**УДК 631.46:631.415.2(477.85)** *https://doi.org/10.31861/biosystems2026.02.318*

# КИСЛОТНІСТЬ ҐРУНТУ ТА ПОТЕНЦІЙНА НІТРИФІКАЦІЙНА АКТИВНІСТЬ АГРОЕКОСИСТЕМ ПЕРЕДКАРПАТТЯ: МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД

Б. І. РИМАР, Р. І. БЕСПАЛЬКО

*Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,*
*вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна, 58012*
*rymar.bohdan@chnu.edu.ua*

*Мета роботи - узагальнити сучасні дані про зв'язок кислотності ґрунту з потенційною нітрифікаційною активністю та запропонувати методичну рамку планування її польово-лабораторного дослідження в агроекосистемах Передкарпаття. Стаття є наративним оглядом і методичним синтезом рецензованих праць 2021–2025 років, регіональних матеріалів щодо родючості ґрунтів та стандартів визначення pH і потенційної нітрифікації. До огляду включено 21 джерело; кількісного об'єднання ефектів не проводили. Узгоджено операційний зміст pH-$H_2O$, pH-KCl і польового електрохімічного сигналу. Показано, що значення pH залежить від екстрагенту та процедури, тому pH-$H_2O$ і pH-KCl не можна вважати взаємозамінними. Польовий сенсор, сам по собі, не є лабораторним визначенням і має проходити незалежну валідацію за парними пробами. Реакція нітрифікувального угруповання на кислотність формується разом із доступністю амонію, вологою, температурою, аерацією, органічним вуглецем, гранулометричним складом і практиками удобрення. Порівняння чотирьох первинних досліджень показало, що висновки про роль AOA, AOB і comammox Nitrospira залежать від ґрунту, азотного режиму й показника (чисельності, функціонального внеску або швидкості); їх не можна переносити лише за подібністю pH чи копійністю amoA. Потенційну нітрифікаційну активність запропоновано трактувати як функціональний потенціал проби за стандартизованих умов інкубації, а не як виміряну швидкість процесу in situ. Для майбутнього регіонального дослідження обґрунтовано стратифікований просторовий відбір, пілотне визначення дисперсії, сезонні повтори та наперед задані подієві проби. Мінімальний набір передбачає лабораторні pH-$H_2O$ і pH-KCl, потенційну нітрифікацію, $NH_4^+$ і $NO_3^-$, вологість і температуру; за наявності ресурсів його доповнюють органічним вуглецем, гранулометричним складом і молекулярними маркерами. Без даних про вуглець і гранулометричний склад скориговані оцінки не враховуватимуть їхнього можливого впливу. Сенсорний часовий ряд може допомагати визначати моменти додаткового пробовідбору, але лише після оцінювання похибки та відокремлення калібрувальних даних від даних незалежної валідації. Окремо наголошено на фіксації глибини відбору, збереженні проб і лабораторному протоколі, уникненні псевдореплікації та врахуванні повторюваних вимірювань. Кількість ділянок, критерії сенсорної події та статистичні взаємодії потрібно визначити до проведення основного аналізу. Запропонована система не містить первинних експериментальних результатів і не доводить причинного впливу кислотності. Її призначення - забезпечити коректне порівняння ділянок, прозоре врахування коваріатів і подальшу локальну перевірку гіпотез щодо кислотності та потенційної нітрифікації ґрунтів Передкарпаття.*

*Ключові слова: амонієокиснювальні археї, амонієокиснювальні бактерії, comammox Nitrospira, pH-$H_2O$, pH-KCl, потенційна нітрифікація*

**Вступ.** Нітрифікація є ключовою ланкою ґрунтового циклу азоту: вона змінює доступність мінеральних форм N для рослин і пов'язана з утворенням нітрату, його вимиванням та утворенням $N_2O$. Окиснення амонію можуть здійснювати амонієокиснювальні археї (AOA) і бактерії (AOB), тоді як окремі представники роду Nitrospira здатні здійснювати повну нітрифікацію (comammox). Співвідношення функціональних груп залежить від властивостей ґрунту та способу вимірювання, тому екологічні закономірності з одного регіону не можна автоматично переносити на інший (Ni et al., 2023; Tan et al., 2024).

Кислотність зазвичай є сильним предиктором перебудови мікробного азотного циклу, але спостережувана асоціація не означає ізольованої причинної дії pH (Zhong et al., 2023). Вологість, температура, аерація, доступність $NH_4^+$, органічний вуглець, текстура та історія внесення добрив можуть одночасно відрізнятися між ділянками й змінювати нітрифікаційну відповідь. Для Чернівецької області регіональні обстеження засвідчують неоднорідність показників кислотності та родючості, однак не замінюють вимірювань у конкретному полі, горизонті й сезоні (Зайцев та ін., 2022; Гунчак та ін., 2025).

