

Stereologiczno-stereometryczne metody oceny ilościowej mikrostruktury gleby.

W. Melnik¹⁾, O. Dorozhynskyy²⁾, W. Woloszyn¹⁾

¹⁾ Wołyński Państwowy Uniwersytet im. Lesi Ukrainki

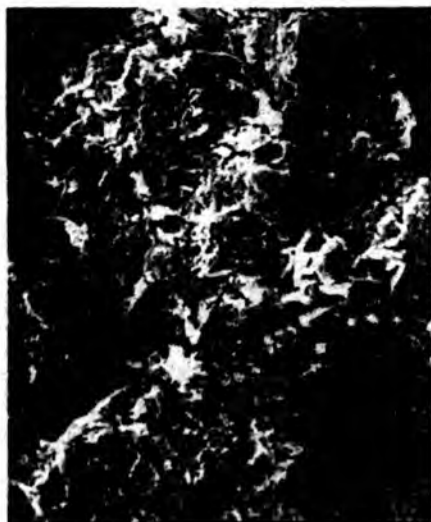
²⁾ Akademia Rolnicza im. H. Kollątaja w Krakowie

Wstęp.

Metoda analizy jakościowej mikrostruktury gleby odgrywa ważną rolę w gleboznawstwie [1]. Osobną rolę mają metody badania z wykorzystaniem rastrowych mikroskopów elektronicznych (REM). Jednakże problem otrzymania informacji odnośnie struktury i przestrzeni porowatej jest jeszcze słabo zbadany. Budowa przestrzeni porowatej ma wpływ na różne funkcje gleby i procesy połączone z urodzajem. Jako przykład, forma i orientacja porów może mieć wpływ na położenie w glebie systemu korzeniowego roślin, charakter nawigacji roztworów i zawiesin w glebach, cech wymiany gazowej i cieplnej w masie gleby. Oprócz tego, budowa porów jest wskaźnikiem informacyjnym i diagnostycznym stanu agrofizycznego gleby, i naturalnie jego struktury.

Odpowiednio do tych zadań proponowane są cztery metody: stereologo-planimetryczna, stereometryczna, spektralna i metoda geometrii fraktalnej.

1. **Analizę stereologiczną** przeprowadzono za pomocą oryginalnego oprogramowania Stiman [2] i Pamir. Wejściową informacją jest REM – obraz, który można wprowadzić do komputera w czasie pracy (tryb on-line) albo z innych urządzeń (tryb on-line) takich jak telekamera, skaner, pliki obrazów poprzednio zapisane na nośnikach magnetycznych tj. w trybie off-line.



Rys. 1. Obraz REM gleby, otrzymany w trybie elementów pochodnych. Powiększenie 1000x

Ilościowe wskaźniki morfometrycznych cech mikrostruktury badanego obiektu badania oblicza się z modelu cyfrowego, który jest analogiem obrazu REM. Dla formowania modelu z obrazu REM, otrzymanego w trybie zwykłym (rys. 1), dyskretyzuje się ten obraz na piksele, których ilość zadaje się programowo i w zależności od potrzebnej ilości wynosi 128x128, 256x256 lub 1024x1024 elementów. Dla każdego piksela wyznacza się i koduje wartość, która odpowiada intensywności sygnału.

Charakterystyka formy i rozmiarów elementów mikrostruktury zawiera wyznaczenie wskaźników powierzchni konturów, ich parametrów, średnic ekwiwalentnych [3]. Ilościową ocenę formy mikro-

obiektów otrzymuje się za pomocą analizy Fouriera tych konturów. Dla tej analizy trzeba wprowadzić współrzędne X_i, Y_i ($i = 1, 2, \dots, m$) punktów konturów z REM do komputera. Żeby uniknąć zależności Fouriera – przetwarzania od orientacji elementów mikrostruktury lepiej wybrać biegunowy układ współrzędnych. Obliczając powierzchnię S i momenty M_x, M_y za pomocą wzorów.

