

ВПЛИВ ЕЛЕМЕНТІВ ЖИВЛЕННЯ НА ФОРМУВАННЯ ЗОН ПРОДУКТИВНОСТІ КУКУРУДЗИ

ГАРБАР Л.А. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент
orcid.org/0000-0003-4249-0434

Національний інститут біоресурсів і природокористування України

ВАСЬКІВСЬКИЙ Б.С. – аспірант

orcid.org/0009-0003-6852-3844

Національний інститут біоресурсів і природокористування України

Постановка проблеми. Більшість орних земель України характеризуються значною просторовою варіабельністю агрохімічних і фізико-хімічних властивостей ґрунту, що суттєво впливає на рівень урожайності. Традиційні підходи до вирощування кукурудзи з фіксованими нормами висіву не враховують цю внутрішньопольову різноманітність, що призводить до перевитрати ресурсів у зонах низької родючості та недоотримання врожаю в потенційно продуктивних ділянках поля. Застосування технологій змінних норм висіву є одним із перспективних інструментів точного землеробства, що дозволяє адаптувати густоту посіву до локальних ґрунтових умов. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю розробки науково-обґрунтованої системи зонального управління нормами висіву кукурудзи з урахуванням просторової мінливості родючості ґрунтів, що є передумовою сталого агровиробництва в умовах інтенсивного землеробства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні десятиліття точне землеробство стрімко розвивається завдяки впровадженню геоінформаційних систем, датчиків моніторингу і технологій змінних норм внесення ресурсів (Variable Rate Technology, VRT). Однією з ключових практик у межах цього підходу є застосування змінних норм висіву (Variable Rate Seeding, VRS), що дозволяє диференціювати норму висіву відповідно до просторової неоднорідності ґрунтів і рельєфу поля. За даними Julie O'Halloran і John McPhee, у штаті Квінсленд (Австралія) VRS успішно адаптовано під кукурудзу, що дозволило підвищити врожайність на 8–10 % у зонах із високим потенціалом родючості порівняно з фіксованими нормами [1]. Технології VRS базуються на припущенні про наявність стабільних зон продуктивності в межах одного поля, що підтверджується численними агрономічними спостереженнями. Як зазначає команда AGRIVI, для успішного застосування VRS необхідно мати просторові дані щодо родючості ґрунту, вмісту поживних речовин та історії врожайності, що дозволяє моделювати оптимальні норми висіву [2]. У дослідженні, опублікованому в журналі Scientific Reports, використання змінних норм висіву для кукурудзи дозволило підвищити ефективність засвоєння елементів живлення та зменшити конкуренцію між рослинами, що особливо важливо для зон з високою вологозабезпеченістю [3]. Це підтверджує гіпотезу про доцільність регулювання густоти посівів відповідно до агрономічного потенціалу кожної ділянки поля. Крім того, за

результатами аналізу, проведеного European Research Institute в Литві, застосування VRS за сівби кукурудзи сприяє не лише збільшенню врожайності, але й оптимізації витрат на насіння, особливо на великих масивах із вираженою варіабельністю ґрунтів. Вони зазначають, що ефективність технології проявляється на площах від 150 га і більше [4]. Схожі результати оприлюднила компанія Corteva Agriscience, яка вказує, що економічна доцільність VRS залежить від адаптації гібриду кукурудзи до конкретного типу ґрунту, що дозволяє досягати кращої синхронізації між потенціалом ґрунту і біологічними властивостями сорту [5]. На рівні державних досліджень у США, зокрема у Північній Дакоті (NDSU), підтверджено, що технології змінних норм висіву можуть зменшити витрати на насіння на 10–15 % без зниження врожайності, а в деяких випадках – навіть із її збільшенням, що забезпечує економічну вигоду в розмірі до 6,25 USD/га [6]. Загалом, аналіз сучасної літератури свідчить про те, що застосування VRS для кукурудзи дозволяє поєднати агрономічну ефективність із економічною доцільністю, за умови врахування просторової неоднорідності ґрунтових умов, оптимального підбору гібридів і точного агрохімічного моніторингу. Такі підходи формують підґрунтя для диференційованого управління густотою посіву як ключового елементу точного землеробства.

Метою дослідження є оцінка впливу просторової варіабельності агрохімічних показників ґрунту (pH, вміст гумусу, азоту, фосфору, калію та мікроелементів) на формування зон продуктивності кукурудзи та уточнення ефективності застосування технології змінних норм висіву (VRS) у реальних умовах господарства. Особлива увага приділяється перевірці гіпотези про те, що адаптація густоти посіву відповідно до агрохімічних параметрів ґрунту забезпечує підвищення врожайності та агрономічної ефективності. Дослідження спрямоване на верифікацію висновків сучасних наукових праць щодо ключових чинників зональної продуктивності та на розробку практичних рекомендацій для реалізації VRS-технологій у зоні Полісся–Лісостепу України.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження проводилось у 2023–2024 рр. на території господарства ТОВ «Чернігівська Індустріальна Молочна Компанія», розташованого в межах Чернігівського району Чернігівської області, в зоні перехідного ґрунтового-кліматичного поясу між Поліссям і Лісостепом. Цей регіон характеризується складною агроландшафтною

