Original researches

Estimation of the Level of Recreational Transformation of Public Green Spaces by Indicators of Soil Penetration Resistance

Received: 29 July 2020
Revised: 05 August 2020
Accepted: 06 August 2020

Bogdan Khmelnytsky Melitopol State
Pedagogical University, Hetmanska Str., 20,
Melitopol, 72318, Ukraine

Tel.: +38-098-507-96-82
E-mail: nadyayork777@gmail.com

Cite this article: Teluk, P., Yorkina, N. V.,
Umerova, A., Budakova, V. S., Nydion, N. M.,
& Zhukov, O. V. (2020). Estimation of the
level of recreational transformation of public
green spaces by indicators of soil penetration
resistance. *Agrology*, 3(3), 171–180.
doi: 10.32819/020020

P. Teluk, N. V. Yorkina, A. Umerova, V. S. Budakova, N. M. Nydion, O. V. Zhukov
Bogdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University, Melitopol, Ukraine

Abstract. The article shows the possibility of assessing the level of recreational transformation of public green spaces in terms of the soil penetration resistance and proved that the profile distribution of soil penetration resistance values is an information valuable indicator for establishing the level of recreational load. The measurement of soil penetration resistance within the park Novooleksandrivsky (Melitopol, Ukraine) was performed at 179 points on a quasi-regular grid with a distance between the points of accounting 30–40 m. The soil penetration resistance was revealed to be naturally increases with the growth of the depth of the soil layer from 2.42 ± 0.023 MPa in the soil layer 0–5 cm to 9.86 ± 0.078 MPa in the soil layer 95–100 cm. The process of increasing soil penetration resistance with depth is not monotonous, resulting in the presence of local penetration resistance at a depth of 50–55 or 55–60 cm. The variability of soil penetration resistance within one layer, which is described by the variation coefficient, is in the range of 6.98–20.54%. This indicator naturally changes by profile. The high level of variation is peculiar to the top layer of soil 0–5 cm, where the coefficient of variation of soil penetration resistance is 12.94 %. It is proved that under the influence of recreation there is a formation of functional layering of soil, expressed in the existence of structures in which layers of soil with greater soil penetration resistance are degraded by layers of less penetration resistance. The presence of such features can cause a complex of negative phenomena, which are associated with restriction of moisture penetration into the soil, reducing the migration capacity of air in the soil, limiting the growth of root systems of plants and the movement of animals. Functional layering can form local waterproof horizons that will limit the soil's ability to absorb moisture. Correlational analysis of the connection of soil penetration resistance and the indicator of recreational load allowed to establish that with the increase of recreational pressure soil penetration resistance increases. The established correlational dependence of soil penetration resistance indicators and the assessment of the level of recreational load allows us to consider the possibility on the basis of penetration resistance data to quantify the level of recreational load. We completed this task with the help of multiple linear regression with the procedure of step-by-step inclusion of predictors in the model. The regression model is statistically significant and has made it easy to explain 46% of the varying indicators of recreational load. The step-by-step inclusion procedure provided an opportunity to choose the 10 most informative predictors for use in the model. The following levels of recreational load were established: low level, below moderate, moderate level, above moderate to high levels, as well as the procedure for indication of these levels based on soil penetration resistance data at different depths. The levels of recreational load were indicated on the basis of the procedure of classification trees on the soil penetration resistance data.

Keywords: recreation; descriptive statistics; regression analysis; soil properties; urbanization.

Оцінка рівня рекреаційної трансформації зелених насаджень загального користування за показниками твердості ґрунту

П. Телюк, Н. В. Йоркіна, А. Умерова, В. С. Будакова, Н. М. Найдьон, О. В. Жуков
Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького, м. Мелітополь, Україна

Анотація. Показано можливість оцінки рівня рекреаційної трансформації зелених насаджень загального користування за показниками твердості ґрунту та доведено, що профільний розподіл значень твердості ґрунту є інформаційно цінним показником для встановлення рівня рекреаційного навантаження. Вимірювання твердості ґрунту в межах парку Новоолександрівський (м. Мелітополь, Україна) виконано в 179 точках по квазірегулярній сітці з відстанню між точками обліку 30–40 м. Встановлено, що твердість ґрунту закономірно збільшується зі зростанням глибини шару ґрунту з 2.42 ± 0.023 МПа у шарі ґрунту 0–5 см до 9.86 ± 0.078 МПа у шарі ґрунту 95–100 см. Процес збільшення твердості з глибиною не є монотонним, унаслідок чого спостерігається наявність локального максимуму твердості на глибині 50–55 або 55–60 см. Варіювання твердості ґрунту в межах одного

шару, яке охарактеризоване за допомогою коефіцієнта варіації, знаходиться в діапазоні 6.98–20.54%. Цей показник закономірно змінюється за профілем. Високий рівень варіації властивий для верхнього шару ґрунту 0–5 см, де коефіцієнт варіації твердості становить 12.94%. Доведено, що під впливом рекреації відбувається формування функціональної шаруватості ґрунту, яке виражається в існуванні структур, коли шари ґрунту з більшою твердістю розмежовуються шарами меншої твердості. Наявність таких особливостей може викликати комплекс негативних явищ, які пов'язані з обмеженням проникнення вологи в ґрунт, зниженням міграційної здатності повітря в ґрунті, лімітацією росту кореневих систем рослин та руху тварин. Функціональна шаруватість може формувати локальні водонепроникні горизонти, які будуть обмежувати здатність ґрунту вбирати вологу. Кореляційний аналіз зв'язку твердості ґрунту та показника рекреаційного навантаження дозволив встановити, що зі збільшенням рекреаційного тиску твердість ґрунту зростає. Визначена кореляційна залежність показників твердості ґрунту та оцінки рівня рекреаційного навантаження дозволяє розглянути можливість, на основі даних про твердість, кількісно оцінити рівень рекреаційного навантаження. Завдання виконували за допомогою множинної лінійної регресії з процедурою покрокового включення предикторів у модель. Регресійна модель є статистично вірогідною та дозволяє пояснити 46% варіювання показників рекреаційного навантаження. Процедура покрокового включення надала можливості обрати 10 найбільш інформативних предикторів для застосування в моделі. Встановлені такі рівні рекреаційного навантаження: низький рівень, нижче помірного, помірний рівень, вище помірного та високий рівень; розроблена процедура індикації цих рівнів на основі даних про твердість ґрунту на різних глибинах. Рівні рекреаційного навантаження індиковані на основі процедури класифікаційних дерев за ознаками твердості ґрунту.

Ключові слова: рекреація; описові статистики; регресійний аналіз; властивості ґрунту; урбанізація.

Вступ

Найважливішим компонентом урбоекосистем є зелені насадження загального користування. Зелені насадження виконують такі екосистемні послуги, як забезпечувальні, регульовальні, культурні та підтримувальні. Забезпечувальна послуга сприяє формуванню екологічних ніш міської біоти і забезпечує стійкість екосистем та збереження біорізноманіття (Dumanski & Peiretti, 2013; Artmann, 2016). Ландшафтно-рекреаційні території є осередками природного середовища в урбанізованих системах і задовольняють зростаючі потреби людей в спілкуванні з природою (Nazaruk & Zhuk, 2013). У 2006 році прийняті “Правила утримання зелених насаджень у населених пунктах України”, які визначають правові та організаційні засади озеленення населених пунктів, що спрямовані на забезпечення сприятливих умов життєдіяльності людини. Здійснення екосистемних послуг зеленими насадженнями залежить від їх взаємодії з інженерною містобудівною інфраструктурою, атмосферою, водою та ґрунтом (Gardiner et al., 2009; Morel et al., 2015; La Notte et al., 2017). Важливе значення має регулювання якісних та кількісних параметрів абіотичного середовища на прийнятному екологічно безпечному рівні (Sousa et al., 2020). В урбосистемі велику увагу приділяють рослинному покриву, як природному, так і штучно створеному (Pryshchepa, 2019), але значно менше досліджується значення ґрунтового покриву міських систем.