$$S = \sum_{j=1}^m \frac{(y_{j+1} + y_j)(x_j + x_{j+1})}{2},$$

$$M_x = \sum_{j=1}^m \frac{(y_j - y_{j+1})(x_j^2 + x_j x_{j+1} + x_{j+1}^2)}{6},$$

$$M_y = \sum_{j=1}^m \frac{(x_j - x_{j+1})(y_j^2 + y_j y_{j+1} + y_{j+1}^2)}{6}$$
(1)

wtedy $x = M_x/S$, $y = M_y/S$. Wyznaczamy we współrzędnych Dekarta parametr

$$P = \sum_{j=1}^m P_j, \quad \text{gdzie } P_j = [(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2]^{1/2},$$

i otrzymujemy przejście do współrzędnych biegunowych w funkcji x i y :

$$R_j = [(y_j - y)^2 + (x_j - x)^2]^{1/2}, \quad \theta_j = \arctg \frac{y_j - y}{x_j - x}.$$
(2)

wtedy dla szeregu Fouriera mamy $R(\theta) = R_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \theta + B_n \sin \theta)$, (3)

gdzie: R_0 – średni promień,

A_n, B_n – współczynniki szeregu Fouriera, obliczone z równań [3].

Współczynniki

$$P_1 = P_{1-10} = \left(\frac{\sum_{j=1}^{10} P_j}{2} \right)^{1/2}, \quad P_2 = P_{11-20} = \left(\frac{\sum_{j=11}^{20} P_j}{2} \right)^{1/2}, \quad P_3 = P_{21-30} = \left(\frac{\sum_{j=21}^{30} P_j}{2} \right)^{1/2}, \quad P_4 = P_{1-30} = \left(\frac{\sum_{j=1}^{30} P_j}{2} \right)^{1/2},$$
(4)

gdzie: $P_j = \frac{1}{k_i} \left(\frac{A_j^2 + B_j^2}{2} \right)$, daje możliwość obliczenia różnicy między formą i

szorstkością powierzchni inaczej jak to się robi w stereologii z wykorzystaniem współczynnika formy $K = (\Delta S/P)$, gdzie S – powierzchnia odrzutowania cząstek.

Aby otrzymać ilościowe charakterystyki dla form subjednostek (pory, cząstki i inne) jest możliwe (oprócz szeregu Fouriera) wykorzystywać inne dodaje funkcji ortogonalnych, tak jak wielomiany Lezandra, Wolch itp. My wykorzystaliśmy wielomian Fouriera bo analiza w takim przypadku jest pogładowa.

Oprogramowanie Stimana pozwala otrzymać natępujące charakterystyki (tabela 1):

- ogólna powierzchnia elementów strukturalnych,
- ogólny obwód elementów strukturalnych,
- średnia powierzchnia, obwód, średnica względna, powierzchnia elementów strukturalnych.

Tabela 1

Wzór	Ilość poz. N	Charakterystyczna średnica, mkm			Powierzchnia poz. μm^2		Obwód μm		Parzystość	Współcz. Filtracji ml	K_f
		D_{\min}	D_{min}	D_{\max}	S_v	S_s	P_v	P_s			
1	18017	1,18	57,80	0,54	5,759	103765	1,145	200811	35,80	0,151	0,559
2	43174	0,29	63,14	0,14	0,728	31428	3,039	131189	39,68	0,111	0,520
3	96739	0,28	54,83	0,13	0,331	32031	2,267	219380	42,93	0,069	0,529

Oprócz tego istnieje możliwość budowania histogramów podziału elementów strukturalnych REM-obrazów według parametrów: powierzchnia ogólna (sumaryczna) powierzchnia, obwód, średnica ekwiwalentna, współczynnik formy.

Zmodyfikowany wariant oprogramowania Stimana'a pozwala wyliczyć dodatkowy parametr charakteryzujący kształt cząstek:

