

УДК 631.4 : 004

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ АГРОЕКОСИСТЕМИ ЗАЛЕЖНО ВІД ПОКАЗНИКІВ БІОЛОГІЧНОЇ АКТИВНОСТІ ҐРУНТУ ТА ГІДРОТЕРМІЧНИХ УМОВ

*О.С. Дем'янюк*

*кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник  
заступник директора з наукової роботи*

*Інститут агроекології і природокористування НААН*

*В.І. Гайдаржи*

*старший викладач кафедри автоматизації  
проектування енергетичних процесів та систем*

*О.Б. Васильєва*

*старший викладач кафедри автоматизації  
проектування енергетичних процесів та систем*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

*За результатами довготривалих експериментальних досліджень активності і спрямованості біологічних процесів у ґрунті природної екосистеми і агроекосистеми, врожайності пшениці озимої за різних систем удобрення та з урахуванням гідротермічних чинників одержано залежність між біологічною активністю ґрунту і погодними умовами та урожайністю. Побудовано узагальнену математичну модель продуктивності агроекосистеми з урахуванням погодних умов, біологічної активності ґрунту та систем удобрення. Розрахунки підтвердили валідність кожної отриманої залежності та узагальнюючої моделі продуктивності агроекосистеми.*

**Ключові слова:** *продуктивність агроекосистеми, математична модель, інтегральний показник біологічного стану ґрунту, гідротермічні чинники.*

Останнім часом застосування математичних методів у сільському господарстві, зокрема під час екологічного оцінювання ґрунту, моделювання його родючості та продуктивності агроекосистеми загалом, широко розповсюджено на практиці. Як правило, математичні моделі використовують для пояснення тих чи інших властивостей об'єкта та процесів, що відбуваються в ньому. Однак унаслідок складної структури агроекосистем побудова математичних моделей, які описують у них перебіг усього комплексу процесів, є доволі складним завданням. Складність моделювання полягає в тому, що більшість чинників, які формують модель, недостатньо вивчені і мають багато в чому стохастичний характер поведінки. Проте прогнозування продуктивності агроекосистем, оцінка впливу погодно-кліматичних та ґрунтових умов на врожайність агрокультур на основі моделювання і математичного аналізу є перспективним науковим напрямом розвитку і підвищення ефективності ведення сільського господарства.

В агроекосистемах існують доволі складні зв'язки і взаємодії, які дедалі стають ще більш

непрогнозованими внаслідок змін параметрів кліматичної системи та вливають на збалансованість усіх складових агроекосистеми, що призводить до зниження їх продуктивності й адаптивності до змін клімату [6].

Продуктивність агроекосистеми, яка визначається урожайністю сільськогосподарських культур, залежить від низки чинників. До першої групи входять чинники, які визначають рівень культури землеробства, а саме: досягнення генетики і селекції, технологій обробітку ґрунту, системи удобрення, засоби захисту рослин тощо. Друга група об'єднує метеорологічні чинники, які визначають значні відхилення врожайності в окремі роки від середнього рівня [10, 11].

Значення математичного моделювання як методу досліджень обумовлено тим, що модель уособлює концептуальний інструмент, орієнтований на аналіз досліджуваних процесів і їх прогнозування. Це дає змогу значно розширити експериментальне поле досліджень, зокрема, здійснювати математичні розрахунки у разі, якщо проведення експериментів у природних системах неможливе через економічні та часові

обмеження або екстремальні умови самого експерименту.

Метою нашої роботи було за допомогою математичних методів визначити залежність між показниками біологічної активності ґрунту і гідротермічними чинниками на прикладі чорнозему глибокого; встановити залежність врожайності від гідротермічних чинників і біологічної активності ґрунту за різних систем удобрення та побудувати узагальнену математичну модель продуктивності агроекосистеми з урахуванням погодних умов і біологічної активності ґрунту та систем удобрення.

В основу гіпотези було покладено те, що гідротермічні умови впливають на ґрунтові мікроорганізми, які, своєю чергою, є одним із основних чинників ґрунтоутворювального процесу; визначають родючість ґрунту та екологічну стійкість агроекосистеми загалом і тим самим здійснюють опосередкований вплив на врожайність сільськогосподарських культур.

