



Сторінка молодого вченого

УДК 633.15:631.811.1:6
31.461.5:631.559
© 2026

АДАПТИВНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ТЕХНОЛОГІЙ СТАБІЛІЗАЦІЇ АЗОТНОГО ЖИВЛЕННЯ КУКУРУДЗИ В УМОВАХ ГІДРОТЕРМІЧНИХ СТРЕСІВ*

В.В. Павленко

*Національний університет біоресурсів і природокористування України
Міністерства освіти і науки України
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна
e-mail: vladimir.pavlenko@cortevea.com
ORCID: 0009-0004-0716-1381*

**Науковий керівник — доктор сільськогосподарських наук,
професор С.П. Танчик*

Надійшла 25.03.2026. Рецензована 06.04.2026. Прийнята до друку 11.05.2026

Мета. Оцінити адаптивний потенціал поєднаного застосування інгібітора нітрифікації *N-Lock™ Max* і біостимулятора-азотфіксатора *Blue N™* за різних кліматичних умов у період вегетації (діапазон ГТК — 0,56 – 1,09) для забезпечення стабільного азотного статусу та продуктивності кукурудзи в умовах Лісостепу України. **Методи.** Для оцінювання азотного статусу рослин використовували метод *Yara N-Tester*-метрії. Статистичну обробку проводили методами 3-факторного дисперсійного й кореляційного аналізів для встановлення закономірностей між гідротермічними показниками та ефективністю досліджуваних технологічних заходів. **Результати.** Польові дослідження проводили впродовж 2023 – 2025 рр. на 3 контрастних локаціях: у с. Черкас Білоцерківського р-ну Київської обл. (чорнозем типовий) та Шаргородському й Тульчинському р-нах Вінницької обл. (сірі лісові ґрунти). Встановлено, що досліджувані сезони характеризувалися значним гідротермічним контрастом. У посушливому 2024 р. (Шаргород) зафіксовано 19 днів із критичними температурами повітря і дефіцит опадів (ГТК = 0,56), що призвело до дегідратації верхнього шару ґрунту та блокування кореневого поглинання азоту. Доведено, що за таких умов провідну адаптивну роль відіграє препарат *Blue N™* (на основі *Methylobacterium symbioticum*), який виконує роль фізіологічного буфера, забезпечуючи автономне

надходження азоту в листки, що дає змогу підтримувати індекс *Yara N-Tester* на рівні 539 – 552 од. (на 5,7 – 8,2% вище, ніж на контролі) та зберегти врожайність – 8,7 т/га. Доведено, що у вологі періоди (Левківці, 2025 р., ГТК = 1,09, сума опадів – 266,3 мм) критичного значення набуває хімічна стабілізація азоту препаратом *N-Lock™ Max*. Утримання азоту в амонійній формі завдяки інгібуванню процесу нітрифікації усунуло ризики промивання нітратів, що забезпечило на 25% вищу агрономічну окупність добрив. Статистично підтверджено, що поєднання препаратів на фоні N_{90} забезпечує врожайність, еквівалентну повному фону N_{120} без стабілізаторів. **Висновки.** Поєднання технологій хімічної стабілізації та ендоефітної азотфіксації дає змогу нівелювати ризики азотного дефіциту незалежно від мінливості гідротермічних умов. Результати дослідження є науковим підґрунтям для впровадження систем кліматично орієнтованого точного землеробства з метою гарантування продовольчої безпеки в умовах глобального потепління.

Ключові слова: адаптивність, азотний статус, ГТК Селянінова, кукурудза, нітрапирин, посуха, температурний стрес, *Blue N*, *Methylobacterium symbioticum*, *N-Lock Max*.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202605-08>

В Україні сучасне сільськогосподарське виробництво розвивається в умовах гідротермічної мінливості вегетаційних періодів із різкими коливаннями гідротермічних показників. Згідно з дослідженнями авторів [1], антропогенні зміни клімату вже призвели до істотного уповільнення темпів росту світового виробництва продовольчої продукції. Для зони Лісостепу України найбільш деструктивним чинником останнього десятиліття стало поєднання тривалих бездощових періодів з аномальною спекою, що призводить до значних втрат урожаю кукурудзи [2, 3].

