

3. Квітко Г. П., Поліщук І. С., Мазур В. А., Протопіш І. Г., Корнійчук О. В., Гетман Н. Я., Демидась Г. І. Багаторічні трави як фактор стабільного розвитку землеробства України. Землеробство. 2013. Вип. 85. С. 63-71.

4. Собко М.Г, Собко Н.А., Собко О.М. Роль багаторічних бобових трав у підвищенні родючості ґрунту. Корми і кормовиробництво. 2012. Вип. 74. С. 53-57.

5. Ткачук О.П. Вплив бобових багаторічних трав на агроекологічний стан ґрунту. Збалансоване природокористування. 2017. №1. С. 127-130.

УДК 631.84, 87(621.3.035.221.727)

ТІОФОСФОРНИЙ ТРИАМІД ТА НІТРАПРИН, ЯК ПЕРСПЕКТИВНІ СТАБІЛІЗАТОРИ АЗОТУ В ҐРУНТІ

Піцик Ю., Гнатів П., Іванюк В.

Львівський національний університет природокористування

Вступ. Потреба у стабілізації та пролонгації достатніх запасів доступних рослинам форм азоту в ґрунті за високих доз внесення мінеральних добрив наріла давно [1]. Новітні сорти і гібриди різних культур, як правило мають потужний біотичний потенціал і позитивно реагують на підвищений фон мінерального живлення [2]. З іншого боку концентрація у добре зволоженому та прогрітому ґрунті нітратних форм азоту внаслідок інтенсивної мікробної життєдіяльності ситуативно можуть створювати умови для вертикального і латерального вимивання нітратів, звітрювання аміаку та закису азоту, і навіть вільного газоподібного азоту в атмосферу [3]. Порівняно з використанням інших поживних речовин, використання азотних добрив у сільському господарстві є найвищим. Упродовж 2018-2019 років промисловістю у всьому

світі вироблено добрив понад 107 Мт азоту, і приблизно 55% азотних добрив є карбамідом [4, 5].

Об'єкт дослідження – інгібітор уреазі N-(n-бутил)тіофосфорний триамід (NBPT) та інгібітор нітрифікації 2-хлор-6-(трихлорметил)піридин (нітрапірин). *Предмет дослідження* – вплив інгібіторів різної дії на процеси перетворень азоту в ґрунті за високих доз азотних добрив під культури у Західному Лісостепу. *Мета цієї статті* – з'ясувати перспективність інгібіторів уреазі та нітрифікації для дослідження при внесенні карбаміду і КАС під кукурудзу на зерно у високих нормах на темно-сірому ґрунті у Західному Лісостепу.

Матеріали й методи дослідження. Матеріалами, використаними в дослідженнях, були інгібітор уреазі N-(n-бутил)тіофосфорний триамід (NBPT) та інгібітор нітрифікації 2-хлор-6-(трихлорметил)піридин (нітрапірин). Метод дослідження дії інгібіторів на вміст амонійного азоту та утворення нітратів – порівняльно-аналітичний.

Результати дослідження та їх обговорення. Інгібітори ензимів та бактеріальної активності ґрунтів є в природних екосистемах. Відома олія німу та макуха німу (видобуті з *Azadirachta indica* A. Juss) використовувалися в Індії як інгібітори уреазі [6]. Було продемонстровано, що карбамід, покритий ним, знижує активність уреазі. Нім вважається добрим інгібітором нітрифікації [7] і з цієї причини увесь карбамід, який використовують в Індії з 2015 року, обов'язково покривають олією німу.

Біотичні інгібітори нітрифікації були виділені з тропічних пасовищних трав, які пристосовані до середовища з низьким вмістом азоту. Зокрема, трава маранду – *Brachiaria* spp. має високу активність інгібування у кореневих системах. Серед польових культур, спостерігали, що сорго (*Sorghum bicolor*) виробляє біоінгібітори нітрифікації [8, 9].

