

УДК 631.416.2:504.3.054

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-3>

Ольга КИЧКИРУК

кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 46, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0002-0558-1647

Scopus Author ID: 15065356500

Ірина ОНИЩУК

кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та географії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 46, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0002-2847-8570

Scopus Author ID: 57210861282

Бібліографічний опис статті: Кичкирук, О., Онищук, І. (2025). Вплив диференційованого антропогенного навантаження на кислотно-основний режим ґрунтів: порівняльний аналіз зон транспортного та промислового впливу. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 4, 18–27, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-3>

ВПЛИВ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА КИСЛОТНО-ОСНОВНИЙ РЕЖИМ ҐРУНТІВ: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗОН ТРАНСПОРТНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО ВПЛИВУ

Дослідження базувалося на комплексному хімічному аналізі ґрунтових зразків, відібраних на різній відстані від джерел антропогенного навантаження: ділянки інтенсивного автомобільного руху (автоtrasа Р28) та С33 промислових підприємств. Основними індикаторами для оцінки ступеня деградації ґрунтового покриву та кислотно-основного буферу обрали: актуальну та обмінну кислотність – як показники інтенсивності підкислення внаслідок накопичення обмінних катіонів Al^{3+} і H^+ , а також гідролітичну кислотність – як інтегральну характеристику потенційної (резервної) кислотності, що визначає потребу в хімічній меліорації та ремедіації.

Результати дослідження ілюструють суттєві відмінності у характері техногенного впливу на кислотно-основний стан ґрунтів у межах двох досліджуваних зон. У приавтомагістральній ділянці зафіксовано інтенсивне та критичне підкислення ґрунтів: мінімальне значення рН (3,98) виявлено на відстані 25 м від узбіччя, що свідчить про глибоку хімічну деградацію ґрунтового поглинального комплексу та високий ризик розвитку алюмінієвої інтоксикації – чинника, небезпечного для більшості сільськогосподарських культур і рослин природних фітоценозів. Значення гідролітичної кислотності (14,71 ммоль-екв/100 г) підтверджують наявність значного резерву кислотності, що обґрунтовує необхідність термінового проведення хімічної меліорації з метою відновлення родючості та мінімізації екологічних ризиків. Крім того, підкислення сприяє підвищенню рухомості токсичних важких металів, що створює загрозу їхнього включення в трофічні ланцюги та забруднення підземних вод у межах придорожніх екотонів.

На відміну від зон, що зазнають транспортного навантаження, ґрунти С33 промислової зони демонструють виражений лужний ефект, імовірно зумовлений викидами промислових підприємств цементної, металургійної або суміжної галузей, що містять значні концентрації сполук кальцію та магнію. Ці сполуки нейтралізують надлишкову кислотність, підвищуючи рН ґрунтового розчину.

Отримані результати мають прикладне значення для систем екологічного моніторингу, агровиробництва та просторового планування. Вони обґрунтовують доцільність впровадження диференційованих підходів до управління ґрунтовими ресурсами: зокрема, створення захисних лісосмуг і реалізація програм вапнування в зонах транспортного впливу, а також моніторинг лужності та потенційної солонцювості в межах промислових територій. Представлені дані можуть слугувати основою для розробки заходів з відновлення деградованих ґрунтів та зниження екологічного навантаження поблизу об'єктів інфраструктури.

Ключові слова: кислотність ґрунту, автотранспортні викиди, промислове забруднення ґрунтів, засолення ґрунтів дорожніми реагентами, оцінка екологічного ризику

Olga KYCHYRUK

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor at the Department of Chemistry, Ivan Franko Zhytomyr State University, 46 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0002-0558-1647

Scopus Author ID: 15065356500

Iryna ONYSHCHUK

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor at the Department of Ecology and Geography, Ivan Franko Zhytomyr State University, 46 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0002-2847-8570

Scopus Author ID: 57210861282

To cite this article: Kychkyruk, O., Onyshchuk, I. (2025). Vplyv dyferentsiiovanoho antropohennoho navantazhennia na kyslotno-osnovnyi rezhym gruntiv: porivnialnyi analiz zon transportnoho ta promyslovoho vplyvu [The impact of differentiated anthropogenic load on the acid-base regime of soils: a comparative analysis of areas of transport and industrial impact]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 4, 18–27, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-3>

THE IMPACT OF DIFFERENTIATED ANTHROPOGENIC LOADING ON THE ACID-BASE REGIME OF SOILS: COMPARATIVE ANALYSIS OF TRANSPORT AND INDUSTRIAL IMPACT ZONES

The study was based on a comprehensive chemical analysis of soil samples collected at varying distances from sources of anthropogenic pressure: areas of intense vehicular traffic (highway R28) and sanitary protection zones (SPZ) of industrial enterprises. The primary indicators selected to assess the degree of soil cover degradation and acid-base buffering capacity included: actual and exchangeable acidity – as markers of acidification intensity due to the accumulation of exchangeable Al^{3+} and H^+ cations, and hydrolytic acidity – as an integral characteristic of potential (reserve) acidity that determines the need for chemical amelioration and remediation.