Методично важливо розрізняти pH-$H_2O$, pH-KCl та показання польового сенсора: це різні операційні величини. Так само потенційна нітрифікаційна активність, визначена в

контрольованій інкубації, не є фактичною польовою швидкістю процесу (ISO 10390:2021; ISO 15685:2012). Сучасні дослідження кислих ґрунтів повідомляють про різну участь AOA, AOB і comammox залежно від ґрунту та надходження азоту; отже, універсальний поріг pH або висновок за одним маркером не обґрунтовані (Chisholm et al., 2024; Tan et al., 2024; Xie et al., 2025).

Мета статті - систематизувати ці методичні застереження та запропонувати дизайн регіонального спостереження, який поєднує стандартизовані лабораторні показники, коваріати та перевірений сенсорний моніторинг. Науковий внесок полягає не в поданні нових польових даних, а в узгодженні вимірювальних понять, мінімального набору показників і меж висновків для майбутнього дослідження агроекосистем Передкарпаття. Рукопис відрізняється від попередньої праці автора про LoRaWAN у точному землеробстві предметом аналізу: тут розглянуто біологічні показники нітрифікації й правила їх вимірювання; технологію зв'язку не подано як доказ біологічного ефекту (Rymar, 2025).

**Матеріали та методи.** Виконано цільовий наративний пошук праць за групами понять soil acidity/soil pH, potential nitrification/potential ammonia oxidation, AOA/AOB/comammox Nitrospira, soil sampling та sensor validation. Пошук завершено у вересні 2026 року; мовних обмежень не встановлювали. Бібліографічні відомості звіряли за DOI та сторінками видавця. До синтезу включено 21 джерело: 19 наукових статей і 2 стандарти; серед статей є 2 регіональні праці щодо ґрунтів Чернівецької області. Добирали дослідження з описаними методами та результатами, релевантними для операційного визначення pH, варіації нітрифікації, відбору проб або валідації сенсорів. Окремо зіставили чотири первинні експериментальні статті 2024–2025 років, що відрізняються дизайном і кінцевими показниками; у табл. 2 їх наведено як цільові приклади, а не як повну чи статистично репрезентативну вибірку. Ці приклади охоплюють чисельність нітрифікаторів, функціональний внесок груп, потенційну й валову нітрифікацію. Дублікати, нерецензовані перекази й джерела без перевірюваних бібліографічних даних не включали. Це не систематичний огляд і не метааналіз: повноту пошуку та величину сукупного ефекту не оцінювали.

Методичний синтез спирався на ISO 10390:2021 для потенціометричного визначення pH у ґрунтовій суспензії та на ISO 15685:2012 для швидкого тесту потенційної нітрифікації. У запропонованій рамці pH-$H_2O$ є лабораторною референцією для парної перевірки польового електрохімічного сигналу; pH-KCl реєструють як окремий показник, не перераховуючи без локальної моделі. Усі проби одного порівняння мають проходити однаковий біологічний тест із документуванням зберігання, маси, складу середовища, температури, тривалості інкубації та аналітичного визначення продукту.

Для майбутнього спостереження pH-$H_2O$ пропонується як основна пояснювальна змінна, потенційна нітрифікаційна активність - як функціональний результат, а вологість, температура, $NH_4^+$, $NO_3^-$, органічний вуглець, текстура, ландшафтна позиція, культура й історія удобрення - як можливі коваріати або змішувальні чинники. $NO_3^-$ не є специфічним показником нітрифікації, оскільки його концентрацію також змінюють поглинання рослинами, іммобілізація, денітрифікація, вимивання та попереднє удобрення.

**Результати огляду та методичний синтез.**

**Операційне визначення кислотності й активності.** Лабораторне значення pH залежить від екстрагенту, співвідношення твердої та рідкої фаз, підготовки проби та режиму вимірювання. pH-$H_2O$ та pH-KCl можуть корелювати, проте різниця між ними не є сталою для всіх ґрунтів; перерахунок, побудований на іншому наборі ґрунтів, потребує локальної перевірки (Takamoto et al., 2023). У протоколі й наборі даних необхідно вказувати метод, екстрагент, глибину відбору, підготовку проби, прилад і калібрування. Незаповнене поле «pH» не дає змоги відрізнити методичну варіацію від ґрунтової.

Потенційна нітрифікаційна активність показує, як проба реагує за наявності субстрату та контрольованих умов інкубації. Стандартизація полегшує порівняння проб, але послаблює подібність до конкретного польового моменту, коли субстрат, температура, аерація та вологість змінюються. Тому результат слід називати потенційною активністю, не інтерпретуючи його як швидкість in situ. Мінімальні показники та межі висновків наведено в табл. 1.

