

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ СТИМУЛЯТОРІВ РОСТУ РОСЛИН ЗА ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ НА ПЕРЕУЩІЛЬНЕНИХ ҐРУНТАХ

С.І. Криlach

кандидат сільськогосподарських наук

Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства

та агрохімії імені О.Н. Соколовського»

вул. Чайковська, 4, м. Харків, 61024, Україна

e-mail: svitlana.krylach@ukr.net

ORCID: 0000-0002-3347-6561

Надійшла 23.08.2024

Мета. Дослідити вплив стимуляторів росту Вимпел та Азотофіт-Р на ріст і розвиток рослин кукурудзи напівінтенсивного (сорт Лелека-МВ) й інтенсивного (сорт Кардинал-МВ) типів, а також на їх кореневу систему за умов вирощування на переущільненому піднасіньному прошарку ґрунту. **Методи.** Лабораторний — для проведення модельного дослідження, лабораторно-аналітичний — для визначення параметрів кореневої системи рослин, математико-статистичний — для дисперсійного аналізу одержаних даних. **Результати.** Дослідження проводили в умовах модельного лабораторного дослідження на чорноземі типовому малогумусному важкосуглинковому на лесоподібному суглинку. Загальна характеристика ґрунту: $pH_{\text{сол}}$ — 6,2; гідролітична кислотність — 1,4 ммоль/100 г; загальний уміст гумусу — 5,0%, мінерального азоту — 27,9 мг/кг ґрунту, фосфору та калію (за Чиріковим) — відповідно, 252,9 та 472,6 мг/кг ґрунту. Встановлено, що показники росту кореневої системи — довжина, діаметр та коефіцієнт продуктивності коренів — на переущільненому ґрунті значно нижчі порівняно з контрольним варіантом, для якого було відтворено оптимальний рівень щільності будови. Доведено, що інокуляція насіння стимуляторами росту є ефективним засобом покращення розвитку кореневої системи кукурудзи за умов її вирощування на переущільненому піднасіньному прошарку ґрунту: довжина коренів кукурудзи збільшується на 7–26%, а діаметр — на 4–26% залежно від варіанту дослідження. Інокуляція насіння стимулятором росту ґрунту позитивно впливає на продуктивність кореневої системи обох досліджуваних типів кукурудзи. Однак рослини кукурудзи напівінтенсивного типу за вирощування на ущільнених ґрунтах виявилися більш адаптивними до несприятливих умов. За переущільнення піднасіньного прошарку ґрунту біологічна врожайність культури інтенсивного типу знижується на 35%, а напівінтенсивного — на 26% порівняно з вирощуванням в умовах інтенсивного рівня щільності будови ґрунту. **Висновки.** Зростання довжини, діаметра та коефіцієнта

продуктивності кореневої системи кукурудзи у разі інокуляції насіння перед посівом стимулятором росту рослин Вимпел та біостимулятором Азотофіт-Р сприяло збільшенню загальної біологічної врожайності культури обох типів. Науково обґрунтовано доцільність вирощування на переуцільнених ґрунтах сортів кукурудзи напівінтенсивного типу, які є більш адаптованими до несприятливих умов середовища.

Ключові слова: ґрунт, щільність будови, стимулятор росту, сільськогосподарська культура, сорт.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202503-02>

Сучасне сільськогосподарське виробництво спрямоване на отримання максимальних урожаїв, чого неможливо досягти без забезпечення нормального розвитку рослин, особливо на початкових стадіях росту. Для вирощування культур у стартовий період вкрай важливими є фізичний стан і будова посівного шару ґрунту, тієї його частини, яка формує насінневе ложе. На жаль, більшість ґрунтів України не відповідають вимогам, що до них висуваються, і за своїми агрофізичними властивостями є деградованими. Загалом понад 60% земельного фонду країни становлять ґрунти чорноземного типу, які, з одного боку, відзначаються високим рівнем родючості, а з іншого — є схильними до фізичної деградації. Це стало наслідком домінування у сільськогосподарському виробництві незбалансованої системи землекористування — використання великої кількості технологічних операцій, що виконуються потужними тракторами та комбайнами [1].