У результаті рекреаційного навантаження відбувається дигресія зелених насаджень. Стадії дигресії характеризують динаміку стану лісових екосистем унаслідок рекреаційного впливу. Головними маркерами дигресії є витоптування лісової підстилки, ущільнення ґрунту, знищення підросту, пошкодження дерев, зміна лісових трав'янистих видів на лучні (Prokorchuk & Matusiak, 2016). Витоптування властиве всім видам лісової рекреації (Kuss & Graefe, 1985). Але зменшити його негативний вплив на лісові насадження можна шляхом проведення комплексу лісівничих та організаційно-технічних заходів. Оцінку рівня рекреаційного витоптування здійснюють за такими показниками, як кількість різного характеру стежок, стан трав'янистого покриву, підстилки та рівень ущільнення верхнього ґрунтового шару (Yavkin et al., 2006; Andrés-Abellán et al., 2006; Pescott & Stewart, 2014). Рослинний покрив найбільш чутливий до впливу рекреації. Зміни його параметрів відбуваються вже при переході до II стадії дигресії екосистеми. Тип лісової підстилки змінюється на III та IV етапах дигресії, а статистично значуще зниження її запасів відбувається на V етапі. Щільність верхнього шару мінерального ґрунту статистично зростає на 0.24–0.28 г/см³ до досить сильного рекреаційного впливу на IV

та V етапах дигресії (Kuznetsov et al., 2015). З припиненням дії витоптування відбувається зворотний процес, аж до повного відновлення лісового покриву. Інтенсивність витоптування оцінюється за допомогою коефіцієнта витоптування (коефіцієнта рекреації) – відношення витоптанної площі до загальної площі ділянки, виражене у відсотках (Yavkin et al., 2006).

Відзначимо, що показники, які системно характеризують стан лісових екосистем, не є придатними повною мірою для характеристики зелених насаджень загального користування в межах міста. Видовий склад насаджень, їх екологічна структура, особливості функціонування проєктують та створюють штучно, тому індикатори природної динаміки екосистем за умов антропогенного впливу не можуть бути використані для оцінки стану екосистем, які первісно створені як штучні природно-антропогенні утворення. Тому розробка підходів для оцінки рівня рекреаційної трансформації зелених насаджень загального користування є актуальною науковою на прикладною проблемою.

Мета роботи: встановити можливість оцінки рівня рекреаційної трансформації зелених насаджень загального користування за показниками твердості ґрунту.

Для досягнення поставленої мети вирішували такі завдання:

- 1) визначено закономірності варіювання твердості ґрунту в межах парку Новоолександрівський (м. Мелітополь);
- 2) встановлено закономірності впливу рекреації на функціональний стан ґрунту;
- 3) оцінено характер впливу рекреації на профільний розподіл значень твердості ґрунту;
- 4) розроблено підхід для кількісної оцінки рівня рекреаційного навантаження.

Наукова гіпотеза: профільний розподіл значень твердості ґрунту є інформаційно цінним показником для встановлення рівня рекреаційного навантаження в межах зелених насаджень міста загального користування.

Матеріал та методи

Відповідно до “Правил утримання зелених насаджень у населених пунктах України” (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0880-06#Text>), зелені насадження – це деревна, чагарникова, квіткова та трав'яна рослинність природного і штучного походження на визначеній території населеного пункту. Серед зелених виділяють насадження загального, обмеженого та спеціального користування. Зелені насадження загального користування – це зелені насадження, які розташовані на території загальноміських і районних парків, спеціалізованих парків, парків культури та відпочинку, на територіях зоопарків та

ботанічних садів, міських садів і садів житлових районів, міжквартальних або при групі житлових будинків; скверів, бульварів, насаджень на схилах, набережних, лісопарків, лугопарків, гідропарків та інших підрозділів, які мають вільний доступ для відпочинку. У нашій роботі виконано оцінку рівня рекреаційної трансформації зелених насаджень загального користування м. Мелітополь за показниками твердості ґрунту на прикладі парку Новоолександрівський. Флора функціональної зони парку Горького містить велику різноманітність дерев і чагарників, і представлена робінією псевдоакацією (*R. pseudoacacia*), айлантом найвищим (*Ailanthus altissima*), кленом (*A. negundo*), вербою вавилонською (*Salix babulonica* L.), платаном східним (*Platanus orientalis*), декількома видами роду *Syringa* (бузок), (*Quercus* L. – дубом), жасміном (*Jasminum*), липою дрібнолистою (*Tilia cordata*), акацією жовтою (*Caragana arborescens*), ялівцем віргінським (*Juniperus virginian* L.), ялівцем козацьким (*Juniperus sabina*), туями східними (*Platyclusus orientalis*), сосною звичайною (*Pinus sylvestris*), ялиною блакитною (*Picea pungens* Engelm.). У дендрофлорі міста також предсталені катальпа бігніонієвидна (*Catalpa bignonioides* Walt.), лох вузьколистий (*Elaeagnus angustifolia* L.), шовковиця чорна (*Morus nigra* L.), тополі (*Populus bolleana Lauche*, *P. alba* L., *Populus italica*).

Вимірювання твердості ґрунтів виконано в польових умовах за допомогою ручного пенетрометра Eijkelkamp на глибину до 100 см з інтервалом 5 см. Середня погрішність результатів вимірів приладу становить $\pm 8\%$. Вимірювання проводили конусом з розміром поперечного перерізу 1 см². У межах кожної облікової точки вимірювання твердості ґрунту проводили в одноразовій повторності. Діапазон вимірювання манометра пенетрометра Eijkelkamp становить 10000 кН/м² (= 10000 кПа). Діапазон шкали від 0 до 1,0 кПа. Точність у рекомендованому вимірюваному діапазоні $\pm 8\%$.

Як міра рекреаційного навантаження використано дані Strava (<https://www.strava.com>). Strava (Сан-Франциско, Каліфорнія, США) – широко відома соціальна мережа для велосипедистів та бігунів. Strava складається з мобільного додатка та веб-сайту. Додаток Strava фіксує відстань, час, середню швид-

кість та маршрут (траєкторію GPS) кожного виду діяльності. База даних Strava налічує майже трильйон точок GPS у всьому світі і щотижня зростає більш ніж на 8 мільйонів активностей (Sun & Mobasher, 2017). Одержані дані конвертовано в значення від 0 (рекреаційне навантаження відсутнє) до 100% (рекреаційне навантаження максимальне).

Результати

Вимірювання твердості ґрунту в межах парку Новоолександрівський виконано в 179 точках по квазірегулярній сітці з відстанню між точками обліку 30–40 м (рис. 1). Територія парку охоплена вимірюваннями нерівномірно. Обліку підлягали території з деревинними насадженнями або трав'янистими газонами. Закономірно, що вимірювання не проводили на ділянках, де ґрунт був вкритий штучним асфальтним покритвом або бруківкою. Такі ділянки відповідають алеям парку або окремим пішохідним доріжкам та характеризуються найбільшою активністю серед відвідувачів парку, тому в середньому оцінка рекреаційного навантаження в них становить умовні 100%. Найбільший інтерес у нашому дослідженні являють території, на яких наявність пішохідних доріжок не передбачена, але вони існують як стихійні напрямки руху відвідувачів парку. Саме вони значно впливають на стан ґрунтового та рослинного покриву парку, а також на характер та рівень виконуваних екосистемних функцій живим покривом парку. Вимірюванню не підлягали території спортивних, навчальних об'єктів, а також об'єктів культурно-розважальної інфраструктури парку, оскільки вони мають специфічний вплив на паркове середовище, що потребує окремого дослідження. Тому обліком твердості ґрунту не охоплена центральна, східна та південно-західна частини парку. І все ж, не менше ніж на 75% площі території були проведені вимірювання твердості ґрунту, що дозволяє вважати репрезентативними одержані результати.

