

Методика проведення досліджень

Можливості географічно зваженого метода головних компонент для аналізу просторової нестационарності взаємозв'язку морфометричних характеристик кукурудзи (*Zea mays* L.)

ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ ЖУКОВ
КАТЕРИНА ВАДИМІВНА АНДРУСЕВИЧ

ZHUKOV A.V., ANDRUSEVICH K.V. (2015). Ability of the geographically weighted principal components analysis for assessing of the maize (*Zea mays* L.) spatial non-stationarity morphometrics traits interrelation. *Chornomors'k. bot. z.*, **11** (3): 397-406. doi:10.14255/2308-9628/15.113/13.

Spatial patterns of maize morphometrics traits interrelation variability with geographically weighted principal components analysis at large-scale level have been revealed. Spatial variability of covariation structures which describes interrelation between morphometrics indicators and density of standing of maize have been established. The global pattern of interrelation obtained by means of the classical principal component analysis have been shown as not to be identical to local covariation structures. Local covariation structures which found with geographically weighted principal components analysis within an optimum kernel bandwidth are characterised by much higher level of nonrandom variability which is described by first three principal components. The part of a dispersion which specifies in a coordination of morphological structures, is characterised by natural spatial trends of a variation. Local covariation structures form spatially natural patterns of the placing. Feature of these structures is quantitative redistribution of those values or other signs within the limits of enough invariant configurations. The continuity covariation structures in a qualitative sense at various scale levels (global and local) but with local quantitative specificity is shown. This specificity is shown in prevalence of this or that indicator as basic marker main components at local level. Revealing of spatial patterns covariation structures puts a problem of understanding of the nature of this spatial regularity.

Keywords: principal components analysis, morphometric traits, spatial variability

ЖУКОВ О.В., АНДРУСЕВИЧ К.В. (2015). **Можливості географічно зваженого метода головних компонент для аналізу просторової нестационарності взаємозв'язку морфометричних характеристик кукурудзи (*Zea mays* L.).** *Чорноморськ. бот. ж.*, **11** (3): 397-406. doi:10.14255/2308-9628/15.113/13.

Виявлені просторові патерни мінливості взаємозв'язку морфометричних характеристик кукурудзи методами географічно зваженого аналізу головних компонент на великомасштабному рівні. Установлено просторову варіабельність коваріаційної структури, що описує взаємозв'язок між морфометричними показниками та густотою стояння кукурудзи. Показано, що глобальний патерн взаємозв'язку, отриманий засобами класичного аналізу головних компонент, не ідентичний локальним коваріаційним структурам. Локальні коваріаційні структури, які розкриваються за допомогою аналізу головних компонент у діапазоні оптимальної смуги пропускання, у цілому характеризуються значно більш високим рівнем невипадкової варіабельності, що описується першими трьома головними компонентами. Частка дисперсії, що вказує на погодженість морфологічних структур, характеризується закономірними просторовими трендами варіювання. Локальні коваріаційні структури формують просторово закономірні патерни свого розміщення. Особливістю цих структур є кількісний перерозподіл значень тих або інших ознак у рамках досить інваріантних конфігурацій. Показано наступність коваріаційних структур у якісному відношенні на різних масштабних рівнях (глобальному та

локальному), але з локальною кількісною специфікою. Ця специфічність проявляється в перевазі того або іншого показника як основного маркера головного компонента на локальному рівні. Виявлення просторових патернів коваріаційних структур ставить завдання розуміння природи цієї просторової регулярності.

Ключові слова: аналіз головних компонент, морфометричні властивості, просторове варіювання

ЖУКОВ А.В., АНДРУСЕВИЧ Е.В. (2015). **Возможности географически взвешенного анализа главных компонент для анализа пространственной нестационарности взаимосвязи морфометрических характеристик кукурузы (*Zea mays* L.).** *Черноморск. бот. ж.*, **11** (3): 397-406. doi:10.14255/2308-9628/15.113/13.

Вывявлены пространственные паттерны изменчивости взаимосвязи морфометрических характеристик кукурузы методами географически взвешенного анализа главных компонент на крупномасштабном уровне. Установлена пространственная вариабельность ковариационной структуры, которая описывает взаимосвязь между морфометрическими показателями и густотой стояния кукурузы. Показано, что глобальный паттерн взаимосвязи, полученный средствами классического анализа главных компонент, не идентичен локальным ковариационным структурам. Локальные ковариационные структуры, которые вскрываются с помощью анализа главных компонент в диапазоне оптимальной полосы пропускания, в целом характеризуются значительно более высоким уровнем неслучайной вариабельности, которая описывается первыми тремя главными компонентами. Доля дисперсии, которая указывает на согласованность морфологических структур, характеризуется закономерными пространственными трендами варьирования. Локальные ковариационные структуры формируют пространственно закономерные паттерны своего размещения. Особенностью этих структур является количественное перераспределение значений тех или иных признаков в рамках достаточно инвариантных конфигураций. Показана преемственность ковариационных структур в качественном отношении на различных масштабных уровнях (глобальном и локальном) но с локальной количественной спецификой. Эта специфичность проявляется в преобладании того или иного показателя как основного маркера главной компоненты на локальном уровне. Вывявление пространственных паттернов ковариационных структур ставит задачу понимания природы этой пространственной регулярности.

