



УДК 631.431.7: 632.125:633.1
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.22>

МОДЕЛЮВАННЯ МІЛІТАРНОГО ВПЛИВУ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ НА БІОЛОГІЧНИЙ УРОЖАЙ ПШЕНИЦІ ЯРОЇ НА ҐРУНТАХ РІЗНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ

І. В. Пліско¹, К. Ю. Романчук²

Вивчення деградаційних явищ, які відбуваються в умовах сучасного землекористування, є надзвичайно актуальним напрямом наукових досліджень в аграрній сфері. Ущільнення ґрунту є одним із найбільш поширених і негативних явищ прояву фізичної деградації, спричинених інтенсивним використанням сільськогосподарської техніки, нерегульованими технологіями обробітку, а в умовах сьогодення – веденням військових дій на території України. Метою дослідження було моделювання мілітарного впливу різних рівнів ущільнення та зволоження ґрунту на проростання, ріст і продуктивність сільськогосподарських культур (на прикладі пшениці ярої) на орних ґрунтах різного гранулометричного складу Лівобережного Лісостепу України. Методи досліджень – аналітико-бібліографічний, лабораторно-модельний, математично-статистичний. Встановлено, що показник щільності будови ґрунту мав тісний зворотний зв'язок з показниками посівних якостей насіння за вирощування рослин: на супіщаному ґрунті (коефіцієнт кореляції R варіював від -0,73 до -0,83), на важкосуглинковому ґрунті – $R=-0,83$ – із показником швидкості проростання, з рештою показників мав середній зворотний зв'язок. Ущільнення ґрунту $> 1,4 \text{ г/см}^3$ та низький рівень зволоження (на рівні 60% від найменшої вологості (НВ)) призводили до погіршення показників кореневої системи та зменшення величини біологічного урожаю культури на 7 та 10% відповідно на ґрунтах важкосуглинкового на супіщаного гранулометричного складу порівняно з контролем. Таким чином, досвід моделювання впливу рівнів ущільнення та вологості ґрунту на проростання

¹ 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)
e-mail: irinachujan@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8111-7662

² кандидат сільськогосподарських наук,
старший науковий співробітник лабораторії геоєкофізики ґрунтів
імені академіка НААН В.В. Медведєва
(Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О.Н. Соколовського», м. Харків)
e-mail: katerina_uvarenko@ukr.net
ORCID: 0000-0002-1150-3135

насіння та врожайність сільськогосподарських культур може бути покладений в основу розробки ефективних заходів щодо упередження та подолання мілітарної деградації орних ґрунтів.

Ключові слова: вологість, гранулометричний склад, мілітарна та фізична деградація, орні ґрунти, пшениця яра, щільність будови.

MODELING THE MILITARY IMPACT OF SOIL COMPACTION ON THE BIOLOGICAL YIELD OF SPRING WHEAT ON SOILS WITH DIFFERENT GRANULOMETRIC COMPOSITION

I. V. Plisko, K. Yu. Romanchuk

The research of degradation phenomena that occur in the conditions of modern land use is an up-to-date direction of scientific research in the agrarian field. Soil compaction is one of the most widespread and negative phenomena of physical degradation caused by the intensive use of agricultural machinery, unregulated cultivation technologies, and in today's conditions, the conduct of military operations on the territory of Ukraine. The purpose of the research was to modeling the military effect of different levels of soil compaction and moistening on the germination, growth and productivity of agricultural crops (using the example of spring wheat) on arable soils of different granulometric composition of the Left Bank Forest Steppe of Ukraine. Research methods are analytical-bibliographic, laboratory-model, mathematical-statistical. It was established that the indicator of the soil bulk density had a close inverse correlation with the indicators of the sowing qualities of the seeds for growing plants: on sandy loam soil (the correlation coefficient R varied from -0.73...to -0.83). On heavy loamy soil the correlation coefficient R was -0.83 – with the rate of germination, with the rest of the indicators had an average correlation.

Soil compaction $> 1.4 \text{ g/cm}^3$ and a low level of moisture (at the level of 60% of the field soil water capacity) led to the deterioration of the root system and a decrease in the biological yield of the crop: by 7% and 10%, respectively, on heavy loam and sandy loam soils granulometric composition compared to the control. Thus, the experience of modeling the influence of compaction levels and soil moisture on seed germination and crop yield can be used as a basis for developing effective measures to prevent and overcome military degradation of arable soils.

Key words: humidity, granulometric composition, military and physical degradation, arable soils, spring wheat, soil bulk density.

Вступ

З початком широкомасштабного вторгнення російської федерації на територію України до усіх наявних видів деградації додалась ще й мілітарна деградація. За час ведення військових дій, за даними FAO, 33% українських сільськогосподарських земель зазнали суттєвої деградації. У НААН економічні збитки від деградації ґрунтів до початку війни оцінили орієнтовно в 40 млрд грн на рік (В Україні..., 2022). У зв'язку з продовженням ведення військових дій збитки від мілітарної деградації продовжують збільшуватися щодня (Концептуальні..., 2024).

Одним з видів мілітарної деградації є фізична деградація, яка особливо негативно впливає на сільськогосподарські ґрунти, що проявляється в значному погіршенні агрофізичних властивостей ґрунтів, зокрема у їх переущільненні внаслідок проходів важкої військової техніки, штучному утворенні вкрай переущільнених ділянок

у місцях її базування, створення розворотних смуг тощо. У зоні ведення військових дій на території України домінують чорноземні ґрунти зі щільністю будови $1,1\text{--}1,5 \text{ г/см}^3$. Проте загроза переущільнення (щодо вимог більшості ярих культур до посівного шару) існує на 60% ріллі країни, що становить близько 17,2 млн га (Медведєв та ін., 2020). Переущільнення ґрунтів виникає здебільшого у верхніх шарах ґрунту, особливо в їх орному шарі, при цьому глибина ущільненої колії становить 10–12 см (Пліско та ін., 2023). За надмірної вологості ґрунту збільшується глибина ущільнення у профілі ґрунту та підсилюється розвиток ерозійних процесів, може спостерігатися замулення або заболочення місцевості (Anderson et al., 2005; Peggy & Stephen, 2005).

