

**І. В. Пліско**

доктор сільськогосподарських наук,
старший науковий співробітник,
завідувачка лабораторії геоєкофізики ґрунтів
імені академіка НААН В. В. Медведєва,
Національний науковий центр
«Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О.Н. Соколовського» (м. Харків, Україна)
E-mail: irinachujan@gmail.com

**К. Ю. Романчук**

кандидат сільськогосподарських наук,
старший науковий співробітник, 1
Національний науковий центр
«Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О.Н. Соколовського» (м. Харків, Україна)
E-mail: katerina_uvarenko@ukr.net

**К. М. Куцова**

аспірант,
Національний науковий центр
«Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського»
(м. Харків, Україна)
E-mail: karikuts96@gmail.com

ВПЛИВ ПРОСТОРОВОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ АГРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТІВ НА ВРОЖАЙНІСТЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

У статті висвітлені питання впливу просторової неоднорідності агрофізичних властивостей орного шару ґрунтів (структурного складу, твердості та щільності будови) на врожайність пшениці озимої та соняшнику на прикладі територіального об'єкту, розташованого в Лівобережному Лісостепу України. Метою роботи було оцінити взаємозв'язки між агрофізичними властивостями ґрунтів та врожайністю культур за допомогою методів кореляційно-регресійного аналізу даних. У результаті досліджень встановлено, що неоднорідність врожаю вирощуваних сільськогосподарських культур значною мірою визначалася неоднорідністю досліджених агрофізичних властивостей орних ґрунтів: найбільшою неоднорідністю характеризувався вміст брилистої фракції (часточок розміром >10 мм) (коефіцієнт варіації (K_v) дорівнював 0,33) та вміст пилуватої фракції (часточок розміром $<0,25$ мм) ($K_v = 0,42$). Показник твердості досліджених ґрунтів у межах об'єкту змінювався в межах від 8,8 до 14,3 кгс/см² та не перевищував значення припустимих параметрів для проростання та розвитку більшості сільськогосподарських культур. За період досліджень щільність будови варіювала в межах від 1,20 до 1,45 г/см³. Встановлено, що найгірші показники агрофізичних параметрів зафіксовано у тих частинах територіального об'єкту, де ґрунтовий покрив представлено ясно-сірими та сірими опідзоленими слабо-та-середньозмитими важкосуглинковими та легкоглинистими ґрунтами, де саме і фіксується зниження врожайності вирощуваних культур. У ході досліджень оцінено значущість взаємозв'язків між окремими дослідженими показниками та врожайністю культур, а також їх кореляцію між собою. Відмічено середню кореляцію між врожайністю озимої пшениці та вмістом агрономічно цінних агрегатів (часточок розміром 10-0,25 мм) та твердістю у шарі 0-10 см. У посівах соняшника найбільша кореляція спостерігалась між вмістом брилистої фракції та вмістом агрономічно цінних агрегатів. Розрахунок множинних регресійних моделей підтвердив, що врожайність вирощуваних культур на 71% та 59% відповідно для пшениці озимої (коефіцієнт множинної кореляції (r) дорівнював 0,84) та соняшника ($r=0,77$) пояснювався сумісним впливом досліджених агрофізичних показників орних ґрунтів.

Ключові слова: агрофізичні властивості, ґрунт, кореляційно-регресійний аналіз, неоднорідність, врожайність культур.

I. V. Plisko

Doctor of Agriculture Sciences, Senior Research Associate,
Head of Laboratory of Geocophysics of Soils named after Academician of NAAS V. V. Medvedev,
National Science Center "Institute of Soil Science and Agrochemistry named after O. N. Sokolovsky"
(Kharkiv, Ukraine)
E-mail: irinachujan@gmail.com

K. Yu. Romanchuk

PhD of Agricultural Sciences, Senior Researcher,
National Science Center "Institute of Soil Science and Agrochemistry named after O. N. Sokolovsky"
(Kharkiv, Ukraine)
E-mail: katerina_uvarenko@ukr.net

K. M. Kutsova

Graduate Student,
National Science Center "Institute of Soil Science and Agrochemistry named after O. N. Sokolovsky"
(Kharkiv, Ukraine)
E-mail: karikuts96@gmail.com

THE INFLUENCE OF SPATIAL HETEROGENEITY OF AGROPHYSICAL SOIL PROPERTIES ON THE YIELD OF AGRICULTURAL CROPS

The article highlights the influence of the spatial heterogeneity of the agrophysical properties of the arable layer of soils (structural composition, hardness and density of the structure) on the yield of winter wheat and sunflower on the example of a territorial object located in the Left Bank Forest-Steppe zone of Ukraine. The aim of the study was to evaluate the relationships between the agrophysical properties of soils and the yield of crops using correlation-regression data analysis methods. Research has established that the heterogeneity of the crop yield was largely determined by the heterogeneity of the studied agrophysical properties of arable soils. The greatest heterogeneity was characterized by the content of the lumpy fraction (particle size >10 mm) (the coefficient of variation (Kv) was equal to 0.33) and the content of the dusty fraction (particle size <0.25 mm) (Kv= 0.42). Indicators of soil hardness within the territorial object ranged from 8.8 to 14.3 kgf/cm² and did not exceed the acceptable parameters for the germination and development of most agricultural crops. During the research period, the density of the structure varied from 1.20 to 1.45 g/cm³. It was found that the worst indicators of agrophysical parameters were recorded in those parts of the territorial object, where the soil cover is represented by light-gray and gray podzolized weakly and moderately washed heavy loam and light clay soils, where the decrease in the yield of cultivated crops is recorded. The significance of the relationships between the individual researched indicators and the yield of crops, as well as their correlation with each other, was assessed. An average positive correlation was noted between the yield of winter wheat and the content of agronomically valuable aggregates (particles 10–0.25 mm in size) and hardness of soil in the 0–10 cm layer. In sunflower crops, the highest correlation was observed between the content of the lumpy fraction and the content of agronomically valuable aggregates. The calculation of multiple regression models showed that the yield of cultivated crops by 71% and 59%, respectively, for winter wheat (multiple correlation coefficient (r) was equal to 0.84) and sunflower (r=0.77) was explained by the combined influence of the researched agrophysical indicators of arable soils.

