

УДК 631.559

DOI <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.112.9>

ЕКОЛОГІЧНІ ДЕТЕРМІНАНТИ УРОЖАЙНОСТІ СОЇ

Зимаросєва А.А. – к.б.н., доцент, доцент кафедри експлуатації лісових ресурсів, Поліський національний університет

Робота присвячена встановленню внеску екологічних факторів, а саме біокліматичних змінних, ґрунтових показників та факторів ландшафтного різноманіття у варіювання урожайності сої у Поліссі та Лісостепу України протягом 1991–2017 рр. Для описання динаміки урожайності сої була застосована симетрична лог-логістична модель, а параметри цієї моделі можуть бути використані для аналізу просторової динаміки урожайності. Зокрема, такі характеристичні точки моделі урожайності, як: нижній ліміт відгуку (найменший рівень врожайності); верхній ліміт (найвищий рівень врожайності); нахил кривої відгуку у близькості до точки перегину, ED50 – час, який потрібний для досягнення половинного від максимального рівня зростання урожайності. У ході попереднього аналізу головних компонент нами встановлено 4 кліматичні головні компоненти та 6 ґрунтових головних компонент. Оцінку ландшафтного різноманіття проведено на основі індексу Шеннона та відстані до природоохоронних об'єктів. За результатами регресійного аналізу виявлено статистично значиму залежність ($p < 0,05$) між параметрами урожайності сої та виявленими екологічними детермінантами. Варіювання показника швидкості зростання урожайності (ухил логарифмічної кривої) сої на 9% залежить від кліматичних і ґрунтових змінних. Також ґрунтові та кліматичні фактори визначають 51% варіювання мінімальної та 69% варіювання максимальної урожайності цієї культури. Час настання різкого зростання урожайності найбільше залежить від різноманітності ландшафтного покриву (відстані до природоохоронних об'єктів). Причому ця залежність носить нелінійний характер. Усі досліджені параметри урожайності сої проявляють найбільшу кореляцію із показником, який визначає вміст піщаної фракції у гранулометричному складі ґрунту.

Ключові слова: *Glycine max*, соя, екологічні детермінанти, екологічні фактори, урожайність, модель урожайності.

Zymarioieva A.A. Ecological determinants of soybean yield

The aim of the study was establishing the contribution of ecological factors, namely, bioclimatic variables, soil indicators and landscape diversity, to the soybean yields variation within Polissya and the Forest-steppe of Ukraine in 1991–2017. The symmetric log-logistic model was used to describe the dynamics of soybean yield, and the parameters of this model can be used to analyze the spatial dynamics of yield. Specifically, the characteristic points of the yield model are: lower response limit (lowest yield level); upper limit (highest yield level); the slope of the response curve near the inflection point, the ED50 is the time it takes to reach half the maximum yield level. Due to the preliminary principal components analyses, 4 climatic principal components and 6 soil principal components have been established. The landscape diversity estimates are based on the Shannon index and the distance to nature conservation sites. There are statistically significant regression dependencies between soybean yield parameters and ecological determinants ($p < 0.05$). Variation of the rate of yield increase (slope of the logarithmic curve) of soybean by 9% depends on climatic and soil variables. Furthermore, soil and climatic factors determine 51% of the variation of the minimum yield (lower limit) and 69% of the variation of the maximum yield (upper limit) of this crop. The time to the sharp increase in yield depends mostly on landscape diversity, namely, the distance to nature conservation sites. Moreover, this dependence is nonlinear. All the studied soybean yield parameters have the highest correlation with the indicator that determines the sand fraction content in the particle size distribution of the soil.

Key words: *Glycine max*, soybean, yield, ecological determinants, ecological factors, yield model.