Ключевые слова: анализ главных компонент, морфометрические свойства, пространственное варьирование

Методи аналізу головних компонент широко застосовуються при вивченні морфології рослин [ZLOBIN et al., 2008]. Аналіз головних компонент показав істотні розбіжності у коваріаційних структурах морфологічних ознак кукурудзи, що вирощувалася в умовах вологості ґрунту 40 і 100 % [HAFIZ et al., 2015]. Класифікацію географічно відмінних посівів кукурудзи за морфологічними ознаками було проведено за допомогою аналізу головних компонент у Франції [GOUESNARD et al., 1997], Іспанії [LLAURADO, MORENO-GONZALEZ, 1993; ORDAS et al., 1994], Італії [CAMUSSI, 1979] і Аргентини [MELCHIORRE, 1992].

Класичні статистичні підходи, які спрямовані на характеристику зв'язку між явищами або процесами, базуються на припущенні стаціонарності, тобто незалежності від місця розташування у просторі цього зв'язку [KUMAR et al., 2012]. Аналіз головних компонент застосовується для зниження розмірності простору ознак та для ідентифікації комбінації характеристик, які описують багатовимірний масив даних [LLOYD, 2010]. Вважається, що коваріаційна структура даних при аналізі головних компонент є постійною в межах досліджуваного просторового діапазону [CHARLTON et al., 2010]. Однак, для просторових даних, будь-які стандартні непросторові статистики в узагальненому вигляді надають підсумок, але не надають можливості описати географічну мінливість спостережуваних значень або взаємозв'язку між ними [LLOYD, 2010]. Крім того, стандартний аналіз головних компонент у явному вигляді не бере до

уваги просторові взаємини, тому що не був спеціально створений для ідентифікації просторових структур [ARROUAYS et al., 2011].

Аналіз головних компонент може бути розширений за допомогою застосування географічно зважених кореляційних коефіцієнтів, у яких ваги визначаються відносно кожної точки спостереження, що дозволяє провести окремі аналізи головних компонент для кожної точки відбору проб – географічно зважений аналіз головних компонент (*geographically weighted PCA – GWPCA*) [LLOYD, 2010]. GWPCA враховує просторову гетерогенність і надає можливості оцінки просторових характеристик даних [KUMAR et al., 2012]. Географічно зважений аналіз головних компонент володіє можливістю виявити сховані просторові структури та забезпечує необхідною інформацією, що вказує на те, що локальні кореляційні структури є результатом не випадкових процесів [CHARLTON et al., 2010]. Застосування GWPCA відбиває тренд в аналізі просторових даних, що пов'язаний зі зсувом фокуса від глобальної подібності до локальних розбіжностей [LLOYD, 2011].

Морфологічні показники, які досліджені у даній роботі, входять до кодексу ознак, які визначають життєвий стан особин – віталітет. Термін «віталітет» запропонований Ю.А. Злобіним (1981) для відображення комплексу кількісних показників, які позначають інтенсивність процесів росту, формоутворення та продуктивності особин в ценопопуляціях. Сама процедура оцінки віталітету є нічим іншим, як дискретним представленням (класи віталітету – це дискретні порядкові змінні) комплексу континуальних морфологічних ознак на основі апріорної інформації про їх значимість. Внаслідок чого можна зробити оцінку гетерогенності життєвості особин в ценопопуляції. Ми вважаємо, що гетерогенність життєвості особин як наслідок екологічно детермінованої варіабельності процесів формоутворення можна визначити за допомогою оцінки взаємозв'язку морфометричних ознак без апріорної інформації. Аналіз головних компонент дозволяє одержати уявлення про структуру морфопроцеса. Але замість дискретних послідовних класів віталітету ми одержуємо ортогональні (тобто незалежні) аспекти варіації морфометричних ознак, які ґрунтуються на особливостях формутворення саме у межах даної ценопопуляції без додаткової апріорної інформації. Концепція віталітету як сукупності послідовних станів є адекватною в умовах одного переважаючого фактору, у градієнті якого можна ранжувати особини за їх життєвістю. Не можна відкидати багатоваріантності морфологічних стратегій адаптації до дії декількох чинників або дії одного фактору. Аналіз головних компонент, за умови відповідності вихідних даних певним статистичним вимогам, є більш адекватним порівняно з концепцією віталітету. З іншого боку, результати аналізу головних компонент є контекстно залежними, що утруднює порівняння ценопопуляцій між собою. У концепції віталітету апріорна інформація є зовнішньою стосовно системи мірою, внаслідок чого можливе порівняння ценопопуляцій за критерієм життєвості.

