УДК 631.559

ОЦІНКА ВПЛИВУ КЛІМАТИЧНИХ ЧИННИКІВ НА ПРОСТОРОВЕ ВАРІЮВАННЯ СЕРЕДНЬОЇ ВРОЖАЙНОСТІ ОВОЧІВ У ВІДКРИТОМУ ҐРУНТІ В ПОЛІСЬКІЙ ТА ЛІСОСТЕПОВІЙ ЗОНАХ УКРАЇНИ

А. Зимаросєва, к. б. н.

ORCID ID: 0000-0001-9382-8269

Житомирський національний агроекологічний університет<https://doi.org/10.31734/agronomy2020.01.107>

Зимаросєва А. Оцінка впливу кліматичних чинників на просторове варіювання середньої врожайності овочів у відкритому ґрунті в Поліській та Лісостеповій зонах України

На сьогодні деградаційні зміни навколишнього середовища впливають на врожайність усіх сільськогосподарських культур. Однак існує дуже мало праць, присвячених оцінці впливу екологічних чинників на врожайність овочів. Ми досліджували вплив агроекологічних чинників на варіювання врожайності овочів відкритого ґрунту в рамках 206 адміністративних районів у Поліській та Лісостеповій зонах України, а також визначали локальні просторово-часові моделі цього варіювання. Динаміка урожайності овочів у більшості адміністративних районів може бути описана поліномом четвертого порядку. Проте аналізували не загальний тренд, а залишки (викиди) регресійної моделі, які зумовлені впливом саме агроекологічних чинників (кліматичних), внесок яких у варіювання врожайності овочів коливається від 10 до 47 % залежно від району досліджень. Застосувавши глобальний аналіз головних компонент щодо залишків регресійної моделі, встановили вісім статистично вірогідних із-поміж них, які разом пояснюють 90,4 % загальної варіабельності простору ознак. Щоб спростити інтерпретацію результатів, використано критерій «осипу», згідно з яким для подальших досліджень доцільно залишити лише перші дві головні компоненти, які разом пояснюють 47,7 % загальної дисперсії. Обидві головні компоненти є просторово детермінованими. Проведення глобального аналізу головних компонент також показало наявність динамічних процесів урожайності овочів коливальної природи з різною частотою. Географічно зважений аналіз головних компонент дав змогу виявити територіальні кластери з однаковою динамікою варіювання врожайності овочів. Просторове відображення кластерів та їхньої часової динаміки може бути використане в прогнозуванні врожайності у майбутньому, а також стати основою для агрокліматичного зонування території щодо вирощування овочів у відкритому ґрунті.

Ключові слова: географічно зважений аналіз головних компонент, урожайність, овочі відкритого ґрунту, просторова мінливість, часова динаміка, кластери, кліматичні чинники.

Zymaroieva A. Assessment of the climatic factors influence on the spatial variation of the yield of vegetables at open ground in Polissya and Forest-steppe zones of Ukraine

Nowadays, degradation changes in the environment affect the yield of all crops. However, there are very few researches concerning the impact of environmental factors on the yield of vegetables. The contribution of agroecological factors to the variation of the open ground vegetables yield on the territory of 206 administrative districts in the Polissya and Forest-steppe zones within Ukraine was investigated, and local spatial-temporal models of this variation were determined. The dynamics of vegetable yields in most administrative areas can be described by a fourth-degree polynomial. However, in this research the general trend that was not been analyzed, but the residuals (emissions) of the regression model, which were caused by the influence of agroecological factors. The agroecological factors contribution to the vegetable yields dispersion varies from 10 to 47 % depending on the study area. Due to global principal components analysis of the regression model residuals eight statistically significant principal components, which together account for 90,4 % of the total variability of the feature space, are identified. To simplify the interpretation of the results, we used the "scree plot" criterion according to which, it is advisable to leave for further studies only the first 2 major components, which together account for 47,7 % of the total variance of the dispersion. Both principal components are spatially determined. Through the geographically weighted principal component analysis the presence of dynamic of vegetables yield of fluctuating nature with different frequency was found. Geographically weighted principal component analysis revealed the territorial clusters with the same dynamics of variation of vegetables yield. Spatial mapping of clusters and their temporal dynamics can be used for yields prediction in the future, as well as to become the basis for agroecological zoning of the territory for growing open ground vegetables.