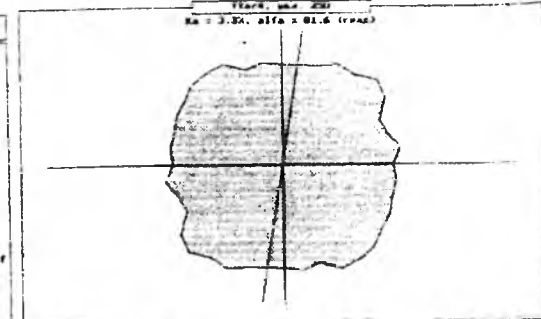
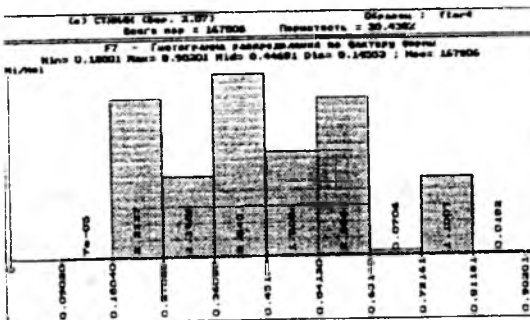
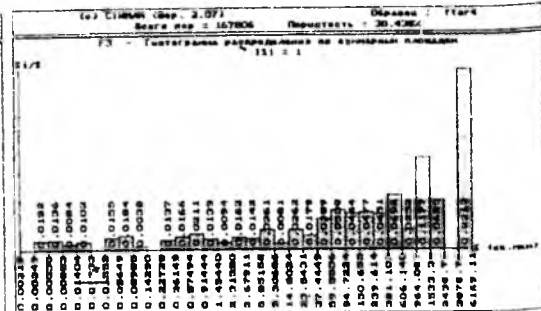
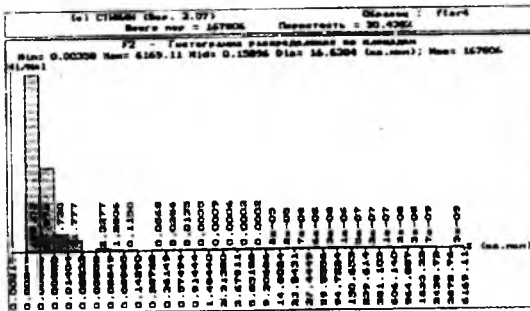
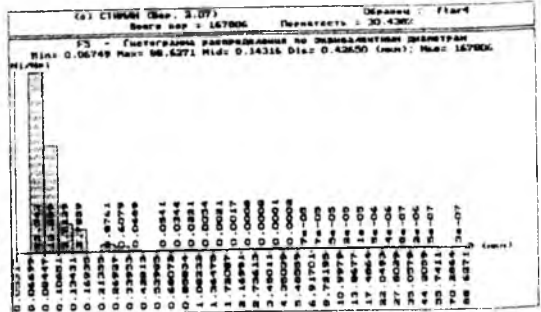
1. współczynnik formy okrągłej – stosunek obwodu pola równego powierzchni badanej figury, do obwodu tej figury: $F_x = 2\sqrt{\pi S} / P$,
gdzie: S – powierzchnia cząstki,
P – parametr.
2. Wskaźnik zwartości – stosunek powierzchni pory do powierzchni koła na niej opisanego: $F_c = \frac{4S}{\pi P^2}$; większej wielkości tego wskaźnika odpowiada większa zwartość cząsteczki,
3. czynnik ścieśnienia – stosunek wymiaru maksymalnego promienia do promienia ortogonalnego: $F_l = D_{\text{ort}}/D_{\text{max}}$, co charakteryzuje wydłużenie kształtu.

Итоговая таблица результатов структурного анализа

Мини образца - F1a4
Увеличения (М) и размер звена разбиения (L)

М	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	32000
L (мкм)	1.38	0.69	0.34	0.17	0.09	0.04	0.02	0.01

Количество пор 167904
Пористость (X) 30.44
Площадь пор (кв.мкм) 26674.8
Средний периметр пор (мкм) 17334.4
Ср. диаметр (мкм) / Ср. кв. отклонение 0.143157 / 0.1819
Ср. площадь (кв.мкм) / Ср. кв. отклонение 0.138942 / 276.37
Ср. периметр (мкм) / Ср. кв. отклонение 1.03312 / 34.401
Удельная поверхность (1/мкм) 1.39918
Фильтранный коэффициент (кВ) 0.140254



Rys. 2. Wyniki opracowania obrazów REM próbki gleby przedstawionej na rys. 1.

2. **Анализ стереометрический.** Для характеристики стереометрической микроструктуры почвы (морфологии почвы, размеров ее элементов, стабильности связей между ними и инне) треба przeprowadzić анализе поверхности микрорельефа выкопок собранных пробек, бо микрорельефа zależy od размеров, формы и стабильности микрочастиц и их розкладу w płaszczyźnie i wzdłuż osi wysokości.

