Original researches

Agroecological Determinants of Rapeseed Yield Variation

A. A. Zymaroieva, T. P. Fedoniuk, T. V. Pinkina, A. A. Pinkin
Zhytomyr National Agroecological University, Zhytomyr, UkraineReceived: 12 December 2019
Revised: 18 December 2019
Accepted: 19 December 2019Zhytomyr National Agroecological University,
Staryy Bulvar, 7, Zhytomyr, 10008, UkraineTel.: +38-097-770-65-02
E-mail: nastya.zymaroieva@gmail.comCite this article: Zymaroieva, A. A.,
Fedoniuk, T. P., Pinkina, T. V.,
& Pinkin, A. A. (2020). Agroecological
determinants of rapeseed yield variation.
Agrology, 3(1), 12–18. doi: 10.32819/020002

Abstract. Global food and energy security largely depends on the rate of main crops yield increase, so the research of limiting factors of yields is a pressing issue today. The aim of this work was to determine the contribution of agro-ecological factors, namely, bioclimatic variables, soil indicators and factors of landscape diversity to the variation of rapeseed yield parameters on the territory of Polissya and Forest-steppe zones of Ukraine during 1991–2017. The average rapeseed yield data by the administrative district for 10 regions was used as the material. The dynamics of rapeseed yield from the mid-1990s to the present described by a log-logistic model. The parameters of the yield model are the following indicators: lower limit of yield; upper limit of yield; slope that showing the rate of change in yield over time and *ED50* – the time it takes to achieve half of the maximum yield level. There are statistically significant regression dependencies between rapeseed yield parameters and agroecological factors ($p < 0.05$). Rapeseed yield parameters of 43–68% are due to the action of agri-environmental factors, which determines this crop as sensitive to environmental changes. Agroecological factors by 43–68% determine the variability of rapeseed yield, which determines this crop as sensitive to environmental conditions. The most sensitive to agro-ecological factors is the upper yield limit. There is a correlation between the Shannon index and the slope of the rapeseed yield regression model, as well as between the distance to the objects of Natural Reserve Fund (NRF) and the upper limit of yield. *ED50* and the landscape diversity index are quadratically correlated, indicating the complex nature of the relationship between this yield parameter and landscape diversity. Rapeseed productivity is mostly influenced by the continentality of climate among other climate variables. High sensitivity of rapeseed yield parameters to soil indices was found, and mostly to the soil structure (sand content in soil), which largely determines the rapeseed yield spatial variation. The aspects of rapeseed yield variation that we have identified are quite important both in terms of forecasting models and in terms of farmland management.

Keywords: productivity; ecological factors; dynamics; model; *Brassica napus* L.

Агроекологічні детермінанти варіювання врожайності ріпаку

А. А. Зимарова, Т. П. Федонюк, Т. В. Пінкіна, А. А. Пінкін
Житомирський національний агроекологічний університет, м. Житомир, Україна

Анотація. Продовольча та енергетична безпека людства значною мірою залежить від швидкості зростання врожайності основних сільськогосподарських культур, тому вивчення факторів, які лімітують врожайність, нині є актуальним питанням. Дослідженнями передбачалося визначити внесок агроекологічних факторів, зокрема, біокліматичних змінних, ґрунтових показників та факторів ландшафтного різноманіття, у варіювання параметрів урожайності ріпаку на території Поліської та Лісостепової зон України протягом 1991–2017 рр. Вихідні дані являли собою усереднені показники врожайності ріпаку за адміністративними районами для 10 областей України. Встановлено, що динаміка урожайності ріпаку зі середини 90-х років минулого століття по поточний період часу може бути описана сигмоїдною кривою (лог-логістичною моделлю). Параметрами моделі врожайності слугували такі показники: мінімальний рівень врожайності; максимальний рівень врожайності; ухил моделі, що показує швидкість змін урожайності в часі; *ED50* – час, який потрібний для досягнення половинного, від максимального, рівня зростання врожайності. Виявлено статистично значимі регресійні залежності між параметрами врожайності ріпаку та агроекологічними факторами ($p < 0,05$). Параметри врожайності ріпаку на 43–68% обумовлені дією агроекологічних факторів, що визначає цю сільськогосподарську культуру як чутливу до змін навколишнього середовища. Найбільш чутливою до агроекологічних факторів є верхня межа урожайності. Визначено кореляцію між індексом Шеннона та ухилом регресійної моделі врожайності ріпаку, а також між відстанню до об'єктів природно-заповідного фонду (ПЗФ) та верхньою границею врожайності. Зі збільшенням відстані до природно-заповідних об'єктів максимальна врожайність знижується. Параметр *ED50* та показник ландшафтного різноманіття пов'язані квадратичною залежністю, що свідчить про складний характер взаємозв'язку між цим параметром врожайності та ландшафтним різноманіттям. Серед кліматичних змінних найбільше впливає на параметри врожайності ріпаку континентальність клімату. Виявлено високу чутливість параметрів урожайності ріпаку до ґрунтових показників, а найбільше – до гранулометричного складу (вмісту піску в ґрунті), що великою мірою визначає просторове варіювання врожайності цієї культури. Встановлені аспекти варіювання врожайності ріпаку є досить важливими як з точки зору прогностичних моделей, так і в контексті управління сільськогосподарськими угіддями.

