А. И. Бутенко, профессор, д. с.-х. н.
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ, г. Мичуринск
but_tolik@mail.ru

УДК 581.451:575.21

DOI 10.31676/2073-4948-2018-55-94-100

РАЗЛИЧНЫЕ ПОДХОДЫ К КОЛИЧЕСТВЕННОМУ ОПИСАНИЮ ФОРМЫ ЛИСТОВОЙ ПЛАСТИНКИ РАСТЕНИЙ

Резюме. Основываясь на анализе существующих подходов к количественной оценке биологической формы, предлагается итерационный алгоритм поиска меток в изображении листовой пластинки, который позволяет точно описать форму листа. Исходя из этого метода, вводится расстояние, которое равно нулю для геометрически подобных листовых пластин и увеличивается с увеличением различий в их форме. Проведенный с помощью этого показателя кластерный анализ 11 сортов смородины дает основание полагать, что одна только форма листовой пластинки не может служить надежным классификатором сортов плодовых растений.

Ключевые слова: контур листовой пластинки, метки, геометрическая морфометрия.

Summary. Based on the analysis of existing approaches to the quantitative evaluation of the biological form, an iterative algorithm for finding marks in the leaf blade image is proposed, which allows you to accurately describe the shape of the sheet. Based on this method, a distance is introduced that is zero for geometrically similar sheet plates and increases with increasing differences in their shape. The cluster analysis carried out with the help of this indicator of 11 varieties of currant suggests that the form of the leaf blade alone cannot serve as a reliable classifier of varieties of fruit plants.

Keywords: leaf blade, landmarks, geometric morphometrics.

Введение

Лист – важнейший орган, выполняющий такие жизнеопределяющие функции растения, как фотосинтез, транспирацию и дыхание. Он, с одной стороны, представляет собой объект познания, предмет морфологии растений, с другой – служит удобным и относительно независимым модулем растения, несущем в себе достаточно много полезной информации для самых разнообразных исследований.

В настоящее время селекционеры уделяют большое внимание корреляциям морфологических признаков листа с важными хозяйственно-биологическими признаками. Обычно ограничиваются рассмотрением таких легко измеряемых признаков, как длина и ширина листовой пластинки. Реже используют площадь и периметр пластинки [1-6].

В данной работе автор пытается выяснить в какой степени форма листовой пластинки характеризует сорта плодовых растений.

Основная часть

В определителях сортов форма листовой пластинки является важной характеристикой и подробно описывается с приложением фотографии или рисунка. Обычно это словесное описание, использующее сравнения «округлая», «яйцевидная», «сердцевидная» и др. [7-8]. Словесное описание является лишь качественным и по нему нельзя оценить, в какой степени различаются формы листовых пластинок, хотя и по такому описанию построена экспертная система для автоматической классификации [9]. Для количественного сравнения форм листьев используют различные числовые показатели, являющиеся отношением некоторых степеней периметра (P) и площади (S) листовой пластинки. Так, например, вводится показатель «сложности листа»

$$K = \frac{P^2}{4\pi S},$$

отражающий степень отличия формы листа от формы круга [10]; или «коэффициент формы»

$$K = \frac{P^{1/D}}{S^{1/2}}$$

(D – фрактальная размерность, определяемая экспериментально) [11].

Такие показатели, конечно, зависят от формы, но они не определяют ее. Нельзя утверждать, что у листьев, различающихся по форме, всегда будут разные по величине показатели.

Достаточно строгое осмысление понятий размера и формы дано Мосимманом [12]. Подход Мосиммана состоит в том, чтобы рассматривать каждый выборочный вектор x как пару переменных: 1) «вектор формы» $Z(x)$ – это переменная, которая представляет положительно направленный луч от начала координат, на котором лежит x ; 2) «размер» $G(x)$ – скалярная величина, которая показывает, как далеко от начала координат находится x на этом положительно направленном луче.

Мосимман показал, что форма однозначно связана с вектором формы, т. е. два индивида имеют одну и ту же форму относительно вектора x , если каждый вектор формы первого индивида равен соответствующему вектору формы второго индивида.

В настоящее время активно развивается новый подход к сравнению форм – геометрическая морфометрия [13]. Она является математическим развитием идеи трансформации координатных сеток Д'Арси Томпсона (1942) [14] и основана на многомерном анализе координат меток, расставляемых в соответствии с определенными правилами на поверхности морфологического объекта.

Задача геометрической морфометрии состоит в установлении различий между морфологическими объектами по форме как таковой, исключая

размер. В данном случае форма понимается как некое математическое представление конфигурации (геометрии) реального морфологического объекта, инвариантное относительно его размеров, ориентации и положения в физическом пространстве [13].

Размеры всех сравниваемых объектов приводятся к единице и производится выравнивание с эталонной конфигурацией. После приведения структур к общему знаменателю (когда устранены различия в положении, поворотах и размерах) между ними сохраняются некоторые различия, так что при наложении одной формы на другую возникает некоторый разброс вокруг меток эталонной конфигурации. Сумма квадратов разностей между координатами меток эталона и данной формы дает прокрустово расстояние и служит общей оценкой различий между формами.

Разработанные компьютерные программы позволяют визуально показать, какую деформацию координатной сетки нужно произвести, чтобы совместить метки двух сравниваемых объектов.

