

7. Boiko T., Dementieva O. The tree vegetation of the Kherson State Agrarian University Arboretum. *Ukrainian journal of ecology*. 2018. Vol. 8, № 2. С. 120–127. DOI: [http://dx.doi.org/10.15421/2018\\_318](http://dx.doi.org/10.15421/2018_318).
8. Бойко Т.О., Демет'єва О.І., Котовська Ю.С. Оцінювання біолого-екологічних властивостей деревних ліан в умовах міста Херсон. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019, т. 29, № 5. С. 31–35.
9. Бойко Т.О., Омелянова В.Ю., Дворна А.В. Еколого-біологічна характеристика деревних порід для створення рекреаційної зони в смт Каланчак (Херсонська область). *Таврійський науковий вісник*. 2020, № 112. С. 262–266.
10. Мельник Р.П. Конспект адвентивної фракції урбанофлори Миколаєва. *Чорноморськ. бот. ж.* 2009. Т. 5, № 2. С. 147–162.
11. Толмачев А.И. Богатство флор как объект сравнительного изучения. *Вестн. Ленингр. ун-та. Отд. Биол.* 1970. Вып. 2. № 9. С. 72–83.
12. Серебряков И.Г. Экологическая морфология растений. Жизненные формы покрытосеменных и хвойных. М. : Высшая школа. 1962. 380 с.
13. Природа Херсонської області : фізико-географічний нарис / відп. ред. М.Ф. Бойко. Київ : Фітосоціоцентр, 1998. 120 с.
14. Національний атлас України. Київ : ДНЗ «Картографія». 2009. 440 с.
15. Мельник Р.П., Бойко Т.О., Карташова І.І., Захарова М.Я. Засмічення агрофітоценозів Півдня України видами адвентивних рослин. *Природничий альманах*. Випуск 28. Херсон. 2020. С. 66–74.
16. Ковалевський С.Б., Шепелюк М.О. Дендрофлора міста Луцька : монографія. Луцьк, 2019. 197 с.
17. Солоненко А.М., Мальцева І.А., Подорожний С.М., Бредіхіна Ю.Л. Особливості озеленення баз відпочинку на північно-західному узбережжі Азовського моря. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. № 22(4). С. 62–67.

УДК 631.8:631.454:631.582

DOI <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.117.39>

---

## СИНЕРГІЗМ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ ЗА БІОЛОГІЗАЦІЇ ВИРОЩУВАННЯ КАРТОПЛІ В КОРОТКОРОТОЦІЙНІЙ СІВОЗМІНІ ПОЛІССЯ

---

**Грабар І.Г.** – д.т.н., професор, завідувач кафедри процесів машин і обладнання в агроінженерії,

Поліський національний університет

**Матвійчук Б.В.** – к.с.-г.н., старший викладач кафедри біоресурсів, аквакультури та природничих наук,

Поліський національний університет

**Матвійчук Н.Г.** – к.с.-г.н., завідувач виміральної лабораторії

Навчально-наукового центру екології та охорони навколишнього середовища,  
Поліський національний університет

*В умовах Правобережного Полісся України на дослідному полі Житомирського національного агроєкологічного університету в стаціонарному польовому досліді виконано дослідження із вивчення різних систем біологізації землеробства у технології вирощування картоплі у короткоротаційній сівозміні з використанням гною, побічної продукції*

---

сільськогосподарських культур, сидерату, біологічного азоту (симбіотична азотфіксація) та різних їхніх поєднань.

Системи удобрення розраховано балансовим методом. Так, за різних співвідношень мінеральних та органічних добрив у ґрунт надходить однакова кількість елементів живлення. Також отримано результати дослідження біологічного контролю (загортання соломі конюшини та зернових культур після їхнього обмолочування на насіння) за мінімізованого обробітку ґрунту під культури сівозміни.

Дослідження функції на екстремум показало, що органічна система живлення (сидерати – 20 т/га) за функцією приросту урожаю ( $\Delta Q = 2,5$  т/га) з використанням нелінійної моделі дозволяє розв'язати обернену задачу – знайти еквівалент сидератів органічній (без мінеральної) та мінеральній (без органічної) системі живлення.

Запропонована нелінійна модель функції приросту урожаю від органічної (ах) та мінеральної (бу) складників живлення, яка позитивно підтверджена експериментальними даними, що дозволяє запропонувати науково-обґрунтовану стратегію при вирощуванні картоплі, а не лінійність  $\Delta Q$  (ах; бу) свідчить про явище синергізму в біодинамічній системі «рослина – ґрунт – система живлення». Результати моделювання на нелінійній моделі поєднання мінеральної і органічної систем удобрення показали, що оптимальною для картоплі сорту Беллароза є органо-мінеральна система удобрення за співвідношення 75%:25%, за якої функція урожайності 13,1 т/га є дуже близькою до абсолютного максимуму.

**Ключові слова:** картопля, система удобрення, синергізм, математичне моделювання, польовий агрономічний досвід, чинники довкілля, режим живлення, зволоження ґрунту, тепловий режим, урожайність.

#### **Grabar I.G., Matviichuk B.V., Matviichuk N.G. Synergy of fertilization programs in the context of biologization of potato growing in a short-term crop rotation in Polissya region**

*Under the conditions of the Right-bank Polissya in Ukraine on the research field of Zhytomyr National University of Agriculture and Ecology during stationary field experiment, we have studied different systems of biologization of crop farming regarding the technology of potato growing in a short-term crop rotation with the application of manure, crop by-products, green manure, biological nitrogen (symbiotic nitrogen fixation) and their various combinations.*

*Fertilizer systems were designed through balance method: with different proportions of mineral and organic fertilizers soil receives equal amount of nutrient elements; we obtained the results of study of biological control (clover straw wrapping and grain crops after threshing for seeds) given that tillage of soil for crops rotation is minimum. The highest level was reached when the organic and mineral fertilizer system was applied (75% organic + 25% mineral fertilizers) and was in average from 28,5 to 36,4 t/ha. Among variants of research, organic and mineral system with application of half norm of manure and mineral fertilizers is in the second place, with this system yield in average was 31,1 t/ha.*