Rozpatrzmy dokładniej główne aspekty stereometrii REM. Każdy stereogram REM ma lewy i prawy obraz. Punktowi x lewego obrazu odpowiada element правого obrazu $x = str(x)$. Ponieważ lewy i prawy obraz otrzymuje się przy obserwowaniu powierzchni pod różnymi kątami to adresy elementu x i jego obrazu str(x) w ogólnym wypadku nie łączą się. Oprócz tego, nie dla każdego x istnieje obraz (tzw. efekt „martwej przestrzeni”, który często występuje w fotogrametrii naziemnej).

Odnosi się to do prawego obrazu \bar{x} jak i jego odpowiednika $x = str^{-1}(\bar{x})$. Z lewym obrazem wiążemy prawoskrętny układ współrzędnych prostokątnych $r(cKr)$ $OX_1X_2X_3$, z początkiem 0 w punkcie styku 4-ch centralnych pikseli, kierunek osi OX_1 i OX_2 jest taki sam jak kierunek wzrastania odpowiednio dla osi i, j . Niech d będzie wymiarem boku piksela; wtedy centrum piksela z dwuwymiarowym adresem (i, j) otrzyma współrzędne:

$$\begin{aligned} x_1 &= \left(i - \frac{M-1}{2} \right) \cdot d, \\ x_2 &= \left(j - \frac{N-1}{2} \right) \cdot d. \end{aligned} \tag{5}$$

Prawy obraz otrzymujemy po skróceniu badanej próbki na stoliku mikroskopu. To skrócenie można zrealizować dwoma sposobami: pierwsze działanie (nieobowiązkowe) to obrót dookoła osi pionowej (w idealnym przypadku jest ona osią CKr) i drugie działanie (obowiązkowe) – obrót dookoła osi OX_1 . Układ współrzędnych, do którego zostanie przetworzone CKr, po tych dwóch skróceniach oznaczmy jako $s(CKs)$. Macierz tego przetwarzania współrzędnych (od CKs do CKr) oznaczmy C_r^s . Niech $\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$.

Jeżeliby stolik mikroskopu działał idealnie, to punkt badanego wzoru z wektorem X w układzie CKr pokrył by się w taki sam punkt w układzie z wektorem $C_r^s X$. Widoczne składowe przemieszczenia X_1 i X_2 byłyby opisane wektorem $Z = \varphi C_r^s X - \varphi X = \varphi(C_r^s - E)X$. W rzeczywistości stolik ma dodatkowe przesunięcie ΔX , i oprócz tego rzeczywista orientacja trzeciej osi układu tego stolika, nie pokrywa się z orientacją osi REM (trzecia oś CKr).

Wprowadzimy układ $V(CKr)$ dla stolika. Uważamy, że przejście od CKr do CKv otrzymamy jako rezultat dwóch małych skręceń o kąty ε i ξ dookoła pierwszej i drugiej osi, wtedy macierz przetwarzania współrzędnych C_r^v ma postać:

$$C_r^v = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon & \sin \varepsilon \\ 0 & -\sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \xi & 0 & -\sin \xi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \xi & 0 & \cos \xi \end{pmatrix} \tag{6}$$

Macierz przetwarzania współrzędnych C_r^v ma postać:

$$C_r^v = \begin{pmatrix} \cos \omega & \sin \omega & 0 \\ -\sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \tag{7}$$

Widoczne składowe przesunięcia x_1 i x_2 z uwzględnieniem ΔX i różnicy w orientacji CKr i CKv opisuje wektor

$$Z = \varphi C_r^v [(C_r^v - E)C_r^s X + \Delta X].$$

Wielkość ΔX może być o tyle duża, że punkt obserwacji powierzchni wyjdzie z pola próbki REM. Aby to nie wystąpiło, jednocześnie z obrotem stolika za pomocą goniometrycz-

nego urządzenia pole próbki REM przesuwa się tak, żeby odrzutowanie centralnego punktu powierzchni po nachyleniu zostało w centrum. Oznacza to, że od równania poprzedniego odejmuje się wektor kompensujący:

$$Z_{komp} = \phi C_v^y [(C_v^s - E) C_v^r X_0 + \Delta X] + \Delta Z \quad (8)$$

gdzie X_0 – wektor współrzędnych (w CKr) punktu, który obserwator przyjął za centralny (pierwsze dwie składowe wektora X_0 są małe, faktycznie są to błędy operatora przy obieraniu początku współrzędnych; trzecia składowa X_0 to znana apriori wysokość powierzchni w pobliżu początku układu współrzędnych),