У якості типів просторових процесів виділяються просторова гетерогенність і просторова залежність. Просторова гетерогенність виникає тоді, коли спостереження, зроблені в близькості одне від одного є подібними внаслідок наявності загальної причини, що на них впливає. У цій ситуації не передбачається наявності взаємодії між просторовими точками. Просторова залежність виникає як наслідок функціонального зв'язку, обумовленого просторовою близькістю. Невірне розуміння природи просторового процесу може бути причиною генерації відомостей про наявність процесу, якого у дійсності немає, або приховувати реально існуючий процес.

Мета цієї роботи – виявити просторові патерни мінливості взаємозв'язку морфометричних характеристик кукурудзи методами географічно зваженого аналізу головних компонент на великомасштабному рівні.

Матеріали й методи дослідження

На сільськогосподарському полі (Дніпропетровська область, Синельниківський район, околиця с. Веселе, 48°21'27.25"З, 35°31'53.88"В) був закладений полігон, що представлений 7 трансектами по 15 пробних ділянок у кожній. Відстань між пробними ділянками становить 2 м. У межах кожної ділянки випадковим чином обиралися 6 рослин, які обмірювалися. У роботі досліджувалась просторова варіабельність морфометричних ознак, тому дослідження проведені тільки в один часовий період – 6 липня 2015 р. Координати цих рослин фіксувалися щодо локальної системи координат.

Рослини можна вважати генетично однорідними, тому відмінності у віталитеті можна розглядати як результат екологічних взаємовідносин у посіві.

У рослин вимірювалися висота стебла, кількість листів, довжина та ширина листа, ширина стебла на висоті, рівній половині висоти рослини. На кожній рослині зроблено виміри медіанного листа (рахуючи від першого). Точність вимірювання висоти рослин склала 1 см, діаметра стебла, довжини та ширини листа – 1 мм.

У ряді рослин кукурудзи довжиною 1 м зроблено підрахунок рослин N і з урахуванням відстані між рядами d (у метрах) обчислювалася густина стояння:

$$PD = N / d,$$

де PD – густина стояння рослин, екз./м², N – кількість рослин у ряді довжиною 1 м; інтервал між рядами, м.

Площа поверхні листа кукурудзи була встановлена за формулою:

$$S = k \times W \times L,$$

де W – максимальна ширина листа; L – довжина листа; k – фактор форми, що варіює в межах 0,67–0,71 [BOS et al., 2000].

Питома площа листової поверхні була обчислена у такий спосіб:

$$LS = S \times Nm \times PD,$$

де LS – питома площа листової поверхні, м²/м²; Nm – кількість листів на одній рослині; PD – густина стояння рослин.

Об'єм стебла кукурудзи обчислювали у такий спосіб [MADDONNI, OTEGUI, 2004]:

$$St_V = \pi \cdot St_L \cdot (0,5 \cdot St_D)^2,$$

де St_V – об'єм стебла, St_L – висота стебла, St_D – висота стебла на рівні, що дорівнює половині висоти стебла.

На основі вимірів морфологічних ознак рослин кукурудзи були розраховані похідні індекси. Індекси являють собою відносини логарифмів величин, якими індекси названі. Так, індекс St_D/St_L дорівнює $\log(St_D)/\log(St_L)$. Формули інших індексів впливають за аналогією.

Розрахунки статистики I -Морана зроблені в програмі GeoDa [ANSELIN et al., 2006; ЖУКОВ, 2015]. Описові статистики отримані за допомогою програми Statistica 7.0. Відображення просторового варіювання ознак виконано за допомогою програм ArcMap 10.0 і Surfer 11.0. Просторово зважений аналіз головних компонент виконаний за допомогою бібліотеки GWmodel [GOLLINI et al., 2013] у рамках середовища R [R CORE TEAM, 2013].

Результати

Дані про гуштоту стояння кукурудзи і її морфологічні ознаки представлені в таблиці 1.

Гуштота стояння рослин склала 10,26 екз./м². Цей показник у межах вивченого полігона варіює в широких межах 2–18 екз./м² ($CV = 26,37\%$). Слід зазначити, що в роботах часто наводяться дані по гуштоті сівби рослин. Наші результати свідчать про те, що такий важливий показник, як гуштота стояння рослин, що визначає стан посіву, зазнає значної варіабельності навіть на порівняно обмеженій ділянці простору поля.

