

UDC 631.431.7:635.1/.8

INFLUENCE OF CONSTANT TRADITIONAL SOIL TREATMENT IN VEGETABLE-FODDER CROP ROTATION ON DENSITY OF BLACK SOIL**Syromyatnikov Y.N., Mozgovskiy O.F., Kutz O.V., Paramonova T.V., Mykhailyn V.I.**

Institute of Vegetable and Melon Growing of National Academy of Agricultural Sciences of Ukraine

Instytutska str., 1, vill. Seleksiine, Kharkiv rg., Ukraine, 62478

*E-mail: mozgovskij@gmail.com***Huliak N.V.**

National Academy of Agricultural Sciences of Ukraine

st. Mykhaylo Omelyanovych -Pavlenko, 9, Kyiv-10, 01010

<https://doi.org/10.32717/0131-0062-2021-70-66-79>

The aim. Was to measure and compare the penetration resistance to depths in areas with continuous traditional tillage before starting work to restore its optimal physical and hydrological characteristics after degradation and determine the depth at which the soil was sufficiently dense and required additional treatment.

Methods. Field, laboratory, calculation and analytical. **Results.** The results of research to determine the resistance to penetration into the soil in the vegetable-fodder crop rotation in the experimental field with continuous traditional tillage were presented. Using the DATAFIELD handheld conical GPS penetrometer, the boundaries of the experimental field were determined, a computer map of the experimental field was compiled to automatically create a «grid» of plot sizes according to the field stationary experiment plan, replicate and two-dimensional mapping. The constituent parameters of soil density were determined, which depended on the geometry of the working body (cone) and the force of the applied load, and were a function of several fundamental factors. The readings of the device made it possible to determine the level of compaction and resistance to root growth, quantitative assessment of soil density, traction resistance of the working bodies of tillage implements and agronomic requirements for them. **Conclusions.** A range of root penetration resistance indices was obtained. They varied from values slightly more than 20 kg/cm² to values no more than 30–40 kg/cm², harmful, slowing down the growth and functioning of plants. With the value of resistance to penetration into the soil above 40 kg/cm², the damage from compaction for soil fertility was obvious. It was studied that the soil in the experimental field was compacted; even the upper layers (0–15 cm) of the soil of the experimental field had a compacted structure (from 0.06 to 34.46 kg/cm²) and increased with depth, indicating physical and hydrological degradation. It was noted that for plants in the field of irrigated vegetable-fodder crop rotation (tomato, white cabbage, beet) the use of fertilizer systems with a combination of green manure and a complex of microbial drugs, as well as organic and organic and mineral systems using high rates of organic fertilizers (21 t/ha of crop rotation area), provided the formation of a critical level of soil compaction from deeper horizons (for growing tomatoes – from a depth of 22.5 cm, white cabbage – 37.5 cm, beets – 37.5–42.5 cm).

Keywords: penetrometer, penetration resistance, soil density, vegetable plants

ВПЛИВ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ТРАДИЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ҐРУНТУ В ОВОЧЕВО-КОРМОВІЙ СИВОЗМІНІ НА ЩІЛЬНІСТЬ ЧОРНОЗЕМУ**Сиромятников Ю. М., Мозговський О.Ф., Куц О.В., Парамонова Т.В., Михайлин В.І.**

Інститут овочівництва і баштанництва НААН

вул. Інститутська, 1, сел. Селекційне Харківської обл., Україна, 62478

*E-mail: mozgovskij@gmail.com***Гуляк Н.В.**

Національна академія аграрних наук України

вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 9, м. Київ-10, 01010

Мета. Виміряти та порівняти опір проникнення на глибину у ділянках з безперервним традиційним обробітком ґрунту до початку робіт з відновлення його оптимальних фізико-гідрологічних характеристик після деградації, та визначити глибину, на якій ґрунт є достатньо щільним та потребує додаткової обробки. **Методи.** Польові, лабораторні, аналітично-вимірювальні. **Результати.** Представ-

лено результати досліджень з визначення опору проникнення у ґрунт в овочево-кормовій сівозміні на дослідному полі з безперервним традиційним обробітком ґрунту. За допомогою ручного конічного GPS пенетрометра «Datafield» визначено межі дослідного поля, складено комп'ютерну карту дослідного поля з метою автоматичного створення «сітки» з розмірами ділянок згідно плану польового стаціонарного дослідження, розміщення варіантів за повтореннями та двомірне картографування. Визначено складові параметри щільності ґрунту, які залежать від геометрії робочого органу (конуса) та сили прикладеного навантаження, та є функціями кількох фундаментальних факторів. Показання приладу дали можливість визначити рівень ущільнення та опору росту коренів, кількісної оцінки щільності ґрунту, тягового опору робочих органів ґрунтообробних знарядь та агротехнічних вимог до них. **Висновки.** Отримано діапазон показників опору проникнення коренів. Вони змінюються від значень, трохи більше 20 кг/см², до значень не більше 30–40 кг/см², шкідливих, що уповільнюють ріст і функціонування рослин. При величині опору проникнення у ґрунт вище 40 кг/см² шкода від переущільнення для родючості ґрунту є очевидною. Встановлено, що ґрунт на дослідному полі є переущільненим, навіть верхні шари (0–15 см) ґрунту дослідного поля мають ущільнену структуру (від 0,06 до 34,46 кг/см²) і збільшується з глибиною, що свідчить про фізико-гідрологічну деградацію. Зазначено, що для рослин ланки зрошуваної овочево-кормової сівозміні (помідор, капуста білоголова, буряк столовий) використання систем удобрення з поєднанням сидеральних добрив та комплексу мікробних препаратів, а також органічних та органо-мінеральних систем удобрення з використанням високих норм органічних добрив (21 т/га сівозмінної площі), забезпечує формування критичного рівня ущільненості ґрунту з більш глибоких горизонтів (за вирощування помідору – з глибини 22,5 см, капусти білоголової – 37,5 см, буряка столового – 37,5–42,5 см).

Ключові слова: пенетрометр, опір проникненню, щільність ґрунту, овочеві рослини

Вступ. Ущільнення ґрунту – це загальна проблема, яка стосується багатьох районів вирощування с.-г. культур у всьому світі (Rouabh A. et al. i, 2018; Shaheb M.R. et al., 2021) і впливає на зміну широкого спектру функцій ґрунту з наслідками, часто негативними для росту і розвитку рослин. Фактично, коли ґрунт ущільнений, ріст коренів уповільнюється, тому доступність води та поживних речовин сильно обмежується (Correa J. et al., 2019; Priori S. et al., 2021). Ущільнений ґрунт має зменшений об'єм та розмір шпарин, їх зв'язність та утримання вологи (Pierce F.J., Lal R., 2017), що в свою чергу зменшує обсяг повітря, і як наслідок нестача кисню може посилити активність збудників кореневими захворюваннями (Morales-Olmedo M.G. et al., 2021; Pulido-Moncada M. et al., 2020). У деяких випадках недостатня аерація ґрунту, викликана ущільненням, підвищує ймовірність до виникнення хлорозу рослин через вироблення екзогенного етилену ґрунту (Manik S.M. et al., 2019; Villeneuve F. et al., 2020).