структурою та високою просторовою варіабельністю агрохімічних властивостей ґрунтів, що створює сприятливі умови для вивчення зональної продуктивності сільськогосподарських культур. Об'єктом дослідження була кукурудза гібриду ДКС 3939. Виділення меж зон здійснювалось у середовищі QGIS із використанням модулів кластерного аналізу та цифрових карт врожайності [7]. Ґрунтові зразки відбирали в шарі ґрунту 0–30 см із щільністю 10–20 точок на зону залежно від її розміру. У кожній зоні змішані зразки формувались шляхом ретельного перемішування проб у стерильних ємностях. Проби транспортували в лабораторію в герметичному стані протягом 12–24 годин для запобігання втратам нітратів і змін органічної фракції. Агрохімічний аналіз включав визначення таких показників: кислотність ґрунту (рН у воді та в розчині KCl), електропровідність (ЕС), вміст гумусу (ОМ), катіонно-обмінна ємність (СЕС), ступінь насичення основами (Soil_BS), вміст нітратного (NO_3^-) та амонійного (NH_4^+) азоту, доступного фосфору за Мачигінім (P_2O_5 _Mach) і резервного фосфору за Чириковим (P_2O_5 _Chir), калію (K), кальцію (Ca), магнію (Mg), натрію (Na), сірки (SO_4^{2-}), а також мікроелементів – заліза (Fe), міді (Cu), цинку (Zn), марганцю (Mn) і бору (B). Методи визначення відповідали ДСТУ ISO 11260:2001 і рекомендаціям [8], [9]. Зокрема, рН визначали потенціометричним методом; ОМ – за Тюрінім (окиснення $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$); СЕС – методом екстракції NH_4Ac при рН 7,0; фосфор – за допомогою лактат-амонійного буфера (Мачигін) і 0,5М HCl (Чириков); макро- і мікроелементи – атомно-абсорбційною спектрофотометрією після ДТРА-екстракції [8]. Сульфатну сірку аналізували методом Пономарьової-Чирикова. Статистичний аналіз виконували з використанням бібліотек Python: pandas (структурування таблиць), scipy (розрахунок коефіцієнтів Пірсона), matplotlib (візуалізація даних), що дало змогу встановити силу та напрямок зв'язку між агрохімічними параметрами і врожайністю, а також виявити мультиколінеарні залежності [8, 7]. Уся методика дослідження відповідає сучасним підходам до точного землеробства, які рекомендовані міжнародними організаціями, зокрема FAO, INRAE та USDA [10], і може бути застосована для розробки локально адаптованих VRS-рішень у регіонах зі складною ґрунтовою мозаїкою.

Результати досліджень. Результати агрохімічного дослідження трьох зон продуктивності кукурудзи, показали значну просторову варіабельність основних властивостей ґрунту, що безпосередньо впливає на потенціал урожайності культури. Аналіз отриманих показників вказує на чітку позитивну залежність між показником кислотності ґрунту (рН) і врожайністю кукурудзи (табл. 1). У зоні з низькою продуктивністю при

рН 4,93 урожайність у 2023 році становила 7,95 т/га, а в 2024 році – лише 5,75 т/га. Високопродуктивна зона, де рН дорівнює 6,30, демонструвала найвищу урожайність: 11,05 т/га (2023 р.) і 9,47 т/га (2024 р.). Ці результати підтверджують загальноприйняту закономірність: за надмірної кислотності ґрунту (рН <5,5) відбувається пригнічення росту кукурудзи внаслідок токсичності іонів алюмінію та дефіциту основних елементів живлення [11]. За оптимального рН близько 6,3 кукурудза засвоює поживні речовини ефективно, і як було доведено в польових експериментах, врожайність у таких умовах може бути на 8 % вищою порівняно з ґрунтами, що мають рН вищий за 8,0 (табл. 1) [12].

Ємність катіонного обміну зростала від 5,03 мг-екв/100 г ґрунту (низька зона) до 11,07 мг-екв/100 г ґрунту (висока зона), що супроводжувалося збільшенням врожаю. Зокрема, зона з найвищим СЕС забезпечила приріст урожайності більш ніж на 3 т/га у 2023 році порівняно з низьким значенням СЕС.

СЕС, як показник здатності ґрунту утримувати йони калію, кальцію та магнію, прямо впливає на живлення рослин. У дослідженні було показано, що підвищення СЕС за рахунок внесення органічних речовин збільшує площу листової поверхні кукурудзи майже в 8 разів порівняно з контролем [13]. Проте, важливо враховувати, що надмірно високі значення СЕС на глинистих ґрунтах можуть не давати очікуваного ефекту через надлишок вологи або низьку аерацію, як це спостерігалось у польових дослідженнях у Гані [14].

Уміст гумусу зростав від 1,0 % (низька зона) до 2,30 % (висока зона), що також супроводжувалося істотним приростом урожаю кукурудзи (від 7,95 до 11,05 т/га у 2023 році та від 5,75 до 9,47 т/га у 2024 році). Це цілком узгоджується з результатами довготривалого дослід у Швеції, де кожен додатковий відсоток органічної речовини забезпечував приблизно +16 % до врожайності [15].

Крім того, дані з США вказують, що кожен додатковий 1 % гумусу асоціюється із середнім приростом урожаю на 0,83 т/га [16]. Оскільки гумус не лише покращує живлення, а й підвищує водоутримання орного шару, його ефективність особливо висока в посушливі роки, як це було доведено у США під час періодів сильної посухи [17].

Між усіма трьома агрохімічними показниками ґрунту (рН, СЕС, гумус) та врожайністю кукурудзи існує тісний позитивний кореляційний зв'язок. Високопродуктивні зони характеризуються оптимальними показниками кислотності, обмінної здатності ґрунту та вмістом органічної речовини, що дозволяє культурі повніше реалізовувати свій біологічний потенціал. Це узгоджується

Таблиця 1

Зв'язок агрохімічних показників ґрунту із урожайністю кукурудзи в різних зонах продуктивності

Зона продуктивності	рН _{cl}	Ємність катіонного обміну, мг-екв/100 г ґрунту	Уміст гумусу, %	Урожайність, т/га	
				2023 р.	2024 р.
Низька	4,93	5,03	1,00	7,95	5,75
Середня	5,40	8,88	1,60	9,64	7,87
Висока	6,30	11,07	2,30	11,05	9,47

з висновками сучасних ґрунтознавчих досліджень: збалансовані агрохімічні властивості ґрунту є ключовою передумовою досягнення високої урожайності кукурудзи [18].

Чітка позитивна кореляція простежувалася між вмістом основних макроелементів у ґрунті (особливо азоту та фосфору) й урожайністю кукурудзи (табл. 2). Високопродуктивна зона має найвищі рівні, як амонійного (10,72 мг/кг), так і нітратного азоту (7,30 мг/кг), тоді як у низькопродуктивній зоні – відповідно лише 3,98 та 5,10 мг/кг. Це узгоджується з сучасними даними, які підтверджують синергійний ефект змішаного азотного живлення ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$): саме така комбінація дає максимальний приріст урожайності кукурудзи за рахунок ефективного засвоєння азоту та мінімізації іонного дисбалансу (табл. 2) [19, 20].