The results demonstrate significant differences in the nature of technogenic impact on the acid-base status of soils within the two studied zones. In the roadside area, intensive and critical acidification was recorded: the minimum pH value (3.98) was observed at a distance of 25 meters from the road edge, indicating profound chemical degradation of the soil adsorption complex and a high risk of aluminum toxicity – a factor hazardous to most agricultural crops and native plant communities. The hydrolytic acidity value (14.71 mmol-eq/100 g) confirms a substantial reserve of acidity, justifying the urgent need for chemical amelioration to restore fertility and minimize ecological risks. Furthermore, acidification enhances the mobility of toxic heavy metals, posing a threat of their entry into food chains and contamination of groundwater within roadside ecotones.

In contrast to transport-affected zones, soils within the SPZ of the industrial area exhibited a pronounced alkaline effect, likely caused by emissions from cement, metallurgical, or related industries containing high concentrations of calcium and magnesium compounds. These compounds neutralize excess acidity, increasing the pH of the soil solution.

The obtained results have practical significance for environmental monitoring systems, agricultural production, and spatial planning. They support the implementation of differentiated approaches to soil resource management, including the establishment of protective forest belts and liming programs in transport-affected areas, as well as monitoring alkalinity and potential solonchicity within industrial territories. The presented data may serve as a basis for developing measures to restore degraded soils and reduce environmental pressure near infrastructure facilities.

Keywords: soil acidity, motor vehicle emissions, industrial soil pollution, soil salinisation by road reagents, environmental risk assessment

Вступ. Грунтовий покрив відіграє роль ключового буферного середовища, здатного акумулювати, трансформувати та частково нейтралізувати антропогенні забруднювальні речовини. Його кислотно-основний режим розглядається як один із найоб'єктивніших індикаторів техногенного навантаження. Інтенсифікація автомобільного руху та розширення промислових зон

справляють суттєвий, проте диференційований вплив на хімічні властивості ґрунтів (Бутенко, 2009, с. 17).

В умовах України, де значна частина території представлена природно кислими ґрунтами – зокрема дерново-підзолистими, для яких характерне фонове значення $pH_{KCl} \approx 4,8$ (Клименко, 2025, с. 255), додаткове антропогенне

підкислення створює комбіноване навантаження на ґрунтову систему. Це призводить до різкого зниження біопродуктивного потенціалу та посилення геохімічних ризиків, зокрема – до підвищення мобільності токсичних елементів, здатних включитися в біогеохімічні цикли та трофічні ланцюги (Пузік, 2012, с. 200)

Визначення активної (pH_{H_2O}), обмінної (pH_{KCl}) та гідролітичної (H_e) кислотності ґрунтів є ефективним і науково обґрунтованим методом моніторингу поточного стану ґрунтового розчину, а також оцінки ступеня виснаження ґрунтового поглинального комплексу (ГПК) і його буферної здатності. Особливу діагностичну цінність має показник обмінної кислотності, що визначається у сольовій витяжці, оскільки він відображає концентрацію протонів та рухомих іонів алюмінію (Al^{3+}) – компонентів, які чинять пряму фітотоксичну дію на рослини (Клименко, 2025, с. 256).

Питання якості ґрунтів і впливу антропогенних чинників на їхній хімічний стан перебувають у центрі уваги провідних наукових установ України. Екологічний стан ґрунтового покриву розглядається як один із пріоритетних напрямів сучасного ґрунтознавства, агроекології та системи екологічного моніторингу (Звіт про діяльність Національної академії наук України у 2020 році, 2021, с. 112)

Аналіз літератури. Кислотно-основний стан ґрунтів, який визначається показниками рН, є критично важливим екологічним параметром, що залежить від впливу антропогенних чинників, зокрема викидів автотранспорту, дорожнього пилу та промислової діяльності. У межах територій, що зазнають транспортного навантаження виявлено два домінуючі, протилежні за напрямом механізми впливу на рН ґрунтового розчину – закислення та олушення.

Традиційно значущим чинником, що спричиняє закислення ґрунтів поблизу автомагістралей, була дія вихлопних газів автотранспорту, які містять оксиди азоту (NO_x) та оксиди сірки (SO_x). У атмосфері ці гази вступають у реакцію з водяною парою, утворюючи сильні мінеральні кислоти. Випадаючи у вигляді кислотних опадів, вони проникають у ґрунт і змінюють його хімічний склад (Пономаренко, 2022, с. 19).

Надходження сильних кислот до ґрунтового розчину спричиняє витіснення основних катіонів кальцію (Ca^{2+}) і магнію (Mg^{2+}) із

ґрунтового-поглинального комплексу (ГПК) та їх заміщення на іони водню (H^+) і алюмінію (Al^{3+}), що призводить до підвищення обмінної та гідролітичної кислотності (Бутенко, 2009, с. 17). Унаслідок впровадження каталітичних нейтралізаторів та переходу на низькосірчисте паливо, інтенсивність цього механізму закислення в сучасних умовах суттєво зменшилася порівняно з попередніми десятиліттями.

У сучасних умовах інтенсифікації автотранспортного навантаження, ефект олушення (підвищення рН) ґрунтів часто переважає над ефектом закислення, особливо в безпосередній близькості від інтенсивних транспортних магістралей. Зокрема, основним джерелом олушення виступає дорожній пил, що осідає з повітря і є провідним чинником підвищення рН ґрунтового розчину. До складу пилу входять частки зносу дорожнього покриття (цементні, бетонні або асфальтові фрагменти), які мають лужну реакцію, а також реагенти, що застосовуються для боротьби з ожеледицею (деайсінг-матеріали), зокрема хлориди натрію та кальцію. Зазначені солі можуть безпосередньо підвищувати лужність або спричинити вилуговування кислотних іонів, зміщуючи реакцію ґрунту в бік нейтральних або лужних значень рН (Marosz, 2011, с. 50).