Аналіз останніх досліджень і публікацій з досліджуваної теми. Основна причина ущільнення ґрунту пов'язана з широким використанням сільськогосподарської техніки постійно зростаючої у розмірах та вазі (Syromyatnikov Y., 2019; Yue L. et al., 2021). Ущільнення ґрунту зазвичай має тенденцію до зменшення з глибиною, яка пропорційна завданому навантаженню, але вона може концентруватися в частинах горизонтів

ґрунту, коли частки масивного субстрату поєднуються зі структурними горизонтами.

Ступінь ущільнення залежить не тільки від типу та розміру техніки, але від внутрішньої вразливості ґрунту. Чутливість ґрунту до ущільнення залежить від його стиснення, а саме «легкості, з якою ґрунт зменшується в обсязі під дією механічного навантаження» (Huang, 2022). Стиснення ґрунту пов'язано з основними властивостями, такими як гранулометричний склад та вміст органічних речовин (Reichert J.M. et al., 2018; Ruehlmann J., 2020). На думку ряду авторів, крупнозернисті ґрунти менш схильні до ущільнення, ніж дрібнозернисті (Moreno-Maroto J.M. et al., 2021). У таких ґрунтах процеси розущільнення через вплив морозу та циклів сушіння-змочування менш ефективні у порівнянні з дрібнозернистими ґрунтами, тому ущільнення, ймовірно, буде більш стійким.

Крім текстури, схильність до ущільнення ґрунту залежить від кам'янистості. Вміст вкрапленого гравію більше ніж 15–20 % діє як «скелет», таким чином дає захист фракції дрібнозему від ущільнення (Ryken N. et al., 2018) та допомагаючи зберегти функції, пов'язані з макрошпаруватістю, такі як гідравлічна провідність та газообмін (Alkroosh I. et al., 2021). Врешті-решт, ущільнення ґрунту може бути природним процесом, наприклад, у ґрунті з фрагіпаном чи умовах твердого схоплювання (Joshi R., 2017; Hernández T.D.B. et al., 2019). Відновлення оптимальних фізико-гідрологічних характеристик ґрунту після дегра-

дації – складний та повільний процес, який може зайняти багато років. Фізико-гідрологічна деградація ґрунту під овочевими культурами в основному відбувається через ущільнення, ерозію, утворення кірки та деструктуризацію ґрунту, і цьому сприяють певні розміри частинок ґрунту та процеси деградації, такі як зниження органічної речовини, біологічної активності, засолення та вилуговування (Carbonell-Bojollo R.M. et al., 2021, Li D.Q. et al. 2021).

Одним з найбільш важливих і поширених процесів деградації є ущільнення ґрунту, в основному через рух тракторів по міжряддях, збирання врожаю та боротьби зі шкідниками (Cerdà A. et al., 2021; Evans R., 2017). Час, необхідний для відновлення ущільненого ґрунту, було оцінено від 5 до 18 років (Froehlich H.A., 1985; Webb R.H., 2002), залежно від типу ґрунту, ступеня ущільнення й клімату, тоді як для відновлення сильно ущільненого ґрунту, вказано близько 100 років (Romaneckas K. et al., 2015). Ущільнення ґрунту може бути зменшене за допомогою механічних та природних методів, що включають глибокий обробіток ґрунту, додавання органічної речовини та використання покривних культур.

Однак тривалість позитивного впливу після глибокого обробітку ґрунту на його ущільнення мало вивчене.

У 2021 році в Інституті овочівництва та багтанництва НААН України було розпочато проект, спрямований на вирішення проблем фізичних властивостей ґрунту за рахунок управління органічною речовиною, відновлення переущільненого ґрунту, за допомогою механічних та природних методів.

Ми вважаємо, що опір проникнення у ґрунт буде знижено за рахунок глибокого локального чизелювання (Pashchenko V.F. et al., 2017; Pashchenko V.F. et al., 2019; Syromyatnikov Y., 2019), у визначений термін його проведення.

Основна мета дослідження – виміряти та порівняти опір проникнення на глибину у ділянках з безперервним традиційним обробітком ґрунту до початку робіт з відновлення його оптимальних фізико-гідрологічних характеристик після деградації, та визначити глибину, на якій ґрунт є достатньо щільним та потребує додаткової обробки.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження проведено в рамках довготривалого (з 1968 року) польового стаціонарного досліджу (Kutz, O.V., 2017; Kutz O.V., 2015) за темою «Наукове обґрунтування механізмів збережен-

ня та відтворення родючості ґрунту у зрошуваних овочевих агроценозах Лісостепу України». Досліди закладено в межах зрошуваної овочево-кормової сівозміни з наступним чергуванням культур: ячмінь з підсівом люцерни – люцерна першого року використання – люцерна другого року використання – огірок – озима пшениця – цибуля ріпчаста – помідор – капуста білоголова – буряк столовий. З 1968 року в дослідах проводилася безперервна традиційна обробка ґрунту з оборотом пласта.

Схема досліджу включає різні системи удобрення для помідора, капусти і буряка столового: мінеральна, інтенсивна (під певний рівень урожайності з додатковим підживленням комплексними добривами з мікроелементами), органічна, органо-мінеральна в різних варіації норм, ресурсоощадна (з внесенням мінеральних добрив локально зі зниженими нормами), сидеральна (з поєднанням поживних посівів сидератів та комплексу мікробних препаратів) та біологізована (з поєднанням заорювання сидеральних культур, внесення органічних добрив та комплексу мікробних препаратів (табл. 1).

Система використання мікробних препаратів включає застосування під помідор обробки насіння та розсади перед висадкою мікробним препаратом Азотофіт-р (1,0 л/т); внесення в рядки за посіву в теплиці Граундфікс (1 л/га), обробка ґрунту до висадки розсади Граундфікс (1 л/га), обробка коренів розсади перед висадкою Азотофіт, прикореневе підживлення Органік баланс (2 л/га) у два строки перед зрошенням; під капусту білоголову – обробка насіння мікробним препаратом Азотофіт-р (1,0 л/т) та прикореневе підживлення Органік баланс (2 л/га) в три строки перед зрошенням; під буряк столовий – обробка насіння мікробним препаратом Азотофіт-р (1,0 л/т); внесення в рядки за сівби Граундфікс (1 л/га); прикореневе підживлення Органік баланс (2 л/га) у три строки перед зрошенням.

Позакореневі підживлення комплексними добривами проводились в три строки:

– помідор – «Нутривант плюс пасльоновий» (по 2 кг/га через 7 днів після висадки розсади, на початку цвітіння, на початку утворення плодів);

– капуста білоголова – «Нутривант плюс універсальний» (по 2 кг/га в фазу 5–6 справжніх листків, на початку утворення розетки листків, на початку формування головки),

– буряк столовий – «Нутривант плюс універсальний» (по 2 кг/га в фазу 5–6 справжніх лист-

ків, через 10–12 днів після першого, пучкова стиглість).

Місце проведення досліджень: Україна, Харківська область, селище Селекційне.

Природно-кліматична зона – Лісостеп; агрогрунтова провінція – Лісостеп лівобережний високий. Географічні координати: широта – 49°47', довгота – 35°51' (рис. 1).