Азотне живлення є головним фактором реалізації генетичного потенціалу культури, проте його ефективність значною мірою залежить від вологозабезпечення [4]. Традиційні системи удобрення стають уразливими: у вологі сезони частина нітратів вимивається в нижні горизонти, а в посушливі — азот стає недоступним через дегідратацію кореневмісного шару [5, 6]. Питання стабілізації азоту в ґрунті за допомогою інгібіторів

нітрифікації детально висвітлено в працях [7]. Доведено, що уповільнення переходу амонію в нітрати дає змогу значно знизити екологічні втрати.

Водночас світова наука приділяє значну увагу використанню метилотрофних бактерій. Встановлено їх здатність до колонізації філосфери рослин і підтверджено, що ці бактерії синтезують метаболіти, які підвищують стресостійкість культур [8, 9]. Особливий інтерес викликає штам SB23 (*Methylobacterium symbioticum*), здатний до ендоефітної фіксації азоту [10]. Ефективність його застосування висвітлено в сучасних розробках [11, 12]. Однак питання адаптивної ролі поєднання хімічної стабілізації та біологічної фіксації в умовах Лісостепу залишається недостатньо вивченим.

Мета досліджень — оцінити адаптивний потенціал поєданого застосування інгібітора нітрифікації *N-Lock™ Max* та біостимулятора-азотфіксатора *Blue N™* за різних кліматичних умов у період вегетації (діапазон ГТК — 0,56–1,09)

1. Кліматичні індикатори вегетації кукурудзи в період дії препаратів

Локація/Рік	Опади, мм	Дні з $t_{\max} > 33 \text{ }^\circ\text{C}$	ГТК Селянінова	Характеристика умов зволоження
Київщина, 2023	174,6	5	0,81	Недостатнє зволоження
Шаргород, 2024	148,0	19	0,56	Жорстка посуха
с. Левківці, Тульчинського р-ну, 2025	266,3	13	1,09	Достатнє зволоження

для забезпечення стабільного азотного гомеостазу та продуктивності посівів кукурудзи.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження проводили впродовж 2023–2025 рр. у мережі науково-дослідних ділянок компанії Corteva Agriscience (Україна) на чорноземах типових (с. Черкас, Білоцерківський р-н, Київська обл.; рН 6,0) і сірих лісових ґрунтах (Вінницька обл., Шаргородський і Тульчинський р-ни; рН 5,4–5,8). Об'єкти досліджень — гібриди Р8723 (FAO 280), Р9127 (FAO 310) та Р9074 (FAO 330). Дослід закладали методом рендомізованих блоків у 4-разовій повторності. Схема досліду: фактор А — азотний фон (карбамід N_{90} та N_{120}); фактор В — N-Lock™ Max [13] (нітрапирин, 300 г/л, вносили 1,7 л/га перед сівбою); фактор С — Blue N™ [14] (*M. symbioticum* SB23, 0,33 кг/га, позакоренево у фазі V4–V6). Гідротермічний коефіцієнт (ГТК) розраховували за Селяніновим [15].

Азотний статус рослин оцінювали за допомогою оптичного сенсора Yara N-Tester (Yara International ASA, Норвегія). Вимірювання здійснювали у фазі наливу зерна в середній частині 3-го зверху повністю сформованого листка на 30 типових рослинах у кожній повторності. Урожай збирали з кожної ділянки. Урожайність зерна (т/га) перераховували на стандартну вологість 14%. Статистичну обробку та візуалізацію даних проводили в програмному середовищі RStudio (версія 4.2.1) із використанням пакетів Agricolae, Ggplot2 та Stats. Істотність відхилень установлювали за критерієм HIP (LSD) за рівня

значущості $p < 0,1$ з урахуванням високої природної варіативності.

Результати досліджень. Оскільки дослідження проводили в різних ґрунтово-кліматичних локаціях на неоднакових базових агрохімічних фонах, результати порівнювали за допомогою уніфікованого гідротермічного індексу (ГТК Селянінова).