*Таблиця 1.*

***Показники, методи та межі інтерпретації***

***Table 1.***

***Measurements, methods, and limits of interpretation***

| **Показник** | **Метод або джерело** | **Межа інтерпретації** |
|---|---|---|
| pH-$H_2O$ | Потенціометричне визначення за ISO 10390:2021 | Лабораторна референція для парної перевірки польового сенсора |
| pH-KCl | Потенціометричне визначення у розчині KCl | Окремий показник; не є взаємозамінним із pH-$H_2O$ |
| Потенційна нітрифікація | Стандартизована інкубація за ISO 15685:2012 | Потенціал за умов тесту, а не швидкість in situ |
| $NH_4^+$ і $NO_3^-$ | Лабораторне визначення мінеральних форм азоту | Баланс кількох процесів; не ідентифікує нітрифікаторів |
| AOA, AOB, comammox | Групоспецифічна qPCR/RT-qPCR маркерів amoA | Копійність гена не дорівнює активності; потрібне функціональне зіставлення |
| Вологість і температура | Польові та лабораторні вимірювання | Коваріати для врахування гідротермічної та сезонної варіації |

**Кислотність і функціональні групи нітрифікаторів.** Зниження pH змінює рівновагу $NH_4^+/NH_3$, доступність субстрату й умови кислотного стресу. AOA часто виявляють у середовищах із нижчою доступністю амонію, AOB можуть реагувати на підвищення азотного навантаження, а екологічна роль comammox залежить від лінії Nitrospira та властивостей ґрунту. Це тенденції, а не взаємовиключні правила. Виявлення гена amoA або підрахунок його копій не доводить, що відповідна група забезпечувала виміряний потік азоту.

Чотири первинні дослідження демонструють не єдину ієрархію нітрифікаторів, а залежні від системи результати. Вони відрізняються ґрунтами, азотним режимом і кінцевим показником - від чисельності угруповань до функціональних і валових швидкостей. Тому порівнювати їх слід разом із дизайном, а не лише за категорією «кислий ґрунт»; ключові приклади наведено в табл. 2.

Зіставлення уточнює, чому ці висновки не слід зводити до одного правила. У Chisholm et al. (2024) AOB найвиразніше реагували на внесення сечі у варіанті pH 7,1; натомість Tan et al. (2024) у трьох інших кислих ґрунтах визначили AOA як ключових $NH_3$-окиснювачів, а Xie et al. (2025) пов'язали PNR з азотним режимом, pH і різноманіттям AOA/comammox. Це не пряме протиріччя, оскільки ґрунти, внесення азоту та виміряні кінцеві показники відрізнялися. У Cao et al. (2025) GHN/GAN - відношення валової гетеротрофної (GHN) до валової автотрофної (GAN) нітрифікації, тобто інший результат, ніж стандартизована потенційна швидкість. Для Передкарпаття доцільно наперед визначити PNR як функціональний результат; щоб приписати його окремим групам, потрібні додаткові функціональні, молекулярні або ізотопні вимірювання. Опубліковані pH-пороги слугують гіпотезами для локальної перевірки, а не готовими рекомендаціями.

На інтерпретацію впливають гідротермічний режим і субстрат. За дефіциту води погіршується транспорт розчинених сполук, а за насичення пор водою може обмежуватися доступ кисню. Сезонні температури та вологість можуть змінюватися разом із pH; повторні проби з однієї точки не є незалежними. Доступність амонію визначається удобренням, мінералізацією, іммобілізацією та поглинанням рослинами. Органічний вуглець, текстура й буферність формують мікросередовища, тоді як довготривале внесення азотних добрив може сприяти підкисленню, але його ефект залежить від форми азоту, буферності та управління рештками (Chen et al., 2023; Zamanian et al., 2024). Тому порівняння «кисле поле - нейтральне поле» без історії менеджменту не ізолює ефект pH.