Key words: geographically weighted principal component analysis, yield, open-ground vegetables, spatial variability, temporal dynamics, clusters, climatic factors.

Постановка проблеми. Світове аграрне виробництво відбувається в умовах глобальних змін навколишнього середовища та зростаючого тиску на природні екосистеми [8]. Зміни довкілля, зокрема зміни клімату, деградація земель, дефіцит води й втрата біорозмаїття, які, за прогнозами, стануть ще глибшими у XXI столітті, створюють значну загрозу для глобального сільського господарства, продовольчої безпеки та харчування [12].

Більшість попередніх досліджень щодо впливу змін навколишнього середовища на сільське господарство стосувалася переважно врожайності зернових [11]. Загалом у прогнозованих кліматичних сценаріях існує загальний консенсус, який передбачає, що майбутні зміни температури та кількості опадів призведуть до значного зниження врожаю багатьох основних сільськогосподарських культур, важливих для людини. Проте є порівняно мало досліджень, що стосуються впливу чинників навколишнього середовища на овочі. Наприклад, помідори та квасоля мають нижчий поріг температури зупинки розвитку (*failure point temperatures* – температура навколишнього середовища, за якої ріст припиняється), ніж зернові культури, та є вразливішими до теплового стресу [12]. Тому дослідження варіювання врожайності залежно від впливу кліматичних чинників – важливе питання сьогодення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останніми дослідженнями [11], глобальне збільшення концентрації CO₂ на 250 ppm приведе до зростання врожайності для всіх овочів та бобових культур разом на 22,0 %, збільшення концентрації O₃ на 25 % у свою чергу – до зменшення врожайності овочів та бобових на 8,9 %, зниження доступності води на 50 % зменшить врожайність на 34,7 %, а підвищення температури на 4 °C знизить середню врожайність овочів на 31,5 %.

Мінливість урожайності сільськогосподарських культур у часі та просторі зумовлена впливом значної кількості чинників, котрі поділяють на дві групи [7]. Перша група охоплює агроекономічні та агроекологічні чинники: досягнення генетики та селекції, технологія обробітку ґрунту, забезпеченість добривами, засобами захисту рослин, меліорація земель тощо. Друга група об'єднує екологічні чинники, зокрема, клімат, метеорологічні явища, які визначають

істотні відхилення урожайності в окремі роки від середнього рівня [6].

Для вирішення практичних питань часто виникає необхідність роздільної оцінки ступеня впливу на урожайність культур як агроекономічних (агротехнологічних), так і екологічних чинників [6]. В основу такої оцінки покладено ідею В. М. Обухова [3] про можливість розкладання часового ряду урожайності будь-якої культури на дві складові: стаціонарну і випадкову. Стаціонарна складова визначає загальну тенденцію зміни врожайності в аналізованому періоді. Вона становить собою плавну лінію, одержану в результаті згладжування ряду. Ця лінія називається трендом і описується зазвичай рівнянням прямої або параболою другого порядку. Лінія тренду досить точно характеризує середній рівень урожайності, зумовлений рівнем культури землеробства, економічними й природними особливостями конкретного району [6]. Випадкова складова зумовлюється погодними особливостями окремих років, визначає їхній вплив на формування урожайності і представляє відхилення від лінії тренду [14]. Ця ідея набула подальшого розвитку у дослідженнях інших авторів [1; 4–6]. Наші дослідження дали змогу удосконалити методику, що допомогла відокремити агроекономічні та агротехнологічні чинники від кліматичних [10; 14].