ΔZ – błąd kompensacji, popełniony przez operatora przy obserwacji punktu centralnego. W wyniku uzyskujemy:

$$Z = \phi C_v^y (C_v^s - E) C_v^r (X - X_0) + \Delta Z. \quad (9)$$

Dopuszczamy, że dla elementu X lewego obrazu z dwuwymiarowym adresem (i, j) mamy obraz $\bar{x} = str(x)$ z adresem (i', j') . Wtedy porównujemy składowe Z :

$$\begin{cases} Z_1 = (i' - i) \cdot d \\ Z_2 = (j' - j) \cdot d \end{cases} \quad (10)$$

Uzyskujemy równania w częściach piksela postaci:

$$\begin{bmatrix} i' - i \\ j' - j \end{bmatrix} = \phi C_v^y (C_v^s - E) C_v^r \begin{pmatrix} i - (M - 1)/2 - \Delta i \\ j - (N - 1)/2 - \Delta j \\ l \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta i' \\ \Delta j' \end{bmatrix}, \quad (11)$$

gdzie: $\Delta i, \Delta j$ – przesunięcie w stosunku do środka obrazu piksela, na który nastawił operator przy kompensowaniu,

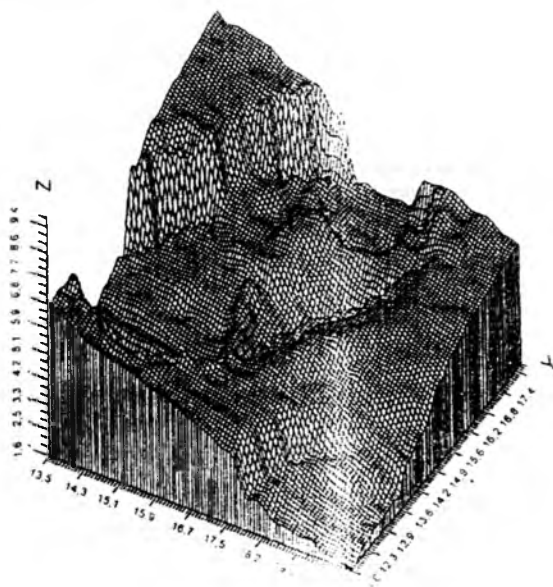
$\Delta i', \Delta j'$ – przesunięcie wprowadzone przez operatora przy kompensowaniu,

l – względna wysokość badanej powierzchni w pikselach.

Zakładając, że $\varepsilon = \xi = \omega = 0$, $\Delta i = \Delta j = \Delta i' = \Delta j' = 0$ otrzymamy $i' - i = 0$;

$j' - j = [j - (N - 1)/2](\cos \alpha - 1) + l \cdot \sin \alpha$, stąd

$$l = \frac{j' - j + (1 - \cos \alpha)[j - (N - 1)/2]}{\sin \alpha} \quad (12)$$



Rys. 3. Widok izometryczny – diagram numerycznego modelu mikrorzeźby

3. Analiza spektralna. Wykorzystując parametry mikrogeometrii powierzchni próbki możemy ocenić rozmiary mikrocząstek, charakter wzajemnego ich połączenia, oraz roli w organizacji struktury przestrzennej i stabilność elementów struktury. Taką ilościową ocenę możemy przeprowadzić za pomocą stereopomiarów REM. Opracowano metodę morfospektralnej analizy numerycznego modelu mikrorzeźby powierzchni (NMP), która bazuje na wykorzystaniu stereoskopowych obrazów mikro obiektów na REM, analizy spektralnej i entropijnej (rys. 4).

