

УДК 631.431: 631.435

Смільський В.В.
к.т.н., доцент*кафедра машинознавства і транспорту
Факультет інженерно-педагогічний
Тернопільський національний педагогічний університет
імені Володимира Гнатюка
Тернопіль, Україна
E-mail: fractalped@gmail.com*

ЕНТРОПІЙНО–ІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ АГРОГРУНТІВ

Гранулометричний склад агрогрунтів, разом зі щільністю, вологістю та вмістом органічної речовини, визначає умови роботи землеробських знарядь та розвитку рослин. При всій важливості гранулометричного складу емпірична функція розподілу його фракцій на сьогодні ще не має аналітичного опису, тому до цих пір його оцінюють ваговим вмістом фізичної глини. Показники фізичних властивостей агрогрунтів залежать не стільки від вмісту фізичної глини, скільки від співвідношення гранулометричних фракцій, що визначають особливості структури на більш високому агрегатному рівні організації. У статті демонструється можливість застосування інформаційної ентропії для аналізу гранулометричного складу аграрних ґрунтів, як одного з можливих підходів до вирішення проблеми їх структурної ідентифікації, що не піддається адекватному математичному опису відомими методами. Пропоновані міри дозволяють оцінити гранулометричний склад невеликим числом параметрів незалежно від виду імовірнісного розподілу.

Ключові слова: *гранулометричний склад, інформація, агроґрунт, ентропія, ідентифікація.*

Вступ. Технологічною основою аграрного виробництва є механізація обробітку агрогрунтів, а їх фізико-механічні властивості являються науковою основою для конструювання та експлуатації землеробських знарядь. Їх робочі органи повинні проектуватися відповідно до фізичних властивостей агрогрунту в кожному технологічному процесі [1,2,3]. Зараз для виявлення закономірностей деформації агрогрунтів використовують методи досліджень запозичені з будівельної механіки, незважаючи на те, що агрогрунти, як об'єкти фізико-механічних трансформацій в багатьох аспектах не схожі на ґрунти будівельні. Гранулометричний склад та високий вміст гумусу в агрогрунті вносять важливу специфіку в формування його фізико-механічних властивостей і, врешті решт, у біохімічну активність. Жодне з сучасних землеробських знарядь не може створити належний стан ґрунту за один прохід, а тому виникає необхідність використання декількох типів робочих органів. У комплексі властивостей агрогрунтів найбільш значущою та домінуючою характеристикою їх агрономічної цінності є гранулометричний склад, який разом зі щільністю складення, вологістю та вмістом органічної речовини, визначає умови для розвитку рослин. Від нього залежать практично всі властивості агрогрунту та режими його функціонування [2,3,4]. При всій важливості гранулометричного складу емпірична функція розподілу його фракцій на сьогодні не має аналітичного опису, тому до цих пір його оцінюють ваговим вмістом фізичної глини, у якій розміри часток різняться на 4 порядки – від колоїдних ($d_{min} = 0,000001$ мм) аж до середнього пилу ($d_{max} = 0,01$ мм) [1,3]. Визнаючи вирішальне значення гранулометричного складу у формуванні властивостей агрогрунтів,

їх агрономічного та екологічного функціонування, логічно припустити, що ключ до ефективної системи землеробства лежить в точній адаптації агротехнологічних операцій до гранулометричного складу ґрунту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В. Безрук одним з перших виявив, що ґрунтоутворний процес визначається найбільш активними колоїдальними частками агроґрунту ($d < 0,001$ мм) [2]. Отримані ним залежності вмісту гігроскопічної води $ГВ$ та максимальної гігроскопічності $МГ$ від розміру d часток з високою точністю описуються степеневими функціями:

$$ГВ = 0,007 \cdot d^{-0,67}, R^2 = 0,97, \text{ та } МГ = 0,003 \cdot d^{-0,86}, R^2 = 0,93.$$

Академік В. В. Медведєв вважає гранулометричний склад агроґрунтів відповідальним за цілий комплекс їх фізико-механічних властивостей, агрономічну цінність та ефективність господарювання в цілому [3]. Автор констатує, що основні прийоми обробітку агроґрунтів наразі проводяться без урахування цієї важливої характеристики.

