

УДК 631.84:504

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.20>

АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ КАПСУЛЬОВАНИХ АЗОТНИХ ДОБРІВ

Нагурський О.А., Брановський М.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів

Oleg.A. Nahursky@lpnu.ua

У статті здійснено комплексний аналіз екологічної та агрономічної ефективності капсульованих азотних добрив із контрольованим вивільненням у порівнянні з традиційними гранульованими формами. На основі узагальнення результатів численних вітчизняних і зарубіжних досліджень обґрунтовано переваги використання капсульованих добрив у системах живлення польових культур, особливо для умов Західної України. Встановлено, що контрольоване вивільнення азоту забезпечує рівномірне надходження поживних речовин упродовж вегетаційного періоду, підвищує коефіцієнт використання азоту рослинами в середньому у 1,5–2,5 рази та зменшує ризики перенасичення ґрунтового розчину, що характерне для швидко розчинних гранульованих форм. Показано, що застосування капсульованих добрив сприяє скороченню втрат азоту через вимивання нітратів на 40–50%, зниженню пікових викидів парникового газу N_2O на 38–55% і зменшенню деградаційних процесів у ґрунті, зокрема втрат гумусу та кислотності. Доведено, що поступове надходження азоту з полімерних капсул забезпечує більш стабільний розвиток рослин, покращення структури врожаю та підвищення продуктивності культур на 15–60%. Ураховуючи низький вміст доступного азоту в дерново-підзолистих і лісових ґрунтах регіону, впровадження технологій контрольованого вивільнення азоту є одним із найефективніших інструментів для зниження екологічного навантаження, оптимізації живлення культур і підвищення родючості ґрунтів. Незважаючи на вищу вартість таких препаратів, економічний ефект їх використання проявляється у зростанні врожайності, зменшенні кількості внесень і скороченні витрат на додаткові підживлення. Отримані результати свідчать, що капсульовані азотні добрива забезпечують одночасне досягнення трьох стратегічних цілей сучасного землеробства – підвищення ефективності виробництва, мінімізацію екологічних ризиків і збереження родючості ґрунтів. Застосування таких добрив може стати важливим елементом адаптації аграрного сектору Західної України до кліматичних викликів та умов сталого розвитку, поєднуючи економічну доцільність з екологічною безпекою. *Ключові слова:* капсульовані добрива, контрольоване вивільнення, азот, ефективність використання, нітратне вимивання, парникові викиди, екологічна безпека.

Analysis of the ecological efficiency of encapsulated nitrogen fertilizers. Nahurskyi O., Branovskyi M.

The article presents a comprehensive analysis of the ecological and agronomic efficiency of encapsulated nitrogen fertilizers with controlled release compared to traditional granular forms. Based on the synthesis of numerous domestic and international research findings, the advantages of using encapsulated fertilizers in crop nutrition systems are substantiated, particularly under the conditions of Western Ukraine. It has been established that controlled nitrogen release ensures a uniform supply of nutrients throughout the growing season, increases the nitrogen use efficiency by crops by an average of 1.5–2.5 times, and reduces the risk of soil solution oversaturation, which is typical for fast-dissolving granular forms. The study shows that the use of encapsulated fertilizers helps reduce nitrogen losses through nitrate leaching by 40–50%, decreases peak emissions of the greenhouse gas N_2O by 38–55%, and mitigates soil degradation processes, including humus loss and acidification. It is proven that the gradual release of nitrogen from polymer capsules provides more stable plant growth, improves crop structure, and increases productivity by 15–60%. Considering the low availability of nitrogen in sod-podzolic and forest soils of the region, the implementation of controlled-release nitrogen technologies is one of the most effective tools for reducing environmental impact, optimizing crop nutrition, and enhancing soil fertility. Despite the higher cost of such formulations, their economic benefits are manifested in increased yields, fewer applications, and lower costs for additional fertilization. The results indicate that encapsulated nitrogen fertilizers enable the simultaneous achievement of three strategic goals of modern agriculture—enhancing production efficiency, minimizing environmental risks, and preserving soil fertility. The application of such fertilizers can become an essential element in adapting the agricultural sector of Western Ukraine to climate challenges and sustainable development conditions, combining economic feasibility with environmental safety. *Key words:* encapsulated fertilizers, controlled release, nitrogen, use efficiency, nitrate leaching, greenhouse emissions, environmental safety.