Ilościowa ocena przewiduje budowę profili mikro powierzchni a następnie badanie jej struktury. Opracowanie stereopomiarów bazuje na metodach analizy spektralnej stacjonarnych losowych procesów. Badania pokazują, że zmiana wysokości w profilach nosi charakter niestacjonarny. Przyczyna jest w tym, że struktura gleby to skomplikowany, wielopoziomowy system. W takiej strukturze jednocześnie mamy proste ułamki cząstek różnego rodzaju i rozmiarów. Dla opisu takiego systemu trzeba zbadać duże i bardzo małe elementy wykonując obserwacje przy różnych powiększeniach np. 50, 100, 250 i 500 razy, co daje możliwość oceny elementów mikro rzeźby w przedziale 10 - 400µm. Duże elementy wydzielone są metodą nisko częstotliwościowej filtracji Batterourt'a:

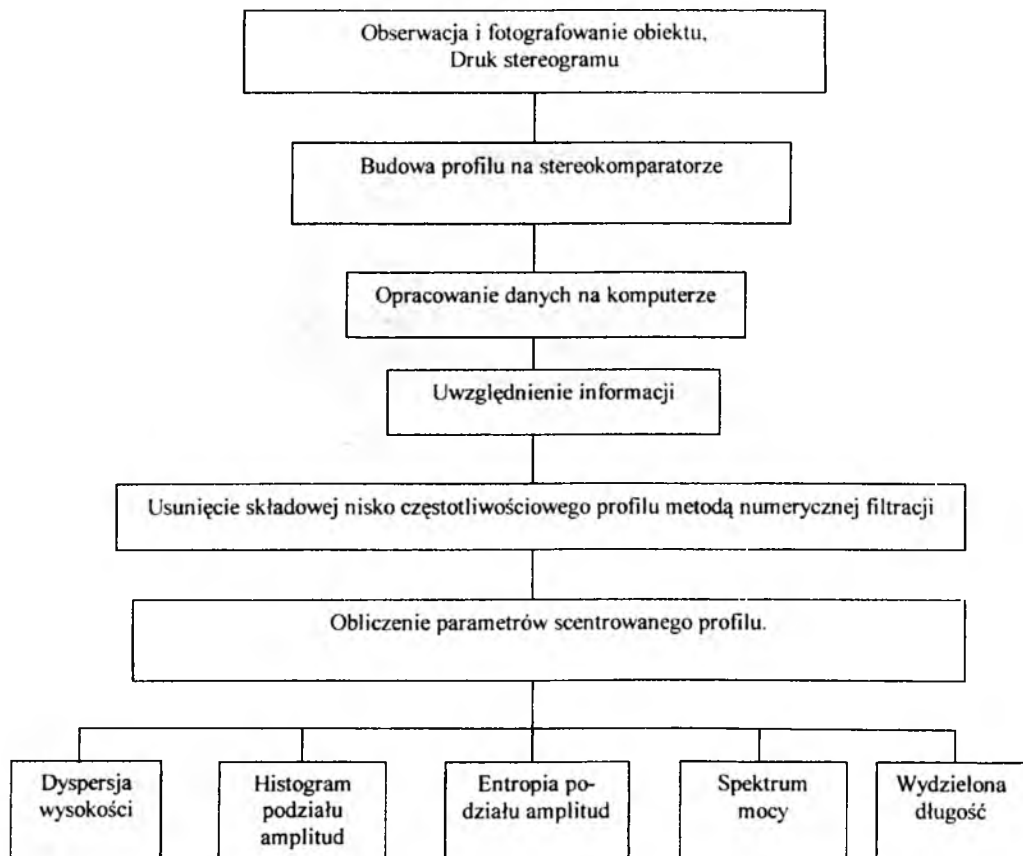
$$y_i^{(p)} = b_0 y^{(p-1)}(i) - a_{1p} y^{(p)}(i-1) - a_{2p} \cdot y^{(p)}(i-2),$$

gdzie: a_{1p} , a_{2p} , b_0 - wagi filtru,

i – numer elementu profilu NMP,

$y^{(0)}(i)$ - początkowe znaczenie elementów profilu, ($p=0$);

$y^{(p)}(i)$ – odfiltrowane znaczki elementów profilu ($p>0$).



Rys. 4. Schemat analizy morfometrycznej mikrorzeźby powierzchni

Współczynniki wagowe dla filtru obliczamy w sposób podany w pracy [4]. Częstotliwość fal odfiltrowanego profilu nie przekracza wcześniej wybranej częstotliwości przesiewania. Po tym procesie możemy dostać profil z charakterystyką stacjonarnego scentrowanego przypadkowego procesu. Analiza histogramu, a zwłaszcza przedział amplitud wskazuje, że proces jest gaussowskim albo przybliżonym do niego.