Постановка завдання. Проведене нами дослідження присвячене саме регіональній диференціації впливу екологічних (кліматичних) чинників на врожайність овочів відкритого ґрунту. Метою було встановлення внеску кліматичних чинників у варіювання врожайності овочів відкритого ґрунту у Поліській та Лісостеповій зонах України, а також виявлення локальних просторово-часових моделей цього варіювання.

Виклад основного матеріалу. Дані щодо урожайності овочів у Поліській та Лісостеповій зонах України забезпечені Державною службою статистики України (<http://www.ukrstat.gov.ua/>). Відомості охоплюють часовий період з 1991 до 2017 року. Дані мають характер середньої врожайності овочів за адміністративними районами. Територія дослідження охоплює 206 адміністративних районів у десяти областях України (Вінницька, Волинська, Житомирська, Київська, Львівська, Рівненська, Тернопільська, Хмельницька, Черкаська, Чернігівська) (рис. 1).

Статистичний аналіз виконаний за допомогою програмного продукту Statistica 10. Обчислення виконані за допомогою бібліотеки REdaS для середовища статистичних розрахунків R. Глобальна статистика Морана обчислена із застосуванням програми Geoda095i (<http://www.geoda.uiuc.edu/>). Метод географічно зваженого аналізу головних компонент (GWPCA) був реалізований за допомогою пакета GWmodel оболонки статистичних розрахунків R

(<http://cran.rstudio.com/>) [11]. Кластери виділені за методом Варда [13].

Встановлено [2], що на території досліджуваного регіону України середньорічна врожайність овочів коливалася від 13,8 ц/га (у 2003 році) до 48,6 ц/га (у 2016 році), середнє значення – 20,9 ц/га, стандартне відхилення – 4,3 і коефіцієнт варіації – 20 %. Динаміка врожайності овочів у більшості адміністративних районів може бути описана поліномом четвертого порядку (рис. 2).

Рис. 1. Карта 10 адміністративних регіонів України, де проводили дослідження.

Рис. 2. Динаміка середньої врожайності овочів відкритого ґрунту протягом 1991–2017 рр. та апроксимація тренду поліномом четвертого порядку.
Примітка: вісь абсцис – роки; вісь ординат – урожайність, ц/га.

Наявність тренду, математична форма якого є сталою для усіх районів, вказує на наявність постійно діючих зовнішніх чинників на динаміку процесу. Тому дійшли висновку, що форма тренду має агроекономічне та агротехнологічне походження. Надалі були досліджені залишки (викиди) регресійної моделі. Ці залишки, на нашу думку, зумовлені впливом кліматичних чинників, оскільки вони мають локальний характер і не можуть бути пояснені загальним трендом. Внесок кліматичних чинників у варіювання врожайності овочів коливається від 10 до 47 % залежно від району досліджень.

Для кількісної оцінки просторової мінливості урожайності використали непараметричний статистичний метод – аналіз головних компонент (*Principle component analysis – PCA*), який зменшує розмір набору даних і допомагає виявити деякі спрощені структури, що приховані в ньому [2].

Застосування *PCA* щодо залишків регресійної моделі показало, що кількість статистично вірогідних головних компонент становить 8 (табл. 1).

Разом перші вісім головних компонент пояснюють 90,4 % загальної варіабельності простору ознак. Щоб спростити інтерпретацію результатів, ми використали критерій «осипу» (*Scree plot*) [9], згідно з яким для подальших досліджень доцільно залишати лише перші дві головні компоненти, які разом пояснюють 47,7 % загальної варіабельності дисперсії.

Оскільки як змінні в аналізі головних компонент використано порядкові величини – роки, то навантаження головних компонент на змінні можуть бути інтерпретовані як динамічні зміни в часі, тобто як коливальні процеси різної періодичності (рис. 3).