Результати досліджень міських ґрунтів, розташованих поблизу жвавих транспортних магістралей (Bartkowiak, 2024, с. 829), демонструють середні значення рН у межах 7,30–7,76 (pH_{KCl}), що свідчить про домінування впливу дорожніх матеріалів і солей на хімічний стан ґрунтового середовища.

Різні типи промислових підприємств можуть генерувати викиди з протилежним впливом на кислотно-основний стан ґрунтів, залежно від технологічної специфіки виробництва. Промислові зони, як правило, характеризуються підвищеними значеннями рН (понад 6,5), що свідчить про домінування викидів лужноземельних елементів, зокрема часток вапна, попелу або цементного пилу. Такі компоненти діють як хімічні меліоранти, нейтралізуючи природну кислотність і підтримуючи ґрунти в нейтральному або слаболужному стані.

Дослідження українських науковців, присвячені аналізу придорожніх ґрунтів (Łuczak, 2021, с. 5309), підтверджують загальносвітову тенденцію до підвищення рН (олушення)

поблизу інтенсивних транспортних артерій. У сучасному ґрунтознавстві показник рН розглядається як ключовий модифікатор хімічного стану ґрунтового середовища. Функціонування транспортних магістралей може спричиняти як закислення, так і олуження ґрунтів, залежно від історичного періоду, типу забруднювачів, інтенсивності руху та локальних умов. У сучасних урбанізованих зонах олуження переважає, але в зонах з інтенсивним накопиченням кислотних компонентів (наприклад, поблизу узбіччя) ризик закислення залишається високим. Олуження, спричинене надходженням техногенних матеріалів і дорожнього пилу, має вирішальне значення для змін мобільності забруднювальних речовин і є пріоритетним напрямом сучасних екологічних досліджень.

Підвищення рН ґрунту спричиняє зменшення рухомості важких металів, таких як Pb, Cd, Zn, Cu, та посилює їхнє утримання у верхньому горизонті ґрунтового профілю. Це, своєю чергою, впливає на оцінку екологічної небезпеки, знижуючи ризик міграції токсичних елементів у трофічні ланцюги та водні екосистеми. Хоча більшість наукових публікацій зосереджені на проблематиці забруднення важкими металами, зміни рН є невід'ємною складовою таких досліджень, оскільки саме цей параметр визначає подальшу трансформацію забруднювачів у ґрунтовому середовищі (Denysuk, 2019, с. 134).

Метою дослідження є кількісна оцінка та порівняльний аналіз кислотно-основного режиму ґрунтів у зонах, що зазнають впливу двох типів антропогенного навантаження – автотранспортного та промислового. Особлива увага приділяється виявленню домінуючих механізмів хімічної трансформації ґрунтового середовища (закислення чи олуження), їхньому просторовому прояву та екологічним наслідкам.

У межах дослідження виконано низку завдань: визначено показники актуальної ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$), обмінної (pH_{KCl}) та гідролітичної (H_2) кислотності ґрунтових зразків, відібраних на різних відстанях від ключових джерел техногенного забруднення (автотраса Р28 та санітарно-захисні зони (СЗЗ) промислових підприємств). Проведено кількісну оцінку інтенсивності підкислення ґрунтового покриву за показниками обмінної кислотності, що

відображають накопичення кислотоутворюючих іонів (H^+ , Al^{3+}), а також встановлено рівень загальної потенційної кислотності за показником гідролітичної кислотності – для оцінки буферної ємності ґрунтів і визначення потреби у хімічній меліорації.

У результаті дослідження виявлено та охарактеризовано принципові відмінності у характері техногенного впливу на кислотно-основний режим ґрунтів між зонами автотранспортного навантаження та промислової діяльності. Здійснено оцінку ступеня хімічної деградації ґрунтового-поглинального комплексу в зоні автотраси, зокрема в точках екстремального підкислення, де зафіксовано високий ризик розвитку алюмінієвої токсичності. Встановлено потенційно негативний вплив цього чинника на сільсько-господарські культури та природні фітоценози в межах зон критичного підкислення.

Експериментальна частина. Об'єктом дослідження виступали змішані ґрунтові зразки, відібрані у двох антропогенно-навантажених зонах Житомирської області. Придорожній коридор автомобільної магістралі Р28 (с. Білоколінка та с. Васьковичі) прогнозовано є зоною імовірного закислення. Відбір проб здійснювався з урахуванням просторового градієнта техногенного впливу: безпосередньо біля узбіччя (0 м; проби П1 та П3) та на відстані 25 м від дорожнього полотна (проби П2 та П4). Друга зона охоплює територію перекриття санітарно-захисних зон кількох промислових підприємств різного профілю (металообробка, переробка полімерів, шкіряне виробництво, виготовлення гнучкої упаковки) в межах міста Житомир. У цій зоні (проби П5–П9) прогнозується можливість як локального закислення, так і залуження ґрунтів залежно від характеру промислових викидів. Змішані ґрунтові зразки відбиралися у випадково визначених точках на різній відстані від основних територій промислових підприємств. Відбір здійснювався з двох горизонтів: поверхневого шару (0–5 см) та з глибини 20 см, що дозволяє оцінити вертикальний розподіл кислотно-основних характеристик. Проби позначено відповідно до майданчиків: П5 – 50 м (майданчик № 1), П6 – 75 м (майданчик № 2), П7 – 100 м (майданчик № 3), П8 – 125 м (майданчик № 4), П9 – 150 м (майданчик № 5).

