

УДК 631.559

DOI <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.110-1.10>

## РЕГІОНАЛЬНА ДИФЕРЕНЦІАЦІЯ ВПЛИВУ ЕКОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ВРОЖАЙНІСТЬ ЦУКРОВОГО БУРЯКУ

**Зимаросєєв А.А.** – к.б.н.,

доцент кафедри експлуатації лісових ресурсів,

Житомирський національний агроєкологічний університет

На врожайність цукрових буряків суттєво впливають фактори навколишнього середовища. Тому вивчення просторових патернів варіювання врожайності цукрових буряків за впливу екологічних факторів є, безумовно, актуальним та нині маловивченим питанням в Україні. Метою роботи було встановлення внеску агроєкологічних факторів у варіювання врожайності цукрових буряків у Поліській та Лісостеповій зонах України, а також виявлення локальних просторово-часових моделей цього варіювання. Динаміка урожайності цукрових буряків може бути описана поліномом четвертого порядку. Проте аналізували не загальний тренд, а залишки (викиди) регресійної моделі, які зумовлені впливом саме агроєкологічних факторів, внесок яких у варіювання врожайності цукрових буряків коливається від 4 до 28% та має регіональну диференціацію. Застосувавши глобальний аналіз головних компонент щодо залишків регресійної моделі, встановлено сім статистично вірогідних головних компонент, які разом пояснюють 63,9% загальної варіабельності простору ознак. Щоб спростити інтерпретацію результатів використано критерій «осипу», згідно з яким для подальших досліджень доцільно залишити лише перші 2 головні компоненти, які разом пояснюють 27,6% загальної варіабельності врожайності цукрових буряків. Також за допомогою глобального аналізу головних компонент виявили динамічні характеристики варіюванням врожайності цукрових буряків. Застосування географічно зваженого аналізу головних компонент дозволило виявити території з однаковою динамікою варіювання врожайності цукрових буряків та відобразити їх на карті. Ми вважаємо, що ця інформація може стати основою для агроєкологічного зонування території щодо вирощування цукрових буряків, а також планування агротехнологічних заходів та управління сільськогосподарськими територіями.

**Ключові слова:** цукровий буряк, урожайність, просторові моделі, часова динаміка.

### **Zymaroiєva A.A. Regional differentiation of the influence of ecological factors on the sugar beet yield**

Sugar beet yields are significantly influenced by environmental factors. Therefore, the study of spatial patterns of sugar beet yield variation due to environmental factors is certainly relevant and has not yet been studied in Ukraine. The aim of this work was to determine the contribution of agro-ecological factors to the variation of sugar beet yield in the Polissya and Forest-steppe zones of Ukraine, as well as to identify local spatiotemporal models of this variation. Sugar beet yield dynamics can be described by a fourth-order polynomial. However, the general trend was not analyzed but the residuals (emissions) of the regression model, which are results of the agro-ecological factors influence, whose contribution to the sugar beet yield variation varies from 4 to 28% and has regional differentiation. According to global principal components analysis, seven statistically significant principal components were identified, which together account for 63.9% of the total variability of the feature space. To simplify the interpretation of the results, the criterion of "scree" was used, according to which, for further studies, it is advisable to leave only the first 2 principal components, which together explain 27.6% of the total variability of sugar beet yield. Also, through global principal components analysis dynamic characteristics of the sugar beet yields variation were revealed. Due to geographically grounded principal components analysis it is possible to identify areas with the same dynamics of sugar beet yields variation and to map them. We believe that this information can form the basis for agro-ecological zoning of the territory according to sugar beet cultivation, as well as for agro-technological planning and agricultural management.

**Key words:** sugar beet, yield, spatial models, temporal dynamics.

**Постановка проблеми.** Цукровий буряк є основною культурою для виробництва цукру в Європі, і оскільки його вирощують у широкому діапазоні екологічних умов, успішне управління врожайністю є викликом для селекціонерів та фермерів [7]. Вибір гібриду цукрових буряків із високим потенціалом урожайності є важливим, так само як добре адаптовані агрономічні заходи та практики, які синхронізовані з потребами рослини [5]. У комерційному відношенні найважливішою ознакою цукрових буряків є врожайність [2], на яку суттєво впливають фактори навколишнього середовища [11; 12; 6]. Тому вивчення просторових патернів варіювання врожайності цукрових буряків за впливу екологічних факторів є, безумовно, актуальним та нині маловивченим питанням в Україні.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Тенденція до підвищення середньорічної температури, що супроводжується збільшенням частоти посух, впливає на вирощування сільськогосподарських культур по всій Європі, але південна та центральна частини континенту знаходяться під особливою загрозою [13]. У багатьох регіонах Європи в сільськогосподарській практиці використовується широкий спектр пристосувань (зрошення, перемежування культур, мінеральне підживлювання тощо), щоб мінімізувати негативний вплив змін клімату на виробництво рослин. За даними White et al. [15], коригування строків сівби – це найбільш поширений варіант адаптації вирощування культур до змін клімату. Потенціал врожайності багатьох культур суттєво залежить від дати сівби, оскільки визначає тривалість вегетаційного періоду та кількість поглинутої сонячної радіації [14].