Key words: agrophysical properties, soil, correlation-regression analysis, heterogeneity, crop yield.

Постановка проблеми. Серед комплексу метеорологічних, агротехнологічних та агробіологічних чинників, які визначають урожайність сільськогосподарських культур, важливе значення мають оптимальні параметри фізичних показників ґрунту. Саме агрофізичні властивості посівного шару ґрунту суттєво впливають на проростання рослин та розвиток їхньої кореневої системи та вегетативної маси що, в подальшому, впливає на формування врожаю сільськогосподарських культур. Для успішного регулювання рівня продуктивності сільськогосподарських культур важливо мати повну інформацію про кореляцію між агрофізичними властивостями ґрунтів та визначити їхній вплив на формування врожайності сільськогосподарських культур, що й визначає актуальність проведення досліджень з цього питання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Залежність продуктивності сільськогосподарських культур від просторового розподілу агрофізичних властивостей ґрунтів висвітлено в чисельних наукових роботах [9; 16; 20; 21]. За результатами досліджень [5] переуцільнення ґрунту призводить до зниження вегетативної маси рослин, що супроводжується негативними

змінами у ґрунті – збільшенням твердості та погіршенням повітропроникності в межах кореневої системи. Перевищення параметрів щільності будови від оптимальних значень на 0,1 г/см³ призводить до зниження врожайності зернових на 0,2–1,0 т/га, у середньому – на 0,6 т/га [8].

Структурно-агрегатний склад ґрунту є одним з головних факторів, що визначає умови росту й розвитку сільськогосподарських культур та величину їх продуктивності, оскільки обумовлює формування водно-повітряного та теплового режимів ґрунтів. Цей показник змінюється в часі і просторі залежно від властивостей ґрунту, кліматичних умов і методів управління земельними ресурсами [14; 15; 17].

Відомо, що високий рівень твердості ґрунту є серйозною перешкодою для росту і розвитку кореневої системи сільськогосподарських рослин. Зі збільшенням твердості ґрунту ріст коренів сповільнюється лінійно [19]. Зазначається, що аналіз твердості ґрунту має важливе інформативне значення для діагностики якості ґрунту та може виступати в якості інтегрального показника, що відображає просторову неоднорідність фізичного стану ґрунту [1].

Просторовій мінливості фізичних властивостей ґрунтів також сприяє і рельєф, який, в свою чергу, відносно сильно пов'язаний із вмістом органічного вуглецю, що в кінцевому підсумку впливає на ріст і розвиток сільськогосподарських культур та їх урожайність [22]. Ґрунти нижньої частини опуклих схилів, зазвичай характеризуються накопиченням відкладень з еродованого ґрунтового матеріалу верхньої частини схилів, що відображується на якісному стані ґрунтів та зростанні культур [11]. Тому вказують на необхідність детального картографування ґрунтів кожного поля із фіксуванням просторової неоднорідності властивостей ґрунтів А. Tariq et al. [18].

Метою статті є оцінювання взаємозв'язків між просторовою неоднорідністю агрофізичних показників орних ґрунтів і врожайністю вирощуваних сільськогосподарських культур для оперативного визначення фізично деградованих ділянок та розробки заходів, спрямованих на оптимізацію фізичних показників орних ґрунтів та підвищення продуктивності культур.

Методика досліджень. Дослідження проведено впродовж 2020–2021 рр. Об'єкт досліджень – частина поля площею 21 га, що знаходиться за межами населеного пункту смт Буди Південноміської територіальної громади Харківського району Харківської області в Лівобережному Лісостепу України (рис. 1а). Ґрунтовий покрив представлено сірими та ясно-сірими опідзоленими ґрунтами важкосуглинкового та легкоглинистого гранулометричного складу, сформованими на лесових породах на верхніх частинах схилу, та їх слабо- і середньозмитими аналогами у підніжжі схилів. На рис. 1б відображено ізолінії

рельєфу згідно з даними топографічної карти та регулярну сітку з точками відбору зразків ґрунту в межах об'єкту. Рельєф поля – хвиляста рівнина, наявні перепади висот від 140 до 160 м, ухил поверхні змінюється від 2 до 6 градусів.

У польових умовах на дослідному об'єкті відібрано ґрунтові зразки за ДСТУ 4287 [2] за регулярною сіткою (1 точка на 1 га) з використанням приладу GPS «Garmin 9» та визначено основні агрофізичні параметри ґрунту в його орному шарі (0–30 см): структурно-агрегатний склад ситовим методом у модифікації Н. І. Саввінова за ДСТУ 4744 [3], твердість ґрунту за ДСТУ 5096 [4] за допомогою твердоміра Рев'якіна та щільність будови ґрунту методом педотрансферного моделювання за розробленою в лабораторії геофізики ґрунтів ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського» квадратичною моделлю за участю показників вмісту загального гумусу та фізичної глини [10].