Постановка проблеми. Збільшення чисельності населення світу призвело до безпрецедентного виклику для продовольчої безпеки людства, що проявляється у стрімкому збільшенні попиту на сільськогосподарську продукцію [11; 14]. Водночас аграрне виробництво здійснюється в умовах глобальних змін клімату

та зростаючого тиску на природні екосистеми [15], що, безумовно, впливає на врожайність основних сільськогосподарських культур. Необхідність виробництва продуктів харчування для зростаючої кількості населення світу за умови, щоб при цьому не спричинити деградацію навколишнього середовища, збільшує попит на більш глибокі знання факторів, які лімітують урожайність. Це дослідження проведене з метою виділення найбільш вагомих факторів впливу екологічного походження на параметри урожайності сої (*Glycine max (L.) Merril*).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Серед екологічних чинників визначальними та найбільш впливовими факторами сільськогосподарської продуктивності є погода та клімат. Так, було показано [16], що останні тенденції зміни кліматичних показників можуть суттєво впливати на врожайність сільськогосподарських культур, незважаючи на досягнення технології вирощування. Очікується, що кліматичні зміни будуть пов'язані зі збільшенням глобальної середньої температури, змінами патернів опадів та зростанням частоти та важкості екстремальних метеорологічних явищ [15], що, безумовно, вплине на врожайність сільськогосподарських культур.

Вплив змін клімату на екологічний стан агроландшафтів, систем землекористування та продуктивність агроекосистем, у т. ч. на врожайність та валові збори зернових і зернобобових культур, досить повно висвітлено у роботах О.Т. Тараріко [10]. Питання залежності врожайності культур від кліматичних факторів розглядали В.Л. Дмитренко [4], Т.І. Адаменко [1], В.Д. Панніков [8], В.О. Балабух [2] та ін.

Вплив різних властивостей ґрунтів на формування урожайності сільськогосподарських культур, їх кількісна оцінка як чинників ефективної родючості висвітлені у роботах багатьох дослідників [9; 7; 3]. Знання параметрів родючості ґрунтів у конкретних природних умовах та їх впливу на врожайність сільськогосподарських культур дасть змогу більш ефективно використовувати земельні ресурси і мінеральні добрива, не допускаючи при цьому зниження родючості ґрунтів і забруднення навколишнього середовища.

У дослідженнях, присвячених вивченню врожайності сільськогосподарських культур, відзначають різні ефекти зміни врожайності залежно від типу природних елементів ландшафту. Вважається, що більш різноманітний ландшафт із різноманітними елементами екосистеми, як правило, більш стійкий до екологічних змін, зокрема кліматичних, аніж однорідний і рівномірний ландшафти [19]. Тому вивчення взаємозв'язку між урожайністю сільськогосподарських культур та різноманіттям ландшафтів є нині надзвичайно актуальним питанням.

Постановка завдання. Метою роботи було встановлення внеску агроекологічних факторів, а саме біокліматичних змінних, ґрунтових показників та факторів ландшафтного різноманіття, у варіювання урожайності сої у Поліссі та Лісостепу України протягом 1991–2017 рр.

Виклад основного матеріалу дослідження. Показники урожайності сої у Поліський та Лісостеповій зонах України були надані Державною службою статистики України (<http://www.ukrstat.gov.ua/>). Період досліджень – з 1991 по 2017 рр. Територія охоплює 206 адміністративних районів з десяти областей України (Вінницької, Волинської, Житомирської, Київської, Львівської, Рівненської, Тернопільської, Хмельницької, Черкаської, Чернігівської).

Для описання динаміки урожайності сої була застосована симетрична лог-логістична модель (рис. 1), яка має такі характеристичні точки, як: нижній ліміт відгуку (найменший рівень врожайності); верхній ліміт (найвищий рівень врожай-

ності); нахил кривої відгуку у близькості до точки перегину, ED_{50} – час, який потрібний для досягнення половинного від максимального рівня зростання врожайності [5].