Таблиця 1. – Система удобрення в зрошуваній овочево-кормовій сівозміні та за культурами її ланки

Система удобрення в розрахунку на 1 га сівозмінної площі	Система удобрення культур ланки сівозміні		
	Томат	Капуста	Буряк столовий
1. Без добрив	–	–	–
2. Сидеральна з комплексом мікробних препаратів	Мікробні препарати + (поживно посів вики озимої)	Мікробні препарати	Мікробні препарати
3. Гній 14 т/га + N ₆₇ P ₆₃ K ₆₃	N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₉₀	60 т/га + N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₉₀	N ₆₀ P ₆₀ K ₁₂₀
4. Гній 21 т/га	–	89 т/га	–
5. N ₆₇ P ₆₃ K ₆₃	N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₉₀	N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₉₀	N ₆₀ P ₆₀ K ₁₂₀
6. Гній 14 т/га	–	40 т/га	–
7. Гній 14 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₅	40 т/га + N ₆₀ P ₆₀ K ₄₅	N ₃₀ P ₃₀ K ₆₀
8. Гній 21 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₅	60 т/га + N ₆₀ P ₆₀ K ₄₅	N ₃₀ P ₃₀ K ₆₀
9. Інтенсивна N ₂₂₆ P ₁₂₉ K ₁₃₄ + мікродобрива	(урожайність 80 т/га) N ₂₆₀ P ₁₈₀ K ₁₃₀ + мікродобрива	(урожайність 100 т/га) N ₅₅₀ P ₂₆₀ K ₃₇₀ + мікродобрива	(урожайність 80 т/га) N ₃₉₀ P ₁₀₀ K ₂₁₀ + мікродобрива
10. Гній 14 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁ (локально)	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₅ (локально)	40 т/га + N ₆₀ P ₆₀ K ₄₅ (локально)	N ₃₀ P ₃₀ K ₆₀ (локально)
11. Гній 21 т/га + N ₁₇ P ₁₆ K ₁₆ (локально)	N ₃₀ P ₃₀ K _{22,5} (локально)	60 т/га + N ₃₀ P ₃₀ K _{22,5} (локально)	N ₁₅ P ₁₅ K ₃₀ (локально)
12. Біологічна (органічні добрива + сидерати + мікробні препарати)	Мікробні препарати	40 т/га гною	Мікробні препарати

Повна назва ґрунту – чорнозем типовий малогумусний важкосуглинковий на лесовидному суглинку. Глибина гумусового горизонту складає 76,0 см; щільність будови ґрунту 1,33 г/см³ (метод ріжучого кільця Качинського). Якість обробки ґрунту на полі, на якому проводились дослідження, багато років визначалася з використанням візуального методу. Отже, виникла необхідність провести інструментальний метод оцінювання якості обробки ґрунту, що обумовлює використання конкретних агротехнічних вимог, які пред'являють до кожного виду заходів.

У якості вимірювального індикатора ущільнення ґрунту використовували опір проникнення у ґрунт. Таким чином, нами запропоновано проаналізувати ущільнення ґрунту до проведення локальної глибокої обробки. Для цього ми порівнювали опір проникнення по горизонтам ґрунту на ділянках з традиційною безперервною обробкою (рис. 1). Нами був використаний ручний конічний GPS пенетрометр «DATAFIELD», розроблений для вимірювання різних показників

щільності ґрунту, який використовують у дослідженнях з обробки ґрунту, тягового опору робочих органів та переущільнення.

Загальна площа експериментальної ділянки під помідорами – 0,33 га, капустою білоголовою пізньостиглою – 0,33 га та буряком столовим – 0,33 га. Повторність відбору зразків на кожній культурі – чотириразова, по 4 заміри на кожній ділянці, розміщення ділянок – у два яруси.

Даний пристрій забезпечує можливість визначення параметрів щільності ґрунту, які залежать від геометрії робочого органу (конуса) та сили прикладеного навантаження. Більш того, ці параметри ґрунту не відображають будь-якої окремої властивості, а є функціями кількох фундаментальних факторів. Тому параметри ґрунту, отримані за допомогою цього пристрою, часто називають складовими параметрами ґрунту. Існують також різні методи, які використовують для визначення липкості ґрунту, опору розтріскування та стійкості до крижкості.



Рис. 1. Ділянка польового стаціонарного дослід з безперервним традиційним обробіткою ґрунту

Конусний пенетрометр застосовують для визначення щільності ґрунту у польових умовах, простий і дуже зручний у використанні. Показання даного приладу дають можливість визначити рівень ущільнення та опір росту коренів, кількісної оцінки щільності ґрунту, тяговий опір робочих органів ґрунтообробних машин і знарядь та агротехнічних вимог до них. Основна робоча частина (робочий орган) складається з полірованого сталевго конуса (плунжера), який вдавлюється у ґрунт, а потім вимірюється сила проникнення. Оскільки сила, необхідна для проникнення у ґрунт, залежить від геометрії пристрою, як стандартну форму використовують конус з діаметром основи 20,27 мм і кутом при вершині 30° (рис. 2).

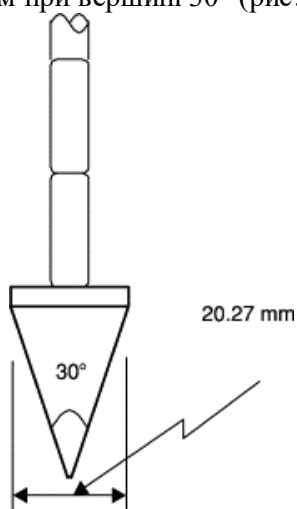


Рис. 2. Стандартний конус пенетрометра Американського товариства інженерів сільського господарства (Sudduth K.A. et al., 2004)

Але для важких ґрунтових умов (у нашому випадку чорнозем типовий малогумусний важкосуглинковий на лесовидному суглинку) ми використовували конус меншого розміру з діаметром основи 12,83 мм (1/2").

Другою основною змінною, що впливає на силу проникнення, є швидкість проникнення. ASAE Стандарт EP542 рекомендує (Sudduth K.A. et al., 2004) квазістатичну швидкість 1,83 м мин⁻¹. Силу проникнення у приладі визначають за допомогою механізму вимірювання навантаження. У приладі встановлено датчик вимірювання глибини, такий як потенціометр, що дозволяє отримати профіль опору проникнення у ґрунт. Сила опору проникнення виражається як індекс конуса, який є відношенням сили до площі основи конуса. Значення індексу ґрунтового конуса є складовим значенням, яке залежить від структури ґрунту, об'ємної щільності та вмісту вологи.

Однією з основних проблем, пов'язаних з використанням індексу конуса для того щоб уявити щільність ґрунту, є його мінливість, особливо у сухих і грудкуватих умовах. З появою точного землеробства та потенційної ролі ущільнення ґрунту в обмеженні інфільтрації води, дренажу та росту коренів зріс інтерес до конусного пенетрометра як до інструмента картування щільності ґрунту. Отже, тепер доступні повністю автоматизовані конічні пенетрометри із системами глобального позиціонування (GPS) для отримання даних географічного розташування.

Для визначення глибини, на якій ґрунт є достатньо щільним і потребує додаткової обробки

за допомогою порталу <https://portal.datafield.com.ua> було:

- 1) визначено межі дослідного поля;
- 2) складено комп'ютерну карту дослідного поля з метою автоматичного створення «сітки» з розмірами ділянок згідно з планом польового стаціонарного досліду та розміщення варіантів за повтореннями, двомірне картографування, оцінка геостатистичних показників;
- 3) розроблено послідовність проведення вимірів;
- 4) визначено точки, де необхідно провести вимірювання;
- 5) зафіксовано координати та підготовлено пенетрометр до вимірювань.