Продуктивність вирощуваних культур оцінювали за врожайністю пшениці озимої (2020 рік) та соняшнику (2021 рік). Збирання урожаю проводили у фазу повної стиглості культур в один день в усіх раніше визначених точках. Суцільно було зібрано та зважено рослини на площі 1 м² в радіусі 1 м від кожної точки. Масу отриманого зерна та насіння було перераховано в ц/га при стандартній вологості (14% для пшениці та 12% для соняшника).

Для встановлення достовірності отриманих даних та взаємозв'язків між урожайністю та дослідженими агрофізичними показниками ґрунту використано математично-статистичні методи, зокрема, факторний дисперсійний, кореляційний та регресійний аналізи, які реалізовані



Рис. 1. Територіальний об'єкт досліджень (біля смт «Буди» Харківського району Харківської області): а – місце розташування та склад ґрунтового покриву, б – картосхема ізоліній рельєфу та регулярна сітка з точками відбору зразків ґрунту

за допомогою комп'ютерних програм Excel та Statistica 10. Для оцінювання просторового аналізу даних використано геостатистичний метод, який проведено за допомогою програми ArcGIS 10.4.1.

Проаналізовано погодні показники періоду досліджень, оскільки урожайність вирощуваних сільськогосподарських культур у значній мірі визначалася кліматично-погодними умовами, що склалися на дослідженій території. В цілому, впродовж вегетаційних періодів зростання культур зафіксовано підвищення показників температури повітря: у 2020 році – на +2,2°C та на +1,2°C у 2021 році порівняно середньобогаторічними даними. По різному склалися умови зволоження: найменше опадів випало у 2020 р. – 471 мм, що на 89 мм менше порівняно з середньобогаторічними даними, у 2021 р. фактична кількість опадів перевищувала середньобогаторічну на 79 мм і становила 639 мм. За розрахунками гідротермічного коефіцієнту (ГТК) Селянинова територія об'єкту характеризувалася дуже сухими умовами 2020 року (ГТК = 0,3) та достатньо вологими умовами 2021 року (ГТК = 1,3).

Основні результати дослідження. За період досліджень середня врожайність пшениці озимої становила 40,1 ц/га, соняшника – 63,5 ц/га, такі показники є доволі високими порівняно із середньою врожайністю по Україні та Харківській області згідно існуючих статистичних даних [12; 13]. У цей період середня урожайність пшениці озимої становила 38,0 ц/га в цілому по Україні та 38,8 ц/га по Харківській області, соняшнику – 24,4 ц/га по Україні та 24,6 ц/га по Харківській області. Доволі високий рівень урожайності соняшника може бути пояснений невисокою врожайністю цієї культури, доволі сприятливими погодно-кліматичними умовами, використанням високоякісного насіннєвого матеріалу та вчасним здійсненням всіх агротехнологічних заходів.

В ході досліджень оцінено просторову неоднорідність основних агрофізичних властивостей орних ґрунтів (показників структурно-агрегатного складу, твердості та щільності будови) в межах територіального об'єкту. Встановлено, що більша частина досліджених ґрунтів у 2020 році характеризувалася сприятливими

