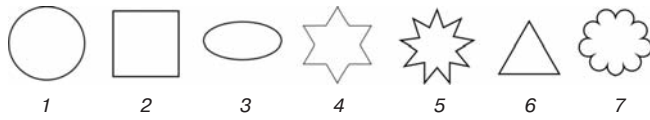
3. *Видовженість* – це відношення максимального розміру пори до ортогонального максимальному:

$$F_C = F_{orto} / F_{max}, \quad (6)$$

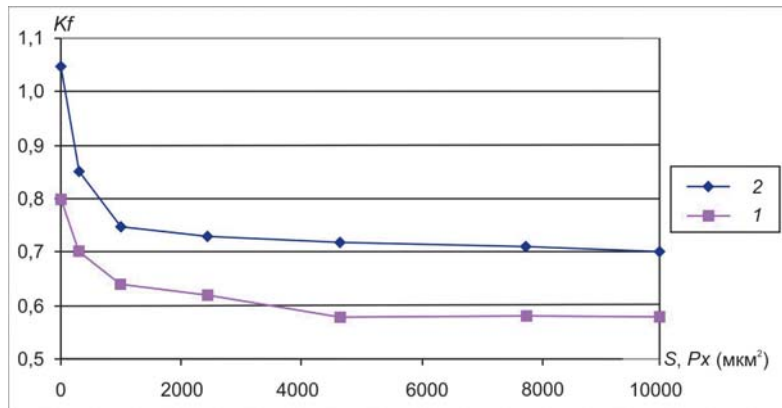
де F_{orto} – діаметр Ферре пори, ортогональний максимальному; F_{max} – максимальний діаметр Ферре. Чим більше числове значення фактора, тим пора має більш видовжену форму.

Точність вимірювання факторів форми для різних фігур було оцінено за допомогою комп'ютерних тестів. Використовувалися цифрові зображення, отримані в графічному редакторі. Для тестування вибрали сім фігур (мал. 3), що моделюють переважні форми реальних пор (часток). Для кожної фігури визначили корельованість факторів форми фігур та їх площі (мал. 4). Встановлено відсутність строгої лінійної залежності ($Kf-S$), особливо в діапазоні мікропор, що можна пояснити впливом процесу дискретизації, тобто чим більша площа (розміри) фігури, тим з меншою похибкою вимірюються параметри, що входять у формули (4-6) для розрахунку факторів форми.

5. Експериментальні дослідження. Для експериментальної апробації розглянутих методів ми провели детальні дослідження порового простору зразків дерново-підзолистого ґрунту (РЕМ-знімання



Мал. 3. Фігури, що моделюють форми часток (пор):
1 – коло; 2 – квадрат; 3 – еліпс; 4 – шестикутна зірка;
5 – дев'ятикутна зірка; 6 – трикутник; 7 – квітка



Мал. 4. Залежність фактора форми від площі фігури (фігура 5 на мал. 3):
1 – форма; 2 – компактність

здійснено в режимах катодолюмінісценції та вторинних електронів у лабораторії електронної мікроскопії Московського державного університету імені М. В. Ломоносова). Дерново-підзолисті ґрунти характеризуються чіткою текстурною диференціацією. Гранулометричний склад дерново-підзолистого ґрунту змінюється від грубопилувато-середньосуглинкового (глибина 0-35 см) до грубопилувато-важкосуглинкового (глибина понад 50 см) (мал. 5).

