

УДК 631.618:633.2.031

<sup>1</sup>Жуков А. В., <sup>2</sup>Андрусевич К. В.**ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ  
МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КУКУРУЗЫ (*ZEА MAYS L.*) ОТ  
ЭДАФИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**<sup>1</sup>Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Украина<sup>2</sup>Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, УкраинаE-mail: [zhukov\\_dnepr@rambler.ru](mailto:zhukov_dnepr@rambler.ru)

Выявлены 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. Выявление пространственных паттернов ковариационных структур ставит задачу понимания природы этой пространственной регулярности.

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

<sup>1</sup>Zhukov A.V., <sup>2</sup>Andrusevich K.V.**ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ  
МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КУКУРУЗЫ (*ZEА MAYS L.*) ОТ  
ЭДАФИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**<sup>1</sup>Oles Honchar Dnepropetrovsk National University, Ukraine<sup>2</sup>Dnepropetrovsk State Agrarian and Economic University, UkraineE-mail: [zhukov\\_dnepr@rambler.ru](mailto:zhukov_dnepr@rambler.ru)

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 has 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 characterized 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 characterized 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*

Методы анализа главных компонент широко применяются при изучении морфологии растений (Злобин та ін., 2008). Анализ главных компонент показал существенные различия в ковариационных структурах морфологических признаков кукурузы, которая выращивалась в условиях влажности почвы 40 и 100 % (Hafiz et al., 2015). Классификация географически различных популяций кукурузы по морфологическим признакам было проведена с помощью анализа главных компонент во Франции (Gouesnard et al., 1997), Испании (Llaurodo, Moreno-Gonzalez, 1993; Ordas et al., 1994), Италии (Camussi, 1979) и Аргентины (Melchiorre, 1992).

Классические статистические подходы, которые направлены на характеристику связи между явлениями либо процессами, исходят из предположения о стационарности, т.е. независимости от местоположения в пространстве этой связи (Kumar et al., 2012). Анализ главных компонент применяется для снижения размерности признакового пространства и для идентификации комбинации характеристик, которые описывают многомерный массив данных (Lloyd, 2010). Считается, что ковариационная структура данных при анализе главных компонент является постоянной в пределах изучаемого пространственного диапазона (Charlton et al., 2010). Однако, для пространственных данных, любые стандартные непустранственные статистики в обобщенном виде предоставляют итог, но не дают возможности описать географическую изменчивость наблюдаемых значений или взаимосвязи между ними (Lloyd, 2010). Кроме того, стандартный анализ главных компонент в явном виде не принимает во внимание пространственные взаимоотношения, так как не был специально создан для идентификации пространственных структур (Argouays et al., 2011).

Анализ главных компонент может быть расширен с помощью применения географически взвешенных корреляционных коэффициентов, у которых веса определяются в отношении каждой точки наблюдения, что позволяет провести отдельные анализы главных компонент для каждой точки отбора проб –

географически взвешенный анализ главных компонент, *geographically weighted PCA* – GWPCA (Lloyd, 2010). GWPCA учитывает пространственную гетерогенность и дает возможность оценки пространственных характеристик данных (Kumar et al., 2012). Географически взвешенный анализ главных компонент обладает возможностью выявить скрытые пространственные структуры и обеспечивает необходимой информацией, которая указывает на то, что локальные корреляционные структуры являются результатом неслучайных процессов (Charlton et al., 2010). Применение GWPCA отражает тренд в анализе пространственных данных, который связан со смещением фокуса от глобального подобия к локальным различиям (Lloyd, 2011).

Как типы пространственных процессов выделяются пространственная гетерогенность и пространственная зависимость. Пространственная гетерогенность возникает тогда, когда наблюдения, сделанные в близости друг от друга являются подобными в следствие наличия общей причины, которая на них оказывает влияние. В этой ситуации не предполагается наличия взаимодействия между пространственными точками. Пространственная зависимость возникает как следствие функциональной связи, обусловленной пространственной близостью. Не верное понимание природы пространственного процесса может быть причиной генерации сведений о наличии процесса, которого в действительности нет, либо скрывать реально существующий процесс (Ward, Gleditsch, 2008).

Как типы пространственных процессов выделяются пространственная гетерогенность и пространственная зависимость. Пространственная гетерогенность возникает тогда, когда наблюдения, сделанные в близости друг от друга являются подобными в следствие наличия общей причины, которая на них оказывает влияние. В этой ситуации не предполагается наличия взаимодействия между пространственными точками. Пространственная зависимость возникает как следствие функциональной связи, обусловленной пространственной близостью. Не верное понимание природы пространственного процесса может быть причиной генерации сведений о наличии процесса, которого в действительности нет, либо скрывать реально существующий процесс.

