

УДК 631.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.141.1.34>

АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО АНАЛІЗАТОРА ЧАСТИНОК ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ У ПРОБАХ ҐРУНТУ СТЕПОВОЇ ЗОНИ

Солоха М.О. – д.с.-г.н., с.н.с.,

завідувач лабораторії інструментальних методів досліджень ґрунтів,
стандартизації і метрології,

Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О.Н. Соколовського»

Винокурова Н.В. – здобувачка вищої освіти ступеня доктора філософії

поза аспірантурою, н.с. лабораторії інструментальних методів досліджень ґрунтів,
стандартизації і метрології,

Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О.Н. Соколовського»

Метод лазерної дифракції набуває все більшого розповсюдження у світі завдяки швидкості, універсальності та відтворюваності. Але як будь який новий метод він потребує верифікації на ґрунтових пробах України із прийнятими стандартними методами.

Метою статті є висвітлення аспектів вимірювання гранулометричного складу методом лазерної дифракції проб ґрунту Степової зони України на прикладі лазерного аналізатора частинок Mastersizer 3000E фірми Malvern Instruments з рідинним модулем диспергування Hydro EV.

В статті наведено існуючі способи пробопідготовки, спосіб вибору оптичних параметрів, за яким індекс рефракції приймається за найменшою сумарною різницею. Для чорнозему звичайного та темно-каштановий залишково-солонцюватого ґрунтів складає 1,40. Також наведений статистичний аналіз проб ґрунту який показав, що не для кожного типу ґрунту та не для кожної фракції можливо побудувати надійну регресійну модель у вигляді рівняння, що пов'язує вміст фракцій за методом лазерної дифракції з вмістом фракцій за методом ДСТУ 4730 2007. Якщо для чорнозему звичайного Степової північної недостатньо зволоженої підзони майже всі фракції, крім фракції середнього пилу, мають регресійні моделі гарної якості, то для більшості фракцій темно-каштанового залишково-солонцюватого ґрунту підзони Сухостепової сухої регресійні моделі незадовільної якості, крім фракції фізичної глини, яка має регресійну модель гарної якості. Тобто дані не можливо порівнювати один до одного та треба враховувати що не всі регресійні моделі є гарної якості.

Тим не менш визначення гранулометричного складу ґрунту за допомогою лазерного аналізатора частинок можливо проводити адже метод лазерної дифракції реагує на зміни по вмісту фракцій аналогічно за ДСТУ 4730:2007, тобто збільшення або зменшення суміжних значень по фракціях у зразках з колекції ґрунтових проб методом за ДСТУ 4730 2007, так само, збільшуються або зменшуються за метод лазерної дифракції, тобто мають однаковий характер змін, або значення знаходяться в межах похибки. Тобто він може слугувати альтернативою класичному седиментаційному методу.

Ключові слова: ґрунт, гранулометричний склад, лазерна дифракція, седиментація, підготовка проб, розмір частинок.

Solokha M.O., Vynokurova N.V. Aspects of the application of a laser particle analyzer in determining the granulometric composition in soil samples of the Steppe zone

The laser diffraction method is becoming increasingly widespread in the world due to its speed, versatility and reproducibility. But like any new method, it requires verification on soil samples from Ukraine with accepted standard methods.

The aim of the article is to highlight the aspects of measuring the particle size distribution by laser diffraction of soil samples from the Steppe zone of Ukraine using the example of the

Mastersizer 3000E laser particle analyzer from Malvern Instruments with a Hydro EV liquid dispersion module.

The article presents existing methods of sample preparation, a method for selecting the optical parameter of the sample, according to which the refractive index is taken according to the smallest total difference. For ordinary chernozem and dark chestnut residual-solonaceous soils, it is 1.40. Also, a statistical analysis of soil samples is presented, which showed that it is not possible to build a reliable regression model in the form of an equation for each type of soil and not for each fraction, linking the content of fractions according to the laser diffraction method with the content of fractions according to the DSTU 4730 2007 method. If for ordinary chernozem of the Steppe Northern insufficiently moistened subzone, almost all fractions, except for the medium dust fraction, have regression models of good quality, then for most fractions of dark chestnut residual-solonchic soil of the Dry Steppe subzone, the regression models are of unsatisfactory quality, except for the physical clay fraction, which has a regression model of good quality. That is, the data cannot be compared to each other and it must be taken into account that not all regression models are of good quality.

Nevertheless, it is possible to determine the grain size composition of the soil using a laser particle analyzer, since the laser diffraction method reacts to changes in the content of fractions similarly to DSTU 4730:2007, i.e., an increase or decrease in adjacent values for fractions in samples from a collection of soil samples by the method according to DSTU 4730 2007, also increase or decrease by the laser diffraction method, i.e., they have the same nature of changes, or the values are within the error range. That is, it can serve as an alternative to the classical sedimentation method.

Key words: soil, grain size distribution, Laser Diffraction, sedimentation, sample preparation, particle size.