На дослідному полі проводили вимірювання щільності ґрунту, фіксували показання вимірювань за допомогою GPS модуля SIM 28ML, що вмонтований до приладу.

Переконавшись у тому, що всі параметри вимірювань зафіксовано, закінчували вимірювання, піднімали щуп пенетрометра, переходили до іншої точки та повторювали вимірювання.

Визначення вологості ґрунту проводили термостатно-ваговим методом (DSTU, 2009).

Результати досліджень. Було зазначено, що за вирощування помідора в зрошуваній овочево-кормовій сівозміні ущільнення ґрунту більше допустимої норми (32–35 кг/м² опору проникнення пенетрометра) для більшості систем удобрення відмічається вже з глибини 12,5 см (табл. 2). Виключення складає впровадження сидеральної системи удобрення та використання органічних добрив з насиченістю 21 т/га сівозмінної площі, де перевищення допустимих меж за опором проникнення пенетрометра зазначається тільки з глибини 15 см.

Зі зростанням глибини шару ґрунту щільність його збільшується з глибини 22,5–30 см та перевищує допустимі для проникнення коренів рослин значення опору проникнення пенетрометра (50–55 кг/м²). Так застосування в сівозміні 14 т/га гною та N₆₇P₆₃K₆₃ або N₆₇P₆₃K₆₃ зумовлює значення даного параметра вже з глибини 22,5 см, тоді як за використання високх норм органічних добрив (21 т/га сівозмінної площі) – критичне значення параметра відмічено тільки з глибини 30 см.

Таблиця 2. – Вплив систем удобрення помідора в зрошуваній овочево-кормовій сівозміні на опір проникнення пенетрометра у ґрунт, кг/м²

Система удобрення у сівозміні	Глибина шару ґрунту, см								
	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5
1. Без добрив	5,6	11,5	19,2	29,2	35,1	35,6	43,4	46,7	51,4
2. Сидеральна з комплексом мікробних препаратів	6,2	12,4	20,0	25,2	29,7	36,7	42,8	46,9	45,9
3. Гній 14 т/га + N ₆₇ P ₆₃ K ₆₃	8,3	15,1	20,6	25,7	32,9	35,4	49,4	53,4	55,8
4. Гній 21 т/га	6,8	11,7	15,8	21,8	26,2	32,0	46,2	50,0	52,8
5. N ₆₇ P ₆₃ K ₆₃	8,3	17,3	21,2	25,5	33,1	40,7	47,4	51,4	55,1
6. Гній 14 т/га	9,0	16,2	21,3	27,5	34,5	37,7	45,9	50,1	53,6
7. Гній 14 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁	9,2	15,6	22,4	26,9	32,1	35,5	43,9	48,0	54,4
8. Гній 21 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁	6,8	13,8	20,9	29,7	38,5	46,0	48,4	50,0	51,2
9. Інтенсивна N ₂₂₆ P ₁₂₉ K ₁₃₄ + мікродобрива	5,1	13,8	22,3	27,6	31,4	38,3	47,3	49,8	52,5
10. Гній 14 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁ (локально)	7,2	16,0	23,1	28,9	36,6	42,2	49,0	52,0	56,8
11. Гній 21 т/га + N ₁₇ P ₁₆ K ₁₆ (локально)	8,7	20,3	28,5	30,7	36,6	41,7	46,4	51,0	55,2
12. Біологічна (органічні добрива + сидерати + мікробні препарати)	10,1	19,8	25,2	28,2	34,0	42,6	46,4	51,5	53,8

продовження таблиці 2

Система удобрення у сівозміні	Глибина шару ґрунту, см								
	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0	37,5	40,0	42,5	45,0
1. Без добрив	44,5	51,2	56,1	57,7	60,2	51,3	62,6	61,6	63,6
2. Сидеральна з комплексом мікробних препаратів	54,5	57,6	59,2	56,0	54,9	54,0	56,6	57,2	61,0
3. Гній 14 т/га + N ₆₇ P ₆₃ K ₆₃	51,1	57,4	58,1	58,3	51,4	61,6	59,5	64,6	63,1
4. Гній 21 т/га	54,9	49,1	57,7	61,6	60,9	58,7	59,2	60,9	60,9
5. N ₆₇ P ₆₃ K ₆₃	57,1	59,0	59,3	61,4	60,8	63,3	63,4	63,7	62,2
6. Гній 14 т/га	55,8	51,6	54,1	59,0	54,8	58,7	61,2	58,5	57,2
7. Гній 14 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁	53,0	56,8	59,5	60,8	60,4	60,2	62,0	63,1	65,9
8. Гній 21 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁	53,4	54,3	58,1	57,5	61,4	56,9	59,4	63,6	62,1
9. Інтенсивна N ₂₂₆ P ₁₂₉ K ₁₃₄ + мікродобрива	55,8	50,4	58,3	58,0	55,3	62,0	64,8	60,3	62,1
10. Гній 14 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁ (локально)	59,1	51,0	60,1	46,0	48,0	63,9	64,1	64,3	65,4
11. Гній 21 т/га + N ₁₇ P ₁₆ K ₁₆ (локально)	52,3	49,9	59,5	59,5	59,5	58,3	60,5	63,9	65,4
12. Біологічна (органічні добрива + сидерати + мікробні препарати)	56,7	58,4	59,7	55,9	63,0	63,1	64,2	63,6	67,3

За вирощування капусти білоголової використання високих доз мінеральних добрив (N₂₂₆P₁₂₉K₁₃₄) зумовлює значення параметра

опору проникнення пенетрометра на рівні щільного ґрунту вже з глибини 10 см (33,9 кг/м²) (табл. 3).

Таблиця 3. – Вплив систем удобрення капусти білоголової в зрошуваній овочево-кормовій сівозміні на опір проникнення пенетрометра у ґрунт, кг/м²

Система удобрення у сівозміні	Глибина шару ґрунту, см								
	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5
1. Без добрив	7,3	13,3	19,8	23,4	33,6	35,8	48,3	49,9	52,6
2. Сидеральна з комплексом мікробних препаратів	11,1	16,0	25,6	31,3	36,4	40,8	44,0	47,8	47,6
3. Гній 14 т/га + N ₆₇ P ₆₃ K ₆₃	5,1	15,5	22,8	25,7	31,2	34,1	41,1	45,7	49,5
4. Гній 21 т/га	7,1	12,4	15,4	19,0	27,6	32,5	38,7	42,3	46,0
5. N ₆₇ P ₆₃ K ₆₃	3,3	10,9	15,8	19,8	26,3	33,4	39,9	38,9	48,0
6. Гній 14 т/га	11,9	19,3	24,6	30,7	35,1	37,3	42,7	40,3	47,4
7. Гній 14 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁	10,9	17,0	20,9	30,3	33,2	42,3	46,5	42,3	53,2
8. Гній 21 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁	4,3	12,8	16,7	22,2	27,4	34,0	37,4	41,2	40,3
9. Інтенсивна N ₂₂₆ P ₁₂₉ K ₁₃₄ + мікродобрива	8,5	18,1	28,4	33,9	41,9	47,8	52,2	53,6	58,5
10. Гній 14 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁ (локально)	9,3	20,4	27,2	28,2	34,1	36,9	37,7	37,3	37,9
11. Гній 21 т/га + N ₁₇ P ₁₆ K ₁₆ (локально)	4,4	14,9	20,3	32,1	34,1	36,6	41,3	43,3	47,3
12. Біологічна (органічні добрива + сидерати + мікробні препарати)	8,7	19,5	27,0	32,6	37,4	41,0	46,9	51,7	53,8