Таблиця 1

Результати глобального аналізу головних компонент

Головна компонента	Налаштоване* власне значення	Власне значення	Зсув	Пояснена варіація	Стандартне відхилення
1	8,18	8,92	0,73	33,03	2,98
2	3,35	3,97	0,62	14,70	1,99
3	1,99	2,52	0,54	9,35	1,58
4	1,71	2,17	0,46	8,05	1,47
5	1,63	2,03	0,40	7,53	1,42
6	1,40	1,74	0,34	6,43	1,31
7	1,38	1,66	0,28	6,15	1,29
8	1,15	1,38	0,23	5,12	1,17

*За процедурою Горна.

Рис. 3. Значення навантажень головних компонент 1–2 на змінні.

Так, головна компонента 1 описує 33,0 % загальної варіабельності врожайності овочів. Варіювання головної компоненти 1 чітко просторово детерміновано (I -Морана 0,47; $p < 0,001$). Для головної компоненти 1 характерний переважаючий період коливання з лагом п'ять років, причому впродовж періоду досліджень частота коливання зростає.

Зони з підвищеними значеннями головної компоненти 1 формують кластери у деяких районах сходу та півночі досліджуваного регіону (рис. 4). Зона із високими значеннями компоненти формує чіткий кластер на півночі та південному сході досліджуваного регіону, а райони з низькими значеннями $PC1$ розташовані на південному сході. Слід зазначити, що сенс знаків головної компоненти – умовний – вказує тільки на узгодженість динаміки середньої урожайності овочів в адміністративних районах. Відповідно у районах з однойменним знаком середня урожайність овочів змінюється синхронно, тоді як протилежний знак вказує на протилежний напрям динаміки.

Головна компонента 2 пояснює 14,7 % варіабельності дисперсії середньої урожайності

овочів; для її коливання характерна автокореляція зі середнім лагом три роки (див. рис. 3). Для $PC2$ характерне згасання коливального процесу з часом. Ця компонента також має просторово закономірні моделі варіювання (I -Морана 0,32, $p < 0,001$). Райони, які найбільше чутливі до головної компоненти 2, розташовані на південному-заході досліджуваного регіону, а найменш чутливі – на південному-сході (рис. 4).

Отож, глобальний аналіз головних компонент виявив наявність динамічних процесів середньої урожайності овочів коливальної природи з різною частотою.

Наступним етапом досліджень було проведення географічно зваженого аналізу головних компонент (*Geographically Weighted Principal Component Analysis – GWPCA*), на основі якого можна побудувати карти просторової неоднорідності даних.

Для того щоб встановити, чи мають наші дані просторову складову варіювання, було проведено тест Монте-Карло, який показав, що дані є придатними для проведення географічно зваженого аналізу головних компонент ($p = 0,03$).

Рис. 4. Просторове варіювання головних компонент 1–2.

Для одержання відповідних результатів глобального аналізу головних компонент з метою порівняння були інтерпретовані тільки дві перші головні компоненти GWPC 1, GWPC 2.

Порівняно з глобальним аналізом головних компонент *GWPCA* демонструє свою ефективність і результативність в аналізі просторових патернів регіонального розміщення середньої урожайності овочів за допомогою картування просторової варіабельності головних компонент (рис. 5). На рис. 5 окреслюється тенденція зростання з півдня на північ відсотка варіювання головних компонент 1 та 2.

Далі для кожної з головних компонент була проведена процедура класифікації адміністративних районів за допомогою кластерного

аналізу. Вказаний підхід дає змогу виділити групи адміністративних районів, які характеризуються подібною часовою динамікою врожайності овочів у аспекті відповідної головної компоненти. Можна припустити, що сукупності адміністративних районів, які характеризуються подібною динамікою середньої врожайності овочів також географічно наближені та формують однорідні кліматичні райони.

Кластерний аналіз адміністративних районів за значеннями факторних навантажень *GWPC 1* допоміг встановити чотири гомогенні кластери (рис. 6). Для кожного кластера були розраховані середні значення факторних навантажень, що дало змогу оцінити специфіку відповідних кластерів (рис. 7).