Твердість ґрунту закономірно збільшується зі зростанням глибини шару ґрунту від 2.42 ± 0.023 МПа у шарі ґрунту 0–5 см до 9.86 ± 0.078 МПа у шарі ґрунту 95–100 см (табл. 1). Процес збільшення твердості з глибиною не є монотонним, унаслідок

Рис. 1. Просторове розміщення точок відбору проб та оцінок рівня рекреаційного навантаження за даними Strava

Таблиця 1. Описові статистики варіювання твердості ґрунту в межах парку Новоолександрівський (МПа, N = 179)

Шар ґрунту, см	Середня $\pm$ ст. помилка	95%-вий довірчий інтервал		CV, %.	Асиметрія $\pm$ ст. помилка	Ексцес $\pm$ ст. помилка
		2.5 %	97.5%			
0–5	2.42 $\pm$ 0.023	1.80	3.00	12.94	–0.12 $\pm$ 0.18	–0.38 $\pm$ 0.36
5–10	4.31 $\pm$ 0.022	3.61	4.82	6.98	–0.36 $\pm$ 0.18	–0.08 $\pm$ 0.36
10–15	5.96 $\pm$ 0.037	5.00	7.00	8.42	0.33 $\pm$ 0.18	0.59 $\pm$ 0.36
15–20	6.66 $\pm$ 0.056	5.00	8.20	11.16	0.08 $\pm$ 0.18	0.03 $\pm$ 0.36
20–25	7.17 $\pm$ 0.075	5.00	9.00	14.06	–0.29 $\pm$ 0.18	–0.17 $\pm$ 0.36
25–30	7.44 $\pm$ 0.114	4.40	10.00	20.54	–0.14 $\pm$ 0.18	–0.38 $\pm$ 0.36
30–35	7.98 $\pm$ 0.080	5.80	10.00	13.41	0.00 $\pm$ 0.18	0.22 $\pm$ 0.36
35–40	8.37 $\pm$ 0.080	6.20	10.25	12.73	–0.03 $\pm$ 0.18	–0.01 $\pm$ 0.36
40–45	8.64 $\pm$ 0.088	6.04	11.05	13.58	0.13 $\pm$ 0.18	0.25 $\pm$ 0.36
45–50	8.84 $\pm$ 0.091	6.40	11.16	13.77	–0.05 $\pm$ 0.18	0.20 $\pm$ 0.36
50–55	8.87 $\pm$ 0.111	5.80	11.72	16.75	–0.21 $\pm$ 0.18	–0.15 $\pm$ 0.36
55–60	8.88 $\pm$ 0.073	6.80	10.86	11.00	–0.11 $\pm$ 0.18	0.19 $\pm$ 0.36
60–65	8.72 $\pm$ 0.074	6.60	10.82	11.40	–0.06 $\pm$ 0.18	0.47 $\pm$ 0.36
65–70	8.67 $\pm$ 0.080	6.45	10.69	12.39	–0.11 $\pm$ 0.18	0.38 $\pm$ 0.36
70–75	8.78 $\pm$ 0.097	6.08	11.42	14.72	–0.03 $\pm$ 0.18	0.06 $\pm$ 0.36
75–80	8.96 $\pm$ 0.095	6.20	11.53	14.17	–0.08 $\pm$ 0.18	0.03 $\pm$ 0.36
80–85	9.18 $\pm$ 0.096	6.32	11.76	14.01	–0.17 $\pm$ 0.18	0.22 $\pm$ 0.36
85–90	9.19 $\pm$ 0.055	7.65	10.60	7.95	–0.06 $\pm$ 0.18	–0.21 $\pm$ 0.36
90–95	9.69 $\pm$ 0.069	7.74	11.69	9.57	0.24 $\pm$ 0.18	0.39 $\pm$ 0.36
95–100	9.86 $\pm$ 0.078	7.73	12.02	10.58	0.06 $\pm$ 0.18	0.57 $\pm$ 0.36

чого спостерігається наявність локального максимуму твердості на глибині 50–55 або 55–60 см. Локальний максимум твердості становить 8.87–8.88 МПа. Підкреслимо, що наявність локального мінімуму твердості на глибині 65–70 см дорівнює 8.67 МПа. За подальшого збільшення глибини твердість досить різко зростає. Варіювання твердості ґрунту в межах одного шару, яке охарактеризоване за допомогою коефіцієнта варіації, знаходиться в діапазоні 6.98–20.54%. Цей показник закономірно змінюється за профілем.

Високий рівень варіації властивий для верхнього шару ґрунту 0–5 см, де коефіцієнт варіації твердості становить 12.94%. На глибині 5–10 см цей показник різко знижується до рівня 6.98%. Зі збільшенням глибини коефіцієнт варіації монотонно зростає до глибини 25–30 см, де становить 20.54%. Локальний максимум спостерігається також на глибині 50–55 см (16.75%) та 70–75 см (14.72%). На глибині 85–100 см рівень варіювання твердості ґрунту реєструється найменшим, а локальний мінімум, встановлений для глибини 85–90 см, дорівнює 7.95%. Коефіцієнт асиметрії розподілу значень твердості ґрунту по шарах змінюється в діапазоні від –0.36 до +0.33. Чимало від нульової альтернативи асиметрія розподілу відрізняється на глибинах 5–10, 20–20 та 50–55 см (від’ємні значення); 10–15 та 90–95 см (позитивні значення). Аналіз гістограм розподілів указує на те, що від’ємні значення асиметрії відповідають зсуву розподілу вправо – у бік більших значень. У свою чергу позитивні значення асиметрії вказують на відхилення розподілу від симетричного стану вліво – у бік менших значень. Відзначимо наявність локального максимуму асиметрії на глибині 10–15 см між двома локальними мінімумами вище та нижче профілем ґрунту. Показники ексцесу розподілів твердості ґрунту по шарах варіюють у діапазоні від –0.38 до +0.59. Статистично вірогідно від випадкової альтернативи ексцес відрізняється у шарах ґрунту 0–5, 25–30 та 85–90 (від’ємні значення); 10–15, 30–35, 40–45, 45–50, 55–60, 60–65, 65–70, 80–85, 90–95 та 95–100 см (позитивні значення).

Кореляційний аналіз зв’язку твердості ґрунту та показника рекреаційного навантаження свідчить про те, що в цілому зі збільшенням рекреаційного тиску твердість ґрунту зростає (рис. 2). Так, у шарі 0–5 см коефіцієнт кореляції становить $r = 0.37$, $p < 0.001$, що вказує на високий рівень впливу рекреації та мінливості твердості ґрунту у верхньому ґрунтовому шарі. У більш глибокому шарі 5–10 см залежність твердості від рекреаційного навантаження зменшується та характеризується коефіцієнтом кореляції $r = 0.14$, $p = 0.05$. У шарах ґрунту 10–15 та 15–20 см спостерігається локальний максимум коефіцієнта кореляції, який набуває значень 0.19 та 0.18, відповідно. За подальшого зростання глибини коефіцієнт кореляції твердості та рекреаційного навантаження зменшується, що продовжується до глибини 40–45 см. Після

Рис. 2. Профільний розподіл коефіцієнта кореляції твердості ґрунту та рівня рекреаційного навантаження. Вісь абсцис – коефіцієнт кореляції; вісь ординат – глибина шарів ґрунту

вказаного шару ґрунту кореляційний зв'язок відновлюється та збільшується зі зростанням глибини до шару 70–75 см, де спостерігається наявність ще одного локального максимуму кореляційного зв'язку. Після цього локального максимуму кореляційний зв'язок зменшується та практично зникає на глибині 95–100 см.

Встановлена кореляційна залежність показників твердості ґрунту та оцінки рівня рекреаційного навантаження дозволяє розглянути можливість на основі даних про твердість кількісно оцінити рівень рекреаційного навантаження. Це завдання виконували за допомогою множинної лінійної регресії з процедурою покрокового включення предикторів у модель (табл. 2). Регресійна модель є статистично вірогідною ($F(10,168)=16.36$, $p < 0.001$) та дозволяє пояснити 46% варіювання показників рекреаційного навантаження. Процедура покрокового включення надала можливості обрати 10 найбільш інформативних предикторів для застосування в моделі. Як рівняння модель має вигляд:

$$Y = 14.5 + 4.6x_1 + 23.3x_2 - 11.0x_3 + 5.7x_4 - 1.9x_5 + 3.2x_6 - 3.2x_7 - 2.4x_8 + 4.1x_9 - 2.9x_{10},$$

де Y – оцінка рекреаційного навантаження; x_1 – твердість на глибині 65–70 см; x_2 – твердість на глибині 0–5 см; x_3 – твердість на глибині 5–10 см; x_4 – твердість на глибині 15–20 см; x_5 – твердість на глибині 30–35 см; x_6 – твердість на глибині 45–50 см; x_7 – твердість на глибині 90–95 см; x_8 – твердість на глибині 35–40 см; x_9 – твердість на глибині 75–80 см; x_{10} – твердість на глибині 80–85 см.