Ґрунти різного гранулометричного складу (гранскладу) неоднаково реагують на механічне навантаження через відмінності в розмірах і структурі ґрунтових частинок. Ґрунти піщаного та супіщаного гранскладу є менш схильними до ущільнення, але їх

здатність утримувати воду є нижчою, що може впливати на доступність вологи для кореневої системи сільськогосподарських культур. Суглинкові та глинисті ґрунти навпаки добре утримують вологу, але під дією важкої техніки вони є більш схильними до ущільнення. Внаслідок проходження таких агрегатів по пухкому вологому ґрунті відбувається його деформація до глибини 60–80 см, а в окремих випадках і глибше. На важких ґрунтах у посушливих умовах відбувається руйнування структурних агрегатів ґрунту, спричиняючи розвиток процесів дефляції. Найбільше змінюється щільність будови орного шару, її максимальні значення досягають 1,35–1,45 г/см³ після 4–7 проходів (Медведєв, 2002).

Україна як одна із провідних країн, що забезпечує світову продовольчу безпеку, внаслідок ведення військових дій на її території зазнає значних збитків у вигляді недоборів урожаїв сільськогосподарських культур. За даними багатьох вчених (Dejong-Hughes et al., 2001; Тонха та ін., 2020; Shaheb et al., 2021; Асмаковський, 2022), продуктивність (врожайність) рослин на ущільнених ґрунтах може падати на 40–60%.

Таким чином, всебічні дослідження ущільнення ґрунту та його вплив на сільськогосподарські рослини у сучасних умовах набувають особливої актуальності, адже, за даними науковців, близько 20% земель сільськогосподарського призначення зазнали значного негативного впливу воєнних дій (Ґрунтовий..., 2024). Актуальність цих досліджень підсилюється також необхідністю розробки ефективних заходів щодо подолання наслідків переущільнення орних ґрунтів як

прояву фізичної деградації, що є складовою частиною мілітарної деградації ґрунтів сільськогосподарського призначення.

Мета дослідження – моделювання різних рівнів ущільнення та вологості ґрунтів для вивчення їхнього впливу на проростання та особливості формування біологічного урожаю пшениці ярої на ґрунтах різного гранулометричного складу для оцінювання впливу прояву фізичної деградації орних ґрунтів.

Матеріал і методи

Для досягнення поставленої мети було закладено лабораторно-модельний дослід, схему якого представлено у табл. 1. Схема досліду включала 12 варіантів, у яких було штучно змодельовано два рівні ущільнення – оптимальний (1,1–1,2 г/см³) та надмірний (>1,4 г/см³) на фоні трьох рівнів вологості ґрунту – низького, середнього та високого, що відповідно становило 60, 80 та 100% від найменшої вологоємності (далі – НВ).

Об'єктами дослідження обрано ґрунти, розташовані у Харківському районі Харківської області, з різним гранулометричним складом: важкосуглинковий ґрунт представлено чорноземом опідзоленим на лесоподібному суглинку (відібрано на дослідному полі ДП ДГ «Граківське» поблизу с. Коротич), супіщаний ґрунт представлено лучним глибокослабосолонцюватим солончаковим на алювіальних і делювіальних відкладах (відібрано поблизу сел. Пісочин). Вирощувана культура – пшениця тверда яра (*Triticum durum* Desf) сорту Ксантия. Дослідження проведено у лабораторних умовах шляхом вирощування рослин у світловій шафі у вегетаційних посудинах об'ємом 1,4 дм³ у 3-кратному повторенні.

Таблиця 1

Схема лабораторно-модельного дослідів

№ варіанта	Гранулометричний склад ґрунту	Щільність будови ґрунту, г/см ³	Вологість ґрунту, % від НВ
1	важкосуглинковий	1,1–1,2	60
2			80
3			100
4		> 1,4	60
5			80
6			100
7	супіщаний	1,1–1,2	60
8			80
9			100
10		> 1,4	60
11			80
12			100

Рівні ущільнення ґрунту, задані схемою, були створені штучно дерев'яним ущільнювачем шляхом трамбування. Кількість ударів для створення необхідних рівнів ущільнення була попередньо встановлена експериментальним шляхом. Для розрахунку норми поливу перед закладанням досліду визначали польову вологість та найменшу вологемність ґрунту. Протягом експерименту здійснювали фенологічні спостереження за фазами розвитку рослин пшениці ярої. Проводили підрахунок пророслого насіння, фіксували дати появи 1-го, 2-го, 3-го та 4-го листків, проводили морфометричні виміри висоти рослин у динаміці за фазами розвитку відповідно до міжнародної шкали ВВСН, яку в Україні почали активно використовувати з 2013 року (Порівняльна..., 2018). Тривалість проведення лабораторно-модельного досліду до макростадії 1: розвиток листків; 14 – стадії четвертого розгортаного листка.

Визначено морфологічні параметри кореневої системи – довжину та масу. Розраховано коефіцієнт продуктивності коренів (як відношення сухої маси надземної частини рослин на посудину до сухої маси коренів) та біологічний урожай вирощуваної культури як суму сирої біологічної (надземної і кореневої) маси рослин.