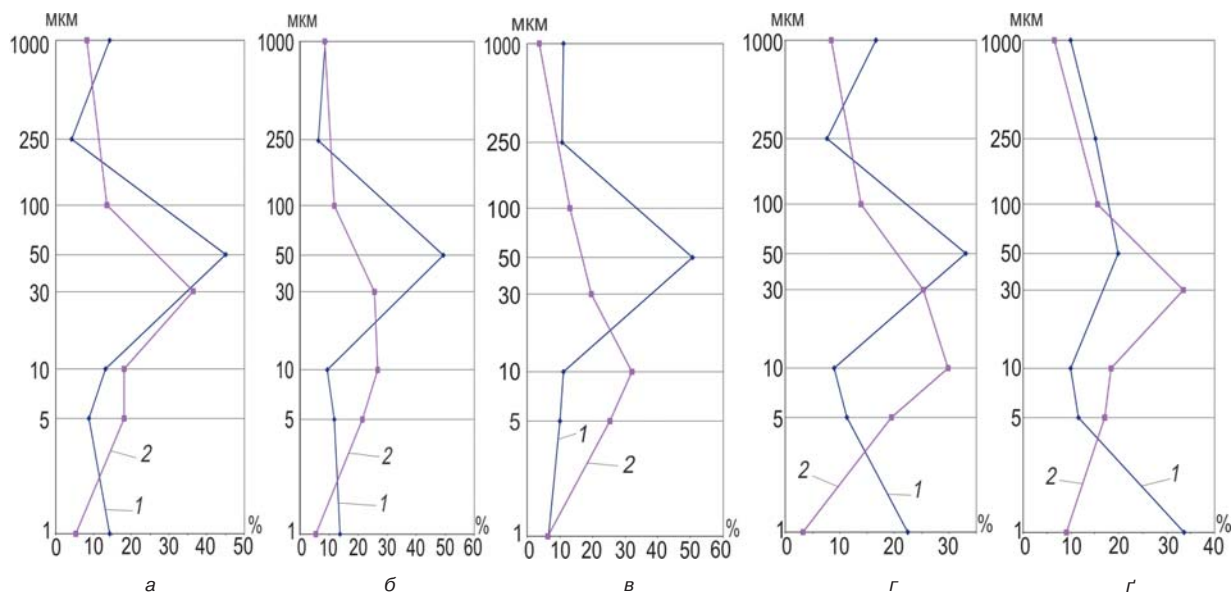
З аналізу РЕМ-зображення встановлено, що мікроагрегатна складова у профілі дерново-підзолистого ґрунту включає незначний відсоток мулистої

фракції, а глиниста речовина представлена переважно ультра- і глинисто-пилуватими мікроагрегатами, а не окремими глинистими лусочками.

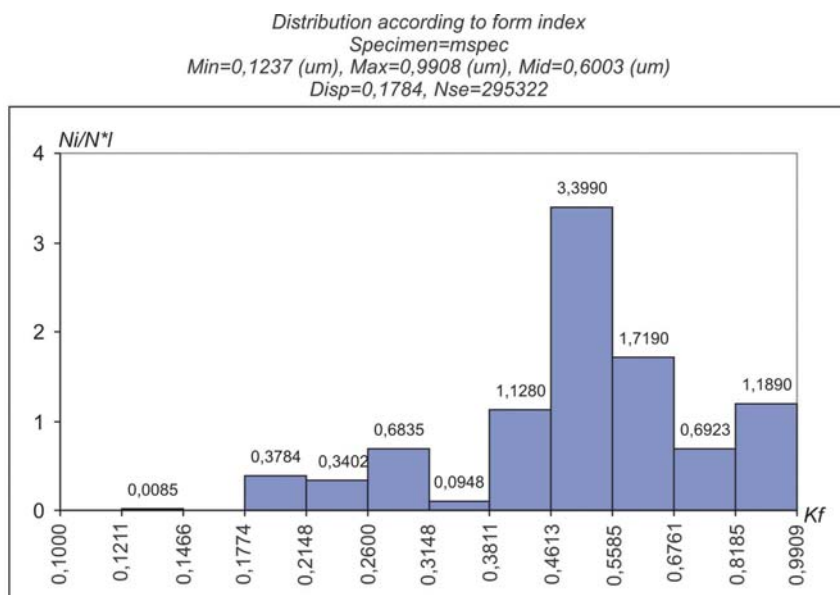
Лювіальний горизонт у верхній частині профілю характеризується горіхуватою, а в нижній – горіхувато-призматичною структурою. Видима макропористість у межах 6 % від площі шліфа. У поровому просторі значна частка ізометричних слабопорізаних пор, які є каналами у субпоперечному зрізі (6 %), хоча загалом переважають витягнуті порізани й слабопорізани пори (23 і 58 %). У поровому просторі горизонту переважають витягнуті пори різного ступеня порізаності, близько 15 % – це внесок ізометричних порізаних пор, тріщиноподібні та ізометричні слабопорізани пори становлять незначну частку в поровому просторі цього горизонту (мал. 6).