Постановка проблеми. Аналіз гранулометричного складу ґрунту за допомогою лазерного аналізатора частинок (метод лазерної дифракції) все активніше використовується у світі, про що свідчать збільшення публікацій за останні 10 років. Але кожен з авторів з різних країн світу мають свої підходи до вимірювання: різняться налаштування приладу, підготовка ґрунтових проб перед аналізуванням, типи ґрунту [1]. На сьогодні не існує єдиної стандартизованої методики вимірювання ґрунтових проб методом лазерної дифракції. Не дивлячись на це, метод є досить перспективним, оскільки він забезпечує високу точність, швидкість та об'єктивність вимірювань.

В Україні основним стандартом є ДСТУ 4730:2007, який, хоча і забезпечує базові потреби у визначенні гранулометричного складу, має низку суттєвих недоліків: трудомісткість і тривалість виконання, залежність від зовнішніх умов, енергоємність. Застосування ж методу лазерної дифракції потребує верифікації на ґрунтових пробах України із прийнятими стандартними методиками та є подальшим кроком у розвитку інструментальних підходів та методологічних основ для України.

Тому метою статті є висвітлення аспектів вимірювання гранулометричного складу методом лазерної дифракції проб ґрунту Степової зони України на прикладі лазерного аналізатора частинок Mastersizer 3000E фірми Malvern Instruments з рідинним модулем диспергування Hydro EV.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій різних авторів (С. Polakowski [2], D. Igaz [3], С.С. Kasmerchaka [4], Р. Fisher [5], А. Makó А. [6], та інші) показав різноманітність підходів до роботи на лазерному дифрактометрі. На вибір підходу впливали конструктивні особливості приладу (об'єм та спосіб диспергування у модулю), методики підготовки проб для стандартизованих методів з якими порівнювались результати вимірювання на лазерному аналізаторі частинок, мети вимірювання (класифікації ґрунту, визначення впливу ультразвуку на частинки, стійкість агрегатів тощо).

На ринку представлені різні моделі лазерних аналізаторів частинок, схеми будови яких описані в ISO 13320:2020 [7]. Під час роботи з приладом оператор повинен визначитися та встановити такі параметри: дисперсійне середовище, час вимірювання, швидкість насосу та мішалки, оптичну модель розрахунку (модель дифракції Фраунгофера, модель розсіювання M_i) та інші. Ці параметри налаштування при застосуванні однієї моделі лазерного аналізатора частинок різними дослідниками часто є неоднаковими. Так С. Polakowski зі співавторами [3] у вимірюванні на Mastersizer 2000 з Hydro G використали такі параметри, як: час одного вимірювання – 60 с, швидкість насосу – 1750 об/хв., а швидкість мішалки – 700 об/хв., математична модель розрахунку – теорія M_i , коефіцієнт заломлення – 1,52, коефіцієнт поглинання – 0,1; значення затемнення становило 10–20%. А в роботах М. Ryzak and А. Bieganski [8], а також С.С. Kasmerchaka зі співавторами [4] на аналогічному приладі налаштування в кожному разі були вже інші. Тобто вибір оптимальних параметрів залежить від наукових підходів дослідника та поки що є суб'єктивним.

Способи підготовки зразка перед вимірюванням на лазерному аналізаторі частинок, що використовували автори, можливо поділити на етапи (висушування та просіювання крізь сито, видалення органічної речовини, видалення карбонатів, руйнування агрегатів), кожен з яких має декілька варіантів що представлено на рисунку 1.



Рис. 1. Існуючі у світі способи підготовки зразка ґрунту до аналізування методом лазерної дифракції

В першу чергу на вибір підготовки проби перед аналізуванням вплинули стандартизовані методики визначення текстури ґрунту або гранулометричного складу тієї країни де проводилося дослідження.

Отже, на сьогоднішній день у світі не існує єдиного способу визначення гранулометричного складу ґрунту методом лазерної дифракції. Але науковцями ведеться робота по впровадженню та використанню лазерних аналізаторів частинок для визначення гранулометричного складу. Питання пробопідготовки та оптимальних налаштувань приладу залишається відкритим.

Матеріали та методи досліджень. Об'єктами дослідження є ґрунти Степової зони України (чорнозем звичайний та темно-каштановий залишково-солонцюватий), що відбиралися протягом 2021–2023 рр. (на рис. 2 представлені всі зразки, що відбиралися для дослідження методом лазерної дифракції, але в даній статі мова піде лише про частину з них).