З метою розмежування агроґрунтів за агрономічною цінністю відомий ґрунтознавець Н. А. Качинський поділив їх на 9 градацій за валовим вмістом глини. Переважаюча фракція надає ґрунту відповідну назву: піщаний, супіщаний, легкосуглинковий, легкоглинистий, середньоглинистий, тощо [1].

Доктор сільськогосподарських наук М. І. Полупан зі співавторами таку класифікацію вважає недосконалою, тому пропонує розширити її до 15 градацій [5]. Проте навіть потрібна назва (легко-важко-суглинкові) не вирішує проблему класифікації, і дає швидше якісну характеристику ґрунту, ніж кількісне співвідношення його фракцій. Окремі автори пропонують виражати гранулометричний склад нормальними, або log-нормальними імовірнісними функціями [3,7,8,9]. Наявні в літературі емпіричні розподіли спростовують уявлення про їх «нормальність» [3,5,6,8,13], тому проф. П. Н. Березин вважає їх непридатним для опису дрібнодисперсних ґрунтів [6,7].

Першим недоліком існуючих методів інтерпретації гранулометричного складу ґрунту є об'єднання в один розмірний діапазон часток різної якості, та унікальність розподілу їх розмірів всередині фракції. Другий недолік полягає в тому, що діючі методи аналізу не враховують емерджентні властивості системи, які є наслідком взаємодії елементів. Показники ґрунтово-фізичних властивостей залежать не стільки від вмісту фізичної глини, скільки від співвідношення гранулометричних фракцій, що визначають особливості структури на агрегатному рівні організації ґрунту. Отже потрібен такий кількісний показник гранулометричного складу агроґрунтів, який би точно відображав їх агротехнічну якість. Таким показником може стати інформаційна ентропія, яка дає узагальнену характеристику будь-якої системи [11,12].

Мета: підвищення точності ідентифікації гранулометричного складу агроґрунтів на базі інформаційної ентропії К. Шеннона.

Методологія. Інформаційна ентропія К. Шеннона як міра розсіювання досліджуваного параметра подібна до статистичного показника «дисперсія», але має ту перевагу, що не залежить від типу імовірнісного розподілу параметра, тому може бути мірою хаосу та мірою структурної організованості множини гранулометричних часток агроґрунтів [11]. Для гранулометричного складу агроґрунту вона визначається за формулою:

$$H = - \sum_{i=1}^k (p_i \cdot \log_2 p_i) \quad (1)$$

де H – ентропія гранулометричного складу;

i – номер фракції;

k – число фракцій;

p_i – відносний вміст фракції.

Максимальне значення ентропії H_{max} означає відсутність інформації про ґрунт у випадку, коли вміст його фракцій однаковий:

$$H_{max} = \log_2 k \quad (2)$$

Гармонійність системи можна оцінити співвідношенням хаосу та порядку:

$$F_{гaрм} = \frac{H}{H_{max} - H} \quad (3)$$

Чисельник даної функції H виражає міру хаотичності, а знаменник – міру впорядкованості структурної системи. Організованість, змінюючись від повного порядку ($H = 0$) до повного хаосу ($H_{max} = 2,585$), міняє функцію гармонійності від нуля до нескінченності, а поточне її значення може бути виражене співвідношенням:

$$R = \frac{H_{max} - H}{H_{max}} \quad (4)$$

За класифікацією С. Біра [12] система є стохастичною, якщо $R < 0,1$, детермінованою, якщо $R > 0,3$, та імовірісно-детермінованою, якщо $0,1 < R < 0,3$. Окрім безпосередніх оцінок ентропії, можуть бути використані похідні від неї показники. Наприклад, міра абсолютної організації системи:

$$O = H_{max} - H \quad (5)$$

Результати. Для реалізації поставленої мети в [13,14] запозичені результати гранулометричного аналізу середньо-суглинкових ґрунтів, у яких вміст глинистих фракцій складає 30–45%. За формулами (1)–(4) обчислені показники ентропійного аналізу та зведені у таблицю.

