УДК 624.131 д.т.н., професор Мельник В.М., Мельник О.В.,
Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки,
Смола О. Ю., Луцький національний технічний університет

ЕНТРОПІЙНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОСТОРОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ ТА РЕЛАКСАЦІЙНОЇ ПОВЗУЧОСТІ ГЛИНИСТИХ ҐРУНТІВ

Розглянуто питання ентропійного дослідження мікроструктур глинистих ґрунтів. З метою апробації розробленої методики виконані експериментальні дослідження мікроструктурних змін зразків ґрунту, відібраних на двох ділянках. Підтверджено існуюче в ґрунтознавстві положення: чим складніша організація мікроструктур ґрунтів, тим з меншою повнотою проявляються деформаційно-ерозійні процеси. На основі проведених досліджень розроблено алгоритм оцінки релаксаційної повзучості глинистих ґрунтів.

Ключові слова: *ентропійна характеристика, елементарні ґрунтові частки, релаксація (повзучість), мікроструктура.*

Важливим показником мікроструктури є ентропія (організованість) розподілу амплітуд профілю [1]. Вона характеризує ступінь неоднорідності (невпорядкованості) рельєфу поверхні сколу. Ентропія оцінюється за відомою формулою К. Шеннона

$$H = -\sum_{i=1}^{N} p_i \cdot \ln p_i \text{ біт}$$

де p_i – ймовірність перебування системи в *i*-тому стані, N – число станів системи.

Мінімальне значення ентропії відповідає гранично згладженим поверхням сколів, властивим щільним і однорідним ґрунтам, наприклад, тяжким глинам і суглинкам. З формули для розрахунку ентропії видно, що максимальне її значення відповідає випадку рівноймовірності станів системи і дорівнює $\ln N$. В нашому випадку це відповідає однаковій ймовірності знаходження висоти любої точки поверхні сколу в раніше вибраному інтервалі висот. Виходячи з аналізу значної кількості зразків прийнято за доцільне ділити інтервал на 25 відрізків-станів. В силу цього, за визначенням, максимальна ентропія рельєфу може складати $\ln 25$ = 3,219 біт. Поверхня з такою ентропією в зразках не зустрічається, однак гіпотетично можуть характеризуватися граничною розчленованістю: частими і глибокими перепадами висот. Близька до граничної величини ентропія властива дуже рихлим, недоущільненим ґрунтам з низькою і сильно змінною міцністю контактних зв’язків , що обумовлює рівноймовірне

руйнування (при розколі зразка) структурних елементів практично будь-якого рівня організації. З метою порівняння неоднорідності (різноманітності) рельєфів різного порядку використовується міра відносної організованості:

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

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

Ґрунт – природна, гармонійна система, що розвивається відповідно до фундаментальних термодинамічних законів. На думку проф. С.Ю. Булигіна [2], вміст неагрегованих елементарних ґрунтових часток (ЕГЧ) є вираженням його ентропії. Будь-яка обробка ґрунту веде до збільшення неагрегованих ЕГЧ, тому що має місце механічний вплив на ґрунтові агрегати. І чим сильніший цей вплив, його потужність, тим більше після обробки буде неагрегованих ЕГЧ. Причому, їхня кількість залежить як від виду обробітку (оранка звичайна, плоскорізна, чизельна, лущення і т.д.), так і від якості виконання одного і того ж обробітку в залежності від рівня кваліфікації механізатора та інших об'єктивних і суб'єктивних факторів. При цьому досить мати абсолютне значення неагрегованих ЕГЧ по варіантах вивчення. Порівнявши їх між собою, віддається пріоритет тому варіанту, де вміст ЕГЧ найменший. Однак знання тільки абсолютного значення неагрегованих ЕГЧ ($C_{факт}$), недостатньо. Для оцінки допустимості технології чи окремої операції для конкретного ґрунту необхідно мати два нормативи: рівень мінімально можливого вмісту неагрегованих ЕГЧ ($C_{\min}$), обумовлений генезисом ґрунту; рівень максимально припустимого вмісту ($C_{\max}$). Відзначимо, що для ґрунту буде цілком коректним застосування теоретичного розрахунку (Ю.Булигін), який показує, що відносна ентропія (фактична ентропія, віднесена до максимальної) гармонійної системи відповідає “золотому січенню” – 0,382. Це значить, що в гармонійній системі частка хаосу складає 0,382 від цілого, а упорядкованості – 0,618.