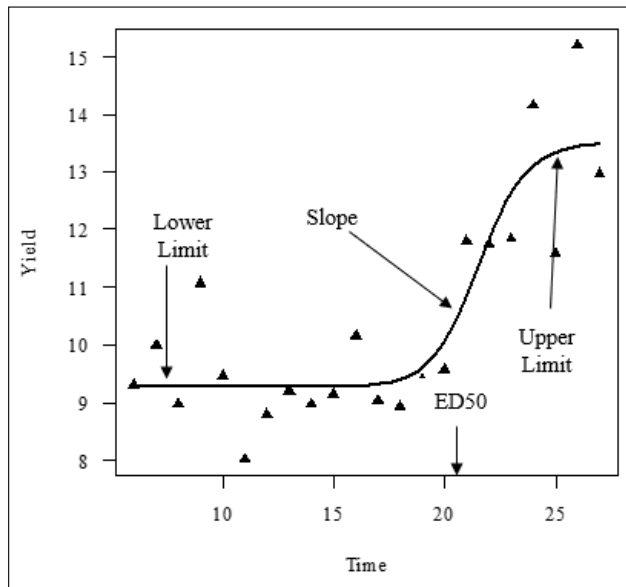


Рис. 1. Типова модель динаміки урожайності сої за 1991–2017 рр.

Умовні позначки: вісь абсцис – порядок років (1 – 1991, 2 – 1992, ...), вісь ординат – урожайність ріпаку, ц/га. *Lower Limit* – позначає найменший рівень урожайності за період досліджень, який спостерігався на початку та у середині 90-х років минулого століття; *Slope* – ухил кривої тренду, що показує швидкість змін урожайності в часі; *ED₅₀* – час з початку досліджень, який потрібний для досягнення половинного від максимального рівня зростання урожайності та одночасно момент найбільшої швидкості зростання врожайності; *Upper Limit* – найвищий рівень урожайності, за якого у цьому рівні агротехнологій урожайність визначається саме біотичним потенціалом території

Біокліматичні дані були визначені відповідно до бази WorldClim version 2 (<http://worldclim.org/version2>). Біокліматичні змінні являють собою екологічно значимі аспекти варіювання температури та опадів упродовж року. Для аналізу було використано 19 біокліматичних змінних [5]. Аналіз головних компонент кліматичних змінних дав змогу виділити чотири головні компоненти, власні числа яких більші за одиницю, які разом пояснюють 92,5% варіабельності кліматичних змінних [5].

Відомості щодо просторового варіювання ґрунтових властивостей та класифікацію ґрунтів одержали з бази даних SoilGrids (<https://soilgrids.org>). Для аналізу впливу ґрунтових факторів на урожайність сої нами використано такі показники, як: запаси гумусу, рН, щільність ґрунту, вміст піску, глини чи мулу для різних ґрунтових шарів. У результаті аналізу головних компонент ґрунтових змінних було виділено 6 головних компонент, власні значення яких вищі за одиницю, які разом пояснюють 98,5% загальної дисперсії ґрунтових показників [6].

Карту типів ландшафтного покриття GlobCover із роздільною здатністю 300 м, яку було створено на основі двомісячних результатів вимірювань Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS), застосовано як основу для створення

карти різноманіття типів ландшафтного покриття. Оцінку різноманіття проведено на основі індексу Шеннона та відстані до природоохоронних об'єктів.

Як модель урожайності сої ми використали лог-логістичну модель (рис. 1), а параметри цієї моделі можуть бути використані для аналізу просторової динаміки урожайності. За результатами регресійного аналізу виявлено статистично значиму залежність ($p < 0,05$) між параметрами урожайності сої та виявленими кліматичними та ґрунтовими головними компонентами (табл. 1).

Таблиця 1
Регресійна залежність параметрів урожайності сої від кліматичних та ґрунтових змінних, а також від показників різноманітності ландшафтного покриття*

Предиктори	Ухил Slope, $R_{adj}^2 = 0,09$	Нижня границя Lower Limit, $R_{adj}^2 = 0,51$	Верхня границя Upper Limit, $R_{adj}^2 = 0,69$	ED50, $R_{adj}^2 = 0,50$
Shannon (H)	–	–	–	-1,20±0,29
H ²	–	–	–	1,16±0,31
Distance (D)	–	–	–	–
D ²	–	–	–	–
Climate_1	0,48±0,20	–	-0,37±0,11	–
Climate_2	–	0,44±0,08	0,14±0,07	–
Climate_3	-0,20±0,09	0,16±0,06	–	–
Climate_4	–	-0,15±0,06	-0,22±0,05	–
soil_1	0,33±0,14	-0,84±0,11	-0,88±0,08	0,60±0,11
soil_2	–	–	-0,24±0,05	–
soil_3	–	–	–	–
soil_4	0,40±0,13	-0,28±0,10	-0,35±0,08	–
soil_5	–	–	0,17±0,06	–
soil_6	–	-0,40±0,07	-0,18±0,06	–