Таблиця 1

Результати гранулометричного аналізу середньо-суглинкових ґрунтів

№ п/п	Джерело	G _{гль} , %	Відносний вміст фракції розміром, мм						H	F _{гaрм}	R	O
			0,001	0,005	0,01	0,05	0,25	1,00				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	[15]	33,38	0,255	0,0304	0,048	0,449	0,102	0,016	1,818	2,37	0,297	0,767
2	[15]	31,37	0,222	0,0397	0,052	0,573	0,108	0,005	1,736	2,04	0,328	0,849
3	[15]	44,90	0,210	0,101	0,138	0,198	0,143	0,210	2,538	54,15	0,018	0,047
4	[15]	32,10	0,2404	0,0579	0,023	0,163	0,368	0,108	2,161	5,09	0,164	0,424
5	[15]	32,13	0,1984	0,0705	0,052	0,318	0,246	0,116	2,340	9,53	0,095	0,245
6	[15]	32,85	0,169	0,0517	0,108	0,464	0,123	0,085	2,187	5,49	0,154	0,398
7	[15]	33,31	0,2293	0,0507	0,053	0,569	0,080	0,018	1,790	2,25	0,308	0,795
8	[15]	34,80	0,130	0,095	0,123	0,359	0,239	0,037	2,277	7,40	0,119	0,308
9	[15]	36,50	0,1896	0,0837	0,092	0,308	0,215	0,022	2,191	5,56	0,152	0,394
10	[15]	35,78	0,2378	0,0509	0,069	0,5686	0,062	0,012	1,765	2,15	0,317	0,820
11	[15]	40,00	0,194	0,116	0,090	0,408	0,188	0,004	2,143	4,85	0,171	0,442
12	[15]	40,77	0,173	0,112	0,122	0,496	0,080	0,002	1,980	54,15	0,234	0,605
13	[15]	43,38	0,2529	0,0843	0,0966	0,214	0,210	0,143	2,478	23,17	0,041	0,107
14	[15]	44,80	0,241	0,174	0,033	0,292	0,158	0,102	2,371	11,11	0,083	0,214
15	[15]	44,35	0,212	0,1145	0,118	0,185	0,349	0,023	2,300	8,06	0,110	0,285

Продовження табл. 1

16	[15]	41,38	0,173	0,1506	0,090	0,428	0,132	0,026	2,210	5,89	0,145	0,375
17	[15]	41,71	0,186	0,1365	0,0943	0,409	0,1522	0,022	2,227	6,21	0,139	0,358
18	[15]	44,90	0,172	0,1475	0,130	0,444	0,096	0,012	2,145	4,88	0,170	0,440
19	[15]	42,30	0,252	0,0825	0,088	0,534	0,043	0,0006	1,792	2,26	0,307	0,793
20	[15]	44,90	0,223	0,181	0,045	0,507	0,036	0,0080	1,856	2,55	0,282	0,729
21	[15]	40,00	0,194	0,116	0,090	0,408	0,188	0,0036	2,143	4,85	0,171	0,442
22	[15]	42,17	0,249	0,100	0,073	0,529	0,047	0,0026	1,822	2,39	0,295	0,763
23	[16]	44,50	0,183	0,181	0,081	0,203	0,220	0,116	2,497	28,28	0,034	0,088
24	[16]	30,20	0,123	0,116	0,063	0,188	0,199	0,284	2,416	14,34	0,065	0,169
25	[16]	31,10	0,095	0,173	0,043	0,221	0,302	0,160	2,382	11,71	0,079	0,203
26	[16]	35,50	0,168	0,117	0,070	0,177	0,164	0,281	2,448	17,85	0,053	0,137
27	[16]	37,50	0,230	0,085	0,060	0,427	0,139	0,007	2,004	3,45	0,225	0,581
28	[16]	38,20	0,217	0,092	0,083	0,285	0,189	0,088	2,372	11,15	0,082	0,213
29	[16]	43,10	0,226	0,139	0,064	0,192	0,137	0,223	2,467	20,99	0,045	0,118
30	[16]	43,30	0,254	0,110	0,069	0,195	0,146	0,207	2,454	18,80	0,051	0,131