На основі аналізу метеоданих виявлено значний контраст погодних умов: від жорсткої посухи у 2024 р. (ГТК = 0,56, 19 днів із $t > 33 \text{ }^\circ\text{C}$) до достатнього зволоження у 2025 р. (ГТК = 1,09) (табл. 1, рис. 1).

Динаміку накопичення вологи й температурних піків за роками досліджень наведено на рис. 1.

Встановлено, що інтеграція засобів стабілізації забезпечує виражений компенсаторний ефект (табл. 2). У посушливому 2024 р. лише синергія біостимулятора Blue N™ та інгібітора N-Lock™ Max на фоні N_{90} забезпечила врожайність на рівні 8,72 т/га, що достовірно перевищило цей показник на обох контрольних фонах. Це підтверджує гіпотезу, що за дефіциту вологи біологічна фіксація азоту стає критичним фактором. Навпаки, у вологому за погодними умовами 2025 р. провідну роль відіграв інгібітор N-Lock™ Max (9,33 т/га), який сприяв запобіганню промиванню нітратів.

Статистичний аналіз даних (див. табл. 2) підтвердив достовірність впливу досліджуваних препаратів на врожайність кукурудзи.

Аналіз азотного статусу (Yara N-Tester) за посухи у 2024 р. показав, що дегідратація ґрунту призвела до блокування