*Примітка – наведені стандартизовані регресійні коефіцієнти, статистично вірогідні для $p < 0,05$

Найбільшою швидкістю зростання урожайності сої характеризуються північно-західні райони території досліджень (рис. 2).

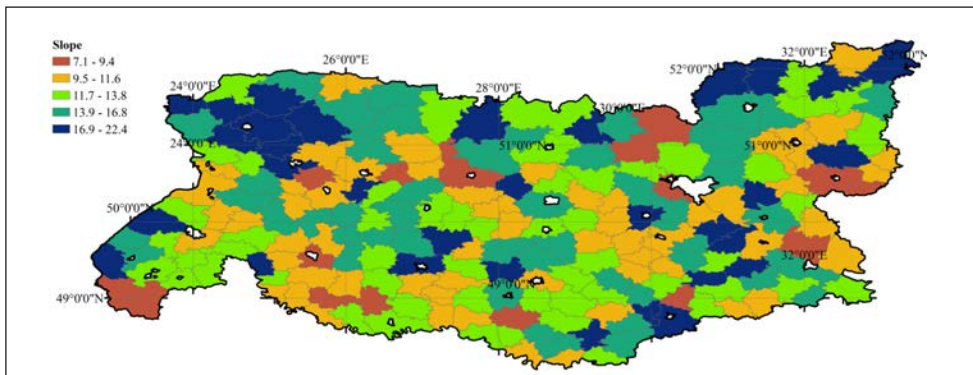


Рис. 2. Просторове варіювання параметра нахилу (Slope) лог-логістичної моделі динаміки урожайності сої

На цей параметр урожайності серед кліматичних змінних найбільш значний вплив має головна компонента 1 (табл. 1). Тобто є прямий кореляційний зв'язок між швидкістю нарощення врожайності та континентальністю клімату ($R = 0,48 \pm 0,20$; $p < 0,05$), а це підтверджує те, що соя має підвищені вимоги до рівномірного зволоження протягом вегетаційного сезону [17]. Також виявлений значний вплив ґрунтової головної компоненти 4 ($R = 0,40 \pm 0,13$; $p < 0,05$), яка характеризується найбільшою чутливістю до вмісту мулу у ґрунті.

За показником нижньої границі урожайності сої досліджений регіон ділиться майже навпіл – південні райони мають більш високі показники мінімальної урожайності порівняно з північними (рис. 3). Виявлено сильний статистично значимий кореляційний зв'язок між цим параметром урожайності та ґрунтовою головною компонентою 1, що відповідає за вміст піску у гранулометричному складі ґрунту ($R = -0,84 \pm 0,11$; $p < 0,05$) (табл. 1). Тобто урожайність сої менша на піщаних ґрунтах. Також на показник мінімальної урожайності сої чинить вплив кліматична головна компонента 2 ($R = 0,44 \pm 0,08$; $p < 0,05$), що визначається мінливістю температурного режиму в екстремальні періоди року. Такі результати підтверджуються дослідженнями інших учених, які стверджують, що соя дуже чутлива до різких перепадів температури. Так, якщо температура опускається нижче 10°C , рослини сої демонструють фізіологічну та біохімічну дисфункцію [17].

