



ЕНТРОПІЙНА КОНЦЕПЦІЯ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНІВ ЕРОЗІЇ ҐРУНТУ ЗА ДАНИМИ РЕМ-МІКРОСКОПІЇ

Рассмотрена методика определения уровней энтропии поверхностей сколов почвы по данным растровой электронной микроскопии (РЕМ-микроскопии) и авторская концепция определения противозерозионной устойчивости почв на основе энтропийных характеристик.

The method of determination of entropy levels of the soil fracture surfaces according to the data of scanning electronic microscopy (SEM-microscopy) and the author's concept of determination of soil erosion resistance on the basis of entropy properties are considered.

Постановка проблеми. Одержання достовірних кількісних характеристик за РЕМ-зображеннями можливе шляхом використання математично коректних алгоритмів, що адаптовані до особливостей досліджуваних мікрооб'єктів. Незважаючи на достатньо тривалий період досліджень у сфері РЕМ-мікроскопії, більшість систем аналізу РЕМ-зображень неповною мірою реалізують технічні можливості комплексів РЕМ-ЕОМ, а також не дозволяють розв'язувати складні прикладні задачі, пов'язані з вивченням мікроструктури [7]. Дана стаття є спробою розв'язання цих проблем.

Зв'язок теми з важливими науковими і практичними завданнями. Тема статті відповідає тематиці загальнодержавної концепції Національної програми охорони земель і тісно пов'язана з державною темою "Дослідження сучасного стану та розробка засобами ГІС-технологій і РЕМ-мікроскопії засад раціонального використання ерозійно-деградованих земель Волинської височини" (держреєстраційний номер 0111U002146), що виконувалась на кафедрі геодезії, землевпорядкування та кадастру Волинського національного університету імені Лесі Українки (2011-2012 рр.).

Метою статті є визначення ентропійної оцінки поверхонь сколів ґрунту за даними цифрового оброблення РЕМ-зображень. Основні завдання: розроблення алгоритму визначення ентропії цифрових мікромоделей рельєфу (ЦММР) за профільними січеннями та концепції взаємозв'язків ентропійних характеристик мікроструктури ґрунту з протієрозійною стійкістю.

Аналіз досліджень даної проблеми. Традиційні методи визначення основних характеристик та оцінювання параметрів мікробудови ґрунтів є трудомісткими, а в деяких випадках уже і непридатними. Сьогодні все актуальніше постає питання розроблення експрес-методів комплексного оцінювання кількісних параметрів мікробудови ґрунтів. Одним з таких методів є РЕМ-мікроскопія [6]. Використання даних, отриманих з РЕМ-зображень зразків невеликого розміру, дає змогу оперативно і достатньо достовірно визначати деякі структурні характеристики ґрунтів на мікрорівні [3]. Окремі результати дослідження цієї проблеми викладено в праці [10]. Виконані нами досліджен-

ня стосуються методики визначення коректних ентропійних характеристик поверхонь сколів зразків ґрунту за даними РЕМ-мікроскопії.

Виклад основного матеріалу. 1. Технологія ентропійного оцінювання зразків ґрунту за даними РЕМ-фотограмметрії. Поширена думка, що дедалі більше утверджується в ґрунтознавстві: всі процеси, які протікають у ґрунтах, є дисипативними. Дисипація зовнішньої енергії пов'язана з утворенням нових динамічних станів і синергізмом об'єктів усіх структурних рівнів, що в кінцевому підсумку проявляється у виникненні механічних ефектів і відтворенні ентропії [1, 5, 11].

В основі дисипативних процесів лежать процеси утворення ентропії і перерозподілу енергії, яка вноситься ззовні. Загалом стандартне визначення ентропії можна описати виразом [11]

$$H = H_0 + \pi L_{kk} + C_U \ln(T/T_0), \quad (1)$$

де H , T – відповідно ентропія і температура поточного стану тіла; H_0 , T_0 – ентропія і температура стандартного стану тіла; π – коефіцієнт термомеханічного розширення; C_U – теплоємність; L_{kk} – лінійний варіант тензора руйнування середовища.