Ключові слова: продуктивність; екологічні фактори; динаміка; модель; *Brassica napus* L.

Вступ

Продовольча безпека та площі земель, які необхідні для виробництва продуктів харчування, значною мірою залежать від швидкості зростання врожайності основних сільськогосподарських культур (Grassini, Eskridge, & Cassman, 2013). До глобальних чинників, що визначають врожайність культур та ступінь її варіювання, відносять технологію, генетику, клімат, ґрунти, стратегію управління землями та пов'язані з цим рішення такі, як застосування добрив, методи обробітку ґрунту, гібридний підбір культур, управління зрошенням, інтервал між рядками, глибина оранки, щільність посадки тощо (Kucharik & Ramankutty, 2005; Kukal & Irmak, 2018).

Серед екологічних чинників визначальними та найбільш впливовими факторами сільськогосподарської продуктивності є клімат (погода) та ґрунтові умови. Так, було зазначено (Xiao et al., 2015; Iizumi & Ramankutty, 2016; Li, Wang, Ning, & Luo, 2016; Leng & Huang, 2017), що останні тенденції зміни кліматичних показників можуть суттєво впливати на врожайність сільськогосподарських культур, незважаючи на досягнення в їх технологіях вирощування.

Зв'язок між врожайністю та ґрунтом досить складний і залежить від складних взаємодій фізичних і хімічних властивостей ґрунту, інших зовнішніх природних факторів (Sys, Van Ranst, & Debaveye, 1991). Проте більшість досліджень врожайності культур зосереджені лише на описуванні просторової мінливості врожайності, незважаючи на потенційну користь врахування ефектів просторової та часової мінливості взаємовідносин “рослина та ґрунт” (McBratney, Whelan, & Shatar, 1997). Вважається, що взаємодія ґрунт–рослина є найбільш значним фактором, що сприяє просторовій мінливості врожайності культур (Corwin et al., 2003).

Протягом останніх десятиліть управління землеробством перетворило раніше гетерогенні ландшафти на монокультури, що призводить до деградації та локального виснаження природних елементів ландшафту (ПЕЛ, natural landscape elements – NLEs) (Vitousek, Mooney, Lubchenco, & Melillo, 1997; Tilman et al., 2001). Однак природні елементи ландшафту являють собою цінні місця існування та харчові ресурси для багатьох тварин, наприклад, безхребетних та птахів (Fuller et al., 1995; Amy et al., 2015), які надають цілий спектр “екосистемних послуг”, таких як біологічний контроль шкідників (Chaplin-Kramer, O'Rourke, Blitzer, & Kremen, 2011; Woodcock et al., 2016) та запилення рослин (Hipólito, Boscolo, & Viana, 2018; Lindgren, Lindborg, & Cousins, 2018). І хоча цінність біологічного різноманіття природних елементів ландшафту є досить вивченим питанням (Billeter et al., 2008), вплив цих природних осередків на виробництво продукції рослинництва досліджено недостатньо.

Існують вагомі докази сильного та стійкого впливу біорізноманіття на врожайність культур як у природних умовах (Hooper, Chapin, & Ewel, 2005), так і в агроекосистемах (Picasso, Brummer, Liebman, Dixon, & Wilsey, 2008). Дослідження Poveda, Martinez, Kersch-Becker, Bonilla, & Tscharntke (2012) виявили позитивний вплив ландшафтного різноманіття на врожайність картоплі. Доведено, що збереження природних місць існування в агроландшафтах корисне у зв'язку з наданням таких “екосистемних послуг” як зменшення шкоди від шкідників, підвищення врожайності та збільшення функціонального біорізноманіття (Poveda et al., 2012). Відзначено, що продуктивність кукурудзи також залежить від екосистемних послуг, а отже, і від ландшафтного різноманіття (CONABIO, 2017). У дослідженнях канадських учених, які аналізували вплив різноманітності ландшафту на врожайність семи зернових культур на посівних площах понад 250 тисяч км² і використовували функціональний регресійний підхід, встановлено докази достовірно позитивного зв'язку між урожайністю та складністю ландшафту в посівах чотирьох зі семи культур (Galpern, Vickruck, Devries, & Gavin, 2019). Хоча варіювання врожайності,

яка пояснюється різноманіттям ландшафту, незначне – це може стати достатньою умовою для збереження природних осередків поблизу агроландшафтів, з огляду на їх важливу екологічну роль. Проте подібні дослідження не проводилися в Україні і тому, на нашу думку, потребують уваги.