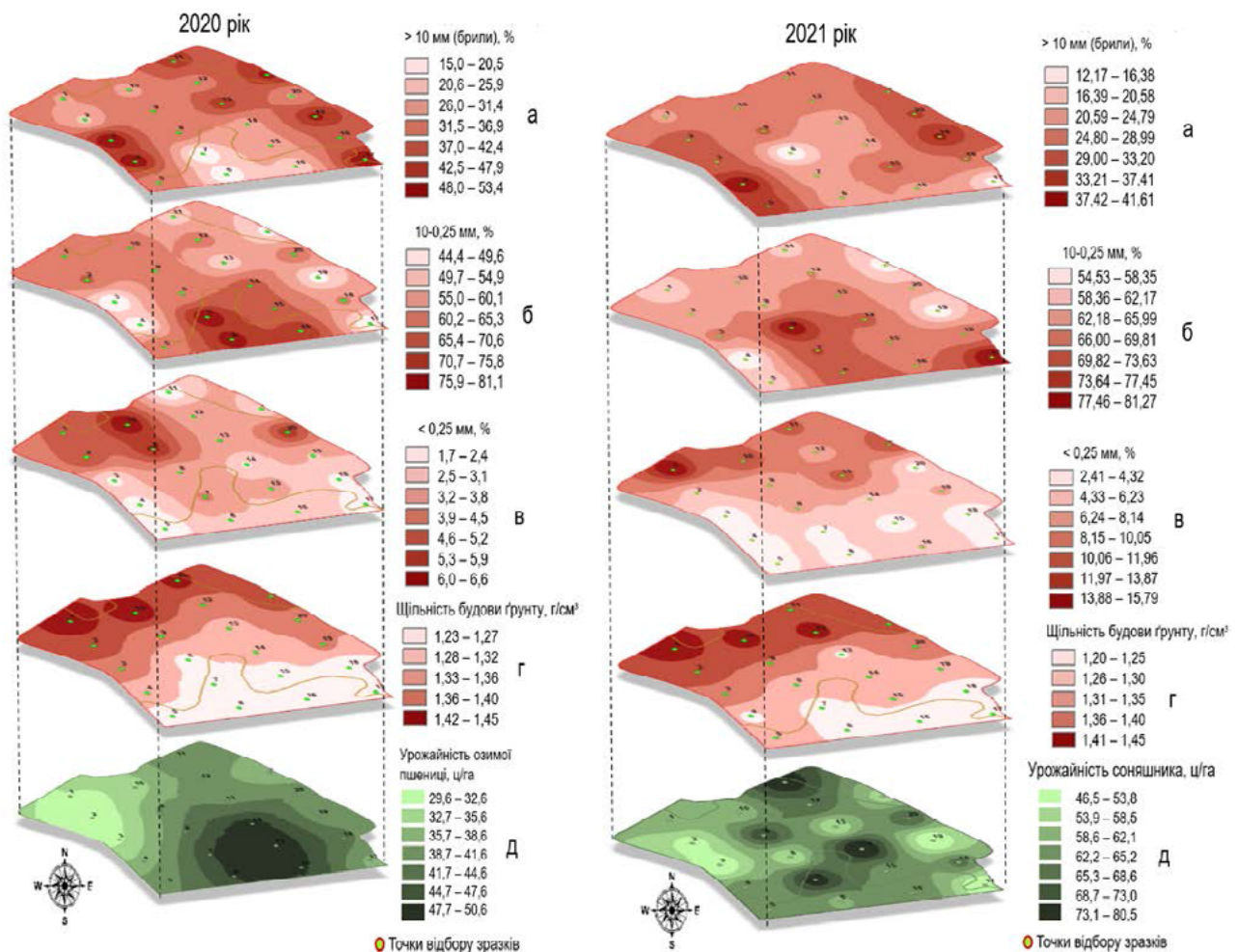


Рис. 2. Модель візуалізації сумісного впливу неоднорідності агрофізичних властивостей ґрунту на урожайність с.-г. культур:

а – вміст агрегатів брилистої фракції,%; б – вміст агрономічно цінних агрегатів,%; в – вміст агрегатів пилюватої фракції,%; г – щільність ґрунту у шарі 0-30 см, г/см³; д – урожайність озимої пшениці та соняшника, ц/га

показниками структурно-агрегатного складу (рис. 2 а-в): 61,9% від загальної площі території характеризувалася добрим, 33,3% – задовільним та 4,8% – відмінним структурним станом. У 2021 році порівняно з попереднім періодом зафіксовано зменшення вмісту брилистої фракції на 23% та збільшення пилуватої фракції на 90% в зоні розташування сірих опідзолених середньозмитих ґрунтів. У результаті статистичного аналізу отриманих даних встановлено, що найбільшою неоднорідністю характеризувався вміст брилистої фракції (часточок розміром >10 мм), коефіцієнт варіації (Kv) дорівнював 0,33) та вміст пилуватої фракції (часточок розміром <0,25 мм), Kv = 0,42.

Показник твердості досліджених ґрунтів змінювався в межах від 8,8 до 14,3 кгс/см², сягаючи максимальних значень у шарі 20–30 см для ясно-сірого середньозмитого ґрунту. В цілому, вся площа об'єкту характеризувалася твердістю, яка не перевищувала значення припустимих параметрів цього показника для проростання та розвитку більшості сільськогосподарських культур (<15 кгс/см²) [7].

Щільність будови досліджених ґрунтів варіювала в межах від 1,20 г/см³ до 1,45 г/см³, зафіксовано перевищення допустимих параметрів щільності будови (> 1,3 г/см³) у тих частинах об'єкту, де ґрунтовий покрив представлено ясно-сірими та сірими опідзоленими слабо- та середньозмитими важкосуглинковими та легкоглинистими ґрунтами (рис. 2 г).

В межах територіального об'єкту зафіксовано строкатість урожайних даних (рис. 2 д): пшениці озимої – від 29,6 ц/га до 50,6 ц/га, сягаючи максимальних значень у повнопрофільних сірих опідзолених ґрунтах. Зі зменшенням висот місцевості (зростанням градусів нахилу поверхні) та появою еродованих (змитих) різновидів сірих та ясно-сірих опідзолених ґрунтів урожайність культури знижувалася. Варіювання урожайності соняшнику становило від 46,5 ц/га до 80,5 ц/га,

при цьому найвищі показники відмічено в зоні розміщення повнопрофільних сірих опідзолених важкосуглинкових ґрунтів.

Візуально, порівнюючи картограму врожайності з картографами просторового розподілу агрофізичних властивостей ґрунтів (рис. 2), відмічено підвищення продуктивності пшениці озимої зі зменшенням вмісту брилистої фракції, збільшенні вмісту фракцій агрономічно цінного розміру (часточок розміром 10–0,25 мм) та зменшенні величини щільності будови досліджених ґрунтів. Аналогічна тенденція спостерігалася також при вирощуванні соняшнику.

В цілому, найвищі показники урожайності обох культур отримано на сірих опідзолених ґрунтах. Зниження врожайності зафіксовано на їх змитих різновидах та ясно-сірих опідзолених ґрунтах. Зменшення врожайності пояснюється тим, що ці ґрунти, знаходячись на схилах різної крутизни, характеризуються гіршими фізичними властивостями, втрачають частину вологи з поверхневим стоком і саме на них досить активно проявляється розвиток ерозійних процесів.