Вихідними даними для проведення розрахунків і математичного моделювання були багаторічні показники спостережень за період 2001–2010 рр. в умовах стаціонарного польового досліді Миронівського інституту пшениці НААН, а саме:

- урожайність культури (пшениця озима) за вирощування в сівозміні за різних систем удобрення — без добрив (контроль), мінеральна, органічна, органо-мінеральна;
- агрометеорологічні показники за роками досліджень (щомісячні значення температури повітря, кількості опадів);

- показники біологічної активності ґрунту (вміст біомаси мікроорганізмів, екологічні коефіцієнти [1, 14] — мінералізації-імобілізації, оліготрофності, педотрофності, гумусонакопичення за роками досліджень в агроекосистемі за різних систем удобрення і в ґрунті перелогу як еталонної системи [9].

Для оцінки впливу погодних умов на ґрунтову мікробіоту і врожайність було обрано гідротермічний коефіцієнт Селянінова (ГТК), що враховує такі важливі для агроекосистеми чинники, як суму опадів і суму температур вище 10°C за відповідний період. За допомогою критерію Неймана–Пірсона доведено, що випадкова величина ГТК може бути описана нормальним законом розподілу, оскільки розрахункове значення критерію у цьому разі виявилось меншим від гранично допустимого теоретичного при 5% рівні значущості.

З метою інтегрування відносних значень різних показників біологічної активності ґрунту, абсолютні значення яких не можуть бути об'єднані в єдиний показник, через різні одиниці виміру, було розраховано інтегральний показник біологічного стану ґрунту (ІПБС) [7]. Розраховані значення інтегрального показника біологічного стану ґрунту для природної екосистеми і агроекосистеми наведено в таблиці 1. Статистичну обробку отриманих результатів здійснювали за Б. Доспеховим [5] та з використанням сучасних комп'ютерних програм.

У постановку завдання моделювання входило:

Таблиця 1

**Інтегральні показники біологічного стану ґрунту (ІПБС) для природної екосистеми і агроекосистеми**

Рік	ГТК	Інтегральний показник біологічного стану ґрунту				
		Природна екосистема (переліг)	Агроекосистема			
			без добрив	NPК	ґній	ґній + NPK
2001	0,9	97,3	85,2	85,4	89,9	90,4
2002	0,6	87,8	64,0	71,5	72,6	74,1
2003	1,3	99,7	93,0	97,9	96,2	94,9
2004	2,0	96,5	100,0	96,3	100,0	94,8
2005	1,0	94,3	90,0	92,8	98,6	92,9
2006	0,5	86,9	75,1	82,6	81,8	81,9
2007	0,5	82,9	64,2	69,3	75,0	70,8
2008	1,3	97,7	93,9	100,0	98,3	100,0
2009	1,4	100,0	85,8	91,4	96,7	95,6
2010	0,7	84,5	69,2	69,0	75,5	73,6

- формування математичного виразу функцій залежності біологічних показників ґрунту природної екосистеми і агроекосистеми від гідротермічних чинників;

- формування математичного виразу функцій залежності врожайності пшениці озимої від сукупного впливу гідротермічних чинників і біологічної активності ґрунту агроекосистеми;

- формування математичного виразу узагальнюючої функції продуктивності агроекосистеми, яку визначає показник урожайності, від сукупного впливу гідротермічних чинників, біологічної активності ґрунту та застосованих агрозаходів (систем удобрення).

Серед найбільш широко затребуваних для аналізу експериментальних даних в економіці, біології, медицині, техніці тощо є методи регресійного аналізу [2, 8, 10, 13].

В основу моделювання та прогнозування покладено побудову моделей лінійної та множинної регресії для визначення емпіричних виразів кожної вказаної залежності. До того ж у кожному випадку окремо проводили оцінку статистичної значущості впливових показників або за критерієм Стьюдента у разі парної кореляції під час дослідження залежності показників біологічної активності ґрунту від гідротермічних чинників, або за критерієм Фішера у разі множинної кореляції для оцінки залежності продуктивності агроекосистеми від гідротермічних чинників та показників біологічної активності ґрунту. Значення статистичних коефіцієнтів спостережень у всіх випадках є більшими, ніж критичні значення *t*-критерію Стьюдента для парної кореляції, та більшими, ніж відповідні критичні значення *F*-критерію Фішера для множинної кореляції.

Для побудови математичної моделі одночасного впливу кількох чинників (незалежних змінних, предикторів) на залежну змінну ви-

користували ускладнений варіант простої лінійної регресії — модель множинної лінійної регресії [2, 8, 13]. Оскільки, на відміну від парної кореляції і регресії, де досліджується взаємозв'язок двох змінних, у множинному кореляційному і регресійному аналізі розглядається взаємозв'язок багатьох показників, було проведено розрахунки коефіцієнтів кореляції між кожною парою показників і на їх основі складено кореляційні матриці.