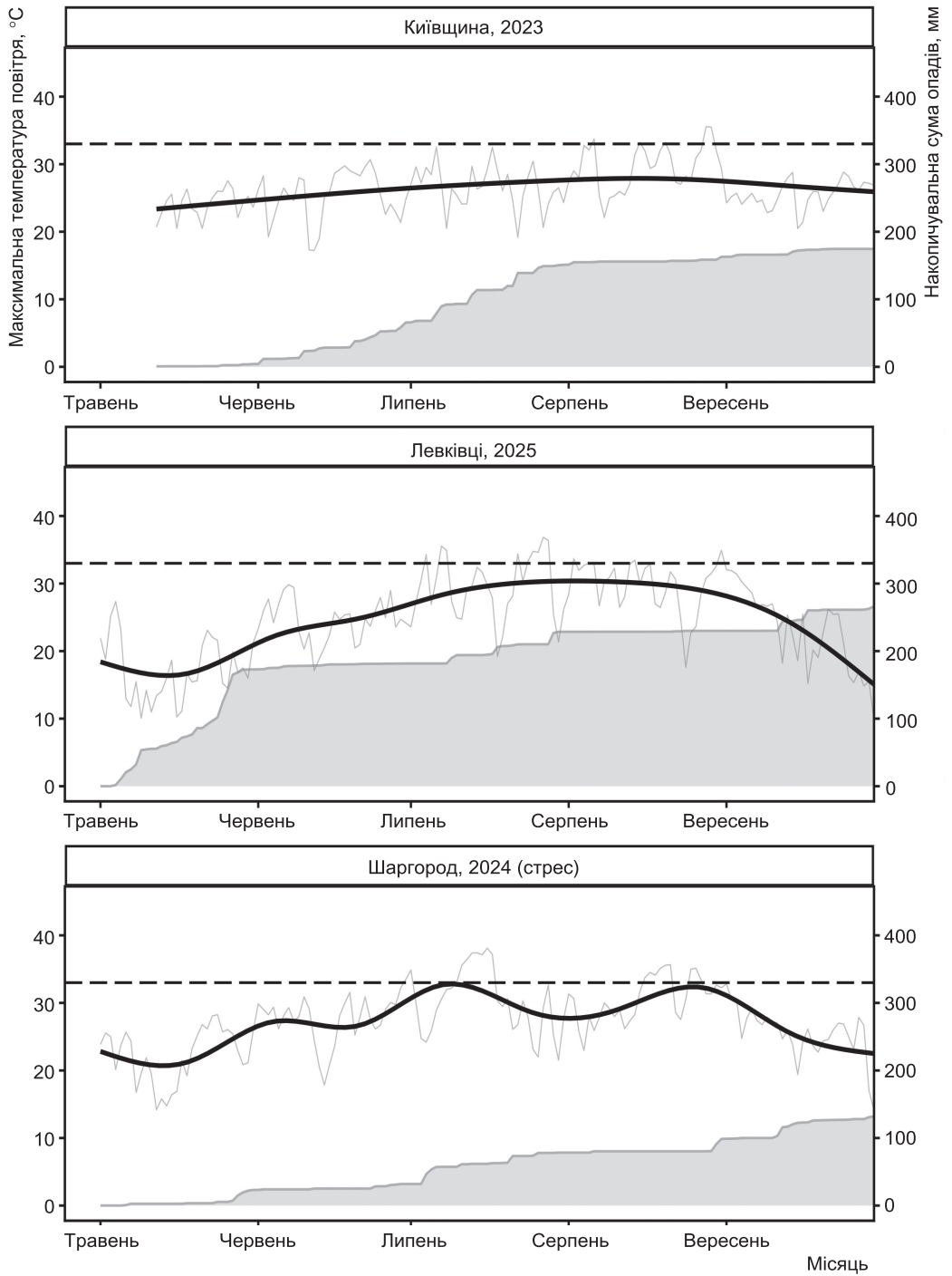


Рис. 1. Динаміка гідротермічних стресів у посівах кукурудзи (2023 – 2025 рр.):
 ■ — накопичення вологи, — — температурний тренд, - - - - межа критичної температури — +33 °C

2. Урожайність кукурудзи залежно від технології стабілізації та різних доз азотного живлення (2023 – 2025 рр.), т/га

Варіант досліджу (фактори А, В і С)	2023 р. (Київщина) ГТК — 0,81	2024 р. (Шаргород) ГТК — 0,56	2025 р. (Левківці) ГТК — 1,09
N ₉₀ ; контроль (без стабілізаторів)	8,40 ^c	7,39 ^b	8,13 ^b
N ₉₀ ; Blue N™	8,44 ^{bc}	8,11 ^{ab}	8,94 ^{ab}
N ₉₀ ; N-Lock™ Max	9,32 ^a	7,82 ^b	9,33 ^a
N ₉₀ ; N-Lock™ Max + Blue N™	8,89 ^{ab}	8,72 ^a	8,54 ^{ab}
N ₁₂₀ ; контроль (без стабілізаторів)	8,61 ^{bc}	8,20 ^{ab}	8,56 ^{abc}
N ₁₂₀ ; Blue N™	8,56 ^{bc}	8,02 ^b	8,26 ^{bc}
N ₁₂₀ ; N-Lock™ Max	8,60 ^{bc}	8,26 ^{ab}	8,62 ^{abc}
N ₁₂₀ ; N-Lock™ Max + Blue N™	8,48 ^c	8,32 ^{ab}	8,42 ^{bc}
HP _{0,1} (LSD), т/га	0,39	0,62	0,78

Примітка. Літери a, b, c позначають статистично значущу різницю між варіантами в межах однієї локації за критерієм LSD, p ≥ 0,1.

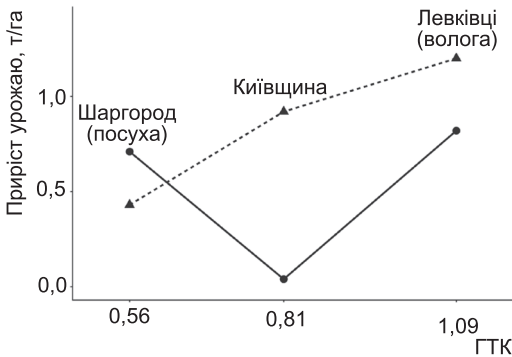


Рис. 2. Залежність приросту врожаю зерна кукурудзи від гідротермічного коефіцієнта за різних технологій стабілізації азоту: ◆ — Blue N™; ▲ — N-Lock™ Max

коренів (індекс знизився до 510 од.). Застосування азотофіксатора Blue N™ дало змогу утримувати показник

на рівні 539,5 од., що свідчить про автономність постачання азоту через фітосферу. Агрономічна окупність азоту (PFP) за використання N-Lock™ Max на фоні N₉₀ досягла 98,0 кг зерна на 1 кг атмосферного азоту, що на 39% вище, ніж за стандартної дози N₁₂₀.