Фосфор також продемонстрував сильний вплив: при збільшенні його вмісту від 34,00 до 85,35 мг/кг урожайність зросла на понад 3 т/га у 2023 році. Це підтверджує висновки про критичну роль фосфору у формуванні генеративних органів і синтезі енергії – зокрема, за даними польових досліджень у Китаї, внесення Р підвищувало урожайність на 10–16 % [21].

Цікаво, що калій у високій зоні був лише незначно вищим, ніж у низькій (90,05 проти 91,15 мг/кг), однак при зниженні калію у середній зоні (77,31 мг/кг) також зменшувався врожай. Це свідчить про участь елемента у підтриманні водного режиму і транспорту вуглеводів – в умовах дефіциту калію, навіть за достатнього вмісту азоту та фосфору, урожай знижується [22].

Розподіл мезоелементів по зонах продуктивності та їх вплив на урожайність подано у таблиці 3. Кальцій відіграє важливу роль у структурі ґрунту. Збільшення його вмісту від 667 до 1892 мг/кг супроводжувалося зростанням урожайності з 7,95 до 11,05 т/га (табл. 3), що узгоджується з даними про ефективність вапнування: внесення Са сприяє нейтралізації кислотності та покращує доступність інших елементів, зокрема в умовах посухи та стресів [23, 24].

Магній також показав прямий зв'язок із показниками урожайності кукурудзи: за зростання вмісту Mg з 51,08 до 120,75 мг/кг урожайність зросла на 2,7–3,0 т/га. Цей

ефект відповідає висновкам метааналізу, що довів значущий приріст продуктивності кукурудзи від Mg-добрив у разі його дефіциту [25]. Синергія з калієм також підтверджена польськими дослідженнями: комбіноване внесення K і Mg давало істотно вищий врожай, ніж K окремо [26]. Щодо сірки, її зворотна градація у таблиці (найвищий вміст – у низькій зоні) свідчить про ймовірну неефективність використання цього елемента. Вищий вміст S не супроводжувався вищим урожаєм, а спостерігалася обернена залежність. Це може бути наслідком низького вмісту інших елементів або незбалансованого співвідношення азоту й сірки. Сучасні дослідження доводять, що ефективність сірки розкривається лише за дефіциту та достатнього рівня забезпеченості азотом [27, 28]. Дані таблиць демонструють ключову роль збалансованого макро- і мезоелементного живлення у формуванні урожайності кукурудзи. Найбільший внесок роблять азот і фосфор – як підтверджують і експерименти, і практичні досліди. Вплив калію, магнію та кальцію значною мірою опосередкований – через підтримку фізіологічних функцій і адаптацію до стресів. Щодо сірки – її ефективність потребує окремого контролю з урахуванням азотного балансу.

Вміст цинку зростає від 0,47 мг/кг (низька зона) до 0,75 мг/кг (висока зона), що супроводжується стабільним приростом урожайності на 3,0–3,5 т/га (табл. 4). Це узгоджується з висновками метааналізу, згідно з яким цинкові добрива підвищували врожайність кукурудзи в середньому на 17 % за умов дефіциту [29]. Зокрема, за рівня $\text{Zn} < 0,5$ мг/кг ризик дефіциту високий, що підтверджує потребу в корекції у низькопродуктивній зоні (табл. 4).

Вміст міді зростає від 0,34 до 0,51 мг/кг між зонами. Усі значення перебувають у діапазоні, потенційно близькому до межі дефіциту на піщаних або високогумусних ґрунтах. За результатами польових досліджень у Єгипті, додавання Cu в умовах її нестачі дало приріст урожайності кукурудзи до 1,0 т/га [30]. Тож поступове зростання вмісту міді могло частково сприяти підвищенню врожайності, особливо в умовах стресу. Інверсійна залежність: найвищий вміст Mn – у середній зоні (38,6 мг/кг), найнижчий – у високій (17,1 мг/кг). Проте, урожай у високій

Таблиця 2

Вміст макроелементів у ґрунті залежно від зони продуктивності та його вплив на урожайність кукурудзи

Зона продуктивності	Амонійний азот	Нітратний азот	Фосфор	Калій	Урожайність, т/га	
	мг/кг				2023 р.	2024 р.
Низька	3,98	5,10	34,00	91,15	7,95	5,75
Середня	7,60	6,62	66,47	77,31	9,64	7,87
Висока	10,72	7,30	85,35	90,05	11,05	9,47

Таблиця 3

Вміст мезоелементів у ґрунті та його вплив на урожайність кукурудзи в різних зонах продуктивності

Зона продуктивності	Кальцій	Залізо	Магній	Сірка	Урожайність, т/га	
	мг/кг				2023 р.	2024 р.
Низька	667	64,80	51,08	4,75	7,95	5,75
Середня	1234	53,31	85,54	4,03	9,64	7,87
Висока	1892	47,95	120,75	3,60	11,05	9,47

Таблиця 4

Вміст мікроелементів у ґрунті та його вплив на урожайність кукурудзи в різних зонах продуктивності

Зона продуктивності	Цинк	Мідь	Марганець	Бор	Урожайність, т/га	
	мг/кг				2023 р.	2024 т/га
Низька	0,47	0,34	31,5	1,0	7,95	5,75
Середня	0,62	0,43	38,6	1,7	9,64	7,87
Висока	0,75	0,51	17,1	1,5	11,05	9,47

зоні було отримано найвищий, що підтверджує загальну закономірність: кукурудза рідко реагує на Mn у разі достатнього забезпечення [31]. Позитивний результат спостерігається лише за дефіциту Mn (нижче 15 мг/кг), тому, навіть за зниження вмісту до 17,1 мг/кг, імовірно, дефіциту не було.