Ріст, розвиток рослин, а також врожайність – результат генетичного складу, впливу навколишнього середовища та взаємодії цих двох факторів. Феномен взаємодії генотипу з навколишнім середовищем (*genotype–environment interaction GEI*) завжди присутній у рослинництві, внаслідок чого генотипи мають різні показники врожайності та ранжуються в різних умовах навколишнього середовища [10]. Оскільки навколишнє середовище розрізняється за кількістю та якістю речовин та подразників, які отримують рослини, включаючи, наприклад, кількість води, поживних речовин або сонячної радіації [9], врожайність культур також має просторово-часову динаміку [3].

**Постановка завдання.** Проведене нами дослідження присвячене саме оцінці просторово-часової диференціації впливу екологічних факторів на врожайність цукрового буряку. Метою роботи було встановлення внеску агроекологічних факторів у варіювання врожайності цукрових буряків у Поліській та Лісостеповій зонах України, а також виявлення локальних просторово-часових моделей цього варіювання.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Встановлено, що на території дослідженого регіону України середньорічна врожайність цукрового буряку коливалася від 154,5 ц/га до 495,7 ц/га. Коефіцієнт варіації має найвищі показники на південному заході (29,4–32,7%), для решти території переважаючим є коефіцієнт варіації на рівні 20,14–29,3% [1]. Динаміка урожайності овочів у більшості адміністративних районів може бути описана поліномом четвертого порядку (рис. 1).

Наявність загального тренду, математична форма якого є однаковою для усіх досліджених територіальних одиниць, вказує на наявність постійно діючих зовнішніх факторів на динаміку процесу. У попередніх дослідженнях [1] встановили, що форма тренду має агроекономічне та агроекологічне походження. Тому в цій статті будуть представлені результати досліджень залишків (викидів) регресійної моделі. Ці залишки, на нашу думку, зумовлені впливом агроекологічних факторів, оскільки вони мають локальний характер та не можуть бути пояснені загальним

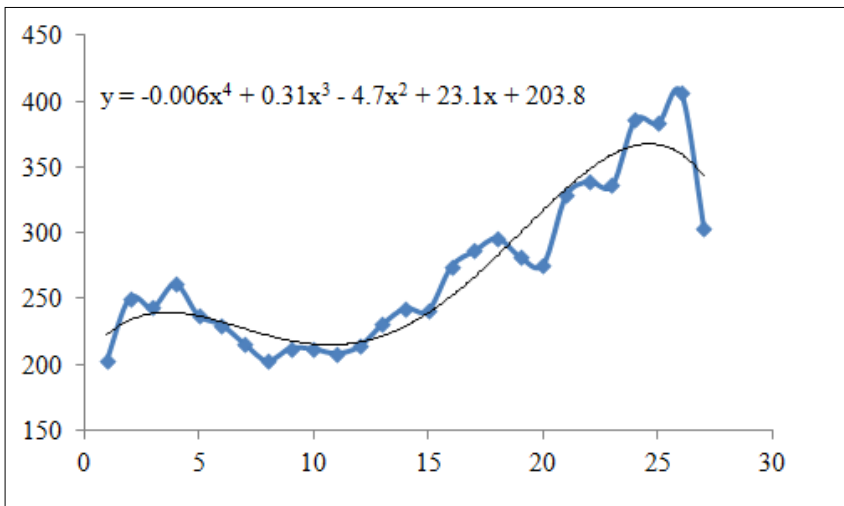


Рис. 1. Типова динаміка урожайності цукрового буряка протягом 1991–2017 рр. та апроксимація тренду поліномом четвертого порядку

Таблиця 1

**Результати глобального аналізу головних компонент**

Головна компонента	Налаштоване* власне значення	Власне значення	Зсув	Пояснена варіація	Стандартне відхилення
1	4,14	4,88	0,74	18,06	2,20
2	1,96	2,58	0,62	9,55	1,60
3	1,89	2,42	0,54	8,98	1,55
4	1,70	2,16	0,46	8,01	1,47
5	1,50	1,90	0,40	7,03	1,37
6	1,33	1,67	0,34	6,18	1,29
7	1,36	1,65	0,28	6,10	1,28

Позначки: \* – за процедурою Горна

трендом. Внесок агроекологічних факторів у варіювання врожайності цукрових буряків коливається від 4 до 28% залежно від району досліджень.