Сказане виражається через формулу $C_{\min} = 0{,}382 \times C_{\max}$, тоді:

$$C_{\max} = \frac{C_{\min}}{0{,}382}. \quad (2)$$

Таким чином, знаючи $C_{\min}$ визначається $C_{\max}$, що дозволить судити про раціональність, екологічну безконфліктність розглянутої технології. Строго кажучи, $C_{\min}$ повинно встановлюватися по цілинному аналогу досліджуваного ґрунту, що приведе до зайвого завищення вимог, оскільки цілина — це принципово інший ґрунт. Тому $C_{\min}$ рекомендується [2] встановлювати на ґрунті досліджуваного різновиду, який не піддавався обробці 3-4 роки. Це, наприклад, може бути ґрунт під багаторічною травою (3-4 роки). Ґрунт до цього часу 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 і, зокрема, структурної зменшується. Це пов'язане з підвищенням у системи внутрішньої енергії, що поступає із зовнішнього середовища. Таким чином, ентропія і міра організованості системи є важливою характеристикою стану ґрунту і взаємовідношення його із зовнішніми факторами.

Другим важливим моментом ентропійного дослідження ґрунту є можливість пояснити природу деформаційно-міцністних властивостей ґрунтів і прогнозувати їх поведінку [3]. З цієї точки зору для нас цікавий аналіз шляхів перетворення різних типів мікроструктур в процесі деградаційно-ерозійних процесів ґрунтів. Такий аналіз цікавий ще й тим, що дозволяє виявити два крайніх стани ґрунту – максимально неущільненого і ущільненого.

З метою апробації розробленої методики нами були виконані експериментальні дослідження мікроструктурних змін зразків ґрунту, відібраних на двох ділянках (табл. 1-2).

Таблиця 1.

Основні структурно-гранулометричні показники зразків ґрунту ділянки №1

№ зразка	Гранулометричний склад: 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

Для дослідження структурних змін були відібрані найбільш однорідні за гранулометричним і мінеральним складом зразки. В табл. 1 наведені основні параметри структурно-гранулометричних показників ґрунту ділянки № 1. Їх аналіз показує, що гранулометричний склад ґрунту незначно змінюється за профілем. З глибиною, приблизно 8-10% піщаної фракції замінюється пилуватою. Для поверхонь сколу зразків характерна згладжуваність рельєфу 1, 2, 3 порядків. Зменшилася і питома довжина профілів, що відображають ступінь розчленованості рельєфу. Структура дисперсії свідчить про розподіл інтенсивності рельєфу між елементами 200-300 мкм і значному вкладі елементів з розмірами 40-60 і 100-150 мкм. Згладжений рельєф вказує на

однорідність розподілу міцності структурних зв'язків за величиною, компактне упакування пилувато-глинистого матеріалу. Про це свідчить підвищення ступеня організованості структури. З глибиною дисперсії рельєфів усіх порядків зменшуються разом з питомою довжиною профілю. Коливання значень цих параметрів пов'язані з неоднорідністю ґрунту. Для них характерна наявність крупних щільних мікроагрегатів. Вони мають невизначену форму і, зливаючись, утворюють цілі конгломерати з розмірами 500-600 мкм.

Описані вище зміни мікроструктур ґрунтів характерні і для опорної ділянки № 2 (табл. 2).

Проте не дивлячись на приблизно однакові зміни щільності скелету ґрунтів на ділянках 1 і 2, структурні параметри (σ_1^2 і $\hat{L}_1$) вказують на наявність менш міцних агрегатів у ґрунтах ділянки № 2 і більшу неоднорідність в розподілі їх значень. Зразкам ґрунту цієї ділянки притаманний також менший ступінь організованості мікроструктур.

Таблиця 2.