Таблиця 1
Екологічні та морфометричні ознаки кукурудзи (N = 630) і результати аналізу головних компонент

Table 1
Ecological and morphometrics traits of the maize (N = 630) and principle component analysis results

Ознака		Среднее±ст. · помилка	CV, %	Аналіз головних компонент*				
				PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
1	Густота стояння, екз./м ² (PD)	10,26±0,11	26,37	–	–	–	–0,50	0,64
2	Висота стебла, см (St_L)	144,68±0,89	15,40	–0,35	–	–	0,33	0,21
3	Ширина стебла, см (St_D)	7,59±0,02	7,17	–0,22	–	0,48	–	–
4	Кількість листів, шт (Nm)	12,26±0,07	13,75	–0,34	0,15	–0,10	–0,15	–0,25
5	Довжина листа, см (L)	68,47±0,27	9,95	–0,21	–0,29	–0,12	–	–
6	Ширина листа, см (W)	7,15±0,03	11,48	–0,32	–0,29	–	–	–
7	Питома площа листової поверхні, м ² /м ² (LS)	4,40±0,07	38,35	–0,29	–0,11	–0,11	–0,40	0,34
8	St_D/St_L	0,41±0,07	4,16	0,16	–0,14	0,43	–0,35	–0,18
9	Num/St_L	0,50±0,10	5,13	–0,21	0,21	–0,17	–0,37	–0,43
10	L/St_L	0,85±0,14	4,01	0,24	–0,31	–	–0,30	–0,20
11	L/St_D	2,09±0,32	3,83	–	–0,17	–0,54	–	–
12	L/Nm	1,70±0,60	8,92	0,28	–0,31	–	–	0,16
13	W/St_L	0,40±0,08	5,34	–	–0,43	–	–0,15	–0,20
14	W/St_D	0,97±0,21	5,48	–0,21	–0,31	–0,30	0,12	–
15	W/Nm	0,79±0,28	9,01	0,11	–0,42	0,14	0,14	0,13
16	W/L	0,46±0,08	4,57	–0,31	–0,24	–	–	–
17	Об'єм стебла, м ³ (St_V)	0,66±0,01	24,15	–0,33	–	0,30	0,14	0,11
I-Морана		Індекс		0,14	0,07	0,13	0,16	0,12
		p-рівень**		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Примітка: *аналіз головних компонент – представлені статистично достовірні навантаження; PC1, ..., PC5 – головні компоненти 1, ..., 5. ** – після 999 пермутацій.

Кількість листів на рослині також є досить варіабельним показником. Необхідно відзначити, що кількість листів, що з'являються, у кукурудзи лінійно залежить від суми ефективних температур із середньою швидкістю 0,03 листка/на добу [BOON et al., 2008]. Наші дані свідчать про те, що між кількістю листів і температурою ґрунту у верхньому шарі 5–7 см існує статистично достовірною кореляція ($r = 0,18$, $p = 0,00$). Було встановлено, що між різними режимами іригації та числом листів у кукурудзи немає статистично достовірної залежності [НАЛІВАВАЕЕ et al., 2012]. Виявлення зв'язку морфологічних ознак з факторами середовища не входило в завдання цього дослідження, але наведені дані дозволяють припустити причину значної варіабельності кількості листів кукурудзи у просторі. Найбільш ймовірно те, що просторова варіабельність теплових властивостей ґрунту впливає на динаміку ростових процесів кукурудзи.

Як перший етап аналізу проведений стандартний аналіз головних компонент. Перші п'ять головних компонент, власні числа яких перевищують 1, пояснюють 94,70 % мінливості простору екологічних і морфометричних ознак кукурудзи. Компонента 1 описує 35,16 % мінливості простору ознак. Найбільшим абсолютним значенням навантаження на головну компоненту 1 характеризуються такі ознаки, як висота стебла (–0,35), число (–0,34) і ширина листів (–0,32), а також об'єм стебла (–0,33). Таким чином, головну компоненту 1 можна інтерпретувати як розмір рослин

кукурудзи. Головна компонента 2 описує 26,42 % варіабельності простору ознак. Найбільшими абсолютними навантаженнями на цю компоненту характеризуються індекси W/St_L (-0,43) і W/L (-0,42), що дає підстави інтерпретувати цю компоненту як міру форми листа – подовжену або розширену. Головна компонента 3 описує 16,32 % варіабельності простору ознак. Найбільшими абсолютними значеннями навантаження на цю компоненту характеризуються ширина стебла (0,48), а також індекси L/St_D (-0,54) і St_D/St_L (0,43). Ця компонента відбиває мінливість товщини стебла кукурудзи. Головна компонента 4 описує 8,77 % варіабельності простору ознак. Найбільшими абсолютними значеннями навантаження на цю компоненту характеризуються густина стояння рослин (-0,50) і питома площа поверхні листів (-0,40), а також індекси St_D/St_L (-0,35), Num/St_L (-0,37) і L/St_L (-0,30). Цей компонент відбиває зворотну залежність між густиною стояння рослин і висотою їх стебел. Головна компонента 5 описує 8,03 % варіабельності простору ознак. Найбільшими абсолютними значеннями навантаження на цей компонент характеризуються густина стояння рослин (0,64) і питома площа поверхні листів (0,34), а також індекси St_D/St_L (-0,18), Num/St_L (-0,43) і L/St_L (-0,20). Цей компонент відбиває позитивну залежність між густиною стояння рослин і висотою їх стебел.