Для випадку, коли внутрішня енергія тіла і зовнішній вплив постійні, ентропійно-енергетичні процеси описуються формулою [1, 11]

$$H = H_0 + \pi L_{kk} + C_U \ln \left\{ 1 + \left[\sigma_{kk} (L_{02} - L_{kk} / 3) + C \rho^0 \right] \right\} \times (1 - \exp(-t/\tau)) / C_U T_0. \quad (2)$$

Тут нульовим індексом помічені величини, що відповідають нульовому моменту часу: $t=0$, коли система напруг $\sigma = \sigma(0)$, в результаті чого виникає деформація $L = L(t)$. Тому при аналізі дисипативних структур важлива задача оцінювання ентропії або відносного ступеня впорядкованості на основі експериментальних даних, особливо, коли немає інформації про структуру досліджуваної системи. Для вирішення цієї задачі пропонується метод розрахунку ентропії, в основу якого покладено морфоспектральний аналіз поверхні руйнування, що поєднує використання методів РЕМ-стереоскопічного знімання мікрооб'єктів, цифрове оброблення РЕМ-зображень та спектральний аналіз ЦММР.

Традиційна інтерпретація РЕМ-зображень допускає одержання лише планіметричних характеристик мікроструктури, що пояснюється змістом



зображення. На підставі двох чи більше зображень, отриманих під різними кутами – стереозображень, можлива тривимірна реконструкція відображеної на них сцени з наступним одержанням просторових стереометричних характеристик.

Найпоширеніша методика одержання стереопар у РЕМ полягає у повторному зніманні однієї і тієї самої ділянки поверхні зразка, нахиленого під різними кутами (5-12°) відносно електронного зонда.

На основі стереовимірювань та отриманих в результаті цього стереопар одержують 3D-цифрову модель мікрорельєфу, з аналізу розподілу висот якої можна вивести ентропійну оцінку. Алгоритм, покладений в основу цього процесу, працює за ієрархічною схемою [5].

Ототожнення точок може здійснюватися різними способами (кореляційним, фазовим та ін.), однак найефективнішим виявився градієнтний ієрархічний метод Лукаса – Кенаде [4, 8].

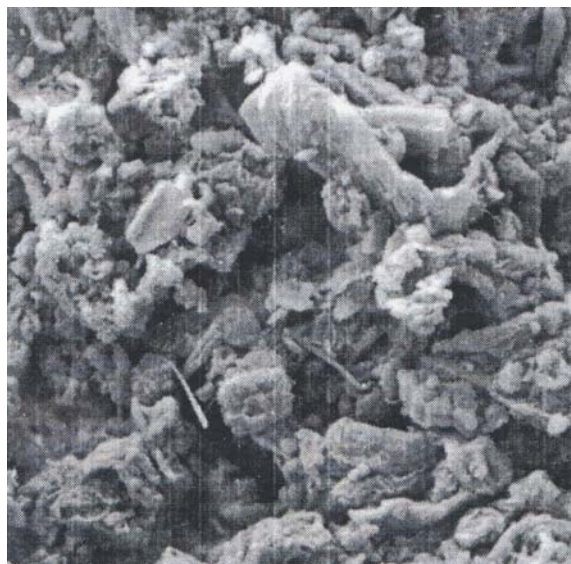
Застосування зазначеного алгоритму на практиці має певні складності. Це викликано особливостями отримання самих стереозображень (деякі ділянки мікрорельєфу, видимі на лівому (див. мал. 1, а)

стереозображенні, після навіть незначного нахилу можуть зміщуватися і ставати невидимими). Для того щоб знайти на стереозображенні помилково ототоженні пари точок, а також підвищити точність і надійність їх ототожнення, пропонується здійснювати пошук симетричним методом.