Найнижчий вміст бору зафіксовано у низькопродуктивній зоні – 1,0 мг/кг. Висока і середня зони мають підвищений вміст (1,5–1,7 мг/кг), що супроводжується кращим виповненням качанів і вищою врожайністю. Це узгоджується з польовими дослідженнями, які показують 3,0–6,0 % приросту урожаю кукурудзи за позакореневого внесення бору на ґрунтах із граничним забезпеченням [32].

Зі зростанням вмісту цинку, міді та бору у ґрунті спостерігається поступове підвищення врожайності, що свідчить про важливість їх забезпечення. Найбільш імовірно лімітуючим у низькопродуктивній зоні був Zn, вміст

якого менше 0,5 мг/кг. Ефект заліза та марганцю, згідно з дослідженнями, проявляється лише за дефіциту, тому за достатніх концентрацій внесення неефективне. У цьому випадку найвиразніший зв'язок урожайності прослідковується з забезпеченістю Zn і B, що відповідає сучасним агрохімічним підходам до оптимізації мікроелементного живлення.

Нами були проведені розрахунки числових зв'язків між ключовими агрохімічними характеристиками ґрунту (макро-, мезо- і мікроелементами) та урожайністю кукурудзи у 2023 і 2024 рр. Кореляційні коефіцієнти (від -1 до +1) дозволяють виявити, які саме фактори найбільше впливали на врожай, і які з них є позитивними, негативними чи нейтральними регуляторами продуктивності (рис. 1).

Уміст гумусу в ґрунті виявився одним із найбільш впливових факторів урожайності. Така сильна позитивна кореляція підтверджує важливу роль гумусу

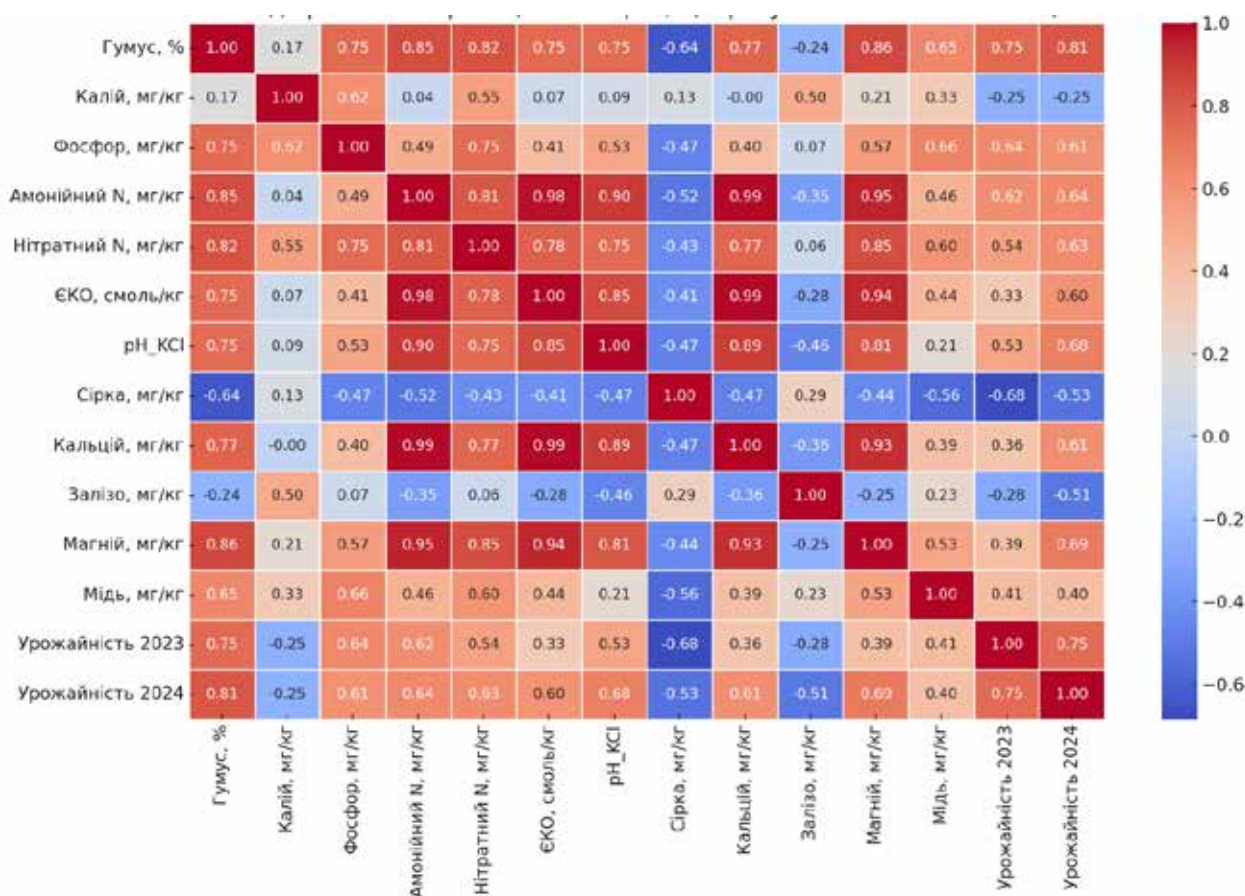


Рис. 1. Коефіцієнти кореляції між вмістом елементів живлення в ґрунті та урожайністю кукурудзи

у формуванні продуктивності кукурудзи. Органічна речовина покращує структуру ґрунту, водоутримання, а також є джерелом макро- і мікроелементів. У шведських стаціонарних дослідках було встановлено, що кожне збільшення гумусу на 1 % може забезпечити +10–16 % приросту урожайності за оптимального живлення [17]. Висока кореляція між вмістом NH_4^+ і урожайністю підкреслює важливість амонійної форми азоту в ранні фази розвитку кукурудзи. Амоній засвоюється без потреби у відновленні, що дозволяє рослинам економити енергію. У польових умовах комбінація $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ вважається оптимальною, бо забезпечує збалансоване живлення і сприяє кращому росту [19, 20]. Виявлена сильна позитивна кореляція із врожайністю обумовлена функцією магнію, як центру хлорофілу, та регулятора фотосинтезу. Крім того, Mg покращує засвоєння фосфору і бере участь у транспортуванні асимілятів. Польські досліді підтверджують, що застосування Mg особливо ефективне за підвищених доз калію і азоту [26]. Цей показник відображає здатність ґрунту утримувати поживні іони. Високі значення СЕС пов'язують із вищою родючістю, кращою буферністю та підвищеною здатністю забезпечувати рослини елементами живлення [13]. Хоча кукурудза потребує Si в малих кількостях, результати вказують на її вагоме значення в умовах дефіциту або стресу. Зокрема, за посухи, мідь сприяє зміцненню клітинних стінок, зменшує окисдаційний стрес і покращує використання води [30].