Для оцінки регіональної диференціації урожайності цукрових буряків використали непараметричний статистичний метод – аналіз головних компонент (Principle component analysis – PCA), який зменшує розмір набору даних і допомагає виявити деякі спрощені структури, які приховані у великих за обсягом наборах даних [8].

Аналіз головних компонент залишків регресійної моделі дав змогу встановити, що, за процедурою Горна [8], кількість статистично вірогідних головних компонент становить 7 (табл. 1).

Разом перші сім головних компонент пояснюють 63,9% загальної варіабельності простору ознак. Щоб спростити інтерпретацію результатів, ми використали критерій «осипу» (Scree plot) [2], згідно з яким для подальших досліджень

доцільно залишати лише перші 2 головні компоненти, які разом пояснюють 27,6% загальної варіабельності дисперсії.

Як змінні в аналізі головних компонент використано порядкові величини – роки, тому навантаження головних компонент на змінні можуть бути інтерпретовані як динамічні зміни у часі, тобто як коливальні процеси різної періодичності (рис. 2).

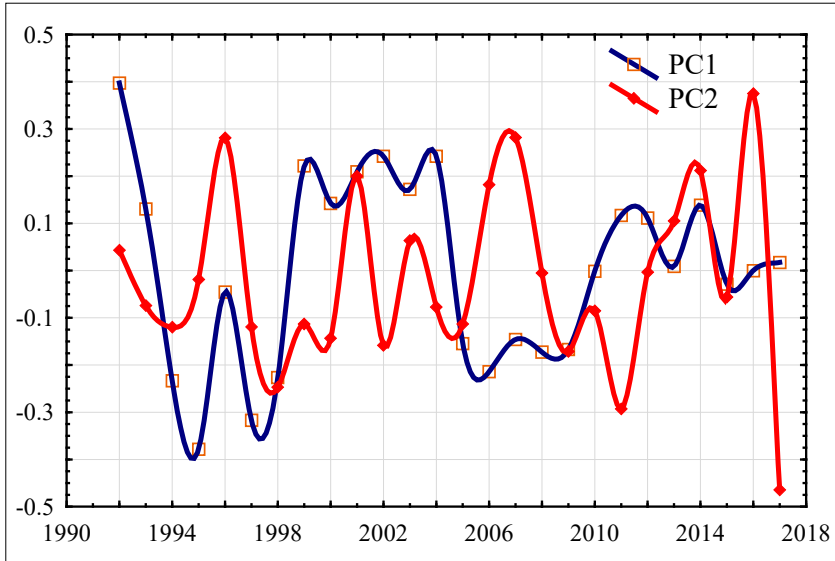


Рис. 2. Часова динаміка головних компонент 1–2

Головна компонента 1 описує 18,06% загальної варіабельності врожайності цукрового буряку. Для неї властива позитивна автокореляція з лагом 1 рік ( $r = 0,45, p < 0,05$ ), від'ємна часова автокореляція з лагом 5 років ( $r = -0,57, p < 0,05$ ) та 6 років ( $r = -0,54, p < 0,05$ ), а також позитивна автокореляція з лагом 11 років ( $r = 0,39, p < 0,05$ ) та 12 років ( $r = 0,34, p < 0,05$ ). Варіювання головної компоненти 1 є чітко просторово детермінованим ( $I$ -Морана 0,67,  $p < 0,001$ ) (рис. 3).

Головна компонента 2 описує 9,55% загальної варіабельності врожайності цукрового буряку. Для неї властива від'ємна часова автокореляція з лагом 3 роки ( $r = -0,27, p < 0,05$ ) (рис. 3). Варіювання головної компоненти 1 є чітко просторово детермінованим ( $I$ -Морана 0,32,  $p < 0,001$ ).

Зони з підвищеними значеннями головної компоненти 1 формують кластери в деяких районах півночі та сходу досліджуваного регіону (рис. 4), а райони із низькими значеннями PC1 розташовані на півдні та заході.

Водночас зони із більшими значеннями головної компоненти 2 знаходяться на південному сході регіону, а зони із низькими абсолютними навантаженнями PC2 не мають чітких кластерів і розподілені рівномірно по території досліджуваного регіону (рис. 4).

Отже, за допомогою аналізу головних компонент, ми можемо визначити переважуючу динаміку врожайності цукрових буряків та виділити території, де динаміка врожайності подібна. Проте ця карта дуже строката за динамічними аспектами та не дуже зручна в користуванні. Тому з метою виявлення територіальних кластерів з однаковою динамікою врожайності ми провели географічно зважений аналіз головних компонент (Geographically Weighted Principal Component Analysis – GWPCA).