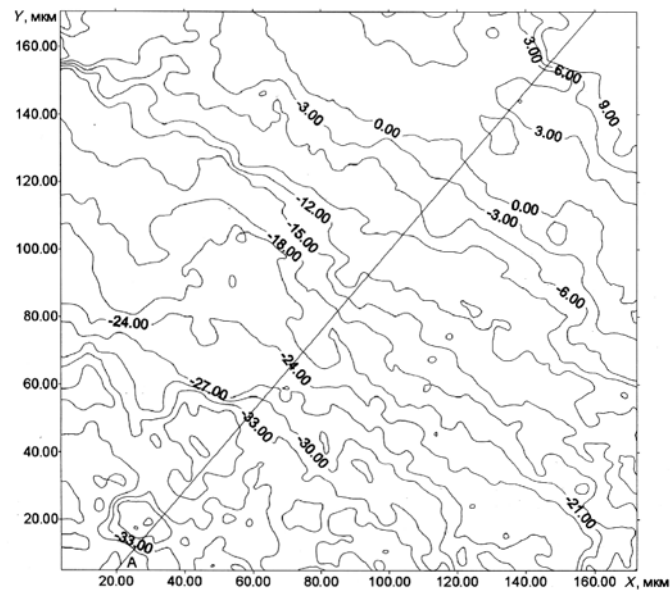
Знайдені пари точок перевіряють методом симетричного пошуку. Аналог точки на правому зображенні (мал. 1, б) використовується як образ, для якого здійснюється пошук аналога на лівому зображенні. Знайдений аналог повинен збігатися з вихідною точкою-образом лівого зображення. У протилежному випадку пара вважається неправильно ототожненою.

Результатом експериментального дослідження РЕМ-зображень ґрунту є побудова карти ізоліній та його профільної характеристики.

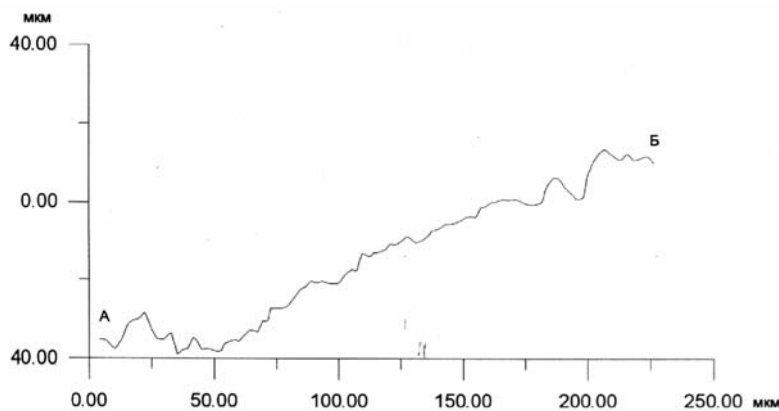
Для розрахунку ентропійної характеристики мікроструктури ЦММР пропонується аналізувати профільний розподіл відміток мікрорельєфу [2, 9]. При цьому ентропія характеризуватиме ступінь неоднорідності (невпорядкованості) рельєфу поверхні сколів ґрунту і може оцінюватися за відомою



а



б



в

Мал.1. Приклад стереометричного аналізу РЕМ-знімків ґрунту:
а – РЕМ-знімок ґрунту
(РЕМ "Хітачі" С-800, кут конвергенції 0-7°, збільшення 250 крат);
б – карта ізоліній;
в – профільна характеристика



формулою Шеннона: $H = -\sum_{i=1}^N p_i \ln p_i$, де p_i – імовірність перебування системи в i -му стані; N – число станів системи. Відносна ентропія обчислюється як $O = 1 - H/H_{\max}$ [2].

Це загальновідомі формули. Для випадку ентропійного аналізу мікрорельєфу за ЦММР їх необхідно конкретизувати.

За критерієм ієрархічної адитивності ентропію H підмножини характерних точок $\{u_0, u_1, \dots, u_n\}$ подамо у вигляді суми умовних ентропій [9, 14]:

$$H(u_0, u_1, \dots, u_n) = H(u_0) + H(u_1/u_0) + H(u_2/u_0, u_1) + \dots + H(u_n/u_0, u_1, \dots, u_{n-1}). \quad (3)$$

Прийmemo, що положення початкової точки відліку фіксоване і при додаткових умовах ентропія не зростає, тобто $H(u_j/u_0, u_1, \dots, u_{j-1}) \leq H(u_j/u_{j-1})$ з деяким запасом у бік збільшення ентропії, формулу (3) можна замінити виразом:

$$H(u_0, u_1, \dots, u_n) = H(u_1/u_0) + H(u_2/u_1) + \dots + H(u_n/u_{n-1}). \quad (4)$$

Положення характерної точки профілю u_i відносно попередньої u_{n-1} визначається відстанню цієї точки від початку профілю та перевищенням z_j . Тому можна прийняти:

$$H(u_j/u_{j-1}) = H(z_j), \quad (j=1, 2, \dots, n). \quad (5)$$

Згідно з (3) $H(z_j) = M\{-\log[f(z)\Delta z]\}$, де M – символ математичного сподівання; $f(z)$ – щільність розподілу ймовірностей випадкових величин; $z, \Delta z$ – крок квантування профілю за висотою.