Мета дослідження полягала у встановленні внеску агро-екологічних факторів, зокрема, біокліматичних змінних, ґрунтових показників та факторів ландшафтного різноманіття, у варіювання врожайності ріпаку на території Поліської та Лісостепової зон України протягом 1991–2017 рр.

Матеріал та методи

Показники врожайності ріпаку (озимого і ярого) у Поліській та Лісостеповій зонах України були надані Державною службою статистики України (<http://www.ukrstat.gov.ua>). Період досліджень з 1991 по 2017 рік. Дані мають характер середньої врожайності культури по адміністративному району. Територія охоплює 206 адміністративних районів з десяти областей України (Вінницька, Волинська, Житомирська, Київська, Львівська, Рівненська, Тернопільська, Хмельницька, Черкаська, Чернігівська).

Для описання динаміки врожайності ріпаку була застосована симетрична лог-логістична модель (рис. 1), яка має такі характеристичні точки: нижній ліміт відгуку (найменший рівень врожайності); верхній ліміт (найвищий рівень врожайності); ухил кривої відгуку в близькості до точки перегину, *ED50* – час, який потрібний для досягнення половинного, від максимального, рівня зростання врожайності (Zymaroieva, 2019).

Указані характеристики динаміки врожайності ріпаку розраховано для кожного адміністративного району та застосовано як інтегральний кількісний показник варіювання врожайності культури в даній точці простору в часі (Zymaroieva & Fedonyuk, 2019). У свою чергу біокліматичні змінні та ґрунтові характеристики було усереднено по кожному адміністративному району. Результати усереднення застосовано як предиктори характеристик врожайності досліджуваної культури.

Біокліматичні дані визначені відповідно до бази WorldClim version 2 (<http://worldclim.org/version2>) (Fick & Hijmans, 2017). Відомості про перебіг кліматичних процесів представлені у вигляді растрових карт з роздільною здатністю 1 км, що є цілком достатнім для вирішення поставлених завдань. Біокліматичні змінні являють собою екологічно значимі аспекти варіювання температури та опадів протягом року. Для аналізу було використано 19 біокліматичних змінних (Zymaroieva, 2019). Для переведення ненормальних залежних змінних у нормальну форму застосували перетворення Box-Cox (Osmanm, Ozgur, & Ozlem, 2014), яке реалізовували за допомогою бібліотеки AID для серії статистичних обчислень R (R Core Team, 2017).

Статистичний аналіз виконаний за допомогою програмного продукту Statistica 10. Аналіз головних компонент був застосований для зменшення розмірності матриць клімату та властивостей ґрунту. Загальні лінійні моделі використані для перевірки значущості впливу змінних клімату та ґрунту на параметри врожайності. Аналіз головних компонент кліматичних змінних дозволив виділити чотири головних компоненти, власні числа яких більші за одиницю і разом пояснюють 92,5% варіабельності кліматичних змінних (Zymaroieva, 2019).

Відомості щодо просторового варіювання ґрунтових властивостей та класифікації ґрунтів отримали з бази даних SoilGrids (<https://soilgrids.org>) (Hengl et al., 2017). Для аналізу впливу ґрунтових факторів на врожайність ріпаку нами використано певні показники: 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 і разом пояснюють 98,5% загальної дисперсії ґрунтових показників.

Карту типів ландшафтного покриття GlobCover з роздільною здатністю 300 м, яку було створено на основі двомісячних результатів вимірювань Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) (Arino et al., 2012), застосовано як основу для створення карти різноманіття типів ландшафтного покриття.

Оцінку різноманіття проведено на основі індексу Шеннона. Розрахунки виконані за допомогою The Corridor Designer toolbox works в ArcGIS 10.1.