Індекс Морана вказує на наявність просторого аспекту мінливості виділених головних компонент.

Для проведення географічно зваженого аналізу головних компонент (GWPCA) необхідно визначити оптимальне значення ширини смуги пропускання. Це завдання може бути виконане автоматично за допомогою процедури кросс-валідації (HARRIS et al., 2011). Для проведення процедури необхідно апіорі обрати кількість компонент, для яких буде визначене оптимальне значення ширини смуги пропускання, тому що для усієї кількості головних компонент оптимального рішення не існує. У нашому випадку було обрано три перші компоненти, а відбір проведений на основі бі-квадратного ядра. Існує дві стратегії відбору – адаптивна та неадаптивна. Адаптивна стратегія застосовується у випадку нерегулярного розташування точок відбору проб і цільовим значенням є число ближніх сусідів для даної точки. Неадаптивна стратегія застосовується для регулярних або квазірегулярних даних і пошуку підлягає відстань. Нами встановлено, що оптимальна ширина смуги пропускання становить 7,23 м.

На рисунку 1 представлено мінливість частки варіювання простору ознак, що описується першими трьома головними компонентами.

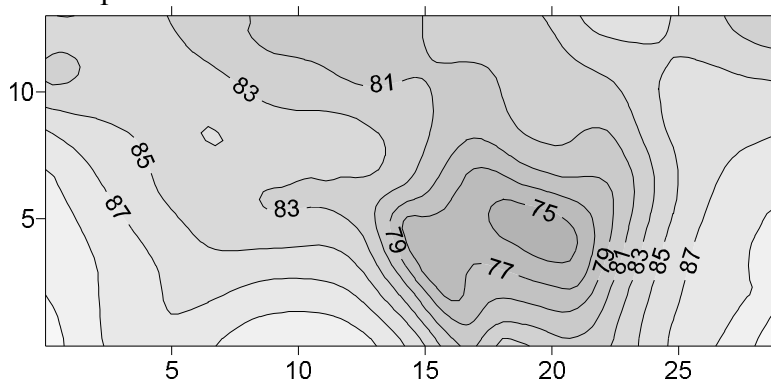


Рис. 1. Просторова мінливість частки варіювання (в %), що описується першими трьома головними компонентами (координати осей абсцис і ординат – у метрах).

Fig. 1. Percentage of variance explained by first three principal components.

Слід зазначити, що стандартний варіант аналізу головних компонент дозволяє описати 77,90 % мінливості простору ознак за допомогою перших трьох компонент. У 91,91 % випадках перші три компоненти GWPCA описують більшу частку варіабельності, ніж у випадку стандартного варіанту аналізу. Цей показник

характеризується високим рівнем I -Морана (0,79, $p = 0,001$), що свідчить про високий ступінь його просторової обумовленості.

На рисунку 2 показані змінні з найбільшим навантаженням на головну компоненту 1. У найбільшій кількості випадків переважним навантаженням характеризується ширина листа, а в трохи меншій кількості випадків – індекси L/Nm і L/St_L (табл. 2). Слід зазначити, що в стандартному варіанті аналізу ці змінні не належать до числа з переважним навантаженням. Ділянки з перевагою факторного навантаження того або іншого показника просторово визначені та компактні. Також компактність просторового розміщення характерна і для ділянок з перевагою навантажень ознак для головної компоненти 2. У найбільшій кількості випадків максимальним абсолютним навантаженням на головну компоненту 2 характеризується індекс L/St_D , трохи рідше максимум установлений для L/St_L і густоти стояння. Цікаво, що для стандартного варіанту аналізу головних компонент останній показник взагалі не попадає у число тих ознак, які характеризуються статистично достовірним навантаженням на головну компоненту 2.