*Mineral system of fertilizers with yield of 29,2 r/ha is in the third place, it is 45,5% more than biological control. With organic system (manure 50 t/ha) potato tubers increased significantly in comparison with biological control, when they amounted to 28,6 t/ha (+8,5 t/ha compared to control). The least growth of crop yield was with organic system (green manure 20 t/ha) – 22,6 t/ha (+2,5 t/ha or 12,5% before biological control).*

*Suggested non-linear model of the function of yield growth from organic (ах) and mineral (бу) fertilizers components is confirmed by experiment findings, that on the one hand allows us to suggest scientifically grounded strategy of potato growing and on the other hand – non-linear character of  $\Delta Q$  (ах; бу) evidences synergy phenomenon in biodynamic system “plant – soil – fertilizer system”. Research of extremum of the function showed that organic fertilizer system (green manure – 20 t/ha) by yield growth function ( $\Delta Q = 2,5$  т/га) using non-linear model allows solving a reverse problem – find equivalent of green manure (without mineral) and mineral (without organic) fertilizer systems. Simulation results on non-linear models of combination of mineral and organic systems of fertilizers showed that for the potato variety Bellarosa organic and mineral system of fertilizers is the best possible option with correlation 75%:25%, under which function of yield 13,1 t/ha and is very approximate to absolute maximum.*

**Key words:** potato, fertilizer system, synergy, mathematical modeling, field agronomic experience, environmental factors, nutrition, soil moisture, thermal regime, yield.

**Постановка проблеми.** Проблеми, які виникли за умов ведення інтенсивного сільського господарства, змусили науковців шукати альтернативні системи землеробства. На зміну теперішнім системам розроблено нову, покликану замінити

інтенсивне землеробство на біологічне (екологічне). Її завданням є усунення багатьох негативних наслідків, що виникли внаслідок порушення основних біологічних законів кругообігу речовин та енергії за умов ведення інтенсивного землеробства [6; 14; 28].

Причина зростаючої популярності альтернативного землеробства полягає у його простоті та нешкідливості для довкілля. Прихильники цього напряму стверджують, що система застосування альтернативних методів уможливить поліпшення родючості ґрунтів, що у майбутньому приведе до збільшення урожайності сільськогосподарських культур до її рівня у традиційному землеробстві.

В Україні з кожним роком зростає кількість господарств, здатних вирощувати органічну продукцію. Станом на 01.01.2017 налічується 360 сертифікованих органічних господарств, а загальна площа сільськогосподарських угідь, на яких ведеться органічне виробництво, склала 411,2 тис. га. В Україні, починаючи з 1990 року, низка науково-дослідних інститутів і установ вищої освіти розпочали вивчення біологічної системи землеробства й запроваджувати окремі її елементи на регіональному рівні [1].

**Постановка завдання.** Метою досліджень є встановлення оптимального поєднання органічних та помірних норм мінеральних добрив за біологізації вирощування картоплі у короткоротаційній сівозміні на ясно-сірих лісових ґрунтах, спрямована на вирощування екологічно безпечної продукції, збереження та підвищення родючості ґрунтів, поліпшення їхньої екологічної стійкості в умовах Полісся України.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На думку провідних українських вчених-землеробів, широкомасштабне застосування альтернативного землеробства у чистому вигляді в нашій країні з метою розв'язання екологічних проблем навряд чи можливе. Вони не погоджуються з положеннями концепції альтернативного землеробства, зокрема щодо повної відмови від мінеральних добрив. Реальним, на їхню думку, є розроблення інтегрального землеробства, яке включало б ефективні заходи альтернативних систем і допускало б застосування в розумних межах мінеральних добрив і пестицидів [23; 44].

Перехід на біологічне землеробство має відбуватися з дотриманням основних його принципів: досягнення бездефіцитного, а краще позитивного балансу органічної речовини і біогенних елементів; дотримання науково-обґрунтованих сівозмін; ґрунтозахисних технологій обробітку ґрунту; інтенсифікація використання біологічного азоту; застосуванням усіх ресурсів органічних добрив: гній, нетоварна частка урожаю (солома зернових і зернобобових), а також післяжнивні посіви сидератів і застосування помірних доз мінеральних добрив; ефективний контроль за рівнем забур'яненості, ступенем ураження хворобами та шкідниками.

Як зазначає академік НААНУ В.Ф. Сайко [35], виробництво конкурентоспроможної продукції в нашій країні можна буде забезпечити за рівня урожайності зернових 40 ц/га, буряків цукрових – 350 ц/га, соняшнику – 20 ц/га, картоплі – 150 ц/га. Таких показників урожайності можна досягти в наших умовах на окремих типах ґрунтів навіть за мінімального застосування мінеральних добрив.

Серед вітчизняних учених дослідженням розвитку та запровадження біологізації сільськогосподарського виробництва займалися вчені М.К. Шикуча, П.І. Бойко, В.Ф. Сайко, В.П. Гудзь, І.А. Шувар, Ю.П. Манько, О.Ф. Смаглій, В.П. Стрельченко та інші [4; 14; 42; 44].

**Об'єкти та методика досліджень.** Повторність досліду – триразова. Площа посівної ділянки – 130 м<sup>2</sup> (4,7×27,6); площа облікової ділянки – 110 м<sup>2</sup> (4×27,6);

ширина захисної смуги – 2 м; ширина коридорів між полями сівозміни – 2 м. Ґрунт дослідних ділянок – ясно-сірий опідзолений глеюватий. Сорт картоплі – Беллароза. Технологія вирощування картоплі загальноприйнята для зони центральних районів Полісся України. Система обробітку ґрунту базується на обробітку без обертання скиби.

Сидеральна культура – редька олійна. Мінеральні добрива вносили під основний обробіток (суперфосфат, калійна сіль) та під передпосівну культивуацію (аміачна селітра). Органічні добрива у вигляді напівперепрілого гною вносили восени під основний обробіток. Захист від колорадського жука передбачав використання біопрепаратів. Збирання урожаю проводили поділянково уручну.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Інститути Національної академії аграрних наук (ННЦ «Інститут землеробства НААН», ННЦ «ІГА ім. О.Н. Соколовського», ІБКЦБ та інші) розробили науково-обґрунтовані методи ведення землеробства на біолого-екологічних принципах, що передбачають впровадження сівозмін із обов'язковим включенням бобових трав і сидератів; обмеження застосування мінеральних добрив, підвищення доз внесення гною, які забезпечать бездефіцитний баланс гумусу; використання комбінованої системи обробітку ґрунту; перехід на біологічні методи захисту рослин [7; 11].