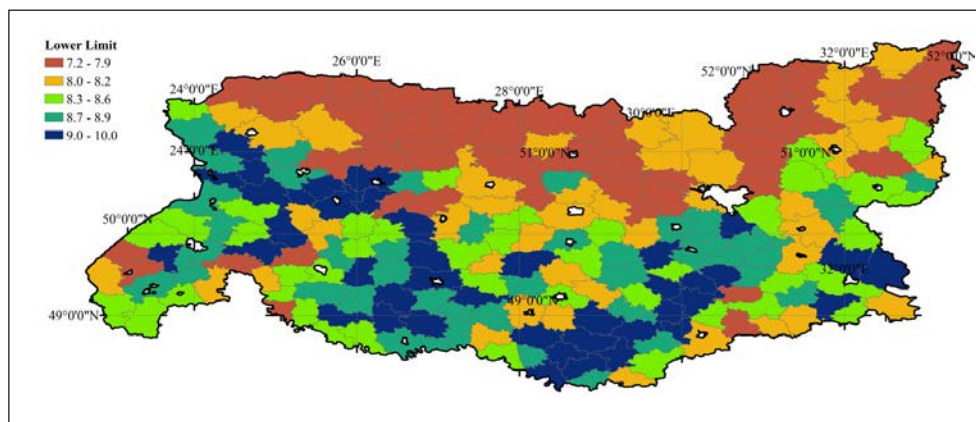


Рис. 3. Просторове варіювання параметра найменшого рівня (Lower limit) лог-логістичної моделі динаміки врожайності сої

Для просторового розподілу параметру найбільшого рівня урожайності сої спостерігається аналогічна картина, як і для нижньої межі урожайності, що свідчить про те, що ці показники пов'язані (рис. 4).

Показник максимальної урожайності також визначається континентальністю клімату ($R = -0,37 \pm 0,11$; $p < 0,05$) та вмістом піщаної ґрунтової фракції $R = -0,88 \pm 0,08$; $p < 0,05$), що ще раз підтверджує попередньо отримані нами висновки про те, що більш сприятливими ґрунтово-кліматичними умовами для вирощування сої характеризується зона Лісостепу.

Час до настання половини від максимальної урожайності сої є показником протилежним максимальній урожайності, оскільки за своєю сутністю фактично характеризує «інертність» продукційного потенціалу. У просторовому аспекті цей показник має вищі значення в тих районах, де показник максимальної урожайності сої низький (рис. 5).

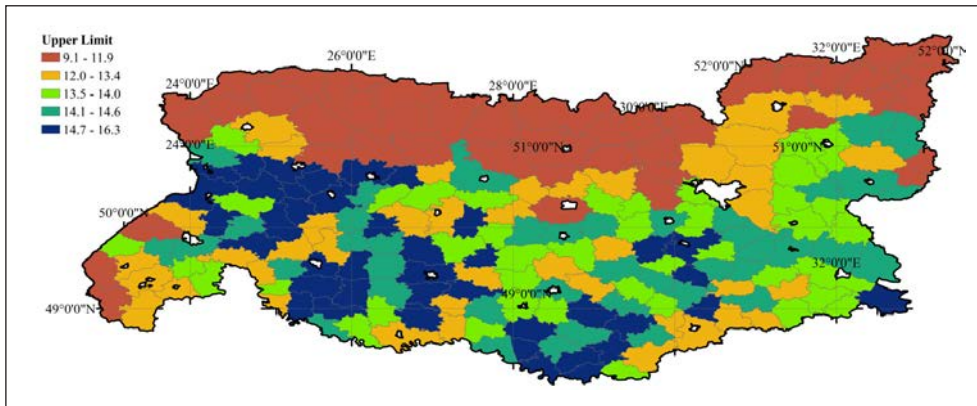


Рис. 4. Просторове варіювання параметра найбільшого рівня (*Upper limit*) лог-логістичної моделі динаміки врожайності сої