**Моделювання залежності біологічних показників ґрунту природної екосистеми і агроекосистеми від гідротермічних чинників.** Попередні наші дослідження засвідчили [3, 4], що на формування мікробіоценозу ґрунту та його функціональну активність значний вплив мають такі абіотичні чинники, як температура повітря і кількість опадів. Тому для сукупності показників, що визначають гідротермічні умови і стан ґрунтової біоти (показники ГТК й ІПБС), для природної екосистеми і агроекосистеми з різними системами удобрення розраховано коефіцієнт парної кореляції (*r*), який підтверджує високий рівень тісноти зв'язку між ними. Залежність біологічної активності ґрунту від погодних умов для різних екоотопів описується рівнянням множинної лінійної регресії (табл. 2).

Результати моделювання залежності ІПБС від гідротермічних чинників для природної екосистеми і агроекосистеми наведено на рисунку 1. Як видно з наведених графічних зображень, кожна розрахована залежність майже співпадає з вихідними експериментальними даними. До того ж відхилення побудованої теоретичної залежності від експериментальних даних спостережень є мінімальними та варіюють у межах 4–7%.

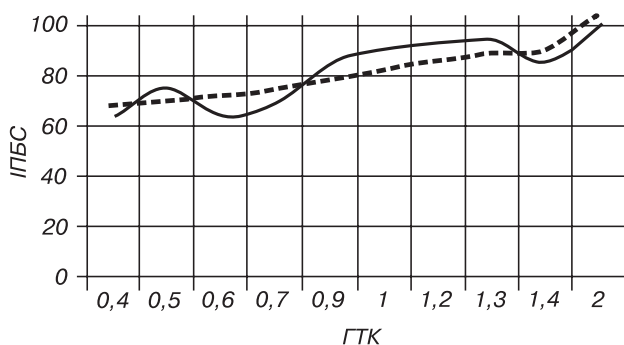
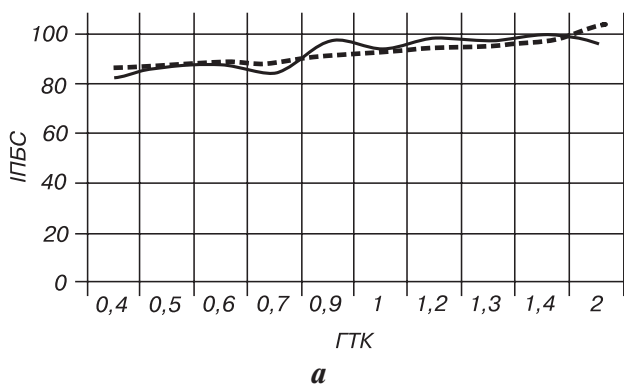
Для перевірки достовірності кожної отриманої залежності проведено розрахунки прогнозних значень показника ІПБС. Наприклад, за умови ГТК = 1,3 прогнозне значення ІПБС

Таблиця 2

**Результати моделювання залежності біологічних показників ґрунту природної екосистеми і агроекосистеми від гідротермічних чинників**

Екотоп	Лінійний коефіцієнт кореляції ( <i>r</i> )	Рівняння множинної лінійної регресії*
Природна екосистема	0,776	$y = 81,981 + 10,571x_1$
Агроекосистема: без добрив	0,874	$y = 57,926 + 23,629x_1$
мінеральна	0,789	$y = 65,519 + 19,722x_1$
органічна	0,835	$y = 68,883 + 19,192x_1$
орвано-мінеральна	0,789	$y = 68,862 + 17,664x_1$

\*Примітка: *y* — біологічна активність ґрунту (ІПБС), *x*<sub>1</sub> — значення ГТК.



— Експериментальні дані  
 - - - - Теоретична залежність

б

**Рис. 1.** Залежність біологічної активності ґрунту від гідротермічних чинників для різних екотопів: а — природна екосистема, б — агроекосистема (без добрив)

для природної екосистеми становить 95,7 при фактичному значенні 97,7. За такої самої умови для агроекосистеми, у варіанті без добрив, прогноз становитиме 88,7 за фактичного значення ІПБС 93,9 і відповідно для мінеральної системи удобрення — 92,2 і 89,5, органічної — 9,8 і 96,2 та органо-мінеральної системи удобрення — 91,9 і 94,9. Такі незначні відхилення розрахункових значень ІПБС від фактичних свідчать про адекватність отриманих залежностей.