продовження таблиці 3

Система удобрення у сівозміні	Глибина шару ґрунту, см								
	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0	37,5	40,0	42,5	45,0
1. Без добрив	53,7	55,0	59,0	60,4	61,0	62,5	62,5	65,4	64,4
2. Сидеральна з комплексом мікробних препаратів	42,1	52,4	53,0	48,3	51,9	57,0	58,6	60,3	62,2
3. Гній 14 т/га + N ₆₇ P ₆₃ K ₆₃	49,1	50,9	51,5	55,0	56,5	56,0	58,7	59,0	59,3
4. Гній 21 т/га	49,1	49,6	52,7	52,0	53,4	54,1	54,4	58,1	59,8
5. N ₆₇ P ₆₃ K ₆₃	51,5	48,9	54,7	57,8	58,1	59,9	60,3	52,2	59,6
6. Гній 14 т/га	50,7	47,3	46,0	52,9	55,8	45,2	57,5	59,2	59,4
7. Гній 14 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁	56,6	55,1	57,3	51,9	59,3	55,7	60,0	62,8	62,7
8. Гній 21 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁	47,9	51,7	52,7	45,6	49,3	57,0	59,0	60,6	62,9
9. Інтенсивна N ₂₂₆ P ₁₂₉ K ₁₃₄ + мікродобрива	57,0	56,2	58,3	58,7	58,9	51,1	62,3	61,9	63,2
10. Гній 14 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁ (локально)	53,7	55,0	59,0	60,4	61,0	62,5	62,5	65,4	64,4
11. Гній 21 т/га + N ₁₇ P ₁₆ K ₁₆ (локально)	42,1	52,4	53,0	48,3	51,9	57,0	58,6	60,3	62,2
12. Біологічна (органічні добрива + сидерати + мікробні препарати)	49,1	50,9	51,5	55,0	56,5	56,0	58,7	59,0	59,3

За даної системи удобрення зазначається мінімальна глибина залягання горизонту з критичним значенням опору проникнення пенетрометра (22,5 см), тоді як за іншими варіантами даний рівень зазначається з глибини 25,0–35,0 см.

Внесення мінеральних (N₆₇P₆₃K₆₃) та органічних добрив (21 т/га гною), деякі варіації органо-мінеральних систем удобрення (14 т/га гною + N₆₇P₆₃K₆₃; 21 т/га гною + N₃₃P₃₁K₃₁) зумовлюють високий рівень ущільнення ґрунту тільки з глибини 15,0 см (32,5–34,1 кг/м²).

Як і у випадку з помідором використання високих норм органічних добрив (21 т/га сівозмінної площі) зумовлює більш глибоке залягання горизонту з критичним рівнем ущільнення ґрунту. За даних систем удобрення опір проникненню пенетрометра на рівні 57,0–58,1 кг/м² зазначається для глибини 37,5–42,5 см.

Для останньої культури ланки сівозміні (буряка столового) позитивний вплив на зниження ущільненості орного шару ґрунту забезпечує використання сидеральної та біологізованої систем удобрення, де використано в комплексі мікробні препарати, а також застосування органо-мінеральних систем удобрення.

За використання ресурсощадної (21 т/га гною + локально N₁₇P₁₆K₁₆) та біологізованої

систем удобрення критичний рівень значення параметра опору проникнення пенетрометра (51,3–53,5 кг/м²) відмічено з глибини 42,5 см, за іншими системами удобрення – 22,5 см (табл. 4).

Проаналізувавши отримані результати в цілому, можна зазначити, що найбільш низький опір ґрунту мають верхні шари. У шарі ґрунту 0–10 см опір до проникнення у ґрунт мало перевищує 10 кг/см², тоді як проходження плунжера через шари з більшою структурою або більш високою щільністю показники опору ґрунту зростають. Починаючи з глибини 10 см, у середньому, ґрунт на дослідному полі є досить ущільненим, але з 15 см, ґрунт стає дедалі ущільненим, що свідчить про фізико-гідрологічну деградацію, тобто згубним для росту рослин. Фактично ґрунт на дослідному полі є переущільненим, відповідно ріст коренів – уповільненим. Пов'язана з цим нестача кисню може посилити захворюваність на кореневі інфекції, викликати хлороз рослин через виробіток екзогенного ґрунтового етилену.

Таблиця 4. – Вплив систем удобрення буряка столового в зрошуваній овочево-кормовій сівозміні на опір проникнення пенетрометра у ґрунт, кг/м²

Система удобрення у сівозміні	Глибина шару ґрунту, см								
	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5
1. Без добрив	11,7	34,0	40,4	41,8	46,2	53,7	58,3	58,7	60,1
2. Сидеральна з комплексом мікробних препаратів	5,1	9,7	17,7	21,3	24,2	30,7	42,2	48,8	55,6
3. Гній 14 т/га + N ₆₇ P ₆₃ K ₆₃	3,4	4,9	5,4	10,1	21,4	36,9	49,9	53,2	55,0
4. Гній 21 т/га	5,1	11,9	21,3	31,0	40,5	46,3	52,1	56,0	58,6
5. N ₆₇ P ₆₃ K ₆₃	6,9	9,8	20,8	28,4	33,1	44,0	48,5	54,8	52,8
6. Гній 14 т/га	7,2	16,9	23,0	24,6	32,4	47,7	35,9	55,8	62,6
7. Гній 14 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁	3,0	5,6	11,7	19,4	29,5	36,2	34,9	52,0	59,1
8. Гній 21 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁	3,2	9,4	15,5	17,6	30,6	40,1	46,8	52,9	52,5
9. Інтенсивна N ₂₂₆ P ₁₂₉ K ₁₃₄ + мікродобрива	8,6	12,7	25,3	33,4	42,6	48,2	48,4	51,2	52,9
10. Гній 14 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁ (локально)	6,2	17,9	27,2	34,4	39,9	37,4	44,8	48,8	52,3
11. Гній 21 т/га + N ₁₇ P ₁₆ K ₁₆ (локально)	10,6	20,6	20,8	21,2	22,5	27,8	32,3	33,2	35,6
12. Біологічна (органічні добрива + сидерати + мікробні препарати)	6,3	13,2	22,4	27,4	35,7	37,9	27,9	33,3	40,3

продовження таблиці 4

Система удобрення у сівозміні	Глибина шару ґрунту, см								
	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0	37,5	40,0	42,5	45,0
1. Без добрив	51,5	59,3	47,0	64,6	39,2	62,8	64,1	63,8	61,1
2. Сидеральна з комплексом мікробних препаратів	58,2	57,6	58,0	58,7	59,7	59,4	58,2	56,7	36,5
3. Гній 14 т/га + N ₆₇ P ₆₃ K ₆₃	56,5	55,1	52,1	44,0	44,8	45,2	45,0	48,0	50,1
4. Гній 21 т/га	58,7	59,0	59,9	56,6	56,4	50,6	51,0	51,2	49,6
5. N ₆₇ P ₆₃ K ₆₃	53,6	55,0	56,4	56,0	55,9	56,4	56,7	57,1	58,2
6. Гній 14 т/га	49,0	46,1	52,9	63,0	68,0	66,6	67,2	60,0	60,0
7. Гній 14 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁	60,7	61,9	61,7	60,3	58,5	60,5	63,6	30,2	64,8
8. Гній 21 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁	48,8	50,6	49,6	52,1	52,2	53,8	58,8	54,1	55,8
9. Інтенсивна N ₂₂₆ P ₁₂₉ K ₁₃₄ + мікродобрива	53,7	50,3	50,6	58,6	58,9	59,4	60,3	59,6	61,5
10. Гній 14 т/га + N ₃₃ P ₃₁ K ₃₁ (локально)	57,2	59,3	61,3	61,5	60,7	62,1	59,8	59,6	60,0
11. Гній 21 т/га + N ₁₇ P ₁₆ K ₁₆ (локально)	38,0	39,8	41,5	39,8	45,5	41,7	52,0	53,3	38,6
12. Біологічна (органічні добрива + сидерати + мікробні препарати)	49,9	40,4	37,3	47,8	49,5	49,5	49,8	51,3	52,7