Дані таблиці свідчать, що різниця між значеннями інформаційної ентропії ґрунтів однієї функціональної групи сягає 29%, (від 1,736 до 2,448), а показник відносної організованості (гармонійності) R варіює ще більше – від 0,018 до 0,328, тобто відмінність сягає 18 разів. Така різниця значень показників гранулометричного складу надто велика, щоб відносити ці зразки до однієї групи. Цікаво, що зразки з практично однаковим вмістом глини мають різучі відмінності показника відносної організованості R . Наприклад, у зразків №№ 2,4,5 та №25 вміст глини лежить в межах 31,1%...32,13%, тобто практично однаковий, а показник $R = 0,328, 0,164, 0,095$ та $0,079$ відповідно. Аналогічний результат спостерігається у зразків №18 і №20 з однаковим вмістом глини 44,90%, у яких показник R – відповідно 0,170 та 0,282. Очевидно, що ці зразки теж некоректно відносити до однієї дисперсної групи. Важливим питанням є кореляція між вмістом глини G_{gl} та показниками ентропії H і R . Візуальний аналіз рисунка переконує, що такого зв'язку немає, а тому класифікація агроґрунтів за вмістом глини надто неточна.

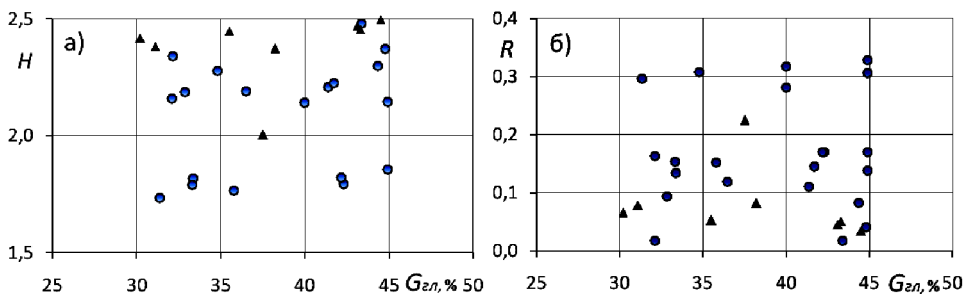


Рис. 1. Залежність між вмістом глини G_{gl} , ентропією H , і показником відносної організованості R

Висновки. 1. Методом інформаційно-ентропійного аналізу виявлено суттєву дезорганізацію гранулометричного складу ґрунтів однієї функціональної градації, а тому діючу класифікацію за вмістом глини можна вважати недостатньо точною та інформативною.

2. Ентропійні характеристики являються адекватними математичними аналогами гранулометричного складу агроґрунтів, що мають розподіли розмірних фракцій відмінні від нормальних. Вони можуть бути використані для класифікації ґрунтів, для проектування технологічних процесів обробітку ґрунту, та конструювання робочих органів землеробських знарядь.