Постановка проблеми. Урожайність польових культур значною мірою залежить від доступності азоту ґрунтового розчину. Проте традиційне застосування азотних добрив часто нерациональне: за різними оцінками, до 50–60% внесеного азоту не засвоюється рослинами і втрачається в ґрунт-гідросферу чи атмосферу [1, 2]. Це спричиняє деградацію ґрунтів і забруднення водних ресурсів [3]. Одним із шляхів підвищення ефективності азотного живлення є використання добрив із контр-

ольованим (повільним) вивільненням, зокрема гранул у полімерній оболонці [4, 5]. Капсульовані (полімерно-інкапсульовані) азотні добрива забезпечують контрольоване, поступове вивільнення N, що призводить до підвищення коефіцієнта використання добрива, зниження пікових концентрацій нітратів у ґрунтовому розчині, скорочення вимивання NO_3^- і зменшення ранніх пікових емісій N_2O . У результаті застосування таких добрив можливе одночасне підвищення врожайності за ниж-

чих екологічних ризиків і покращення економічної ефективності агровиробництва.

Урахування специфіки ґрунтів і клімату Західної України (поширені дерново-підзолисті та лісові ґрунти з відносно низьким вмістом рухомого азоту та підвищеною вразливістю до вимивання) робить необхідним регіональне оцінювання екологічної та агроекономічної ефективності капсульованих N-добрив. Практичне обґрунтування переваг або обмежень їхнього застосування дозволить зменшити ризики забруднення ґрунтових і поверхневих вод, скоротити парникові викиди та підвищити стійкість агроєкосистем до змін клімату й гідрології, що має як наукове, так і прикладне значення для політики сталого використання добрив [6, 7].

Отже, дослідження, спрямоване на порівняльний аналіз капсульованих і традиційних гранульованих N-добрив за показниками доступності азоту для рослин, втрат азоту (вимивання, випаровування, N_2O -емісії), залишкового N у ґрунті та економічної ефективності, є актуальним і обґрунтованим для вирішення міждисциплінарних задач агрономії, ґрунтознавства й екологічного управління ресурсами.

Матеріали і методи. Проведено систематичний огляд опублікованих досліджень, присвячених впливу капсульованих (контрольованого вивільнення) азотних добрив у порівнянні з традиційними формами N-добрив. Пошук літератури здійснювався в провідних міжнародних базах (Web of Science, Scopus, PubMed) та в національних репозиторіях із використанням релевантних ключових слів англійською й українською (наприклад: «controlled-release fertilizer», «капсульовані добрива», «nitrate leaching», « N_2O emissions», «nitrogen use efficiency»). Відбір публікацій проводили у два етапи – первинний скринінг за назвами та анотаціями і подальший перегляд повних текстів; оцінювання здійснювали двоє незалежних рецензентів, у разі розбіжностей остаточне рішення приймав третій рецензент. До аналізу включалися емпіричні роботи (польові, лізіметричні та лабораторні експерименти), які містили дані про вимивання нітратів, кумулятивні викиди N_2O , рівень поглинання азоту рослинами, урожайність або економічні показники. З кожного джерела систематично вилучали основні метадані та результати (автори, рік, тип досліджуваного об'єкта, тип і норма добрива, ключові результати та їх похибки). Якість включених досліджень оцінювали за адаптованими критеріями для агрономічних експериментів.

Результати. Капсульовані добрива забезпечують рівномірніше й триваліше надходження N до кореневої зони [8, 9]. Так, експерименти показали, що рослини, підживлені капсульованими добривами, виростають кращими та рівномірнішими, ніж при звичайному гранульованому підживленні [10, 11]. Це пояснюється тим, що звичайні гранульовані добрива швидко розчиняються після внесення і створюють

пікове перенасичення ґрунту азотом на початку вегетації, а потім нестачу пізніше, тоді як у капсулах поживні речовини надходять до ґрунтового розчину поступово [12].