На рис. 2 показано реакцію технологій стабілізації азоту на гідротермічні умови: препарат Blue N™ є критично важливим за ГТК < 0,7 (посуха), а роль інгібітора N-Lock™ Max лінійно зростає за ГТК > 0,8 (зволоження). Точка перетину ліній указує на зміну домінуючого фактора стабілізації. Синергія препаратів створює «фізіологічний буфер», що корелює з даними авторів [12, 15] щодо автономності азотного статусу за використання метилотрофів.

Висновки

Встановлено, що інтеграція нітрапірину та ендосфитної азотфіксації розширює межі кліматичної пластичності кукурудзи в діапазоні ГТК = 0,56 – 1,09. З'ясовано, що в умовах посухи азотфіксатор Blue N™

виконує роль компенсаторного чинника, забезпечуючи стабільний азотний статус (Yara N-Tester > 539 од.) і врожайність 8,7 т/га, оминаючи заблоковану кореневу систему. Доведено, що у вологі періоди інгібітор N-Lock™

Мах підвищує окупність добрив на 25–30% завдяки інгибуванню нітрифікації.

Технологія стабілізації азотного живлення дає змогу оптимізувати норми азоту на 25% (N_{90} замість N_{120}) без втрати врожайності. Статистично підтверджено, що синергія хімічної стабілізації ґрунтового азоту та біологічної фіксації атмосферного азоту допомагає усунути ризику

азотного голодування на пізніх етапах вегетації (ефект *stay-green*) незалежно від мінливості гідротермічних умов Лісостепу України.

Отже, для впровадження систем кліматично орієнтованого землеробства з метою гарантування продовольчої безпеки в умовах глобального потепління рекомендовано поєднувати інгібітор *N-Lock™* Мах з азотфіксатором *Blue N™*.

Pavlenko V.

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine Ministry of Education and Science of Ukraine, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine; e-mail: vladimir.pavlenko@corteva.com; ORCID: 0009-0004-0716-1381

Adaptive potential of technologies for stabilization of nitrogen nutrition of corn in conditions of hydrothermal stresses

Goal. To assess the adaptive potential of the combined use of *N-Lock™* Max nitrification inhibitor and *Blue N™* biostimulant nitrogen-fixator under different climatic conditions during the growing season (HTC range — 0.56–1.09) to ensure stable nitrogen status and corn productivity in the Forest-Steppe of Ukraine. **Methods.** To assess the nitrogen status of plants, the Yara N-Tester-metric method was used. Statistical processing was carried out by methods of 3-factor dispersion and correlation analyses to establish patterns between hydrothermal parameters and the effectiveness of the studied technological measures. **Results.** Field studies were conducted during 2023–2025 in 3 contrasting locations: vil. Cherkas (Bila Tserkva district, Kyiv oblast) (typical black soil), and the Shargorod and Tulchynskiy districts (Vinnytsya oblast) (gray forest soils). It was found that the studied seasons were characterized by significant hydrothermal contrast. In dry 2024 (Shargorod) they recorded 19 days with critical air temperatures and precipitation deficiency (HTC=0.56), which led to dehydration of the topsoil

and blocking the root absorption of nitrogen. It was proved that under such conditions the leading adaptive role was played by the preparation *Blue N™* (based on *Methylobacterium symbioticum*), which acted as a physiological buffer, providing an autonomous flow of nitrogen into the leaves, which made it possible to maintain the Yara N-Tester index at the level of 539–552 units (5.7–8.2% higher than in the control), and save the yield — 8.7 t/ha. It was proved that in wet periods (Levkivtsi, 2025, HTC=1.09, the amount of precipitation — 266.3 mm), the chemical stabilization of nitrogen by the drug *N-Lock™* Max became critical. The retention of nitrogen in ammonium form due to inhibition of the nitrification process eliminated the risks of nitrate washing, which provided 25% higher agronomic payback of fertilizers. It was statistically confirmed that the combination of drugs against the background of N_{90} provided a yield equivalent to the full background N_{120} without stabilizers.