Серед деградаційних процесів найбільш помітним є переуцільнення ґрунту. В Україні площа переуцільнених ґрунтів ще до 2022 р. сягала близько 17 млн га, але війна, розпочата росією проти України, призвела до різкого її збільшення. За результатами експертних розрахунків, потенційні щорічні збитки від переуцільнення ґрунту в Україні можуть становити близько 1,6 млрд євро, а потенційні втрати врожаю оцінюються в майже 1 млрд євро [2].

Вплив щільності ґрунту на його властивості та на життя рослин є багатограним. Цей чинник впливає на водний режим, газообмін, біологічну активність, поживний режим ґрунту та співвідношення у ньому води й повітря. Пухкий ґрунт зазвичай характеризується більшою глибиною промочування, ніж щільний, а також високою ймовірністю виникнення поверхневого та горизонтального стоку [3, 4].

Згідно з результатами низки досліджень [5–7], щільність будови ґрунту — це один з основних чинників, які впливають на ріст, глибину проникнення і розвиток коренів рослин, що і визначає в кінцевому підсумку врожайність. Наслідком переуцільнення ґрунтів є зменшення об'єму, загальної глибини проникнення й продуктивності кореневих систем, ослаблення адаптації рослин до нестачі вологи, зменшення їх здатності поглинати потрібні елементи живлення, різке погіршення якості орного шару після його обробітку [8]. Високий рівень ущільненості ґрунту негативно впливає на ріст коренів рослин, що супроводжується зменшенням довжини кореня, об'єму, площі поверхні та ваги кореневої системи [9].

Стан ґрунту впливає на сільськогосподарські культури по-різному, але простежується загальна тенденція до зменшення врожайності за збільшення ступеня його ущільненості [10]. Загальні потенційні довгострокові втрати продуктивності сільськогосподарського виробництва

через переуцільнення ґрунту можуть сягати 10–20%, а втрати врожайності сільськогосподарських культур — близько 15% [11].

Можна стверджувати, що проблема переуцільнення ґрунту набуває глобального характеру, а тому постає потреба в пошуку методів адаптації сільськогосподарських культур до зазначеного виду деградації. Дослідження та підбір стійких до прояву переуцільнення ґрунту культур є вкрай актуальними та перспективними завданнями. Результати досліджень L. Wang зі співавторами [12] показали, що селекція сільськогосподарських культур сприяла збільшенню врожайності зерна, частково завдяки підвищенню опору та стійкості кореневої системи рослин до ущільнення ґрунту.

Однією з умов ефективного вирощування сільськогосподарських культур на ґрунтах із несприятливими агрофізичними властивостями може бути застосування стимуляторів росту. Їх використання у мікродозах підвищує ефективність поглинання рослинами з ґрунту вологи, поживних речовин та добрив, підсилює ріст кореневої системи, активізує роботу багатьох ферментних систем рослин, підвищує адаптацію рослинного організму до чинників стресу [13]. Стимулятори росту майже не токсичні, не акумулюються в рослинах і ґрунтах, підвищують урожай та його якість. У розвинутих країнах їх широко використовують у землеробстві, тож вони є актуальним об'єктом наукових досліджень.

Мета досліджень — на прикладі напівінтенсивного (сорт Лелека-МВ) та інтенсивного (сорт Кардинал-МВ) типів кукурудзи вивчити вплив стимуляторів росту рослин на кореневу систему культури за умов її вирощування на переуцільненому піднасінненому прошарку ґрунту.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження проводили в умовах модельного лабораторного досліді в Національному науковому центрі «Інститут

ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського». Ґрунтову масу для досліджень було відібрано з орного шару чорнозему типового малогумусного важкосуглинкового на лесоподібному суглинку на території господарства «Докучаєвське» у Харківському р-ні Харківської обл. Загальна характеристика ґрунту: рН^{сольовий} — 6,2; гідролітична кислотність — 1,4 ммоль/100 г; загальний уміст гумусу — 5,0%, мінерального азоту — 27,9 мг/кг ґрунту, фосфору та калію (за Чиріковим) — відповідно, 252,9 та 472,6 мг/кг ґрунту.