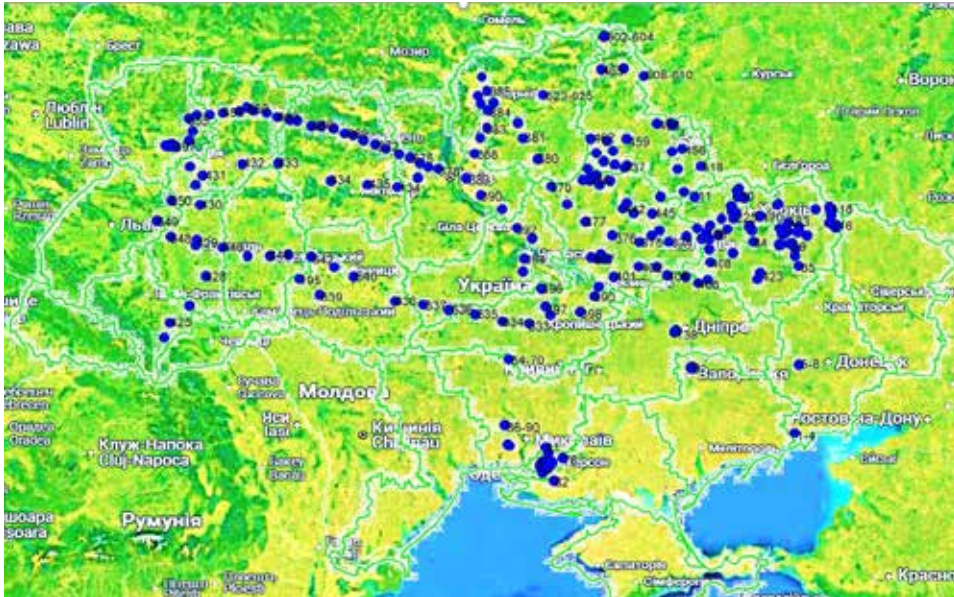


Рис. 2. Карта-схема відбору зразків

Зразки ґрунту відбиралися випадково з урахуванням ДСТУ 4287:2004 та ДСТУ ISO 10381-2:2004. Було створено колекцію ґрунтових проб номери яких співпадають з номерами на картосхемі. Випадковий відбір зразків дозволяє уникнути упередженості в аналізі даних.

Також застосовувалися галузеві стандартні зразки складу (агрохімічних показників) чорнозему звичайного малогумусного легкосуглинистого (ГСЗУ 163.1-2015) та темно-каштанового важкосуглинкового солонцюватого (ГСЗУ 163.3-2019) ґрунтів.

Попереднє оброблення зразків виконувалося з урахуванням та ДСТУ ISO 11464:2007, а саме зразки були висушені до повітряно-сухого стану, просіяні крізь сито з діаметром отворів 1 мм, перемішані та взяті середні проби методом квартування.

Було проведено вимірювання за ДСТУ 4730:2007.

Вимірювання методом лазерної дифракції проводилося на лазерно-дифракційному аналізаторі розміру частинок Mastersizer 3000E фірми Malvern Instruments з рідинним модулем диспергування Hydro EV. Прилад має оптичний блок з джерелом світла з довжиною хвиль 632,8 нм та 86 детекторів, що дозволяє вимірювати частинки у діапазоні 0,1–1000 мкм.

Для двох методів при видаленні карбонатів застосовувався розчин соляної кислоти, для дезагрегації – розчин гідроксиду натрію. Підготовка проб перед

аналізуванням була із застосуванням однакових реагентів, оскільки в такому випадку часточки будуть однаково дезагредовані – це дозволяє порівнювати результати, оскільки теоретично розміри часточок повинні бути однаковими.

Вимірювання на Mastersizer 3000E проводилося за встановленими оптимальними параметрами налаштувань: диспергатор – дистильована вода з коефіцієнтом рефракції 1,33, швидкість мішалки – 2250 об/хв, час вимірювання фону та зразка 15 с, кількість вимірювань – 6, математична модель розрахунку – теорія Мі з коефіцієнтом рефракції -1,38 – 1,42.

Статистичну обробку даних проводили за допомогою програмного забезпечення Excel та Statistical v.10, визначалися: коефіцієнт кореляції r_{xy} , фактичне значення t-критерію Стьюдента $t_{\text{факт}}$, коефіцієнт детермінації R^2 , регресійні рівняння. Коефіцієнт кореляції дає уявлення про наявність зв'язку між значеннями по кожній з фракцій двох методів. Фактичне значення t-критерію – про істотність коефіцієнта кореляції, тобто наявності або відсутності лінійного зв'язку [9, 10]. Коефіцієнт детермінації – про якість побудованої регресійної моделі.