Якщо в модель вводили експериментальні дані по твердості ґрунту, то зможемо одержати оцінку рекреаційного навантаження в даній точці лісопаркового насадження. Прогнозовані дані на основі моделі вказують на варіювання рівня рекреаційного навантаження від 43 до 90%. Таким чином, на основі відомостей бази даних Strava, які мають невідому точність та розмірність, ми одержали модель, яка на основі вимірюваних величин надає можливості розрахувати оцінки рівня рекреаційного навантаження. Очевидно, що дані Strava задають загальний тренд рекреаційного навантаження та є кількісною характеристикою, яку ми змогли застосовувати в статистичних розрахунках. У конкретній точці точність оцінки рекреаційного навантаження є невідомою, але був встановлений інваріантний характер зв'язку твердості та рекреаційного навантаження. Значення оцінок рекреаційного навантаження, за даними Strava, містять як достовірну інформацію, так і інформаційний шум. Фактично регресійна модель виконує функцію фільтра шуму для виділення корисної інформації про рівень рекреаційного навантаження.

Нормальний ймовірнісний графік оцінок рекреаційного навантаження підтверджує нормальний характер розподілу прогнозованих оцінок рекреаційного навантаження та дозволяє розбити експериментальні точки на нові рівні (рис. 3).

Експериментальні точки з прогнозованими значеннями рекреації від найменшого рівня до 62% ми віднесли до категорії низького рівня рекреації. Від 62 до 66% віднесені до рівня нижче середнього. Від 66 до 72% – середній рівень, від 72 до 76% – вище середнього, а від 76% й вище – вище середнього. Рівні рекреаційного навантаження можуть бути індиковані на основі процедури класифікаційних дерев за ознаками твердості ґрунту (рис. 4). Рівень твердості 2.19 МПа у шарі 0–5 см є диференціальним для розділення низького рівня рекреації та нижче помірному від усіх інших рівнів. Твердість за умов низького рівня рекреації на глибині 50–55 см повинна бути менше 8.05 МПа або на глибині 5–10 см – більше ніж 4.4 МПа. В альтернативному випадку матимемо рівень рекреаційного навантаження менший за середній.

Якщо твердість у шарі 0–5 см більш ніж 2.19 МПа, то будемо мати гілку рівнів рекреації, більшу за низький рівень. Твердість ґрунту на глибині 60–65 см більш ніж 8.91 МПа диференціює групу рівнів високий та вище середнього. Рівень твердості на глибині 50–55 см вище 9.43 вказує на високий рівень рекреації, в альтернативному випадку матимемо рівень вище середнього. Такий самий рівень буде у випадку, коли твердість на глибині 60–65 см менша за 8.91 МПа, але більша за 2.63 МПа на глибині 0–5 см. Якщо твердість менша за 2.63

Рис. 3. Нормальний ймовірнісний графік оцінок рекреаційного навантаження та рівні рекреації

Таблиця 2. Множинна лінійна регресія за результатами покрокового включення предикторів у модель ($R_{adj}^2 = 0.46$, $F(10,168)=16.36$, $p < 0.001$)

Предиктори	b^*	b	$t(168)$	p -рівень
Константа	-	14.50±11.31	1.28	0.20
65–70	0.41±0.08	4.63±0.95	4.88	< 0.001
0–5	0.59±0.07	23.31±2.84	8.20	< 0.001
5–10	-0.27±0.08	-11.03±3.12	-3.53	< 0.001
15–20	0.31±0.07	5.17±1.10	4.68	< 0.001
30–35	-0.17±0.08	-1.91±0.94	-2.02	0.04
45–50	0.31±0.08	3.17±0.83	3.79	< 0.001
90–95	-0.24±0.09	-3.18±1.23	-2.59	0.01
35–40	-0.21±0.08	-2.42±0.96	-2.52	0.01
75–80	0.43±0.21	4.14±2.01	2.06	0.04
80–85	-0.30±0.20	-2.90±1.90	-1.53	0.13

Умовні позначки: b – регресійний коефіцієнт; b^* – стандартизований регресійний коефіцієнт.

Рис. 4. Класифікаційне дерево для діагностики рівнів рекреаційного навантаження за даними про твердість ґрунту
Умовні позначки: Low – низький рівень; Below temperate – нижче помірного; Temperate – помірний рівень; Above temperate – вище помірного; High – високий рівень.

МПа та менша за 6.25 МПа на глибині 70–75 см, тоді такий рівень рекреації можна оцінити як низький. Якщо твердість на глибині 70–75 см більша за 6.25 МПа та більша 7.72 МПа на глибині 20–25 см, тоді такий рівень рекреації буде оцінений як помірний. Якщо твердість менша 7.72 МПа, тоді матимемо групу рівнів помірний або вище помірного. Останній відрізняється від помірного твердістю ґрунту на глибині 35–40 см, яка перевищує 8.15 МПа.

Обговорення

Твердість – важливий генетичний і агровиробничий показник, за допомогою якого характеризують фізико-механічні властивості ґрунтів, точніше опір ґрунту росту коренів, або опір ґрунту, який треба подолати ґрунтообробному робочому органу в процесі його обробки (Medvedev, 2009). Твердість – незамінний показник для оцінювання умов проростання насінин та їх розвитку на перших етапах онтогенезу, в тому числі оцінки відповідності кореневих волосків освоювати не тільки між-, а й внутрішньоагрегатний простір (Zhukov et al., 2017). Під час росту кореня, при пересуванні ґрунтообробного знаряддя, в ґрунті відбуваються різноманітні фізико-механічні процеси розклинювання, зсуву, долаються сили внутрішнього зчеплення (Reichert & Silva, 2004; Tekin et al., 2008). Узагальненим адекватним індикатором цих процесів є твердість. Показник твердості здатний оцінити не тільки практично гредки, але і якість складення, причому таку оцінку практично неможливо одержати, використовуючи тільки традиційний показник щільності складення. Використання показника твердості на додаток до показника щільності складення дозволяє отримати більш досконалу оцінку фізичного стану ґрунту, а в землеробстві поліпшити ґрунтообробні знаряддя і ефективність їх експлуатації (Medvedev, 2009; Wirthner, 2011; Carrizo et al., 2015; Medvedev, 2015; Zhukov et al., 2017; Villagra-Mendoza & Horn, 2018; Zhang et al., 2019). Відзначимо, що як критичний рівень твердості ґрунту, при досягненні якого значно знижується можливість рослин до росту та розвитку кореневої системи, розглядають значення 3 МПа (Medvedev & Sybulko, 1995; Medvedev, 2009). Як свідчать одержані дані, у межах дослідженого лісопаркового насадження вказаний рівень твердості вже може бути перевищений з верхніх шарів ґрунту. У шарі 0–5 см у 95% випадків рівень 3 МПа не перевищується, але вже більш глибокі шари ґрунту мають твердість, яка більша, ніж критична. Це вказує на велике значення твердості ґрунту

як лімітуючого фактора у формуванні структури як рослинного покриву, так і перебігу ґрунотвірних процесів у межах паркового насадження.

Твердість залежить від вологості ґрунтів, від умісту в ґрунті органічної речовини, складу поглинених катіонів, співвідношення структурних агрегатів і дуже помітно залежить від гранулометричного складу (Bécel et al., 2012). Все це обумовлює перспективність використання твердості і в ґрунтово-генетичних, і в агрономічних дослідженнях. Із ґрунтово-фізичних факторів, що впливають на твердість, на перше місце слід поставити вміст води в ґрунті та її енергетичний стан (Young et al., 2000). Далі з фізичних факторів – гранулометричний склад, щільність складання, структурний склад, розмір пор і співвідношення великих і тонких пор та інші (Bennie & Krynauw, 1985; Bennie & du Burger, 1988; Quiroga et al., 1999). Перелічені фактори вирішальним чином впливають на показник сили конуса і здатність ґрунту стискатися (Agiaga et al., 2011).