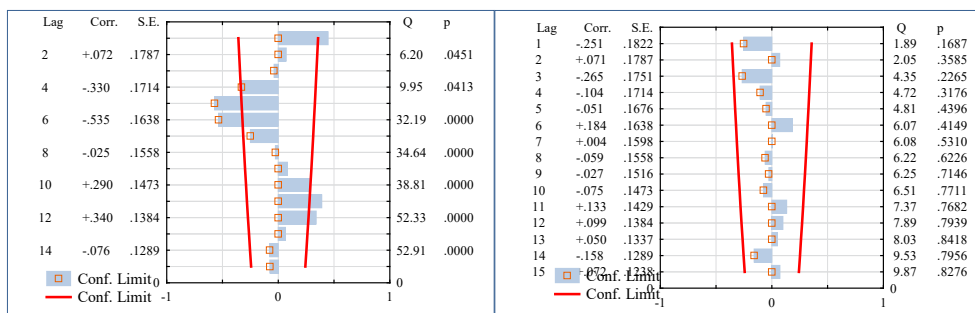


Рис. 3. Автокореляційна функція для PC1 та PC2

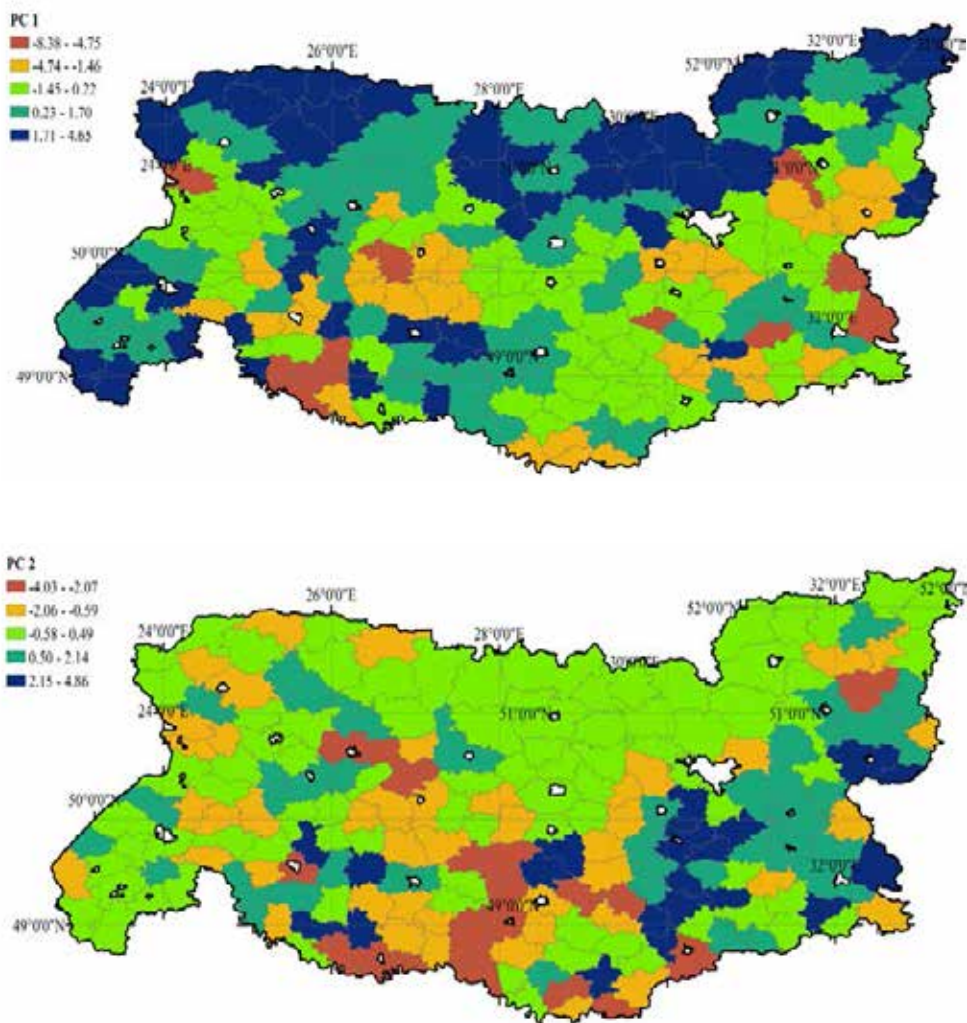


Рис. 4. Просторове варіювання головних компонент 1–2

Для того, щоб встановити чи мають наші дані просторовий складник варіювання, було проведено тест Монте-Карло, який показав, що дані є придатними для проведення географічно-зваженого аналізу головних компонент ( $p = 0,01$ ).