Вибір точок відбору зумовлений необхідністю аналізу просторового розподілу

забруднювальних речовин у межах різних типів техногенного навантаження. Зразки, відібрані безпосередньо біля автостради, відображають переважно вплив грубодисперсних частинок і продуктів механічного зносу дорожнього покриття, тоді як зразки, відібрані на відстані 25 м, більшою мірою зазнають впливу дрібнодисперсних кислотних аерозолів, що осідають з атмосфери на віддаленіших ділянках. Аналіз проб ґрунту із СЗЗ промислових підприємств необхідний для порівняння кисло-основного режиму з іншими зонами антропогенного навантаження (зокрема, автотранспортною) та для визначення характеру техногенного впливу – чи спричинюють викиди локальне закислення або олушення ґрунтового середовища.

Для проведення аналізу використовували стандартизований лабораторний посуд та аналітичне обладнання, зокрема: іономір, технічні ваги з точністю до 0,01 г, бюретки об'ємом 25 мл, піпетки Мора на 5 мл та мірні циліндри. Серед реактивів застосовували 1 моль-екв/л розчину хлориду калію (KCl) та ацетату натрію (CH₃COONa), 0,01 моль-екв/л розчин гідроксиду натрію (NaOH), а також індикатор фенолфталеїн. (Кичкирук, 2023, с. 33).

Усі показники кислотності визначалися потенціометричними та титриметричними методами відповідно до вимог ДСТУ ISO 10390:2001 (Державний стандарт України, 2003, с. 6).

- Активну кислотність (рН_{H₂O}) визначали у водній суспензії: наважку повітряно-сухого ґрунту масою 6,00 г поміщали у склянку, додавали 30 мл дистильованої води (співвідношення ґрунт:розчин – 1:5), збовтували протягом 20 хвилин. Після часткового відстоювання рН вимірювали за допомогою іономіра (Чорний, 2018, с. 122).

- Обмінну кислотність (рН_{KCl}) визначали у сольовій витяжці: наважку ґрунту масою 10,00 г обробляли 25 мл 1 М розчину KCl (співвідношення 1:2,5), збовтували протягом 15 хвилин. Розчин KCl виступає екстрагентом, що витісняє обмінні іони Н⁺ та Al³⁺ з ґрунтового-поглинального комплексу, забезпечуючи точнішу оцінку потенційної кислотності та токсичності ґрунту.

- Гідролітичну кислотність (Н₂) визначали титриметричним методом за Каппеном (Городній, 2005, с. 152): наважку ґрунту масою 40,00 г обробляли 100 мл 1 М розчину ацетату натрію, збовтували протягом 30 хвилин. Отриманий фільтрат титрували 0,01 н розчином NaOH у присутності фенолфталеїну. Значення Н₂ (у ммоль-екв/100 г ґрунту) розраховували за формулою з урахуванням об'єму титранту (V_{NaOH}) та параметрів титрування.

Результати та їх обговорення. Порівняльний аналіз показників активної (рН_{H₂O}), обмінної (рН_{KCl}) та гідролітичної кислотності (Н₂) дозволяє виявити характер техногенного впливу на кисло-основний режим ґрунтів у двох досліджуваних зонах – придорожній та промисловій. Представлені результати вимірювання активної та обмінної кислотності для всіх відібраних проб (Таблиця 2).

Активна кислотність ґрунту (рН_{H₂O}), що визначається як негативний логарифм концентрації іонів водню (Н⁺) у ґрунтового розчині, є ключовим показником, який дозволяє об'єктивно оцінити хімічні умови середовища для рослин і мікроорганізмів. Вона безпосередньо впливає на біологічну доступність елементів живлення, а отже – на загальну родючість ґрунту. У межах санітарно-захисних зон підприємств значення рН у відібраних пробах

Таблиця 1

Опис відібраних проб ґрунтів

Проба	Місце відбору	Локація (джерело впливу)	Відстань до джерела, м
П1	с. Білоколінка	Транспорт (Траса Р28)	0
П2	с. Білоколінка	Транспорт (Траса Р28)	25
П3	с. Васьковичі	Транспорт (Траса Р28)	0
П4	с. Васьковичі	Транспорт (Траса Р28)	25
П5	м. Житомир	СЗЗ підприємств	50
П6	м. Житомир	СЗЗ підприємств	75
П7	м. Житомир	СЗЗ підприємств	100
П8	м. Житомир	СЗЗ підприємств	125
П9	м. Житомир	СЗЗ підприємств	150

варіюють від слабокислих (П8 – 6,62) до слаболужних (П7 – 7,16; П9 – 7,05), що свідчить про неоднорідність ґрунтових умов на дослідженій території. Значення рН у всіх пробах нижче нейтрального рівня (рН = 7,0), що свідчить про кислу реакцію ґрунтового середовища. У зоні автотранспортного навантаження (придорожній коридор траси Р28) зафіксовано виражене підкислення ґрунтів, особливо на відстані 25 м від узбіччя. Найвищий показник активної кислотності (П1 – 6,14) зафіксовано безпосередньо біля траси, що може бути наслідком локального впливу дорожніх викидів, зокрема карбонатних частинок, які частково нейтралізують кислотність. Найнижчі значення (П2 – 5,71 та П4 – 5,77) спостерігаються на відстані 25 м від траси, що може свідчити про менший антропогенний вплив або накопичення органічних кислот у ґрунті.