Встановлений рівень варіації твердості вказує на наявність різноманітних джерел впливу на цей показник. Високий рівень мінливості цього показника у верхньому шарі викриває важливе значення поверхневого ущільнення ґрунту, яке може відбуватися внаслідок рекреаційної активності. Локальні максимуми на різних глибинах указують на наявність таких джерел варіації, як природна гетерогенність у складенні ґрунту та вплив кореневих систем рослин на твердість ґрунту. Живі організми – рослини та тварини – можуть як зазнавати негативного впливу підвищеної твердості ґрунту, так і бути фактором відновлення оптимального фізичного стану ґрунту після його переущільнення. Результатом рівноваги цих процесів на фоні рекреаційної діяльності і є спостережувані патерни профільної мінливості значень твердості ґрунту. Висока твердість ґрунту в будь-якому шарі сприяє зменшенню руху вологи в цілому через профіль ґрунту і обмежує поширення кореневої системи (Laboski et al., 1998; Bayhan et al., 2002). Показники твердості застосовані як інтегральний показник фізичного стану ґрунтів. Якщо раніше у Швеції строкатість врожаю найчастіше розглядали як наслідок перерозподілу поживних елементів у ґрунті, то в цій роботі надзвичайно широкий розкид урожайних даних на полі (зерна від 4,0 до 11,5 т/га) пояснили варіабельністю твердості ґрунту. Встановлена досить чітка закономірність: врожай був вище там, де менше твердість (Bolenius et al., 2006). Одночасно виявлено відмінності в динаміці розвитку кореневих систем протягом вегетації ячменю. За іншими даними, зернові куль-

тури цілком переносять підвищену твердість (20–25 кгс/см²), у той час як для просапних, коренеплодів, садових і овочевих вона неприйнятна (Медведев, 2007). Оптимальні параметри в цих випадках не перевищують 5–10 кгс/см². Твердість вище 30 кгс/см², і особливо вище 40–50 кгс/см², значно пригнічує і навіть зупиняє ріст кореневих систем більшості культур (Medvedev, 2009). Встановлено також, що твердість ґрунту корелює з індикаторними значеннями освітленості за Елленбергом. У свою чергу відмінностей в індикаторних значеннях азотного харчування між рослинами, різними за ступенем толерантності до твердості ґрунту, не виявлено (Sandrine Godefroid & Koedam, 2003; S. Godefroid & Koedam, 2004a; Zhukov et al., 2017).

Одержані експериментальні результати вказують на систематичне переважання більшої твердості, ніж це можна очікувати за умов випадкової альтернативи, у верхніх шарах ґрунту 0–5 та 5–10 см. При цьому шар ґрунту 5–10 см є більш показовим, ніж шар 0–5 см. Очевидно, шар ґрунту, який виходить на денну поверхню, зазнає впливу широкого різноманіття факторів, багато з яких мають локальну та випадкову природу. Це можуть бути і детальномасштабні фактори, які пов'язані з просторовою організацією рослинного покриву і неможливо оцінити в рамках проведеного дослідження з відповідною регулярністю сітки опробування. Це можуть бути й нерегулярні впливи, які пов'язані з рекреаційною активністю або господарською діяльністю в парку.

Максимум асиметрії, як було й згадано, підтверджує наявність зсуву розподілу в бік менших значень, ніж можна очікувати в ситуації з випадковою альтернативою. Очевидно, перещільнені сусідні шари ґрунту за профілем формують захисні екрани від негативних впливів, унаслідок чого між ними формується прошарок меншої твердості. Такий результат дозволяє відкрити ще один аспект рекреаційного впливу на твердість ґрунту: під впливом рекреації відбувається не тільки збільшення твердості ґрунту, але й формується функціональна шарувата структура ґрунту. На даному етапі досліджень ми не можемо стверджувати, що шаруватість відбувається і на морфологічному рівні, але висновок про функціональну шаруватість виглядає досить переконливим. Таким чином, “зубчастий” профільний розподіл значень асиметрії твердості свідчить про формування функціональної шаруватості ґрунтів, які зазнають рекреаційного впливу. Амплітуда коливань показників асиметрії затухає з глибиною, тобто інформація про те, що саме рекреація є джерелом формування відповідних патернів.

Встановлено, що переважна більшість розподілів значень твердості ґрунту по шарах характеризується позитивним ексцесом. Позитивний ексцес указує на тяжіння значень облікової величини до модального рівня більшою мірою, ніж це можна передбачати з позиції повністю випадкового процесу. Такий результат також відповідає нашому припущенню про формування функціональної шаруватості структури під рекреаційним впливом. За умов шаруватості структури більш високі значення ознаки будуть зменшуватися, а більш низькі – збільшуватися, тобто буде відбуватися наближення до рівня, який найбільш характерний для даного шару ґрунту. Від'ємні значення ексцеса маркують двовершинний розподіл. Він характерний переважно для приповерхневих шарів ґрунту. Двовершинність є результатом незбалансованої дії суттєво відрізняються факторів. Альтернативою розподілу, як з позитивним, так і з негативним ексцесом, є нормальний розподіл, який виникає як результат реалізації випадкового процесу, на який не діють жодні зовнішні фактори, або діє надзвичайно велика їх кількість, серед яких неможливо виділити один або декілька найважливіших. У свою чергу двовершинність є результатом дизруптивного процесу як результат антагоністичного впливу двох зовнішніх факторів. Такими факторами слід розглядати дію таких причин, які зменшують твердість ґрунту, і дію причин, які твердість ґрунту збільшують. Підкреслимо, що в приповерхневих шарах дія факторів,

які протистоять зростанню твердості, є найбільш інтенсивною. Це активний перебіг фізичних явищ усадки та набухання при перепадах вологості ґрунту, які найбільші саме у верхніх ґрунтових шарах. Діяльність ґрунтових тварин та значне зростання кореневих систем рослин також спостерігається саме в дерновому шарі або в лісовій підстилці. Фізичні процеси та біологічна активність дієво розпушують ґрунт, сприяють зменшенню його твердості. Систему “твердість ґрунту–корінь” не можна представляти як однобічний вплив твердості на формування і розвиток коренів. Корінь також впливає на ґрунт, причому, залежно від культури і особливостей її кореневих систем, іноді цей вплив сягає істотної значущості (Grimes et al., 1972; Montagu et al., 2001; D'avello et al., 2003; Vanags et al., 2004; S. Godefroid & Koedam, 2004b). За допомогою показників твердості добре розрізняються посіви просапних культур і культур суцільної сівби. Останні, як правило, мають твердість на 5–10 кгс/см² більшу (Zhukov et al., 2017).

З іншого боку, саме верхній шар ґрунту в паркових насадженнях зазнає найбільшого впливу рекреаційної діяльності. Тому переважання рекреаційного впливу створює осередки більшої твердості, а в зонах, де такий вплив відсутній або незначний, спостерігається альтернативний пік у розподілі з меншими значеннями твердості. Твердість знаходиться в тісній залежності з розміром агрегатів, що складають структуру, а також безпосередньо визначають умови зростання рослин (Langmaack et al., 2002; Kumssa et al., 2004; Brown & Gilkes, 2010). У ґрунтах, що характеризуються значною твердістю, порушуються водний, повітряний і біологічний режими, що негативно позначається на розвитку рослин і врожаї (Grimes et al., 1972; Hammel, 1989; Salire et al., 1994; Unger & Kaspar, 1994; Nimmo, 2004). Твердість ґрунту суттєво змінюється протягом сезону (Reinert et al., 2003).

Таким чином, одержані результати викрили дві особливості. По-перше, збільшення рекреаційного навантаження спричиняє збільшення твердості ґрунту. У цілому наш результат є дещо тривіальним. По-друге, збільшення твердості ґрунту під впливом рекреації відбувається не монотонно, з наявністю декількох (трьох) максимумів кореляційного зв'язку, які маркують максимумами впливів рекреації на твердість ґрунту. Наявність максимального реагування твердості ґрунту на рекреацію в шарі 0–5 см пояснити можна безпосереднім витоптуванням поверхні ґрунту відвідувачами парку: чим більше такий вплив, тим більший буде зв'язок твердості та рекреації. У випадку однорідних властивостей ґрунту в його профілі можемо очікувати монотонне зменшення зв'язку твердості та рекреаційного навантаження з глибиною внаслідок затухання тиску на ґрунт від відвідувачів. Але ми цього не спостерігаємо; навпаки, встановлено наявність двох локальних максимумів кореляційного зв'язку на різних глибинах. Відзначимо, що зростання кореляційного зв'язку з глибиною та наявність його локальних максимумів неможливо пояснити на основі припущення про безпосередній вплив навантаження, яке здійснюють відвідувачі парку на ґрунт.