За результатами досліду розраховано показники енергії проростання (Е, %), схожість (С, %), швидкість проростання (Ш, діб), дружність проростання (Д, %) та індекс проростання (ІП) насіння. Енергію проростання (здатність насіння швидко й одночасно проростати) визначали як кількість проростків за три дні від початку проростання.

Швидкість проростання насіння визначали за формулою Піпера (1):

$$Ш = n_1 S_1 + n_2 S_2 + \dots + n_m S_m / n_1 + n_2 + n_m, \quad (1)$$

де Ш – середня швидкість проростання, діб; n – кількість пророслих насінин за добу у дні підрахунку; m – кінцевий день підрахунку; s – строки проростання.

Показник дружності проростання обчислювали за формулою 2:

$$Д = С / S, \quad (2)$$

де Д – дружність проростання, %; С – кінцева схожість насіння, %; S – кількість діб проростання.

Індекс проростання розраховували за формулою Walker-Simmons (3):

$$ІП = (7n_1 + 6n_2 + \dots + 1n_7) / 7N, \quad (3)$$

де ІП – індекс проростання; $n_1, n_2, \dots, n_7$ – кількість насінин, пророслих на перший, другий і в наступні дні до сьомого дня відповідно; N – загальна кількість насінин (Формування..., 2023).

Математичну та статистичну обробку результатів лабораторно-модельного досліду виконано за допомогою кореляційного аналізу з використанням програмних пакетів Statistica 6.0, Microsoft Excel (Єгоршин і Лісовий, 2005).

Результати

У таблиці 2 наведені посівні якості насіння пшениці ярої залежно від рівня ущільнення та зволоження ґрунту. За результатами проведених досліджень найменша енергія (47%) та дружність проростання (0,75–0,79%) вирощуваної культури спостерігалася за надмірного ущільнення ґрунту ($>1,4$ г/см³). Схожість також мала тенденцію до зниження на варіантах з ущільненим ґрунтом. Причому на важкосуглинковому ґрунті найнижчу лабораторну схожість (60%) зафіксовано на варіантах як низького, так і високого рівнів зволоження. На варіантах із супіщаним ґрунтом середній рівень вологості в поєднанні з надмірною щільністю будови став причиною найменшого рівня лабораторної схожості – 63%.

Найбільше значення індексу проростання зафіксовано на варіантах з середнім та високим рівнем зволоження за оптимального рівня щільності будови ґрунту як на важкосуглинковому (0,77), так і на супіщаному (0,83) ґрунті. Цей індекс відображає те, наскільки швидко та ефективно проростає насіння: чим вищий показник індексу проростання, тим міцнішим та здоровішим є насіння.

За результатами кореляційного аналізу було встановлено взаємозв'язки між досліджуваними показниками (табл. 3; 4). Відповідно до отриманих даних показник щільності будови ґрунту мав тісний зворотний зв'язок з показниками посівних якостей насіння за вирощування рослин на супіщаному ґрунті (від -0,73...до -0,83). На важкосуглинковому ґрунті фактор щільності будови мав тісний зворотний зв'язок із показником швидкості проростання (-0,83), з рештою показників мав середній зворотний зв'язок, що є свідомством того, що ущільнення ґрунту створює негативні умови для проростання та розвитку сільськогосподарських рослин.

У ході вимірювання висоти рослин відповідно до фенологічних фаз розвитку

Таблиця 2

Посівні якості насіння пшениці ярої залежно від рівня ущільнення та зволоження ґрунту

№ варіанта	Грансклад ґрунту	Щільність будови ґрунту, г/см ³	Вологість ґрунту, % від НВ	Енергія проростання, %	Схожість, %	Швидкість проростання, шт/1 день	Дружність проростання, %	Індекс проростання
1	важкосуглинковий	1,1–1,2	60	53	63	5,5	0,83	0,63
2			80	57	67	5,8	0,79	0,77
3			100	67	77	5,4	0,96	0,63
4		>1,4	60	63	60	4,8	0,75	0,61
5			80	47	63	5,1	0,75	0,63
6			100	53	60	4,2	0,79	0,63
7	супіщаний	1,1–1,2	60	73	80	5,6	1,00	0,80
8			80	77	80	6,4	1,00	0,80
9			100	80	83	7,0	1,04	0,83
10		>1,4	60	67	77	3,6	0,96	0,77
11			80	47	63	5,8	0,79	0,63
12			100	60	70	4,7	0,88	0,70

пшениці ярої встановлено, що надмірне ущільнення ґрунту призводило до затримки росту рослин на ґрунтах як важкосуглинкового, так і супіщаного гранскладу (табл. 5). Низький рівень зволоження лише посилював негативний вплив ущільнення на динаміку зростання вирощуваної культури. Так, у фазі ВВСН 11 на стадії 1-го листка рослини, що вирощувалися за оптимальної щільності, були на 26 та 13% вищими за рослин, що вирощувалися на надмірно ущільненому ґрунті важкосуглинкового та супіщаного

гранскладу відповідно. Варто відмітити, що показники висоти рослин в цілому були кращими на ґрунті супіщаного гранскладу порівняно з важкосуглинковим.