Результати

Ріпаківництво в Україні має не дуже давню історію (Haidash, 2002), але від середини 2000-х років почалося майже лінійне нарощування врожайності ріпаку (рис. 1), що пов'язане з низкою економічних та екологічних факторів (Zymaroieva, Zhukov, Romanchuck, & Pinkin, 2019). У загальному вигляді динаміка врожайності ріпаку зі середини 90-х років і дотепер може бути описана сигмоїдною кривою. Ця крива описує характерні етапи спостережуваної динаміки, а саме: повільна швидкість зростання на початковому етапі, різке зростання в середній частині періоду досліджень та стабілізація зростання в останній третині проміжку досліджень.

Виявлені статистично значимі регресійні залежності між параметрами врожайності ріпаку та агроєкологічними факторами ($p < 0,05$) – таблиця. Так, ухил логарифмічної кривої, що відповідає швидкості збільшення врожайності, характеризується оберненою кореляцією до індексу різноманіття ландшафтного покриття. Швидкість нарощування врожайності ріпаку проявляє кореляцію з усіма кліматичними головними компонентами, що свідчить про виняткову роль кліматичних змінних у варіюванні цього параметра врожайності. Серед ґрунтових чинників на врожайність ріпаку найбільше впливає головна компонента 1 ($R = -0,56 \pm 0,10$; $p < 0,05$), що визначає вміст піску, та головна компонента 3 ($R = 0,21 \pm 0,07$; $p < 0,05$), яка вказує на вміст гумусу у ґрунті. Швидкість зростання врожайності ріпаку закономірно підвищується зі збільшенням вмісту гумусу у ґрунті. Найповільніше врожайність ріпаку зростає в північних регіонах території досліджень (зона Полісся) – рис. 2.

Рис. 1. Типова динаміка врожайності ріпаку та лог-логістична модель

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

Таблиця. Регресійна залежність параметрів врожайності ріпаку від кліматичних та ґрунтових змінних, а також показників різноманітності ландшафтного покриття*

Предиктор	Ухил Slope, $R_{adj}^2 = 0,57$	Нижня границя Lower Limit, $R_{adj}^2 = 0,43$	Верхня границя Upper Limit, $R_{adj}^2 = 0,68$	ED50, $R_{adj}^2 = 0,59$
Shannon (H)	$-0,55 \pm 0,27$	-	-	$0,77 \pm 0,26$
H2	-	-	-	-
Distance (D)	-	-	$-0,41 \pm 0,16$	$1,47 \pm 0,18$
D2	-	-	-	$-1,73 \pm 0,17$
Climate_1	$0,34 \pm 0,13$	$0,34 \pm 0,16$	$0,40 \pm 0,11$	$-0,91 \pm 0,13$
Climate_2	$-0,16 \pm 0,08$	-	$-0,19 \pm 0,07$	-
Climate_3	$-0,17 \pm 0,06$	-	$0,42 \pm 0,05$	$0,25 \pm 0,06$
Climate_4	$-0,20 \pm 0,06$	$-0,16 \pm 0,07$	-	-
soil_1	$-0,56 \pm 0,10$	$-0,47 \pm 0,11$	$-0,19 \pm 0,08$	$-0,19 \pm 0,10$
soil_2	$-0,15 \pm 0,06$	$-0,15 \pm 0,07$	$-0,16 \pm 0,05$	-
soil_3	$0,21 \pm 0,07$	$0,19 \pm 0,08$	$0,23 \pm 0,06$	$-0,33 \pm 0,07$
soil_4	-	-	$-0,28 \pm 0,08$	$-0,24 \pm 0,09$
soil_5	-	-	$0,20 \pm 0,06$	$0,18 \pm 0,07$
soil_6	$0,16 \pm 0,07$	-	$0,47 \pm 0,06$	$-0,31 \pm 0,07$

Примітка: * – наведено стандартизовані регресійні коефіцієнти, статистично вірогідні для $p < 0,05$.

Рис. 2. Просторове варіювання параметра ухилу (*Slope*) лог-логістичної моделі динаміки врожайності ріпаку (1991–2017 рр.)

Нижня межа врожайності ріпаку визначається екологічними факторами лише на 43% (таблиця). На цей параметр врожайності серед кліматичних факторів найбільше впливає континентальність клімату ($R = 0,34 \pm 0,16$; $p < 0,05$), а серед ґрунтових – уміст піску ($R = -0,47 \pm 0,11$; $p < 0,05$) та запас гумусу ($R = 0,19 \pm 0,08$; $p < 0,05$). Як правило, райони, що мають невисоку початкову врожайність ріпаку, характеризуються і більш повільною швидкістю зростання врожайності (рис. 3, 4).