Причини виникнення локальних максимумів кореляційного зв'язку треба шукати через встановлення інших механізмів варіювання твердості ґрунту, ніж тільки фізичне навантаження на ґрунт при рекреації. Ми виходимо з припущення, що тиск відвідувачів на ґрунт не є безпосередньою причиною, але запускає комплекс процесів, які приводять до формування локальних максимумів кореляції твердості та інтенсивності рекреаційного навантаження. Наше припущення, що ущільнення ґрунту під зовнішнім тиском відбувається не рівномірно, зі затуханням з глибиною, а з утворенням функціональних шарів, які відрізняються за своїми властивостями. Вже наявність таких шарів є фактором регуляції ґрунтоутворних процесів за умов рекреації, внаслідок чого може відбуватися магніфікація кореляційного зв'язку з глибиною. Безумовно, кореляція вказує на зростання твердості в певних шарах ґрунту зі збільшенням рекреаційно-

го навантаження, але, на відміну від первинного збільшення у шарі 0–5 см, локальні максимуми твердості слід інтерпретувати як зони вторинного зростання твердості, оскільки тиск на поверхню ґрунту не є безпосередньою причиною їх виникнення. Дослідженнями науковців виявлено, що підвищення рівня рекреації негативно впливає на властивості ґрунту та індукує зменшення рослинного покриву й біологічного різноманіття (Sujetovienė & Baranauskienė, 2016; Sujetovienė et al., 2019; Kunakh et al., 2020). Рекреація найбільше впливає на шар підстилки та органічний горизонт (Amrein et al., 2005). Показано, що ґрунт на глибині 0–5 см значно ущільнений внаслідок рекреаційної активності (Cakir et al., n.d.). Рослинність, лісова підстилка та верхній шар ґрунту відіграють вирішальну роль у запобіганні ерозії ґрунту (Durán Zuazo & Rodríguez Pleguezuelo, 2008). Рекреаційне навантаження спричиняє ущільнення та ерозію ґрунту (Farrior, 2005). Ущільнення змінює структуру пор ґрунту і може перешкоджати проникненню коренів, спричиняє неадекватне вкорінення та погіршення росту рослин (Lipiec et al., 2012; Correa et al., 2019). Ущільнення ґрунту впливає на ріст і розвиток рослинності (Cambi et al., 2015; Solgi et al., 2018). Опір проникненню в ґрунт був визнаний одним з основних обмежуючих факторів розвитку коренів (Lambers et al., 2007). Змінні ґрунтового та рослинного покриву можуть розглядатися як предиктори небезпеки ерозії внаслідок рекреаційних навантажень (Kuss & Morgan, 1986). Низькі показники інфільтрації, спричинені ущільненням ґрунтів, негативно впливають на навколишнє середовище міста, що призводить до застою води або обмеженого водопостачання, збільшення миттєвих затоплень та поганої якості поверхневих вод (Yang & Zhang, 2011; Solgi et al., 2018). Опір проникненню ґрунту як показник ущільнення ґрунту суттєво залежав від кількох змінних ґрунту, таких як вміст води, щільність ґрунту, органічні речовини, текстура та структура ґрунту (Lomeling & Lasu, 2015). Через місцевості проникність ґрунту змінюється внаслідок зміни вмісту вологи в ґрунті, зміни типу ґрунту, глибини, текстури, вмісту грубих осколків і органічних речовин та експозиції гірських порід, зміни різних типів механічного впливу, спричиненого людиною на ґрунт (Jones & Ayr, 2019).

Шаруватість може бути причиною обмеження закономірної міграції повітря та вологи профілем ґрунту. Відомо, що вологість та вміст повітря в ґрунті безпосередньо відбиваються на його твердості. Необхідно додати, що твердість сама по собі є мірою супротиву ґрунтового тіла penetraції, вона таким чином тісно корелює з умовами для існування ґрунтових тварин та кореневих систем рослин. Біотичні складові є дієвими антагоністами явищ зростання твердості ґрунту. Тому шаруватість може виступати як лімітуючий фактор процесів, які відновлюють фізичний стан ґрунту, що може стати причиною формування зон зростання твердості в ґрунті вторинного характеру.

Таким чином, аналіз одержаних даних по твердості ґрунту вказує на те, що рекреаційна активність у лісопарковому насадженні може призводити до зростання цього показника. Більш ретельно це питання досліджуватиметься у наступній частині цього розділу. Нами встановлено, що характер описових статистик показників твердості ґрунту по шарах цілком підтверджує гіпотезу про ще один аспект впливу рекреації – виникнення явища функціональної шаруватості ґрунтів. Вона виражається у формуванні структур, в яких шари з більшою твердістю розмежовуються шарами меншої твердості. Наявність таких структур може викликати комплекс негативних явищ, які пов'язані з проникненістю вологи через шар ґрунту, міграційну здатність повітря в ґрунті, можливість росту кореневих систем рослин та руху тварин. Шарувата структура може формувати локальні водонепроникні горизонти, які будуть обмежувати здатність ґрунту вбирати вологу. Таке обмеження має інший безпосередній негативний наслідок – активація явищ ерозій, тому що в разі інтенсивних опадів вертикальний

потік води переорієнтується на латеральний, який є важливим чинником ерозії ґрунту. Такі водонепроникні горизонти є нічим іншим, як аналогами плужної підшови, які здатні обмежувати ріст кореневих систем рослин та міграцію ґрунтових тварин.

У подальших дослідженнях ми плануємо вивчити характер просторової мінливості твердості ґрунту під впливом рекреації на детальномасштабному рівні.

Висновки

1. У межах парку Новоолександрівський твердість ґрунту закономірно збільшується зі зростанням глибини шару ґрунту з 2.42 ± 0.023 МПа у шарі ґрунту 0–5 см до 9.86 ± 0.078 МПа у шарі ґрунту 95–100 см. Рівень варіації твердості вказує на наявність різноманітних джерел впливу на цей показник. Високий рівень варіювання твердості ґрунту у верхньому шарі викликає важливе значення поверхневого ущільнення ґрунту, яке може відбуватися внаслідок рекреаційної активності.

2. Під впливом рекреації відбувається формування функціональної шаруватості ґрунту, що виражається в існуванні структур, в яких шари ґрунту з більшою твердістю розмежовуються шарами меншої твердості. Наявність таких особливостей може викликати комплекс негативних явищ, які пов'язані з обмеженням проникнення вологи в ґрунт, зниженням міграційної здатності повітря в ґрунті, лімітацією росту кореневих систем рослин та руху тварин. Функціональна шаруватість може формувати локальні водонепроникні горизонти, які будуть обмежувати здатність ґрунту вбирати вологу.

3. Збільшення твердості ґрунту під впливом рекреації відбувається немонотонно з наявністю декількох максимумів кореляційного зв'язку, які маркують максимуми впливів рекреації на твердість ґрунту. Локальні максимуми твердості інтерпретовані як зони вторинного зростання твердості, оскільки тиск на поверхню ґрунту не є безпосередньою причиною їх виникнення.

4. На основі даних про твердість можливо кількісно оцінити рівень рекреаційного навантаження. Встановлені такі рівні рекреаційного навантаження: низький рівень, нижче помірного, помірний рівень, вище помірного та високий рівень; розроблена процедура індикації цих рівнів на основі даних про твердість ґрунту на різних глибинах.