***Таблиця 2.***

***Порівняльні результати досліджень нітрифікації у кислих ґрунтах***

***Table 2.***

***Comparative evidence from nitrification studies in acidic soils***

| **Дослідження й дизайн** | **Основний результат** | **Значення та межа перенесення** |
|---|---|---|
| Chisholm et al. (2024). 90 діб; один новозеландський суглинок; pH 4,9, 6,1–6,2 і 7,1; із синтетичною сечею/без неї. Оцінювали чисельність і склад AOA, AOB та comammox. | Чисельність comammox clade B була найбільшою за природного pH без N. AOB реагували на сечу, найбільше за pH 7,1; AOA на N не реагували. | Вказує на залежність відповіді від поєднання pH і N. Чисельність не тотожна швидкості процесу, а один ґрунт не задає регіонального порога. |
| Tan et al. (2024). Три кислі аграрні ґрунти; інгібіторні мікрокосми, qPCR та оцінювання окиснення $NH_3$ і $N_2O$. | AOA були ключовими $NH_3$-окиснювачами в усіх трьох ґрунтах; AOB істотно брали участь в одному з них; comammox відігравали другорядну роль. Чутливість clade A до 1-octyne різнилася між ґрунтами. | Функціональні ролі встановлено в конкретних ґрунтах; специфічність інгібіторів залежить від матриці та потребує перевірки. |
| Xie et al. (2025). Довготривалий дослід у кислому фіолетовому ґрунті Південно-Західного Китаю; 5 рівнів N: 0–360 кг/га. Визначали PNR, властивості ґрунту та групи окиснювачів. | За внесення N (проти N0) PNR, $NH_4^+$, $NO_3^-$ і SOC зростали, pH знижувався; автори пов'язали PNR із рівнем N, pH та різноманіттям AOA/comammox. | pH, субстрат і властивості ґрунту змінювалися одночасно; асоціацію не слід тлумачити як універсальний ізольований ефект pH. |
| Cao et al. (2025). Вісім провінцій Китаю; кислі орні ґрунти з pH 3,7–6,9; $^{15}N$-розведення та ацетиленове пригнічення, з/без $NH_4^+$. | Співвідношення GHN/GAN змінювалося нелінійно; поріг автори оцінили як pH 4,5 з $NH_4^+$ і 4,7 без нього; нижче переважала грибна HN, вище — AOA-залежна AN. | Поріг стосується валових авто-/гетеротрофних потоків, а не стандартної потенційної швидкості; це гіпотеза для перевірки, не локальна рекомендація. |

*Примітка. PNR (potential nitrification rate)- потенційна швидкість нітрифікації; SOC (soil organic carbon) - органічний вуглець ґрунту; HN і AN - гетеротрофна й автотрофна нітрифікація; GHN і GAN - відповідні валові швидкості; GHN/GAN - їхнє відношення.*

Схематичний зв'язок між кислотністю, субстратом та групами нітрифікаторів наведено на рис. 1. Він показує концептуальні напрями, а не виміряний внесок окремих організмів.

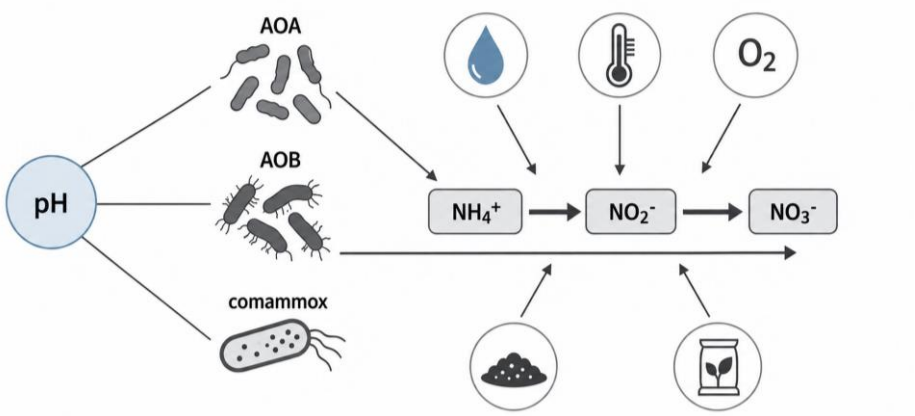



***Рис. 1. Концептуальна схема зв'язку кислотності ґрунту з функціональними групами нітрифікаторів і перетворенням $NH_4^+$ на $NO_3^-$. Стрілки позначають можливі біологічні перетворення та чинники, але не кількісний внесок AOA, AOB чи comammox. Авторська схема***

***Fig. 1. Conceptual relationship between soil acidity, nitrifier functional groups, and the transformation of $NH_4^+$ to $NO_3^-$. Arrows indicate possible biological transformations and relevant factors, not the quantitative contribution of AOA, AOB, or comammox. Author's illustration***

**Дизайн регіонального дослідження.** Регіональна спрямованість рамки полягає в урахуванні неоднорідності кислотності й родючості ґрунтів через стратифікацію за ландшафтною позицією, ґрунтовою відміною та удобренням. Рамку потрібно адаптувати до визначеної сукупності ґрунтів і типів землекористування Передкарпаття, якою обмежуватимуться висновки майбутнього дослідження. Спершу потрібно операційно визначити межі території та описати кожну ділянку координатами, висотою, рельєфною позицією, ґрунтовою відміною, землекористуванням, культурою та глибиною відбору. Базове обстеження має бути стратифіковане за ландшафтною позицією, попередньо встановленим класом кислотності, типом ґрунту та типом удобрення. Польовими повторностями є незалежні точки або ділянки, а не кілька аліквот однієї складеної проби.