Отже, ентропія профілів ЦММР визначається розподілом випадкових величин:

$$(z_1, z_2, \dots, z_n). \quad (6)$$

Для експериментального дослідження законів розподілу ймовірностей випадкових величин (6) було використано результати профільних стереовимірювань ЦММР. Всі досліджені профілі мали однаково кількість характерних точок: $n=208$ при $\Delta z=0,1$ мкм. Довжини окремих профілів коливаються в межах від 5,8 до 16,6 мкм, а їх загальна довжина становить 106 мкм. Дані, що характеризують розподіл перевищень між характерними точками, об'єднані по кожному профілю в 20 інтервалів, які відображено в табл. 1.

Як видно з цієї таблиці, виміряні перевищення у своїй сукупності мають ознаки обмеженості, компенсації та унімодальності, а також характеризуються властивістю рівномірності в тому розумінні, що додатні й від'ємні перевищення зустрічаються в середньому однаково часто.

Проаналізувавши отримані дані, побачимо, що сукупність перевищень має розподіл Лапласа зі щільністю ймовірностей [14]

$$f(z) = \frac{1}{2\beta} \exp\left(-\frac{|z-\xi|}{\beta}\right), \quad (7)$$

одержані методом максимальної правдоподібності [4].

Таблиця 1. Розподіл перевищень між характерними точками профілів ЦММР в інтервалі від z_{\min} до z_{\max}

Мінімальне перевищення z_{\min} , мкм	Профіль			
	1	2	3	4
	-8,2	-4,4	-10,0	-8,8
Кількість перевищень, які потрапляють у різні інтервали (довжину інтервалу виражено в частках $(R_{z_{\max}} - z_{\min})$ мікрометра)				
0-0,05	2	1	1	1
0,05-0,1	-	-	1	-
0,10-0,15	2	-	1	-
0,15-0,2	2	3	1	3
0,2-0,25	-	2	1	1
0,25-0,3	3	3	3	4
0,3-0,35	2	6	8	3
0,35-0,4	13	23	22	2
0,4-0,45	36	22	25	7
0,45-0,5	58	63	38	11
0,5-0,55	42	40	49	17
0,55-0,6	22	23	32	46
0,6-0,65	8	9	13	51
0,65-0,7	4	5	5	29
0,7-0,75	2	2	5	12
0,75-0,8	-	2	1	13
0,8-0,85	1	2	1	3
0,85-0,9	-	1	-	3
0,9-0,95	-	-	-	-
0,95-1,0	1	1	1	1
Максимальне перевищення z_{\max} , мкм	+8,3	+4,7	+10,0	+6,0
R , мкм	16,5	9,1	20,0	14,8
ξ , мкм	-0,38	0,03	-0,07	0,06
β , мкм	1,2	0,7	1,7	1,4

У такому разі ентропію перевищень z можна оцінювати як математичне сподівання функції $\{-\log[f(z)\Delta z]\}$. Приймаючи до уваги (7), можемо записати:

$$H(z) = m \left\{ -\log \left[\frac{1}{2\beta} \exp\left(-\frac{|z-\xi|}{\beta}\right) \Delta z \right] \right\} = \log 2\beta + \frac{\log e}{\beta} M(|z-\xi|) - \log \Delta z. \quad (8)$$

Для визначення параметрів ξ і β за експериментальними даними використаємо формули

$$\xi = \frac{\sum z_j}{n}; \quad \beta = \frac{\sum |z_j - \xi|}{n}. \quad (9)$$