На час збирання біологічного урожаю у фазі ВВСН 14 (стадія 4-го листка) найнижчі рослини зафіксовано на варіантах з низьким рівнем зволоження та надмірною щільністю будови, що становило 29,9 см та 34,4 см відповідно на ґрунтах важкосуглинкового та супіщаного гранскладу. Слід відмітити, що рослини, які вирощувалися на супіщаному

Таблиця 3

Кореляційні зв'язки між досліджуваними факторами та показниками посівних якостей насіння пшениці ярої (за вирощування на важкосуглинковому ґрунті)

Назва показника	Щільність, г/см ³	Вологість, % від НВ	Енергія проростання, %	Схожість, %	Середня швидкість проростання, шт/1 добу	Дружність проростання, %	Індекс проростання
Щільність, г/см ³	1						
Вологість, % від НВ	0	1					
Енергія проростання, %	-0,34956	0,122322	1				
Схожість, %	-0,68266	0,487713	0,588056	1			
Середня швидкість проростання, шт/1 добу	-0,83054	-0,27386	0,156329	0,55607	1		
Дружність проростання, %	-0,67369	0,483679	0,606725	0,88808	0,332451	1	
Індекс проростання	-0,49237	0,075378	-0,03688	0,199569	0,589802	-0,07721	1

Таблиця 4

Кореляційні зв'язки між досліджуваними факторами та показниками посівних якостей насіння пшениці ярої (за вирощування на супіщаному ґрунті)

Назва показника	Щільність, г/см ³	Вологість, % від НВ	Енергія проростання, %	Схожість, %	Середня швидкість проростання, шт/1 добу	Дружність проростання, %	Індекс проростання
Щільність, г/см ³	1						
Вологість, % від НВ	0	1					
Енергія проростання, %	-0,83294	0	1				
Схожість, %	-0,79732	-0,118365	0,987572	1			
Середня швидкість проростання, шт/1 добу	-0,73495	0,459250	0,383727	0,29462	1		
Дружність проростання, %	-0,80207	-0,095837	0,98990	0,99968	0,307214	1	
Індекс проростання	-0,79732	-0,11837	0,98757	0,99970	0,29462	0,99968	1

Таблиця 5

Динаміка висоти рослин пшениці ярої (см) залежно від щільності будови та вологості ґрунтів різного гранулометричного складу

№ варіанта	Гранулометричний склад ґрунту	Щільність будови ґрунту, г/см ³	Вологість ґрунту, % від НВ	Макростадія 1: розвиток листків (масові сходи)	ВВСН 11 – стадія 1-го листка	ВВСН 12 – стадія 2-го листка	ВВСН 13 – стадія 3-го листка	ВВСН 14 – стадія 4-го листка
1	важкосуглинковий	1,1–1,2	60	3,3	18,3	18,5	25,0	30,6
2			80	3,0	19,3	21,7	28,3	33,0
3			100	3,7	18,3	18,2	25,2	32,2
4		>1,4	60	4,0	18,3	17,8	25,7	29,9
5			80	3,2	15,3	17,8	26,0	30,6
6			100	4,0	18,3	19,7	27,5	32,4
7	супіщаний	1,1–1,2	60	4,3	20,7	19,7	30,8	36,9
8			80	5,0	19,3	20,0	27,7	37,3
9			100	4,2	17,3	17,5	28,0	36,7
10		>1,4	60	3,5	17,0	18,3	26,3	34,4
11			80	3,5	17,3	18,0	28,2	36,8
12			100	3,5	17,0	21,5	30,0	38,5

ґрунті, мали кращу динаміку за висотою порівняно з важкосуглинковим ґрунтом.

Встановлено погіршення показників розвитку кореневої системи рослин за надмірного ущільнення ґрунту порівняно з його оптимальним рівнем. Крім того, зафіксовано вплив вологості ґрунту на довжину кореневої системи пшениці ярої (рис. 1). Так, за низького рівня зволоження простежувалося

збільшення довжини коренів на 12% порівняно із середнім рівнем зволоження за вирощування рослин на супіщаному ґрунті. На важкосуглинковому ґрунті спостерігалася аналогічна тенденція: підвищення рівня ущільнення ґрунту до надмірного призвело до зменшення довжини коренів рослин на 24% порівняно з оптимальним рівнем щільності будови за середньої вологості ґрунту.

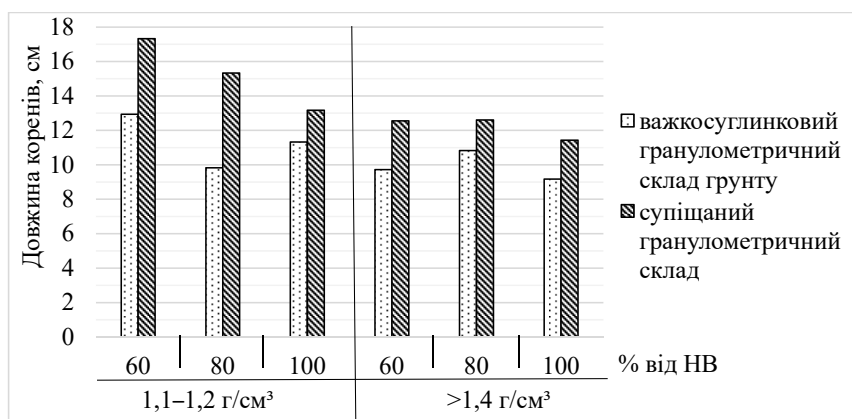
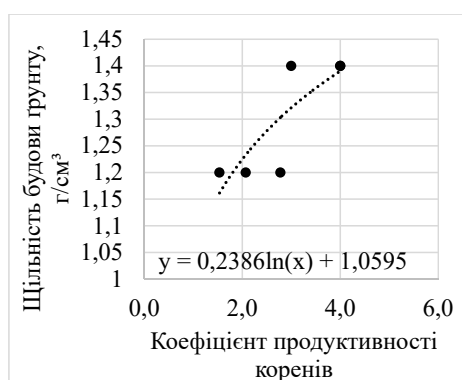


Рис. 1. Вплив щільності будови та вологості ґрунту на довжину коренів пшениці ярої

Водночас встановлено, що коефіцієнт продуктивності кореневої системи збільшувався зі зростанням ущільнення ґрунту до надмірного, що, напевно, пов'язано з невеликими розмірами коренів, але з одночасним посиленням їх фізіологічної активності та збільшенням надземної маси (рис. 2).