**Моделювання залежності врожайності від гідротермічних чинників і біологічної активності ґрунту для різних систем удобрення.** Для оцінювання врожайності сільськогосподарських культур використовуються різні підходи, серед яких переважають статистичні методи та припущення щодо існування залежності між параметрами навколишнього природного середовища, різними агрозаходами, у т.ч. внесенням добрив, і врожайністю [10–12]. З цією метою і для проведення регресійного моделювання була перевірена гіпотеза про те, що в генеральній сукупності є кореляційна залежність між показниками ГТК, ІПБС і врожайністю пшениці озимої. Перевірку статистичної значущості здійснено на основі розрахунків критерію Фішера для кожного варіанта дослідження та встановлено тісноту взаємозв'язку між результативною ознакою та сукупністю всіх факторних ознак ( $R = 0,41-0,72$ ) (табл. 3). Розрахунки коефіцієнту детермінації  $D$ , який демонструє на скільки відсотків варіація показника врожайності обумовлюється варіацією всіх факторних ознак (ГТК, ІПБС), включених у модель, показали, що лише у варіанті без добрив виявлено значний вплив аналізованих чинників на врожайність ( $D = 0,52$ ). Очевидно, у варіантах із унесенням мінеральних і органічних добрив фактор «добрива» має домінуючий вплив.

Графічну інтерпретацію результатів моделювання у вигляді тривимірних графіків залежності врожайності пшениці озимої від показників біологічної активності ґрунту та погодних умов наведено на рисунку 2.

Отримані моделі надають можливість розрахунку прогнозу врожайності пшениці озимої. Так наприклад, при ГТК = 1,3, ІПБС = 93,9 за вирощування пшениці озимої без застосування добрив прогнозована врожайність буде становити 4,3 т/га на тлі фактичного значення 4,06 т/га. Для мінеральної системи удобрення за умови ГТК = 1,3 і ІПБС = 97,9 прогноз урожайності становить 5,13 т/га при фактичному

Таблиця 3

**Результати моделювання залежності врожайності від гідротермічних чинників і біологічної активності ґрунту**

Варіант дослідження/система удобрення	Коефіцієнт множинної кореляції (R)	Рівняння множинної лінійної регресії*
Без добрив	0,721	$y = 1,352 + 1,046x_1 + 0,018x_2$
Мінеральна	0,685	$y = 4,39 + 1,568x_1 - 0,013x_2$
Органічна	0,412	$y = 1,691 - 0,055x_1 + 0,035x_2$
Органо-мінеральна	0,586	$y = 4,582 + 1,149x_1 - 0,008x_2$

Примітка:  $y$  — урожайність, т/га;  $x_1$  — значення ГТК;  $x_2$  — значення ІПБС.