Оскільки для розподілу Лапласа $M(|z-\xi|) = \beta, \sigma(z) = \beta\sqrt{2}$, то в результаті матимемо:

$$H(z) = \log \left(\frac{2\beta e}{\Delta z} \right) = \log \left[\frac{\sqrt{2}e\sigma(z)}{\Delta z} \right] \text{ біт}, \quad (10)$$

де $\sigma(z)$ – середнє квадратичне відхилення перевищень. За результатами проведених досліджень встановлено:

1) для профілів при $\Delta z=0,1$ мкм оцінка ентропії характерної точки змінюється в межах від 11,9 до 13,5 біт/точку;

2) основними факторами, що визначають інфор-



маційну ємність ЦММР, є інтервали квантування Δz ;

3) концепція ентропії у фрактографічному застосуванні має такі особливості: мінімальне значення ентропії відповідає добре згладженим поверхням сколів, а максимальне відповідає випадку рівномірності стану системи і дорівнює $\ln N$. Для ЦММР це однакова ймовірність знаходження відмітки будь-якої точки ЦММР у попередньо вибраному інтервалі перепаду висот.

2. Сутність ентропійної концепції протиерозійної стійкості ґрунту. Важливою характеристикою мікроструктури є ентропія (організованість) розподілу амплітуд профілю [10]. Мінімальне значення ентропії відповідає гранично згладженим поверхням сколів. Воно властиве щільним і однорідним ґрунтам, наприклад, важким глинам і суглинкам. З формули К. Е. Шеннона [12] для розрахунку ентропії випливає, що максимальне її значення відповідає випадку рівномірності станів системи, і воно дорівнює $\ln N$.

У нашому випадку це означає існування однакової ймовірності знаходження висоти будь-якої точки поверхні сколу в наперед вибраному інтервалі висот. При аналізі значної кількості зразків прийнято за доцільне ділити інтервал на 25 відрізків-станів. Через це максимальна ентропія рельєфу може становити: $\ln 25 = 3,219$ біт. Поверхні з такою ентропією в зразках ми не зустрічали, однак гіпотетично вони можуть характеризуватися граничною розчленованістю: частими і значними перепадами висот. Близька до граничної величини ентропія властива дуже рихлим, слабоущільненим ґрунтам з низькою і високою змінністю міцності контактних зв'язків, що спричинює рівномірне руйнування (при розколі зразка) структурних елементів практично будь-якого рівня організації. Для порівняння неоднорідності мікрорельєфів різного порядку використовується показник міри відносної організованості:

$$O = 1 - \frac{H}{H_{\max}}, \quad (11)$$

де H – ентропія системи; H_{\max} – максимальна ентропія системи.

Є інший підхід до визначення ентропії. Він базується на тому, що ґрунт – природна, гармонійна система, яка розвивається за фундаментальними термодинамічними законами. На думку проф. С. Ю. Булигіна [3], вміст неагрегованих елементарних ґрунтових часток (ЕГЧ) є відображенням його ентропії. Будь-який вид сільськогосподарського обробітку ґрунту спричинює збільшення неагрегованих ЕГЧ, адже тут має місце механічний вплив на ґрунтові агрегати. І чим сильніший цей вплив, тим більше в ході обробітку буде неагрегованих ЕГЧ. Причому їх кількість залежить як від виду обробітку (оранка звичайна, плоскорізна, чизельна, лущення і т. д.), так і від його якості, що в свою чергу залежить від рівня кваліфікації механізатора та інших об'єктивних і суб'єктивних факторів. При цьому досить мати абсолютне значення

неагрегованих ЕГЧ за варіантами вивчення. Порівнявши їх між собою, пріоритет надається тому варіанту, де вміст ЕГЧ найменший.

Однак знань тільки абсолютних значень неагрегованих ЕГЧ ($C_{\text{факт}}$) недостатньо. Для оцінювання допустимості технології чи окремої операції для конкретного ґрунту необхідно мати два нормативи: рівень мінімально можливого вмісту неагрегованих ЕГЧ ($C_{\text{мін}}$), обумовлений генезисом ґрунту, та рівень максимально допустимого вмісту таких часток ($C_{\text{макс}}$). Відзначимо, що для ґрунту цілком коректним буде застосування прийому теоретичного розрахунку. С. Ю. Булигін переконує, що відносна ентропія (фактична ентропія, віднесена до максимальної) гармонійної системи відповідає "золотому січченню" – 0,382. Це означає, що в гармонійній системі частка хаосу становить 0,382 від цілого, а частка упорядкованості – 0,618. Сказане передає формула $C_{\text{мін}} = 0,382 \cdot C_{\text{макс}}$. Тоді $C_{\text{макс}} = C_{\text{мін}} / 0,382$.