Верхня границя врожайності негативно корелює з відстанню до об'єктів природно-заповідного фонду ($R = -0,41 \pm 0,16$; $p < 0,05$). Тобто близькість природоохоронних територій сприятливо впливає на верхній ліміт врожайності ріпаку (таблиця). Цей параметр врожайності також залежить від кліматичних факторів, здебільшого від мінливості температурних умов ($R = 0,42 \pm 0,05$; $p < 0,05$) та ґрунтових показників, зокрема, від умісту мулу та глини

($R = 0,47 \pm 0,06$; $p < 0,05$). Наголосимо, що коливання температурних умов сприятливо впливають на врожайність ріпаку. Територіально більш високими показниками максимальної врожайності характеризуються адміністративні райони на східній половині території досліджень (рис. 4).

Між параметром *ED50* та відстанню до природно-заповідних об'єктів існує статистично значимий нелінійний зв'язок (рис. 5). Залежність можна описати дзвіноподібною кривою.

Час досягнення половинного, від максимального, рівня врожайності ріпаку показує досить сильний зворотний кореляційний зв'язок з континентальністю клімату ($R = -0,91 \pm 0,13$; $p < 0,05$). Це явище проявляється в певній закономірності: південні райони характеризуються меншим часом, який необхідний для досягнення половини, від максимальної, врожайності ріпаку (рис. 6). Поміж ґрунтових чинників *ED50* найбільше корелює зі запасами гумусу ($R = -0,33 \pm 0,77$; $p < 0,05$).

Рис. 3. Просторове варіювання параметра найнижчого рівня (*Lower limit*) лог-логістичної моделі динаміки врожайності ріпаку (1991–2017 рр.), ц/га

Рис. 4. Просторове варіювання параметра найвищого рівня (*Upper limit*) лог-логістичної моделі динаміки врожайності ріпаку (1991–2017 рр.), ц/га

Рис. 5. Залежність *ED50* від відстані до об'єктів природно-заповідного фонду

Рис. 6. Просторове варіювання параметра часу настання перегіну (*ED50*) лог-логістичної моделі динаміки врожайності ріпаку (1991–2017 рр.)

Обговорення

У ході дослідження з'ясовано: чим більш різноманітний ландшафтний покрив, тим повільніше зростає врожайність ріпаку. Це можна, очевидно, пов'язати з тим, що на врожайність ріпаку значно впливають шкідники, яких натеper визначено понад 50 видів (Basanets, 2017). Можливо також, що присутність ландшафтних одиниць з більш різноманітним рослинним покривом впливає на кількість шкідників та бур'янів, а це у свою чергу впливає на показники врожайності ріпаку. У такий спосіб, теоретично, складність ландшафту може також негативно впливати на посіви, оскільки природні ареали навколо полів можуть являти собою резервуари для шкідників і насіння бур'янів. Хоча мета-аналізи свідчать про те, що поширеність комах-шкідників, як правило, не пов'язана зі складністю ландшафту (Galpern et al., 2019). Так, саме поширення бур'янів у посівах не пов'язане зі складністю ландшафту, хоча і може залежати від конкретних характеристик рослин та їх життєвої історії (Alignier, Bretagnolle, & Petit, 2012). Складні ландшафти можуть виявити ризики там, де ставиться за мету збереження біорізноманіття, наприклад, як надання шляхів для поширення інвазійних видів (O'Reilly-Nugent et al., 2016). Хоча більшість досліджень свідчать про те, що негативні ефекти складності ландшафтів не є переважаючими (Galpern et al., 2019).

Висока чутливість параметрів врожайності до ґрунтових показників доводить твердження, що ріпак (*Brassica napus*) дуже вимогливий до кліматичних умов і родючості ґрунту. У зоні Полісся найбільш придатні під ріпак сірі легкосуглинкові ґрунти, зовсім непридатні – піщані і глинисто-піщані (Melnychuk, Bovsunovskyi, Savchuk, & Grishenko, 2011). Саме цим пояснюється негативна кореляція всіх параметрів врожайності до вмісту піску в ґрунті.