Карбамід має такі переваги для користувачів, як висока концентрація азоту (45–46% N). Він є найбільш широко використовуваним азотним добривом, з прогнозованим збільшенням річного попиту на 1,5% у найближчі роки

[4, 5]. Після внесення в ґрунт карбамід піддається гідролізу за допомогою ензиму уреази, спричиняючи підвищення рН ґрунту навколо гранул добрива і призводячи до втрат аміаку, який звітрюється (випаровується і видувається вітром) в атмосферу. Вони в середньому становлять 16% азоту, що вноситься в усьому світі, і можуть досягати 40% або більше в теплих та вологих умовах. Втрати аміаку можуть бути як економічною проблемою (оскільки рослинам залишається менше поживних речовин, що впливає на врожайність), так і проблемою охорони довкілля. Втрати NH_3 у сільському господарстві та тваринництві в усьому світі оцінюються в 37 Мт N [3, 4, 5].

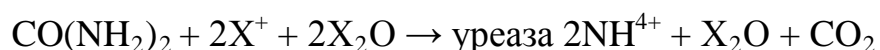
В Україні дуже мало досліджень ефективності інгібіторів – стабілізаторів азоту в ґрунті [2]. Проте з публікацій у США та в ЄС відомо, що використання інгібіторів уреази є ефективним способом зниження втрати аміаку. Відомі декілька сполук, що діють як інгібітори уреази, але лише N-(n-бутил)тіофосфорний триамід (NBPT) використовують у всьому світі. Він є найконкурентнішим на ринку. Виробництво його зросло на 16% на рік за останні 10 років. NBPT продають у США, як Agrotain, починаючи від середини 1990-их років. Сьогодні різні марки NBPT продають як добавки до карбаміду в багатьох країнах світу [7].

У порівнянні зі звичайним карбамідом, оброблений препаратом NBPT карбамід зменшує втрати NH_3 приблизно на 53%. Приріст урожайності при використанні NBPT становить близько 6,0% і коливається від 0,8 до 10,2% залежно від виду культури. Ефективність NBPT для зниження втрат аміаку добре задокументована, але існує потреба в подальшому дослідженні для збільшення періоду інгібування та терміну зберігання сечовини, обробленої NBPT.

Принципову схему розчинення, дифузії та гідролізу сечовини в ґрунті можна описати так. Без інгібітора гідроліз відбувається швидко, спричиняючи накопичення $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ і підвищення рН навколо гранули добрива при поверхні ґрунту, що призводить до випаровування NH_3 . Оскільки азот в формі аміаку менш рухливий в ґрунті, дифузія стає

обмеженою. Інгібітор підтримує сечовину негідролізованою упродовж тривалого часу. Карбамід не є електрично зарядженим і легко дифундує в ґрунтовий розчин. Частина сечовини закладається в ґрунт перед гідролізом. Аміак, що утворюється в ґрунті, утримується негативними зарядами колоїдних гранул і втрати зменшуються. Навіть за рясного дощу або зрошення азот не втрачається з ґрунту. Коли дія інгібітора ослаблюється і карбамід більше гідролізується, рН ґрунтового розчину стає нижчою, а пул $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ в результаті перетворення зменшується.

Гідроліз сечовини, який каталізується ензимом уреазою, є швидким процесом у ґрунтах і включає споживання протонів, підвищення рН ґрунту в оточенні гранул добрива [10]. L. N. Overrein and H. F. Moe [11] показали підвищення рН ґрунту відбувається з 6,5 до 8,8 на третій день після застосування сечовини. Гідроліз сечовини призводить до утворення амонію та CO_2 відповідно до спрощеного рівняння:



Оскільки при гідролізі сечовини споживаються протони (H^+), рН ґрунту підвищується, приводячи до рівноваги між NH_4^+ і NH_3 у напрямку утворення газоподібної форми.

NBPT надійно блокує три активні центри ензиму уреазини, утворюючи зв'язок з двома центрами нікелю та одним киснем від карбаматного містка, що зв'язує обидва метали, зменшуючи ймовірність досягнення сечовиною атома нікелю [12]. NBPT не є прямим інгібітором уреазини. Його необхідно перетворити на триамід N-(n-бутил) фосфорної кислоти (NBPTO). Реакція відбувається швидше в ґрунтах з аеробними умовами – упродовж хвилин або години, і може тривати кілька днів за анаеробних умов [13]. Проте, NBPT продемонстрував вищу ефективність у затримці гідролізу сечовини, ніж пряме застосування NBPTO, який розкладається швидше [14].