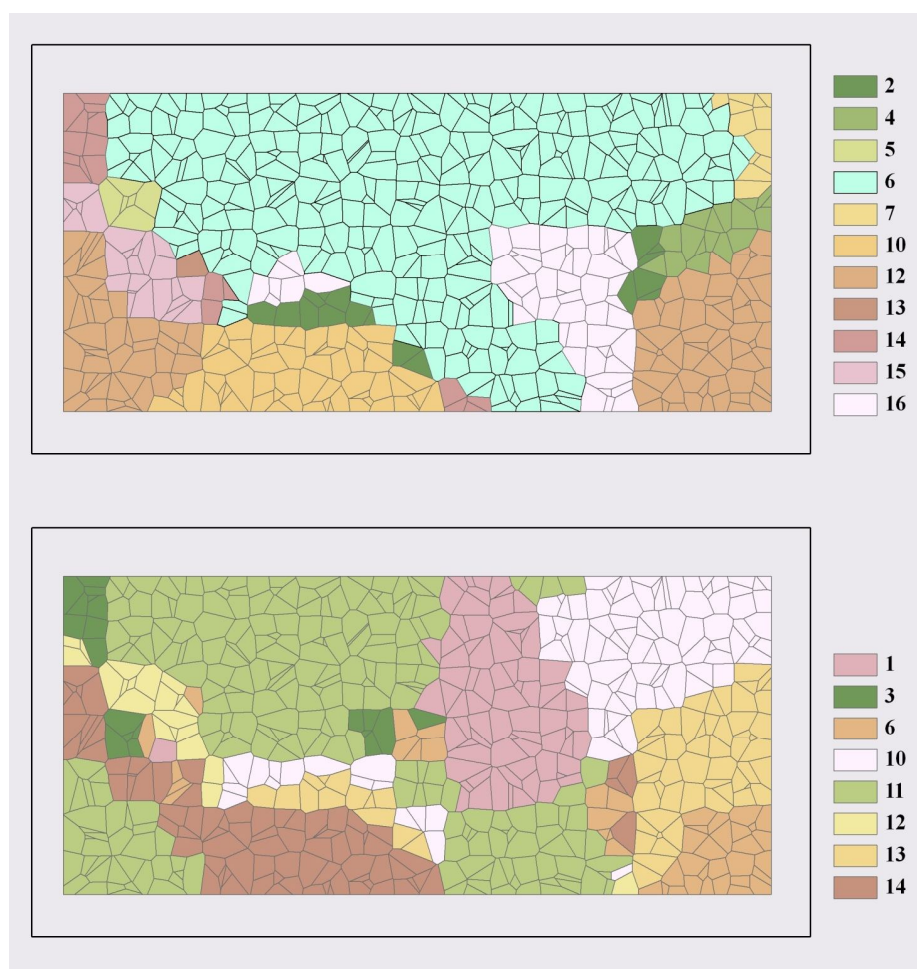


Рис. 2. Змінні з найбільшими навантаженнями на головну компоненту 1 (верх) і 2 (низ).

Fig. 2. Variable with largest loading on principle component 1 (top) and 2 (down).

Обговорення

Стандартний варіант аналізу головних компонент дозволив виділити п'ять основних трендів мінливості морфологічних характеристик кукурудзи та густоти стояння цієї рослини в полі. Ці тренди можуть бути змістовно інтерпретовані. Інтерпретація багатовимірних головних компонент на перший погляд трохи тривіальна:

це розмір рослин, форма листів, товщина стебла, а також зміна висоти рослин при різних рівнях густоти стояння. При цьому варто звернути увагу на дві обставини. Це сукупність показників, які формують зв'язну плеяду ознак, описувану кожним головним компонентом. А також ортогональність головних компонент, або незалежність тих процесів, з якими головні компоненти ідентифіковані при інтерпретації. Так, специфіка головного компонента 1 указує на те, що розміри рослин не залежать від їх густоти стояння. Крім того, довжина листа кукурудзи відстає у швидкості росту від швидкості росту довжини рослини.

Таблиця 2

Кількість локалізацій, де змінні мають найбільше навантаження на головну компоненту 1 (GWPC1) або 2 (GWPC2) (ширина вікна пропускання – 7,23 м)

Table 2

Number of locations at which each variable has the largest on first (GWPC1) or second (GWPC2) principle component (7,23 m bandwidth)

№	Змінна	GWPC1	GWPC2
1	Густота стояння, екз. /м ² (PD)	–	75
2	Висота стебла, см (St_L)	17	–
3	Ширина стебла, см (St_D)	–	20
4	Кількість листів, шт (Nm)	17	–
5	Довжина листа, см (L)	6	–
6	Ширина листа, см (W)	317	44
7	Питома площа листової поверхні, м ² /м ²	12	–
10	L/St_L	58	98
11	L/St_D	–	223
12	L/Nm	103	21
13	W/St_L	1	66
14	W/St_D	19	83
15	W/Nm	25	–
16	W/L	55	–