З однієї добре перемішаної проби відбирають частини для паралельного визначення pH-$H_2O$, pH-KCl, потенційної активності, $NH_4^+$, $NO_3^-$, вологості та основних властивостей ґрунту. Частину для біологічного тесту зберігають згідно з його протоколом; проби для аналізів із різними вимогами розділяють і окремо маркують. Кількість точок і повторів не задають наперед без оцінки дисперсії: пілотна серія має визначити компоненти варіації та забезпечити розрахунок статистичної потужності. Рекомендовану послідовність наведено в табл. 3.

***Таблиця 3.***

***Просторово-часовий дизайн майбутнього дослідження***

***Table 3.***

***Spatial and temporal design for the proposed study***

| **Етап** | **Одиниця спостереження та відбір** | **Аналітичний результат** |
|---|---|---|
| Базове просторове обстеження | Незалежні точки, стратифіковані за ландшафтом, pH, типом ґрунту й удобренням | Оцінка градієнта pH і просторової дисперсії |
| Пілотна серія | Повторні проби в частині точок за однакового протоколу | Компоненти дисперсії й розрахунок потрібної вибірки |
| Сезонні повтори | Планові відбори в тих самих точках | Зміни pH, потенційної активності й коваріат у часі |
| Подієвий відбір | Додаткова проба після наперед заданого критерію опадів, зрошення чи удобрення | Перевірка короткочасної асоціації без ретроспективного добору подій |
| Статистичний аналіз | Змішана модель із випадковим ефектом точки або ділянки | Асоціація, довірчий інтервал, перевірка нелінійності й чутливості |

Для сезонних даних доречна змішана модель із випадковим ефектом точки або ділянки, оцінюванням асоціації та довірчими інтервалами. pH-KCl доцільно використовувати замість pH-$H_2O$ в окремому аналізі чутливості, без одночасного включення обох показників у базову модель. За відсутності даних про органічний вуглець і гранулометричний склад слід прямо зазначати неможливість коригування за цими чинниками та ризик залишкового змішування. Нелінійність або взаємодію pH з $NH_4^+$/удобренням слід задавати як обмежені наперед гіпотези, узгоджені з розміром вибірки. Спостережний дизайн оцінює асоціацію, а не причинний вплив. Навіть контрольоване вапнування змінює не лише pH, тому причинна інтерпретація потребуватиме належних контролів (Enesi et al., 2023; Zhang et al., 2023).

**Сенсорний моніторинг і контроль якості.** Польовий електрохімічний сенсор може збільшити часову частоту спостережень, однак сигнал залежить від контакту електрода з ґрунтом, вологості, температури, іонної сили, забруднення поверхні та дрейфу. Технічна працездатність сенсора не гарантує правильного визначення pH у конкретному субстраті (Eldeeb et al., 2023; Sakabe et al., 2024). Потрібне парне зіставлення показання з лабораторним pH-$H_2O$ проби, відібраної поруч на узгодженій глибині. Мета - перевірити можливість прогнозування

лабораторного pH-$H_2O$ за польовим сигналом, без припущення операційної тотожності цих вимірювань. Похибку прогнозу слід оцінювати також залежно від вологості, температури та властивостей ґрунту; здатність відстежувати часові зміни потребує окремої перевірки.

Калібрувальні й незалежні валідаційні пари не слід змішувати. Потрібно звітувати про систематичне зміщення, MAE, RMSE, діапазон, повторюваність і графік різниць; поріг похибки та кількість пар визначають до початку основного збору, за пілотними даними. У цій статті ці метрики не наведено, оскільки первинного сенсорного набору немає. Лише після валідації часовий ряд може виявляти події та спрямовувати додатковий відбір проб. Числові тригери мають походити з пілотної оцінки похибки, а не добиратися після перегляду всього ряду.

Канал передавання, наприклад, LoRaWAN, забезпечує доставку записів, але не підтверджує точність вимірювання. Попередня праця автора була присвячена можливостям LoRaWAN у точному землеробстві; у цій статті мережа згадується лише як допоміжний інструмент реєстрації й не є предметом повторного огляду (Rymar, 2025). Сенсорний цикл від події до лабораторної перевірки показано на рис. 2.).