Ріпак – це однорічна рослина, яка переважно вирощується на територіях з відносно прохолодним та вологим помірним кліматом (Jaime, Alcántara, Manzaneda, & Rey, 2018). Зокрема, нами встановлена чутливість параметрів врожайності до континентальності клімату. За прогнозами багатьох учених (Donatelli, Srivastava, Duveiller, Niemeyer, & Fumagalli, 2015; Leng & Huang, 2017), глобальне потепління та пов'язане з цим збільшення посушливості в багатьох помірних регіонах, де зараз культивується ріпак, можуть знизити його врожайність. Наприклад, на основі симуляційних моделей зміни клімату встановлено, що в найближчому майбутньому врожайність ріпаку в Канаді знизиться на 23–27% (Qian et al., 2017). Дослідження потенціалу врожайності ріпаку в Україні за умов кліматичних змін потребує уточнення. Нами визначено, що на верхню границю врожайності ріпаку впливає мінливість температурних умов. Схожі висновки отримали британські вчені, які встановили, що середня температура на початку зими значно і обов'язково пов'язана зі зміною врожайності озимого ріпаку, зокрема, збільшення середньої температури на 1 °C спричиняє середнє зниження врожайності на 21 кг/га (Brown, Beeby, & Penfield, 2019).

Залежність між параметром врожайності ріпаку *ED50*, що відображає час, який потрібний для досягнення половинного, від максимального, рівня зростання врожайності, носить нелінійний характер. Це засвідчує, що за певної відстані до природоохоронних територій *ED50* сягає максимальних показників, але зниження відстані до природоохоронних об'єктів неминуче призводить до скорочення часу, який необхідний для досягнення половинного, від необхідного, рівня врожайності. Узагалі залежності між ландшафтним різноманіттям та врожайністю культур часто мають нелінійний характер (Bae et al., 2018; Galpern et al., 2019), що свідчить про доволі складний та неоднозначний взаємозв'язок між цими поняттями.

Висновки

Таким чином, параметри врожайності ріпаку на 43–68% обумовлені дією агроекологічних факторів, що визначає цю

сільськогосподарську культуру як чутливу до змін навколишнього середовища. Встановлено кореляцію між індексом Шеннона та ухилом регресійної моделі врожайності ріпаку, а також між відстанню до об'єктів ПЗФ та верхньою границею врожайності. Параметр *ED50* і показник ландшафтного різноманіття пов'язані квадратичною залежністю. На врожайність ріпаку впливає також континентальність клімату та вміст гумусу в ґрунті, що й обумовлює просторове варіювання параметрів врожайності цієї культури.

References

- Alignier, A., Bretagnolle, V., & Petit, S. (2012). Spatial patterns of weeds along a gradient of landscape complexity. *Basic and Applied Ecology*, 13(4), 328–337. doi: [10.1016/j.baec.2012.05.005](https://doi.org/10.1016/j.baec.2012.05.005)
- Amy, S. R., Heard, M. S., Hartley, S. E., George, C. T., Pywell, R. F., & Staley, J. T. (2015). Hedgerow rejuvenation management affects invertebrate communities through changes to habitat structure. *Basic and Applied Ecology*, 16(5), 443–451. doi: [10.1016/j.baec.2015.04.002](https://doi.org/10.1016/j.baec.2015.04.002)
- Arino, O. R. P., Julio, J., Vasileios, K., Sophie, B., Pierre, D., & Eric, V. B. (2012). Global Land Cover Map for 2009 (GlobCover 2009). European Space Agency (ESA) & Université catholique de Louvain (UCL). PANGAEA.
- Bae, S., Müller, J., Lee, D., Vierling, K., Vogeler, J., Vierling, L., ... Thorn, S. (2018). Taxonomic, functional, and phylogenetic diversity of bird assemblages are oppositely associated to productivity and heterogeneity in temperate forests. *Remote Sensing of Environment*, 215. doi: [10.1016/j.rse.2018.05.031](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.031)
- Basanets, O. (2017). 5 advantages and 5 disadvantages of rapeseed cultivation. Features of technology. *SuperAgronom*. Retrieved from <https://superagronom.com/articles/63-5-perevaga-ta-5-nedolikiv-viroshchuvannya-ripaku-osoblivosti-tehnologiyi> (in Ukrainian)
- Billeter, R., Liira, J., Bailey, D., Bugter, R., Arens, P., Augenstein, I., ... Edwards, P. J. (2008). Indicators for biodiversity in agricultural landscapes: A pan-European study. *Journal of Applied Ecology*, 45, 141–150. doi: [10.1111/j.1365-2664.2007.01393.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01393.x)
- Brown, J., Beeby, R., & Penfield, S. (2019). Yield instability of winter oilseed rape modulated by early winter temperature. *Scientific Reports*, 9, 6953. doi: [10.1038/s41598-019-43461-7](https://doi.org/10.1038/s41598-019-43461-7)
- Chaplin-Kramer, R., O'Rourke, M. E., Blitzer, E. J., & Kremen, C. (2011). A meta-analysis of crop pest and natural enemy response to landscape complexity. *Ecology Letters*, 14(9), 922–932. doi: [10.1111/j.1461-0248.2011.01642.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01642.x)
- CONABIO. (2017). Ecosystems and agro-biodiversity across small and large-scale maize production systems, feeder study to the “TEEB for Agriculture and Food”. Retrieved from http://www.teebweb.org/wp-content/uploads/2018/01/Final-Maize-TEEB-report_290817.pdf
- Corwin, D. L., Kaffka, S. R., Hopmans, J. W., Mori, Y., Lesch, S. M., & Oster, J. D. (2003). Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil. *Geoderma*, 114(3–4), 231–259. doi: [10.1016/s0016-7061\(03\)00043-0](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(03)00043-0)
- Donatelli, M., Srivastava, A., Duveiller, G., Niemeyer, S., & Fumagalli, D. (2015). Climate change impact and potential adaptation strategies under alternate realizations of climate scenarios for three major crops in Europe. *Environmental Research Letters*, 10(7), 075005. doi: [10.1088/1748-9326/10/7/075005](https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/7/075005)
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37, 4302–4315. doi: [10.1002/joc.5086](https://doi.org/10.1002/joc.5086)
- Fuller, R. J., Gregory, R. D., Gibbons, D. W., Marchant, J. H., Wilson, J. D., Baillie, S. R., & Carter, N. (1995). Population declines and range contractions among lowland farmland birds in Britain. *Conservation Biology*, 9(6), 1425–1441. doi: [10.1046/j.1523-1739.1995.09061425.x](https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1995.09061425.x)