Zaleca się, aby badania struktury otrzymanego profilu prowadzić analizą częstotliwościową, ponieważ statystyczne właściwości i charakterystyki rozkładu Gaussowskiego o zerowej średniej najlepiej opisują się spektrum mocy takiego procesu.

Obliczenie takiej charakterystyki wykonuje się algorytmem Blakman-Tuiki. Otrzymane spektrum opisuje rozkład średniokwadratowej mocy procesu, jako funkcji częstotliwości, podając w ten sposób wpływ elementów rzeźby powierzchni, a zwłaszcza rozkład wymiarów i jego mocy.

Częstotliwość w takim razie jednoznacznie łączy się z długością elementów profilu. Ze zintegrowania spektrum według częstotliwości możemy ocenić ogólną dyspersję wysokości rzeźby, pomierzonej w profilu również część dyspersji, która przypada na konkretne interwały częstotliwości (rozmiar elementów).

Proponowane rozwiązanie pozwala ilościowo opisać intensywność rzeźby powierzchni wzoru (dyspersja jego wysokości r_z^2) i wyjaśnić jakie elementy mają na nią wpływ. Wy-

korzystanie różnych powiększeń pozwala otrzymywać parametry grubej rzeźby (pierwszego rzędu) z rozmiarem elementów 40-400 μm , średniego (drugiego rzędu) – 20 – 200 μm i drobne (trzeciego rzędu) – 10 – 80 μm . Oprócz tego istnieje możliwość wyznaczenia właściwej długości profilu τ_i , którą oblicza się jako przedział długości profilu do jego rzutu. Ten parametr opisuje charakter rzeźby powierzchni. Może on przyjmować duże wartości nawet wtedy, kiedy dyspersja jest mała: tj. tworzy się on z obliczeń elementów średnich i małych rozmiarów i istotnie odzwierciedla charakter mikrostruktury.

Ważnym wskaźnikiem mikrostruktury jest entropia amplitud profilu. Opisuje ona stopień różnorodności (nie uporządkowania) rzeźby powierzchni wzorca. Entropię ocenia się ze znanych wzorów K.Szenon'a:

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \cdot \ln p_i \quad (13)$$

gdzie: p_i – wiarygodność pozostawania systemu w i-tym stanie.

N – ilość stanów systemu.

Minimalne znaczenie entropii odpowiada maksymalnie wygładzonej powierzchni wzorca, właściwego dla szczelnych i jednakowych struktur. Z wzoru (13) widzimy, że maksymalna entropia odpowiada sytuacji, kiedy wszystkie stany systemu są równowiarygodne i wynoszą $\ln N$.

Analiza wielkiej ilości próbek wskazuje na rozbiecie interwałów na 25 odcinków – stanów. Wtedy maksymalna entropia rzeźby wynosi $\ln 25 = 3,219$. Powierzchni z taką entropią pomiędzy wzorami nie spotyka się, ale teoretycznie jest to możliwe i opisuje powierzchnię graniczną podzieloną z wielkimi i głębokimi zmianami wysokości. Bliska do granicznej wielkości entropia jest właściwa dla struktur słabych, z niską mocą wzorów zwartości, takie struktury łatwo mieszczą się przy jakimkolwiek poziomie organizacji. Dla porównania różnorodności rzeźby różnych powierzchni wykorzystuje się miarę względnej organizacji:

$$O = 1 - \frac{H}{H_{\max}} \quad (14)$$

gdzie: H – entropia systemu,

H_{\max} - maksymalna entropia.

Jak tylko rośnie stopień organizacji systemu jej entropia zmniejsza się co łączy się ze wzrostem wewnętrznej energii nadchodzącej z zewnątrz. Z tego wynika, że entropia i miara organizacji systemu są ważnymi charakterystykami stanu gleby i jego zależności od czynników zewnętrznych.