Список використаних джерел

1. Качинский, Н. А. Структура почвы [Текст] / Н. А. Качинский. – М.: МГУ, 1963. – 100 с.
2. Безрук, В. Гранулометрический состав как показатель физико-механических свойств почв и грунтов [Текст] / В. Безрук // Почвоведение. – 1935. – № 2. – С. 202–217.
3. Медведев, В. В. Гранулометрический состав почв Украины (генетический, экологический и агрономический аспекты) [Текст] / В. В. Медведев, Т. М. Лактионова // Харьков : Апостроф, 2011. – 292 с.
4. Мигунова, Е. С. О целесообразности более подробной классификации песчаных почв по механическому составу [Текст] / Е. С. Мигунова // Агрохимия и почвоведение. – 1986. – Вып. 49. – С. 3–6.
5. Полупан, М. І. Роль гранулометричного складу в параметризації ґрунтоутворення та його місце в класифікації агроґрунтів / М. І. Полупан, В.Б. Соловей, В.А. Величко та ін. // Вісник аграрної науки. – 1999. – № 12. – С. 17–22.
6. Березин, П. Н. Особенности распределения гранулометрических элементов почв и почвообразующих пород [Текст] / П. Н. Березин // Почвоведение. – 1983. – №2. – С. 64–72.
7. Березин, П. Н. Применение вероятностных функций для описания гранулометрического состава почв и грунтов / П. Н. Березин, А. Д. Воронин // Вестник МГУ. Сер. Почвоведение. – 1981. – №3. – С. 30–36.
8. Шеин, Е. В. Гранулометрический состав почв: проблемы методов исследования, интерпретации результатов и классификаций [Текст] / Е. В. Шеин // Почвоведение. – 2009. – № 3. – С. 309–317.
9. Михеева, И. В. Статистическая характеристика «формулы» гранулометрического состава почв [Текст] / И. В. Михеева, Е. Д. Кузьмина // Почвоведение. – 2000. – № 7. – С. 818–828.
10. Градусов, Б. П. Использование статистических методов в анализе гранулометрического состава текстурно-дифференцированных почв для установления их генезиса / Б. П. Градусов, А. С. Фрид, О. Б. Градусова // Почвоведение. – 2002. – №7. – С.797–808.
11. Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетике [Текст] / Шеннон К. — М. : Изд. иностр. литер., 1963. – 830 с.
12. Бир, С. Кибернетика и управление производством [Текст] / Бир С. – М. : Государственное издательство физико-математической литературы. – 1963. – 391 с.
13. Атлас почв УССР [Текст] / [Под ред. Крупского Н. К., Полупана Н. И.]. – К. : Урожай, 1979. – 160 с.
14. Почвы Болгарии [Текст]. – М : Акад. Наук СССР, 1959. – 400 с.

References

1. Kachinskij, N. A. (1963) *Struktura pochvy* [Soil structure]. Moscow : MGU.
2. Bezruk, V. (1935) *Granulometricheskij sostav kak pokazatel' fiziko-mehaničeskikh svojstv pochv i gruntov* [Grain size distribution as an indicator of physical and mechanical properties of soils]. *Pochvovedenie [Pedology]*, 2, 202–217.
3. Medvedev, V. V. (2011) *Granulometricheskij sostav pochv Ukrainy (genetičeskij, jekologičeskij i agronomičeskij aspekty)* [Grain size distribution of soils of Ukraine (genetic, environmental and economic aspects)]. Har'kov : Apostrof [in Ukrainian].
4. Migunova, E. S. (1986). *O celesoobraznosti bolee podrobnoj klassifikacii pesčanyh pochv po mehaničeskomu sostavu* [On the expediency of further classification of sandy soils in texture].

Agrohimiya i pochvovedenie [Agricultural chemistry and soil science], 6, vol. 49, 3-6 [in Ukrainian].

5. Polupan, M. I. (1999) Rol` granulometrychnogo skladu v parametryzaciji grunto-utvorennia ta jogo misce v klasyfikaciji agrogруntiv [The role of particle size distribution in the soil parameterization and its place in the classification of soils]. *Visnyk agrarnoyi nauky [Journal of Agricultural Science]*, 12, 17–22 [in Ukrainian].

6. Berezin, P. N. (1983). Osobennosti raspredelenija granulometricheskikh jelementov pochv i pochvoobrazujushhiih porod [Features of grain size distribution of the elements of soils and soil-forming rocks]. *Pochvovedenie [Pedology]*, 2, 64–72.

7. Berezin, P. N. (1981). Primenenie veroyatnostnyh funkciy dlja opisanija granulometricheskogo sostava pochv i grunтов [Application of probability functions to describe the particle size distribution of soils]. *Vestnik MGU. Ser. Pochvovedenie [Pedology]*, 3, 30–36.

8. Shein, E. V. (2009). Granulometricheskij sostav pochv: problemy metodov issledovanija, interpretacii rezul'tatov i klassifikacij [Grain size distribution of soils: problems of research methods and interpretation of results of classifications]. *Pochvovedenie [Pedology]*, 3, 309–317.

9. Miheeva, I. V. (2000). Statisticheskaja charakteristika «formuly» granulometricheskogo sostava pochv [Grain size distribution of soils: problems of research methods and interpretation of results of classifications]. *Pochvovedenie [Pedology]*, 7, 818–828.