Рис. 5. Просторове варіювання відсотка загальної варіації перших двох головних компонент (percentage of total variance – PTV), %

Рис. 6. Кластерний аналіз адміністративних районів за значеннями факторних навантажень *GWPC 1* (1991–2017 рр.).

Примітка: по осі ординат відкладено відстань у евклідовому просторі між об'єктами, які відкладені на осі абсцис (безрозмірні величини).

Встановлені кластери та їхні профільні розподіли факторних навантажень дають уявлення про перебіг процесів, які характерні для відповідного кластера. Для кластера 1 характерний коливальний процес із від'ємною автокореляцією з лагом 5 років ($r = -0,38$, $p < 0,05$) та позитивною автокореляцією з лагом 7 років ($r = 0,33$, $p < 0,05$). Для кластера 2 характерний коливальний процес із від'ємною автокореляцією з лагом 2 роки ($r = -0,43$, $p < 0,05$). Для кластера 3 характерний коливальний процес із від'ємною автокореляцією з лагом 6 років ($r = -0,39$, $p < 0,05$) та позитивною автокореляцією з лагом 7 та

15 років ($r = 0,37$; $p < 0,05$ та $r = 0,25$; $p < 0,05$ відповідно). Для кластера 4 характерний коливальний процес із від'ємною автокореляцією з лагом 6 та 10 років ($r = -0,45$; $p < 0,05$ та $r = -0,59$; $p < 0,05$ відповідно).

Просторове розміщення адміністративних районів, які залучені у відповідні кластери, є просторово регулярним (рис. 8). Кластери 1 та 2 знаходяться на півдні, кластер 3 займає північно-західну частину території, а кластер 4 розташовано на сході дослідженої території.

Рис. 7. Середні значення факторних навантажень GWPC 1 для кластерів 1–4.

Примітка: вісь абсцис – роки; вісь ординат – факторні навантаження.

Рис. 8. Просторове розміщення кластерів, одержаних на основі факторних навантажень GWPC 1.

Кластерний аналіз адміністративних районів за значеннями факторних навантажень *GWPC 2* дав змогу встановити також чотири гомогенні кластери (рис. 9).

Рис. 9. Кластерний аналіз адміністративних районів за значеннями факторних навантажень *GWPC 2*.

Примітка: по осі ординат відкладено відстань у евклідовому просторі між об'єктами, які відкладені на осі абсцис (безрозмірні величини).

Рис. 10. Середні значення факторних навантажень *GWPC 2* для кластерів 1–4.

Примітка: вісь абсцис – первинні змінні (залишки регресійних моделей тренду урожайності за роками), вісь ординат – факторні навантаження.

Рис. 11. Просторове розміщення кластерів, одержаних на основі факторних навантажень GWPC 2.

За середніми значеннями факторних навантажень ми можемо оцінити специфічну динаміку кожного кластера (рис. 10). Для кластера 1 характерний коливальний процес із від'ємною автокореляцією з лагом 2 і 9 років ($r = -0,34$; $p < 0,05$ та $r = -0,31$; $p < 0,05$ відповідно). Кластеру 2 властивий коливальний процес із від'ємною автокореляцією з лагом 4–6 років та позитивною кореляцією з лагом 10–12 років. Для кластера 3 характерний коливальний процес з від'ємною автокореляцією з лагом 6 років ($r = -0,44$; $p < 0,05$). Кластеру 4 властивий коливальний процес із від'ємною автокореляцією з лагом 4 роки ($r = -0,27$; $p < 0,05$).

У просторовому аспекті ці кластери розміщені мозаїчно на дослідженій території (рис. 11): кластер 1 складається з двох провінцій на півдні, кластер 2, більшою мірою знаходиться на заході, кластер 3 здебільшого покриває північні райони, кластер 4 займає південно-східну частину території. На півдні досліджуваного регіону присутні усі чотири кластери.