Основні структурно-гранулометричні показники зразків ґрунту ділянки №2

№ зразка	Гранулометричний склад: 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	12,2	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

Очевидно можна стверджувати, що досить швидко і повно втрачають недоущільнений стан ґрунти з найбільш рихло складеними мікроструктурами з більшими значеннями показників σ_i^2 і $\hat{L}_i$, низьким ступенем їх організованості O_i. Для таких ґрунтів характерні перебудови мікроструктур майже на всіх рівнях організації. При цьому найбільш інтенсивні перетворення мікроструктур скелетного типу спостерігаються для другого порядку.

З виконаних досліджень випливає також наступна методика. Вона полягає у співставленні структурного стану ґрунтів після їх випробування на протиерозійну стійкість, наприклад, дощуванням. При цьому необхідно строго дотримуватися умов подібності дисперсного і речовинного складів ґрунтів, а також відповідність напруженого стану і режиму вологості при випробуваннях на змив. Тоді аналіз полягатиме в оцінці по аналогії мікроструктурних

параметрів ґрунтів, випробуваних в лабораторних умовах і самоущільнених за природних умов. Менша ступінь організованості мікроструктур O_i і великі значення $\sigma_i^2, \hat{L}_i$, наприклад, після дощування ґрунтів у порівнянні із самоущільнюючими ґрунтами свідчить про значну "схильність" зразків ґрунту до ерозії (змиву). Для оцінки максимального значення ерозієзнавчого показника необхідно в розрахунковій формулі змиву ґрунту замінити коефіцієнт пористості ґрунту після "дощування" на коефіцієнт пористості самоущільненого ґрунту. Цей підхід може використовуватися як експертний при контролі результатів лабораторних ерозієзнавчих випробувань. Навпаки, якщо зменшилася питома довжина профілів, що відображають ступінь розчленованості рельєфу, структура дисперсії із розподілом інтенсивності рельєфу між елементами 200-300 мкм і значному вкладі елементів з розмірами 40-60 100-150 мкм, то це є свідченням згладженого рельєфу, що вказує на однорідність розподілу міцності структурних зв'язків за величиною, компактне упакування ґрунту. Іншими словами, це свідчить про підвищення ступеня організованості структури.

Програмне забезпечення стереометричної оцінки дисперсійно-ентропійних властивостей мікроструктури ґрунтів здійснено розробленим нами оригінальним пакетом "STEREOREM".

При оцінці напружено-деформованого стану глин важливим є визначення параметрів релаксації (повзучості) . Ця задача є досить важливою в будівельній механіці, гірській механіці, вулканології тощо. Для розв'язання цієї задачі нами пропонується такий ентропійний підхід. Як відомо, стандартне визначення ентропії твердого середовища має вигляд [4, 5]

$$S = S_0 + \pi L_{kk} + C_v \ln(T/T_0) \qquad (3)$$

Тут *S*, *T* - відповідно ентропія й температури поточного, S_0, T_0 - стандартного стану середовища, π - коефіцієнт термомеханічного розширення, C_v - теплоємність середовища при постійному об'ємі, L_{kk} - лінійний інваріант тензора деформації середовища.

В літературі звичайно не уточнюється форма тензора деформації. Далі ми будемо використовувати логарифмічний тензор або, що те ж, тензор у формі Генки [6,7], головні значення якого L_k рівні за визначенням логарифма головних видовжень:

$$L_k = \ln K_k = \ln(\Delta X_k / \Delta X_{0k}), k = 1,2,3 \ , \qquad (4)$$

де ΔX_k - поточне, ΔX_{0k} - початкове видовження середовища вздовж *к-й* головної осі деформацій. Вибір саме логарифмічного тензора деформацій важливий тому, що його лінійний інваріант

$$L_{kk} = L_1 + L_2 + L_3 = \ln(\Delta V / \Delta V_0). \qquad (5)$$

являє собою відношення поточного ΔV і початкового ΔV_0 елементарних

об'ємів. Завдяки цьому визначення ентропії (3) може бути записане у формі

$$S = S_0 + \pi \ln(\Delta V/\Delta V_0) + C_v \ln(T/T_0), \quad (6)$$

яка звичайно застосовується для газів і рідин.