За оцінками, 2016 року в усьому світі було вироблено 14 млн. тонн спеціальних добрив, включаючи сечовину з контрольованим вивільненням,

уповільненим вивільненням, вкрити сіркою, а також добрива, оброблені інгібіторами уреаз та нітрифікації. Карбаміду, що містить NBPT, виготовили 7,4 млн. тонн, або 53% [7]. Очікується, що попит на інгібітори уреаз продовжуватиме зростати і з міркувань безпеки довкілля. Нові екологічні норми можуть сприяти підвищенню попиту на такі продукти. Наприклад, Німеччина прийняла законодавство, яке вимагало, щоб до 2020 року всі добрива у формі карбаміду, які використовуються в цій країні, доповнювалися інгібіторами уреаз [7].

Інгібітори уреаз, такі як NBPT, застосовуються в основному у вигляді рідинної композиції, що покриває гранули карбаміду, що гарантує однорідне покриття та ефективність [15]. NBPT також можна додавати до розплаву сечовини перед гранулюванням. Існує невелика різниця або взагалі немає різниці в дієвості NBPT щодо зменшення втрат аміаку при покритті або включенні в гранулу сечовини [15, 16]. Проте NBPT, нанесений у розплаві, значно подовжив час зберігання добрива, порівняно з поверхневим покриттям гранул [15].

Карбамід, доповнений інгібітором уреаз, забезпечує обмеження звірювання, що призводить до зменшення втрат аміаку в атмосферу. Згідно з узагальненнями A. G. V. Silva et al. [1] сукупна втрата аміаку за використання чистого карбаміду становила 31%, за внесення карбаміду з NBPT – 15% у широкому діапазоні ґрунтів, за різної погоди та агротехнологій культур. Зменшення гідролізу сечовини інгібітором уреаз уповільнює втрату аміаку упродовж кількох діб після удобрення ґрунту. Дані досліджень свідчать, що 50% загальної втрати аміаку відбулося за 4,8 доби за внесення чистого карбаміду або 8,3 доби після внесення карбаміду з NBPT.

Незважаючи на високий потенціал інгібіторів уреаз щодо зменшення втрати аміаку [17, 14], вплив на врожайність сільськогосподарських культур та ефективність використання азоту є ще не достатньо вивченими. Результати дослідження коливається в діапазоні збільшення врожайності на 5–12% у більшості авторів. Відносно невеликі прирости врожайності, про які

повідомляється в літературі зумовлюють потребу визначити норми застосування інгібіторів як добавки до добрив, так і безпосереднього внесення в ґрунт після внесення добрив, або разом з ними.

Причина розбіжностей полягає в тому, що зазвичай більша частина азоту поглинається культурами із ґрунтового пулу доступних форм. Азот з добрив, хоча і важливий для формування врожайності, але він є доповненням до ґрунтового. Таким чином, азот, збережений інгібітором уреаз, може не призвести до вагомого збільшення врожайності [1]. Проте сукупний ресурс азоту, що зберігається в системі ґрунт-рослина, як наслідок використання інгібіторів уреаз, що зменшують втрати аміаку, сприяє нарощуванню загальних його запасів у ґрунті. Цим прийомом ми вагомо підвищуємо потенційну родючість ґрунтів. Крім того, обмеження звітрювання аміаку дає вагомий позитивні результати в охороні природного довкілля. Аміак може осідати на місці або переноситися на великі відстані, коли NH_3 реагує з кислотами з утворенням амонійних аерозолів, таких як $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ або NH_4HSO_4 [18]. Азот, перенесений за межі агроєкосистеми в інші місця агороландшафту, може спричиняти небажані наслідки, включаючи непрямі викиди парникових газів, підкислення ґрунтів та втрати біорізноманіття [4].

Інгібітори уреаз існують на ринку вже 20 років, і фермери все частіше їх застосовують і отримують економічний ефект. Їхня ефективність у зменшенні випаровування аміаку добре досліджена і не викликає сумнівів. Однак деякі обмеження, такі як короткий період ефективного інгібування та обмежений термін придатності, повинні стимулювати вкрай необхідні дослідження та розробки. Крім того, слід визнати, що хоча інгібітори уреаз значно знижують втрати аміаку від випаровування, вони їх не усувають цілком. У ситуаціях, коли потенційні втрати є високими, використання карбаміду, поверхнево обробленого інгібіторами уреаз, може призвести до значних втрат N. Таким чином, залишаються проблеми щодо подальшого вдосконалення існуючих інгібіторів уреаз, розробки нових молекул або суміші молекул, покращення рецептур та їх інтеграції з агротехнологічними

методами, здатними зменшити втрати та збільшити ефективність азотних добрив.