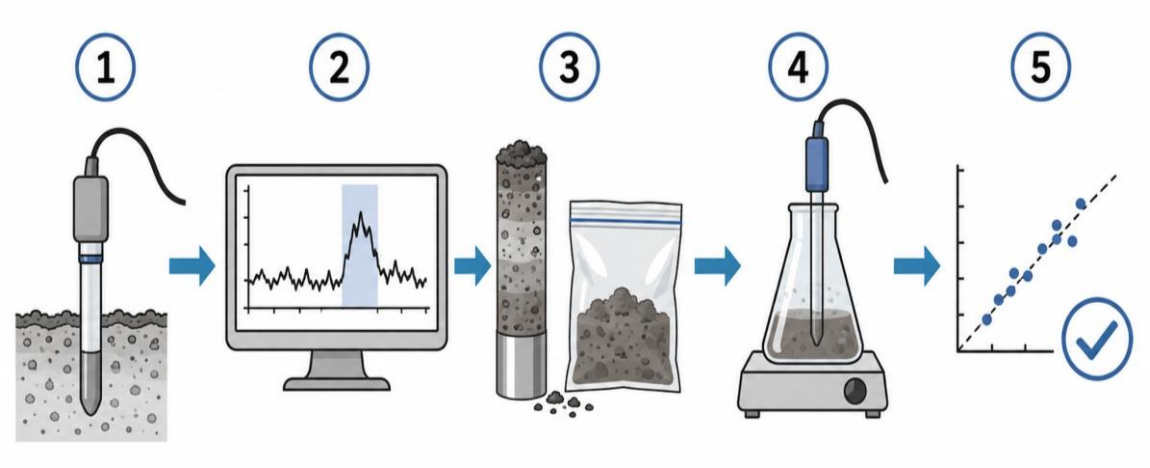



***Рис. 2. Послідовність використання цифрового моніторингу для цільового пробовідбору: 1 - реєстрація; 2 - виявлення події; 3 - відбір проби; 4 - лабораторне визначення; 5 - повторна валідація та поточний контроль якості. Первинну незалежну валідацію проводять до запуску цього циклу. Авторська схема***

***Fig. 2. Workflow for using digital monitoring to guide targeted sampling: 1 - recording; 2 - event detection; 3 - sample collection; 4 - laboratory measurement; 5 - repeated validation and ongoing quality control. Initial independent validation precedes this cycle. Author's illustration***

**Обговорення.** Запропонована методична рамка поєднує біологічно значущий градієнт кислотності з точним визначенням того, що саме вимірюється. Це принципово для регіональних порівнянь: змішування pH-$H_2O$, pH-KCl та польового сигналу може створити удавану зіставність; підміна потенційного тесту фактичною польовою швидкістю може завищити екологічний висновок. Тому першою науковою цінністю майбутньої роботи має стати відтворювана оцінка асоціації за чітко описаними протоколами, а не наперед дане твердження про «оптимальний» pH чи домінантну групу.

Регіональні обстеження обґрунтовують актуальність питання, але не дають змоги присвоїти конкретне значення pH кожному полю (Зайцев та ін., 2022; Гунчак та ін., 2025). Спершу слід підтвердити наявність достатнього локального градієнта кислотності. Якщо діапазон вузький, перевірка порогової відповіді буде недоцільною. Якщо доступні лише агрохімічні дані без молекулярних аналізів, висновки потрібно обмежити функціональним потенціалом проби. Розподіл внеску AOA, AOB і comammox не можна вивести з одного pH, $NO_3^-$ або qPCR без функціонального зіставлення.

Сенсорний блок має допоміжну, а не доказову роль у біологічному процесі. Його перевага - підвищення часової роздільної здатності й цільове планування проб; обмеження - залежність від матриці та необхідність зовнішньої валідації. Аналогічно, просторові дані й зони управління можуть допомагати розміщувати незалежні точки, проте схема відбору визначається дослідницьким питанням, масштабом поля та допустимою похибкою (Kazemi & Samavati, 2023; Kerry et al., 2024a, 2024b). Ця стаття не подає нових карт, сенсорних вимірювань або експериментальних результатів.

Основні обмеження - наративний, а не систематичний характер огляду; відсутність метааналітичної оцінки; відсутність первинних регіональних даних; неможливість встановити причинність або розподілити функціональний внесок мікробних груп без додаткових методів. Практична перевірка запропонованої рамки має починатися з пілотного дослідження та попередньої фіксації первинного показника, критеріїв включення, коваріатів, обробки пропусків і статистичної моделі. Такий крок зменшить ризик післяфактумного вибору порогів і підгруп.

**Висновки:**

1. Кислотність є важливим, але не самодостатнім предиктором потенційної нітрифікаційної активності. Її зв'язок із процесом потрібно оцінювати з урахуванням вологості, температури, аерації, $NH_4^+$, органічного вуглецю, текстури та історії удобрення.

2. pH-$H_2O$, pH-KCl і польовий сенсорний сигнал мають різний операційний зміст. У запропонованій рамці pH-$H_2O$ є лабораторною референцією для парної перевірки сенсора, а pH-KCl реєструють окремо.

3. Потенційна нітрифікаційна активність відображає функціональний потенціал проби за стандартизованих умов і не дорівнює швидкості in situ. $NO_3^-$ або копійність amoA самостійно не ідентифікує виконавців процесу.

4. Для Передкарпаття доцільні стратифіковане просторове обстеження, пілотна оцінка дисперсії та сезонні повтори. Кількість незалежних точок слід визначити розрахунком статистичної потужності, а не довільно.