З метою встановлення ступеня чутливості різних за інтенсивністю типів кукурудзи до прояву переуцільнення ґрунту було змодельовано два контрольні варіанти — з оптимальною щільністю будови (1,1–1,3 г/см³) та переуцільненим ґрунтом (понад 1,3 г/см³). Щоб визначити ефективність інокуляції насіння кукурудзи, яка вирощується на переуцільнених ґрунтах, використовували стимулятор росту рослин Вимпел та біостимулятор Азотофіт-Р. Вимпел — це комплексний природно-синтетичний препарат контактної дії, призначений для обробки насіння та вегетуючих рослин. Вимпел має такий склад: поліетиленоксиди (ПЕО) — 770 г/л, солі гумінових кислот — до 30 г/л. Азотофіт-Р — природний активатор росту рослин. Активними компонентами цього біопрепарату є клітини бактерії *Azotobacter chroococcum* у кількості $(1-9) \times 10^9$ КУО/см³, мікро- та макроелементи, а також біологічно активні продукти життєдіяльності бактерій: ферменти, амінокислоти, вітаміни, фітогормони, фунгіцидні речовини. Насіння кукурудзи обробляли, замочуючи його впродовж кількох годин препаратом у розрахунку 0,5–1 л/т насіння.

Схему лабораторного досліді наведено далі:

Контроль: щільність будови ґрунту — 1,1–1,3 г/см³, без інокуляції насіння.

Контроль: щільність будови ґрунту — понад $1,3 \text{ г/см}^3$, без інокуляції насіння.

Варіант 1: щільність будови ґрунту — понад $1,3 \text{ г/см}^3$, інокуляція насіння біостимулятором росту Азотофіт-Р.

Варіант 2: щільність ґрунту — понад $1,3 \text{ г/см}^3$, інокуляція насіння стимулятором росту Вимпел.

Досліджували кукурудзу інтенсивного (сорт Лелека-МВ) та напівінтенсивного (Кардинал-МВ) типу. Експеримент проводили у світловій шафі, в посудинах об'ємом $1,5 \text{ дм}^3$ з 3-кратним повторенням. У посудину засипали необхідну кількість ґрунту та штучно (дерев'яним ущільнювачем) трамбували його, моделюючи піднасінневий прошарок, щільність якого перевищувала $1,3 \text{ г/см}^3$. Параметри щільності будови ґрунту визначали згідно з ДСТУ ISO 11272-2001 [14]. На створений прошарок висівали насіння кукурудзи та прикривали його пухким ґрунтом. Потужність наднасінневого шару становила 5 см, тобто була оптимальною для цієї культури. Зволоженість підтримували на рівні 75% від найменшої вологості (НВ) ґрунту. За НВ було прийнято 40% — вологості досліджуваного ґрунту, яку визначали методом прямого зважування [15]. Полив рослин здійснювали через скляну трубку, щоб вода надходила знизу. Експерименти тривали до появи

в рослин 4-го листка. Після цього визначали морфологічні параметри кореневої системи кукурудзи (довжину, діаметр, коефіцієнт продуктивності) та її біологічну врожайність як суму біологічної надземної і кореневої маси рослин.

Математичну та статистичну обробку результатів досліджень здійснювали методом дисперсійного аналізу з використанням програмних пакетів Statistica 10 та Microsoft Excel 2016.

Результати досліджень. Установлено потенційний вплив переуцільнення ґрунту на ріст коренів досліджуваних типів кукурудзи (рис. 1): довжина та діаметр коренів кукурудзи за прояву переуцільнення зменшувалися порівняно з контрольним варіантом, для якого було відтворено оптимальний рівень щільності будови ґрунту. Аналогічну тенденцію виявили під час досліджень і автори праці [16]: ущільнення ґрунту призводило до зменшення довжини, об'єму і ваги коренів на 30–50%, а їх діаметра — на 15% порівняно з неуцільненим ґрунтом.