Аналіз даних щодо урожайності сільськогосподарських культур показав, що відмова у біологічному землеробстві від мінеральних добрив, навіть за умови введення у структуру сівозміни бобових, використання побічної сільськогосподарської продукції і сидерату зумовлює істотні втрати урожаю. У той же час співставлення даних, отриманих на варіантах з інтенсивною промисловою й екологічною системами землеробства з мінімальними дозами мінеральних добрив і внесенням гною, свідчить про те, що за рівнем урожаю із більшості вирощуваних культур екологічна система істотно не поступається промисловій [38].

Картопля належить до дуже чутливих культур за реакцією на альтернативні методи вирощування, урожайність якої істотно зменшується порівняно із традиційним веденням землеробства [22]. Численні дослідження та практика картоплярів стверджують, що з усіх сільськогосподарських культур картопля характеризується найбільшою пластичністю, але нормально рости й розвиватися рослини можуть лише за оптимального забезпечення світлом, теплом, повітрям, водою та елементами живлення [21; 22].

За умов альтернативного землеробства підвищені вимоги картоплі до поживних речовин визначають і відповідну систему удобрення [11]. Органічні добрива сприяють збільшенню запасів елементів живлення (макро- і мікроелементів) у ґрунті, знижують його кислотність, підвищують вміст увібраних основ, вбирну здатність і буферність. Вони містять біологічно активні речовини – вітаміни та ауксини, необхідні для росту й розвитку рослин і мікроорганізмів, які здійснюють мінералізацію органічних речовин; ґрунт збагачується на мікрофлору, посилюється біологічна активність та виділення CO<sub>2</sub>.

Органічні добрива зменшують опір ґрунту у процесі механічного обробітку, поліпшують його тепловий режим і фітосанітарний стан, створюють умови для ефективнішого використання рослинами мінеральних добрив. Особливо важливе значення органічні добрива мають у зоні Полісся, де поширені ґрунти із низькою природною родючістю. Отримати високі урожаї сільськогосподарських культур без їхнього застосування майже не можливо. Нині внесення гною під картоплю зменшилося до 1,6 т/га посівної площі. Основним джерелом елементів живлення картоплі стали мінеральні добрива, доза яких збільшилася до 359 кг/га посівної

площі і ґрунтових запасів елементів живлення. За цих умов важливо знайти шляхи досягнення бездефіцитного балансу гумусу і забезпечити збереження та відтворення родючості ґрунтів.

На Поліссі України щорічно вирощують 7,5–8,0 млн тонн картоплі, що становить майже 40% від загального валового збору у країні. Порівняно з іншими культурами, картопля вимогливіша до забезпечення поживними речовинами, вона нагромаджує велику надземну вегетативну масу і масу бульб за відносно слабкого розвитку кореневої системи, тому потребує внесення значної кількості добрив [3; 8; 13]. Перехід агропромислового комплексу на ринкові засади господарювання спричинив докорінні зміни у спеціалізації більшості агроформвань, характерним наслідком яких є стрімке зменшення поголів'я тварин і виробництва гною.

Найбільш ефективним органічним добривом для картоплі є гній, якого катастрофічно не вистачає, тому необхідно шукати альтернативні джерела надходження органічної маси до ґрунту, які б сприяли не лише отриманню високих урожаїв, а й забезпечували поліпшення та охорону родючості ґрунтів. Сучасні економічні умови в аграрному секторі спонукають до пошуку технологій, побудованих на мобілізації дешевих місцевих мінеральних та органічних ресурсів. Перспективним у цьому аспекті є залучення до біологічного кругообігу вторинної продукції рослинництва – сидератів і виготовлення на їхній основі нового покоління органо-мінеральних біоактивних добрив, застосування яких у дозах на порядок нижчих порівняно із рекомендованими дозами традиційних органічних добрив не поступалося б, а то й перевищувало їх за ефективністю [31].

Рослинні рештки є незамінним джерелом відтворення органічних речовин у ґрунті, засобом покращення його структури, чинником регулювання рухомості елементів мінерального живлення, поживним та енергетичним субстратом для мікроорганізмів, продуцентом низькомолекулярних розчинних сполук, які мають принципове значення для метаболізму ґрунту [39]. Ефективною вважають таку систему удобрення, яка забезпечує поживними речовинами рослини картоплі рівномірно протягом вегетації. Ця потреба повністю задовольняється у разі збалансованого застосування органічних та мінеральних добрив [24; 29].

За результатами досліджень в умовах західного Лісостепу на сірих лісових поверхнево оглеєних ґрунтах встановлено, що нове органо-мінеральне біоактивне добриво «Екобіом», внесене нормою 3 т/га, забезпечило удвічі вищий приріст врожайності бульб картоплі (8,9 т/га) високої якості порівняно із застосуванням 30 т/га гною та не поступалося органо-мінеральній системі удобрення із внесенням 30 т/га гною +  $N_{90}P_{90}K_{90}$  [13]. Таким чином, нині назріла нагальна потреба в пошуку альтернативних шляхів поповнення ґрунту органічними речовинами за допомогою природних (біологічних) матеріалів, зокрема шляхом використання соломи на добриво, сидератів [19; 20; 39; 40].

Серед багатьох не розв'язаних проблем сільськогосподарського виробництва надзвичайно важливе місце належить збереженню або хоча б стабілізації природної родючості ґрунту та збільшенню продуктивності сільськогосподарських культур. Ця проблема на часі в усіх розвинених країнах світу [42]. Науковцями Полтавського інституту АПВ ім. М.І. Вавілова встановлено, що навіть за комплексного підходу до внесення органічних речовин баланс елементів живлення у ґрунті порушується. І тільки застосування органічних та мінеральних добрив і насичення сівозміни бобовими культурами (соя, горох, багаторічні трави) може наблизити до бездефіцитного балансу гумусу [12].

За тривалого ведення дослідів (протягом 50 років) відділом агрохімії ННЦ «Інститут землеробства НААН» оптимальною виявилася органічно-мінеральна система удобрення із внесенням 12 т/га підстилкового гною і середньої дози мінеральних добрив  $N_{66}P_{60}K_{64}$ , що забезпечувало відтворення родючості сірого лісового ґрунту за усіма параметрами й отримання високих урожаїв сільськогосподарських культур [15].