Результати попереднього глобального аналізу головних компонент вказують на те, що перші дві компоненти здатні разом пояснити 27,6% варіації в структурі даних. Відповідно, обґрунтованим є рішення залишити дві компоненти для подальшої процедури GWPCA. У процесі процедури адаптивної селекції вікна пропускання для Гаусової ядерної функції (gaussian kernel) було встановлене оптимальне вікно пропускання, яке включає 45 сусідів для цього фокального об'єкта. Для одержання відповідних до результатів глобального аналізу головних компонент із метою порівняння були інтерпретовані тільки дві перші головні компоненти GWPC 1, GWPC 2.

Порівняно з глобальним аналізом головних компонент, GWPCA демонструє свою ефективність та результативність в аналізі просторових патернів регіонального розміщення урожайності цукрових буряків за допомогою картування просторової варіабельності головних компонент (рис. 5). З рисунка бачимо, що райони із найбільшим процентом варіювання головних компонент знаходяться в центрі дослідженого регіону, а зони з найменшим процентом варіювання розміщені переважно на заході.

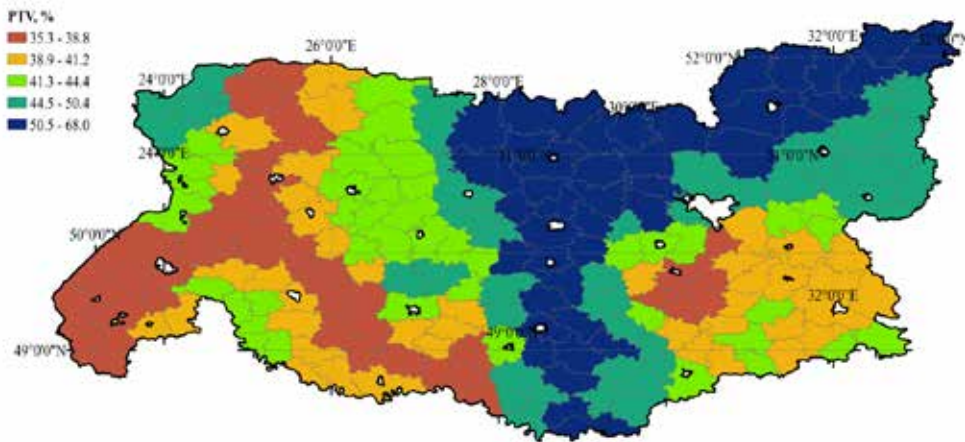


Рис. 5. Просторове варіювання проценту загальної варіації перших двох головних компонент (percentage of total variance – PTV)

Замість традиційної для цього типу аналізу процедури «виграшних змінних», яка в нашому випадку, на жаль, дає нечітку картину результатів, нами був застосований кластерний аналіз. Вказаний підхід дає змогу виділити групи адміністративних районів, які характеризуються подібною часовою динамікою врожайності цукрових буряків в аспекті відповідної головної компоненти. Очевидно, що сукупності адміністративних районів, які характеризуються подібною динамікою врожайності, також географічно наближені та формують однорідні екологічні райони.

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

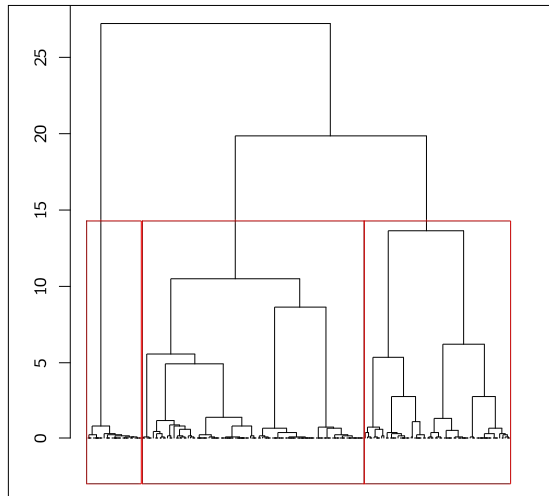


Рис. 6. Кластерний аналіз адміністративних районів за значеннями факторних навантажень GWPC I

Встановлені кластери та їх профільні розподіли факторних навантажень дають уявлення про перебіг процесів, які характерні для відповідного кластеру. Частотні характеристики GWPC I в кластері 1 характеризуються наявністю від'ємної автокореляції з лагом 5 років ( $r = -0,42$ ,  $p < 0,05$ ). Своєю чергою, для кластеру 2 характерна позитивна автокореляція з лагом п'ять років ( $r = 0,36$ ,  $p < 0,05$ ). Для кластеру 3 характерні частотні властивості, встановлені для головної компоненти 1, виділеної в результаті звичайного аналізу головних компонент: позитивна автокореляція з лагом 1 рік ( $r = 0,41$ ,  $p < 0,05$ ), від'ємна часова автокореляція з лагом 5 років ( $r = -0,56$ ,  $p < 0,05$ ) та 6 років ( $r = -0,57$ ,  $p < 0,05$ ), а також позитивна автокореляція з лагом 10 років ( $r = 0,35$ ,  $p < 0,05$ ), 11 років ( $r = 0,40$ ,  $p < 0,05$ ) та 12 років ( $r = 0,36$ ,  $p < 0,05$ ).