Розглядаючи чутливість кореневої системи кукурудзи різних типів до переуцільнення ґрунту, варто зазначити, що сорт напівінтенсивного типу виявився менш чутливим, ніж інтенсивного. У разі переуцільненого піднасінневого прошарку спостерігалось зниження

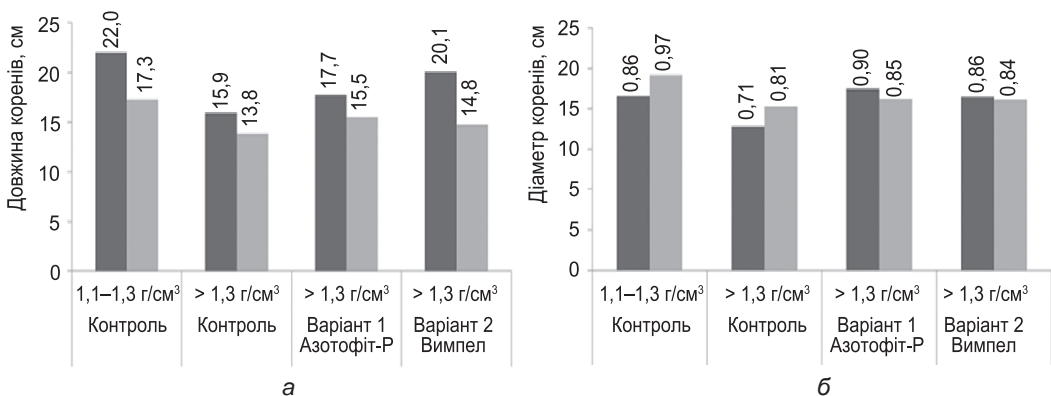


Рис. 1. Довжина (а) та діаметр (б) коренів кукурудзи інтенсивного (■) і напівінтенсивного (▒) типів залежно від щільності будови ґрунту й використаного стимулятора росту

діаметра та довжини коренів кукурудзи напівінтенсивного типу, відповідно, на 20 та 16%, а інтенсивного — на 28 та 18% порівняно із прошарком з оптимальною щільністю будови ґрунту.

Інокуляція насіння стимулятором росту є досить ефективним засобом покращення розвитку кореневої системи рослин (див. рис. 1). Позитивний ефект від інокуляції біопрепаратами зумовлений передусім підвищенням посівних властивостей насіння рослин. Згідно з даними [17], інокуляція насіння кукурудзи стимулятором росту Seed treatment у дозі 3 кг/га сприяла збільшенню маси проростків і довжини стебла кукурудзи, відповідно, на 10 та 20% порівняно з контрольним варіантом.

За переуцільнення піднасінного прошарку ґрунту обробка насіння кукурудзи сприяє збільшенню довжини коренів залежно від варіанта дослідження на 7–26%. Довжина коренів кукурудзи інтенсивного сорту за обробки насіння стимуляторами росту Азотофіт-Р і Вимпел збільшується на 11 та 26%, а напівінтенсивного — на 12 та 7% порівняно з контролем.

Діаметр коренів кукурудзи зростає на 4–26% залежно від типу культури за умов її вирощування на ґрунтах з проявом переуцільнення. Так, у разі рослин інтенсивного типу у варіанті 1 діаметр коренів збільшувався на 26%, а у варіанті 2 — на 20% порівняно з контрольним варіантом за переуцільнення та без обробки насіння. У рослин кукурудзи напівінтенсивного типу спостерігали значно нижчий приріст діаметра коренів — він становив лише 4% порівняно з контролем.