Можливо доцільно поєднувати інгібітори уреаз з інгібіторами утворення інших ензимів – аміномонооксигенази і нітритоксидоредуктази у ґрунті. Основною метою використання інгібіторів нітрифікації є зменшення перетворення амонію (NH_4^+) на нітрат (NO_3^-), що сприяє обмеженню їх вимивання [2]. Це є іншим, одним з вірогідних шляхів великих втрат азоту в сільському господарстві. Інгібітори нітрифікації також зменшують викиди закису азоту (N_2O) з добрив [2], що має позитивний вплив на навколишнє середовище, оскільки N_2O є шкідливим парниковим газом. Проте уникнення викидів N_2O не має великого значення для живлення рослин, оскільки процес денітрифікації зазвичай спричиняє низькі втрати азоту.

Таким чином, поєднання інгібіторів уреаз та нітрифікації має потенціал для підвищення ефективності використання азоту шляхом вирішення двох важливих механізмів втрати азоту. Проте поєднання обох інгібіторів у карбаміді може не дати очікуваного сприятливого ефекту. Кілька досліджень показали, що інгібітори нітрифікації, додані до карбаміду, збільшують втрати аміаку [19] і це може применшити дію позитивну інгібітора уреаз у ньому [17, 20]. Активність взаємодії між двома інгібіторами залежить від властивостей ґрунту. У більшості досліджень суміш обох інгібіторів сумарно зменшувала втрати аміаку порівняно з необробленим карбамідом. Проте у дослідженні ґрунтів вологих тропічних зон з мінімальним вмістом глини (Oxisol) і з низькою ємністю катіонного обміну J. R. Soares et al. [17] зауважили, що інгібітор нітрифікації може компенсувати ефект інгібітора уреаз щодо зменшення втрат аміаку на випаровування. Тим не менше, ці автори показали, що не було прямого негативного впливу інгібітора нітрифікації на інгібітор уреаз. Інгібітор нітрифікації, блокуючи нітрифікацію, призводив до того, що концентрація $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ у ґрунті залишалася високою упродовж більш тривалого періоду. Це могло сприяти потенційним втратам від випаровування [17]. Крім того, інгібітор ні-

рифікації, блокуючи нітрифікацію, зменшував підкислення ґрунту, що також допомагало зменшити втрати аміаку.

Нещодавно було опубліковано чотири незалежні великі узагальнення щодо впливу добрив підвищеної ефективності, збагачених інгібіторами уреаз, інгібіторами нітрифікації або добрив з контрольованим вивільненням азоту, на зменшення втрат від випаровування або підвищення ефективності використання азоту чи приросту врожайності. Узагальнення стверджують, що збагачення карбаміду інгібітором уреаз зменшило втрату аміаку 52-54% порівняно з необробленим добривом [22, 1, 23, 24].

Стабілізатор азоту – нітрапірін був першим комерційним інгібітором, який з'явився 1974 року, як N-Serve[®] (компанії Dow Agrosiences LLC, Індіанаполіс, IN). Нітрапірін є летким і тому в основному використовується для внесення в ґрунт в розчині. Це – хлорована піридинова сполука з формулою $\text{ClC}_5\text{H}_3\text{NCCl}_3$. Нітрапірін, є ґрунтовим бактерицидом [25], функціонує, як інгібітор утворення ензимів аміномонооксигенази і нітритоксидоредуктази, чим запобігає гідролізу сечовини археями, *Nitrosomonas*, *Nitrospira* та можливо й іншими. Його дія на бактеріоценоз ґрунту і пригнічення нітрифікації триває 8–10 тижнів. Потім він розкладається як у ґрунті, так і в рослинах [25].

Як тіофосфорний триамід, так і нітрапірін затримує процес нітрифікації і перетворення амонію, утримуючи у такий спосіб більше азоту, що вноситься добривами, у легкодоступній для сільськогосподарських культур формі [26]. Це запобігає втраті ґрунтового азоту через вилуговування або змив нітратів (NO_3), або газоподібних викидів азоту (NH_3 , N_2 , N_2O) [27].