Необходимость проведения пространственной регрессии обусловлено тем, что пространственная гетерогенность приводит к гетероскедастичности, а пространственная автокорреляция приводит к зависимости регрессионных остатков. Наличие указанных особенностей нарушает стандартные предположения регрессионной модели, основанной на методе наименьших квадратов (Ward, Gleditsch, 2008).

Целью настоящей работы является выявить пространственные паттерны изменчивости взаимосвязи морфометрических характеристик кукурузы методами географически взвешенного анализа главных компонент на крупномасштабном уровне.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На сельскохозяйственном поле (Днепропетровская область, Синельниковский район, окрестность с. Веселое, 48°21'27.25"С, 35°31'53.88"В) был заложен полигон, который представлен 7 трансектами по 15 пробных участков в каждой. Расстояние между пробными участками составляет 2 м. В пределах каждого участка случайным образом выбирались 6 растений, которые подвергались измерениям. Координаты этих растений фиксировались относительно локальной системы координат. У растений измерялись высота стебля, число листьев, длина и ширина листа, ширина стебля на высоте, равной половине высоты растения. На каждом растении производились измерения медианного листа (по счету от первого). Точность измерения высоты растений составила 1 см, диаметра стебля, длины и ширины листа – 1 мм.

В ряду растений кукурузы длиной 1 м производился подсчет растений  $N$  и с учетом расстояния между рядами  $d$  (в метрах) вычислялась густота стояния:

$$PD = N / d,$$

где  $PD$  – густота стояния растений, экз./м<sup>2</sup>,  $N$  – число растений в ряду длиной 1 м; интервал между рядами, м.

Площадь поверхности листа кукурузы была установлена по формуле:

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

где  $W$  – максимальная ширина листа;  $L$  – длина листа;  $k$  – фактор формы, который варьирует в пределах 0,67–0,71 (Bos et al., 2000).

Удельная площадь листовой поверхности была вычислена следующим образом:

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

где  $LS$  – удельная площадь листовой поверхности, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>;  $Nm$  – число листьев на одном растении;  $PD$  – густота стояния растений.

Объем стебля кукурузы вычисляли следующим образом (Maddonni, Otegui, 2004):

$$St\_V = \pi \cdot St\_L \cdot (0,5 \cdot St\_D)^2,$$

где  $St\_V$  – объем стебля,  $St\_L$  – высота стебля,  $St\_D$  – высота стебля на уровне, равном половине высоты стебля.

На основании измерений морфологических признаков растений кукурузы были рассчитаны производные индексы. Индексы представляют собой отношения логарифмов величин, которыми индексы названы. Так, индекс  $St\_D/St\_L$  равен  $\log(St\_D)/\log(St\_L)$ . Формулы прочих индексов следуют по аналогии.

Расчеты статистики  $I$ -Морана произведены в программе GeoDa (Anselin et al., 2006; Жуков, 2015). Описательные статистики получены с помощью программы Statistica 7.0. Отображение пространственного варьирования признаков выполнено с помощью программ ArcMap 10.0 и Surfer 11.0. Пространственно взвешенный анализ главных компонент выполнен с помощью библиотеки GWmodel (Gollini et al., 2013) в рамках среды R (R Core Team, 2013). Результаты представлены как среднее значение и ошибка среднего.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные о густоте стояния кукурузы и её морфологических признаках представлены в табл. 1.

Густота стояния растений составила 10,26 экз./м<sup>2</sup>. Этот показатель в пределах изученного полигона варьирует в широких пределах 2–18 экз./м<sup>2</sup> (CV = 26,37 %). Следует отметить, что в работах часто приводятся данные по густоте сева растений. Наши результаты свидетельствуют о том, что такой важный показатель, как густота стояния растений, который определяет состояние посева, подвержен значительной вариабельности даже в сравнительно ограниченном участке пространства поля.

Число листьев на растении также является весьма вариабельным показателем. Необходимо отметить, что число появляющихся листьев у кукурузы линейно зависит от суммы эффективных температур со средней скоростью 0,03 листка/°C·сутки (Boon et al., 2008). Наши данные свидетельствуют о том, что между числом листьев и температурой почвы в верхнем слое 5–7 см существует статистически достоверная корреляция ( $r = 0,18$ ;  $p = 0,00$ ). Было установлено, что между различными режимами ирригации и числом листьев у кукурузы нет статистически достоверной зависимости (Найбобаев et al., 2012). Выявление связи морфологических признаков с факторами среды не входило в задачи этого исследования, но приведенные данные позволяют предположить причину значительной вариабельности числа листьев кукурузы в пространстве. Наиболее вероятно то, что пространственная вариабельность тепловых свойств почвы оказывает влияние на динамику ростовых процессов кукурузы.