Результати досліджень. Основними оптичними параметрами зразка, які застосовуються при вимірюванні на лазерному аналізаторі частинок є індекс рефракції та індекс абсорбції. Для видимого світла «майже всі тверді тіла та рідини мають індекс рефракції вище 1,3. Значення зазвичай вимірюються на довжині хвилі 589 нм, що відповідає дублетній D-лінії натрію в жовтій частині спектра» [11]. У більшості довідників наведені дані індексу рефракції саме для цієї довжини хвилі. Довжина хвилі лазерно-дифракційного аналізатора розміру частинок Mastersizer 3000E є інша (632,8 нм), тому й показник заломлення може бути іншим, оскільки він залежить від довжини хвилі та властивостей матеріалу (мінерального складу, щільності, структурності). Для цієї довжини хвилі даних показника заломлення в розповсюджених довідниках по оптичних властивостях мінералів немає. Можливо, з цієї підстави автори статей з лазерної дифрактометрії G. Eshel зі співавторами [12], B.A. Miller, R.J. Schaez [13] та інші все ж таки використовували саме коефіцієнт заломлення мінералів для жовтої лінії спектра з довідників. Натомість Е. Kondrlova зі співавторами [14], відзначили, що зниження показника заломлення призвело до збільшення вмісту глин. Також відомо, що ґрунт – це гетерогенна система, яка може включати у себе різні мінерали, тому ансамбль частинок вірогідніше за все матиме своєрідний коефіцієнт заломлення, притаманний певному типу ґрунту, та відрізнятиметься від довідникового.

Виходячи з того що бажано щоб дані вмісту гранулометричних фракцій визначених методом лазерної дифракції мали мінімальну різницю зі стандартизованим методом за ДСТУ 4730:2007 нами запропоновано вибирати індекс рефракції по мінімальній сумарній різниці між методами. Тому для встановлення індексу рефракції для різних типів ґрунту було проаналізовано зразки проб при різних індексах рефракції, наприклад, як для чорнозему звичайного та темно-каштанового важкосуглинкового солонцюватого Степової зони (табл. 1), та визначена сума різниць по фракціям між методами для кожного зі зразків за формулою:

$$C = \sum_{i=n} |A_i - B_i|$$

де С – сума різниць по фракціям між методами;

A_i – значення і-тої фракції визначене за методом Лазерної дифракції;

B_i – значення і-тої фракції визначене за ДСТУ 4730:2007.

Таблиця 1

Вміст гранулометричних фракцій чорнозему звичайного та темно-каштанового важкосуглинкового солонцюватого за ДСТУ 4730:2007 та за методом Лазерної дифракції при різних індексах рефракції

Метод/індекс рефракції/ різниця	Вміст гранулометричних фракцій, %						Сума різниць %
	1-0,25 мм	0,25-0,05 мм	0,05-0,01 мм	0,01-0,005 мм	0,005-0,001 мм	<0,001 мм	
Галузевий стандартний зразок чорнозему звичайного малогумусного легкосуглинкового ґрунту (ГСЗУ 163.1-2015)							
ДСТУ 4730: 2007	0,30	9,09	29,25	9,77	11,20	40,39	
Лазерна дифракція / 1,38	2,15	8,33	19,93	5,31	25,43	38,85	
Різниця між методами	1,85	0,76	9,32	4,46	14,23	1,54	32,16
Лазерна дифракція / 1,39	1,01	9,92	25,16	6,95	22,39	34,58	
Різниця між методами	0,71	0,83	4,09	2,82	11,19	5,81	25,45
Лазерна дифракція / 1,40	0,77	11,09	29,54	8,65	19,74	30,31	
Різниця між методами	0,47	2,00	0,29	1,12	8,54	10,08	22,50
Лазерна дифракція / 1,41	0,9	13,36	32,61	9,94	17,42	25,77	
Різниця між методами	0,60	4,27	3,36	0,17	6,22	14,62	29,25
Галузевий стандартний зразок темно-каштанового важкосуглинкового солонцюватого ґрунту (ГСЗУ 163.3-2019)							
ДСТУ 4730: 2007	0,21	9,45	44,21	8,60	8,76	28,77	
Лазерна дифракція / 1,38	1,96	10,16	25,09	4,8	24,48	33,51	
Різниця між методами	1,75	0,71	19,12	3,80	15,72	4,74	45,85
Лазерна дифракція / 1,39	2,15	13,37	29,99	6,09	20,56	27,84	
Різниця між методами	1,94	3,92	14,22	2,51	11,80	0,93	35,32
Лазерна дифракція / 1,40	3,1	14,55	34,23	7,33	17,69	23,03	
Різниця між методами	2,89	5,10	9,98	1,27	8,93	5,74	33,91
Лазерна дифракція / 1,41	3,87	16,2	37,34	8,37	15,4	18,75	
Різниця між методами	3,66	6,75	6,87	0,23	6,64	10,02	34,17

З таблиці 1 бачимо що найменша сумарна різниця складає 22,50% при індексі рефракції 1,40 для чорнозему звичайного та 33,91% – темно-каштанового важкосуглинкового солонцюватого. Так само, по найменшій сумарній різниці між методами, було обрано індекс рефракції для всіх зразків, які досліджувались. Було встановлено що для більшості ґрунтів чорнозему звичайного та темно-каштанового ґрунтів Степової зони індекс рефракції склав 1,40.

При індексі рефракції 1,40 визначалися та порівнювалися зразки ґрунту чорнозему звичайного Степової північної недостатньо зволоженої підзони загальною кількістю 64 проби № 9, 43–63, 85, 116, 119, 129, 130, 138–157, 192–194, 226, 397–399, 404–408, 422–424, 632, 633 у колекції ґрунтових проб. Для прикладу надано на рисунку 3 фрагмент порівняння даних двох методів по фракціям.