Таким чином, знаючи $C_{\text{мін}}$, можна визначити $C_{\text{макс}}$, що дозволяє судити про раціональність, екологічну безконфліктність розглянутої технології. Строго кажучи, $C_{\text{мін}}$ має встановлюватися за цілиним аналогом досліджуваного ґрунту. Але це приведе до надмірного завищення вимог, оскільки цілина – принципово інший ґрунт. Тому $C_{\text{мін}}$ рекомендується встановлювати на ґрунті досліджуваного різновиду, який не оброблявся 3-4 роки. Це, наприклад, може бути ґрунт під багаторічною травою. Ґрунт на той час вже "не пам'ятає", чим і як він оброблявся до посіву трави. Вміст неагрегованих ЕГЧ встановлюється за нашою методикою методом прямого мікроскопіювання на світловому мікроскопі у відбитому світлі при 98-кратному збільшенні.

З підвищенням організованості системи величина її ентропії зменшується. Це пов'язано з посиленням у системі енергії, що надходить іззовні. Таким чином, ентропія і ступінь організованості системи є важливими характеристиками залежності стану ґрунту від зовнішніх факторів.

Другим важливим моментом ентропійного дослідження ґрунту є можливість пояснити природу деформаційної стійкості ґрунтів і прогнозувати їх поведінку. Тому для нас цікавим є аналіз шляхів перетворення різних типів мікроструктур у ході деградаційно-ерозійних процесів, які відбуваються у ґрунтах. Такий аналіз цікавий ще й тим, що він дозволяє виявити два крайніх стани ґрунту – неущільненого і ущільненого.

3. Експериментальні дослідження. Для апробування розробленої методики було виконано експериментальні дослідження мікроструктурних змін зразків ґрунту, відібраних на двох ділянках. Було взято однорідні за гранулометричним і мінеральним складом зразки. У таблицях 2 і 3 наведено основні параметри структурно-гранулометричних показників ґрунту обох ділянок. Аналіз даних таблиць показує, що гранулометричний склад ґрунту незначно змінюється за профілем. З глибиною приблизно 8-10 % піщаної фракції замінюється піллуваю. Для поверхонь



сколу зразків характерна згладжуваність рельєфу 1-3-го порядків. Зменшилася і довжина профілів, що відображують ступінь розчленованості рельєфу.

структур, можна описати стан досліджуваних ґрунтів і спрогнозувати імовірні форми перебудови мікроструктур.

Таблиця 2. Основні структурно-гранулометричні показники поверхні зразків ґрунту ділянки № 1

Номер зразка	Гранулометричний склад фракції, мм			σ_1^2	O_1	\hat{L}_1	σ_2^2	O_2	\hat{L}_2	σ_3^2	O_3	\hat{L}_3
	>0,05	0,05-0,002	<0,002									
1	19,1	45,4	33,5	352	0,31	1,10	244	0,35	1,51	65	0,29	1,54
2	9,2	58,3	32,5	90	0,60	1,05	75	0,55	1,09	31	0,40	1,22
3	18,5	42,4	39,1	310	0,33	1,10	283	0,33	1,46	31	0,40	1,22

Таблиця 3. Основні структурно-гранулометричні показники зразків ґрунту ділянки № 2

Номер зразка	Гранулометричний склад фракції, мм			σ_1^2	O_1	\hat{L}_1	σ_2^2	O_2	\hat{L}_2
	0,05	0,05-0,002	0,002						
1	2,2	55,4	32,4	380	0,32	1,15	256	0,35	1,45
2	9,1	62,3	28,7	345	0,30	1,17	245	0,36	1,52
3	9,7	55,8	34,5	230	0,40	1,42	190	0,47	1,10