У випадку чистої повзучості енергія середовища зберігається

$$\begin{aligned} dU/dt &= (\partial U / \partial L_1)(dL_1/dt) + (\partial U / \partial L_2)(dL_2/dt) + \\ &+ (\partial U / \partial L_3)(dL_3/dt) + (\partial U / \partial S)(dS/dt) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

При цьому:

$$\partial U/\partial L_k = \sigma_k, \partial U/\partial S = T, k = 1,2,3, \quad (8)$$

де σ_k - k – те головне значення тензора напруг, передбачуване незмінним у часі, $\sigma_k = const(t)$. Розв'язуючи (7) відносно похідної ентропії, одержуємо

$$dS/dt = -(\sigma_{kk}(dL_2/dt)) + C(dS_{13}/dt)/T. \quad (9)$$

У випадку, коли прикладена напруга $\sigma = \sigma(0)$ не перевищує межі крихкого руйнування, результат релаксації деформацій залежить від величини й знака виразу

$$A = \sigma_{kk}(L_{02} - L_{kk}/3) + C\rho_0. \quad (10)$$

Тоді при L_{kk} =0, $J_2 \neq 0$ руйнування є чисто зсувним. Тут J_2 - квадратичний інваріант девіатора деформації. При $L_{kk} \neq 0$, $J_2 \neq 0$ тип руйнування (простий або анти плоский зсув, відрив, роздавлювання при стисненні) визначається конкретною картиною деформації, тобто величиною параметра Лоде-Надаі.

Отримане в такий спосіб співвідношення являє собою не що інше, як ентропійний критерій релаксації (повзучості глин) знайдений прямим шляхом.

Висновки. Підтверджено існуюче в ґрунтознавстві положення: чим складніша організація мікроструктур ґрунтів, тим з меншою повнотою проявляються деформаційно-ерозійні процеси. На основі проведених досліджень розроблено алгоритм оцінки релаксаційної повзучості глинистих ґрунтів. З розробкою кількісних моделей перетворення мікроструктур з'явилася можливість описувати стан досліджуваних ґрунтів і оцінювати можливі шляхи перебудови мікроструктур.

Література

1. Шостак А.В. Ентропійна характеристика поверхонь руйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів, 2009. – №7. – С.18-21.

2. Булыгин С.Ю., Лисецкий Ф.Н. Микроагрегированость как показатель противоэрозионной стой кости почв // Почвоведение.- 1991.- №12.- С.98-103.

3. Мельник В.М., Волошин В.У., Тарасюк Ф.П., Бліндер Ю.С.

Кількісний РЕМ-аналіз морфометричних і геометричних характеристик мікроструктури грунту // Зб. наук. праць «Українське полісся: вчора, сьогодні, завтра».- Луцьк: Надстир'я.- 1998. С.46-49.

4. Рудзит Я.А., Кризберг Ю.Я. Методические вопросы определения микротопографических параметров шероховатых поверхностей // Зб. Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин. Рига.- 1983. –С.5-20.

5. Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства горных пород.- М.: Недра.- 1985.- 240с.

6. Вергунова І.М., Гайдук О.В., Душейко П.І. Дослідження деяких задач масо переносу 137Cs // Дев'ята міжнародна наукова конференція ім. акад. М. Кравчука.- Київ.- 2002.- С.40-41.

7. Поспеев В.Е., Овчинникова З.Г. Математические модели распределения и перемещения пиклорама в почве // Почвоведение.- 1992.- №9.- с.145-151.

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы энтропийного исследования микроструктур глинистых грунтов. С целью апробации разработанной методики выполнены экспериментальные исследования микроструктурных изменений образцов грунта, отобранных на двух участках. Подтверждено существующее в почвоведении положение: чем сложнее организация микроструктур почв, тем с меньшей полнотой проявляются деформационно-эрозионные процессы. На основании проведенных исследований разработан алгоритм оценки релаксационной ползучести глинистых грунтов.

Ключевые слова: энтропическая характеристика, элементарные почвенные частицы, релаксация (ползучесть), микроструктура.

Annotation

The paper considers the question entropic research microstructures clay soils. For the purpose of testing the developed technique performed experimental studies of microstructural changes of soil samples, selected at two sites. Confirmed the existing position in soil science: the more complex organization of microstructures soils, those with less complete manifest deformation-erosion. The algorithm of evaluation relaxation creep clay soils based on the investigations is developed.

Keywords: entropy characteristic, elementary soil particles, relaxation (creep), microstructure.