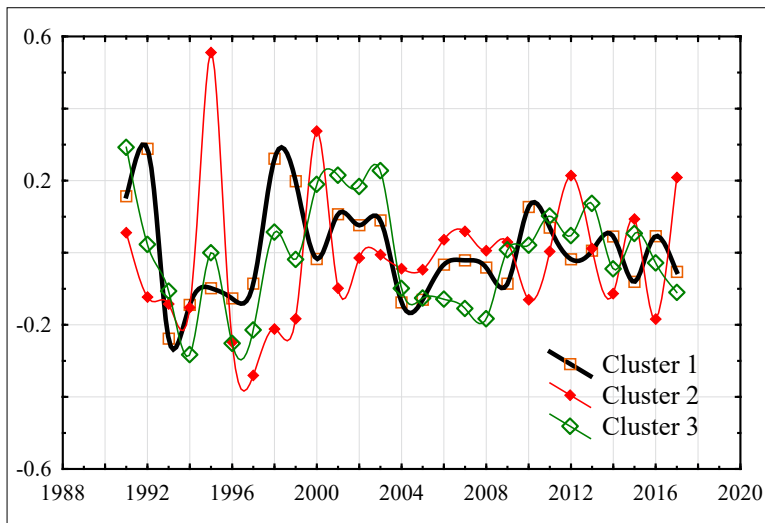


Рис. 7. Середні значення факторних навантажень GWPC I для кластерів 1–3. Вісь абсцис – роки, вісь ординат – факторні навантаження



Просторове розміщення адміністративних районів, які включені у відповідні кластери, є просторово регулярним (рис. 8). Кластери 1 та 2 займають центр дослідженого регіону, кластер 3 покриває найбільшу територію та знаходиться як на краях дослідженого регіону, так і в його центрі.

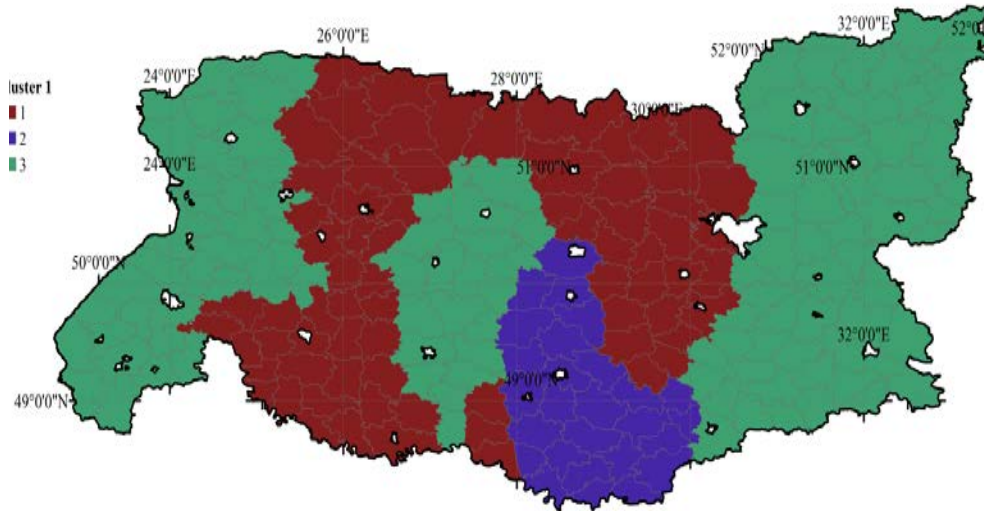


Рис. 8. Просторове розміщення кластерів, одержаних на основі факторних навантажень GWPC 1

Кластерний аналіз адміністративних районів за значеннями факторних навантажень GWPC 2 дав змогу встановити два гомогенних кластера (рис. 9).