Фосфор необхідний для розвитку кореневої системи, генеративних органів і енергетичних процесів. Його позитивний зв'язок з урожаєм підтверджується експериментами, в яких фосфорне удобрення забезпечувало прибавки врожаю до 15 % [21]. Сприятливе кислотнo-лужне середовище ($\text{pH} \approx 6,0\text{--}7,0$) є критичним для оптимального поглинання елементів. На надмірно кислих ґрунтах засвоєння P, Ca, Mg ускладнене. Тому позитивний зв'язок pH із урожаєм вказує на важливість регулювання кислотності (наприклад, вапнування) [11].

Слабкий негативний зв'язок може бути наслідком антагонізму між K^+ і Mg^{2+} або надмірного внесення калію без реальної потреби. У деяких випадках надлишок калію блокує поглинання магнію, що негативно позначається на фотосинтезі [22, 26]. Уміст S був найвищим у зоні з найнижчим урожаєм, у результаті чого була встановлена негативна низька кореляція з усіма показниками. Очевидно, що внесення сірки без урахування потреби й азотного забезпечення, не сприяє підвищенню врожаю. Згідно з літературою, сірка працює ефективно лише за її дефіциту та на фоні активного азотного живлення [27].

Виявлений негативний зв'язок вказує, що навіть за високого вмісту Fe урожайність була низькою – ймовірно, через інші обмежувальні фактори. Попередні результати досліджень підтверджують, що додаткове внесення заліза не має ефекту без явного дефіциту, а надлишок Fe може викликати антагонізм з іншими мікроелементами [28, 31].

Кореляційна матриця підтверджує ключову роль органічної речовини, амонійного азоту, магнію, СЕС і міді у формуванні високої урожайності кукурудзи.

Водночас, сірка, залізо та надмірний вміст калію можуть негативно впливати на формування врожайності у разі порушення балансу живлення. Ці результати узгоджуються з висновками багатьох польових досліджень 2015–2025 років і підкреслюють необхідність комплексного підходу до удобрення, з урахуванням фактичного забезпечення елементами та стану ґрунту. Порівняння отриманих результатів з міжнародними дослідженнями підтверджує наші висновки. Так, O'Halloran і McPhee зазначають, що найбільший ефект від VRS досягається на полях із різномірною кислотністю та вмістом органіки, що ми чітко спостерігали у нашому дослідженні [1].

Висновки. Проведене дослідження дозволило комплексно оцінити вплив агрохімічних показників ґрунту на формування врожайності кукурудзи за різних рівнів продуктивності. Аналіз фактичних даних урожайності 2023 і 2024 рр. у поєднанні з агрохімічними характеристиками ґрунту та кореляційною матрицею підтвердив тісний кореляційний взаємозв'язок між забезпеченням елементами живлення і продуктивністю культури.

Найвищий позитивний вплив на урожайність мали такі показники, як вміст гумусу, амонійна форма азоту, магній, ємність катіонного обміну (ЄКО) і реакція ґрунтового середовища (pH). Фосфор показав впевнене позитивне значення у формуванні структури врожаю та енергетичного обміну, сприяв розвитку кореневої системи та наливу зерна.

Водночас встановлено, що деякі елементи, зокрема калій, сірка і залізо, можуть мати негативний або слабкий вплив на урожай за умов їхнього надлишкового вмісту або незбалансованого внесення.

Отримані результати підкреслюють важливість комплексного підходу до мінерального живлення кукурудзи з урахуванням хімічних властивостей ґрунту, вмісту доступних форм елементів і взаємодії між ними. Збалансоване забезпечення культури макро- та мікроелементами, адаптоване до зональної продуктивності, дозволяє повніше реалізувати потенціал гібридів і підвищити ефективність використання добрив. Це особливо актуально в умовах сучасного інтенсивного землеробства та кліматичних ризиків, що зумовлює доцільність впровадження елементів точного землеробства, зокрема диференційованого внесення добрив і насіння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. O'Halloran J., McPhee J. Variable Rate Technologies Factsheet. *Queensland Department of Agriculture and Fisheries*. 2020. 13 p.
2. AGRIVI. Variable Rate Technology: Everything You Need to Know. 2022. URL : <https://www.agrivi.com/blog/variable-rate-technology/> (дата звернення: 31.03.2025).
3. Variable-rate in corn sowing for maximizing grain yield. *Scientific Reports. Nature*. URL : <https://www.nature.com/articles/s41598-021-92238-4> (дата звернення: 31.03.2025).
4. Variable Rate Seeding in Precision Agriculture: Recent Advances and Future Perspectives / E. Sarauskis et al. *Agriculture*. 2022. Vol. 12, no 2. P. 305. DOI: 10.3390/agriculture12020305