За прояву переуцільнення ґрунту також простежували тенденцію до зменшення коефіцієнта продуктивності коренів (рис. 2). Цей показник характеризує продуктивність роботи кореневої системи, а вимірюється як співвідношення надземної маси рослини до маси її кореневої системи. За переуцільнення

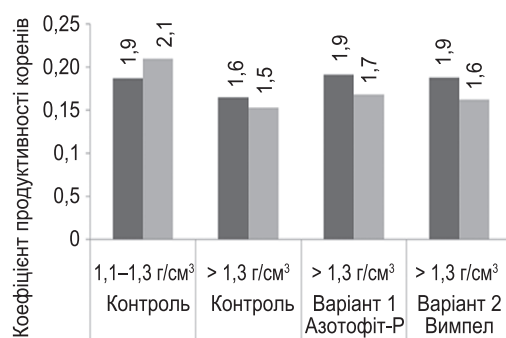


Рис. 2. Коефіцієнт продуктивності кореневої системи кукурудзи інтенсивного (■) та напівінтенсивного (□) типів залежно від щільності будови ґрунту та стимулятора росту рослин

піднасінного прошарку ґрунту продуктивність коренів кукурудзи інтенсивного сорту знижується на 12%, а напівінтенсивного — на 27% порівняно з оптимальним рівнем ущільнення ґрунту.

Установлено, що інокуляція насіння стимулятором росту на фоні переуцільненого піднасінного прошарку ґрунту чинить позитивний вплив на продуктивність кореневої системи обох досліджуваних сортів і типів кукурудзи. Кореляційно-регресійний аналіз дав змогу визначити залежність між коефіцієнтом продуктивності кореневої системи кукурудзи та інокуляцією насіння стимулятором росту. Коефіцієнт детермінації становить 0,85 у кукурудзи інтенсивного типу та 0,80 — у кукурудзи напівінтенсивного типу, і це є свідченням того, що рівень продуктивності кореневої системи культури залежить від стимулятора росту. З'ясовано, що коефіцієнт продуктивності коренів рослин інтенсивного типу за умов застосування біостимулятора росту Азотофіт-Р зростає на 16%, а в разі застосування стимулятора росту Вимпел — на 14% порівняно з контролем. У рослин напівінтенсивного типу коефіцієнт продуктивності за таких умов збільшувався, відповідно, на 10 та 6%.

Інокуляція насіння стимулятором росту сприяє збільшенню загального

Вплив щільності ґрунту та стимулятора росту рослин на біологічну врожайність кукурудзи

Варіант	Біологічна врожайність, г/посудину	
	Лелека-МВ, інтенсивний тип	Кардинал-МВ, напівінтенсивний тип
<i>Контроль</i> : щільність ґрунту 1,1–1,3 г/см ³ , без інокуляції насіння	16,5	14,5
<i>Контроль</i> : щільність ґрунту — понад 1,3 г/см ³ , без інокуляції насіння	10,8	10,6
<i>Варіант 1</i> : щільність ґрунту — понад 1,3 г/см ³ , інокуляція насіння біостимулятором росту Азотофіт-Р	11,1	11,9
<i>Варіант 2</i> : щільність ґрунту — понад 1,3 г/см ³ , інокуляція насіння стимулятором росту Вимпел	11,6	12,3
НІР _{0,5}	7,0	6,3

біологічного врожаю досліджуваних сортів кукурудзи (таблиця). Найістотнішу його прибавку за вирощування культури напівінтенсивного типу показав варіант з обробкою насіння стимулятором росту Вимпел — вона становила 16%, а з обробкою біостимулятором Азотофіт-Р — 12% порівняно з контролем. Прибавка врожаю кукурудзи інтенсивного типу за інокуляції насіння Вимпелом становить 7%, а за інокуляції Азотофітом-Р — 3%.

Рослини кукурудзи напівінтенсивного типу, вирощені на ущільнених ґрунтах, виявилися більш адаптивними порівняно з рослинами інтенсивного типу. З'ясовано, що з підвищенням ступеня інтенсивності сортів відбувається закономірне зниження їх адаптивного потенціалу. Переваги сортів інтенсивного типу зазвичай проявляються лише за сприятливих умов, на фоні високої технології вирощування. У разі вирощування на ґрунтах із несприятливими параметрами вони не тільки не реалізують свого потенціалу, а й часто дають нижчий урожай, ніж сорти, які є менш

продуктивними, але не вимогливими до умов вирощування. Так, автори праці [18] зазначають, що потенціал рослин сортів інтенсивного типу навіть за умов впливу оптимальних біотичних і абіотичних чинників реалізується лише на 50–60%.