Отже, запропонована процедура статистичного опрацювання даних дає змогу: по-перше, визначити співвідношення чинників агроекономічної та кліматичної природи на динаміку середньої врожайності овочів відкритого ґрунту; по-друге, встановити гомогенні території з однаковою частотою варіювання середньої врожайності овочів (ці дані можуть бути використані для прогнозування середньої врожайності овочів у майбутньому); по-третє, кластерний аналіз дав змогу виділити компактніші території з однаковим перебігом екологічних (кліматичних) процесів, які у загальному вигляді можна розглядати як агрокліматичні зони з точки зору вирощування овочів відкритого ґрунту.

Висновки

1. Внесок визначених кліматичних чинників у варіюванні середньої врожайності овочів коливається від 10 до 47 % залежно від району досліджень.

2. Аналіз головних компонент залишків регресійної моделі середньої врожайності овочів дав змогу встановити дві головні компоненти, які разом пояснюють 47,7 % загальної варіабельності простору ознак. Також глобальний аналіз головних компонент виявив наявність динамічних процесів середньої урожайності овочів коливальної природи з різною частотою.

3. Географічно зважений аналіз головних компонент дав змогу виявити території з однаковою динамікою варіювання середньої врожайності овочів та відобразити їх на карті. Ми вважаємо, що ця інформація може стати основою для агрокліматичного зонування території щодо вирощування овочів у відкритому ґрунті.

Бібліографічний список

1. Динамика урожайности сельскохозяйственных культур в РСФСР / А. И. Манелля и др. Москва: Статистика, 1972. 192 с.
2. Зимарова А. А. Аналіз варіювання врожайності овочів відкритого ґрунту у Поліссі та Лісостеповій зоні України. *Таврійський науковий вісник*. 2019. № 109 (1). С. 49–56.
3. Обухов В. М. Урожайность и метеорологические факторы. Москва: Госпланиздат, 1949. 318 с.
4. Пасов В. М. Изменчивость урожая и оценка ожидаемой продуктивности зерновых культур. Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 152 с.
5. Платонова Т. Ф. Прогнозирование динамики урожайности сельскохозяйственных культур. Кишинев: Штиинца, 1983. 87 с.

6. Польовий А. М., Божко Л. Ю., Дронова О. О. Просторово-часова оцінка мінливості врожаїв озимої пшениці на території України. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2011. № 8. С. 84–91.
7. Раунер Ю. Л. Климат и урожайность зерновых культур. Москва: Наука, 1981. 163 с.
8. Bohan D., Raybould A., Mulder C. et al. Networking agroecology: integrating the diversity of agroecosystem interactions. *Adv. in Ecol. Res.* 2013. Vol. 49. P. 1–67.
9. Cattell R. B. The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research*. 1966. Iss. 1. P. 245–76.
10. Kunah O. M., Pakhomov O. Y., Zymaroieva A. A. et al. Agroecological and agroecological aspects of the rye (*Secale cereale* L.) yields spatial variation within Polesia and Foreststeppe zones of Ukraine: the useage of the geographically weighted principal components analysis. *Biosystems Diversity*. 2018. Vol. 26 (4). P. 276–285. doi: <https://doi.org/10.15421/011842>.
11. Scheelbeek P. F.D., Bird F. A., Tuomisto H. L. et al. Effect of environmental changes on vegetable and legume yields and nutritional quality. *PNAS*. 2018. Vol. 115 (26). P. 6804–6809. doi: [10.1073/pnas.1800442115](https://doi.org/10.1073/pnas.1800442115).
12. The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources, and biodiversity: US Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research / P. Backlund et al. Washington, 2008. P. 11–21.
13. Ward J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*. 1963. 236 p.
14. Zymaroieva A., Zhukov O., Fedonyuk T., Pinkin A. Application of geographically weighted principal components analysis based on soybean yield spatial variation for agro-ecological zoning of the territory. *Agronomy Research*. 2019. 17 (6). P. 2460–2473. doi: <https://doi.org/10.15159/AR.19.208>.

Стаття надійшла 17.09.2019