Структура дисперсії свідчить про розподіл інтенсивності рельєфу між елементами в 200-300 мкм і про значний вклад елементів з розмірами 40-60 і 100-150 мкм. Згладжений рельєф вказує на однорідність розподілу міцності структурних зв'язків за величиною, компактне упакування пилувагоглинистого матеріалу. Про це свідчить підвищення ступеня організованості структури ґрунту. З глибиною дисперсія рельєфу усіх порядків зменшується разом з довжиною профілю. Коливання значень цих параметрів пояснюються неоднорідністю ґрунту. Для нього характерна наявність крупних щільних мікроагрегатів. Вони мають невизначену форму і, зливаючись, утворюють цілі конгломерати розмірами 500-600 мкм. Описані зміни мікроструктур ґрунтів характерні для обох ділянок.

Проте, незважаючи на приблизно однакові зміни щільності скелету ґрунтів на обох ділянках, структурні параметри σ_1^2 та \hat{L}_1 вказують на наявність не дуже міцних агрегатів у ґрунтах ділянки № 2 і на більшу неоднорідність у розподілі їх значень. Зразкам ґрунту цієї ділянки притаманний також нижчий ступінь організованості мікроструктур.

Отож, можна стверджувати, що досить швидко і повно втрачають щільність ґрунти з рихлими мікроструктурами з вищими значеннями показників σ_i^2 і \hat{L}_i та нижчим ступенем їх організованості O_i . Для таких ґрунтів характерні перебудови мікроструктур майже на всіх рівнях організації. При цьому найінтенсивніші перетворення мікроструктур скелетного типу спостерігаються для другого порядку.

Таким чином, експериментальні дослідження підтверджують досить поширене в ґрунтознавстві положення: чим складніша організація мікроструктур ґрунтів, тим менше проявляються деформаційно-ерозійні процеси.

Проаналізувавши моделі перетворення мікро-

Висновки та перспективи подальших досліджень. 1. Класичний (енергетичний) підхід до руйнування суцільного середовища, що базується на застосуванні відомих критеріїв міцності типу критерію Мізеса, втрачає ефек-

тивність у випадку наявності матеріалів з яскраво вираженими реологічними властивостями. У цьому випадку перспективне використання теорії повзучості (релаксації деформацій) С. К. Годунова. Її переваги – коректно визначене поняття ентропії процесів повзучості. 2. Обравши метод спільного розгляду внутрішньої енергії та ентропії релаксуючого середовища, можна легко визначити критерій його руйнування.

Література

1. *Баланкин, А.С.* Синергетика деформируемого тела / А.С. Баланкин. – М.: Оборонгис, 1991. – 404 с.
2. *Бобро, Ю.Г.* Принципы фрактальности в механике разрушения / Ю.Г. Бобро, В.Н. Мельник, А.В. Шостак, В.У. Волошин // *Металлы*. – М.: Наука, 1997. – № 2. – С. 199-202.
3. *Булыгин, С.Ю.* Микроагрегированность как показатель противэрозионной стойкости почв / С.Ю. Булыгин, Ф. Н. Лисецкий // *Почвоведение*. – 1991. – № 12. – С. 98-103.
4. *Войсловский, Л.К.* Информационная модель рельефа, изображенного горизонталями / Л.К. Войсловский // *Геодезия, картография и аэрофотосъемка*. – 1983. – Вып. 37. – С. 122-130.
5. *Годунов, С.К.* Элементы механики сплошной среды / С.К. Годунов. – М.: Наука, 1978. – 304 с.
6. *Дмитриев, В.И.* Прикладная теория информации / В.И. Дмитриев. – М.: Высш. шк.– 320 с.
7. *Иванов, А.Ю.* Об оценке прочности и трещиностойкости глинистых слоев с учетом ползучести глин / А.Ю. Иванов // *Геоэкология*, 1998. – № 1. – С. 113-119.
8. *Колмогоров, А.Н.* Три подхода к определению понятия "количество информации" / А.Н. Колмогоров. – М.: Наука, 1965. – Т. 1.– № 1. – С. 118-127.
9. *Корн, Г.* Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970. – 720 с.



10. Мельник, В.М. Растрово-електронна стереомікрофрактографія: монографія / В.М. Мельник, А.В. Шостак. – Луцьк: Ред.-вид. від. ВНУ ім. Лесі Українки, 2009. – 468 с.