За польовими даними, капсульовані N-добрива суттєво підвищують коефіцієнт використання добрива (відношення врожаю до внесеної діючої речовини). Для картоплі, наприклад, K_{ef} (т урожаю на т діючої речовини) становив $\approx 33,4$ для звичайного гранульованого добрива, тоді як для капсульованих сумішей – від $\approx 50,2$ до $\approx 84,5$ (на 1,5–2,6 рази більше) [13, 14]. Відповідно приріст урожаю (порівняно з контролем без добрив) зростав з $\approx 13,6$ т/га у варіанті з гранульованим добривом до $\approx 17,7$ – $31,0$ т/га за капсульованими (особливо помітний варіант із мультикомпонентною полімерною оболонкою – $+31,0$ т/га) [15, 16]. Тобто при меншій кількості внесеного азоту окупність і врожайність значно вищі.

За даними вітчизняних досліджень, ґрунтовий покрив України загалом характеризується дефіцитом азоту на всіх орних землях [25]. Це підтверджується результатами агрохімічних обстежень: близько 90% українських ґрунтів мають низький або дуже низький вміст доступного азоту, а середнє значення легкогідролізованого азоту становить лише ≈ 111 мг/кг [24, 25]. Особливо це стосується полісних і лісостепових ґрунтів західного регіону (дерново-підзолистих, темно- і світло-сірих лісових, бурих). Вміст гумусу в таких ґрунтах (а він є основним резервом азоту) звичайно складає лише ~ 1 – 4% , що відповідає приблизно 15–60 т/га гумусу [21, 22]. Відповідно, валовий запас азоту у верхньому шарі зростає разом із гумусом – від $\sim 1\%$ (для малогумусних дерново-підзолистих) до 15–20 т/га (для багатогумусних буроземів Карпатського передгір'я) [22].

У дерново-підзолистих ґрунтах (поширених у Поліссі та Карпатах) частка рухомого азоту (нітратного та аміачного) може сягати 40–50% від загального його запасу, тоді як у чорноземах – лише 20–40% [23]. Проте абсолютні запаси рухомих форм азоту у ґрунтах Західної України залишаються низькими. Це узгоджується з даними 11-го туру агрохімічного обстеження: вміст легкогідролізованого азоту у ґрунтах Львівської та Рівненської областей протягом 2016–2020 рр. зменшувався до рівнів, нижчих за середньоукраїнські [24]. Загалом залишковий азот формується в ґрунті внаслідок мінералізації органічної речовини та внесення добрив, але суттєву роль відіграє також попередник культури і умови вирощування.

Водночас надлишок нітратів у ґрунті часто втрачається через вимивання. Зокрема, при інтенсивному зябловому обробітку органічної речовини одним із кінцевих продуктів мінералізації є нітрати, але за високої вологості або після опадів надлишок нітратів «витікає» з поля, не приносячи користі рослинам [23]. На осушених дерново-підзолистих землях (типових для Полісся) нітратна форма азоту майже

Таблиця 1

Порівняння основних показників капсульованих і традиційних гранульованих добрив

Показник	Гранульовані добрива	Капсульовані добрива
Швидкість вивільнення N	~2/3 дози вивільняється за 3 дні [1, 2]	~2/3 дози вивільняється за ~22 дні [3, 4]
Розвиток рослин	Менший (пікове перенасичення) [10, 11]	Кращий (рівномірне живлення) [12, 13]
Урожайність картоплі (приріст)	+13.6 т/га [15]	+17.7–31.0 т/га [15, 16]
K_{ef} (т урожаю/т N) картоплі	~33.4 [14]	~50.2–84.5 [14]
Відсоток втрат азоту	Вищий (значний стік у глиб) [12]	Нижчий (~47% втрат) [17]
Накопичення N у ґрунті	Низьке (швидке вимивання) [18]	Вище (повільний перехід, краще утримання) [19]
N_2O -емісії (пікові)	Високі (до 1140 $\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{год}$) [16]	Значно нижчі (–38–55% від піку) [17]
Нітратне вимивання	Більше [18]	Менше (~41–54% менше NO_3^-) [17]
Кількість внесень	Багаторазове [13]	Зазвичай одноразове [13]
Вартість препарату	Доступніша [20]	Вища (але із економією ресурсів) [20]

не затримується: тому восени вносити нітратні добрива не рекомендується, адже вони не засвоюються рослинами і вимиваються в дренажні води [23]. Таким чином, залишковий азот у цих ґрунтах активно залучається лише за сприятливих умов (відсутність вимивання), а його надлишок може швидко бути втрачений.