Скелетна мікроструктура ґрунту горизонту НЕ (0-5 см) характеризується загальною пористістю близько 41 %. Найбільше міжзернистих мезопор, менше – міжмікроагрегатно-зернистих грубих і середніх мікропор. Найменше у поровому просторі тонких мікропор, що розташовуються між зернами дрібнопилуватої фракції і глинистими ультрамікроагрегатами (мал. 5 і 8). На частку анізометричних пор припадає понад 85 % загального порового простору цього горизонту (мал. 7).

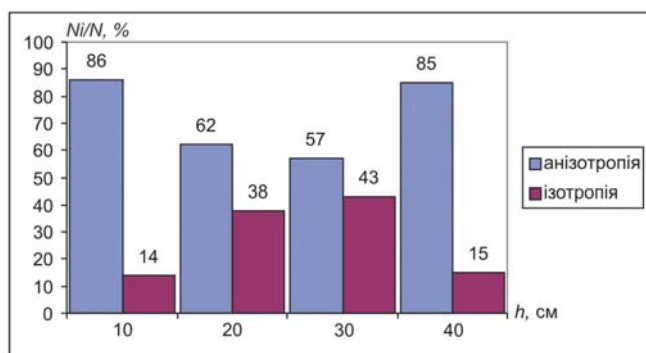
У результаті кількісного аналізу мікроструктури можна зробити висновок про те, що більші пори мають округлішу форму. Це підтверджується зростанням показника ізометричності від 0,48 до 0,62 при збільшенні еквівалентного діаметра пор. Мікропоровий простір горизонту (0-5 см) характеризується значною мінливістю еквівалентних діаметрів пор і показника ізометричності (табл. 2).



Мал. 5. Розподіл часток (1) та пор (2) у профілі дерново-підзолистого ґрунту (горизонти: а – 0-10 см; б – 10-20 см; в – 20-30 см; г – 35-45 см; г – 75-85 см)



Мал. 6. Розподіл пор за фактором форми (ПП STIMAN)



Мал. 7. Діаграма відсоткового розподілу пор (часток) за характером ізотропності

Таблиця 2. Характеристика порового простору дерново-підзолистого ґрунту

Глибина відбору зразка, см	Розподіл за еквівалентним діаметром, мкм			Загальна пористість, % від об'єму ґрунту	Середня площа пор, мкм ²
	макс.	мін.	сер.		
0-5	172,36	0,15	14,25	42,1	0,85
10-15	129,75	0,13	12,79	39,8	0,85
20-25	1,64	0,13	0,2	37,4	0,47

Роза орієнтації структурних елементів має округлу форму, що разом з низькими значеннями параметра дисперсності мікроструктури та анізотропії вказує на слабоорієнтовану середньодисперсну мікроструктуру (мал. 8-10).

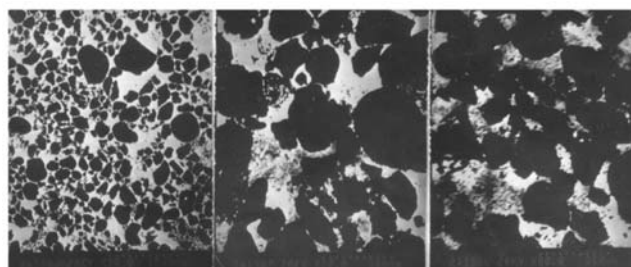
Перехідний горизонт ($h=15$ см) характеризується переважанням витягнутих слабопорізаних і порізаних пор. Найменша частка тріщиноподібних та ізометричних слабопорізаних пор. Ізометричні порізани пори у поровому просторі горизонту свідчать про наявність у його структурі елементів грудкуватої організації.