Загалом, усі значення активної кислотності ґрунтового розчину з проб відібраних поблизу траси, знаходяться в межах від слабокислої до кислої реакції, що може: обмежувати доступність макроелементів (особливо фосфору, кальцію, магнію); підвищувати рухливість потенційно токсичних мікроелементів (Fe, Mn, Al); впливати на мікробіоту ґрунту та структуру фітоценозу (табл. 2).

Обмінна кислотність ґрунту (pH_{KCl}) є важливим показником його буферної здатності та катіонно-аніонного складу, що безпосередньо впливає на агрохімічний стан і родючість. Вона визначає рівень доступності мінеральних поживних речовин для рослинних і мікробних систем, зокрема катіонів калію (K^+), натрію (Na^+), а також нітрат (NO_3^-) і фосфат (PO_4^{3-}) аніонів.

За умов підвищеної кислотності ґрунту спостерігається зниження доступності азот- і фосфорвмісних сполук, що обмежує їх засвоєння рослинами. Водночас зростає рухливість мікроелементів, таких як залізо (Fe), марганець (Mn) та алюміній (Al), що за певних концентрацій може призводити до фітотоксичності. У межах досліджених проб (П1–П4) значення обмінної кислотності ґрунту варіюють у межах рН 3,98–5,58 (табл. 2), що відповідає кислої реакції ґрунтового розчину. Такий рівень кислотності є нижчим за оптимальний діапазон (рН 6,0–7,5), рекомендований для більшості сільськогосподарських культур рослин, і може свідчити про певне порушення агрохімічного

балансу ґрунтів на дослідженій території. За таких умов можливе зниження доступності основних елементів живлення (зокрема фосфору, кальцію, магнію) та підвищення рухливості потенційно токсичних мікроелементів, що потребує корекційних заходів, зокрема вапнування. Щодо аналізу ґрунтового розчину проб відібраних з території перекриття СЗЗ промислових підприємств, то значення обмінної кислотності варіюють у межах рН 6,68–7,26, що відповідає нейтральній або слаболужній реакції ґрунтового середовища. Такий діапазон вважається оптимальним для більшості сільськогосподарських культур, оскільки забезпечує: високу доступність макроелементів (фосфору, калію, кальцію, магнію); стабільність мікробіологічної активності; мінімальний ризик токсичної дії мікроелементів (Fe, Mn, Al), які зазвичай активні в кислих умовах.

Проби П5 (рН 7,05), П6 (рН 6,94) та П9 (рН 6,88) характеризуються нейтральною реакцією, що є сприятливим показником для ґрунтів, потенційно підданих техногенному навантаженню.

Проба П7 (рН 7,26) має слаболужну реакцію, що може бути наслідком накопичення лужних компонентів, зокрема гідроксидів металів або залишків вапнякових матеріалів, характерних для металообробних або шкіряних виробництв.

Проба П8 (рН 6,68) демонструє слабокислу реакцію, яка все ще залишається в межах допустимих агрохімічних норм, однак може свідчити про локальне підкислення, ймовірно, внаслідок впливу органічних або кислотних стоків.

З урахуванням того, що проби відібрані в межах СЗЗ підприємств, що спеціалізуються на металообробці, шкіряній промисловості та виробництві гнучких упаковок тощо, отримані значення обмінної кислотності можуть відображати комплексний вплив технологічних викидів, зокрема:

- Металообробка – можливе надходження гідроксидів металів, що нейтралізують кислотність;
- Шкіряне виробництво – використання лужних реагентів (наприклад, вапна, сульфідів) може підвищувати рН;
- Виробництво гнучких упаковок – менш агресивне хімічне навантаження, однак можливе локальне накопичення органічних залишків.

**Порівняльні результати активної та обмінної кислотності ґрунтів
під антропогенним впливом**

Проба	pH_{H_2O}	pH_{KCl}	$\Delta pH (H_2O-KCl)$	Категорія кислотності (за pH_{KCl})
П1	6,14	5,03	1,11	Середньоокислий
П2	5,77	3,98	1,79	Сильнокислий
П3	5,91	5,58	0,33	Слабокислий
П4	5,71	4,20	1,51	Сильнокислий
П5	6,97	7,05	-0,08	Нейтральний / Слаболужний
П6	6,83	6,94	-0,11	Нейтральний / Слаболужний
П7	7,16	7,26	-0,10	Слаболужний
П8	6,62	6,68	-0,06	Нейтральний
П9	7,05	6,88	0,17	Нейтральний

Порівняльний аналіз активної та обмінної кислотності ґрунтів під антропогенним впливом свідчать про суттєві відмінності між значеннями активної та обмінної кислотності у пробах, відібраних як у безпосередній близькості до джерел автотранспортного навантаження (0–25 м), так і в межах санітарно-захисних зон підприємств. Проби П1–П4 характеризуються вираженим зниженням рН у розчині КСl порівняно з рН у водній витяжці ($\Delta pH = 0,33-1,79$), що свідчить про високу обмінну кислотність. Найбільша різниця між активною та обмінною кислотністю зафіксована у пробі П2 ($\Delta pH = 1,79$), що вказує на значну кількість обмінних і потенційно токсичних іонів H^+ та Al^{3+} , здатних вивільнятися з ґрунтового комплексу. Категорії кислотності за pH_{KCl} варіюють від слабокислої (П3) до сильнокислої (П2, П4), що підтверджує підкислення ґрунтів у зоні безпосереднього впливу антропогенних чинників (транспорт, промислові викиди). Такі умови можуть обмежувати доступність макроелементів (особливо фосфору, кальцію, магнію) та підвищувати ризик токсичності мікроелементів (Fe, Mn, Al). Проби П5–П9 (СЗЗ підприємств) характеризуються тим, що значення pH_{KCl} переважно перевищують або близькі до pH_{H_2O} , що відображається у негативних або мінімальних значеннях ΔpH (від $-0,11$ до $+0,17$). Така динаміка свідчить про низьку обмінну кислотність і високу буферну здатність ґрунтів, що характерно для нейтрального або слаболужного середовища. Категорії кислотності за pH_{KCl} – нейтральна або слаболужна, що є оптимальним агрохімічним режимом для більшості сільськогосподарських культур.