У цілому, густота стояння характеризується статистично достовірним навантаженням на головні компоненти 4 і 5, які замикають перелік компонент, власні числа яких перевищують одиницю та у такий спосіб можуть бути залишені для аналізу. При цьому коефіцієнт варіації густоти стояння становить 26,37 %, що поступається тільки показнику питомої площі листової поверхні (до речі, це розрахунковий показник, що також залежить від густоти стояння рослин). Таким чином, при досить високому рівні варіабельності густоти стояння, середній рівень цього показника $10,26 \pm 0,11$ екз. /м² не здійснює істотного впливу на такі морфологічні ознаки кукурудзи, як розміри, форма листової поверхні та ширина стебла. При цьому вплив на висоту стебла густоти стояння неоднозначний. Протилежний характер зв'язку густоти стояння та висоти стебел розкривають головні компоненти 4 і 5. Така ситуація може бути результатом ефекту підкови: аналіз головних компонент є лінійною процедурою, що не в змозі описати нелінійні ефекти. І нелінійний зв'язок (дзвіноподібний, або подібний до підкови) цей аналіз розбиває не на одну компоненту, а на декілька, у найпростішому випадку на дві, які відповідають висхідному і спадному сегментам «підкови».

Географічно зважений аналіз головних компонент дозволив установити просторову варіабельність коваріаційної структури, що описує взаємозв'язок між морфометричними показниками та густотою стояння кукурудзи. Установлений глобальний патерн взаємозв'язку засобами класичного аналізу головних компонент не ідентичний локальним коваріаційним структурам. Локальні коваріаційні структури, які

розкриваються за допомогою аналізу головних компонент у діапазоні оптимальної смуги пропускання, у цілому характеризуються значно більш високим рівнем не випадкової варіабельності, що описується першими трьома головними компонентами. Варіабельність, яка належить до наступних головних компонент (особливо, якщо відповідні власні числа менше 1), визначається випадковим шумом, або факторами, які не можуть бути описані в рамках моделі аналізу головних компонент. Таким чином, частка дисперсії, що описується першими трьома головними компонентами, указує на погодженість морфологічних структур. Ця погодженість характеризується закономірними просторовими трендами варіювання.

Локальні коваріаційні структури формують просторово закономірні патерни свого розміщення. Особливістю цих структур є кількісний перерозподіл значень тих або інших ознак у рамках досить інваріантних конфігурацій. У цьому випадку під конфігурацією ми розуміємо погоджену сукупність морфологічних ознак, яка за змогою може бути змістовно інтерпретована. Можна говорити про наступність коваріаційних структур у якісному відношенні на різних масштабних рівнях (глобальному та локальному), але з локальною кількісною специфікою. Ця специфічність проявляється у перевазі того або іншого показника як основного маркера головної компоненти на локальному рівні.

Виявлення просторових патернів коваріаційних структур ставить завдання розуміння природи цієї просторової регулярності. Природа цих патернів може бути ендегенна або екзогенна. Під ендегенною природою ми розуміємо формування когерентності морфологічних процесів у результаті міжорганізменних взаємодій рослинних організмів. Під екзогенною природою насамперед ми розуміємо едафічно обумовлені процеси синхронізації морфологічних процесів.

Висновки

Стандартний варіант аналізу головних компонент дозволив виділити п'ять основних трендів мінливості морфологічних характеристик та густоти стояння кукурудзи. Встановлені тренди можуть бути змістовно інтерпретовані: це розмір рослин, форма листів, товщина стебла, а також зміна висоти рослин при різних рівнях густоти стояння.

Географічно зважений аналіз головних компонент дозволив установити просторову варіабельність коваріаційної структури, що описує взаємозв'язок між морфометричними показниками та густотою стояння кукурудзи. Глобальний патерн взаємозв'язку засобами класичного аналізу головних компонент не ідентичний локальним коваріаційним структурам.

Особливістю локальних коваріаційних структур є кількісний перерозподіл значень тих або інших ознак у рамках досить інваріантних конфігурацій, які формують просторово закономірні патерни свого розміщення. Встановлена наступність коваріаційних структур у якісному відношенні на різних масштабних рівнях (глобальному та локальному).

References

- ANSELIN L., IBNU S., YOUNGHN KH. (2006). GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis. *Geographical Analysis*, **38** (1): 5-22.
- ARROUAYS D., SABA N.P.A., THIOULOUSE J., JOLIVET C., BOULONNE L., RATIE C. (2011). Large trends in French topsoil characteristics are revealed by spatially constrained multivariate analysis. *Geoderma*, **161**: 107-114.
- BOON E.J.M.C., STRUIK P.C., TAMMINGA S., ENGELS F.M., CONE J.W. (2008). Stem characteristics of two forage maize (*Zea mays L.*) cultivars varying in whole plant digestibility. III. Intra-stem variability in anatomy, chemical composition and in vitro rumen fermentation. *NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences*, **56** (1-2): 101-122.
- BOS H.J., TIJANI-ENIOLA H., STRUIK P.C. (2000). Morphological analysis of leaf growth of maize: responses to temperature and light intensity. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, **48**: 181-198.