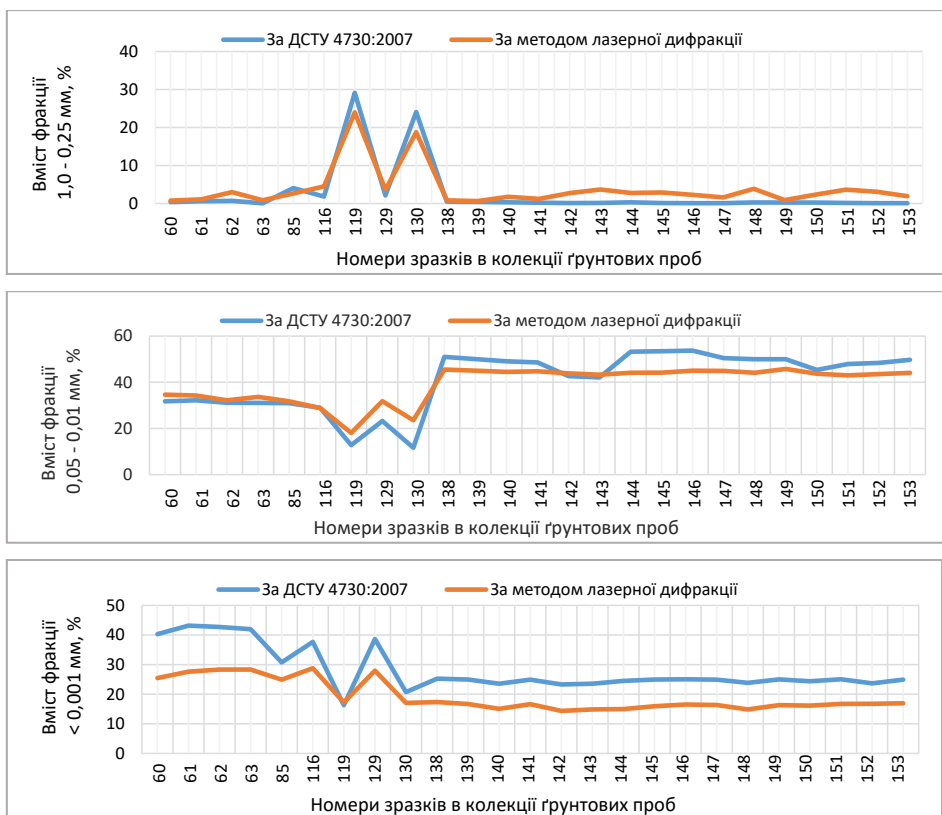


Рис. 3. Вміст фракцій за ДСТУ 4730 2007 та за методом лазерної дифракції для чорнозему звичайного Степової північної недостатньо зволоженої підзони

Аналізуючи дані рисунку 3 бачимо, що графіки по фракціям для обох методів мають подібні піки зростання та пониження. Отже збільшення або зменшення суміжних значень фракції у зразку методом за ДСТУ 4730 2007, так само, для більшості зразків, збільшуються або зменшуються за метод лазерної дифракції, тобто мають однаковий характер змін. При цьому в залежності від фракції різниця між методами не однакова та коливається від 0 до 19,5%.

У статистиці для технічних вимірювань, коли ступінь надійності та точності не потребує високого рівня, приймають довірчу ймовірність в межах 0,9–0,95 [15]. Оскільки вибір оптичних параметрів передусь визначенню точності, то на даному етапі досліджень, враховуючи неоднорідність ґрунтового покриття та ґрунтових проб будемо вважати, що довірливий інтервал значень знаходиться в межах $\pm 2,5\%$ від значення (в даному випадку відсоток – це одиниця вимірювання фракції). Тобто якщо різниця між значеннями для фракції за ДСТУ 4730:2007 та значеннями фракції за методом лазерної дифракції не перевищує 5% від значення вмісту фракції, то прийнятним вважатиметься твердження, що різниця викликана похибкою у вимірюваннях.

Невелику різницю (до 5%) мають фракції крупного піску (1–0,25 мм) – у 78% зразків вона не перевищує 2,5%, а у 19% – 5,0%, середнього піску у 30% зразків

вона не перевищує 2,5%, а у 31% – 5,0%, крупного пілу – у 42% зразків вона не перевищує 2,5%, а у 27% – 5,0%, середнього пілу – у 92% зразків вона не перевищує 2,5%, а у 8% – 5,0% та фракції фізичної глини (<0,01 мм) – у 31% зразків вона не перевищує 2,5%, а у 38% – 5,0%. У фракції дрібного пілу 38% зразків мають різницю до 5%, 62% – від 5% до 10%, Для фракції мулу (<0,001 мм) характерним є велика різниця – у 58% зразків від 5% до 10%, та у 30% – від 10% до 15%, тобто є суттєвою. Отже не завжди різницю можливо віднести до похибки методів, тому при зіставленні значень даних методів необхідно їх перераховувати за регресійним рівнянням. Для цього проведені статистичні розрахунки (див. табл. 2).