В качестве первого этапа анализа проведен стандартный анализ главных компонент. Первые пять главных компонент, собственные числа которых превышают 1, объясняют 94,70 % изменчивости признакового пространства экологических и морфометрических признаков кукурузы. Компонента 1 описывает 35,16 % изменчивости признакового пространства. Наибольшим абсолютным значением нагрузки на главную компоненту 1 характеризуются такие признаки, как высота стебля (–0,35), число (–0,34) и ширина листьев (–0,32), а также объем стебля (–0,33). Таким образом, главную компоненту 1 можно интерпретировать как размер растений кукурузы. Главная компонента 2 описывает 26,42 % вариабельности признакового пространства.

Наибольшими абсолютными нагрузками на эту компоненту характеризуются индексы W/St\_L (–0,43) и W/L (–0,42), что дает основания интерпретировать эту компоненту как меру формы листа – удлиненную либо расширенную. Главная компонента 3 описывает 16,32 % вариабельности признакового пространства. Наибольшими абсолютными значениями нагрузки на эту компоненту характеризуются ширина стебля (0,48), а также индексы L/St\_D (–0,54) и St\_D/St\_L (0,43). Эта компонента отражает изменчивость толщины стебля кукурузы.

Таблица 1. Экологические и морфометрические признаки кукурузы и результаты анализа главных компонент (n = 630).

	Признак	M±st.err	CV, %	Анализ главных компонент*				
				PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
1	Густота стояния, экз./м <sup>2</sup> (PD)	10,26±0,11	26,37	-	-	-	0,50	0,64
2	Высота стебля, см (St_L)	144,68±0,89	15,40	0,35	-	-	0,33	0,21
3	Ширина стебля, см (St_D)	7,59±0,02	7,17	0,22	-	0,48	-	-
4	Число листьев, шт (Nm)	12,26±0,07	13,75	0,34	0,15	0,10	0,15	0,25
5	Длина 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	Удельная площадь листовой поверхности, м <sup>2</sup> /м <sup>2</sup>	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	Объем стебля, м <sup>3</sup> (St_V)	0,66±0,01	24,15	0,33	-	0,30	0,14	0,11
I-Морана	Индекс			0,14	0,07	0,13	0,16	0,12
	p-уровень**			0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Примечание: \*анализ главных компонент – представлены статистически достоверные нагрузки; PC1, ..., PC5 – главные компоненты 1, ..., 5. \*\* – после 999 пермутаций

Главная компонента 4 описывает 8,77 % вариабельности признакового пространства. Наибольшими абсолютными значениями нагрузки на эту компоненту характеризуются густота стояния растений (-0,50) и удельная площадь поверхности листьев (-0,40), а также индексы  $St\_D/St\_L$  (-0,35),  $Num/St\_L$  (-0,37) и  $L/St\_L$  (-0,30). Эта компонента отражает обратную зависимость между густотой стояния растений и высотой их стеблей. Главная компонента 5 описывает 8,03 % вариабельности признакового пространства. Наибольшими абсолютными значениями нагрузки на эту компоненту характеризуются густота стояния растений (0,64) и удельная площадь поверхности листьев (0,34), а также индексы  $St\_D/St\_L$  (-0,18),  $Num/St\_L$  (-0,43) и  $L/St\_L$  (-0,20). Эта компонента отражает позитивную зависимость между густотой стояния растений и высотой их стеблей.

Индекс Морана указывает на наличие пространственного аспекта изменчивости выделенных главных компонент.

Для проведения географически взвешенного анализа главных компонент (GWPCA) необходимо определить оптимальное значение ширины полосы пропускания. Эта задача может быть выполнена автоматически с помощью процедуры кросс-валидации (Harris et al., 2011). Для проведения процедуры необходимо априори выбрать число компонент, для которых будет определено оптимальное значение ширины полосы пропускания, так как для всего числа главных компонент оптимального решения не существует. В нашем случае было выбрано три первых компоненты а отбор проведен на основе биквадратного ядра. Существует две стратегии выбора – адаптивная и неадаптивная. Адаптивная стратегия применяется в случае нерегулярного расположения точек отбора проб и целевым значением является число ближних соседей для данной точки. Неадаптивная стратегия применяется для регулярных либо квазирегулярных данных и поиску подлежит расстояние. Нами установлено, что оптимальная ширина полосы пропускания составляет 7,23 м.

На рис. 1 представлено изменчивости доли варьирования признакового пространства, которое описывается первыми тремя главными компонентами.

Следует отметить, что стандартный вариант анализа главных компонент позволяет описать 77,90 % изменчивости признакового пространства с помощью первых трех компонент. В 91,91 % случаях первые три компоненты GWPCA описывают большую долю вариабельности, чем в случае стандартного варианта анализа. Этот показатель характеризуется высоким уровнем *I*-Морана (0,79;  $p = 0,001$ ), что свидетельствует о высокой степени его пространственной обусловленности.