- CAMUSSI A. (1979). Numerical taxonomy of Italian populations of maize based on quantitative traits. *Maydica*, **24**: 161-174.
- CHARLTON M., BRUNSDON C., DEMŠAR U., HARRIS P., FOTHERINGHAM A.S. (2010). Principal components analysis: from global to local. *13th AGILE International Conference on Geographic Information Science*. Guimaraes, Portugal. 1-10.
- GOLLINI I. LU B., CHARLTON M., BRUNSDON CH., HARRIS P. (2013). GWmodel: An R Package for Exploring Spatial Heterogeneity Using Geographically Weighted Models. *Journal of Statistical Software*, **63** (17): 1-52.
- GOUESNARD B., DALLARD J., PANOUILLE A., BOYAT A. (1997). Classification of French maize populations based on morphological traits. *Agronomie, EDP Sciences*, **17** (9-10): 491-498.
- HAFIZ S.B.M., JEHAZEB F., EJAZ-UL-HASAN, TAHIRA B., TARIQ M. (2015). Cluster and principle component analyses of maize accessions under normal and water stress conditions. *Journal of Agricultural Sciences*, **60** (1): 33-48.
- HAJIBABAE M., AZIZI F., ZARGARI K. (2012). Effect of Drought Stress on Some Morphological, Physiological and Agronomic Traits in Various Foliage Maize Hybrids. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, **12** (7): 890-896.
- HARRIS P., BRUNSDON C., CHARLTON M. (2011). Geographically Weighted Principal Components Analysis. *International Journal of Geographical Information Science*, **25** (10): 1717-1736.
- KUMAR S., LAL R., LLOYD CH.D. (2012). Assessing spatial variability in soil characteristics with geographically weighted principal components analysis. *Computational Geosciences*, **16**: 827-835.
- LLAURADO M., MORENO-GONZALEZ J. (1993). Classification of northern Spanish populations of maize by numerical taxonomy. I. Morphological traits. *Maydic*, **38**: 15-21.
- LLOYD C.D. (2011). *Local Models for Spatial Analysis*. CRC Press. 352 p.
- LLOYD C.D. (2010). Analysing population characteristics using geographically weighted principal components analysis: a case study of Northern Ireland in 2001. *Comput. Environ. Urban.*, **34** (5): 389-399.
- MADDONNI G.A., OTEGUI M.E. (2004). Intra-specific competition in maize: Early establishment of hierarchies among plants affects final kernel set. *Field Crops Res.*, **85**: 1-13.
- MELCHIORRE P. (1992). Phenetic relationships among different races of maize (*Zea mays* sss mays) from Salta (Argentina). *Maydica*, **37**:329-338.
- ORDAS A., MALVAR R.A., DE RON A.M. (1994). Relationships among American and Spanish populations of maize. *Euphytica*, **79**: 149-161.
- R CORE TEAM (2013). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>
- ZHUKOV O.V. (2015). Spatial analysis in ecology and agriculture. Dnipropetrovsk. 124 p. [ЖУКОВ О.В. (2015). Аналіз просторових даних в екології та сільському господарстві. Дніпропетровськ: ДНУ. 124 с.] DOI: 10.13140/RG.2.1.3480.2406
- ZLOBIN YU.A., SKLYAR V.G., BONDAREVA L.M., KYRYLCHUK K.S. (2009). The morphometric concept in modern botany. *Chornomors'k. bot. z.*, **5** (1): 5-22. [ЗЛОБИН Ю.А., СКЛЯР В.Г., БОНДАРЕВА Л.М., КИРИЛЬЧУК К.С. (2009). Концепція морфометрії у сучасній ботаніці. *Чорноморськ. бот. ж.*, **5** (1): 5-22]
- ZLOBIN YU.A. (1981). About vitality levels of plants. *Journal of General Biology*, **42** (4): 492-505. [ЗЛОБИН Ю.А. (1981). Об уровнях жизнеспособности растений. *Журн. общей биологии*, **42** (4): 492-505]

Рекомендує до друку
М.Ф. Бойко

Отримано 22.08.2015

Адреси авторів:

О.В. Жуков
Дніпропетровський національний університет
імені Олеся Гончара
вул. Казакова, 24, корпус 17
м. Дніпропетровськ, 49010, Україна
e-mail: zhukov_dnepr@rambler.ru
К.В. Андрусевич
Дніпропетровський державний аграрно-
економічний університет
вул. Ворошилова, 25
м. Дніпропетровськ, 49600, Україна
e-mail: eandrusevich@mail.ru

Authors' addresses:

A.V. Zhukov
Oles Gonchar Dnepropetrovsk national university
24, Kazakova st.
Dnepropetrovsk, 49010, Ukraine
e-mail: zhukov_dnepr@rambler.ru
K.V. Andrusevich
Dnepropetrovsk state agrarian and economic
university
25, Voroshilov st.
Dnepropetrovsk, 49600, Ukraine
e-mail: eandrusevich@mail.ru