На рисунку 3 наведено інтерполяцію відомих значень вимірювань глибини занурення плунжера та опору ґрунту на дослідному полі. Зелений колір інтерполяції означає, що ущіль-

нення знаходиться в допустимих значеннях, жовтий колір означає, що ділянки є ущільненими, червоний колір означає, що ущільнення є досить високим.

При заглибленні плунжера до 10 см спостерігаємо, що ущільнення перевищує норму, крім ділянок виділених зеленим кольором, на глибині 10 см вже присутнє високе ущільнення. При зануренні щупа від 15 до 20 см спостерігаємо декілька зон, які мають ущільнення у межах норми.

При заглибленні плунжера від 25 до 40 см можемо відмічати, що нижня та деяка частина інших ділянок поля є досить переущільненими та потребують рихлення на даній глибині.

Візуалізація опору проникнення у ґрунт у дослідженому полі ясно показує особливості просторової строкатості. По-різному проявляється переущільнення за глибиною та величиною перепаду порівняно з суміжними шарами. Характерно, що за досить високих показників опору проникнення у ґрунт потрібен його глибокий обробіток.

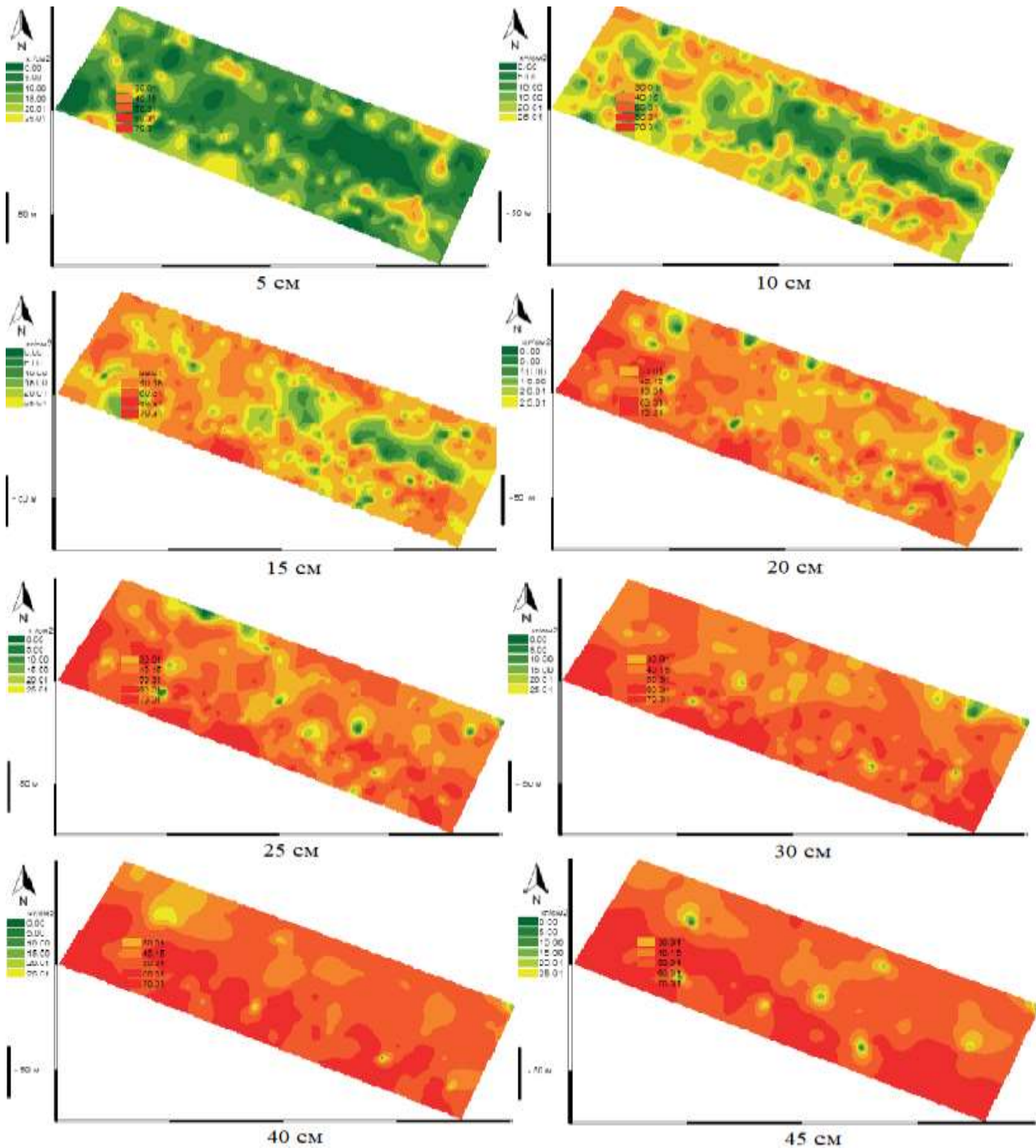


Рис. 3. Опір проникнення у ґрунт залежно від глибини заглиблення плунжера

Отримано значний діапазон знайдених показників опору проникнення коренів (рис. 4). Вони змінюються від значень, що порівняно легко долають корені практично всіх вирощуваних культур (не більше 20 кг/см^2), до значень явно шкідливих, що ускладнюють їх ріст і розвиток (у межах $30\text{--}40 \text{ кг/см}^2$). Водночас для успішного проростання насіння та розвитку коренів ба-

жано, щоб опір проникнення у ґрунт не перевищував 10 кг/см^2 , а для дрібнонасієних (таких як морква та цибуля на ріпку) – навіть $5\text{--}7 \text{ кг/см}^2$. На нашу думку, при величині опору проникнення у ґрунт вище 40 кг/см^2 шкода від переущільнення на родючість ґрунту є очевидною й нехтувати цією проблемою не слід.