У ході аналізу даних щодо продуктивності пшениці ярої встановлено, що за вирощування рослин на супіщаному ґрунті отримано вищі показники. Найбільший біологічний урожай рослин сформувався за оптимального рівня щільності будови та середнього рівня зволоження, що на супіщаному ґрунті становило 4,02 г/посудину.

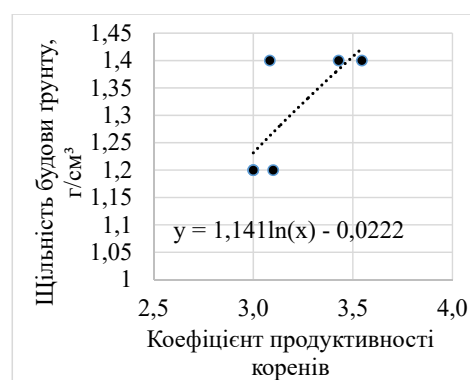
Найнижчий біологічний урожай вирощуваної культури зафіксовано в умовах надмірного ущільнення ґрунту важкосуглинкового гранскладу як за низького, так і за високого рівня зволоження – 2,15 г/посудину та 1,82 г/посудину відповідно – біологічного урожаю культури за всіма варіантами практично у 2 рази, що показано на рис. 3. Тобто отримані дані свідчать про те, що за вирощування культури на ґрунті важкосуглинкового гранскладу надмірне ущільнення призводило до зменшення біологічного урожаю пшениці ярої на 5 та 10% відповідно за середнього та низького рівнів зволоження ґрунту. За вирощування культури на над-



Регресійна статистика:

- множинний $R=0,81789$;
- $r^2=0,66895$;
- нормований $r^2=0,55860$;
- стандартна похибка= $0,07277$

а)



Регресійна статистика:

- множинний $R=0,69049$;
- $r^2=0,47647$;
- нормований $r^2=0,30236$;
- стандартна похибка= $0,0915$

б)

Рис. 2. Регресійна залежність між коефіцієнтом продуктивності коренів та щільністю будови ґрунту (а – важкосуглинковий грансклад; б – супіщаний грансклад)

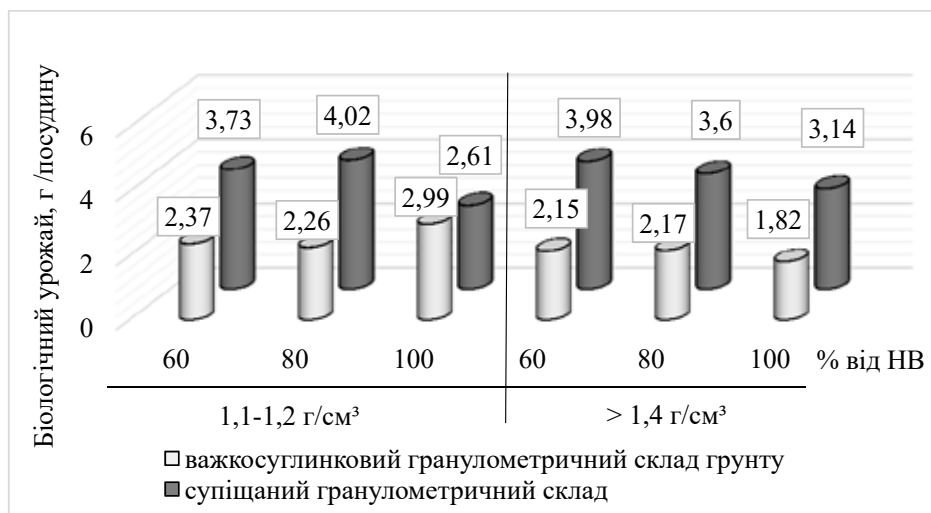


Рис. 3. Біологічний урожай пшениці ярої залежно від рівнів ущільнення та вологості за різного гранулометричного складу ґрунтів

мірно ущільненому ґрунті супіщаного гранскладу біологічний урожай культури також знижувався відповідно на 11 та 7% за середнього та низького рівня вологості ґрунту.

Чітко простежувалася тенденція до зниження біологічного урожаю пшениці ярої також за надмірного ущільнення за середнього рівня зволоження ґрунту. Фіксувалося зниження на 12% порівняно з оптимальною щільністю будови.

Обговорення

Ущільнення ґрунту стає причиною зменшення продуктивності рослин у екосистемах (в тому числі врожайності агроєкосистем). Саме щільність будови ґрунту є досить впливовим чинником для швидкості появи сходів рослин. В ущільненому ґрунті обмежується доступ повітря до рослин, що знижує швидкість і дружність проростання. За результатами низки наукових досліджень (Sanat et al, 2015; Криlach, 2019), ущільнення ґрунту призводить до зниження кількості пророслих насінин та погіршення розвитку кореневої системи. Негативним наслідком переущільнення чорноземних ґрунтів є зменшення потужності й продуктивності кореневих систем, ослаблення адаптації рослин до нестачі вологи, різке погіршення якості орного шару після обробітку через перевагу брил (Бережняк та ін., 2022). Крім того, негативний ефект ущільнення зростає у випадках, коли ґрунт недостатньо або надмірно зволожений, що призводить до виникнення анаеробних умов.