Таблиця 2

Статистичні показники для зразків з № 9, 43–63, 85, 116, 119, 129, 130, 138–157, 192–194, 226, 397–399, 404–408, 422–424, 632, 633

Гранулометрична фракція	Статистичний показник			
	Коефіцієнт кореляції r_{xy}	t-критерій Стьюдента $t_{\text{факт}}$	Коефіцієнт детермінації R^2	Регресійне рівняння
1–0,25 мм	0,94	21,73	0,88	$y = 1,75x - 1,73$
0,25–0,05 мм	0,85	12,69	0,72	$y = 0,97x - 3,35$
0,05–0,01 мм	0,93	19,99	0,87	$y = 1,5x - 17,66$
0,01–0,005 мм	0,74	8,71	0,55	$y = 0,81x + 1,13$
0,005–0,001 мм	0,88	14,91	0,78	$y = 0,85x - 3,24$
<0,001 мм	0,92	18,75	0,85	$y = 1,43x + 0,47$
<0,01 мм	0,97	30,11	0,94	$y = 1,17x - 3,54$

Коефіцієнт кореляції дорівнює значенням від 0,74 до 0,97 (табл. 2), тобто за шкалою Чеддока для фракцій піску крупного пілу мулу та фізичної глини маємо дуже високий зв'язок, для інших фракцій – високий. При цьому зв'язок є істотним, адже для 64 зразків табличне значення t-критерію дорівнює 2,0 [10], що менше ніж розрахункове $t_{\text{факт}}$ (табл. 2), а значить для всіх фракцій можемо побудувати регресійне рівняння (табл. 2). За коефіцієнтом детермінації відзначимо, що для всіх фракцій, крім фракції середнього пілу, більш ніж у 72% при відомому значенні фракції за методом лазерної дифракції за рівнянням вміст фракції дорівнюватиме близькому значенню фракції визначеному за ДСТУ 4730:2007. Тобто маємо регресійні моделі гарної якості. Для фракції середній піл (0,01–0,005 мм) модель є задовільної якості, але при цьому різниця між методами є найнижчою порівняно з іншими фракціями і у 92% зразків вона не перевищує 2,5%, тобто може бути викликана похибкою у вимірюваннях.

Виходячи з цього, можемо говорити, що для чорнозему звичайного Степової північної недостатньо зволоженої підзони дані метода лазерної дифракції є порівняльними з даними за визначеними за ДСТУ 4730:2007.

При індексу рефракції 1,40 визначалися зразки темно-каштанового залишково-солонцюватого ґрунту підзони Сухостепової сухої загальною кількістю 127 проб (№ 76–83, 227–347 колекції ґрунтових проб). На рисунку 4 надано фрагмент порівняння даних двох методів по фракціям.