- Galpern, P., Vickruck, J., Devries, J., & Gavin, M. (2019). Landscape complexity is associated with crop yields across a large temperate grassland region. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 290, 106724. doi: [10.1016/j.agee.2019.106724](https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106724)
- Grassini, P., Eskridge, K. M. & Cassman, K. G. (2013). Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. *Nature Communications*. 4(1), 2918. doi: [10.1038/ncomms3918](https://doi.org/10.1038/ncomms3918)
- Haidash, V. (2002). Rape: its current state and prospects in Ukraine. *Offer*, 8–9, 50–51 (in Ukrainian).
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., ... Kempen, B. (2018). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*, 12(2), e0169748. doi: [10.1371/journal.pone.0169748](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748)
- Hipólito, J., Boscolo, D., & Viana, B. F. (2018). Landscape and crop management strategies to conserve pollination services and increase yields in tropical coffee farms. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 256, 218–225. doi: [10.1016/j.agee.2017.09.038](https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.038)
- Hooper, D. U, Chapin, F. S., & Ewel, J. J (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75, 3–35. doi: [10.1890/04-0922](https://doi.org/10.1890/04-0922)
- Iizumi, T., & Ramankutty, N. (2016). Changes in yield variability of major crops for 1981–2010 explained by climate change. *Environmental Research Letters*, 11(3), 034003. doi: [10.1088/1748-9326/11/3/034003](https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034003)
- Jaime, R., Alcántara, J., Manzaneda, A., & Rey, P. (2018). Climate change decreases suitable areas for rapeseed cultivation in Europe but provides new opportunities for white mustard as an alternative oilseed for biofuel production. *PLOS ONE*, 13, e0207124. doi: [10.1371/journal.pone.0207124](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207124)
- Kucharik, C. J., & Ramankutty, N. (2005). Trends and variability in US corn yields over the twentieth century. *Earth Interact*, 9(1), 1–29. doi: [10.1175/ei098.1](https://doi.org/10.1175/ei098.1)
- Kukal, M. S., & Irmak, S. (2018). Climate-Driven Crop Yield and Yield Variability and Climate Change Impacts on the U.S. Great Plains Agricultural Production. *Scientific Reports*, 8, 3450. doi: [10.1038/s41598-018-21848-2](https://doi.org/10.1038/s41598-018-21848-2)
- Leng, G., & Huang, M. (2017). Crop yield response to climate change varies with crop spatial distribution pattern. *Scientific Reports*, 7, 1463. doi: [10.1038/s41598-017-01599-2](https://doi.org/10.1038/s41598-017-01599-2)
- Li, C., Wang, R. H., Ning, H. S., & Luo, Q. H. (2016). Changes in climate extremes and their impact on wheat yield in Tianshan Mountains region, northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 75(17), 1228. doi: [10.1007/s12665-016-6030-6](https://doi.org/10.1007/s12665-016-6030-6)
- Lindgren, J., Lindborg, R., & Cousins, S. A. O. (2018). Local conditions in small habitats and surrounding landscape are important for pollination services, biological pest control and seed predation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 251, 107–113. doi: [10.1016/j.agee.2017.09.025](https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.025)
- McBratney, A. B., Whelan, B., & Shatar, T. M. (1997). Variability and uncertainty in spatial, temporal and spatiotemporal crop-yield and related data. In J. V. Lake, G. R. Bock & J. A. Goode (Eds.), *Precision agriculture: Spatial and temporal variability of environmental quality* (Ciba Foundation Symposium 210) (pp. 141–160). John Wiley & Sons, New York. doi: [10.1002/9780470515419.ch9](https://doi.org/10.1002/9780470515419.ch9)