Наприклад, дослідженнями Львівського національного університету природокористування у Пасмовому Побужжі Західного Лісостепу упродовж 2019-2023 рр. автори [2] вперше довели, що з метою збільшення врожайності ячменю озимого та віддачі підвищених норм мінеральних добрив на темно-сірому опідзоленому слабогумусованому легкосуглинковому ґрунті доцільно вносити перед сівбою $\text{N}_{23}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$, а у фазі відновлення вегетації N_{97} (у формі

амонійної селітри) та застосувати стабілізатор азоту нітрапірін N-Lok Макс в нормі 1,7 л/га при відновленні весняної вегетації. Якщо за виробничої необхідності під ячмінь озимий з осені є потреба використовувати карбамід, то нітрапірін застосувати під передпосівну культивування у тій же нормі 1,7 л/га. Застосовувати інгібітор нітрифікації на малих фонах мінерального живлення ячменю озимого ($N_{60}P_{60}K_{60}$ і менше) недоцільно, оскільки це може призвести до зниження врожаю.

Підвищені норми внесення азотних добрив (N_{90-120}) під ячмінь озимий в гумідній зоні Пасмового Побужжя створюють загрозу втрати азоту у нітратній формі вертикальним вимиванням з вологою та у газоподібній формі з викидом закису азоту в атмосферу. Застосування стабілізатора азоту N-Lok Макс істотно зменшило концентрацію нітрат-йонів у товщі 0-40 см [2]. Загалом, нітрапірін на тлі внесення 120 кг/га різних форм азоту уповільнює перехід амонійної форм азоту у нітратну, що зменшує вміст нітратів у орному та підорному шарах приблизно на 10-13 %. Нітрапірін обмежує обсяг емісії закису азоту на 3,3-7,2 кг/га, відповідно від зменшення запасів нітратів у товщі 0-40 см. За норми азоту N_{120} у формі амонійної селітри без використання нітрапірину ґрунт зазнав істотного підкислення на початку вегетації. До збирання врожаю високі норми азоту N_{120} при використанні нітрапірину не підкислювали ґрунт, а навпаки була досліджена нейтралізація кислотності до рівня варіанту без удобрень.

Висновок. У зв'язку з актуальністю прийомів підвищення віддачі азотних добрив у сучасному землеробстві нами заплановане вивчення дії інгібіторів перетворення азоту в ґрунті різного спрямування як окремо, так і разом, а також ефективності їх застосування при внесенні різних форм азотних добрив у темно-сірий опідзолений ґрунт Західного Лісостепу в умовах гумідного клімату. Нами розроблена схема експерименту внесення карбаміду і КАС під кукурудзу на зерно у різних нормах, з використанням добрива, збагаченого тіофосфорним триамідом, із внесенням нітрапірину перед

сівбою, а також поєднанням цих препаратів між собою та з різними формами добрив, що будуть внесені різними прийомами.

Список використаних джерел

1. Silva A. G. B., Sequeira C.H., Sermarini R. A., Otto R. 2017. Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: a meta-analysis. *Agron. J.*, 109(1): 1-13.
2. Шестак В. Г., , Гнатів П. С., Іванюк В. Я. 2023. Азотне живлення і стабілізація нітрифікації: наукова монографія. Львів : Видавець Марченко Т. В. 168 с.
3. Bittman S., Dedina M., Howard C.M., Oenema O., Sutton M.A. 2014. Options for ammonia mitigation: guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Centre for Ecology and Hydrology (CEH), Edinburgh.
4. Galloway J. N., Dentener F. J., Capone D. G., Boyer E. W., Howarth R. W., Seitzinger S. P., et al. 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochem*, 70(2): 153-226.
5. Sutton M. A., Erisman J. W., Dentener F., Möller D. 2008. Ammonia in the environment: from ancient times to the present. *Environ Pollut*, 156: 583-604.
6. Opoku A., Chaves B., Chaves B. & De Neve S. 2014. Neem seed oil: A potent nitrification inhibitor to control nitrate leaching after incorporation of crop residues. *Biological Agriculture & Horticulture*. 30(3): 145-152. DOI: 10.1080/01448765.2014.885394
7. Sridharan G. V., Hazarika D., Bhat M. R., Suraksha R. S., Singh S. 2017. Nitrification inhibition studies of neem coating on urea prills. *Asian J Chem*, 29(1): 196-198.
8. Subbarao, G. V., Yoshihashi, T., Worthington, M., Nakahara, K., Ando, Y., Sahrawat, K. L. et al. 2015. Suppression of soil nitrification by plants. *Plant Sci*. 233: 155–164. doi: 10.1016/j.plantsci.2015.01.012