5. Corteva Agriscience. Putting Variable-Rate Seeding to Work on Your Farm. *Pioneer Agronomy Articles*. URL : https://www.pioneer.com/us/agronomy/variable_rate_seeding.html (дата звернення: 31.03.2025).
6. Hanson E. NDSU Agriculture Communication. Spotlight on Economics: Economic Lessons From Precision Agriculture in N.D. URL : <https://www.ag.ndsu.edu/news/columns/spotlight-on-economics/spotlight-on-economics-economic-lessons-from-precision-agriculture-in-n-d> (дата звернення: 31.03.2025).
7. Soil Fertility and Fertilizers : 8th ed. / J. L. Havlin et al. *Upper Saddle River : Pearson Education*. 2013. 528 p.
8. Tabachnick B.G., Fidell L.S. 2013. Using multivariate statistics : 6th ed. Boston, MA : Pearson.
9. Lindsay W.L., Norvell W.A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*. 1978. Vol. 42(3). P. 421–428.
10. FAO. The future of food and agriculture – Drivers and triggers for transformation. Rome: FAO. 2022. URL : <https://www.fao.org/3/cc1731en/cc1731en.pdf> (дата звернення: 31.03.2025).
11. Breeding Maize for Tolerance to Acidic Soils: A Review / L.N. Tandzi et al. *Agronomy*. 2018. Vol. 8, no. 6. P. 84. DOI : 10.3390/agronomy8060084.
12. Sirisuntornlak N. et al. Interactive Effects of Silicon and Soil pH on Growth, Yield and Nutrient Uptake of Maize. *Silicon*. 2021. Vol. 13(1). P. 289–299. DOI : 10.1007/s12633-020-00427-z.
13. Goda D.A. et al. The optimization of calcareous soil cation exchange capacity via the feather hydrolysate and N-P fertilizers integration. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 4676. DOI : 10.1038/s41598-025-86941-9.
14. Can yield variability be explained? Integrated assessment of maize yield gaps across smallholders in Ghana / M.P. Van Loon et al. *Field Crops Research*. 2019. Vol. 236. P. 132–144. DOI : 10.1016/j.fcr.2019.03.022.
15. Kätterer T., Bolinder M.A. Response of maize yield to changes in soil organic matter in a Swedish long-term experiment. *European Journal of Soil Science*. 2024. Vol. 75, no. 2. Article e13482. DOI : 10.1111/ejss.13482.
16. Soil organic matter protects US maize yields and lowers crop insurance payouts under drought / D. A. Kane et al. *Environmental Research Letters*. 2021. Vol. 16(4). Article 044018. DOI : 10.1088/1748-9326/abe492.
17. Soil organic matter and maize yield responses under drought conditions in a long-term field trial in Sweden / T. Kätterer et al. *Publications of the Swedish University of Agricultural Sciences*. 2024. ID: 129318. URL : <https://publications.slu.se/?file=publ/show&id=129318>
18. Soil Organic Carbon, Cation Exchange Capacity, and Maize (*Zea mays*) Response to Biochar and Nitrogen Fertilizer Amendments / M.O. Kareem et al. *Journal of Scientific Research and Reports*. 2025. Vol. 31, no. 5. P. 278–283. DOI : 10.9734/jsrr/2025/v31i53025.
19. Wierzbowska J., Sienkiewicz S., Świątły A. Yield and Nitrogen Status of Maize Fertilized with Urea–Ammonium Nitrate Solution Enriched with P, Mg or S. *Agronomy*. 2022. Vol. 12(9). Article 2099. DOI : 10.3390/agronomy12092099.
20. Nitrogen Fertilizers Technologies for Corn in Two Yield Environments in South Brazil / B.M.A.R. Cassim et al. *Plants*. 2022. Vol. 11(14). Article 1890. DOI : 10.3390/plants11141890.
21. Impact of Different Phosphorus Fertilizers on Yield under Wheat–Maize Rotation / C. Liang et al. *Agronomy*. 2024. Vol. 14(6). Article 1317. DOI : 10.3390/agronomy14061317.
22. Effect of Long-Term Potassium Application on Crop Yield and K Use Efficiency in Maize–Wheat Rotation / B. He et al. *Agronomy*. 2022. Vol. 12(10). Article 2565. DOI : 10.3390/agronomy12102565.
23. Calcium Sprays Improve Yield and Grain Quality of Maize under Drought Stress / M. Abbas et al. *Agriculture*. 2021. Vol. 11(4). Article 285. DOI : 10.3390/agriculture11040285.
24. Influence of Calcium on Development of Corn in Hydroponics / V.C.M. Gatti et al. *AgriEngineering*. 2023. Vol. 5(1). P. 39. DOI : 10.3390/agriengineering5010039.
25. Magnesium Fertilization Improves Crop Yield in Most Production Systems: A Meta-Analysis / Z. Wang et al. *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 10. Article 1727. DOI : 10.3389/fpls.2019.01727.
26. Barłóg P., Frącowiak-Pawlak K. Effect of Potassium and Magnesium Fertilization on Maize Yield. *Plant, Soil and Environment*. 2008. Vol. 54(7). P. 303–311.
27. Sulfur Application Improves Nutritional Quality and Amino Acid Balance in Maize Grain / H. Wang et al. *Agronomy*. 2023. Vol. 13(12). Article 2912. DOI : 10.3390/agronomy13122912.
28. Corn Response to Sulfur Fertilization in Iowa / J.E. Sawyer et al. *Better Crops*. 2015. Vol. 99(3). P. 6–8.
29. Maize grain yield and grain zinc concentration response to zinc fertilization: A meta-analysis / D. Mutambu et al. *Heliyon*. 2023. Vol. 9(5). Article e16040. DOI : 10.1016/j.heliyon.2023.e16040.
30. Copper nanoparticle application enhances plant growth and grain yield in maize under drought stress conditions / D.V. Nguyen et al. *Journal of Plant Growth Regulation*. 2022. Vol. 41. P. 364–375. DOI : 10.1007/s00344-021-10301-w.
31. Effect of Foliar Micronutrients (B, Mn, Fe, Zn) on Maize Grain Yield, Micronutrient Recovery, Uptake, and Partitioning / Z.P. Stewart et al. *Plants*. 2021. Vol. 10(3). Article 528. DOI : 10.3390/plants10030528.
32. Kaur G., Nelson K.A. Effect of foliar boron fertilization of fine textured soils on corn yields. *Agronomy*. 2015. Vol. 5(1). P. 1–18. DOI : 10.3390/agronomy5010001.