Відсутність значного розриву між активною та обмінною кислотністю вказує на стабільність ґрунтового поглинального комплексу та відсутність надлишку вільних іонів H^+/Al^{3+} , що є типовим для ґрунтів з меншим техногенним навантаженням або ефективною природною самоочисною здатністю. Таким чином можна робити висновки, що ΔpH ($pH_{H_2O} - pH_{KCl}$) є інформативним показником потенційної кислотності: чим вища різниця, тим більша кількість обмінних іонів H^+ у ґрунтовому поглинаючому комплексі. Проби з високим ΔpH (П2, П4) потребують корекційних заходів, зокрема вапнування, для нейтралізації кислотності та зниження токсичності. Ґрунти в межах СЗЗ (П5–П9) демонструють стабільний кислотнолужний режим, що свідчить про відносно сприятливий екологічний стан або ефективну буферну здатність ґрунтів у цих зонах.

Гідролітична кислотність ґрунту, як різновид потенційної кислотності, є показником здатності ґрунтового вбирного комплексу накопичувати протони водню (H^+) внаслідок гідролізу мінеральних і органічних речовин. Визначення цього параметра дозволяє оцінити буферну ємність ґрунту та його реакційну здатність до нейтралізації кислотних компонентів.

Гідролітична кислотність має прикладне значення у кількох аспектах:

- Прогнозування потреби у вапнуванні – на її основі розраховується кількість нейтралізуючих речовин (зокрема $CaCO_3$), необхідних для корекції кислотнолужного балансу.
- Планування рекультиваційних заходів – показник використовується для обґрунтування заходів з відновлення деградованих

або техногенно порушених земель, зокрема в межах промислових зон.

Таким чином, гідролітична кислотність є індикатором екологічного стану ґрунтів і відіграє важливу роль у формуванні агрохімічної стратегії на територіях із підвищеним техногенним навантаженням. Результати визначення гідролітичної кислотності, представлені у Таблиці 3, включаючи розрахункові значення для транспортних проб на основі об'ємів розчину титранту NaOH.

Отримані дані демонструють виражений контраст у рівнях гідролітичної кислотності між ґрунтами, що зазнають впливу автотранспортної інфраструктури, та ґрунтами промислової зони. Значення H_e для ґрунтів поблизу автотранспортної магістралі (діапазон 1,55–14,71 ммоль-екв/100 г) на порядки перевищують показники ґрунтів промислової зони. Це підтверджує принципову відмінність у хімічному складі та механізмах кислотного навантаження двох типів антропогенних джерел.

Винятково високе значення гідролітичної кислотності ($H_e = 14,71$ ммоль-екв/100 г; проба П3) свідчить про надзвичайно високий рівень резервної (буферної) кислотності ґрунту. Такий показник вказує на те, що, незважаючи на можливе стримування активного підкислення (відносна стабільність pH_{KCl}), зумовлене буферною ємністю ґрунту (високий вміст органічної речовини або первинних мінералів), запас нейтралізуючих основ є критично виснаженим. Це свідчить про необхідність застосування максимальної розрахункової дози хімічної меліорації для відновлення кислотного-лужного балансу.

Інтенсивне зростання гідролітичної кислотності у ґрунтах транспортної зони є прямим

наслідком хімічної деградації, спричиненої домінуючим кислотним атмосферним навантаженням. Основним джерелом такого навантаження є автотранспортна діяльність, що супроводжується емісією оксидів сірки та азоту, які в атмосфері трансформуються у сірчану та нітратну кислоту. Ці сполуки, потрапляючи в ґрунт, спричиняють вимивання обмінних основ та збільшення концентрації іонів H^+ і Al^{3+} у ґрунтового розчину.

У контексті сучасних досліджень додатковим фактором підвищення кислотності ґрунтового покриву є вплив бойових дій. Зокрема, вибухові навантаження (наприклад, удари БПЛА) можуть сприяти утворенню нітратної кислоти внаслідок реакції атмосферного азоту з киснем при високих температурах (Khomiak, 2025). Крім того, механічна деструкція ґрунту активізує вивільнення токсичних іонів з алюмосилікатних мінералів, зокрема рухомого алюмінію, який у процесі гідролізу додатково підвищує концентрацію іонів водню.

Аналіз одержаних результатів свідчить, що автотранспортна діяльність є домінуючим джерелом кислотного навантаження, що призводить до виснаження запасу обмінних основ та хімічної деградації придорожніх ґрунтів. Найбільш виражене підкислення зафіксовано на відстані 25 м від дорожнього полотна (pH_{KCl} 3,98 і 4,20 в пробах П2 та П4 відповідно), де осідають дрібнодисперсні кислотні аерозолі. Натомість pH в П1 та П3 може бути тимчасово вищим через присутність лужних абразивних частинок (наприклад, з дорожнього покриття).