За сучасних умов альтернативне землеробство є чи не єдиним заходом, здатним стримати подальше зменшення родючості ґрунтів, знизити залежність від техногенних чинників, підвищити конкурентоспроможність аграрного виробництва. Ознакою будь-якої синергетичної системи є відкритість, нелінійність, стохастичність і нерівновісність. Система «рослина – ґрунт – система живлення» є біодинамічною нелінійною системою, яка при заданих початкових умовах самоорганізується до певного оптимального стану [16; 32].

Сучасний стан моделювання в агрономічній науці можна охарактеризувати двома протилежними тенденціями. Враховуючи, що до процесу моделювання залучаються фахівці, далекі від складних форм традиційних динамічних моделей, це приводить до максимального спрощення моделей [2; 34; 36] – до простих напівемпіричних формул, зручних і зрозумілих для фахівців-агрономів у практичному використанні.

З огляду на зростаючі можливості сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій, особливо з автоматизації накопичення (реєстрації) експериментальних даних, їхнього збереження, обробки та аналізу, в тому числі і в автоматизованому режимі, значним зростанням об'єму масивів цих даних, розробки спеціальних алгоритмів виявлення кореляцій між окремими чинниками в моделях Великих Даних (Big DATA) суттєво зростають можливості і інструментарій значного ускладнення моделей, що максимально наближені до реальних процесів у біодинамічній системі «рослина – ґрунт – атмосфера», що приводить до підвищення точності моделювання, зростає їхня практична значимість для прогнозу продуктивності та оптимізації агротехнологій. Такі моделі дозволяють глибше зрозуміти закономірності формування урожаю під дією як детермінованих (система живлення, попередники, обробіток ґрунту), так і частково стохастичних (температура, опади, рух повітряних мас) чинників.

Здебільшого обидва вказаних підходи, незважаючи на високий коефіцієнт детермінації, дозволяють отримати лише математичні моделі, далекі від фізичного смислу, які є лише максимальним наближенням до конкретних експериментальних даних і мало коли придатні для апроксимації експериментальних даних, коли умови експерименту змінюються [25].

У [25] на прикладі зони «ризикованого землеробства» (Республіка Білорусь) показано, що за даними однофакторного експерименту, коли враховується лише режим живлення, ймовірність прогнозу урожаю може мати значні відхилення від реальних значень. Однак ймовірність прогнозу можливо суттєво підвищити, використавши агрономічний досвід із використанням стандартних метеорологічних даних, оброблених з використанням математичної моделі урожаю сільськогосподарських культур.

А.П. Лихацевич запропонував і апробував математичну модель впливу чинників середовища на урожай сільськогосподарських культур. Так, зі зростанням кількості факторів, що формують урожай, точність моделювання урожаю також зростає. Автор запропонував моделі, які дозволили перейти від однофакторного до багатфакторного агрономічного дослідження. Як додаткову інформацію було

залучено метеорологічні дані, що характеризують волого- та теплозабезпечення вегетаційного періоду. Встановлено, що умови вологозабезпечення досить точно відповідають атмосферним опадам, які випадають протягом вегетації, а теплозабезпечення є максимальними добовими температурами повітря у цей період. Включення в аналіз водного і теплового факторів урожаю дозволяє не тільки збільшити факторний вплив польового досвіду, але і на основі запропонованої математичної моделі істотно підвищити обґрунтованість висновків за його результатами.

У [5] на основі тривалих результатів спостереження (15–20 років) побудовані моделі прогнозування в параметричній задачі оптимального розміщення посівів с/г культур, запропоновано для конкретних територій (райони Іркутської області, РФ) низку авторегресійних (залежно від попереднього року), трендових (залежно від часу) і факторних (залежно від середніх місячних температур та опадів) моделей. Наприклад:

урожай картоплі в Зімінському районі (1998–2015 рр.)

$$Y_t = 0,61Y_{t-1} + 53,5 R_2 = 0,52;$$

урожай капусти в Тайшетському районі (1998–2015 рр.)

$$Y_t = 0,75Y_{t-1} + 56,4 R_2 = 0,61;$$

урожай буряків у Зімінському районі (1996–2015 рр.)

$$Y_t = 0,76 Y_{t-1} + 56,0 R_2 = 0,70;$$

урожай моркви в Зімінському районі (2000–2015 рр.)

$$Y_t = 0,87 Y_{t-1} + 36,1 R_2 = 0,81.$$

У [5] показано, що наявність таких моделей значно зменшує діапазон невизначеності в задачах параметричного прогнозування урожаю наступного року. У [45] запропоновано імітаційну модель моделювання урожайності с/г культур (ц/га):  $X_{10} = f(X_1; X_2; X_3; X_4; X_5; X_6; X_7; X_8; X_9)$  від таких чинників:

$X_1$  – середня кількість опадів за рік, мм;

$X_2$  – сума опадів за рік при температурах вище 10 °С, мм;

$X_3$  – середня річна температура повітря, °С;

$X_4$  – сума активних температур, °С;

$X_5$  – сумарна сонячна радіація, ккал/см<sup>2</sup>;

$X_6$  – середня річна відносна вологість повітря, %;

$X_7$  – тривалість безморозного періоду, днів;

$X_8$  – середня висота снігового покриву за зиму, см;

$X_9$  – густина снігового покриву, г/см<sup>3</sup>.

$X_{10}$  – середня урожайність с/г культури на 1 га посівної площі, ц/га.

У результаті проведених досліджень для конкретних географічних і природно-кліматичних умов (Уссурійський район Приморського краю, РФ) отримано імітаційні моделі, що дозволяють прогнозувати об'єм урожаю з відхиленням не більше 3,3% та відхиленням локальної урожайності не більше 4% від фактичних даних. Це дало авторам підстави вважати, що така імітаційна модель на основі імітаторів випадкових величин у заданому діапазоні достовірності дає змогу урахувати вплив природно-кліматичних умов на агровиробництво. У [9; 10; 17; 26; 33; 41] розглянуто аналогічні підходи до моделювання біодинамічних систем і побудови цільових дво- трьох- і багато параметричних функцій.