На рис. 2 показаны переменные с наибольшей нагрузкой на главную компоненту 1. В наибольшем числе случаев преимущественной нагрузкой характеризуется ширина листа, а в несколько меньшем числе случаев – индексы  $L/Nm$  и  $L/St\_L$  (табл. 2). Следует отметить, что в стандартном варианте анализа эти переменные не относятся к числу с преобладающей нагрузкой. Участки с преобладанием факторной нагрузки того либо иного показателя

пространственно определены и компактны. Также компактность пространственного размещения характерна и для участков с преобладанием признаков нагрузок для главной компоненты 2. В наибольшем числе случаев максимальной абсолютной нагрузкой на главную компоненту 2 характеризуется индекс  $L/St\_D$ , несколько реже максимум установлен для  $L/St\_L$  и густоты стояния. Примечательно, что для стандартного варианта анализа главных компонент, последний показатель вообще не попадает в число тех признаков, которые характеризуются статистически достоверной нагрузкой на главную компоненту 2.

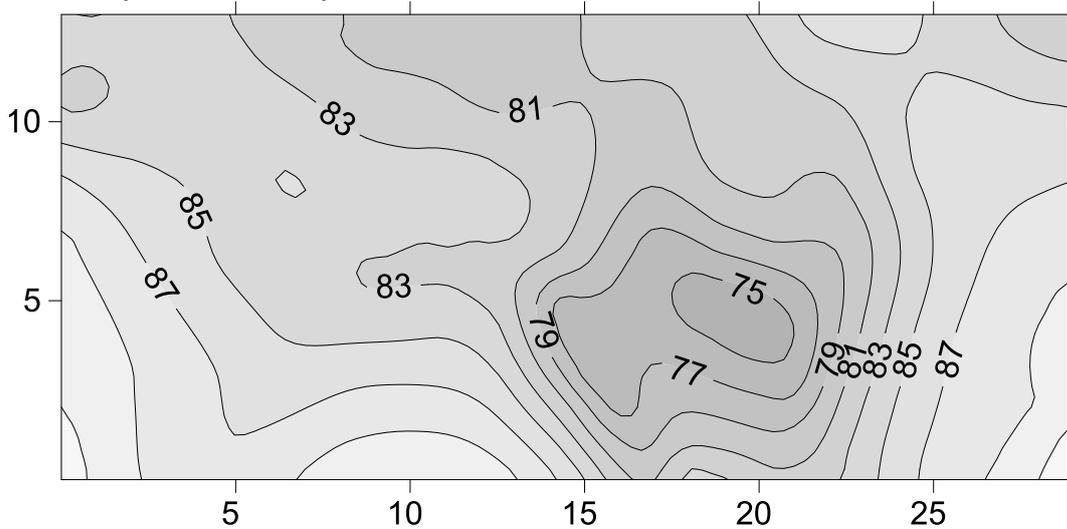


Рис. 1. Пространственная изменчивость доли варьирования, которая описывается первыми тремя главными компонентами

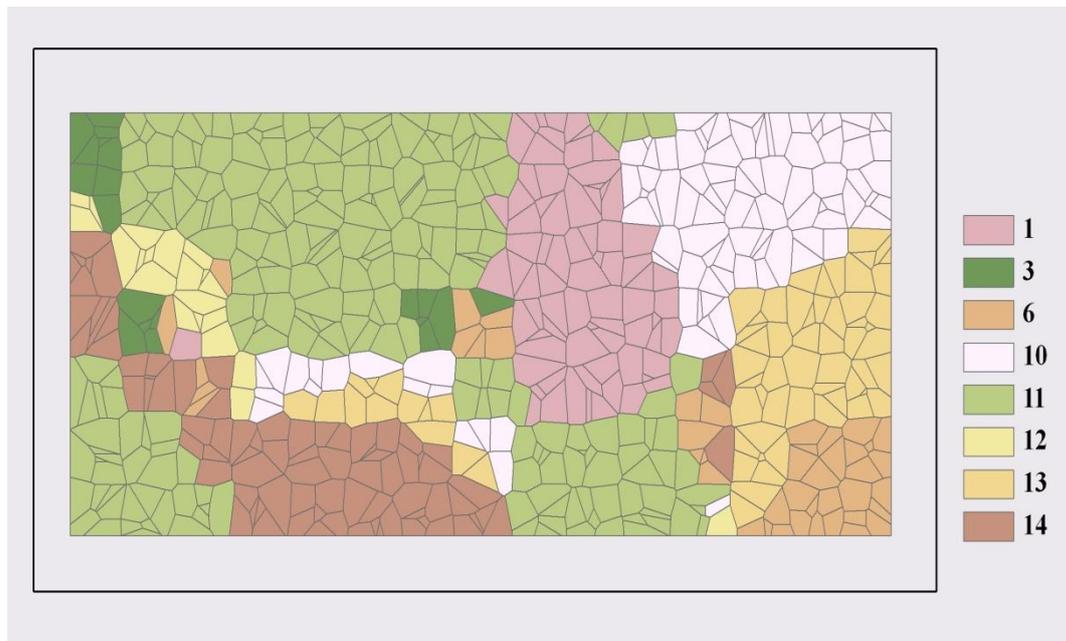


Рис. 2. Переменные с наибольшими нагрузками на главную компоненту 1 (верх) и 2 (низ).