Проведені дослідження довели існування тісного зворотного зв'язку між щільністю будови ґрунту та показниками посівних яко-

стей насіння, що свідчить про ускладнене проникнення кисню та води, які необхідні для проростання насіння за високої щільності будови ґрунту. Подібні закономірності висвітлюються й іншими дослідженнями, де зазначається негативний вплив надмірного ущільнення на аерацію та водопроникність ґрунту (Frene et al, 2024).

Середній рівень зволоження в поєднанні з оптимальною щільністю будови ґрунту забезпечував найкращі умови для формування біологічного урожаю пшениці ярої: на супіщаному ґрунті за таких умов урожайність становила 4,02 г/посудину, на важкосуглинковому – 3,6 г/посудину. Натомість низький рівень зволоження за надмірної щільності будови значно знижував урожайність, особливо на ґрунті важкосуглинкового гранскладу через обмеження транспортування води та кисню. Надмірне ущільнення ґрунту призводило до зменшення біологічного урожаю пшениці ярої в межах від 5 до 12% за різних рівнів зволоження на ґрунтах як важкосуглинкового, так і супіщаного гранскладу.

Важливо відмітити, що ґрунти супіщаного гранскладу виявилися менш чутливими до ущільнення через їхню більшу водопроникність та аерацію. Надмірне ущільнення важкосуглинкового ґрунту створювало більш критичні умови для проростання та росту рослин пшениці ярої. У науковій літературі існують роботи, де підтверджується, що важкі ґрунти є більш вразливими до фізичної деградації (Hu et al., 2023).

Отримані результати мають важливе практичне значення для відновлення фізич-

них властивостей ґрунтів, пошкоджених унаслідок інтенсивного використання або військових дій. Аналіз наукової літератури (Цицюра, 2024; Krylach & Romanchuk, 2022) та власні дослідження дозволять у подальшому розробити ефективні заходи з відновлення мілітарно пошкоджених ґрунтів шляхом адаптації сільськогосподарських культур до несприятливих агрофізичних параметрів ґрунту.

Висновки

За результатами лабораторно-модельного дослідження щодо моделювання мілітарного впливу ущільнення на фоні різних рівнів вологості ґрунту на показники росту та розвитку рослин пшениці ярої та її продуктивності (біологічний врожай) встановлено, що найбільше значення індексу проростання зафіксовано на варіантах із середнім та високим рівнями зволоження за оптимального рівня щільності будови ґрунту на ґрунтах як важкосутлиноквого, так і супіщаного

гранскладу. Надмірне ущільнення ґрунту, як і низький рівень зволоження, призводило до затримки появи сходів, зменшення висоти рослин, погіршення показників кореневої системи та біологічного урожаю пшениці ярої. Простежувався також вплив гранулометричного складу ґрунтів на продуктивність вирощуваної культури. Зокрема, встановлено, що за вирощування рослин на супіщаному ґрунті отримано кращі показники схожості, енергії, швидкості, дружності та індексу проростання, висоти рослин, показники кореневої системи та біологічного урожаю культури. Отримані дані дозволять обґрунтувати заходи з відновлення мілітарно пошкоджених ґрунтів шляхом адаптації сільськогосподарських культур до несприятливих агрофізичних параметрів ґрунту, зокрема надмірного ущільнення ґрунтів, що є супроводжуваним фактором фізичної деградації орних ґрунтів унаслідок ведення військових дій на території України.

Список використаної літератури

- Асмаковський Є.В. Вплив бойових дій на лісові природно-заповідні території басейну річки Снов в межах Семенівської територіальної громади Чернігівської області. *Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології* : збірник матеріалів Національного форуму, 24–25 листопада 2022 р., м. Київ. Київ : Центр екологічної освіти та інформації, 2022. С. 192–193.
- Бережняк Є.М., Наумовська О.І., Бережняк М.Ф. Деградаційні процеси в ґрунтах України та їх негативні наслідки для довкілля. *Біологічні системи: теорія та інновації*. 2022. Т. 13. № 3–4. С. 96–109. [https://doi.org/10.31548/biologiya13\(3-4\).2022.014](https://doi.org/10.31548/biologiya13(3-4).2022.014).
- В Україні шукають шляхи відновлення деградованого ґрунту: проблему ускладнила війна, але вихід є. БТУ-ЦЕНТР. 2022 [Електронний ресурс]. URL: <https://btu-center.com/news/v-ukraini-shukayut-shlyakhi-vidnovlennya-degradovanogo-gruntu-problemu-uskladnila-viyna-ale-vikhid/> (дата звернення: 17.01.2025).
- Ґрунтовий покрив України в умовах воєнних дій: стан, виклики, заходи з відновлення : монографія / за ред. С.А. Балюка, А.В. Кучера, М.І. Ромашенка. Київ : Аграрна наука, 2024. 340 с. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-612-9>.
- Єгоршин О.О., Лісовий М.В. Математичне планування польових дослідів та статистична обробка експериментальних даних. Харків, 2005. 193 с.
- Концептуальні підходи до відновлення ґрунтів, що постраждали від збройної агресії : монографія / за ред. С.А. Балюка, А.В. Кучера, І.В. Пліско. Київ : Аграрна наука, 2024. 216 с. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-604-4>.
- Криlach С.І. Ріст та продуктивність кореневої системи сільськогосподарських культур залежно від агрофізичних характеристик ґрунту. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2019. Вип. 88. С. 68–73. <https://doi.org/10.31073/acss88>.
- Медведев В.В. Моніторинг ґрунтів України. Харків : ПФ «Антиква», 2002. 428 с.
- Медведев В.В., Пліско І.В., Криlach С.І., Накісько С.Г., Уваренко К.Ю. Фізична деградація орних ґрунтів України (оцінювання, профілактика, призупинення). Харків : ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського», 2020. 110 с.
- Пліско І.В., Романчук К.Ю., Криlach С.І. Механічна та фізична деградація орних ґрунтів внаслідок ведення військових дій в Україні. *Вісник аграрної науки*. 2023. № 10. С. 5–12. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202310-01>.
- Порівняльна характеристика шкал росту й розвитку зернових культур / С.М. Каленська, О.І. Присяжнюк, О.Ю. Половинчук, Н.В. Новицька. *Plant Varieties Studying and Protection*. 2018. Том 14. № 4. С. 406–414. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.14.4.2018.151906>.