Залишковий азот – це та частина внесених добрив, яка не була поглинута рослинами. Він накопичується, якщо норма добрив перевищує потребу рослин і показник NUE (ефективність використання азоту) низький. При надлишкових нормах азоту «можуть утворюватись значні запаси залишкового азоту» [26]. Кількість цього залишку залежить і від ґрунту, і від погодних умов: в умовах помірного клімату надлишковий азот або втрачається, або накопичується, залежно від властивостей ґрунту. Важливо також урахувати потенціал N_{min} ґрунту (запаси мінералізованого азоту), адже «його обсяг залежить від виду ґрунту, і різні ґрунти потребують різного об'єму так званого залишкового азоту» [27]. Наприклад, на легких підзолистих ґрунтах велика частина внесеного азоту може залишатись у верхніх шарах та бути вразливою до вилуговування.

Гранульовані мінеральні добрива (аміачна селітра, сірчаноокислий амоній, карбамід тощо) швидко розчиняються у ґрунтовій воді і переводяться в нітратну форму. Якщо перед внесенням або навесні рослинність поглинає азот мало (низька біомаса), залишок нітратів накопичується. Наприклад, дослідники відзначають, що при інтенсивному застосуванні азотних добрив у меліорованих угіддях Полісся відбувається «накопичення нітратів у верхніх шарах ґрунту», особливо під час періодів інтенсивного внесення добрив [28].

Накопичення залишкового азоту змінює агрохімічний склад ґрунту. Надлишок нітратів активі-

зує мінералізацію органічної речовини, що веде до втрати гумусу (за даними, 1 кг азоту добрив може стимулювати мінералізацію 1–20 кг гумусу). Крім того, амонійні добрива «призводять до декальцизації, дегуміфікації та деструктуризації» ґрунту. У результаті в ґрунті зменшується вміст обмінного кальцію і магнію, підвищується кислотність і погіршуються фізичні та мікробіологічні властивості. Особливо чутливі до цього легкі, малобуферні дерново-підзолисті та сірі лісові ґрунти Західної України. Накопичений нітратний азот частково може бути використаний посівами наступного року. Так, у дослідях встановлено, що після внесення значних норм азоту озима пшениця наступного року «ефективно утилізує залишковий азот в ґрунті і знижує його втрати від вилуговування». Тобто культурозміни можуть дещо компенсувати залишкові запаси N . Проте інші культури (кукурудза, буряк, соя тощо) зазвичай мають високу потребу в новому азоті і не повністю використовують залишки, що призводить до їх вимивання. Отже, агрохімічно надлишковий азот можна розглядати й як марнотратне використання добрив: оптимальне удобрення потребує точного урахування залишкових запасів, оскільки неврахований залишок означає непотрібні витрати і можливе зниження ефективності наступних підживлень [29].

Через швидке розчинення звичайні гранульовані добрива дають значний первинний стік азоту з ґрунту [12, 18]. Експерименти показують, що приблизно 2/3 внесеного гранульованого азоту вимиваються з ґрунту вже протягом перших 3 діб після внесення [1, 2]. Натомість у капсульованих добривах азот поступово переходить у ґрунтовий розчин і лише за ~22 доби досягає подібної величини вивільнення [3, 4].

Дослідження свідчать, що капсульовані добрива зменшують сумарні втрати азоту з агросистеми:

наприклад, втрати нітратів і амонію скорочувалися на ~47,4% (≈ 106 кг/га за посівами картоплі) [17]. Це свідчить про вищий вміст залишкового N у ґрунті після внесення капсул, ніж при традиційній технології [18]. Навіть за умов рясних опадів капсульовані добрива показували менший стік азоту: за 20-денний дослід на гребеневому ґрунті сумарний винос нітратного азоту знизився на 41–54% у порівнянні з добривами без оболонки [17, 19]. Таким чином, у короткостроковій перспективі після внесення капсул у ґрунті накопичується більше доступного азоту, що також поліпшує довгострокову родючість [11].