**Таблица 2. Число локализаций, где переменные имеют наибольшую нагрузку на главную компоненту (ширина окна пропускания 7,23 м)**

№	Переменная	GWPC1	GWPC2
1	Густота стояния, экз./м <sup>2</sup> (PD)	–	75
2	Высота стебля, см (St_L)	17	–
3	Ширина стебля, см (St_D)	–	20
4	Число листьев, шт (Nm)	17	–
5	Длина листа, см (L)	6	–
6	Ширина листа, см (W)	317	44
7	Удельная площадь листовой поверхности, м <sup>2</sup> /м <sup>2</sup>	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	–

Подобно анализу вариабельности совокупности морфометрических признаков кукурузы средствами анализа главных компонент, следующим этапам исследования является снижение размерности пространства эдафических показателей. Полученные в результате анализа главных компонент переменные (веса компонент) могут быть использованы как немультиколинеарные предикторы, с помощью которых можно объяснить изменчивость морфометрических показателей кукурузы. Главные компоненты, собственные числа которых превышают 1, объясняют 95,28 % изменчивости признакового пространства эдафических свойств (табл. 3).

Главная компонента 1 в наибольшей степени отражает варьирование твердости на всех измеренных глубинах, плотность почвы и некоторые особенности агрегатной структуры. Прочие главные компоненты отражают различные аспекты взаимно согласованной изменчивости эдафических свойств. Для нашего исследования содержательная интерпретация главных компонент эдафических показателей имеет второстепенное значение, важным является то, что полученные главные компоненты являются ортогональными (это требование метода главных компонент – выделение именно ортогональных переменных) которые выполняют в свою очередь требование регрессионного анализа – отсутствие мультиколлинеарности между переменными-предикторами.

Результаты классического и пространственно-зависимого регрессионных анализов зависимости главных компонент варьирования морфометрических показателей кукурузы от эдафических главных компонент представлены в табл. 4.

Таблица 3. Эдафические свойства и результаты их анализа главных компонент (n = 105).

Свой- ство	M±st.err	CV, %	Анализ главных компонент								
			Env 1	Env 2	Env 3	Env 4	Env 5	Env 6	Env 7	Env 8	Env 9
<i>Твердость почвы в МПа·10<sup>-1</sup> на глубине, см</i>											
0–5	6,70±0,06	22,54	0,22	–	0,83	–	–	–	–	0,14	–
5–10	6,97±0,07	24,92	0,20	–	0,85	–	–	–	–	–	–
10–15	8,02±0,09	28,50	0,51	–	0,61	0,14	0,09	0,12	0,19	–	0,17
15–20	10,05±0,12	29,02	0,57	0,18	0,32	0,26	–	0,18	0,26	0,12	0,31
20–25	11,63±0,10	21,16	0,44	0,18	0,17	0,63	–	–	0,25	0,08	0,21
25–30	12,60±0,11	21,12	0,14	–	–	0,77	0,10	–	0,15	0,16	0,24
30–35	13,27±0,09	16,73	0,10	–	–	0,86	–	–	0,10	0,27	–
35–40	13,63±0,08	15,21	0,27	–	–	0,68	–	–	0,36	–	–0,32
40–45	13,69±0,11	19,87	0,63	–	0,19	0,32	–	–	0,08	0,37	–0,23
45–50	14,88±0,18	29,75	0,73	0,11	0,16	–	0,10	–	0,28	0,29	–0,12
50–55	17,39±0,24	35,17	0,58	–	0,11	–	0,23	0,16	0,34	–	–
55–60	20,96±0,29	34,68	0,92	–	0,14	–	–	–	0,14	–	–
60–65	24,38±0,28	28,63	0,91	–	0,13	–	–	–	–	–	–
65–70	27,98±0,30	26,75	0,89	–	0,18	–	–	–	–	–	–
70–75	30,78±0,28	23,22	0,86	–	0,15	–	–	0,12	0,10	0,20	–
75–80	35,13±0,28	20,13	0,85	–	–	0,14	0,09	–	–	0,14	–
80–85	38,10±0,28	18,30	0,89	–	–	–	0,08	0,11	–	0,09	–
85–90	40,94±0,30	18,42	0,91	0,10	–	–	–	–	–	–	–
90–95	44,42±0,32	17,83	0,93	–	–	0,18	–	–	–	–	–
95–100	47,38±0,32	16,80	0,95	–	–	0,19	–	–	–	–	–