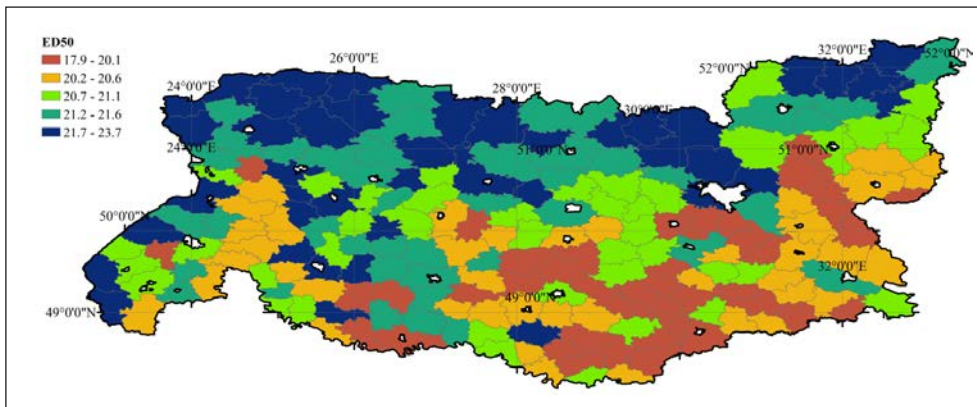


Рис. 5. Просторове варіювання параметра часу настання перегину (*ED50*) лог-логістичної моделі динаміки врожайності сої

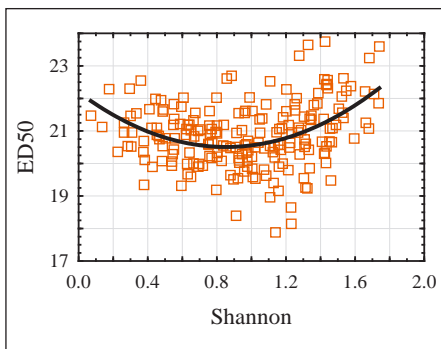


Рис. 6. Залежність *ED50* від ландшафтно-екологічного різноманіття та відстані до об'єктів природно-заповідного фонду

На цей параметр також впливає ґрунтова змінна, що визначає вміст піску у гранулометричному складі ($R = 0,60 \pm 0,11$, $p < 0,05$).

Варто зауважити, що *ED50* – єдиний параметр урожайності сої, який проявляє залежність від рівня ландшафтного різноманіття (індексу Шеннона) ($R = 1,16 \pm 0,30$; $p < 0,05$); причому ця залежність описується квадратичною функцією (рис. 6).

У дослідженнях, присвячених вивченню врожайності сільськогосподарських культур, відзначають позитивний ефект ландшафтного різноманіття агроландшафтів на урожайність. Насамперед це пов'язане із так званими

«екосистемними послугами», які асоціюються із природними елементами ландшафту поблизу сільськогосподарських полів. Серед екосистемних послуг виділяють такі як, наприклад, біологічна боротьба зі шкідниками, яка полягає у здатності середовища використовувати хижих членистоногих, присутніх в екосистемі, для захисту від шкідників та запилення рослин дикими комахами [13]. Природні вороги, за оцінками [19], забезпечують 50–90% боротьби зі шкідниками в посівах сільськогосподарських культур і можуть являти собою стійку та ефективну альтернативу використанню хімічних пестицидів для захисту сільськогосподарських культур. Тому різноманіття ландшафтів у локальному аспекті позитивно впливає на чисельність природних ворогів і комах-запилювачів і, як наслідок, на врожайність [12]. Зокрема, було доведено позитивний ефект «екосистемних послуг» різноманітного ландшафту, який полягав у зниженні чисельності основних шкідників сої за допомогою природних ворогів, що в разі зменшує потребу у застосуванні інсектицидів [13]. Наші дослідження підтверджують взаємозв'язок між ландшафтним різноманіттям та урожайністю сої у великих просторових масштабах.