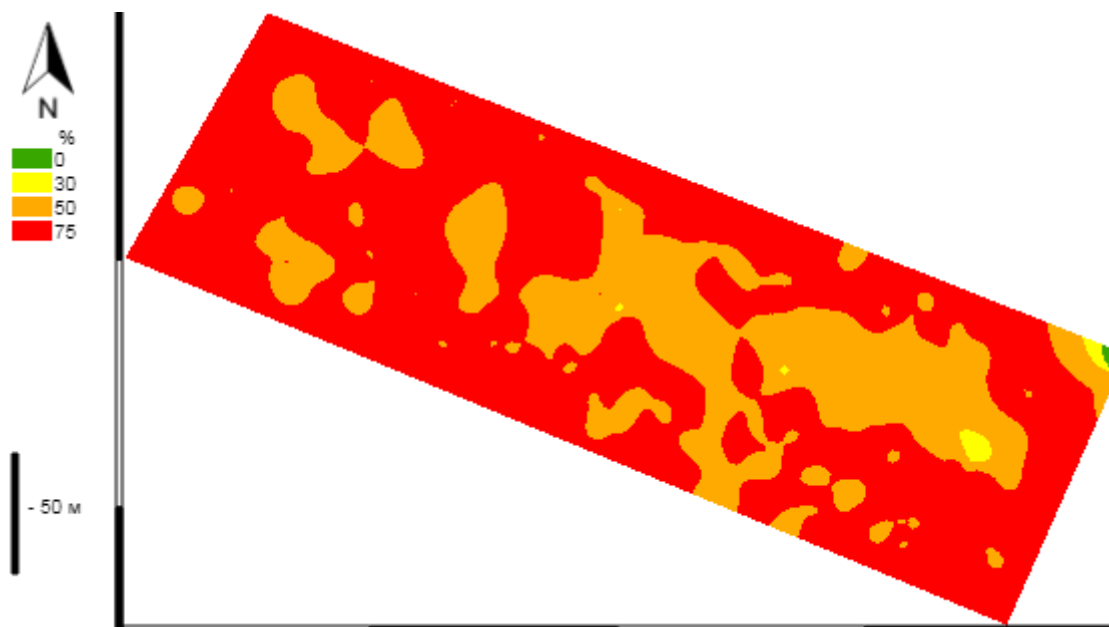


Рис. 4. Опір проникнення коренів, %

Обговорення. Для оцінки щільності ґрунту використовували показник опору проникнення у ґрунт. У якості плунжера твердоміра використовували конус, кут атаки якого становить 30° , при цьому утворюється оптимальне співвідношення довжини плунжера до площі перерізу і зменшується шорсткість поверхні, а отже, опір подолання шкідливого тертя, також визначені сумарні види опорів (Medvedev V.V., 2009, Sudduth K.A. et al., 2004). Отримано дані про те, які зусилля потрібно прикласти кореням рослин, щоб подолати опір ґрунту. Використання опору проникнення у ґрунт як індикатора характеристик щільності ґрунту має велику точність показників. Визначення характерних показників опору проникнення у ґрунт дозволяє розробити необхідні критерії вибору глибини обробки (Syromyatnikov Y. et al., 2021). У такий спосіб можна усунути небезпеку деградації ґрунтів. Спираючись на отримані значення опору проникнення у ґрунт та допустимі їх параметри, що використовують овочеві культури, визначено принципи застосування значень опору проникнення у ґрунт для вирішення питань

щодо проведення додаткових обробок на велику глибину.

Провівши відповідні вимірювання опору проникнення у ґрунт у період, що передують проведенню основного обробки, визначено, на яку глибину потрібно обробляти поле. Звичайно, потрібно мати на увазі, що найкращі фізичні умови у ґрунті в передпосівний період формуються при невеликих (не більше $10\text{--}15 \text{ кг/см}^2$) параметрах опору проникнення у ґрунт, а для дрібнонасієних культур – не більше 10 кг/см^2 (Romaneckas, 2015, Medvedev V.V., Plysko I.V., 2016). Далі з ущільненням ґрунту фізичні властивості погіршуються, потрібен більш інтенсивний та глибший його обробіток для отримання сприятливого фізичного стану та щільності (Syromyatnikov Y., 2020); опір проникнення у ґрунт – надійний показник для вирішення питання щодо проведення додаткових обробок, спрямованих на зниження ущільнення.

У кожному з цих випадків, використовуючи розроблені критерії, можна вирішити питання, на яку глибину потрібно обробляти ґрунт, опір

проникнення у ґрунт у цьому плані може бути допоміжним інструментарієм для агронома. Прикладним завданням при вимірюванні опору проникнення є його показник для використання з метою оцінки якості виконаного обробітку ґрунту. Дослідження ущільнення ґрунту за допомогою пенетрометра має важливе значення як частина фізико-механічних властивостей ґрунтів, для поліпшення практики обробітку ґрунту та конструювання ґрунтообробних машин та знарядь (Syromyatnikov Y., 2019, Syromyatnikov Y., 2021).

Висновки. Отримано діапазон показників опору проникнення коренів. Вони змінюються від значень трохи більше 20 кг/см², до значень не більше 30–40 кг/см² – шкідливих, що уповільнюють ріст і функціонування рослин. При величині опору проникнення у ґрунт вище 40 кг/см² шкода від переущільнення для родючості ґрунту очевидна. Встановлено, що ґрунт на дослідному полі є переущільненим, навіть верхні шари (0–15 см) ґрунту дослідного поля мають ущільнену структуру (від 0,06 до 34,46 кг/см²) і збільшується з глибиною, що свідчить про фізико-гідрологічну деградацію.

Встановлено, що для рослин ланки зрошуваної овочево-кормової сівозміни (помідор, капуста білоголова, буряк столовий) використання систем удобрення з поєднанням сидеральних добрив та комплексу мікробних препаратів, а також органічних та органо-мінеральних систем удобрення з використанням високих норм органічних добрив (21 т/га сівозмінної площі), забезпечує формування критичного рівня ущільненості ґрунту з більш глибоких горизонтів (за вирощування помідора – з глибини 22,5 см, капусти білоголової – 37,5 см, буряка столового – 37,5–42,5 см).

Подяка. Колектив авторів статті та директор Інституту овочівництва і баштанництва НААН висловлюють подяку директору ТОВ «Нетмастер» Шофировському Дмитру за надану матеріальну підтримку, а саме ручного конічного GPS пенетрометра «Datafield» та доступ до порталу <https://portal.datafield.com>, що дало провести виміри опору проникнення на глибину на ділянках з безперервним традиційним обробітком ґрунту та здійснити обрахунки на сучасному рівні за короткий проміжок часу та з мінімальними затратами ручної праці. Сподіваємося на подальшу плідну співпрацю та процвітання в роботі.

References

Alkroosh, I. et al. (2021). Effect of Sand Percentage on the Compaction Properties and Undrained Shear Strength of Low Plasticity Clay. *Aro-the scientific journal of Koya university*. 9 (1), 16-20. doi: 10.14500/aro.10748 [in English].

Carbonell-Bojollo, R.M., Friedrich, T., Derpsch, R. (2021). Global Spread of Conservation Agriculture for Enhancing Soil Organic Matter, Soil. *Soil Organic Matter and Feeding the Future: Environmental and Agronomic Impacts*. 4, 91-126. doi: 10.1201/9781003102762-4 [in English].

Cerdà, A. et al. (2021). Long-term monitoring of soil bulk density and erosion rates in two Prunus Persica (L) plantations under flood irrigation and glyphosate herbicide treatment in La Ribera district, Spain. *Journal of Environmental Management*. 282, 111965 [in English]. doi: 10.1007/s12517-021-08879-2.

Correa, J. et al. (2019). Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. *Journal of experimental botany*. 70 (21), 6019-6034. doi: 10.1093/jxb/erz383. [in English].

DSTU B B.2.1-17: 2009 Soils. Methods of laboratory determination of physical properties. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 32 p. [in English].