За допомогою кореляційного аналізу оцінено залежність урожайності пшениці озимої (табл. 1) та соняшника (табл. 2) окремо від кожного з досліджених агрофізичних ґрунтових показників. Із наукових джерел відомо, що сильна або тісна кореляція є, коли коефіцієнт кореляції $|r| \geq 0,7$; середня кореляція, коли $0,5 \leq |r| < 0,7$; помірна, коли $0,3 \leq |r| < 0,5$; слабка, коли $0,2 \leq |r| < 0,3$ та дуже слабка, якщо $|r| < 0,2$ [6].

Оцінено значущість взаємозв'язків між окремими дослідженими показниками: встановлено дуже високу зворотну кореляцію між вмістом брилистої фракції та вмістом агрономічно-цінних агрегатів ($r = -0,9884$), вмістом пилуватої фракції повітряно-сухих агрегатів та вмістом водостійких агрегатів >0,25 мм ($r = -0,8201$), твердістю в шарі 0–10 см та 10–20 см ($r = 0,8167$) та позитивну кореляцію між твердістю у шарі 10–20 см та 20–30 см ($r = 0,8063$). Урожайність пшениці озимої

Таблиця 1

Матриця коефіцієнтів кореляції урожайності пшениці озимої з дослідженими фізичними властивостями

	у	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
у	1									
X ₁	-0,5271	1								
X ₂	0,5936	-0,9884	1							
X ₃	-0,1056	-0,4148	0,2941	1						
X ₄	0,1770	0,2996	-0,2036	-0,8201	1					
X ₅	-0,3575	0,1150	-0,1407	-0,0477	-0,1721	1				
X ₆	-0,2709	0,1429	-0,1640	-0,0112	-0,2443	0,8167	1			
X ₇	-0,0419	0,1422	-0,1630	-0,0771	-0,1784	0,6032	0,8063	1		
X ₈	-0,3991	0,0771	-0,1501	0,4612	-0,6791	0,2047	0,2939	0,2279	1	
X ₉	0,4370	-0,1844	0,2781	-0,5353	0,5707	-0,0891	-0,1385	-0,1414	-0,9051	1

Умовні позначення: у – урожайність, ц/га; X₁ – вміст агрегатів >10 мм; X₂ – вміст агрономічно цінних агрегатів (10-25 мм); X₃ – вміст агрегатів <0,25 мм; X₄ – вміст водостійких агрегатів >0,25 мм; X₅ – твердість у шарі 0–10 см; X₆ – твердість у шарі 10–20 см; X₇ – твердість у шарі 20-30 см; X₈ – щільність ґрунту у шарі 0-30 см, X₉ – вміст часточок фізичної глини <0,01 мм, %.

продемонструвала середню кореляцію з вмістом брилистої фракції ($r=0,5271$) та вмістом агрономічно цінних агрегатів ($r=0,5936$); помірна кореляція простежувалася з твердістю у шарі 0–10 см ($r=0,3575$). З іншими дослідженими показниками кореляція виявилася слабкою.

Подібні результати отримано і для соняшника: встановлено середню кореляцію між урожайністю соняшника та вмістом агрономічно цінних агрегатів ($r=0,5151$) та помірну кореляцію із вмістом брилистої фракції ($r=0,4651$). Решта показників також слабо корелювала з урожайністю культури.

Таблиця 2

Матриця коефіцієнтів кореляції урожайності соняшника з дослідженими фізичними властивостями

	Y	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
Y	1									
X ₁	-0,4651	1								
X ₂	0,5151	-0,9884	1							
X ₃	0,0516	-0,4148	0,2941	1						
X ₄	-0,1224	0,2996	-0,2036	-0,8201	1					
X ₅	-0,1882	0,1150	-0,1407	-0,0477	-0,1721	1				
X ₆	0,0083	0,1429	-0,1640	-0,0112	-0,2443	0,8167	1			
X ₇	0,1141	0,1422	-0,1630	-0,0771	-0,1784	0,6032	0,8063	1		
X ₈	0,0251	0,0771	-0,1501	0,4612	-0,6791	0,2047	0,2939	0,2279	1	
X ₉	0,1255	-0,1844	0,2781	-0,5353	0,5707	-0,0891	-0,1385	-0,1414	-0,9051	1

Умовні позначення наведено у табл. 1.

Таблиця 3

Математичні регресійні моделі залежності урожаю пшениці озимої від агрофізичних показників ґрунту

Форма залежності	Математична модель (або рівняння регресії)	Регресійна статистика
Лінійна парна	$Y = 61,29 - 0,60 \cdot X_1$	$R = 0,53; R^2 = 0,28$
	$Y = 0,73 \cdot X_2 - 4,30$	$R = 0,59; R^2 = 0,35$
	$Y = 43,23 - 0,97 \cdot X_3$	$R = 0,11; R^2 = 0,01$
	$Y = 24,87 + 0,24 \cdot X_4$	$R = 0,18; R^2 = 0,03$
	$Y = 111,65 - 7,48 \cdot X_5$	$R = 0,36; R^2 = 0,13$
	$Y = 93,82 - 5,03 \cdot X_6$	$R = 0,27; R^2 = 0,07$
	$Y = 48,08 - 0,71 \cdot X_7$	$R = 0,04; R^2 = 0,002$
Лінійна множинна	$Y = 5,16 \cdot X_1 + 6,04 \cdot X_2 + 6,17 \cdot X_3 + 0,39 \cdot X_4 - 2,62 \cdot X_5 - 8,82 \cdot X_6 + 11,72 \cdot X_7 + 0,09 \cdot X_8 - 575,27$	$R = 0,84; R^2 = 0,71;$ нормований $R^2 = 0,51;$ стандартна похибка 9,2