Капсульовані добрива значно знижують екологічні ризики, пов'язані з застосуванням азоту [16, 17]. Плавне вивільнення азоту зменшує пікові концентрації у ґрунтовому розчині і, як наслідок, ризики перенасичення ґрунту та анаеробних умов [16, 17]. При цьому емісії парникового N_2O від капсульованих добрив у короткостроковій перспективі суттєво менші: у моделювальних дослідах максимальні потоки N_2O у перші дні після внесення були в капсульованих сумішах на 38–55% нижчими, ніж після внесення звичайної сечовини [16, 17]. Хоча кумулятивна різниця N_2O за 20 діб була статистично незначущою, загальний профіль викидів зміщувався в часі (максимум спостерігався пізніше при капсулах) [17].

Також вимивання нітратів у ґрунтові води зменшується: полімерні капсульовані азотні добрива знизили сумарний стік NO_3^- на 41–54% порівняно зі звичайним кабамідом [17, 19]. У поєднанні з вологим кліматом Західної України це означає менший ризик забруднення ґрунтових вод нітратами та подальшої евтрофікації водойм [16, 17, 19].

Капсульовані азотні добрива мають суттєві переваги в економічному плані, хоча початкові витрати на придбання препаратів вищі (на 25–40%) [20]. Однак завдяки підвищенню врожайності і зниженню втрат азоту загальна ефективність використання N-добрив зростає, що робить їх рентабельними у середньостроковій перспективі [8, 9, 20]. Наприклад, у досліді із зерновими культурами підвищення урожайності становило 8–15% при одноразовому внесенні капсульованого добрива порівняно з кількома внесеннями традиційної мочевины [20]. Крім того, застосування капсул спрощує технологічний процес внесення, зменшуючи потребу у багатократних підживленнях [13]. З огляду на екологічні вигоди (менше N_2O , менше стоку нітратів), можна оцінити загальну економічну ефективність капсульованих добрив як вищу за традиційні [16, 17, 20].

Обговорення. Капсульовані азотні добрива забезпечують більш рівномірне та протяжне вивільнення доступного азоту порівняно з традиційними гранульованими формами, що супроводжується підвищенням коефіцієнта використання добрива та збільшенням врожайності в ряді дослідів [8–16]. Динаміка вивільнення N визначає основні агроно-

мічні та екологічні ефекти: пом'якшення тимчасових коливань доступності азоту в ризосфері дозволяє рослинам ефективніше використовувати внесений елемент у періоди інтенсивного росту, зменшуючи одночасно умови, сприятливі для інтенсивного вилугування і пікових газових емісій. Це пояснює як підвищення K_{ef} , так і зниження пікових потоків N_2O і вимивання NO_3^- у короткострокових експериментах [12, 16–19].

Екологічні наслідки полягають насамперед у зниженні гострих піків концентрацій нітратів у ґрунтовому розчині та, відповідно, зменшенні ризику їхнього переносу у водні системи, що має практичне значення для охорони якості водних ресурсів у регіонах із високим ризиком вимивання. Одночасно спостережуване зменшення максимальних потоків N_2O у ранній період після внесення може знизити миттєвий парниковий внесок сільськогосподарських операцій; проте доступні дані свідчать, що для оцінки кумулятивних сезонних викидів потрібні довші та ширші спостереження, оскільки сумарні показники іноді не відрізняються істотно між формами добрив [16].

З практичної точки зору застосування капсульованих добрив виправдане в системах, де важлива стабільність постачання азоту і де ризик вимивання є високим (легкі ґрунти, регіони з частими інтенсивними опадами), а також у господарствах, що прагнуть зменшити кількість міжрядних підживлень. Водночас економічна доцільність визначається місцевими умовами – цінами на добрива та продукцію, логістикою, наявністю субсидій і агротехнічними практиками – і тому потребує адаптованого аналізу для кожної агроєкосистеми [8, 13, 20]. Для Західної України, де широка частина орних земель має низький вміст доступного азоту і помірний вміст гумусу, капсульовані технології можуть сприяти зниженню деградаційних процесів у ґрунті та поліпшенню якості води, якщо їх застосовування буде інтегроване з іншими заходами підвищення органічної речовини та збереження структури ґрунту [21–29].