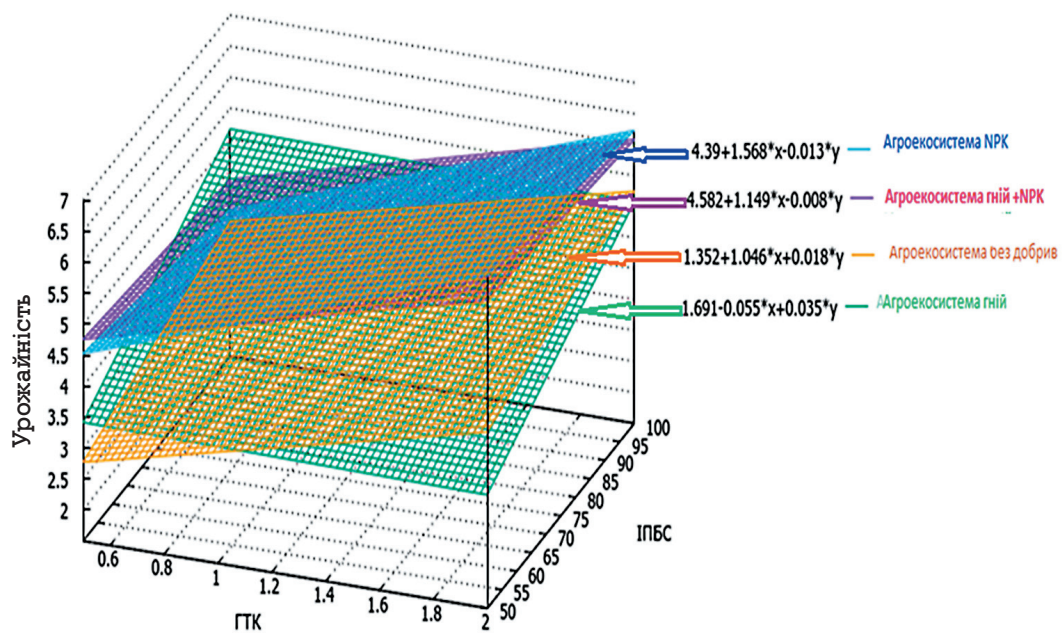


Рис. 2. Залежність урожайності пшениці озимої від гідротермічних умов і біологічної активності ґрунту для різних систем удобрення

значенні 5,11 т/га. Для органічної системи удобрення за умови ГТК = 1,3 і ІПБС = 96,2 прогноз урожайності становить 5,15 т/га при фактичному значенні 4,76 т/га. Для органо-мінеральної системи удобрення за умови ГТК = 1,3 і ІПБС = 94,9 прогноз урожайності становить 5,3 т/га при фактичному значенні 4,65 т/га. Такі розрахунки свідчать про адекватність кожної отриманої залежності.

**Моделювання продуктивності агроекосистеми залежно від гідротермічних чинників, біологічної активності ґрунту та систем удобрення.** Для виконання поставленого завдання було проведено узагальнення за роками досліджень значень врожайності пшениці озимої за різних систем удобрення та показників біологічної активності ґрунту за ІПБС, сформовано кореляційну матрицю за показниками середньої врожайності, ІПБС і ГТК. При цьому коефіцієнт множинної кореляції ( $R$ ) для сукупності аналізованих показників вихідних даних становив 0,616 ( $F_{\text{спост.}} = 4,45$ ,  $F_{\text{критич.}} = 3,71$ ,  $F_{\text{спост.}} > F_{\text{критич.}}$ ), тобто коефіцієнт кореляції є статистично значущим.

Регресійна лінійна модель залежності продуктивності агроекосистеми, що визначається показником урожайності, від гідротермічних умов та біологічної активності ґрунту з урахуванням систем удобрення має вигляд:

$$y = 3,41 + 1,069x_1 + 0,002x_2,$$

де  $y$  — врожайність, т/га;  $x_1$  — значення ГТК;  $x_2$  — значення ІПБС.

Результати моделювання залежності врожайності пшениці озимої від гідротермічних чинників і біологічної активності ґрунту з урахуванням систем удобрення наведено на рисунку 3.

За результатами порівняння фактичних даних багаторічних досліджень із даними, отриманими за допомогою розробленої моделі, було встановлено, що похибка варіює у межах 10%.

## ВИСНОВКИ

Із використанням методу лінійної регресії з парною кореляцією було отримано емпіричну залежність біологічної активності ґрунту (через інтегрований показник біологічного стану ґрунту (ІПБС)) для природної екосистеми і агроекосистеми від гідротермічних чинників, які описуються рівнянням множинної лінійної регресії. Коефіцієнт парної кореляції  $r$  вказує на доволі тісний зв'язок між аналізованими показниками (0,78–0,87).

На підставі вихідних даних польових дослідів методом лінійної регресії з множинною кореляцією встановлено емпіричні залежності між ГТК, ІПБС і урожайністю пшениці озимою для кожної системи удобрення, що підтверджується розрахунками критерію Фішера. Крім того, коефіцієнт множинної кореляції  $R$  варіює у межах 0,41–0,72, що свідчить про статичну значущість використаних під час побудови моделей даних.