Основу цієї роботи складають результати досліджень і спостережень, які проводили на посадках картоплі в короткоротаційній сівозміні за 6 систем удобрення:

<b>Сівозміна</b>	<b>Системи удобрення</b>
1. Конюшина на насіння	1. Біологічний контроль
2. Картопля	2. Органічна (гній 50 т/га)
3. Жито озиме	3. Органо-мінеральна – 50%, органічних + 50% мінеральних добрив (гній 25 т/га + N <sub>25</sub> P <sub>20</sub> K <sub>35</sub> )
4. Пелюшка + овес	4. Органо-мінеральна – 75% органічних + 25% мінеральних добрив (гній 37,5 т/га + N <sub>12,5</sub> P <sub>10</sub> K <sub>17,5</sub> )
5. Овес із підсіванням конюшини	5. Органічна (сидерат – 20 т/га)
	6. Мінеральна (N <sub>50</sub> P <sub>40</sub> K <sub>70</sub> )

Статистичну та математичну обробку експериментальних даних виконували методами дисперсійного та кореляційного аналізів за допомогою *EOM Pentium III* за методикою Б.О. Доспехова [18] із використанням прикладних комп'ютерних програм *ANOVA*, пакету аналізу електронної таблиці *Microsoft Excel* та *Statistica*.

На основі аналізу залежності урожайності картоплі від систем удобрення та достовірності відхилень між варіантами дослідження та їхньої взаємодії (НІР<sub>05</sub> = 1,92–2,39) встановлено, що у варіанті біологічного контролю врожайність бульб картоплі була низькою і становила лише 20,1 т/га (табл. 1).

Таблиця 1

**Урожайність бульб картоплі залежно від системи удобрення, т/га**

№ з/п	Система удобрення	Рік дослідження			Середнє за 2012–2014 рр.	+/- до контролю	% до контролю
		2012	2013	2014			
1.	Біологічний контроль	21,3	16,7	22,2	20,1	–	100
2.	Органічна (гній 50 т/га)	30,2	24,2	31,4	28,6	8,5	142,4
3.	Органо-мінеральна (50% органічних + 50% мінеральних добрив)	33,5	26,8	32,9	31,1	11,0	154,7
4.	Органо-мінеральна (75% органічних + 25% мінеральних добрив)	36,4	28,5	34,6	33,2	13,1	165,1
5.	Органічна (сидерати – 20 т/га)	22,9	18,7	26,1	22,6	2,5	112,5
6.	Мінеральна (N <sub>50</sub> P <sub>40</sub> K <sub>70</sub> )	31,9	23,9	31,9	29,2	9,1	145,5
НІР <sub>05</sub> , т/га		2,23	1,92	2,39			

Найвищого рівня вона сягала за органо-мінеральної системи удобрення (75% органічних + 25% мінеральних добрив) і складала у середньому від 28,5 до 36,4 т/га [27]. На другому місці серед варіантів досліджу – органо-мінеральна



система із внесенням половинної норми гною і мінеральних добрив, за якої урожайність у середньому становила 31,1 т/га. На третьому місці – мінеральна система удобрення, урожайність за якої складала 29,2 т/га, що на 45,5% перевищує біологічний контроль. За органічної системи (гній 50 т/га) встановлено значне зростання урожайності бульб картоплі порівняно із біологічним контролем, де вона складала 28,6 т/га (+8,5 т/га до контролю). Найменший приріст урожайності спостерігався за органічної системи (сидерати – 20 т/га) – 22,6 т/га (+2,5 т/га, або 12,5% до біологічного контролю).

Для заданих систем живлення  $X$  – органічної та  $Y$  – мінеральної функція урожаю  $Q(ax; by)$  має певні експериментальні значення (табл. 2).

Таблиця 2

№ з/п	Система живлення	$Q$ , т/га	$\Delta Q = Q - Q_0$
0	Біологічний контроль	20,1	0
1	Гній 50 т/га ( $a = 1$ ; $b = 0$ )	28,6	8,5
2	Гній + мінеральні добрива ( $a = 0,5$ ; $b = 0,5$ )	31,1	11,0
3	Гній + мінеральні добрива ( $a = 0,75$ ; $b = 0,25$ )	33,2	13,1
4	Сидерати 20 т/га ( $a = 0$ ; $b = 0$ )	22,6	2,5
5	Мінеральні добрива ( $a = 0$ ; $b = 1$ )	29,2	9,1

Функцію урожаю шукаємо за формулою:

$$Q(ax; by) = Q_0 + \Delta Q(ax; by), \quad (1)$$

де  $Q_0$  – складник урожаю на біологічному контролі. У нашому випадку  $Q_0 = 20,1$  т/га і не залежить від системи живлення.

У такому ж вигляді доцільно знаходити функції екологічних показників:

$$E(ax; by) = E_0 + \Delta E(ax; by), \quad (2)$$

та собівартості одиниці продукції:

$$C(ax; by) = C_0 + \Delta C(ax; by), \quad (3)$$

Попередній аналіз показав, що взаємодія органічної ( $ax$ ) та мінеральної ( $by$ ) систем живлення мають нелінійний характер, а рівняння лінійної взаємодії не виконуються у відносних координатах [30]:

$$ax + by \neq \Delta Q$$

Це змушує використовувати більш складні нелінійні моделі. Будуємо функцію  $\Delta Q(ax; by)$  у такому вигляді:

$$\Delta Q = ax + by + \alpha(ax; by) + \beta(ax; by)^2, \quad (4)$$

Значення  $X$  (доля приросту урожаю від органічної системи живлення) та  $Y$  (доля приросту урожаю від мінеральної системи живлення) у нашому досліді (табл. 1) знайдемо із асимптотичних значень  $\Delta Q(ax; by)$ . Так, для  $a = 1$ ,  $b = 0$  (система 1 – 50 т/га гною) маємо  $X = 8,5$ . Для  $a = 0$ ,  $b = 1$  (система 5 – мінеральна  $N_{50}P_{40}K_{70}$ ) маємо  $Y = 9,1$ .