Свой- ство	M±st.err	CV, %	Анализ главных компонент								
			Env 1	Env 2	Env 3	Env 4	Env 5	Env 6	Env 7	Env 8	Env 9
<i>Физические свойства</i>											
W, %	27,21±0,06	5,26	–	0,09	0,30	0,20	–	0,09	0,09	0,79	–
D, г/см <sup>3</sup>	0,94±0,01	8,85	0,13	–	0,52	0,18	–	0,24	0,11	0,24	0,45
ЕС, дСм/м	1,12±0,01	12,13	–	0,11	–	–	0,15	0,22	0,20	–	0,74
Temp, °С	24,75±0,04	4,46	0,39	0,11	–	0,26	0,13	0,21	0,12	0,48	–0,24
<i>Агрегатная структура, доля фракций (диапазон размеров, в мм) в %</i>											
>10	37,51±0,16	10,70	–	0,95	–	–	0,10	–	–	–	–
7–10	12,51±0,10	20,68	–	–	0,16	–	0,27	0,68	–	–	–0,25
5–7	10,72±0,10	23,87	–	0,50	0,15	0,09	0,52	–	0,31	–	0,23
3–5	15,32±0,14	22,93	0,10	0,53	–	0,13	0,55	0,24	0,23	–	–
1–3	19,50±0,18	22,99	0,11	0,17	–	–	0,93	–	–	–	0,10
0,5–1	2,65±0,04	40,52	0,12	0,09	0,37	0,10	–	0,63	–	0,20	–0,14
0,25–0,5	1,38±0,02	29,51	–	0,17	–	–	–	–	0,84	0,09	–0,11
<0,25	0,27±0,01	38,74	–	0,21	–	0,16	0,36	0,60	–	0,27	–0,12
<i>K<sub>st</sub></i>	1,67±0,01	17,81	–	0,96	–	–	–	–	–	–	–

*Примечание:* – представлены статистически достоверные нагрузки главных компонент; Env 1, ..., Env 9 – главные компоненты 1, ..., 9; W – влажность почвы; D – плотность почвы; ЕС – электропроводность почвы; Temp – температура почвенного слоя 3–5 см; *K<sub>st</sub>* – коэффициент структурности.

Статистика *I*-Морана, которая значимо отличается от нулевой альтернативы, указывает на существенную пространственную компоненту варьирования морфометрической компоненты 1. Анализ статистик, основанных на множителях Лагранжа, указывает на то, что лаг-модель пространственной регрессии будет в лучшей степени отражать варьирование этой морфометрической главной компоненты.

Таблица 4. Результаты регрессионного анализа влияния эдафических факторов на многомерные морфо-экологические факторы кукурузы

	F 1			F 2			F 3			F 4			F 5		
	Class	Lag	Error	Class	Lag	Error	Class	Lag	Error	Class	Lag	Error	Class	Lag	Error
W	A	B	-	A	B	-	A	B	-	A	B	-	A	B	-
CONSTANT	0,01	0,90	0,01	0,85	0,00	0,95	-0,03	0,80	0,01	0,81	-0,06	0,65	0,00	1,00	0,00
Env 1	-0,06	0,13	0,01	0,72	-0,10	0,01	-0,04	0,39	0,11	0,00	0,08	0,07	-0,02	0,55	-0,01
Env 2	-0,07	0,06	-0,02	0,61	-0,02	0,57	-0,05	0,25	-0,27	0,00	-0,23	0,00	-0,03	0,39	-0,01
Env 3	-0,04	0,30	-0,03	0,46	0,06	0,11	0,19	0,00	0,04	0,21	0,12	0,00	-0,06	0,15	-0,02
Env 4	0,11	0,00	0,07	0,06	0,07	0,08	0,07	0,08	-0,20	0,00	-0,17	0,00	-0,09	0,02	-0,06
Env 5	-0,17	0,00	-0,13	0,00	-0,05	0,20	-0,05	0,21	-0,19	0,00	-0,19	0,00	0,01	0,82	-0,01
Env 6	-0,09	0,02	-0,05	0,18	0,01	0,86	0,05	0,47	-0,04	0,20	-0,02	0,55	-0,05	0,18	-0,04
Env 7	0,14	0,00	0,10	0,00	-0,06	0,10	-0,15	0,00	0,02	0,60	-0,11	0,00	0,11	0,01	0,06
Env 8	-0,09	0,02	0,00	0,98	-0,10	0,01	-0,13	0,00	-0,17	0,00	-0,14	0,00	0,00	0,95	-0,01
Env 9	-0,02	0,58	0,04	0,27	-0,16	0,00	-0,13	0,00	0,04	0,21	0,07	0,06	-0,11	0,01	-0,04
Lambda	-	-	-	-	-	0,65	0,00	-	-	-	0,76	0,00	-	-	-
AIC	17,45,31	1677,23	1744,52	1715,53	1635,16	1587,88	1775,38	1728,64	1779,83	1700,76					
F-Mорфана	0,11	0,01	-	0,05	0,01	-	0,14	0,01	-	0,12	0,01	-	0,13	0,01	-
Lmlag	173,93	0,00	-	23,07	0,00	-	130,92	0,00	-	117,66	0,00	-	206,61	0,00	-
RLmlag	16,66	0,00	-	3,21	0,07	-	5,99	0,01	-	25,52	0,00	-	0,00	0,96	-
Lmerror	160,71	0,00	-	40,35	0,00	-	165,83	0,00	-	92,95	0,00	-	222,01	0,00	-
RLmerror	3,44	0,06	-	20,50	0,00	-	38,89	0,00	-	0,79	0,37	-	15,41	0,00	-
SARMA	177,37	0,00	-	43,57	0,00	-	168,81	0,00	-	118,45	0,00	-	222,01	0,00	-