Сорти напівінтенсивного типу характеризуються підвищеною стійкістю до несприятливих умов середовища. Вони ефективніше, ніж сорти екстенсивного та інтенсивного типу, використовують природні ресурси ґрунтів. Їх недоліком є нижчий, ніж у сортів інтенсивного типу, рівень продуктивності, про що свідчать розрахунки коефіцієнта продуктивності коренів.

Біологічна врожайність сортів кукурудзи інтенсивного типу за переущільнення ґрунту знижується на 35%, а напівінтенсивного — на 26% порівняно з оптимальним рівнем щільності його будови. Це свідчить про кращу пристосованість кукурудзи напівінтенсивного типу до переущільнення піднасінневого прошарку ґрунту.

Висновки

Одним з ефективних способів сприяння розвитку кореневої системи

кукурудзи в переущільненому прошарку ґрунту може бути інокуляція її насіння

стимуляторами росту. Довжина, діаметр і коефіцієнт продуктивності кореневої системи культури за обробки насіння стимулятором росту Вимпел і біостимулятором Азотофіт-Р збільшуються, і це сприяє підвищенню біологічної врожайності обох досліджуваних

типів кукурудзи. Установлено кращу пристосованість культури напівінтенсивного типу до переуцільнення ґрунту порівняно з інтенсивним, що свідчить про доцільність його вирощування на ґрунтах з несприятливими агрофізичними параметрами.

Krylach S.

National Scientific Center «O.N. Sokolovsky Institute of Soil Science and Agrochemistry», 4 Chaikovska Str., Kharkiv, 61024, Ukraine; e-mail: svitlana.krylach@ukr.net; ORCID: 0000-0002-3347-6561

The effectiveness of the use of plant growth stimulants for growing corn on over-compacted soils

Goal. To investigate the influence of growth stimulants Vympel and Azotofit-R on the growth and development of corn plants of semi-intensive (Leleka-MV variety) and intensive (Kardynal-MV variety) types, as well as on their root system at growing on the over-compacted seed layer of soil. **Methods.** Laboratory — for conducting a model experiment, laboratory-analytical — for determining the parameters of the root system of plants, mathematical-statistical — for the analysis of variance of the data obtained. **Results.** The study was carried out under the conditions of a model laboratory experiment on typical low-humus heavy-clay on loess-like loam chernozem. General characteristics of the soil: pH_{salt} — 6.2; hydrolytic acidity — 1.4 mmol/100 g; total content of humus — 5.0%, mineral nitrogen — 27.9 mg/kg of soil, phosphorus, and potassium (according to Chyrikov) — 252.9 and 472.6 mg/kg of soil, respectively. It was found that the growth indicators of the root system — the length, diameter, and productivity factor of the roots — on the overcompacted soil were much lower compared to the control, for which

the optimal level of density of the structure was reproduced. It was proved that inoculation of seeds with growth stimulants was an effective means of improving the development of the root system of corn under the conditions of its cultivation on the over-compacted seed layer of soil: the length of corn roots increased by 7–26% and the diameter — by 4–26% depending on the version of the experiment. Inoculation of seeds with a soil growth stimulator positively influenced the productivity of the root system of both studied types of corn. However, semi-intensive corn plants growing on compacted soils turned out to be more adaptive to adverse conditions. In conditions of an over-compacted seed layer of soil, the biological yield of an intensive-type crop was reduced by 35%, and of a semi-intensive crop by 26% compared to growing under conditions of an intensive level of soil structure density. **Conclusions.** The increase in the length, diameter, and productivity factor of the corn root system in the case of inoculation of seeds before sowing with the plant growth stimulator Vympel and the biostimulant Azotofit-R contributed to an increase in the total biological yield of both types of crops. The feasibility of growing semi-intensive corn varieties on overcompacted soils, which are more adapted to adverse environmental conditions, is scientifically substantiated.

Key words: soil, density, growth stimulator, agricultural crop, variety.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202503-02>

Бібліографія

1. Балюк С.А., Носко Б.С., Скрильник Є.В. Сучасні проблеми біологічної деградації чорноземів і способи збереження їх родючості. *Вісник аграрної науки*. 2016. 1. С. 11–17.