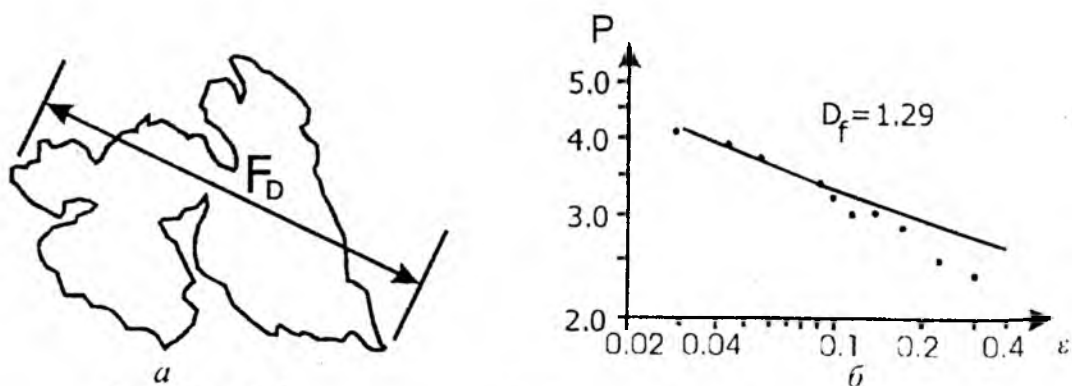
Oprogramowanie opracowane dla analizy morfologicznej NMP nosi nazwę Pamir.

4. Analiza fraktalna jakościowo wyznacza chaotyczność i wiarygodność, pozwala scharakteryzować przestrzenne cechy mikrostruktury gleby, wykorzystując zasady samopodobieństwa i w tej liczbie wyznaczenie cech struktur planimetrycznych i przestrzennych z rysami nie uporządkowania.

Dlatego opracowaliśmy metodę oceny przestrzennego uporządkowania mikrostruktury gleby na podstawie geometrii fraktalnej. Klasyfikację form (cząstek, por) zaproponowano zrealizować na podstawie ich rozmiarów fraktalnych.

Rozmiar fraktalny obliczamy przez pokrycie konturów badanych cząstek (por) odcinkami pewnej długości (ϵ) i licząc ich ilość. Jest to proces iteracyjny i przewiduje zmianę długo-

ści ϵ . Korzystając ze znanej z geometrii fraktalnej proporcjonalności $N \sim f(\epsilon)$ obliczamy (rys. 5a,b) fraktalny rozmiar ($D_f=1,29$).



Rys. 5a,b. Fraktalny rozmiar jako funkcja parametru P:

A – kontur cząstki, b – wykres wyznaczenia

Dla analizy powierzchni fraktalnych przestrzennych opracowaliśmy algorytm nazwany komórkowym. Idea jego polega na: prowadzeniu krok po kroku pokrycia powierzchni pewną ilością sześcianów ($N(\epsilon)$), dla których długość krawędzi równa się 8ϵ , 4ϵ , 2ϵ , ϵ , $\epsilon/2$. Obliczamy ilość takich sześcianów i wyznaczamy rozmiar fraktalny jako $N(\epsilon) = K\epsilon^{-D_f}$, gdzie: D_f – rozmiar fraktalny,
 K – stała

Dla wszystkich krawędzi sześcianów w skali podwójnie logarytmicznej odkładamy punkty: na jednej osi $\ln N(\epsilon)$, na drugiej - $\ln \epsilon$. Przez punkty prowadzi się prosta najlepszego przybliżenia metodą najmniejszych kwadratów. Wielkość kątownego współczynnika tej prostej jest fraktalnym wymiarem powierzchni.

Praktyczne zastosowanie opracowanych metod wykazało, że wzajemnie się dopełniają, mają wysoką efektywność, i dają integralną ocenę gleby.

Recenzowała: doc. dr. inż Krystyna Bursztynska

Spis literatury:

1. Turcina T.W., Skwarcowa E.B., Kullinckaja E.B., Graczewa M.P. Ocnowy mikro-morfometpiceskowo analiza poristosti por. Poczzwowiedienie – 1985. Nr 4. S.60-69.
2. Sergiejew Y.M., Osipov V.I. Sokolov V.N Quantitative morphological analysis of complex SEM-image. J.of Microscopy-1984, v.135, s.13-24
3. Eriich R., Weinberg B. An exact method for charakterization of grain chape. J.Sedim, Petrol-1970, v.40, s. 205-212.
4. Gouldstiejn Dż., Njubiern D., Eczlin P. i in. Rastrowaja elektronnaja mikroskopija i rientgienowskij mikroanaliz. M.: Mir-1984, Kn. 1. 303s.