10. Gradusov, B. P. (2002). Ispolzovanie statisticheskikh metodov v analize granulometricheskogo sostava teksturno-differencirovannyh pochv dlja usta-novlenija ih genezisa [The use of statistical methods in the analysis of particle size distribution of the texture-differentiated soils to determine their genesis]. *Pochvovedenie [Pedology]*, № 7, 797–808.

11. Shannon, K. (1963). *Raboty po teorii informacii i kibernetike* [Works on information theory and cybernetics]. — Moscow : Izd. inostr. liter.

12. Bir, S. (1963). *Kibernetika i upravlenie proizvodstvom* [Cybernetics and production management]. Moscow : Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury.

13. Krupskiy, N. K., & Polupan, N. I. (Eds.) (1979). *Atlas pochv USSR* [Atlas of the USSR soils]. Kiev : Urozhaj.

14. *Pochvy Bolgarii [Soils Bulgaria]* (1959). Moscow : Akademia Nauk SSSR [The Academy of Sciences of the USSR].

Дата надходження статті до редакції : 23.04.2016

1 рецензування 10.05.2016, прийняття в друк: 15.05.2016

Received: 23.04.2016. 1st Revision: 10.05.2016. Accepted: 15.05.2016

Vasyl Smilskyj
Ph. D. (Techn.),
Associate Professor

*Department of Mechanical Engineering and Transport
Faculty of Engineering and Pedagogical
National Pedagogical University named after Volodymyr
Hnatyuk
Ternopil, Ukraine
E-mail : fractalped@gmail.com*

ENTROPY–INFORMATION ANALYSIS OF THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF SOILS

Particle size distribution of soil along with drafting, moisture and organic matter content, determines the conditions of agricultural implements and development of plants. Despite of the importance of particle size distribution empirical distributional function of its factions currently has no analytical description, because it is still estimated by means of weight content of physical clay. Indicators of soil-physical properties depend not only on the content of physical clay but as well as the ratio of particle size fractions which define the structural features at the higher level of aggregation. Information entropy Shannon, as a measure of diversity and organization system represents the degree of its uncertainty and can be a considered as a degree of chaos and the extent of structural organization set of size distribution of soil particles.

Results of the investigation show that the information entropy soil, which belong to the same functional group varies about $H = 1,736-2,448$ (the difference reaches 29%), the indicator of relative organization (harmony) R varies in a wider range - from 0,018 to 0.328, that is 18 times different. Such difference indicator value is too large to attribute these soils to one group according its particle size. Also its need to be admitted, that samples with the same clay content are striking differences Relative organization R . The method of information entropy analysis is suggested to reveal the significant disruption of soil particle size distribution concerning one functional group, therefore valid for classification clay content cannot be considered as accurate and informative. Entropy characteristics can be considered as adequate mathematical analogues of soil size distribution with the distribution of size fractions different from normal. They can be used to classify soils, to design processes cultivation and to design the workers of the agricultural implements.

Keywords : particle size distribution, information, soil, entropy, identification.

Васи́лий Сми́льский
к.т.н., доцент

кафедра машиноведения и транспорта
Факультет инженерно–педагогический
Тернопольский национальный педагогический
университет имени Владимира Гнатюка
Тернополь, Украина
E-mail : fractalped@gmail.com

ЕНТРОПИЙНО–ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОЧВ

Гранулометрический состав почв, вместе с плотностью, влажностью и содержанием органического вещества, определяет условия работы земледельческих орудий и развития растений. При всей важности гранулометрического состава эмпирическая функция распределения его фракций сегодня еще не имеет аналитического описания, поэтому до сих пор его оценивают весовым содержанием физической глины. Показатели физических свойств почв зависят не столько от содержания физической глины, сколько от соотношения гранулометрических фракций, определяющего особенности структуры на более высоком агрегатном уровне организации. В статье демонстрируется возможность применения информационной энтропии для анализа гранулометрического состава аграрных почв, как одного из возможных подходов к решению проблемы их структурной идентификации, не поддающегося адекватному математическому описанию известными методами. Предлагаемые меры позволяют оценить гранулометрический состав небольшим числом параметров независимо от вида вероятностного распределения.

Ключевые слова: гранулометрический состав, информация, почва, энтропия, идентификация.