Використовуючи асимптотики систем живлення 2 і 3 (табл. 2), визначимо коефіцієнти взаємодії  $\alpha$  та  $\beta$  при нелінійних членах моделі:

$$\alpha = 0,8859; \beta = -0,0399$$

Це дозволило побудувати нелінійну модель та отримати значення функції приросту урожаю  $\Delta Q(ax; by)$ :

$$\Delta Q = 8,5 a + 9,1 b + 68,52 ab - 238,72 a^2 b^2, \quad (5)$$

$$R^2_{1/1} = 0,992$$

де  $a$  – доля органічної системи живлення (для 50 т/га гною  $a = 1$ );  $b$  – доля мінеральної системи живлення (для  $\Omega = 50_N + 40_P + 70_K$ ,  $b = 1$ ). Для будь-яких значень  $a \in [0; 1]$ ,  $b \in [0; 1]$ . Значення функції приросту урожаю  $\Delta Q(ax; by)$  наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Значення  $\Delta Q(ax; by)$  для моделі 5

$b \backslash A$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	0	0,85	1,7	2,55	3,4	4,25	5,1	5,95	6,8	7,65	8,5
0,1	0,91	2,42	3,88	5,3	6,66	7,99	9,26	10,49	11,66	12,79	13,87
0,2	1,82	3,94	5,79	7,62	9,17	10,53	11,7	12,68	13,47	14,07	14,47
0,3	2,73	5,42	7,68	9,51	10,91	11,82	12,43	12,54	12,22	11,47	10,38
0,4	3,64	6,85	9,29	10,97	11,89	12,04	11,43	10,06	7,92	5,02	1,35
0,5	4,55	8,23	10,71	12,01	12,1	11,01	8,72	5,24	0,56	-5,31	-12,37
0,6	5,46	9,56	11,94	12,61	11,55	8,78	4,29	1,92	-0,99	-19,5	
0,7	6,37	10,84	12,98	10,23	5,35	-1,86	-11,42				
0,8	7,28	12,08	13,83	12,52	0,74	-9,73					
0,9	8,19	13,27	14,49	11,84	5,32	-0,51					
1,0	9,1	14,41	14,95	10,72	1,71	-12,07					

З аналізу результатів, наведених у табл. 3, випливає, що наступні поєднання (табл. 4) органічної і мінеральної систем живлення є критичними.

Таблиця 4

$a_*$	1	0,8	0,7	0,5	0,4
$b_*$	0,4	0,5	0,6	0,8	1

Поєднання систем живлення ( $a_*$   $b_*$ ) призводить до стрімкого зменшення  $\Delta Q$ , а за їх незначного перевищення значення  $\Delta Q < Q$  дає негативний результат. Оптимальна система 3 ( $a = 0,75$ ;  $b = 0,25$ ), коли  $\Delta Q = 13,1$  виявилася дуже близькою до абсолютного максимуму. Як випливає із табл. 3, значення  $\Delta Q_{max} = 14,95$  для  $a = 0,2$  (10 т/га гною) та  $b = 1$  ( $\Omega = 50_N + 40_P + 70_K$ ). Взагалі значення  $\Delta Q_{max}$  незначно перевищує  $\Delta Q = 13,1$  т/га для восьми поєднань органічної та мінеральної систем живлення (табл. 3), що підтверджує високе наближення системи живлення № 3 ( $a = 0,75$ ;  $b = 0,25$ ) до оптимальної.

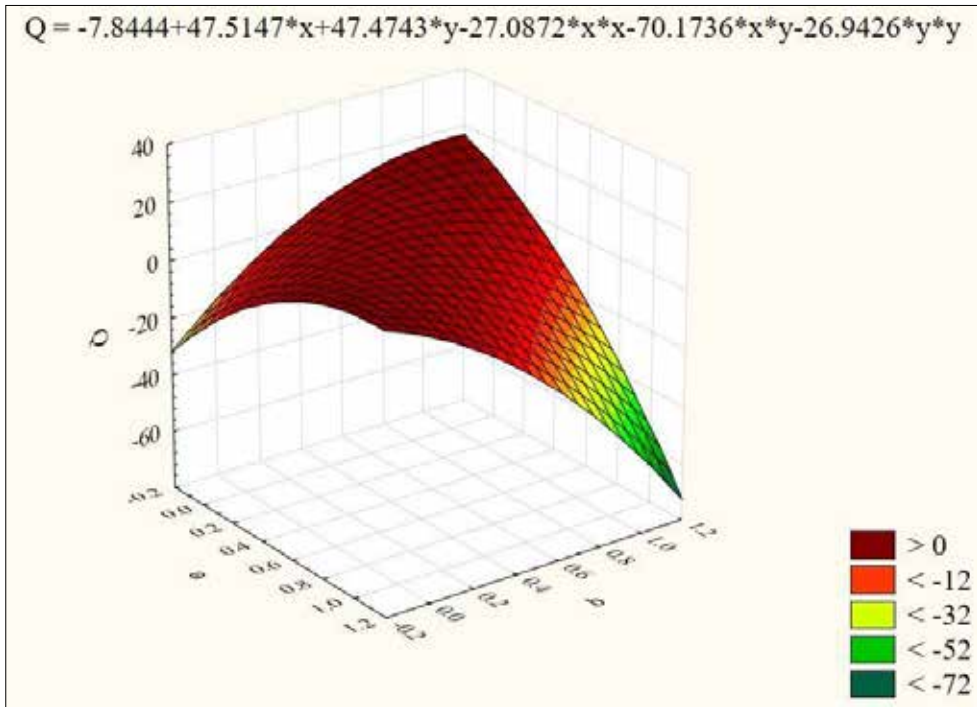


Рис. 1. 3D-модель взаємодії органічної та мінеральної систем живлення агроценозу картоплі сорту Беллароза

Дослідження  $\Delta Q (ax; by)$  на екстремум.

Взявши похідну по параметру і рівняння 5, дослідимо отримане нове рівняння на екстремум:

$$d(\Delta Q) / dQ = 8,5 + 9,1 b + 68,52 b - 2 * 238,72 a b^2 = 0, \tag{6}$$

Отримаємо рівняння кривої екстремумів:

$$d(\Delta Q) / dQ = 8,5 + 9,1 b + 68,52 b - 2 * 238,72 a b^2 = 0$$

$$a^{**} = 8,5 + 77,62 b / 477,44 b^2, \tag{7}$$

У табл. 4 наведено розраховані за рівнянням 7 координати точок екстремумів та  $\Delta Q (a^{**}; b^{**})$ .