Evans, R. (2017). Factors controlling soil erosion and runoff and their impacts in the upper Wissey catchment, Norfolk, England: A ten year monitoring programme. *Earth Surface Processes and Landforms*. 42 (14), 2266-2279 [in English]. doi: 10.1002/esp.4182.

Froehlich, H.A., Miles, D.W.R., Robbins R.W. (1985). Soil bulk density recovery on compacted skid trails in central Idaho. *Soil Science Society of America Journal*. 49 (4), 1015-1017 [in English]. doi: 10.2136/sssaj1985.03615995004900040045x.

Joshi, R. (2017). Physical constraints of fine textured heavy soils and their management-A review. *Agricultural Reviews*. 38(3), 216-222 [in English]. doi: 10.18805/ag.v38i03.8981.

Hernández, T.D.B. et al. (2019). Assessment of long-term tillage practices on physical properties of two Ohio soils. *Soil and Tillage Research*. 186, 270-279 [in English]. doi: 10.1016/j.still.2018.11.004.

Huang, X., Horn, R., Ren, T. (2022). Soil structure effects on deformation, pore water pressure, and consequences for air permeability during compaction and subsequent shearing. *Geoderma*. 406, 115452 [in English]. doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115452.

Kutz, O.V. (2017). Microbiological activity of soil under different systems of optimization of tomato plant nutrition. *Vegetable and Melon Growing*. 63, 185-193 [in English].

Kutz, O.V., Terekhina, L.A., Mozgovskiy, O.F. (2015). Microbiological activity of soil under alternative fertilization systems for late-ripe white cabbage. *Scientific works of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beets*. 23, 149-153 [in English].

Li, D.Q., Wang, J., Rui, R. (2021). Effects of specimen preparation method and strain rate on the mechanical responses of a clayey loess. *Arabian Journal of Geosciences*. 14 (23), 1-13 [in English]. doi: 10.1007/s12517-021-08879-2.

Manik, S.M. et al. (2019). Soil and crop management practices to minimize the impact of waterlogging on crop productivity. *Frontiers in plant science*. 10, 140. doi: 10.3389/fpls.2019.00140 [in English].

Medvedev, V.V. (2009). Soil penetration resistance and penetrometers in studies of tillage technologies. *Eurasian Soil Science*. 42 (3), 299-309. doi: 10.1134/S1064229309030077 [in English].

Medvedev, V.V., Plysko, I.V. (2016). Spatial heterogeneity of physical properties of the soils in Ukraine. *Agricultural science and practice*. 1, 3-16. doi: 10.15407/agrisp3.01.003 [in English].

Morales-Olmedo, M.G. et al. (2021). Full-field characterization of sweet cherry rootstocks: responses to soil with different air-filled porosities. *Plant and Soil*. 1-17. doi: 10.1007/s11104-021-05184-5 [in English].

Moreno-Maroto, J.M., Alonso-Azcárate, J., O'Kelly, B.C. (2021). Review and critical examination of fine-grained soil classification systems based on plasticity. *Applied Clay Science*. 200, 105955. doi: 10.1016/j.clay.2020.105955 [in English].

Pashchenko, V.F., Syromyatnikov, Y. (2017). Influence of local loosening of soil on soybean yield. *Grain crops*. 1(2), 329 [in English].

Pashchenko, V.F. et al. (2019). The influence of local loosening of the soil on soybean productivity. *Tractors and Agricultural Machinery*. 5, 79-86 [in English].

Pierce, F.J., Lal, R. (2017). Monitoring the impact of soil erosion on crop productivity. Soil erosion research methods. Routledge. 235-263. doi: 10.1201/9780203739358-10 [in English].

Priori, S. et al. (2021). Soil Physical-Hydrological Degradation in the Root-Zone of Tree Crops: Problems and Solutions. *Agronomy*.

11(1), 68 [in English]. doi: 10.3390/agronomy11010068.

Pulido-Moncada, M. et al. (2020). Residual effects of compaction on the subsoil pore system. – A functional perspective. *Soil Science Society of America Journal*. 84 (3). 717-730 [in English]. doi: 10.1002/saj2.20061.

Reichert, J.M. et al. (2018). Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture. *Catena*. 165, 345-357 [in English]. doi: 10.1016/j.catena.2018.02.014.

Romanekas, K. et al. (2015). The main physical properties of planosol in maize (*Zea mays* L.) cultivation under different long-term reduced tillage practices in the Baltic region. *Journal of Integrative Agriculture*. 14 (7), 1309-1320 [in English]. doi: 10.1016/S2095-3119(14)60962-X.

Rouabhi, A. et al. (2018). What Are The Factors Affecting No-Till Adoption In The Farming System Of Sétif Province In Algeria? *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*. 6 (6), 636-641 [in English]. doi:10.24925/turjaf.v6i6.636-641.1343.

Ruehlmann, J. (2020). Soil particle density as affected by soil texture and soil organic matter: 1. Partitioning of SOM in conceptual fractions and derivation of a variable SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*. 375, 114542 [in English]. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114542.

Ryken, N. et al. (2018). Soil erosion rates under different tillage practices in central Belgium: New perspectives from a combined approach of rainfall simulations and ⁷Be measurements. *Soil and Tillage Research*. 179, 29-37 [in English]. doi: 10.1016/j.still.2018.01.010.

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*. 1-23 [in English]. doi:10.1007/s42853-021-00117-7.

Sudduth, K.A., Hummel, J.W., Drummond, S. T. (2004). Comparison of the Veris Profiler 3000 to an ASAE-standard penetrometer. *Applied Engineering in Agriculture*. 20 (5), 535 [in English]. doi: 10.13031/2013.17452.

Syromyatnikov, Y.N. (2017). Ways to reduce the specific pressure of wheel propellers on the soil. *Agriculture*. 4, 95-103 [in English].

Syromyatnikov, Y. (2019). Influence of local loosening of the soil on the yield of soybeans. *Știința Agricolă*. 1, 117-124 [in English].

Syromyatnikov Y. (2019). Design parameters of the rotor of the tillage loosening and separating machine. *Agriculture*. 2, 7-27 [in English].

Syromyatnikov, Y. (2020). Substantiation of the parameters of the flat-cutting share for loosening the soil during its layer-by-layer processing. *Altai State Agrarian University Bulletin*. 3, 163-170 [in English].

Syromyatnikov Y. et al. (2021). Productivity of tillage loosening and separating machines in an aggregate with tractors of various capacities. *Journal of Terramechanics*. 98, 1-6. doi: 10.1016/j.jterra.2021.09.002 [in English].

Syromyatnikov, Y. (2021). Substantiation of the parameters of the cultivator of the cultivator of the stratifier. *Engineering technologies and systems*. 31 (2), 257-273 [in English].

Villeneuve, F. et al. (2020). Carrot physiological disorders and crop adaptation to stress. *Carrots in Related Apiaceae Crops*. Wallingford, Cabi. 156-170 [in English]. doi: 10.1079/9781789240955.0156.

Webb, R.H. (2002). Recovery of severely compacted soils in the Mojave Desert, California, USA. *Arid Land Research and Management*. 16 (3), 291-305 [in English]. doi: 10.1080/153249802760284829.

Yue, L. et al. (2021). Impacts of soil compaction and historical soybean variety growth on soil macropore structure. *Soil and Tillage Research*. 214, 105166 [in English]. doi: 10.1016/j.still.2021.105166.