2. Zabrodskiy A., Šarauskiis E., Kukharets S. et al. Analysis of the Impact of Soil Compaction

on the Environment and Agricultural Economic Losses in Lithuania and Ukraine. *Sustainability*. 2021. 13(14): 7762. doi: 10.3390/su13147762

3. Медведев В.В., Лындина Т.Е., Лактионова Т.Н. Плотность сложения почв (генетическое, экологическое и агрономическое аспекты). Харьков: 13 типография, 2004. 244 с.

4. *Topa D., Cara I.G., Jițoreanu G.* Long term impact of different tillage systems on carbon pools and stocks, soil bulk density, aggregation and nutrients: A field meta-analysis. *Catena*. 2021. 199. 105102. doi: 10.1016/j.catena.2020.105102

5. *Szatanik-Kloca A., Hornb R., Lipiec J.* et al. Soil compaction-induced changes of physicochemical properties of cereal roots. *Soil and Tillage Research*. 2018. 175. P. 226–233. doi: 10.1016/j.still.2017.08.016

6. *Zarebanadkouki M., Meunier F., Couvreur V.* et al. Estimation of the hydraulic conductivities of lupine roots by inverse modelling of high-resolution measurements of root water uptake. *Annals of botany*. 2016. 118(4). P. 853–864.

7. *Тимошенко Г.З., Коваленко А.М., Новохижній М.В., Шепель А.В.* Вплив щільності складення ґрунту на урожайність сільськогосподарських культур за різних систем обробітку ґрунту в короткоротаційних сівозмінах. *Зрошуване землеробство*. 2016. 66. С. 82–85.

8. *Colombi T., Torres L.C., Walter A., Keller T.* Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth: A vicious circle. *Science of The Total Environment*. 2018. 626. P. 1026–1035. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.129

9. *Yu C., Mawodza T., Atkinson B.S.* et al. The effects of soil compaction on wheat seedling root growth are specific to soil texture and soil moisture status. *Rhizosphere*. 2024. 29. 100838. doi: 10.1016/j.rhisph.2023.100838

10. *Zhang B., Jia Y., Fan H.* et al. Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic review. *Land Degradation &*

Development. 2024. 35(10). P. 3256–3273. doi: 10.1002/ldr.5144

11. *Sonderegger T., Pfister S.* Global assessment of agricultural productivity losses from soil compaction and water erosion. *Environ. Sci. Technol.* 2021. 55(18). P. 12162–12171. doi: 10.1021/acs.est.1c03774

12. *Wang L., Wang T., Yao S.* et al. Soil compaction development facilitated the decadal improvement of the root system architecture and rhizosheath soil traits of soybean in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*. 2024. 237. 105983. doi: 10.1016/j.still.2023.105983

13. *Кисель В.И.* Биологическое земледелие в Украине: проблемы и перспективы. Харьков: Штрих, 2000. 161 с.

14. *Якість ґрунту.* Визначання щільності складення на суху масу (ISO 11272:1998, IDT): ДСТУ ISO 11272–2001. [Чинний від 2003–07–01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2003. 15 с.

15. *Ильченко В.А., Медведев В.В., Назарова Д.И., Попов Ф.А.* Агрофизические исследования в опытах по обработке и удобрению почв: метод. реком. Харьков, 1977. 67 с.

16. *Mondal S., Chakraborty D.* Root growth and physiological responses in wheat to topsoil and subsoil compaction with or without artificial vertical macropores. *Heliyon*. 2023. 9(8). e18834. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18834

17. *Маренич М.М., Юрченко С.О.* Посівні властивості насіння сільськогосподарських культур залежно від застосування стимуляторів росту. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2016. 1–2. С. 18–21.

18. *Попов С.І., Ермантраут Е.Р.* Адаптивність сортів пшениці м'якої озимої залежно від умов вирощування. *Вісник ЦНЗ АПВ Харківської області*. 2013. 15. С. 93.