5. Сенсорний часовий ряд може спрямовувати додатковий пробовідбір лише після незалежної валідації за лабораторним pH-$H_2O$. Запропонована стаття є методичною рамкою, а не звітом про первинні результати чи доказом причинного впливу кислотності.

**Фінансування.** Зовнішнє фінансування *дослідження відсутнє.*

***Конфлікт інтересів.*** *Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.*

**Список літератури / References:**


1. Cao, M., Li, Y., Zhang, Y., Yu, D., Uwiragiye, Y., Wang, J., Jing, H., Tang, Q., Qian, Y., Elrys, A. S., Cheng, Y., Cai, Z., Xu, M., & Müller, C. (2025). pH threshold in controlling dominant nitrification pathway in acidic soils. Agriculture, Ecosystems & Environment, 377, 109278. https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109278
2. Chen, C., Xiao, W., & Chen, H. Y. H. (2023). Mapping global soil acidification under N deposition. Global Change Biology, 29(16), 4652–4661. https://doi.org/10.1111/gcb.16813
3. Chisholm, C., Di, H., Cameron, K., Podolyan, A., Shen, J., Zhang, L., Sirisena, K., & Godsoe, W. (2024). Contrasting response of comammox Nitrospira, ammonia-oxidizing bacteria, and archaea to soil pH and nitrogen inputs. Science of the Total Environment, 924, 171627. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171627
4. Eldeeb, M. A., Dhamu, V. N., Paul, A., Muthukumar, S., & Prasad, S. (2023). Espial: Electrochemical soil pH sensor for in situ real-time monitoring. Micromachines, 14(12), 2188. https://doi.org/10.3390/mi14122188
5. Enesi, R. O., Dyck, M., Chang, S., Thilakarathna, M. S., Fan, X., Strelkov, S., & Gorim, L. Y. (2023). Liming remediates soil acidity and improves crop yield and profitability: A meta-analysis. Frontiers in Agronomy, 5, 1194896. https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1194896
6. Hunchak, M. V., Palamarchuk, R. P., & Pasichniak, V. I. (2025). Stan rodiuchosti gruntiv peredhirskoi zony Chernivetskoi obl. [Soil fertility state of the foothill zone in Chernivtsi region]. Ahroekolohichnyi zhurnal, 2, 100–108. https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2025.333829 [in Ukrainian].
7. International Organization for Standardization. (2012). ISO 15685:2012 Soil quality. Determination of potential nitrification and inhibition of nitrification. Rapid test by ammonium oxidation. https://www.iso.org/standard/53530.html
8. International Organization for Standardization. (2021). ISO 10390:2021 Soil, treated biowaste and sludge. Determination of pH. https://www.iso.org/standard/75243.html
9. Kazemi, M., & Samavati, F. F. (2023). Automatic soil sampling site selection in management zones using a multi-objective optimization algorithm. Agriculture, 13(10), 1993. https://doi.org/10.3390/agriculture13101993
10. Kerry, R., Ingram, B., Oliver, M., & Frogbrook, Z. (2024a). Soil sampling and sensed ancillary data requirements for soil mapping in precision agriculture I: Delineation of management zones to determine zone averages of soil properties. Precision Agriculture, 25(3), 1181–1211. https://doi.org/10.1007/s11119-023-10107-8
11. Kerry, R., Ingram, B., Oliver, M., & Frogbrook, Z. (2024b). Soil sampling and sensed ancillary data requirements for soil mapping in precision agriculture II: Contour mapping of soil properties with sensed z-score data for comparison with management zone averages. Precision Agriculture, 25(3), 1212–1234. https://doi.org/10.1007/s11119-023-10108-7
12. Ni, G., Leung, P. M., Daebeler, A., Guo, J., Hu, S., Cook, P., Nicol, G. W., Daims, H., & Greening, C. (2023). Nitrification in acidic and alkaline environments. Essays in Biochemistry, 67(4), 753–768. https://doi.org/10.1042/EBC20220194
13. Rymar, B. I. (2025). Prospects of application of LoRaWAN technology in precision agriculture tasks in the Carpathian region. Biolohichni systemy, 17(1),