Умовні позначення: Y – урожайність, ц/га; X₁ – вміст агрегатів >10 мм; X₂ – вміст агрономічно цінних агрегатів (10–25 мм); X₃ – вміст агрегатів <0,25 мм; X₄ – вміст водостійких агрегатів >0,25 мм; X₅ – твердість у шарі 0–10 см; X₆ – твердість у шарі 10–20 см; X₇ – твердість у шарі 20–30 см; X₈ – щільність ґрунту у шарі 0–30 см, X₉ – вміст часточок фізичної глини <0,01 мм, %.

Таблиця 4

Математичні регресійні моделі залежності урожаю соняшника від агрофізичних показників ґрунту

Форма залежності	Математична модель (або рівняння регресії)	Регресійна статистика
Лінійна парна	$Y = 76,47 - 0,40 \cdot X_1$	$R = 0,47; R^2 = 0,22$
	$Y = 33,29 + 0,48 \cdot X_2$	$R = 0,52; R^2 = 0,27$
	$Y = 61,02 + 0,36 \cdot X_3$	$R = 0,05; R^2 = 0,003$
	$Y = 70,08 - 0,13 \cdot X_4$	$R = 0,12; R^2 = 0,01$
	$Y = 90,73 - 0,97 \cdot X_5$	$R = 0,19; R^2 = 0,04$
	$Y = 60,99 + 0,12 \cdot X_6$	$R = 0,01; R^2 = 0,0001$
	$Y = 45,45 + 1,45 \cdot X_7$	$R = 0,11; R^2 = 0,01$
	$Y = 59,21 + 0,07 \cdot X_8$	$R = 0,13; R^2 = 0,02$
Лінійна множинна	$y = 4,91 \cdot X_1 + 5,65 \cdot X_2 + 4,03 \cdot X_3 + 0,02 \cdot X_4 - 4,38 \cdot X_5 + 0,50 \cdot X_6 + 5,81 \cdot X_7 - 0,09 \cdot X_8 - 496,83$	$R = 0,77; R^2 = 0,59;$ нормований $R^2 = 0,31$ стандартна похибка 8,2

Умовні позначення наведено у табл. 1.

Для більш детального оцінювання впливу агрофізичних показників на урожай пшениці озимої (табл. 3) та соняшнику (табл. 4) за допомогою регресійного аналізу розраховано лінійні парні математичні моделі для кожного показника та лінійні множинні математичні моделі, які було побудовано з урахуванням колінеарності перемінних, тобто тих, які є взаємозалежними та сильно корелюють між собою.

Простежувалася сильна кореляція між урожайністю пшениці озимої та сумісним впливом агрофізичних показників ($r=0,84$). Коефіцієнт детермінації (R^2) при цьому становив 0,71. Нормований R^2 демонструє наскільки зміна Y може бути визначено змінними X , тобто, ця величина вказує на адекватність рівняння регресії.

Отже у нашому випадку 51% – адекватність регресійної моделі. Стандартна похибка – на рівні 9,2%.

Враховуючи сумісний вплив досліджених агрофізичних показників ґрунту, виявлено сильну кореляцію з урожайністю соняшника ($r=0,77$; $R^2=0,59$). Тобто, розсіювання урожайності (Y) на 59% пояснювалося змінами агрофізичних показників i , відповідно, 41% пояснювалося впливом інших факторів (наприклад, вмістом гумусу та основних елементів живлення, кліматичними умовами, умовами господарювання та ін.). Нормований $R^2=0,31$, стандартна похибка – 8,2%.

Отже, отримані результати продемонстрували, що агрофізичні показники суттєво впливають на формування урожаю вирощуваних сільськогосподарських культур, при цьому їх просторова неоднорідність здатна відбиватися на урожайності культур, утворюючи у межах об'єкту ділянки з різною продуктивністю.

Висновки. Просторова неоднорідність агрофізичних властивостей орних ґрунтів відбивається на врожайності вирощуваних культур у межах територіального об'єкту. Відмічено підвищення врожайності культур зі зменшенням величини щільності будови, а також зниженням вмісту брилих фракцій. Водночас із підвищенням фракцій агрономічно-цінного розміру продуктивність культур збільшувалася. Математично підтверджено існування взаємозв'язків між окремими фізичними показниками та урожайністю культур.

В цілому, це доводить необхідність проведення моніторингу агрофізичних властивостей ґрунтів з метою виявлення ділянок поля, де агрофізичні параметри ґрунтів набувають критичних значень, що свідчить про розвиток процесів фізичної деградації і може вкрай негативно впливати на врожайність сільськогосподарських культур. У зв'язку з вищезначеним необхідним є розробка та впровадження протидеградаційних заходів, спрямованих на оптимізацію агрофізичних властивостей орних ґрунтів та підвищення врожайності сільськогосподарських культур.

Література

1. Бець Т. Ю. Просторова неоднорідність твердості ґрунту та її зв'язок з електричною провідністю ґрунту та продуктивністю соняшника. *Біологічний вісник МДПУ*. 2013. № 2 (8). 30–44.