Таблиця 4

$b^{**}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
$a^{**}$	3,41	1,26	0,74	0,52	0,4	0,32	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16
$\Delta Q (a^{**}; b^{**})$	25,5	14,64	12,46	12,0	12,12	12,53	13,09	13,75	14,46	15,22	16,01

Для  $b^{**} = 0,25$ , із формули 7 знаходимо  $a^{**} = 0,93$  і  $\Delta Q (a = 0,93, b = 0,25) = 13,19$  т/га, що лише на 0,09 т/га перевищує значення  $\Delta Q_3 = 13,1$  т/га, отриманого у досліді за системи живлення № 3.

Еквівалент системи живлення № 4 (сидерати). Для цієї системи  $\Delta Q_4 = 2,5$  т/га. Із моделі 5 для  $\Delta Q = 2,5$  знаходимо, що:

$$a_{екв.} = 0,294, b = 0 \text{ та } a = 0, b_{екв.} = 0,275$$

Це означає, що система живлення № 4 (сидерати) за функцією приросту урожаю ( $\Delta Q = 2,5$  т/га) з використанням моделі 5 дозволяє розв'язати обернену задачу – знайти еквівалент сидератів органічній (без мінеральної) та мінеральній (без органічної) системи живлення, а також їхніх комбінацій. Так,  $a_{екв.} = 0,294$  відповідає масі гною =  $50 * 0,294 = 14,7$  т/га. Для  $b_{екв.} = 0,275$ .  $\Omega 80,275 = 13,75_N + 11_P + 19,25_K$ .

**Висновки і пропозиції.** На основі аналізу залежності урожайності картоплі від системи удобрення на ясно-сірому лісовому ґрунті за 2012–2014 роки ми встановили, що найвищого рівня урожайність картоплі досягається за органо-мінеральної системи удобрення за внесення 75% органічних і 25% мінеральних добрив (гній 37,5 т/га +  $N_{12,5}P_{10}K_{17,5}$ ) від 28,5 до 36,4 т/га. Цільова функція приросту урожаю  $\Delta Q(ax; by)$  дуже чутлива до компоненту органічних і мінеральних складників і незадовільно описується в рамках лінійної моделі, у зв'язку з чим настає необхідність використання нелінійних моделей.

Результати моделювання на нелінійній моделі поєднання мінеральної і органічної систем удобрення показали, що оптимальною для картоплі сорту Беллароза є органо-мінеральна система удобрення за співвідношення 75%:25%, за якої функція урожайності 13,1 т/га є дуже близькою до абсолютного максимуму. Запропонована нелінійна модель функції приросту урожаю від органічного ( $ax$ ) та мінерального ( $by$ ) складників живлення позитивно підтверджена експериментальними даними, що дозволяє запропонувати науково-обґрунтовану стратегію при вирощуванні картоплі, а не лінійність  $\Delta Q(ax; by)$  свідчить про явище синергізму в біодинамічній системі «рослина – ґрунт – система живлення».

Дослідження функції на екстремум показало, що органічна система живлення (сидерати – 20 т/га) за функцією приросту урожаю ( $\Delta Q = 2,5$  т/га) із використанням нелінійної моделі дозволяє розв'язати обернену задачу – знайти еквівалент сидератів органічній (без мінеральної) та мінеральній (без органічної) системі живлення.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Bomba M., Kovalchuk Y. Complex influence of tillage and fertilization upon acidity and biological activity of Ukraine grey forest soils. *III Scientific Conference "Natural and anthropogenic causes and effects of soil acidification"*. Lublin, 2001. P. 50.
2. Аномальные формы функции отклика «удобрения – продуктивность»: полевые наблюдения и модельный анализ / А.Г. Топаж [и др.]. *Изв. Тимирязев. с.-х. акад.* 2015. Вып. 2. С. 15–27.
3. Агроекологічні основи вирощування картоплі / В.М. Положенець, М.С. Чернілевський, Л.В. Немерицька [та ін.]. Київ : Світ, 2008. 196 с.
4. Агроекологія : навч. посіб. / О.Ф. Смаглій, А.Т. Кардашов, П.В. Литвак [та ін.]. Київ : Вища освіта, 2006. 671 с.
5. Асалханов П.Г., Иванько Я.М., Полковская М.Н. Модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в задачах параметрического программирования. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 2. С. 57–66.
6. Біологізація землеробства в Україні: реалії та перспективи. За ред. В.В. Івашишина та І.А. Шувара. Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2016. 284 с.