Висновки та перспективи подальшого розвитку у цьому напрямі. Варіювання показника швидкості зростання урожайності сої на 9% залежить від кліматичних і ґрунтових змінних. Також ґрунтові та кліматичні фактори визначають 51% варіювання мінімальної та 69% варіювання максимальної урожайності цієї культури. Час настання різкого зростання врожайності найбільше залежить від різноманітності ландшафтного покриву. Причому ця залежність носить нелінійний характер. Усі досліджені параметри урожайності сої проявляють найбільшу кореляцію із показником, який визначає вміст піщаної фракції у гранулометричному складі ґрунту. Проведені дослідження можуть стати відправною точкою для моделювання продукційного потенціалу агроекосистем під впливом зміни клімату та деградаційних процесів у ґрунтах. Також отримані результати можуть бути використані для обґрунтування створення нових об'єктів природо-заповідного фонду або природних осередків поблизу агроландшафтів у зв'язку з їх важливими «екосистемними послугами». Більш того, на основі отриманих статистичних закономірностей вищезгадані «екосистемні послуги» можуть бути економічно обраховані.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Адаменко О., Рудько Г., Консевич Л. Екологічне картування : підручник. Івано-Франківськ : Вид-во ІМЕ, 2003. 272 с.
2. Балабух В.О., Однолєток Л.П., Кривошеїн О.О. Вплив зміни клімату на продуктивність озимої пшениці в Україні у періоді вегетаційного циклу. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2017. № 3. С. 72–85.
3. Демидов А.А., Кобец А.С., Грицан Ю.И., Жуков А.В. Пространственная агроэкология и рекультивация земель : монография. Днепропетровск : Изд-во «Свидлер А.Л.». 2013. 560 с.
4. Дмитренко В.Л. Адаптації меліоративного землеробства до погоди і клімату. *Вісник аграрної науки*. 2003. № 2. С. 52–56.
5. Зимарєва А.А. Просторово-часові закономірності варіювання урожайності кукурудзи в Україні. *Наукові горизонти*. 2019. № 2 (75). С. 58–66.
6. Зимарєва А.А., Писаренко П.В. Просторовий взаємозв'язок властивостей ґрунту та урожайності кукурудзи. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2019. № 4. С. 108–115.
7. Медведєв В.В., Чесняк Г.Я., Полупан М.І. та ін. Родючість ґрунтів: моніторинг та управління. Київ : Урожай. 1992. 248 с.
8. Панников В.Д., Минєев В.Г. Почва, климат, удобрение и урожай. Москва : Колос, 1977. 416 с.

9. Сибирцев Н.М. Почвоведение. Москва : Наука, 1951. 472 с.
 10. Тараріко Ю.О., Чернокозинський А.В., Сайдак Р.В. Вплив агротехнічних і агрометеорологічних факторів на продуктивність агроєкосистем. *Вісник аграрної науки*. 2008. № 5. С. 64–67.
 11. Brisson N. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crop. Res.* 2010. Vol. 119. Pp. 201–212.
 12. Garbach K., Milder J.C., DeClerck F.A.J., GemmillHerren B. Examining multi-functionality for crop yield and ecosystem services in five systems of agroecological intensification. *Int. J. Agric. Sustain.* 2017. Vol. 15. Pp. 11–28.
 13. Gardiner M., Landis D., Gratton C., Heimpel G. Landscape diversity enhances biological control of an introduced crop pest in the North-Central USA. *Ecological applications: a publication of the Ecological Society of America*. 2009. Vol. 19. Pp. 143–54. DOI: 10.1890/07-1265.1.
 14. Godfray H.C.J., Beddington J.R., Crute I.R., Toulmin C. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*. 2010. Vol. 327(5967). Pp. 812–818. DOI: 10.1126/science.1185383.
 15. Leng G., Huang M. Crop yield response to climate change varies with crop spatial distribution pattern. *Scientific Reports*, 2017. Vol. 7. P. 1463. DOI: 10.1038/s41598-017-01599-2.
 16. Lesk C., Rowhani P., Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*. 2016. Vol. 529. Pp. 84–87. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16467>.
 17. Miransari M. Environmental Stresses in Soybean Production. *Soybean Production*. London : Academic Press, 2016. 322 p.
 18. Penalba Olga & Bettolli Maria & Vargas Walter. The impact of climate variability on soybean yields in Argentina. *Multivariate regression. Meteorological Applications*. 2007. No. 14. Pp. 3–14. DOI: 10.1002/met.1.
 19. Schippers P., Heide C., Koelewijn H., Schouten M., Smulders M.J.M., Cobben M., Verboom J. Landscape diversity enhances the resilience of populations, ecosystems and local economy in rural areas. *Landscape Ecology*. 2015. Vol. 30. Pp. 193–202. DOI: 10.1007/s10980-014-0136-6.
-