171–178. https://doi.org/10.31861/biosystems2025.01.171
14. Sakabe, K., Kan, T., & Onoe, H. (2024). Entirely biodegradable wireless pH sensor with split-ring resonators for soil pH monitoring. Advanced Materials Technologies, 9(13), 2400038. https://doi.org/10.1002/admt.202400038
15. Takamoto, A., Takahashi, T., & Togami, K. (2023). Estimation models from soil pH with a solid-to-liquid ratio of 1:2.5 to pH measured by other methods using soils in Japan. Soil Science and Plant Nutrition, 69(3), 190–198. https://doi.org/10.1080/00380768.2023.2190749
16. Tan, C., Yin, C., Zhang, L., Zeng, Y., Gubry-Rangin, C., Chen, H., Gao, Z., Peng, H., Li, T., & Liang, Y. (2024). Deciphering the functional importance of comammox vs. canonical ammonia oxidizers in nitrification and $N_2O$ emissions in acidic agricultural soils. Soil Biology and Biochemistry, 193, 109415. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109415
17. Xie, J., Jiang, J., Lu, J., Dai, W., Guo, H., Chen, Y., Huang, R., Wang, Z., & Gao, M. (2025). Comammox and ammonia-oxidizing archaea dominated the nitrification under different nitrogen fertilizer levels in acid purple soil of Southwest China. Applied Soil Ecology, 207, 105941. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.105941
18. Zaitsev, Yu. O., Hunchak, M. V., & Romanova, S. A. (2022). Stan rodiuchosti gruntiv Chernivetskoi obl. [State of soil fertility in Chernivtsi region]. Ahroekolohichnyi zhurnal, 4, 66–75. https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2022.273250 [in Ukrainian].
19. Zamanian, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Tao, J., Fan, L., Raza, S., Guggenberger, G., & Kuzyakov, Y. (2024). Acidification of European croplands by nitrogen fertilization: Consequences for carbonate losses, and soil health. Science of the Total Environment, 924, 171631. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171631
20. Zhang, S., Zhu, Q., de Vries, W., Ros, G. H., Chen, X., Muneer, M. A., Zhang, F., & Wu, L. (2023). Effects of soil amendments on soil acidity and crop yields in acidic soils: A world-wide meta-analysis. Journal of Environmental Management, 345, 118531. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118531
21. Zhong, Y., Yan, W., Canisares, L. P., Wang, S., & Brodie, E. L. (2023). Alterations in soil pH emerge as a key driver of the impact of global change on soil microbial nitrogen cycling: Evidence from a global meta-analysis. Global Ecology and Biogeography, 32(1), 145–165. https://doi.org/10.1111/geb.13616

# SOIL ACIDITY AND POTENTIAL NITRIFICATION ACTIVITY IN PRECARPATHIAN AGROECOSYSTEMS: A METHODOLOGICAL APPROACH

**B. I. Rymar, R. I. Bespalko**

*Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,*
*Kotsiubynsky 2 Str., Chernivtsi 58012, Ukraine*
*rymar.bohdan@chnu.edu.ua*

*This paper synthesizes current evidence on the relationship between soil acidity and potential nitrification activity and proposes a methodological framework for planning field and laboratory studies of this relationship in Precarpathian agroecosystems. It is a narrative review and methodological synthesis of peer-reviewed studies published in 2021–2025, regional soil-fertility assessments, and standards for soil pH and potential nitrification measurements. The review includes 21 sources; effects were not quantitatively pooled. The operational meanings of pH-$H_2O$, pH-KCl, and a field electrochemical signal are distinguished. Because measured pH depends on the extractant and procedure, pH-$H_2O$ and pH-KCl are not interchangeable. A field sensor is not a laboratory measurement and requires independent validation using paired soil samples. The response of nitrifying communities to acidity is shaped jointly by ammonium availability, moisture, temperature, aeration, organic carbon, soil texture, and fertilization practices. Comparison of four primary studies showed that reported roles of AOA, AOB, and comammox Nitrospira depend on soil, nitrogen regime, and endpoint (abundance, functional contribution, or rate); they cannot be transferred to a new region based on similar pH or amoA copy number alone. Potential nitrification activity is therefore interpreted as the functional potential of a sample under standardized incubation conditions, not as a measured in situ process rate. For a future regional study, the paper outlines stratified spatial sampling, pilot estimation of variance, seasonal resampling, and event-based sampling defined in advance. The minimum measurement set includes laboratory pH ($H_2O$ and KCl), potential nitrification, $NH_4^+$ and $NO_3^-$, soil moisture, and temperature. Where resources permit, it should be complemented by organic carbon, texture, and molecular markers. Without carbon and texture data, adjusted estimates cannot account for their potential influence. A sensor time series may help schedule additional sampling only after its measurement error has been evaluated and*

*calibration observations have been separated from independent validation data. The proposed framework contains no original experimental results and does not establish a causal effect of acidity. Its purpose is to support valid comparisons among sites, transparent adjustment for covariates, and subsequent local hypothesis testing of soil acidity and potential nitrification in the Precarpathian region.*

*Keywords: ammonia-oxidizing archaea, ammonia-oxidizing bacteria, comammox Nitrospira, pH-$H_2O$, pH-KCl, potential nitrification*

*Отримано редколегією 02.09.2026 р.*
*Підписано до друку 15.10.2026 р.*
*Дата публікації 31.10.2026 р.*

**ORCID ID**
Богдан Римар: https://orcid.org/0009-0007-2925-4812