- Melnichuk, A. O., Bovsunovskyi, A. M., Savchuk, O. I., & Grishenko, V. (2011). Methodical recommendations for the suspension of degradation processes in agrolandscapes of the Polissya zone of Zhytomyr region. Institute of agriculture of Polissya NAAS, Zhytomyr (in Ukrainian).
- O'Reilly-Nugent, A., Palit, R., Lopez-Aldana, A., Medina-Romero, M., Wandrag, E. & Duncan, R. P. (2016). Landscape effects on the spread of invasive species. *Current Landscape Ecology Reports*, 1, 107–114. doi: [10.1007/s40823-016-0012-y](https://doi.org/10.1007/s40823-016-0012-y)
- Osman, D., Ozgur, A., & Ozlem, I. (2014). A Methodology to Implement Box-Cox Transformation When No Covariate is Available. *Communications in Statistics – Simulation and Computation*, 43, 1740–1759. doi: [10.1080/03610918.2012.744042](https://doi.org/10.1080/03610918.2012.744042)
- Picasso, V. D., Brummer, E. C., Liebman, M., Dixon, P., & Wilsey, B. J. (2008). Crop species diversity affects productivity and weed suppression in perennial polycultures under two management strategies. *Crop Science*, 48(1), 331–342. doi: [10.2135/cropsci2007.04.0225](https://doi.org/10.2135/cropsci2007.04.0225)
- Poveda, K., Martinez, E., Kersch-Becker, M., Bonilla, M., & Tschardtke, T. (2012). Landscape simplification and altitude affect biodiversity, herbivory and Andean potato yield. *Journal of Applied Ecology*, 49, 513–522. doi: [10.1111/j.1365-2664.2012.02120.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02120.x)
- Qian, B., Jing, Q., Bélanger, G., Shang, J., Huffman, T., Liu, J., & Hoogenboom, G. (2017). Simulated Canola Yield Responses to Climate Change and Adaptation in Canada. *Agronomy journal*, 110. doi: [10.2134/agronj2017.02.0076](https://doi.org/10.2134/agronj2017.02.0076)
- R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Sys, C., Van Ranst, E., & Debaveye, J. (1991). Land evaluation. Part 1. Principles in land evaluation and crop production calculations. General Administration for Development Cooperation. Brussels, Agricultural Publication, Belgium.
- Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'Antonio, C., Dobson, A., Howarth, R., & Swackhamer, D. (2001). Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science*, 292(5515), 281–284.
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., & Melillo, J. M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277(5325), 494–499. doi: [10.1126/science.277.5325.494](https://doi.org/10.1126/science.277.5325.494)
- Woodcock, B. A., Bullock, J. M., McCracken, M., Chapman, R. E., Ball, S. L., Edwards, M. E., ... Pywell, R. F. (2016). Spillover of pest control and pollination services into arable crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 231, 15–23. doi: [10.1016/j.agee.2016.06.023](https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.023)
- Xiao, D. P., Moiwo, J. P., Tao, F. L., Yang, Y. H., Shen, Y. J., Xu, Q. H., ... Liu, F. S. (2015). Spatiotemporal variability of winter wheat phenology in response to weather and climate variability in China. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20(7), 1191–1202. doi: [10.1007/s11027-013-9531-6](https://doi.org/10.1007/s11027-013-9531-6)
- Zymaroieva, A. A. (2019) Assessment of the climate changes impact on the productivity of maize within the Polissya and Forest-steppe ecoregions within Ukraine. *Scientific horizons*, 11(84), 113–120 (in Ukrainian).
- Zymaroieva, A. A., & Fedonyuk, T. P. (2019). Assessing the spatiotemporal dynamics of maize yield in the central and northern regions of Ukraine. *Agrology*, 2(4), 199–204. doi: [10.32819/019028](https://doi.org/10.32819/019028)
- Zymaroieva, A., Zhukov, O., Romanchuk, L. & Pinkin, A. (2019). Spatiotemporal dynamics of cereals grains and grain legumes yield in Ukraine. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 25(6), 1107–1113.