References

- Amrein, D., Rusterholz, H., & Baur, B. (2005). Disturbance of sub-urban *Fagus* forests by recreational activities: Effects on soil characteristics, above-ground vegetation and seed bank. *Applied Vegetation Science*, 8(2), 175–182. doi: [10.1111/j.1654-109X.2005.tb00643.x](https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2005.tb00643.x)
- Andrés-Abellán, M., López-Serrano, F. R., Morote, F. A. G., & Cerro-Barja, A. D. (2006). Assessment Of Trampling Simulation Impacts On Native Vegetation In Mediterranean Sclerophyllous Forest. *Environmental Monitoring and Assessment*, 120(1–3), 93–107. doi: [10.1007/s10661-005-9051-2](https://doi.org/10.1007/s10661-005-9051-2)
- Arriaga, F. J., Lowery, B., & Raper, R. (2011). Soil penetrometers and penetrability. In *Encyclopedia of Earth Sciences Series: Vol. Part 4* (pp. 757–760). Springer Netherlands. doi: [10.1007/978-90-481-3585-1_207](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_207)
- Artmann, M. (2016). Urban gray vs. urban green vs. soil protection – Development of a systemic solution to soil sealing management on the example of Germany. *Environmental Impact Assessment Review*, 59, 27–42. doi: [10.1016/j.eiar.2016.03.004](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.03.004)
- Bayhan, Y., Kayisoglu, B., & Gonulol, E. (2002). Effect of soil compaction on sunflower growth. *Soil and Tillage Research*, 68(1), 31–38. doi: [10.1016/S0167-1987\(02\)00078-8](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00078-8)
- Bécel, C., Vercambre, G., & Pagès, L. (2012). Soil penetration resistance, a suitable soil property to account for variations in root elongation and branching. *Plant and Soil*, 353(1–2), 169–180. doi: [10.1007/s11104-011-1020-7](https://doi.org/10.1007/s11104-011-1020-7)

- Bengough, A. G., & Mullins, C. E. (1990). Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science*, 41(3), 341–358. doi: [10.1111/j.1365-2389.1990.tb00070.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1990.tb00070.x)
- Bennie, A. T. P., & du Burger, R. T. (1988). Penetration resistance of fine sandy apedal soils as affected by relative bulk density, water content and texture. *South African Journal of Plant and Soil*, 5(1), 5–10. doi: [10.1080/02571862.1988.10634239](https://doi.org/10.1080/02571862.1988.10634239)
- Bennie, A. T. P., & Krynanuw, G. N. (1985). Causes, adverse effects and control of soil compaction. In *South African Journal of Plant and Soil*, 2(3), 109–114. doi: [10.1080/02571862.1985.10634148](https://doi.org/10.1080/02571862.1985.10634148)
- Bolenius, E., Rogstrand, G., & Arvidsson, J. (2006). On-the-go measurements of soil penetration resistance on a Swedish Eutric Cambisol. *International Soil Tillage Research Organization 17 Th Triennial Conference*, 867–870.
- Brown, K., & Gilkes, R. (2010). Before and after: the make-up of native and disturbed mine soil materials. *World*, August, 33–36.
- Cakir, M., Makineci, E., & Kumbasli, M. (n.d.). Comparative study on soil properties in a picnic and undisturbed area of Belgrad Forest, Istanbul. *Journal of Environmental Biology*, 31(1–2), 125–128.
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*, 338, 124–138. doi: [10.1016/j.foreco.2014.11.022](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022)
- Carriazo, M. E., Alesso, C. A., Cosentino, D., & Imhoff, S. (2015). Aggregation agents and structural stability in soils with different texture and organic carbon contents. *Scientia Agricola*, 72(1), 75–82. doi: [10.1590/0103-9016-2014-0026](https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0026)
- Correa, J., Postma, J. A., Watt, M., & Wojciechowski, T. (2019). Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. *Journal of Experimental Botany*, 70(21), 6019–6034. doi: [10.1093/jxb/erz383](https://doi.org/10.1093/jxb/erz383)
- D'avello, T., Yoas, K., & Beaudette, D. (2003). Spatial Data for Soil Mapping.
- Dumanski, J., & Peiretti, R. (2013). Modern concepts of soil conservation. *International Soil and Water Conservation Research*, 1(1), 19–23. doi: [10.1016/S2095-6339\(15\)30046-0](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30046-0)
- Durán Zuazo, V. H., & Rodríguez Pleguezuelo, C. R. (2008). Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(1), 65–86. doi: [10.1051/agro:2007062](https://doi.org/10.1051/agro:2007062)
- Farrior, C. (2005). Species invasions and the relationships between species diversity, community saturation, and ecosystem functioning. *PennScience*, 3(2), 30–34.
- Gardiner, M. M., Landis, D. A., Gratton, C., DiFonzo, C. D., O'Neal, M., Chacon, J. M. ... Heimpel, G. E. (2009). Landscape diversity enhances biological control of an introduced crop pest in the north-central USA. *Ecological Applications*, 19(1), 143–154. doi: [10.1890/07-1265.1](https://doi.org/10.1890/07-1265.1)
- Godefroid, S., & Koedam, N. (2004a). Interspecific variation in soil compaction sensitivity among forest floor species. *Biological Conservation*, 119(2), 207–217. doi: [10.1016/j.biocon.2003.11.009](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2003.11.009)
- Godefroid, S., & Koedam, N. (2004b). Interspecific variation in soil compaction sensitivity among forest floor species. *Biological Conservation*, 119(2), 207–217. doi: [10.1016/j.biocon.2003.11.009](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2003.11.009)
- Godefroid, S., & Koedam, N. (2003). How important are large vs. small forest remnants for the conservation of the woodland flora in an urban context? *Global Ecology and Biogeography*, 12(4), 287–298. doi: [10.1046/j.1466-822X.2003.00035.x](https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00035.x)
- Grimes, D. W., Miller, R. T., Schweers, V. N., Smith, R. B., & Willey, P. L. (1972). Soil Strength Modification of Root Development and Soil Water Extraction. *California Agriculture*, 26(11), 12–14.
- Hammel, J. E. (1989). Long-Term Tillage and Crop Rotation Effects on Bulk Density and Soil Impedance in Northern Idaho. *Soil Science Society of America Journal*, 53(5), 1515–1519. doi: [10.2136/sssaj1989.03615995005300050036x](https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300050036x)
- Jones, M.-F., & Arp, P. (2019). Analyzing and Projecting Soil Moisture and Cone Penetrability Variations in Forest Soils. *Open Journal of Forestry*, 09(02), 109–142. doi: [10.4236/ojfor.2019.92005](https://doi.org/10.4236/ojfor.2019.92005)
- Kumssa, D. B., Van Aarde, R. J., & Wassenaar, T. D. (2004). The regeneration of soil micro-arthropod assemblages in a rehabilitating coastal dune forest at Richards Bay, South Africa. *African Journal of Ecology*, 42(4), 346–354. doi: [10.1111/j.1365-2028.2004.00537.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2028.2004.00537.x)
- Kunakh, O. M., Yorkina, N. V., Zhukov, O. V., Turovtseva, N. M., Bredikhina, Y. L., & Logvina-Byk, T. A. (2020). Recreation and terrain effect on the spatial variation of the apparent soil electrical conductivity in an urban park. *Biosystems Diversity*, 28(1), 3–8. doi: [10.15421/012001](https://doi.org/10.15421/012001)
- Kuss, F. R., & Graefe, A. R. (1985). Effects of Recreation Trampling on Natural Area Vegetation. *Journal of Leisure Research*, 17(3), 165–183. doi: [10.1080/00222216.1985.11969628](https://doi.org/10.1080/00222216.1985.11969628)
- Kuss, F. R., & Morgan, J. M. (1986). A first alternative for estimating the physical carrying capacities of natural areas for recreation. *Environmental Management*, 10(2), 255–262. doi: [10.1007/BF01867363](https://doi.org/10.1007/BF01867363)
- Kuznetsov, V. A., Ryzhova, I. M., Telesnina, V. M., & Stoma, G. V. (2015). Quantitative assessment of the effect of recreation on vegetation, forest litter, and soil compactness in forest parks of Moscow. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 70(1), 17–24. doi: [10.3103/S0147687415010032](https://doi.org/10.3103/S0147687415010032)
- La Notte, A., D'Amato, D., Mäkinen, H., Paracchini, M. L., Liqute, C., Egoh, B., Geneletti, D., & Crossman, N. D. (2017). Ecosystem services classification: A systems ecology perspective of the cascade framework. *Ecological Indicators*, 74, 392–402. doi: [10.1016/j.ecolind.2016.11.030](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.030)
- Laboski, C. A. M., Dowdy, R. H., Allmaras, R. R., & Lamb, J. A. (1998). Soil strength and water content influences on corn root distribution in a sandy soil. *Plant and Soil*, 203(2), 239–247. doi: [10.1023/A:1004391104778](https://doi.org/10.1023/A:1004391104778)
- Lambers, H., Bultynck, L., & Zhu, Y.-G. (2007). Marschner reviews: A new initiative in delivering cutting-edge science in soil-plant interactions. *Plant and Soil*, 300(1–2), 1–7. doi: [10.1007/s11104-007-9259-8](https://doi.org/10.1007/s11104-007-9259-8)
- Langmaack, M., Schrader, S., Rapp-Bernhardt, U., & Kotzke, K. (2002). Soil structure rehabilitation of arable soil degraded by compaction. *Geoderma*, 105(1–2), 141–152. doi: [10.1016/S0016-7061\(01\)00097-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00097-0)
- Lipiec, J., Hajnos, M., & Świeboda, R. (2012). Estimating effects of compaction on pore size distribution of soil aggregates by mercury porosimeter. *Geoderma*, 179–180, 20–27. doi: [10.1016/j.geoderma.2012.02.014](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.02.014)
- Lomeling, D., & Lasu, D. M. (2015). Spatial Patterns of Penetration Resistance and Soil Moisture Distribution in a Sandy Loam Soil (Eutric leptosol). *International Journal of Soil Science*, 10(3), 130–141. doi: [10.3923/ijss.2015.130.141](https://doi.org/10.3923/ijss.2015.130.141)
- 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](https://doi.org/10.1134/S1064229309030077)
- Medvedev, V. V. (2015). Continuity and discreteness of soils for fields: applied consequences for agriculture. *Fundamental and Applied Soil Science*, 16(1–2), 11–25. doi: [10.15421/041502](https://doi.org/10.15421/041502)
- Medvedev, V. V., & Cybulko, W. G. (1995). Soil criteria for assessing the maximum permissible ground pressure of agricultural vehicles on Chernozem soils. *Soil and Tillage Research*, 36(3–4), 153–164. doi: [10.1016/0167-1987\(95\)00501-3](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00501-3)
- Montagu, K. D., Conroy, J. P., & Atwell, B. J. (2001). The position of localized soil compaction determines root and subsequent shoot growth responses. *Journal of Experimental Botany*, 52(364), 2127–2133. doi: [10.1093/jexbot/52.364.2127](https://doi.org/10.1093/jexbot/52.364.2127)
- Morel, J. L., Chenu, C., & Lorenz, K. (2015). Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and mil-