7. Бовсуновський А.М., Савчук О.І. Ефективність елементів біологізації сівозмін на Поліссі. *Вісник ДАЕУ*. 2008. № 1. С. 37–43.
8. Бунчак О.М. Вплив органічних добрив універсальної дії (ОДУД) на урожайність і якість бульб картоплі. *Зб. наук. праць Подільського державного аграрно-технічного університету*. 2010. Вип. 18. С. 140–145.
9. Валге А.М. Математическое моделирование урожайности многолетних трав / А.М. Валге, Э.А. Папушин, А.Н. Перекопский. *Вестн. Рос. акад. с.-х. наук*. 2013. № 5. С. 8–10.
10. Вахонин Н.К. Моделирование урожаев в системе точного земледелия. *Мелиорация*. 2015. № 1(73). С. 131–136. URL: <http://niimel.by/melioratsiya-2015-1-73/60-zemledelie-i-rastenievodstvo/204-modelirovanie-urozhaev-v-sisteme-tochnogo-zemledeliya>.
11. Вирощування екологічно чистої продукції рослинництва / Е.Г. Дегодюк, В.Ф. Сайко, М.С. Корнійчук [та ін.]; за ред. Е.Г. Дегодюка. Київ : Урожай, 1992. 320 с.
12. Вплив органо-мінеральної системи удобрення на поліпшення родючості ґрунту, продуктивності сільськогосподарських культур та агроекологічної обстановки у регіоні / Л.Д. Глущенко, З.Г. Троценко, Г.П. Сокирко [та ін.]. *Агроекологічний журнал*. 2007. № 1. С. 34–36.
13. Вплив різних видів органічних та органо-мінеральних добрив на урожайність, якість бульб картоплі та поживний режим ґрунту / Ю.М. Оліфір, А.Й. Габриель, О.Й. Кочмар, Р.В. Ільчук. *Картоплярство України*. 2012. № 1–2. С. 30–34.
14. Гудзь В.П., Шувар І.А., Юннк А.В. Адаптивні системи землеробства : підручник / за ред. Гудзя В.П. Київ : Центр учбової літератури. 2014. 336 с.
15. Дегодюк С.Е., Літвінова О.А., Кириченко А.В. Вплив тривалого застосування добрив у сівозміні на агрохімічну характеристику сірого лісового ґрунту. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2015. Вип. 58(І). С. 84–93.
16. Детергенти сучасності / В.А. Бурлака, І.Г. Грабар, В.М. Микитюк [та ін.]; за ред. В.А. Бурлаки. Житомир : Вид-во «Полісся», 2013. 652 с.
17. Динамические модели в биологии. Реестр моделей. URL: <http://www.dmb.biophys.msu.ru/registry?article=99>.
18. Доспехов Б.С. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) : учебник [для студ. высших с.-х. учеб. заведений] / Б.С. Доспехов. [изд. 5-е, доп. и перераб.]. М. : Высшая шк., 1985. 351 с.
19. Журавель С.В., Матвійчук Б.В., Матвійчук Н.Г. Особливості органічного землеробства на Поліссі. *Зб. наук. праць ННЦ «Інститут землеробства НААН»*. 2011. Вип. 1–2. С. 86–94.
20. Камінський В.Ф., Дворецька С.П. Ефективність використання побічної продукції у технологіях вирощування зернобобових культур. *Зб. наук. пр. Ін-ту землеробства УААН*. 2003. Спецвип. С. 28–31.
21. Картопля / В.А. Вітенко, М.С. Куценко, М.Ю. Власенко [та ін.]; за ред. В.А. Вітенка, М.С. Куценка, М.Ю. Власенка. Київ : Урожай, 1990. 256 с.
22. Картопля / за ред. В.В. Кононученка, М.Я. Молоцького. Біла Церква, 2002. Т. 1. 536 с.
23. Кисіль В.І. Біологічне землеробство в Україні: проблеми і перспективи. Харків : Штрих, 2000. 162 с.
24. Кравченко О.А., Шарапа М.Г. Агротехнічні прийоми вирощування високих урожаїв картоплі в зонах Полісся та Лісостепу України. *Картоплярство України*. 2010. № 1–2. С. 20–30.
25. Лихацевич А.П. Использование математического моделирования для повышения достоверности оценки результатов полевого агрономического опыта / А.П. Лихацевич. *Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. Аграр. науки*. 2018. Т. 56, № 3. С. 321–334. URL: <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2018-56-3-321-334>.

26. Малинина В.Г. Математическая модель агроэкосистемы «картофель – вредитель – среда обитания» : автореф. дисс. ... к.н.т. Л., 1984. 140 с.
27. Матвийчук Б.В., Матвийчук Н.Г. Оценка выбросов парниковых газов при разных системах удобрения картофеля. *Современное состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса* : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 27–28 апр. 2016 г. Курган : КГСХА, 2016. С. 53–60.
28. Матвийчук Н.Г. Биоорганическое земледелие на Полесье Украины. *Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК* : материалы VIII Междунар. науч. конф. Брянск : БГСХА, 2011. С. 195–198.
29. Матвийчук Н.Г. Вплив системи удобрення на урожайність та якість картоплі у короткоротаційній сівозміні в умовах Полісся України. *Органічне виробництво і продовольча безпека* : зб. матеріалів доп. учасн. Міжнар. наук.-практ. конф. Житомир : Полісся, 2013. С. 362–366.
30. Методологічні основи наукових досліджень. Математичне моделювання та оптимізація складних систем і процесів : навчальний посібник / І.Г. Грабар, М.О. Гуменюк, Ю.Г. Даник [та ін.]. Житомир : ЖВІ ДУТ, 2015. 680 с.
31. Органічні добрива / С.А. Балюк, О.О. Бацула, В.М. Тимчук [та ін.]. Посібник українського хлібороба. Київ, 2010. С. 128–134.
32. Перколяційно-фронтальні матеріали доп. учасн. Міжнар. наук.-практ. конф. Житомир : ЖДТУ, 2007. 354 с.
33. Полуэктов Р.А. Динамические модели агроэкосистемы / Р.А. Полуэктов. Л. : Гидрометеиздат, 1991. 312 с.
34. Прошкин В.А. Моделирование эффективности минеральных удобрений по показателям агрохимических свойств почвы. *Агрохимия*. 2012. № 7. С. 16–27.
35. Сайко В.Ф., Малієнко А.М. Системи обробітку ґрунту в Україні. Київ : ЕКМО, 2007. 44 с.
36. Свенцицкий А.М., Грабар И.Г. Построение функции двух переменных для прогнозирования долговечности элементов, пораженных коррозией. *Физ. хим. механика материалов*. 1987. № 2.
37. Семенов В.М., Ходжаева А.К. Агроэкологические функции растительных остатков в почве. *Агрохимия*. 2006. № 7. С. 63–81.
38. Танчик С.П., Цюк О.А., В'ялий С.О. Розвиток органічного землеробства в Україні. *Вісн. аграр. науки*. 2009. № 1. С. 11–15.
39. Тарарико А.О. Агроэкологические основы почвозащитного земледелия. Киев : Урожай, 1990. 184 с.
40. Тараріко Ю.О., Несмачна О.Є., Глущенко Л.Д. Енергетична оцінка систем землеробства і технологій вирощування сільськогосподарських культур : метод. рекомендації. Київ : Нора-прінт, 2002. 60 с.
41. Швецова Елена Дмитриевна. Моделирование взаимосвязей между характеристиками агроландшафта и урожаем озимой пшеницы : дисс. ... канд. техн. наук : 06.01.03. СПб., 2005. 116 с.
42. Шикун М.К., Макаруч О.Л. Ґрунтозахисна біологічна система землеробства на Україні. Київ : Урожай, 1999. 284 с.
43. Шмидт Ю.Д., Куликов В.Е. Моделирование урожайности сельскохозяйственных культур. *Вестник ТГЭУ*. № 1. 2006. С. 73–84.
44. Шувар І.А. Наукові основи підвищення продуктивності сівозмін та родючості ґрунту у традиційному і біологічному землеробстві Західного Лісостепу України : автореф. дис. ... докт. с.-г. наук: спец. 06.01.01. Чабани, 2005. 37 с.