11. Мельник, В.М. Цифрова обробка РЕМ-зображень / В.М. Мельник, А.В. Шостак, О.В. Мельник: міжвуз. зб. "Наук. нотатки". – Луцьк, 2007. – С. 299-304.

12. Шеннон, К.Э. Работы по теории информации и кибернетике: пер. с англ. / К.Э. Шеннон. – М.: ИЛ,

1963. – 829 с.

13. Шостак, А.В. Оцінка дисперсних ґрунтів та їх основних реологічних властивостей / А.В. Шостак // Містобудування та територіальне планування. – К., 2011. – Вип. 40. – С. 201-212.

14. Эрдоган, Ф. Теория распространения трещин. – В кн.: Разрушение; под ред. Г. Либовица. – Т. 2. Математические основы теории разрушения. – М.: Мир, 1975. – С. 521-615.

Надійшла 04.09.14

* * *

УДК 631.165:528.88

М. П. Слободяник

ПРОГНОЗУВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДЗЗ ТА ВЕГЕТАЦІЙНИМИ ІНДЕКСАМИ

Осуществлен общий анализ методологических подходов к прогнозированию урожайности сельскохозяйственных культур. Приводится пример мониторинга изменений состояния сельскохозяйственных угодий с использованием материалов ДЗЗ и вегетационного индекса NDVI.

General study of methodological approaches to the forecasting of crop yield has been carried out. An monitoring example of changes of agricultural land condition using materials of remote sensing of the Earth and vegetation index NDVI is provided.

Актуальність теми дослідження. Багато країн світу здійснюють агрометеорологічний моніторинг з метою оцінювання майбутнього врожаю сільськогосподарських культур. Державні структури потребують надійних продовольчих прогнозів. Попереднє оцінювання обсягів майбутнього врожаю – важливий засіб формування цін на ринку, інструмент планування, зменшення масштабів спекуляції і коливань цін, а також чинник, який визначає рівень доступності продовольства для багатьох людей.

Втрати врожаю і зниження якості продукції, викликані впливом шкідливих організмів, досягають 30 % і більше. Тому велике значення має довгострокове та своєчасне прогнозування появи шкідників на рівні допустимих порогів для організації дієвого захисту від них доступними технологічними засобами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження, пов'язані з застосуванням методів ДЗЗ для розв'язання питань моніторингу стану сільськогосподарських угідь та прогнозування їх урожайності, проводяться у світі вже три десятиліття.

В Україні цією проблемою вчені зацікавились у 1980 році. За останні 10-15 років в установах НАН України, НААН та Мінагрополітики України велися розрізнені дослідження. Інститут агроєкології і природокористування НААН разом з ДП "Дніпрокосмос" Державного космічного агентства України (ДКАУ) розробив Концепцію науково-технічної

програми "Моніторинг агроресурсів і прогнозування їхнього стану з використанням даних ДЗЗ" (Агрокосмос) та низку науково-методичних і нормативних документів з обґрунтування, створення і функціонування мережі тестових аграрних полігонів, екологічного оцінювання агроландшафтів і систем землекористування. За підтримки Мінагрополітики та ДКАУ установи НАН України та фірма AG RapidEye (Німеччина) реалізували пілотний проект "Моніторинг аграрних ресурсів з використанням даних супутникової системи RapidEye" (AGRO-UA).

Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого виконує проект упровадження європейської системи прогнозування урожайності MARS/CGMS, розробленої в Об'єднаному дослідницькому центрі Європейської економічної комісії.

За останні роки до супутникового моніторингу аграрного потенціалу залучалось понад дванадцять українських установ та організацій. Але, незважаючи на значний обсяг проведених наукових досліджень, їх результати залишаються розпорошеними, точковими, мало пов'язаними між собою і не доведеними до технологічного системного застосування у виробничій діяльності АПК.

Значний вклад у розвиток напрямку аналізу даних ДЗЗ та можливостей використання результатів моніторингу сільгоспугідь і прогнозування їх урожайності внесли такі вчені та дослідники: В. І. Зацерковний, С. В. Кривоберець, В. В. Сергієнко,

© М. П. Слободяник, 2014