Условные обозначения: F1, ..., F5 – факторы кукурузы Env 1, ..., Env 9 – эдафические факторы; Class – классическая модель; Lag – простейшая модель; Error – модель с простейшей ошибкой; CONSTANT – константа; A – регрессионные коэффициенты B – уровни значимости коэффициентов; W – пространственная компонента для лар-модели; Lambda – пространственная компонента для модели с пространственной ошибкой; AIC – информативный критерий Акаике; Lmlag – тест значимости Ларанжа для лар-модели; RLmlag – его робастная форма; Lmerror – тест значимости Ларанжа для модели с простейшей ошибкой; RLmerror – его робастная форма; SARMA – сложный тест значимости Ларанжа, который учитывает ошибки Lmlag+Lmerror

Учет пространственной компонентности непосредственно сказывается на качестве регрессионной модели: показатель AIC снижается от 1745,31 для классической модели до 1677,23 для пространственного варианта регрессии. Важно отметить, что число значимых предикторов в пространственной регрессии меньше, чем в классическом варианте. Иначе говоря, недоучет пространственных взаимодействий приводит к переоценке предсказательных возможностей эдафических показателей. В качестве значимых предикторов в пространственной регрессии выступают главные компоненты 4, 5 и 7.

Аналогичные рассуждения можно продолжить и для прочих морфометрических компонент, но отметим лишь главное. Прежде всего, все морфометрические компоненты, которые описывают ключевые аспекты варьирования размеров и формы кукурузы в пределах изученного участка поля, характеризуются четко обозначенной пространственной компонентой, что указывает на необходимость применения пространственного варианта регрессионного анализа. В количественном отношении пространственная регрессия обладает более высокими предсказательными свойствами, о чем свидетельствует статистика AIC. В качественном отношении варианты классической и пространственной регрессий подобны лишь только в общих чертах. Как правило, число значимых предикторов при пространственном варианте регрессионного анализа уменьшается, а их статистическая значимость – увеличивается. Это позволяет более четко в качественном отношении проследить характер связи между морфометрическими показателями и эдафическими свойствами.

Лаг-вариант пространственной регрессии предпочтителен оказался для морфометрических компонент 1, 4 и 5, а вариант с пространственной ошибкой – для 2 и 3 соответственно. Необходимо отметить, что речь идет об условном преобладании одного из вариантов моделей, тогда как в большинстве случаев смешанный вариант является наиболее адекватным, т.к. статистика SARMA является наибольшей практически для всех морфометрических главных компонент, за исключением компоненты 5, для которой SARMA и Lmetgor равны, что указывает на равнозначность смешанной модели и модели пространственной ошибки.

### **ОБСУЖДЕНИЕ**

Стандартный вариант анализа главных компонент позволил выделить пять основных трендов изменчивости морфологических характеристик кукурузы и густоты стояния этого растения в поле. Эти тренды могут быть содержательно интерпретированы. Интерпретация многомерных главных компонент на первый взгляд несколько тривиальна: это размер растений, форма листьев, толщина стебля, а также изменение высоты растений при различных уровнях густоты стояния. При этом следует обратить внимание на два обстоятельства. Это совокупность показателей, которые формируют связную плеяду признаков, описываемую каждой главной компонентой. А также ортогональность главных компонент, или независимость тех процессов, с которыми главные компоненты идентифицированы при интерпретации. Так,

специфика главной компоненты 1 указывает на то, что размеры растений не зависят от их густоты стояния. Кроме того, длина листа кукурузы отстает в скорости роста от скорости роста длины растения.