Слід також відзначити наукові та технічні обмеження: більшість досліджень мають короткостроковий характер і охоплюють одну кілька вегетацій, тому питання довготривалих наслідків (зокрема накопичення полімерних оболонок, вплив на фізико-хімічні властивості ґрунту і мікробіоту) лишається відкритим. Варіабельність реакцій різних культур на профілі вивільнення азоту ускладнює універсальні рекомендації без попередньої адаптації під конкретні культури й умови. Подальші дослідження мають бути спрямовані на багаторічні багатолокаційні випробування, оптимізацію конструкції капсул і матеріалів оболонки, комплексні оцінки життєвого циклу (LCA) та економічні моделі собівартості в різних сценаріях ринку, щоб повніше оцінити довгострокові агрономічні та екологічні ефекти.

Висновки. Капсульовані азотні добрива є технологічно й екологічно обґрунтованою альтернативою традиційним гранульованим формам, оскільки забезпечують більш ефективне використання азоту, сприяють підвищенню врожайності та водночас зменшують негативний вплив на довкілля. Проведений аналіз засвідчив, що уповільнене вивільнення поживних речовин із полімерної оболонки запобігає швидкому накопиченню нітратів у ґрунті, скорочує втрати азоту через вимивання і випаровування, знижує викиди N_2O та стабілізує баланс поживних елементів у агроєкосистемі. Для легких і середньосуглинкових ґрунтів Західної України така технологія дозволяє мінімізувати

дегуміфікацію, покращити структуру ґрунту й водний режим, зменшити ризики забруднення підземних і поверхневих вод. Економічна ефективність використання капсульованих добрив полягає не лише у збільшенні врожайності, а й у зниженні витрат на повторні внесення, що робить їх конкурентоспроможними у довгостроковій перспективі. Таким чином, впровадження добрив із контрольованим вивільненням азоту є перспективним напрямом екологізації землеробства, який поєднує підвищення продуктивності з охороною природних ресурсів і сприяє формуванню стійких агроландшафтів, здатних адаптуватися до сучасних екологічних і економічних викликів.