Мікроструктура перехідного горизонту характеризується загальною пористістю близько 40 %. У поровому просторі переважають міжзеренні грубі мікропори (до 27 %), що мають анізометричну форму, а також ізометричні середні мікро- (22 %) і мезопори (26 %) (див. мал. 5).

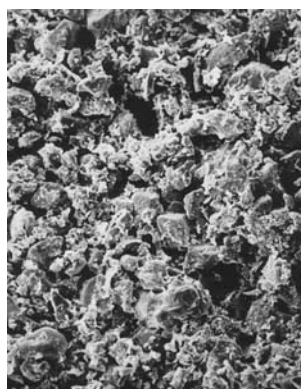
Про перевагу в поровому просторі анізометричних пор свідчить показник ізометричності: понад 60 % пор характеризуються значеннями Kf менше 0,65. Значення еквівалентного діаметра мікропор змінюються від 0,13 до 129,75, причому 75 % пор мають еквівалентний діаметр від 4 до 27 мкм. Ізометричність пор змінюється рівномірніше (див. табл. 2).

Наведені дані підтверджують, що верхній гумусово-елювіальний горизонт добре мікроагрегований, його мікроструктура характеризується значною міцністю, на що вказує високий відсоток агрономічно цінної фракції мікроагрегатів. Водночас горизонт 10-15 см характеризується грудкувато-горіхуватою структурою, в якій поряд з агрегованою масою зафіксовано велику кількість неагрегованого матеріалу. Результати РЕМ-кількісного аналізу зразків, відібраних з основних генетичних горизонтів, свідчать про те, що в мікропоровому просторі співвідношення ані-

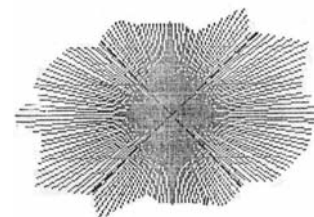
ізотропності порівняно високе. Це свідчить про те, що в мікропоровому просторі співвідношення ані-



Мал. 8. РЕМ-зображення порового простору дерново-підзолистих ґрунтів у режимі катодолюмінісценції РЕМ "Hitachi S-800"



Мал. 9. Мікроструктура зразка ґрунту в режимі BE (M=250^x), горизонт HE (10-15 см)



Мал. 10. Роза орієнтації структурних елементів



зометричних та ізометричних пор майже однакове. Встановлена диференціація мікроструктури досліджуваних ґрунтів відповідає відомій у ґрунтознавстві схемі формування текстурно-диференційованих ґрунтів. Аналіз форми пор та їхній розподіл за розмірами вказує на слабе структурування і складну будову ґрунту, що зумовлено в основному ґрунтоутворювальною породою, яка незначно змінюється у процесі педогенезу та визначається мінералогічним і гранулометричним складом.

Висновки і перспективи подальших досліджень. 1. Перевірка однорідності мікроструктури зразків ґрунту здійснюється на основі побудови кривої розподілу пор (часток) за розмірами та кривої прогнозованого розподілу пар з наступним оцінюванням цих кривих за критерієм Смирнова – Колмогорова.

2. Кількісний аналіз передбачає вибір випадкової ділянки та режиму роботи, знімання та дискретизацію РЕМ-зображення з інтегральним морфометричним аналізом кожного структурного елемента зразка.

3. “Зшивання” РЕМ-зображень проводиться з метою формування генеральної статистичної вибірки. При цьому здійснюється перевірка емпіричної вибірки (v_0 , N_0) з теоретичним розподілом Ерланга, що дозволяє оцінити репрезентативність такого емпіричного розподілу.

4. Для оцінювання мікроструктури зразків ґрунту пропонується використовувати такі безрозмірні фактори, як форма, що характеризує пори за формою, компактністю та видовженістю.