9. Coskun, D., Britto, D. T., Shi, W. and Kronzucker, H. J., 2017. Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition. *Nat. Plants*. 3: 17074. doi.org: 10.1038/nplants.2017.74
10. Ernst J. W. & Massey H. F. 1960. The effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in the soil. *Soil Sci Soc Am J*, 24(2): 87-90.
11. Overrein L. N. & Moe P. G. 1967. Factors affecting urea hydrolysis and ammonia volatilization in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 31(1): 57-61.
12. Manunza B., Deiana S., Pintore M., & Gessa C. 1999. The binding mechanism of urea, hydroxamic acid and N-(N-butyl)-phosphoric triamide to the urease active site. A comparative molecular dynamics study. *Soil Biol. Biochem.*, 31(5): 789-796.
13. Watson C. J. (Ed.). 2000. Urease activity and inhibition – principles and practices, The International Fertilizer Society Meeting, London.
14. Hendrickson L. L., Douglass E. A. 1993. Metabolism of the urease inhibitor N-(n-butyl)thiophosphoric triamide (NBPT) in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 25(11): 1613-1628.
15. Watson C. J., Akhonzada N. A., Hamilton J. T. G., Matthews D. I. 2008. Rate and mode of application of the urease inhibitor N-(n-butyl)thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea. *Soil Use Manag*, 24: 246-253.
16. Trenkel M. E. 2010. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. (2nd ed.), IFA – Intl. Fertilizer Industry Association, Paris.
17. Soares J. R., Cantarella H., Menegale M. L. C. 2012. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrifications inhibitors. *Soil Biol. Biochem.*, 52: 82-89.
18. Sutton M. A., Bleeker A., Howard C. M., Bekunda M., Grizzetti B., de Vries W., et al. 2013. Our Nutrient World: the challenge to produce more food and energy with less pollution. Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh.

19. W. Frame. 2017. Ammonia volatilization from urea treated with NBPT and two nitrification inhibitors. *Agr. J.*, 109(1): 1-10.
20. Zaman M., Saggar S., Blennerhassett J. D., Singh J. 2009. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system. *Soil Biol. Biochem.*, 41: 1270-1280.
21. Linqvist B. A., Liu L., van Kessel C., van Groenigen K. J. 2013. Enhanced efficiency nitrogen fertilizers for rice systems: meta-analysis of yield and nitrogen uptake. *Field Crop Res.*, 154: 246-254.
22. Abalos D., Jeffery S., Sanz-Cobena A., Guardia G., Vallejo A. 2014. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agric Ecosyst Environ*, 189: 136-144.
23. Mira A. B., Cantarella H., Souza-Netto G. J. M., Moreira L. A., Kamogawa M. Y., Otto R. 2017. Optimizing urease inhibitor usage to reduce ammonia emission following urea application over crop residues. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 248: 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.032>
24. Snyder C. S., Davidson E.A., Smith P., Venterea R. T. 2014. Agriculture: sustainable crop and animal production to help mitigate nitrous oxide emissions. *Cur. Opin. Environ. Sustain.*, 9–10: 46-54.
25. Nitrapyrin. 2005. United States Environmental Protection Agency. Pesticides and Toxic Substances (7508C). EPA-738-F-05-003. 6 p. URL: https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/reregistration/fs_PC-069203_1-May-05.pdf
26. IFA International Fertilizer Association. Fertilizer outlook 2017–2021. IFA annual conference – 22–24 May 2017 Marrakech (Marocco). Paris: IFA International Fertilizer Association, Services PITaA; 2017 June 2017.
27. Pan B., Lam S. K., Mosier A., Luo Y., Chen D. 2016. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: a global synthesis. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 232: 283-289.