REFERENCES:

1. O'Halloran, J., & McPhee, J. (2020). *Variable Rate Technologies Factsheet*. Queensland Department of Agriculture and Fisheries, 13.
2. AGRIVI. (2022). *Variable Rate Technology: Everything You Need to Know*. Retrieved from <https://www.agrivi.com/blog/variable-rate-technology/>
3. *Variable-rate in corn sowing for maximizing grain yield*. *Scientific Reports, Nature*. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/s41598-021-92238-4>
4. Sarauskis, E., Kazlauskas, M., Naujokiene, V., Brochene, I., Steponavicius, D., Romanekas, K., & Jasinskis, A. (2022). *Variable seeding rates in precision agriculture: latest advances and perspectives*. *Agriculture*, 12(2), 305. doi:10.3390/agriculture12020305
5. Corteva Agriscience. (2025). *Putting Variable-Rate Seeding to Work on Your Farm [Electronic resource]*. Pioneer Agronomy Articles. Retrieved from https://www.pioneer.com/us/agronomy/variable_rate_seeding.html

6. Hanson, E. *Spotlight on Economics: Economic Lessons From Precision Agriculture in N.D.* NDSU Agriculture Communication. Retrieved from <https://www.ag.ndsu.edu/news/columns/spotlight-on-economics/spotlight-on-economics-economic-lessons-from-precision-agriculture-in-n-d>
7. Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2013). *Soil Fertility and Fertilizers*: 8th ed. Upper Saddle River: Pearson Education. 528.
8. Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2013). *Using multivariate statistics*: 6th ed. Boston, MA: Pearson.
9. Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). *Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper*. Soil Science Society of America Journal, 42(3), 421-428.
10. FAO. (2022). *The future of food and agriculture – Drivers and triggers for transformation*. Rome: FAO. Retrieved from <https://www.fao.org/3/cc1731en/cc1731en.pdf>
11. Tandzi, L.N., Mutengwa, C.S., Ngonkeu, E.L.M., & Gracen, V. (2018). *Breeding maize for tolerance to acidic soils: A review*. Agronomy, 8(6), 84. doi : 10.3390/agronomy8060084
12. Sirisuntornlak, N., Ullah, H., Sonjaroon, W., Anusontpornperm, S., Arirob, W., & Datta, A. (2021). *Interactive effects of silicon and soil pH on growth, yield and nutrient uptake of maize*. Silicon, 13(1), 289–299. doi : 10.1007/s12633-020-00427-z
13. Goda, D.A., El-Gamal, E.H., Rashad, M., & Abdel-Fattah, Y.R. (2025). *The optimization of calcareous soil cation exchange capacity via the feather hydrolysate and N-P fertilizers integration*. Scientific Reports, 15, Article 4676. doi : 10.1038/s41598-025-86941-9
14. van Loon, M.P., Adjei-Nsiah, S., Descheemaeker, K., Akotsen-Mensah, C., van Dijk, M., Morley, T., van Ittersum, M.K., & Reidsma, P. (2019). *Can yield variability be explained? Integrated assessment of maize yield gaps across smallholders in Ghana*. Field Crops Research, 236, 132–144. doi : 10.1016/j.fcr.2019.03.022
15. Kätterer, T., & Bolinder, M.A. (2024). *Response of maize yield to changes in soil organic matter in a Swedish long-term experiment*. European Journal of Soil Science, 75(2), e13482. doi : 10.1111/ejss.13482
16. Kane, D.A., Rogé, P., Mueller, N.D., Barford, C.C., Jahn, M.M., & Six, J. (2021). *Soil organic matter protects US maize yields and lowers crop insurance payouts under drought*. Environmental Research Letters, 16(4), 044018. doi : 10.1088/1748-9326/abe492
17. Kätterer, T., Bolinder, M.A., Andrén, O., & Kirchmann, H. (2024). *Soil organic matter and maize yield responses under drought conditions in a long-term field trial in Sweden*. Publications of the Swedish University of Agricultural Sciences. ID: 129318. Retrieved from <https://publications.slu.se/?file=publ/show&id=129318>
18. Kareem, M.O., Hussaini, A.L., Odofin, A.J., Azeez, B.A., Musa, B.M., & Jimoh, L.T. (2025). *Soil organic carbon, cation exchange capacity, and maize (Zea mays) response to biochar and nitrogen fertilizer amendments*. Journal of Scientific Research and Reports, 31(5), 278-283. doi : 10.9734/jsrr/2025/v31i53025
19. Wierzbowska, J., Sienkiewicz, S., & Świątły, A. (2022). *Yield and nitrogen status of maize fertilized with urea–ammonium nitrate solution enriched with P, Mg or S*. Agronomy, 12(9), 2099. doi : 10.3390/agronomy12092099
20. Cassim, B.M.A.R., Besen, M.R., Kachinski, W.D., Macon, C.R., de Almeida Junior, J.H.V., Sakurada, R., Inoue, T.T., & Batista, M.A. (2022). *Nitrogen fertilizers technologies for corn in two yield environments in South Brazil*. Plants, 11(14), 1890. doi : 10.3390/plants11141890
21. Liang, C., Liu, X., Lv, J., Zhao, F., & Yu, Q. (2024). *Impact of different phosphorus fertilizers on yield under wheat-maize rotation*. Agronomy, 14(6), 1317. doi : 10.3390/agronomy14061317
22. He, B., Xue, C., Sun, Z., Ji, Q., Wei, J., & Ma, W. (2022). *Effect of long-term potassium application on crop yield and K use efficiency in maize-wheat rotation*. Agronomy, 12(10), 2565. doi : 10.3390/agronomy12102565
23. Abbas, M.; Abdel-Lattif, H.; Shahba, M. (2021). *Calcium sprays improve yield and grain quality of maize under drought stress*. Agriculture, 11(4), 285. doi : 10.3390/agriculture11040285
24. Moraes Gatti, V.C.; da Silva Barata, H.; Silva, V.F.A.; da Cunha, F.F.; de Oliveira, R.A.; de Oliveira, J.T.; Silva, P.A. (2023). *Influence of calcium on development of corn in hydroponics*. AgriEngineering, 5(1), 39. doi : 10.3390/agriengineering5010039
25. Wang, Z., Hassan, M., Nadeem, F., Wu, L., Zhang, F., & Li, X. (2020). *Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: A meta-analysis*. Frontiers in Plant Science, 10, 1727. doi : 10.3389/fpls.2019.01727
26. Bartóg, P., & Frącowiak-Pawlak, K. (2008). *Effect of potassium and magnesium fertilization on maize yield*. Plant, Soil and Environment, 54(7), 303-311.
27. Wang, H., Cui, S., Fu, J., Gong, H., Liu, S. (2023). *Sulfur application improves nutritional quality and amino acid balance in maize grain*. Agronomy, 13(12), 2912. doi : 10.3390/agronomy13122912
28. Sawyer, J.E., Lang, B., & Barker, D. (2015). *Corn response to sulfur fertilization in Iowa Corn Production*. Better Crops, 99(3), 6-8.
29. Mutambu, D., Kihara, J., Mucheru-Muna, M., Bolo, P., & Kinyua, M. (2023). *Maize grain yield and grain zinc concentration response to zinc fertilization: A meta-analysis*. Heliyon, 9(5), e16040. doi : 10.1016/j.heliyon.2023.e16040
30. Nguyen, D.V., Nguyen, H.M., Le, N.T., Nguyen, K.H., Nguyen, H.T., Le, H.M., Nguyen, A.T., Dinh, N.T.T., Hoang, S.A., & Ha, C.V. (2022). *Copper nanoparticle application enhances plant growth and grain yield in maize under drought stress conditions*. Journal of Plant Growth Regulation, 41, 364–375. doi : 10.1007/s00344-021-10301-w
31. Stewart, Z.P., Paparozzi, E.T., Wortmann, C.S., Jha, P.K., & Shapiro, C.A. (2021). *Effect of foliar micronutrients (B, Mn, Fe, Zn) on maize grain yield, micronutrient recovery, uptake, and partitioning*. Plants, 10(3), 528. doi : 10.3390/plants10030528
32. Kaur, G., & Nelson, K.A. (2015). *Effect of foliar boron fertilization of fine textured soils on corn yields*. Agronomy, 5(1), 1-18. doi : 10.3390/agronomy5010001