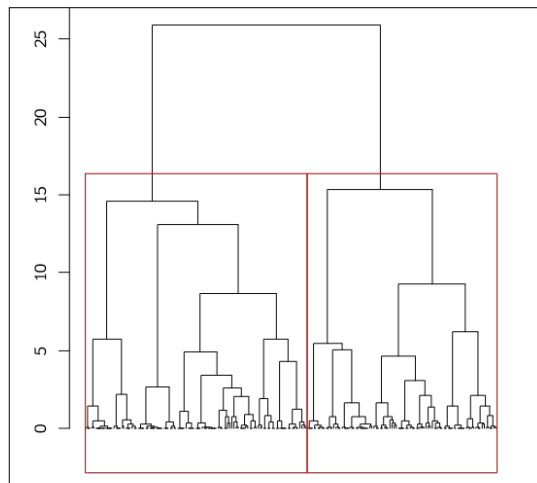


Рис. 9. Кластерний аналіз адміністративних районів за значеннями факторних навантажень GWPC 2



Динаміка процесів, які об'єднані кластером 1, характеризується часовою від'ємною автокореляцією з лагом 3 роки ( $r = -0,38, p < 0,001$ ) та 4 роки ( $r = -0,37, p < 0,001$ ). Кластер 2 характеризується динамікою, в якій представлена від'ємна автокореляція з лагом 1 рік ( $r = -0,39, p < 0,001$ ) та позитивна автокореляція з лагом 2 роки ( $r = 0,23, p < 0,001$ ) (рис. 10).

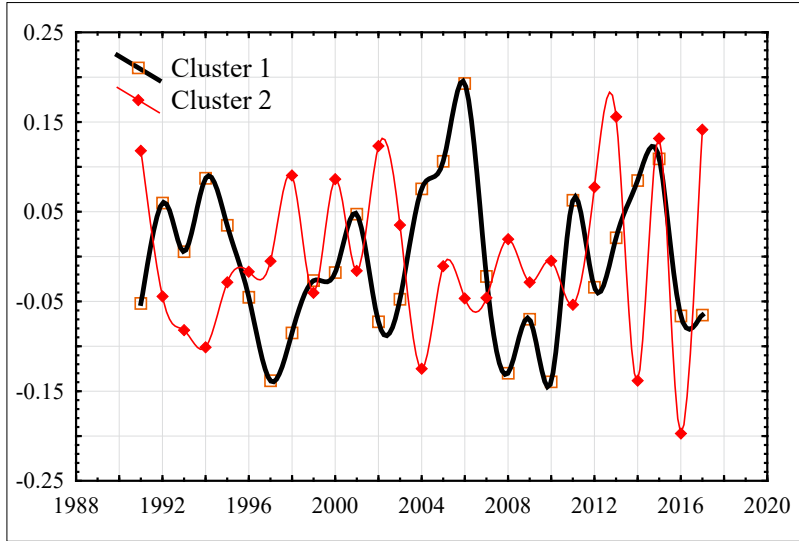


Рис. 10. Середні значення факторних навантажень GWPC 2 для кластерів 1–2.  
Вісь абсцис – роки, вісь ординат – факторні навантаження

У просторовому аспекті другий кластер факторних навантажень GWPC 2 займає центральне положення, а кластер 1 присутній як у центрі, так і на заході і сході дослідженого регіону (рис. 11).

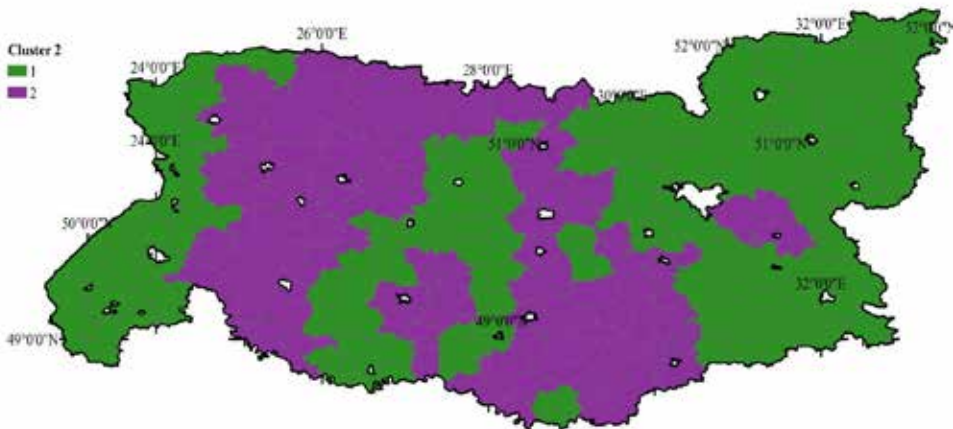


Рис. 11. Просторове розміщення кластерів, одержаних на основі факторних навантажень GWPC 2

Отже, використання аналізу головних компонент щодо залишків регресійної моделі дає змогу встановити динамічні характеристики варіювання врожайності цукрових буряків. Ця інформація може бути використана в сільськогосподарському менеджменті, зокрема, при плануванні сівозмін, заходів захисту рослин, підвищення родючості ґрунту тощо. Застосування географічно зваженого аналізу головних компонент дає змогу виділити більш компактні території (кластери) з однаковою частотою варіювання врожайності цукрових буряків. А території з однаковим перебігом екологічних процесів загалом можуть розглядатися як агроекологічні зони. Тобто виділені нами кластери можна розглядати як агроекологічні зони з точки зору вирощування цукрових буряків.