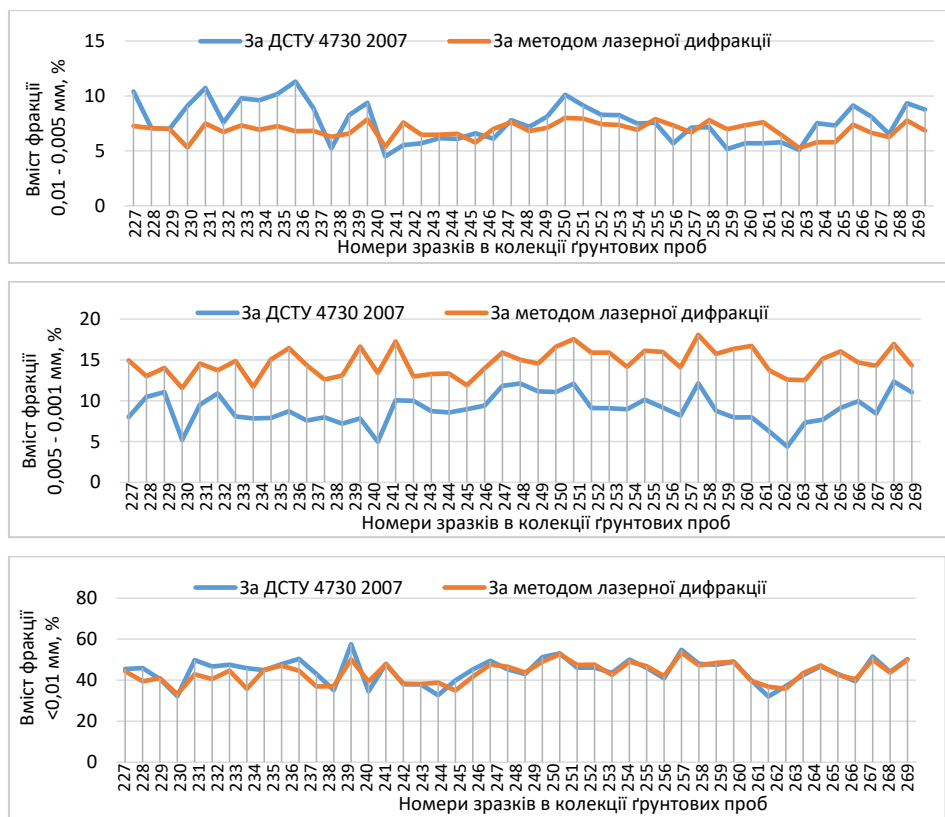


Рис. 4. Вміст фракцій за ДСТУ 4730 2007 та за методом лазерної дифракції для темно-каштанового залишково-солонцюватого ґрунту підзони Сухостепової сухої

Аналізуючи графіки бачимо, що піки по фракціям у деяких зразків не співпадають та між даними є різниця. Проаналізувавши різниці по кожній фракції маємо, що для фракцій крупний пісок у 82% зразків різниця не перевищує 3%, що є логічним адже має місце низький вміст цієї фракції яка не перевищує 6%. Також невелику різницю для більшості зразків має фракція середнього пилу – у 73% вона не перевищує 3% при цьому вміст фракції складає від 4% до 11%. Інші фракції мають більше розбіжність між даними і можуть складати більше 10%. Але для фракції фізичної глини у 69% зразків різниця менше 2,5%, та у 17% від 2,5% до 5%. Тобто для більшості зразків темно-каштанового залишково-солонцюватого ґрунту, враховуючи похибку методів, клас ґрунту за гранулометричним складом буде визначатися однаковий як за ДСТУ 4730 2007 так і за методом лазерної дифракції, але в той же час маємо перерозподіл фракцій: за методом лазерної дифракції фракції дрібний пісок має більші значення порівняно з даними за ДСТУ 4730:2007 у 77% зразків і різниця складає більше 5% та навпаки – фракція пилу має менші значення у 87% зразків (різниця складає більше 5%) порівняно з даними за ДСТУ 4730:2007.

Проведений статистичний аналіз (табл. 3) показує, що за коефіцієнтом кореляції за шкалою Чеддока фракції крупного піску та середнього пилу мають слабкий зв'язок, тобто це ті фракції де різниця між методами є мінімальною, фракції дрібний пісок та дрібний пил – середній, а фракції крупного пилу, мулу та

фізичної глини – тісний. За критерієм Стюдента коефіцієнти кореляції є значущим ($t_{\text{табл.}} = 1,98$ менше $t_{\text{факт.}}$), тому побудовані регресійні рівняння (табл. 3).

Таблиця 3
Статистичні показники для зразків з № 76–83, 227–347

Гранулометрична фракція	Статистичний показник			
	Коефіцієнт кореляції r_{xy}	t-критерій Стюдента $t_{\text{факт}}$	Коефіцієнт детермінації R^2	Регресійне рівняння
1–0,25 мм	0,49	6,29	0,24	$y = 0,32x + 0,02$
0,25–0,05 мм	0,69	10,72	0,48	$y = 1,02x - 8,36$
0,05–0,01 мм	0,71	11,21	0,50	$y = 1,08x + 6,08$
0,01–0,005 мм	0,36	3,34	0,13	$y = 0,81x + 2,21$
0,005–0,001 мм	0,67	10,12	0,45	$y = 0,66x - 0,006$
<0,001 мм	0,71	11,23	0,50	$y = 0,85x + 8,17$
<0,01 мм	0,88	20,64	0,77	$y = 0,98x + 1,64$

Для більшості фракцій темно-каштанового залишково-солонцюватого ґрунту підзони Сухостепової сухої коефіцієнт детермінації є низьким ($\leq 0,5$), що говорить про не достатню достовірність моделей, тобто при їх застосуванні менше ніж у 50% зразків при перерахунку отримаємо однакові дані по фракціям для обох методів. Отже, перерахунок з одного метода в інший по фракціям не є коректним. Використовувати регресійне рівняння можливо лише для фракції фізичної глини, адже в цьому випадку для 77% зразків вміст даної фракції буде однаковий. В даній фракції також невелика різниця (до 2,5%) у 69% зразків, тобто різниця в межах похибки, це суттєво не вплине на встановлення типу ґрунту за гранулометричним складом. Тому можливо використовувати дані вмісту фракції фізичної глини отриманих методом лазерної дифракції для встановлення типу ґрунту за гранулометричним складом без перерахунку.

Висновки і пропозиції

1. Визначення гранулометричного складу ґрунту за допомогою лазерного аналізатора частинок можливо проводити адже метод лазерної дифракції реагує на зміни по вмісту фракцій аналогічно за ДСТУ 4730:2007, тобто збільшення або зменшення суміжних значень по фракціях у зразках з колекції ґрунтових проб методом за ДСТУ 4730 2007, так само, збільшуються або зменшуються за метод лазерної дифракції, тобто мають однаковий характер змін, або значення знаходяться в межах похибки.