Гарбар Л.А., Васківський Б.С. Вплив елементів живлення на формування зон продуктивності кукурудзи

Мета. Метою дослідження було встановлення впливу просторової варіабельності агрохімічних характеристик ґрунту на формування зон продуктивності кукурудзи та оцінка доцільності застосування технології змінних норм висіву (VRS) у виробничих умовах господарства. Основний акцент зроблено на верифікації гіпотез щодо впливу окремих елементів родючості на урожайність та обґрунтуванні зонального підходу до управління густотою посіву. **Методи.** Польові дослідження проводилися у 2023–2024 рр. на площі понад 1000 га в зоні переходу Полісся та Лісостепу. Поля було поділено на 82 зони продуктивності на основі агрохімічних і просторових параметрів. Відібрані ґрунтові зразки (0–20 см, 0–30 см) досліджували за показниками кислотності, органічної речовини, катіонно-обмінної ємності, макро- та мікроелементного складу. Для обробки результатів застосовано геоінформаційне моделювання, кореляційний аналіз та тематичне картування в середовищах QGIS та Python. **Результати.** Дослідження виявило стабільні позитивні зв'язки урожайності з вмістом органічної речовини, катіонною ємністю обміну та pH. Найвищу кореляцію з урожайністю мали доступний фосфор, OM та CEC. Водночас резервний фосфор і надлишкові концентрації мікроелементів (Zn, Mn) мали негативний вплив. Просторове моделювання підтвердило наявність стабільних зон з підвищеною або зниженою продуктивністю. Результати демонструють доцільність VRS у диференційованому управлінні нормами висіву на основі зональної родючості. **Висновки.** Просторово-агрохімічний аналіз дозволив встановити ключові фактори формування продуктивності кукурудзи. Використання агрохімічних індикаторів є обґрунтованим для побудови карт зонування та розробки VRS-рекомендацій. Технологія VRS довела свою ефективність і рентабельність в умовах різнорідних ґрунтів господарства.

Ключові слова: просторовий аналіз, агрохімічні показники, диференційоване живлення, точне землеробство, родючість ґрунту, густота посіву, геоінформаційні системи, врожайність.

Harbar L.A., Vaskivskyi B.S. The impact of nutrient elements on the formation of corn productivity zones

Purpose. The purpose of this study was to assess the impact of spatial variability in soil agrochemical characteristics on the formation of maize productivity zones and to evaluate the feasibility of implementing variable rate seeding (VRS) technology under real farm conditions. The research focused on verifying hypotheses regarding the influence of key fertility indicators on yield and justifying a zonal approach to seeding rate management. **Methods.** Field trials were conducted in 2023–2024 across an area exceeding 1000 hectares in the Polissia–Forest–Steppe transition zone of Ukraine. The land was divided into 82 productivity zones based on agrochemical and spatial parameters. Soil samples (0–20 cm, 0–30 cm) were analyzed for pH, organic matter, cation exchange capacity (CEC), macro- and micro-nutrient content. Data analysis included geoinformation modeling, Pearson correlation analysis, and thematic mapping using QGIS and Python. **Results.** The study revealed strong and consistent positive correlations between maize yield and the levels of organic matter, CEC, and pH. The highest correlations with yield were observed for available phosphorus, OM, and CEC. In contrast, reserve phosphorus and excessive levels of Zn and Mn showed a negative relationship with productivity. Spatial modeling confirmed the presence of stable zones with either high or low yield potential. The findings support the application of VRS as a precision tool for differentiated seeding based on spatial fertility patterns. **Conclusions.** The spatial-agrochemical approach proved effective in identifying key determinants of maize productivity. Using soil indicators (OM, CEC, pH, P_{2O_5} Mach) for productivity zone mapping and VRS optimization is scientifically justified. VRS technology demonstrated agronomic efficiency and profitability under heterogeneous soil conditions in the studied enterprise.

Key words: spatial analysis, agrochemical indicators, differentiated fertilization, precision agriculture, nutrient management, seeding density, GIS modeling, yield.

Дата першого надходження рукопису до видання: 05.09.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 27.10.2025

Дата публікації: 28.11.2025