2. ДСТУ 4287:2004. Якість ґрунту. Відбирання проб. [Чинний від 2005-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 9 с.

3. ДСТУ 4744:2007. Якість ґрунту. Визначання структурно-агрегатного складу ситовим методом у модифікації Н.І. Саввінова. [Чинний від 2008-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 11 с.

4. ДСТУ 5096:2008. Якість ґрунту. Визначення твердості ґрунту твердоміром Ревякіна. [Чинний від 2009-03-01.]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 7 с.

5. Малієнко А.М., Скурятін Ю.М. Агрофізична концепція редукції продуктивності перелогів на сірому лісовому ґрунті. *Вісник аграрної науки*. 2006. № 2. С. 15–18.

6. Мармоза А.Т. Теорія статистики. 2-ге вид. перероб. та доп. Київ : «Центр учбової літератури», 2013. 592 с.

7. Медведєв В.В. Твердість ґрунту як критерій для обґрунтування технологій і технічних засобів з його обробітку. *Вісник аграрної науки*. 2010. № 4. С. 14–18.

8. Медведєв В.В., Бігун О.М. Антропогенне перещільнення кореневмісного шару чорноземних ґрунтів. *Вісник аграрної науки*. 2014. № 10. С. 55–60.

9. Продуктивність сільськогосподарських культур залежно від елементів біологізації землеробства в умовах центрального полісся України / Р.Б. Кропивницький та ін. *Sciences of Europe*. 2020. Vol. 2(59). Р. 4–7.

10. Спосіб визначення щільності будови ґрунту: пат. 123878 Україна: МПК G01N 33/24 (2006/01). № у 2017 09763; заявл. 09.10.2017; опубл. 12.03.2018, Бюл. № 5.

11. Стародубцев В.М., Власенко І.С., Басараб Р.М., Комарчук Д.С. Просторова неоднорідність продуктивності типових чорноземів на полях з мікрозападинами. *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*. № 3 (73). 2018. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd_2018_3_6.

12. Урожайність культур сільськогосподарських. Статистичний щорічник України за 2020 рік / За редакцією І.Є. Вернера. Київ : Державна служба статистики України, 2020. С. 296.

13. Урожайність культур сільськогосподарських. Статистичний щорічник України за 2021 рік / За редакцією І.Є. Вернера. Київ : Державна служба статистики України, 2021. С. 292.

14. Шиліна Л.І., Шаповал І.Е., Ермолаєв М.М. Зміна структурно-агрегатного стану чорнозему типового під впливом чинників землеробства. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2006. Спец. вип. Кн. 2. С. 188–190.

15. Gholoubi A., Emami H. Caldwell T. Deforestation effects on soil aggregate stability quantified by the high-energy moisture characteristic method. *Geoderma*. 2019. Vol. 355. 113919. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113919>.

16. Impact of in-field soil heterogeneity on biomass and yield of winter triticale in an intensively cropped hummocky landscape under temperate climate conditions / M. Habib-ur-Rahman, A. Raza,

H.E. Ahrends, H. Hüging, T. Gaiser. *Precision Agriculture*. 2022. Vol. 23. P. 912–938. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09868-x>.

17. Ma L., Wang Q., Shen S., Li F. Heterogeneity of soil structure and fertility during desertification of alpine grassland in northwest Sichuan. *Ecosphere*. 2020. Vol. 11(7). e03161. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3161>.

18. Tariq A., Gunina A., Lamersdorf N. Initial changes in soil properties and carbon sequestration potential under monocultures and short-rotation alley coppices with poplar and willow after three years of plantation. *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 634. P. 963–973. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.391>.

19. The effect of soil strength on the yield of wheat / W.R. Whalley et al. *Plant Soil*. 2008. Vol. 306. P. 237–247. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9577-5>.

20. The response of process-based agro-ecosystem models to within-field variability in site conditions / E. Wallor et al. *Field Crops Research*. 2018. Vol. 228. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.08.021>.

21. Vieira S.R., Gonzalez A.P. Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. *Bragantia*, 2003. Vol. 62(1), P. 127–138. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052003000100016>.

22. Whole-profile soil organic matter content, composition, and stability under cropping systems that differ in belowground inputs / H.J. Poffenbarger et al. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2020. Vol. 291. 106810. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106810>.

References

1. Bets, T. Yu. (2013). Prostorova neodnoridnist tverdosti gruntu ta yiyi zv'yazok z elektrichnoyu providnistyu gruntu ta produktivistyu sonyashnika [Spatial variability of the soil mechanical impedance and its connection with electrical conductivity and productivity of sunflower]. *Biological Bulletin MNMU*, 2 (8), 30–44. [in Ukrainian].

2. DSTU 4287:2004. (2005). Yakist gruntu. Vidbirannya prob. [Chynnyi vid 2005-07-01] [Soil quality. Sampling]. Kyiv, 9 [in Ukrainian].

3. DSTU 4744:2007. (2005). Yakist gruntu. Vznachannya strukturno-agregatnogo skladu sitovim metodom u modifikaciyi N.I. Savvinova. [Chynnyi vid 2008-01-01] [Soil quality. Determination of the structural and aggregate composition by the sieve method in the modification of N.I. Savvinov]. Kyiv, 11 [in Ukrainian].

4. DSTU 5096:2008. (2009). Yakist gruntu. Vznachennya tverdosti gruntu tverdomirom Revyakina. [Chynnyi vid 2009-03-01.] [Soil quality. Determination of soil hardness by the Revyakina hardness tester]. Kyiv, 7. [in Ukrainian].