Тонха О.А., Піковська О.В., Балаєв А.Д. Охорона ґрунтів від вітрової ерозії в сучасних умовах. НУБіП України. 2020 [Електронний ресурс]. URL: <https://nubip.edu.ua/node/75451> (дата звернення 20.01.2025).

Формування посівних якостей насіння зернобобових і зернових культур / А.В. Баган, С.М. Шакалій, С.О. Юрченко, О.О. Четверик. *Аграрні інновації*. 2023. № 19. С. 7–11. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.19.1>.

Цицюра Я.Г. Ґрунтореабілітаційний потенціал редьки олійної за її сидерального використання з позиції відновлення базових агрофізичних властивостей. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 10. С. 185–196. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.17>.

Anderson A., Palazzo A., Ayers P., Fehmi J., Shoop S., Sullivan P. Assessing the impacts of military vehicle traffic on natural areas. Introduction to the special issue and review of the relevant military vehicle impact literature. *Journal of Terramechanics*. 2005. Vol. 42. P. 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2005.01.001>.

Dejong-Hughes J., Moncrief J., Voorhees W., Swan J. Soil compaction: causes, effects and control. St. Paul, MN: University of Minnesota Extension Service, 2001. 16 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/55483> (дата звернення: 20.01.2025).

Frene J.P., Pandey B.K., Castrillo G. Under pressure: elucidating soil compaction and its effect on soil functions. *Plant Soil*. 2024. Vol. 502. P. 267–278. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06573-2>.

Hu W., Cichota R., Beare M., Müller K., Drewry J., Eger A. Soil structural vulnerability: Critical review and conceptual development. *Geoderma*. 2023. Vol. 430. 116346. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116346>.

Krylach S., Romanchuk K. Methods of crop adaptation to unfavorable agrophysical parameters of the arable soil layer. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. 2022. Vol. LXV. Issue 1. P. 77–84 [Електронний ресурс]. URL: https://agronomyjournal.usamv.ro/pdf/2022/issue_1/Art9.pdf (дата звернення: 20.01.2025).

Peggy S.A., Stephen J.T. Impact of M1A1 main battle tank disturbance on soil quality, invertebrates, and vegetation characteristics. *Journal of Terramechanics*. 2005. Vol. 42. Is. 3–4. P. 159–176. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.10.014>.

Sanat G., Khattak G., Webster C., Saeed I., Khan A.J. Effect of soil strength on roots and vegetative growth of wheat at seedling stage. *Pakistan Journal of Botany*. 2015. Vol. 47 (2). P. 523–526.

Shaheb M.R., Venkatesh R., Shearer S.A. A Review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. *Journal of Biosystems Engineering*. 2021. Vol. 46. P. 417–439. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>.

References

Asmakovskyi, Ye.V. (2022). Vplyv boiovykh dii na lisovi pryrodno-zapovidni terytorii basynu richky Snov v mezhakh Semenivskoi terytorialnoi hromady chernihivskoi oblasti [The impact of hostilities on the forest nature reserve areas of the Snov River basin within the Semenivka territorial community of Chernihiv region]. *Zbirka materialiv Natsionalnoho forumu "Povodzhennia z vidkhodamy v Ukraini: zakonodavstvo, ekonomika, tekhnolohii"*. [Collection of materials of the National Forum "Waste Management in Ukraine: Legislation, Economics, Technologies"]. Kyiv : Center for Environmental Education and Information, P. 192–193 [in Ukrainian].

Berezhniak, E., Naumovska, O., & Berezhniak, M. (2022). Dehradatsiini protsesy v gruntakh Ukrainy ta yikh nehatyvni naslidky dlia dovkillia [Degradation processes in the soils of Ukraine and their negative consequences for the environment]. *Biologichni systemy: teoriia ta innovatsii* [Biological Systems: Theory and Innovation], 13 (3–4), 96–109. [https://doi.org/10.31548/biologiya13\(3-4\).2022.014](https://doi.org/10.31548/biologiya13(3-4).2022.014) [in Ukrainian].

V Ukraini shukaiut shliakhy vidnovlennia dehradovanoho gruntu: problemu uskladnyla viina, ale vykhid ye (2022). [In Ukraine, people are looking for ways to restore degraded soil: the problem was caused by the virus, but it was removed]. BTU-Centre. [Electronic resource] URL: <https://btu-center.com/news/v-ukraini-shukayut-shlyakhi-vidnovlennya-degradovanogo-gruntu-problemu-uskladnyla-viyna-ale-vikhid-/> (access date 17.01.2025) [in Ukrainian].

Ґрунтові покрови України в умовах воєнних дій: стан, виклики, заходи з відновлення: монографія (2024). [Soil cover of Ukraine in the conditions of military operations: state, challenges, recovery measures: monograph] / edited by S.A. Balyuka, A.V. Kuchera, M.I. Chamomile Kyiv : Agrarian Science. 340 p. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-612-9>. [in Ukrainian].