**Висновки і пропозиції.** Внесок агроекологічних факторів у варіювання врожайності цукрових буряків коливається від 4 до 28% та має регіональну диференціацію. Аналіз головних компонент залишків регресійної моделі врожайності цукрових буряків дає змогу встановити 2 головні компоненти, які разом пояснюють 27,6% загальної варіабельності врожайності цукрових буряків. Також за допомогою глобального аналізу головних компонент виявили динамічні характеристики варіювання врожайності цукрових буряків. Застосування географічно зваженого аналізу головних компонент дало змогу виявити території з однаковою динамікою варіювання врожайності цукрових буряків та відобразити їх на карті. Ми вважаємо, що ця інформація може стати основою для агроекологічного зонування території щодо вирощування цукрових буряків, а також планування агро-технологічних заходів та управління сільськогосподарськими територіями.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Зимарова А.А. Просторово-часові закономірності варіювання урожайності кукурудзи в Україні. *Наукові горизонти*. 2019. № 2 (75). С. 58–66.
2. Bosermark N.O. “Genetics and Breeding,” in *Sugar Beet*, ed A.P. Draycott (Oxford: Blackwell Publishing Ltd.), 2006. P. 50–88.
3. Cattell R.B. The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research*. 1966. Iss. 1. Pp. 245–76.
4. Curcic Z., Cirić M., Nagl N., Taški-Ajduković K. Effect of Sugar Beet Genotype, Planting and Harvesting Dates and Their Interaction on Sugar Yield. *Front. Plant Sci*. 2018. 9. 1041. doi: 10.3389/fpls.2018.01041
5. Hergert G.W. Sugar beet fertilization. *Sugar Tech*. 2010. 12. Pp. 256–266. DOI: 10.1007/s12355-010-0037-1
6. Hoffmann C.M., Kluge-Severin S. Growth analysis of autumn and spring sown sugar beet. *Eur. J. Agron*. 2011. 34. Pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.eja.2010.09.001
7. Jaggard K.W., Qi A., Semenov M.A. The impact of climate change on sugar beet yield in the UK: 1976-2004. *J. Agric. Sci*. 2007. 145. Pp. 367–375. DOI: 10.1017/S0021859607006922
8. Kunah O.M., Pakhomov O.Y., Zymarioieva A.A., Demchuk N.I., Skupskyi R.M., Bezuhla L.S., Vladyka Y.P. 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). Pp. 276–285. DOI: <https://doi.org/10.15421/011842>
9. Malosetti, M., Ribau, T. J.M., and Van Eeuwijk, F. A. (2013). The statistical analysis of multi-environment data: modeling genotype-by-environment interaction and its genetic basis. *Front. Physiol*. 4:44. DOI: 10.3389/fphys.2013.00044M
10. Ndhlela T., Herselman L., Magorokosho C., Setimela P., Mutimaamba C., Labuschagne M. (2014). Genotype-environment interaction of maize grain yield using AMMI biplots. *Crop Sci*. 54, 1992–1999. DOI: 10.2135/cropsci2013.07.0448

11. Powers L., Schmehl W. R., Federer W. T., Payne M. G. Chemical genetic and soils studies involving thirteen characters in sugar beet. *J. ASSBT*. 1963. 12. Pp. 393–448. DOI: 10.5274/jsbr.12.5.393
  12. Schneider K., Schafer-Pregl R., Borchardt D. C., Salamini F. Mapping QTLs for sucrose content, yield and quality in a sugar beet population fingerprinted by EST-related markers. *Theor. Appl. Genet.* 2002. 104. Pp. 1107–1113. DOI: 10.1007/s00122-002-0890-8
  13. Spinoni J., Naumann G., Vogt J., Barbosa P. European drought climatologies and trends based on a multi-indicator approach. *Glob. Planet. Change*. 2015. 127, 50–57. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2015.01.012
  14. Van Ittersum M., Rabbinge R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crop Res.* 1997. 52. Pp. 197–208. DOI: 10.1016/S0378-4290(97)00037-3
  15. White J.W., Hoogenboom G., Kimball B. A., Wall G. W. Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Field Crop Res.* 2011. 124, 357–368. DOI: 10.1016/j.fcr.2011.07.001.
-