5. Maliyenko, A.M. & Skuryatin, Yu.M. (2006). Agrofizichna koncepciya redukciyi produktivnosti perelogyv na siromu lisovomu gruntu [Agrophysical concept of fallow productivity reduction on gray forest soil]. *Bulletin of Agricultural Science*, 2, 15–18. [in Ukrainian].

6. Marmoza, A.T. (2013). Teoriya statistiki [Theory of statistics]. 2nd edition. Kyiv: "Center for Educational Literature". 592. [in Ukrainian].

7. Medvedev, V.V. (2010). Tverdist gruntu yak kriterij dlya obgruntuvannya tehnologij i tehnicnih zasobiv z jogo obrobitku [Soil hardness as a criterion for justifying technologies and technical means for its cultivation]. *Bulletin of Agricultural Science*, 4, 14–18. [in Ukrainian].

8. Medvedev, V.V. & Bigun, O.M. (2014). Antropogenne pereushilnennya korenevismnogo sharu chornozemnih gruntiv [Anthropogenic overcompaction of the root layer of chernozem soils]. *Bulletin of Agricultural Science*, 10, 55–60. [in Ukrainian].

9. Kropyvnytskyi, R., Bendiukevich, V., Halitskyi, P., Antonyuk, N. & Kravchuk, A. (2020). Produktivnist silskogospodarskih kultur zalezno vid elementiv biologizaciyi zemlerobstva v umovah centralnogo polissya Ukraini [Productivity of agricultural crops depending on elements of biologization of agriculture in the conditions of the central polissya of Ukraine]. *Sciences of Europe*, 2(59), 4–7. [in Ukrainian].

10. Patent 123878 UA (2018). Sposib viznachen-nya shilnosti budovi gruntu [Patent for utility model 123878 UA, IPC: G01N 33/24 (2006/01). *Method of determining bulk density of soil* / Medvedev, V.V., Bigun, O.M., & Plisko, I.V. Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovations: publ. 12.03.2018, Bull. 5. [in Ukrainian].

11. Starodubtsev, V.M., Vlasenko, I.S., Basarab, R.M. & Komarchuk, D.S. (2018). Prostorova neodnoridnist produktivnosti tipovih chornozemiv na polyah z mikrozapadinami [Special heterogeneity in productivity of typical chernozem in fields with micro-depressions ("potholes")]. *Scientific reports of NULES of Ukraine*, 3(73). URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd_2018_3_6. [in Ukrainian].

12. Urozhajnist kultur silskogospodarskih [Yield of agricultural crops]. (2020). Statistical Yearbook of Ukraine for 2020. In I. E. Werner ed. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine, 296. [in Ukrainian].

13. Urozhajnist kultur silskogospodarskih [Yield of agricultural crops]. (2021). Statistical Yearbook of Ukraine for 2021. In I. E. Werner ed. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine, 292. [in Ukrainian].

14. Shilina, L.I., Shapoval, I.E. & Yermolaev, M.M. (2006). Zmina strukturno-agregatnogo stanu chornozemu tipovogo pid vplivom chinnikov zemlerobstva [Changes in the structural and aggregate state of typical chernozem under the influence of agricultural factors]. *AgroChemistry and Soil Science*. Special issue, Book 2, 188–190. [in Ukrainian].

15. Gholoubi, A., Emami, H. & Caldwell, T. (2019). Deforestation effects on soil aggregate stability quantified by the high-energy moisture characteristic method. *Geoderma*, 355, 113919. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113919>.

16. Habib-ur-Rahman, M., Raza, A., Ahrends, H.E., Hüging, H. & Gaiser, T. (2022) Impact of in-field soil heterogeneity on biomass and yield of winter triticale in an intensively cropped hummocky landscape under temperate climate conditions. *Precision Agric*, 23, 912–938. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09868-x>.

17. Ma, L., Wang, Q., Shen, S. & Li, F. (2020). Heterogeneity of soil structure and fertility during desertification of alpine grassland in northwest Sichuan. *Ecosphere*, 11(7), e03161. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3161>.

18. Tariq, A., Gunina, A., & Lamersdorf, N. (2018). Initial changes in soil properties and carbon sequestration potential under monocultures and short-rotation alley coppices with poplar and willow after three years of plantation. *Science of the Total Environment*, 634, 963–973. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.391>.

19. Whalley, W.R., Watts, C.W., Gregory, A.S., Mooney, S.J., Clark, L.J. & Whitmore, A.P. (2008). The effect of soil strength on the yield of wheat. *Plant Soil*. 306, 237–247. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9577-5>.

20. Wallor, E., Kersebaum, K.-C., Ventrella, D., Bindi, M., Cammarano, D., Couchney, E. ... Trombi, G.

(2018). The response of process-based agro-ecosystem models to within-field variability in site conditions. *Field Crops Research*, 228, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.08.021>.

21. Vieira, S.R., & Gonzalez, A.P. (2003). Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. *Bragantia*, 62(1), 127–138. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052003000100016>.

22. Poffenbarger, H.J., Olk, D.C., Cambardella, C., Kersey, J., Liebman, M., Mallarino, A. ... Castellano, M.J. (2020). Whole-profile soil organic matter content, composition, and stability under cropping systems that differ in belowground inputs. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 291. 106810. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106810>.