Література

1. Bernal M. P., Fenoll J. Controlled-release nitrogen fertilizers and their impact on nitrate leaching in temperate soils. *Agricultural Water Management*. 2021. Vol. 247. P. 106734. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106734.
2. Blaylock A. D., Tindall T. A. Controlled-release fertilizers: Principles and practices for nitrogen management. *Agronomy Journal*. 2020. Vol. 112, No 5. P. 3987–3996. DOI: 10.1002/agj2.20356.
3. Chen J., Liu X., Wang H., Li X., Zhang Y. Mitigation of nitrous oxide emissions from farmland by polymer-coated urea: A meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 356. P. 131870. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131870.
4. European Commission. Best Available Techniques (BAT) for the Production of Fertilizers. Joint Research Centre, 2022. URL: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu>.
5. FAO. Sustainable soil fertility management and nitrogen efficiency. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021.
6. Głodowska M., Wesołowski M., Szewczuk C. Efficiency of polymer-coated urea under different soil moisture regimes in Central Europe. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2020. Vol. 29(5). P. 3391–3400. DOI: 10.15244/pjoes/118322.
7. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2022: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO, 2022.
8. Marenych, M., Koba, K., Hanhur, V., Semenov, A., Len, O., Yermenko, L., ... & Yeleussinov, B. (2024). Effect of Fertigation with Urea-Ammonium Nitrate on the Seed Yield of Maize Maternal Lines. *Agriculture*, 70(4), 218-229.
9. Li Y., Zhao B., Xu J. Comparison of conventional and controlled-release urea fertilizers on nitrogen losses and crop yields: A field study. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. P. 18892–18903. DOI: 10.1007/s11356-023-24940-1.
10. Міністерство аграрної політики та продовольства України. Методичні рекомендації з ефективного використання азотних добрив у сільському господарстві України. Київ: Мінагрополітики України, 2021.
11. Тимчук, І. С. (2016). АГРОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА КАПСУЛЬОВАНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ В УМОВАХ ЗАХОДУ УКРАЇНИ (Doctoral dissertation, Національний університет «Львівська політехніка»).
12. Novikov V., Hlushko O. Nitrate leaching and nitrous oxide emissions under different nitrogen fertilizer regimes in Ukrainian Chernozem soils. *Eurasian Soil Science*. 2020. Vol. 53(8). P. 1102–1113. DOI: 10.1134/S1064229320080071.
13. Pan B., Lam S. K., Mosier A. R., Luo Y., Chen D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers in China: A meta-analysis and modeling approach. *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 266. P. 115368. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115368.
14. Синельников, С. Д. (2021). Екологічна безпечна утилізація відходів поліетилентерефталату використанням їх для капсулювання мінеральних добрив (Doctoral dissertation, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України).
15. Singh B., Craswell E. Slow-release and controlled-release fertilizers to improve nitrogen use efficiency and reduce losses. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2021. Vol. 121(3). P. 209–226. DOI: 10.1007/s10705-021-10145-5.
16. Włodarczyk T., Cieślak W. Controlled-release nitrogen fertilizers as a tool to mitigate nitrate pollution in European agriculture. *Environmental Research*. 2020. Vol. 191. P. 110048. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110048.
17. Yin S., Chen Q., Guo Z. Environmental impacts and nitrogen fate of polymer-coated urea in agricultural soils: A global review. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 920. P. 171035. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171035.
18. Zhao Y., Liu Q., Wang X. Evaluation of polymer-coated urea fertilizers under different rainfall regimes. *Agricultural Sciences*. 2020. Vol. 11(8). P. 863–873. DOI: 10.4236/as.2020.118054.
19. Баранов, В. І., & Гавриляк, М. Я. Вплив капсульованої нітроамофоски на вміст пігментів фотосинтезу, цукрів, нітратів та важких металів у рослинах ранньої цибулі. II-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю, 2009. Секція 5 Хімія довкілля та екотоксикологія. проблеми змін клімату та біосфери. контроль за атмосферними викидами у світлі кіотського протоколу, С. 355-357.
20. Zhou W., Liang G., Zhang F. Nitrogen release dynamics and soil residual nitrogen after application of coated urea. *Journal of Soils and Sediments*. 2023. Vol. 23(5). P. 1742–1754. DOI: 10.1007/s11368-023-03245-8.
21. Дмитрієвцева Н. В. Динаміка зміни вмісту гумусу основних типів ґрунтів Рівненської області. *Зернові культури*. 2024. Т. 8, № 1. С. 180–186. DOI: 10.31867/2523-4544/0327.

22. Томашівський З. М., Конік Г. К. Наукові основи системи землеробства в західному регіоні України. Львів: СПОЛОМ, 2020. 286 с.
23. Національний науковий центр «Інститут землеробства НААН». Сучасні системи удобрення в землеробстві України: науково-методичні рекомендації. Чабани: ННЦ Інститут землеробства НААН, 2020. 85 с.
24. Романова С. Якість ґрунтів України та їх придатність для сільгоспвиробництва – результати агрохімічного обстеження. SuperAgronom.com. 20.12.2023. URL: <https://superagronom.com/articles/699-yakist-gruntiv-ukrayini-ta-yih-pridatnist-dlya-silgospvirobnitstva--rezultati-agrohimichnogo-obstejennya>.
25. Національна доповідь про стан родючості ґрунтів України. Київ: МінАПК, 2010. Держ. технолог. центр охорони родючості ґрунтів, НААН. URL: http://www.iogu.gov.ua/literature/periodically/1_2010.pdf.
26. Eriksson J., Magnusson M. Optimized winter wheat production in Kiev region of Ukraine – A case study on cultivation properties and management focusing on sowing date and nitrogen fertilization. Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Department of Soil and Environment. 2015. 87 p.
27. Ярошко М. Перетворення азоту у ґрунті і його значення для росту рослин. Агроном. 2013.
28. Сташук М. О. Моделювання зон, уразливих до накопичення нітратів у ґрунтових екосистемах Полісся під впливом меліоративних систем і сільськогосподарської діяльності. Охорона ґрунтів. 2024. С. 22.
29. Багнюк Д. О., Сербенюк А. А. Екологічне значення вирощування пшениці озимої в сівозміні. Збірник матеріалів доповідей міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. НУБіП України, 2023. С. 8. URL: <https://superagronom.com/blog/894-vpliv-mineralnih-dobriv-na-vlastivosti-gruntu-ta-gvk>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025