За усередненими багаторічними даними врожайності пшениці озимої за різних систем

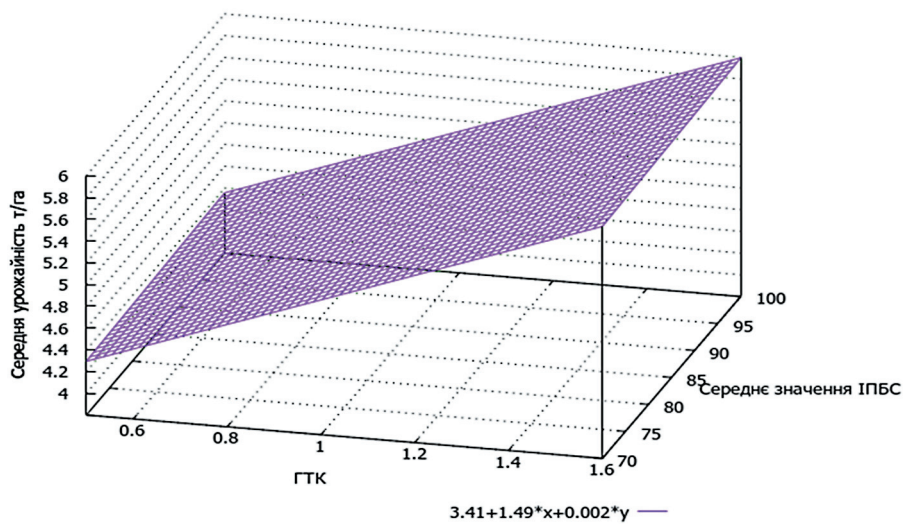


Рис. 3. Графічна інтерпретація функції множинної лінійної регресії для моделювання продуктивності агроєкосистеми

удобрення, інтегральних показників біологічного стану ґрунту та з урахуванням значень ГТК розроблено узагальнюючу модель продуктивності агроєкосистеми (яку визначає показник урожайності) від сукупного впливу досліджуваних чинників. Визначено, що коефіцієнт множинної кореляції для сукупності аналізованих чинників становив 0,616, а за порівняння фактичних експериментальних даних багаторічних досліджень із даними, отриманими за допомогою розробленої моделі, було встановлено, що похибка не перевищує 10%.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Андреюк Е.И.* Основы экологии почвенных микроорганизмов / Е.И. Андреюк, Е.В. Валагурова. — К.: Наукова думка, 1992. — 224 с.
2. *Бідюк П.І.* Прикладна статистика / П.І. Бідюк, О.М. Терентьев, Т.І. Просьянкіна-Жарова. — Вінниця: ТД «Едельвейс і К», 2013. — 288 с.
3. *Демидов О.А.* Вплив агроєкологічних чинників на вміст мікробної біомаси у ґрунті / О.А. Демидов, О.С. Дем'янюк // Таврійський науковий вісник. — 2017. — Вип. 97. — С. 39–44. — (Серія: Сільськогосподарські науки).
4. *Дем'янюк О.С.* Таксономічна структура мікробіоценозу ґрунту за різних погодних умов / О.С. Дем'янюк, О.В. Шерстобоева, А.Б. Крижанівський // Вісник Сумського національного аграрного ун-ту. — 2016. — Вип. 2(31). — С. 228–234.
5. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта / Б.А. Доспехов. — М.: Колос, 1985. — 351 с.
6. Збалансоване управління природно-ресурсним потенціалом агросфери України за принципами Конвенції РІО / О.Г. Тараріко, О.В. Сиротенко, Т.В. Ільєнко, Т.Л. Кучма // Агроєкологічний журнал. — № 1. — 2015. — С. 21–36.
7. *Казеев К.Ш.* Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований / К.Ш. Казеев, С.И. Колесников, В.Ф. Вальков. — Ростов на Дону: Изд-во РГУ, 2004. — 350 с.
8. *Камінський В.Ф.* Основи прикладного математичного аналізу в сільськогосподарських дослідженнях: Методичні рекомендації / В.Ф. Камінський, Н.Г. Буслаєва. — К.: ВП «Едельвейс», 2011. — 28 с.
9. *Медведев В.В.* Мониторинг почв Украины / В.В. Медведев. — Х., 2002. — 428 с.
10. Моделювання гідрометеорологічного режиму та продуктивності агроєкосистем: [підручник] / А.М. Польовий. — О.: Екологія, 2013. — 432 с.
11. Оцінка впливу кліматичних змін на галузі економіки України: монографія / С.М. Степаненко, А.М. Польовий, Є.П. Школьнік та ін.; за ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового. — О.: Екологія, 2011. — 696 с.
12. Прогнозне моделювання нелінійних нестационарних процесів у рослинництві з використанням інструментів SAS ENTERPRISE MINER / П.І. Бідюк, О.М. Терентьев, Т.І. Просьянкіна-Жарова, В.В. Ефендієв // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2017. — № 1. — С. 24–36.
13. Эконометрика: Учебник для вузов / Под ред. проф. Н.Ш. Кремера. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. — 311 с.
14. *Чундерова А.И.* Активность полифенолоксидазы и пероксидазы в дерново-подзолистых почвах / А.И. Чундерова // Почвоведение. — 1970. — № 7. — С. 22–28.