Conclusions. The combination of chemical stabilization technologies and endophytic nitrogen fixation made it possible to neutralize the risks of nitrogen deficiency, regardless of the variability of hydrothermal conditions. The results of the study are the scientific basis for the introduction of climate-oriented precision farming systems to ensure food security in the face of global warming.

Key words: *adaptability, Blue N, corn, drought, Methylobacterium symbioticum, nitrapyrin, nitrogen status, N-Lock Max, Selianinov's HTC, temperature stress.*

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202605-08>

Бібліографія

1. Ortiz-Bobea A., Ault T.R., Carrillo C.M. et al. Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change*. 2021. 11(4). P. 306–312. doi: 10.1038/s41558-021-01000-1
2. Teng, L., Qing, L., Shumei, W. et al. High temperature effects on maize photosynthesis during stress and recovery phase at the seed setting stage. *BMC Plant Biology*. 2025. 25(1): 454. doi: 10.1186/s12870-025-06047-2
3. Hatfield J.L., Prueger J.H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*. 2015. 10. P. 4–10. doi: 10.1016/j.wace.2015.08.001
4. Li Y., Cui S., Zhang Z. et al. Determining effects of water and nitrogen input on maize (*Zea mays*) yield, water- and nitrogen-use efficiency: A global synthesis. *Scientific Reports*. 2020. 10(1):9699. doi: 10.1038/s41598-020-66613-6
5. Klaus V. H., Friedritz L., Hamer U., Kleinbecker T. Drought boosts risk of nitrate leaching from grassland fertilisation. *Science of The Total Environment*. 2020. 726. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137877
6. Trenkel M.E. Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010. 164 p.
7. Wolt J.D. A meta-analysis of nitrapyrin nitrification inhibitor efficiency in corn production. *Agronomy Journal*. 2004. 96(2). P. 502–508. doi: 10.2134/agronj2004.0502
8. Iguchi H., Yurimoto H., Sakai Y. Interactions of methylophiles with plants and other heterotrophic bacteria. *Microorganisms*. 2015. 3(2). P. 137–151. doi: 10.3390/microorganisms 3020137
9. Gamit H.A., Naik H., Chandarana K.A. et al. Secondary metabolites from methylophobic bacteria: their role in improving plant growth under a stressed environment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. 30. P. 28563–28574. doi: 10.1007/s11356-023-25505-8
10. Arrobas M., Correia C.M., Rodrigues M.A. *Methylobacterium symbioticum* Applied as a Foliar Inoculant Was Little Effective in Enhancing Nitrogen Fixation and Lettuce Dry Matter Yield. *Sustainability*. 2024. 16(11):4512. doi: 10.3390/su16114512
11. Valente F., Panozzo A., Bozzolin F. et al. Growth, photosynthesis and yield responses of common wheat to foliar application of *Methylobacterium symbioticum* under decreasing chemical nitrogen fertilization. *Agriculture*. 2024. 14(10). P. 1670. doi: 10.3390/agriculture 14101670
12. Quemada M., Alonso-Ayuso M., Esteban R., Gonzalez E. Maize (*Zea mays* L.) response to the biostimulant *Methylobacterium symbioticum* under various nitrogen fertilizer rates. *European Journal of Agronomy*. 2026. 172. doi: 10.1016/j.eja.2025.127887
13. Corteva Agriscience. BlueN™: nutritional efficiency biostimulant based on *Methylobacterium symbioticum*. Technical sheet. February 2026.
14. Corteva Agriscience. N Лок™ Макс: стабілізатор азоту на основі нітрапірину (Optinyte™ technology): інформаційний буклет. 2021.
15. Єщенко В.О., Копитко П.Г., Опришко В.П. Основи наукових досліджень в агрономії: підруч. Київ: Аграрна освіта, 2014. 332 с.