В целом, густота стояния характеризуется статистически достоверной нагрузкой на главные компоненты 4 и 5, которые замыкают перечень компонент, собственные числа которых превышают единицу и таким образом могут быть оставлены для анализа. При этом коэффициент вариации густоты стояния составляет 26,37 %, что уступает только показателю удельной площади листовой поверхности (кстати, это расчетный показатель, который также зависит от густоты стояния растений). Таким образом, при достаточно высоком уровне вариабельности густоты стояния, средний уровень этого показателя  $10,26 \pm 0,11$  экз./м<sup>2</sup> не оказывает существенного влияния на такие морфологические признаки кукурузы, как размеры, форма листовой поверхности и ширина стебля. При этом влияние на высоту стебля густоты стояния неоднозначно. Противоположный характер связи густоты стояния и высоты стеблей вскрывают главные компоненты 4 и 5. Такая ситуация может быть результатом эффекта подковы: анализ главных компонент является линейной процедурой, которая не в состоянии описать нелинейные эффекты. И нелинейную связь (колоколообразную, или подобную подкове) этот анализ разбивает не на одну компоненту, а на несколько, в простейшем случае на две, которые соответствуют восходящей и нисходящей ветвям «подковы».

Географически взвешенный анализ главных компонент позволил установить пространственную вариабельность ковариационной структуры, которая описывает взаимосвязь между морфометрическими показателями и густотой стояния кукурузы. Установленный глобальный паттерн взаимосвязи 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. Вариабельность, которая относится к последующим главным компонентам (особенно, если соответствующие собственные числа меньше 1), определяется случайным шумом, либо факторами, которые не могут быть описаны в рамках модели анализа главных компонент. Таким образом, доля дисперсии, которая описывается первыми тремя главными компонентами, указывает на согласованность морфологических структур. Эта согласованность 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. В данном случае под конфигурацией мы понимаем согласованную совокупность морфологических признаков, которая по возможности может быть содержательно

интерпретирована. Можно говорить о преемственности 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.

Выявление пространственных паттернов ковариационных структур ставит задачу понимания природы этой пространственной регулярности. Природа этих паттернов может быть эндогенная либо экзогенная. Под эндогенной природой мы понимаем формирование когерентности морфологических процессов в результате межорганизменных взаимодействий растительных организмов. Под экзогенной природой прежде всего мы понимаем эдафически обусловленные процессы синхронизации морфологических процессов. Отмеченное понимание может быть отображено в терминах пространственной гетерогенности и пространственной зависимости.

Пространственная гетерогенность – это подобие близко расположенных в пространстве наблюдений в силу подобия воздействия стимула, рамки которого превышают размер пределы одного наблюдения, либо в силу дрейфа среднего либо вариационной/ковариационной структуры в пространстве. В этом случае не предполагается наличия взаимодействия между показателями. Пространственная гетерогенность нежелательна для проведения классического варианта регрессионного анализа.

Пространственная зависимость предполагает подобие или различие между близко расположенных точек, что является следствием функциональной связи, которая убывает по мере увеличения расстояния.

В пространственной модели регрессии могут присутствовать такие компоненты, как пространственная ошибка или пространственный лаг. Пространственная ошибка оценивает пространственную компоненту изменчивости в ошибке регрессии, а пространственный лаг подобен прочим независимым предикторам. Пространственная гетерогенность в наибольшей степени может быть отражена с помощью модели пространственной ошибки, а пространственная зависимость – с помощью пространственной лаг-модели (Ward, Gleditsch, 2008).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что смешанная лаг-модель и модель пространственной ошибки является адекватной для отображения пространственной регрессионной зависимости. Морфометрические главные компоненты 1, 4 и 5 являются пространственно зависимыми, 2 и 3 – пространственно-гетерогенными.

## REFERENCES

- Anselin, L., Ibnu, S., Youngihn, Kh. (2006). GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis. *Geographical Analysis*. 38 (1), 5–22.

- Arrouays, D., Saby, 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., Brunson, 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.
- Gollini, I. Lu B., Charlton, M., Brunson, 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., Jehanzeb, 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. *Maydica*. 38, 15–21.
- Lloyd, C.D. (2011). *Local Models for Spatial Analysis*. CRC Press.
- 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.
- Maddoni, 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. [Analiz prostorovykh dannykh v ekologii ta silskomu khoziastvi]. Dnipropetrovsk National University. 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 [Konceptsiya morfometrii' u suchasnij botanici]. *Chornomors'kiy botanichniy zhurnal*. 5(1), 5–22.
- Ward, M. (2008). Spatial Regression Models. Thousand Oaks, CA: Sage publications.

**Поступила в редакцию 10.10.2015**

**Как цитировать:**

Жуков, А.В., Андрусевич, К.В. (2015). Оценка пространственной зависимости морфометрических характеристик кукурузы (*Zea mays* L.) от эдафических свойств. *Acta Biologica Sibirica*, 1 (3-4), 24-41.

**crossref** <http://dx.doi.org/10.14258/abs.v1i1-2.788>

**© Жуков, Андрусевич, 2015**

Users are permitted to copy, use, distribute, transmit, and display the work publicly and to make and distribute derivative works, in any digital medium for any responsible purpose, subject to proper attribution of authorship.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 3.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/)