Yehorshyn, O.O., & Lisovyi, M.V. (2005). Matematychnе planuvannia polovykh doslidiv ta statystychna obrobka eksperymentalnykh danykh [Mathematical planning of field experiments and statistical processing of experimental data]. Kharkiv, 193 p. [in Ukrainian].

Balyuk, S.A., Kucher, A.V., & Plisko, I.V. (eds). (2024). Kontseptualni pidkhody do vidnovlennia gruntiv, shcho postrazhdaly vid zbroinoi ahresii: monohrafiia [Conceptual approaches to the restoration of soils affected by armed aggression: monograph]. Kyiv.: Agrarna nauka, 216 p. [in Ukrainian].

Krylach, S.I. (2019). Rist ta produktyvnist korenevoi systemy silskohospodarskykh kultur zalezhno vid ahrofizychnykh kharakterystyk gruntu [Growth and productivity of the agricultural crops root system depending on soil agrophysical characteristics]. *Ahrokhimiia i gruntoznaustvo [AgroChemistry and Soil Science]*, 88, 68–73. <https://doi.org/10.31073/acss88-09> [in Ukrainian].

Medvedev, V.V. (2002). Monitorynh gruntiv Ukrayiny [Monitoring of soils of Ukraine]. Kharkov : PF “Antykva”, 428.

Medvedev, V.V., Plisko, I.V., Krylach, S.I., Nakisko, S.G., & Uvarenko, K.Yu. (2020). Fizychna dehradatsiia ornykh gruntiv Ukrainy (otsiniuvannia, profilaktyka, pryzupynennia) [Physical degradation of arable soils of Ukraine (assessment, prevention, suspension)]. Kharkiv : NSC “Institute of Soil Science and Agrochemistry named after O.N. Sokolovsky”, 110 p. [in Ukrainian].

Plisko, I., Romanchuk, K., & Krylach, S. (2023). Mekhanichna ta fizychna dehradatsiia ornykh gruntiv vnaslidok vedennia viiskovykh dii v Ukraini [Mechanical and physical degradation of arable soils as a result of military operations in Ukraine]. *Visnyk agrarnoi nauky [Bulletin of Agricultural Science]*, 101 (10), 5–12. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202310-01> [in Ukrainian].

Kalenska, S.M., Prysiashniuk, O.I., Polovynchuk, O.Yu., & Novytska, N.V. (2018). Porivnialna kharakterystyka shkal rostu y rozvytku zernovykh kultur [Comparative characteristics of the growth and development of grain crops]. *Plant varieties studying and protection*, 14 (4), 406–414. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.14.4.2018.151906> [in Ukrainian].

Tonkha, O.L., Pikovska, O.V., & Balayev, A.D. (2020). Okhorona gruntiv vid vitrovoi erozii v suchasnykh umovakh [Soil protection from wind erosion in modern conditions]. NUBiP of Ukraine. [Electronic resource] URL: <https://nubip.edu.ua/node/75451> (access date 20.01.2025) [in Ukrainian].

Bahan, A.V., Shakalii, S.M., Yurchenko, S.O., & Chetveryk, O.O. (2023). Formuvannia posivnykh yakosti nasinnia zernobobovykh i zernovykh kultur [Formation of sowing qualities of legume and grain cropsseeds]. *Ahrarni innovatsii [Agrarian innovations]*, 19, 7–11. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.19.1> [in Ukrainian].

Tsytsiura, Ya.G. (2024). Gruntoreabilitatsiinyi potentsial redky oliinoi za yii syderalnoho vykorystannia z pozytsii vidnovlennia bazovykh ahrofizychnykh vlastyvosti [Soil rehabilitation potential of oil radish for its green manure use from the point of view of restoration of basic agrophysical properties]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychykh nauk [Ukrainian Journal of Natural Sciences]*, (10), 185–196. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.17> [in Ukrainian].

Anderson, A., Palazzo, A., Ayers, P., Fehmi, J., Shoop, S., & Sullivan, P. (2005). Assessing the impacts of military vehicle traffic on natural areas. Introduction to the special issue and review of the relevant military vehicle impact literature. *Journal of Terramechanics*, 42, 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2005.01.001> [in English].

Dejong-Hughes, J., Moncrief, J., Voorhees, W., & Swan, J. (2001). Soil compaction: causes, effects and control. St. Paul, MN: University of Minnesota Extension Service, 16 [Electronic resource] <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/55483> (access date 20.01.2025) [in English].

Frene, J.P., Pandey, B.K., & Castrillo, G. (2024). Under pressure: elucidating soil compaction and its effect on soil functions. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06573-2> [in English].

Krylach, S., & Romanchuk, K. (2022). Methods of crop adaptation to unfavorable agrophysical parameters of the arable soil layer. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, LXV, 1, 77–84 [in English].

Peggy, S.A., & Stephen, J.T. (2005). Impact of M1A1 main battle tank disturbance on soil quality, invertebrates, and vegetation characteristics. *Journal of Terramechanics*, 42 (3–4), 159–176. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.10.014> [in English].

Sanat, G., Khattak, G., Webster, C., Saeed, I., & Khan, A. J. (2015). Effect of soil strength on roots and vegetative growth of wheat at seedling stage. *Pakistan Journal of Botany*, 47, 523–526 [in English].

Shaheb, M.R., Venkatesh, R., & Shearer, S.A. (2021). A Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production. *Journal of Biosystems Engineering*, 46 (4), 417–439. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7> [in English].

Hu, W., Cichota, R., Beare, M., Müller, K., Drewry, J., & Eger, A. (2023). Soil structural vulnerability: Critical review and conceptual development. *Geoderma*, 430, 116346. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116346> [in English].

Отримано: 21.01.2025

Прийнято: 17.02.2025