- itary areas (SUITMAs). *Journal of Soils and Sediments*, 15(8), 1659–1666. doi: [10.1007/s11368-014-0926-0](https://doi.org/10.1007/s11368-014-0926-0)
- Nazaruk, M., & Zhuk, Y. (2013). Green zone of small and medium cities of Lviv region: current status and performance issues. *Physical Geography and Geomorphology*, 1, 54–62.
- Nimmo, J. R. (2004). Aggregation – Physical Aspects. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 4, 28–35. doi: [10.1016/B0-12-348530-4/00532-4](https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00532-4)
- Pescott, O. L., & Stewart, G. B. (2014). Assessing the impact of human trampling on vegetation: a systematic review and meta-analysis of experimental evidence. *PeerJ*, 2, e360. doi: [10.7717/peerj.360](https://doi.org/10.7717/peerj.360)
- Prokopchuk, V., & Matusiak, M. (2016). The Degree of Recreational Capacity and Antropotolerance of Forest Ecosystems of Forest-park Zone in Vinnytsia. *Path of Science*, 2(11), 5.1–5.6. doi: [10.22178/pos.16-6](https://doi.org/10.22178/pos.16-6)
- Pryshchepa, A. M. (2019). Ecosystem services of urbosystems green plantations. *Naukovi Dopovidi Nacional'nogo Universitetu Bioresursiv i Prirodokoristuvannâ Ukraini*, 2019(1). doi: [10.31548/dopovidi2019.01.004](https://doi.org/10.31548/dopovidi2019.01.004)
- Quiroga, A. R., Buschiazzi, D. E., & Peinemann, N. (1999). Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil and Tillage Research*, 52(1–2), 21–28. doi: [10.1016/S0167-1987\(99\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00049-5)
- Reichert, J., & Silva, V. da. (2004). Soil moisture, penetration resistance, and least limiting water range for three soil management systems and black beans yield. 13th International Soil Conservation Organization Conference, 721, 2–5.
- Reinert, D. J., Suzuki, L. E. A. S., & Reichert, J. M. (2003). Interrelation of mechanical and physical soil properties of six south brazilian soils under no-tillage. *Cc*.
- Salire, E. V., Hammel, J. E., & Hardcastle, J. H. (1994). Compression of intact subsoils under short-duration loading. *Soil and Tillage Research*, 31(2–3), 235–248. doi: [10.1016/0167-1987\(94\)90083-3](https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90083-3)
- Solgi, A., Naghdi, R., Labelle, E. R., & Zenner, E. K. (2018). The effects of using soil protective mats of varying compositions and amounts on the intensity of soil disturbances caused by machine traffic. *International Journal of Forest Engineering*, 29(3), 199–207. doi: [10.1080/14942119.2018.1527174](https://doi.org/10.1080/14942119.2018.1527174)
- Sousa, P., Gomes, D., & Formigo, N. (2020). Ecosystem services in environmental impact assessment. *Energy Reports*, 6, 466–471. doi: [10.1016/j.egy.2019.09.009](https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.009)
- Sujetovienė, G., & Baranauskienė, T. (2016). Miesto parko lankytų poveikis dirvožemio savybėms ir augalijai centrinėje Lietuvoje. *Environmental Research, Engineering and Management*, 72(3), 51–58. doi: [10.5755/jol.irem.72.3.14486](https://doi.org/10.5755/jol.irem.72.3.14486)
- Sujetovienė, G., Žaltauskaitė, J., & Dagiliūtė, R. (2019). Biodiversity in Lithuania: achievements, challenges and policy. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 18(1), 45. doi: [10.1504/IJESD.2019.098640](https://doi.org/10.1504/IJESD.2019.098640)
- Sun, Y., & Mobasheri, A. (2017). Utilizing crowdsourced data for studies of cycling and air pollution exposure: A case study using strava data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(3). doi: [10.3390/ijerph14030274](https://doi.org/10.3390/ijerph14030274)
- Tekin, Y., Kul, B., & Okursoy, R. (2008). Sensing and 3D mapping of soil compaction. *Sensors*, 8(5), 3447–3459. doi: [10.3390/s8053447](https://doi.org/10.3390/s8053447)
- Unger, P. W., & Kaspar, T. C. (1994). Soil Compaction and Root Growth: A Review. *Agronomy Journal*, 86(5), 759–766. doi: [10.2134/agronj1994.00021962008600050004x](https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600050004x)
- Vanags, C., Minasny, B., & Mcbratney, A. (2004). The dynamic penetrometer for assessment of soil mechanical resistance.
- Villagra-Mendoza, K., & Horn, R. (2018). Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils. *Geoderma*, 326, 88–95. doi: [10.1016/j.geoderma.2018.03.021](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.021)
- Wirthner, S. (2011). The role of wild boar (*Sus scrofa* L.) rooting in forest ecosystems in Switzerland. 19729, 103.
- Yang, J.-L., & Zhang, G.-L. (2011). Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff. *Journal of Soils and Sediments*, 11(5), 751–761. doi: [10.1007/s11368-011-0356-1](https://doi.org/10.1007/s11368-011-0356-1)
- Yavkin, V. G., Rudenko, V. P., & Korol, O. D. (2006). The problems of geography and tourism management. *Ruta, Chernivtsi*.
- Young, G. D., Adams, B. A., & Topp, G. C. (2000). A portable data collection system for simultaneous cone penetrometer force and volumetric soil water content measurements. *Canadian Journal of Soil Science*, 80(1), 23–31. doi: [10.4141/S99-025](https://doi.org/10.4141/S99-025)
- Zhang, C., Zhou, X., Jiang, J., Wei, Y., Ma, J., & Hallett, P. D. (2019). Root moisture content influence on root tensile tests of herbaceous plants. *Catena*, 172, 140–147. doi: [10.1016/j.catena.2018.08.012](https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.012)
- Zhukov, O. V., Zadorozhna, G. O., Maslikova, K. P., Andrushevych, K. V., & Lyadskaya, I. V. (2017). *Tehnosols Ecology*. Zhurfond, Dnipro.