2. Індексу рефракції для певного типу ґрунту при вимірюванні на лазерному аналізаторі частинок визначають шляхом порівняння даних отриманих методом лазерної дифракції при різних індексах рефракції та даних стандартизованого методу за найменшою сумарною різницею. Для ґрунтів Степової зони України (чорнозем звичайний та темно-каштановий залишково-солонцюватий) однаковим і складає 1,40.

3. Не для кожного типу ґрунту та не для кожної фракції можливо побудувати надійну регресійну модель у вигляді рівняння, що пов'язує вміст фракцій за методом лазерної дифракції з вмістом фракцій за методом ДСТУ 4730 2007. Якщо для чорнозему звичайного Степової північної недостатньо зволоженої підзони майже всі фракції, крім фракції середнього пілу, мають регресійні моделі гарної якості, то для більшості фракцій темно-каштанового залишково-солонцюватого ґрунту

підзони Сухостепової сухої регресійні моделі незадовільної якості, крім фракції фізичної глини, яка має регресійну модель гарної якості. Це особливо важливо при діагностуванні ґрунтів, наприклад за коефіцієнтом профільного нагромадження гумусу (КПНГ) та коефіцієнт відносної акумуляції гумусу (КВАГ).

Отже метод лазерної дифракції можливо застосовувати як альтернативний метод визначення гранулометричного складу ґрунту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Солоха М.О., Винокурова Н.В. Параметри налаштування лазерного дифрактометра та підготовка проби ґрунту до аналізування при визначенні розміру частинок, які використовуються у світі. *Формування нової парадигми розвитку агропромислового сектору в XXI столітті*: колективна монографія: у 2 ч. Ч. 2 / відп. за випуск О. В. Аверчев. – Львів-Торунь : Ліґа-Прес, 2021. С. 538–562. ISBN 978-966-397-240-4 DOI: <https://doi.org/10.36059/978-966-397-240-4-19>
2. Particle Size Distribution of Various Soil Materials Measured by Laser Diffraction – The Problem of Reproducibility / Polakowski C. et al. *Minerals*. 2021. V.11(5), P. 465. URL: <https://doi.org/10.3390/min11050465>
3. Laser diffraction as an innovative alternative to standard pipette method for determination of soil texture classes in central Europe / Igaz D. et al. *Water*. 2020. V. 12, 1232; <https://doi.org/10.3390/w12051232>
4. Kasmerchaka C.S., Masonb J.A., Liangb M. Laser diffraction analysis of aggregate stability and disintegration in forest and grassland soils of northern Minnesota, USA. *Geoderma* 2019. V. 338. P. 430–444. <http://dx.doi.org/10.3390/app11104427>
5. Adequacy of laser diffraction for soil particle size analysis / Fisher P. et al. *PLoS ONE* May 4 2017. V.12(5): e0176510. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176510>
6. Evaluation of soil texture determination using soil fraction data resulting from laser diffraction method. / Mako A. [et al.]. *International Agrophysics*. 2019. V.33. P. 445-454 URL: <https://doi.org/10.31545/intagr/113347>
7. ISO 13320:2020 Particle size analysis. Laser diffraction methods. [2020-01-06]. Geneva, Switzerland : International Organization for Standardization. 2020. 66 p
8. Ryz'ak M. and Bieganski A. Methodological aspects of determining soil particle-size distribution using the laser diffraction method. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2011. V. 174. P. 624–633 ДСТУ 4287:2004
9. Чепур С.С. Біометрія: Методичний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла», 2015. – 40 с.13
10. Таблиці функцій та критичних точок розподілів. Розділи: Теорія ймовірностей. Математична статистика. Математичні моделі в психології. / Укладач: М.М Горнескуль. – Х.: УІЦЗУ, 2009. – 90 с.14 <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/1530>
11. Показник заломлення URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BA%D0%B0%D0%B7%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%B7%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F (дата звернення 15.01.2025 р.).
12. Singer Critical Evaluation of the Use of Laser Diffraction for Particle-Size Distribution Analysis / Eshel G. et al. *Soil Science Society of America MAY–JUNE* 2004. V.68. P. 736–743
13. Miller B.A., Schaetzl R.J. Precision of soil particle size analysis using laser diffractionometry. *Soil Science Society of America Journal*. 2011. V. 76. P.1719–1727.
14. Kondrova E., Igaz D., Horak J. Effect of calculation models on particle size distribution estimated by laser diffraction. *The Journal of Ege University Faculty of Agriculture*. 2015, Special Issue. P. 21-27. ISSN 1018 – 8851.
15. Довірчі інтервали. URL: https://wiki.tntu.edu.ua/%D0%94%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%80%D1%87%D1%96_%D1%96%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D0%B8 (дата звернення 05.01.2025 р.) (дата звернення 15.01.2025 р.).