Критичні значення pH_{KCl} у П2 та П4 спричиняють вивільнення рухомого алюмінію, що є лімітуючим фактором для чутливих

Таблиця 3

Результати визначення гідролітичної кислотності ґрунтів
Умови аналізу: аліквота фільтрату 5 мл, концентрація луку 0,0111 моль екв/л

Проба	V_{NaOH} , мл	H_e (ммоль-екв/100 г ґрунту)	Категорія кислотності
П1	2,8	1,55	Дуже слабкокислий
П2	8,2	5,55	Середньокислий
П3	16,5	14,71	Сильнокислий
П4	12,6	6,93	Середньокислий
П5	0,5	0,28	Некислий (Нейтралізований)
П6	0,3	0,17	Некислий (Нейтралізований)
П7	0,4	0,22	Слабокислий (Локальна аномалія)
П8	0,4	0,22	Некислий (Нейтралізований)
П9	0,4	0,22	Некислий (Нейтралізований)

сільськогосподарських культур, таких як ячмінь, кукурудза, соя, для яких оптимальний рН становить 6,0–7,5. Крім того, кисле середовище (особливо при рН < 5,0) значно підвищує рухливість важких металів (Pb, Cd, Ni), що збільшує ризик їх міграції в ґрунтові води та накопичення в рослинній продукції.

Загалом, високі значення гідролітичної кислотності ($H_2 > 6,0$ ммоль-екв/100 г) однозначно свідчать про високу резервну кислотність і значну потребу ґрунту у вапнуванні. Показник H_2 є кількісною мірою буферної здатності ґрунту проти закислення. Значення $H_2 = 14,71$ ммоль-екв/100 г (проба ПЗ) демонструє, що ґрунт досяг межі своєї природної нейтралізуючої здатності. Для забезпечення агрохімічної та екологічної безпеки такі ґрунти потребують інтенсивних меліоративних заходів, зокрема внесення вапна у дозах, орієнтованих на нейтралізацію резервної кислотності – приблизно 1,0–1,5 т/га $CaCO_3$ на кожні 1,0 ммоль-екв H_2 .

Висновки

1. Проведене дослідження підтвердило наявність суттєвих відмінностей у характері антропогенного впливу на кислотність ґрунтів: транспортні коридори виступають джерелом інтенсивного підкислення, тоді як в СЗЗ промислової зони демонструється нейтралізуючий

(лужний) ефект, що може бути пов'язано з особливостями технологічних процесів та хімічного складу викидів.

2. Максимальне зниження обмінної кислотності зафіксовано на відстані 25 м від траси Р28, де мінімальне значення рН_{KCl} становить 3,98. Це свідчить про глибоку хімічну деградацію ґрунтового поглинального комплексу, що супроводжується високим ризиком алюмінієвої токсичності, особливо для чутливих сільськогосподарських культур.

3. Результати визначення гідролітичної кислотності свідчать, що ґрунти у зоні інтенсивного впливу автотранспорту характеризуються високим рівнем резервної кислотності (H_2 до 14,71 ммоль-екв/100 г), що є індикатором критичного виснаження нейтралізуючого потенціалу ґрунту. Це обґрунтовує необхідність негайного проведення хімічної меліорації, зокрема вапнування, для відновлення родючості та зниження екологічних ризиків.

4. Кисле середовище ґрунтів, сформоване під впливом транспортних викидів, створює умови для підвищення рухливості токсичних важких металів (Pb, Cd, Ni), що посилює загрозу забруднення трофічних ланцюгів та інфільтрації забруднювачів у підземні води придорожніх територій.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Бутенко О. С., Охарєв В. О. Механізм визначення кількісних характеристик рівня концентрації забруднюючих речовин викидами автомобільного транспорту. *Екологічна безпека та природокористування*. 2009. Вип. 3. С. 14–33.
2. Клименко М. О., Колесник Т. М., Андрощук О. О., Ровна Г. Ф. Динаміка реакції ґрунтового розчину за тривалої післядії вапнування та удобрення на дерново-підзолистому ґрунті. *Таврійський науковий вісник*. 2025. № 142. Ч. 2. С. 255–262. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.142.2.32>
3. Пузік В. К., Бузіна І. М. Вплив техногенезу та сучасного виробництва на агроекологічний стан території. *Вісник ХНАУ. Екологія ґрунтів*. 2012. № 3. С. 199–203.
4. Звіт про діяльність Національної академії наук України у 2020 році. НАН України. Київ : Академперіодика, 2021. 593 с.
5. Пономаренко О. М., Никифоров В. В., Яковенко В. М. Зміни хімічних і мікроморфологічних властивостей ґрунтів Полтавської області України за останні 130 років. *Український географічний журнал*. 2022. 1(117). С. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2022.01.018>
6. Marosz A. Soil pH, electrical conductivity values and roadside leaf sodium concentration at three sites in central Poland. *Dendrobiology*. 2011. 66. P. 49–54.
7. Bartkowiak A. et al. The Impact of Proximity to Road Traffic on Heavy Metal Accumulation and Enzyme Activity in Urban Soils and Dandelion. *Sustainability*. 2024. 16(2). P. 812–832. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16020812>
8. Łuczak K. et al. Effect of NaCl road salt on the ionic composition of soils and *Aesculus hippocastanum* L. foliage and leaf damage intensity. *Scientific Reports*. 2021. 11. P. 5309. DOI: <https://10.1038/s41598-021-84541-x>
9. Denysyk H. I., Didura R. V. Accumulation of heavy metals in road landscape engineering systems. *Науковий вісник Херсонського державного університету*. 2019. Вип. 10. С. 130–136. DOI: <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2019-10-18>