5. Проаналізовано мікроструктуру ґрунтів методами растрової електронної мікроскопії в комплексі з програмним забезпеченням STIMAN, що дає змогу отримати інтегральну картину побудови порового простору (розмір, форма пор та частка кожної групи пор у загальній пористості), викладено підходи до оцінювання репрезентативності дослідження мікроструктури. Оцінюючи мікроструктуру пор (часток) ґрунту, проаналізовано фактор форми пор. Під час дослідження мікроструктури дерново-підзолистого ґрунту встановлено, що максимальну частку в поровому просторі верхніх горизонтів становлять пори упакування крупнопилуватих піщаних зерен (20-30 %) та внутріагрегатні мезопори (25-35 %). У перехідному горизонті максимальна частка у поровому просторі міжмікроагрегатних пор (30-40 %). Значна частка тонких мікропор, розміщених між глинистими субмікроагрегатами та ізольованими зернами первинних мінералів. Разом з тим спостерігається різниця у розподілі пор за фактором форми і типом мікроструктури. Фактор дисперсності змінюється в діапазоні 10-17 %, роза орієнтації структурних елементів наближається до округлої.

6. Подальші дослідження порового простору

ґрунтів передбачають вивчення основних морфогеометричних показників (форма, орієнтація пор), які визначають процеси структурування та забезпечують “запис” цих процесів у поровому просторі, а також дослідження мікроморфології зональних ґрунтів.

Література

1. Ковбаса, С.И. Информационные характеристики системы нейронов [Текст] / С.И. Ковбаса, А.А. Ноздрачев. – Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1990. – 177 с.
2. Мельник, В.М. До теорії РЕМ-фотограмметрії [Текст] / В.М. Мельник, В.У. Волошин // Вісн. геодез. та картогр. – 2006. – № 5. – С. 26-29.
3. Мельник, В.М. Кількісна стереомікрофрактографія: монографія [Текст] / В.М. Мельник, А.В. Шостак. – Луцьк: ПВД “Твердиня”, 2010. – 460 с.
4. Мельник, В.М. Растрово-електронна стереомікрофрактографія: монографія [Текст] / В.М. Мельник, А.В. Шостак. – Луцьк: РВВ Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки, 2009. – 469 с.
5. Седов, С.Н. Методы исследования минерального скелета почв: оценка возможностей, применение к решению почвенно-генетических задач [Текст] / С.Н. Седов, С. А. Шоба // Почвоведение. – 1996. – № 10. – С. 1157-1166.
6. Седов, С.Н. Морфология песчано-пылеватых фракций почв: память о литогенезе и почвообразовании [Текст] / С.Н. Седов, С.А. Иноземцев, А.М. Кузнецова, С.А. Шоба // Память почв. Память как память биосферно-геосферно-антропосферных взаимодействий. – М.: URSS, 2008. – С. 206-235.
7. Скворцова, Е.Б. Микроморфометрические типы строения порового пространства целинных и пахотных суглинистых почв [Текст] / Е.Б. Скворцова, Н.В. Килина // Почвоведение. – 2004. – № 9. – С. 1114-1125.
8. Скворцова, Е.Б. Поровое пространство как носитель почвенной памяти [Текст] / Е.Б. Скворцова // Память почв. Память как память биосферно-геосферно-антропосферных взаимодействий. – М.: URSS, 2008. – С. 438-467.
9. Травлев, А.П. Экология почвообразования лесных черноземов [Текст] / А.П. Травлев, Н.А. Белова, А.К. Балалаев // Ґрунтознавство. – 2008. – Т. 9. – № 1-2. – С. 19-29.
10. Турсина, Т.В. Особенности микростроения текстурно-дифференцированных почв России и Франции [Текст] / Т. В. Турсина // Генезис, география и картография почв: науч. тр. Почв. ин-та им. В. В. Докучаева. – М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 2000. – С. 185-200.
11. Черных, С.Е. Интегральный и локальный морфометрический анализ графита в чугунах [Текст] / С.Е. Черных, Р.М. Кадушников, В.И. Гроховский [и др.] // Заводская лаборатория. – 1997. – Т. 63. – № 6. – С. 30-33.
12. Яковенко, В.М. Мікроморфологічна діагностика чорноземів Присамар'я Дніпровського [Текст] / В.М. Яковенко // Ґрунтознавство. – 2008. – Т. 9. – № 3-4. – С. 119-127.

Надійшла 12.10.10