10. Кичкирук О. Ю. Інструктивно-методичні матеріали до лабораторних занять з дисципліни «Екологічна хімія». Житомир : Вид-во ЖДУ імені Івана Франка, 2023. 48 с.
11. Державний стандарт України. якість ґрунту визначання рН (ISO 10390:1994, IDT). Київ : Держстандарт України. 2003. 14 с.
12. Чорний С. Г. Оцінка якості ґрунтів : навчальний посібник. Миколаїв : МНАУ, 2018. 233 с.
13. Городній М. М., Лісовал А. П., Бикін А. В. та ін. Агрохімічний аналіз : підручник. 2005. Київ : Арістей. 476 с.
14. Khomiak I. V., Onyshchuk I. P., Kychkyruk O. Y., Vakerych M. M., Hasynets Y. S., Schwartau V. V. The impact of strike UAV explosions on soil acidity and vegetation dynamics. *Biosystems Diversity*. 2025. Vol. 33(2). DOI: <https://doi.org/10.15421/012530>

REFERENCES:

1. Butenko, O. S., & Okhariev, V. O. (2009). Mekhanizm vyznachennia kilkisnykh kharakterystyk rivnia kontsentratsii zabrudniuiuchykh rehovyn vykydamy avtomobilnoho transportu [Mechanism for determining quantitative characteristics of pollutant concentration levels in motor vehicle emissions. Environmental safety and natural resource use]. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*, (3), 14–33. [in Ukrainian].
2. Klymenko, M. O., Kolesnyk, T. M., Androshchuk, O. O., & Rovna, H. F. (2025). Dynamika reaktsii gruntovoho rozchynu za tryvaloї pisladii vapnuvannia ta udobrennia na dernovo-pidzolystomu grunti [Dynamics of soil solution reaction during prolonged after-effects of liming and fertilisation on sod-podzolic soil]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk*, 142(2), 255–262. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.142.2.32> [in Ukrainian].
3. Puzik, V. K., & Buzina, I. M. (2012). Vplyv tekhnogenezu ta suchasnoho vyrobnytstva na ahroekolohichni stan terytorii [The impact of technogenesis and modern production on the agroecological condition of territories]. *Visnyk KhNAU. Ekolohiia gruntiv*, (3), 199–203. [in Ukrainian].
4. Zvit pro diialnist Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy u 2020 rotsi. (2021). NAN Ukrainy. Akademperiodyka. [in Ukrainian].
5. Ponomarenko, O. M., Nykyforov, V. V., & Yakovenko, V. M. (2022). Zminy khimichnykh i mikromorfolohichnykh vlastyvopei gruntiv Poltavskoi oblasti Ukrainy za ostanni 130 rokiv. [Changes in the chemical and micromorphological properties of soils in the Poltava region of Ukraine over the last 130 years]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal*, 1(117), 18–26. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2022.01.018> [in Ukrainian].
6. Marosz, A. (2011). Soil pH, electrical conductivity values and roadside leaf sodium concentration at three sites in central Poland. *Dendrobiology*, 66, 49–544
7. Bartkowiak, A. et al. (2024). The Impact of Proximity to Road Traffic on Heavy Metal Accumulation and Enzyme Activity in Urban Soils and Dandelion. *Sustainability*, 16(2), 812. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16020812>
8. Łuczak K. et al. (2021). Effect of NaCl road salt on the ionic composition of soils and *Aesculus hippocastanum* L. foliage and leaf damage intensity. *Scientific Reports*, 11, 5309. DOI: <https://10.1038/s41598-021-84541-x>
9. Denysyk, H. I., & Didura, R. V. (2019). Accumulation of heavy metals in road landscape engineering systems. *Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnoho universytetu*, (10), 130–136. DOI: <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2019-10-18>
10. Kychkyruk, O. Yu. (2023). *Instruktyvno-metodychni materialy do laboratornykh zaniat z dystsypliny “Ekolohichna khimiiia”*. Vyd-vo ZhDU imeni Ivana Franka. [in Ukrainian].
11. Derzhavnyi standart Ukrainy. (2003). Yakist gruntuv vyznachannia pH (ISO 10390:1994, IDT). Derzhstandart Ukrainy. [in Ukrainian].
12. Chornyi, S. H. (2018). *Otsinka yakosti gruntiv [Soil quality assessment]* : navchalnyi posibnyk. MNAU.
13. Horodnii, M. M., Lisoval, A. P., Bykin, A. V. ta in. (2005). *Ahrokhimichniy analiz [Agrochemical analysis]* : pidruchnyk. Aristei.
14. Khomiak, I. V., Onyshchuk, I. P., Kychkyruk, O. Y., Vakerych, M. M., Hasynets, Y. S., & Schwartau, V. V. (2025). The impact of strike UAV explosions on soil acidity and vegetation dynamics. *Biosystems Diversity*, 33(2). DOI: <https://doi.org/10.15421/012530>

Стаття надійшла: 21.11.2025

Прийнято: 07.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025