Отбрасывание размерного фактора в геометрической морфометрии, на наш взгляд, приводит к излишнему математическому усложнению. Вектор формы в подходе Мосиммана, как было описано ранее, представляет собой положительно направленный луч, выходящий из начала координат, а размер показывает, как далеко от начала координат находится конкретная форма на этом положительно направленном луче. Если привести все формы к одному размеру, то для каждой из сравниваемых форм луч закончится на поверхности некоторой сферы в многомерном пространстве (гиперсферы). Близость каких-то точек на такой гиперсфере будет соответствовать близости описываемых этими точками форм. В зависимости от введенной метрики получают разные пространства (кендалловы, прокрустовы), но они не являются линейными. Чтобы использовать методы многомерного статистического анализа, приходится проектировать соответствующие сравниваемым формам точки в некое линейное пространство (тангенциальное). При этом метод может привести к искажению объективной картины из-за деформации расстояний между точками. Органическая форма образуется в процессе роста, поэтому его отбрасывание приводит к неполному описанию. Например, часто мелкие листья на одном растении и даже на одной ветке значительно отличаются по форме от более крупных листьев.

Для «плоских» объектов, каковыми являются листья, становится доступной автоматизированное получение координат граничных точек. Например, в результате цифровой обработки полученного после сканирования изображения листа можно получить координаты точек контура листа [15]. Затем эти координаты можно сохранять и обрабатывать различными методами.

В методе эллиптических коэффициентов Фурье используется разложение в ряд Фурье координат точек контура:

$$\begin{aligned}x &= \frac{a_{x0}}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_{xk} \cos k\varphi + b_{xk} \sin k\varphi), \\y &= \frac{a_{y0}}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_{yk} \cos k\varphi + b_{yk} \sin k\varphi).\end{aligned}\tag{1}$$

В разложении (1) угол φ задает положение радиус-вектора точки с координатами x и y . Если ограничиться членами с k , равными 0 и 1, то получим эллипс, который является самым близким приближением к контуру объекта. При любом числе членов разложение (1) представляет замкнутую кривую, тем более точно аппроксимирующую контур объекта, чем больше взято членов разложения. Ограничиваясь определенным количеством n членов, получаем вектор коэффициентов размера $4n + 2$, который описывает форму каждого из сравниваемых объектов.

Подробное изложение метода эллиптических коэффициентов содержится в работах [16-17].

Метод эллиптических коэффициентов обладает одним важным свойством. С его помощью можно производить такие действия, как сложение контуров разных объектов, получение «среднего контура». Для этого достаточно произвести такие действия над векторами разложений у разных объектов и по полученным результирующим векторам восстановить изображение. К недостаткам этого подхода можно отнести большое количество членов разложения (несколько сотен), необходимых для точного описания конкретного листа и невозможность связать с коэффициентами разложения координаты каких-то конкретных меток на контуре, так как коэффициенты рассчитывают по всей совокупности граничных точек.

В работе [18] нами предложен итерационный алгоритм для автоматического определения меток на контуре листовой пластинки. На каждом шаге итерации между всякими двумя метками A и B в качестве новой метки выбирается точка контура C , которая наиболее удалена от прямой AB . Первоначальными метками являются основание и кончик листовой пластинки. Соединяя метки отрезками прямых, получаем замкнутый многоугольник. Его точки все плотнее заполняют контур с каждым шагом итерации. Для листьев смородины оказалось достаточным десяти итераций для визуального полного совмещения многоугольника с контуром. Контуров разных листьев можно складывать, находить «средние контуры». Для сравнения форм предлагается расстояние, приспособленное для данного подхода. У двух подобных треугольников со сторонами a_1, b_1, c_1 и a_2, b_2, c_2 соответственно отношения $d_1 = a_1/a_2, d_2 = b_1/b_2, d_3 = c_1/c_2$ будут одинаковыми. При итерационном методе по каждому двум меткам получаем третью метку между ними, т. е. получаем последовательность треугольников. При сравнении двух листьев получаем последовательность отношений сторон треугольников $d_1, d_2, \dots$

d_n . У двух подобных контуров листовых пластинок эта последовательность будет состоять из одинаковых чисел. Поэтому чем меньше будет дисперсия (выборочная) этой совокупности, тем ближе по форме будут листья. Однако у этого показателя есть один недостаток. Отношения сторон треугольников второго листа к первому дадут последовательность обратных величин $1/d_1$, $1/d_2$, ... $1/d_n$. Их дисперсия не будет равна первой дисперсии прямых величин, т. е. не соблюдается симметрия расстояния. Если взять логарифмы величин d_i , то логарифмы обратных величин $1/d_i$ будут отличаться только знаком, а дисперсии прямых и обратных величин будут равными. Выбирая такое расстояние, вычислили матрицу парных расстояний между всеми контурами 11 сортов смородины черной. По каждому сорту были просканированы около 20 листьев, выбранных случайным образом из разных частей 2-3 кустов. По полученной матрице провели иерархическую классификацию в пакете Statistica и получили 7 кластеров (табл.).

Таблица.

Распределение листьев сортов смородины черной по кластерам

Сорт	Кластеры							Сумма
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	
Багира	8	9			3			20
Белорусская		3	14	5				22
Бредторп		7			8	5		20
Бычковская		6	8				8	22
Зеленая дымка	2	4	7			1		14
Июньское Кондрашевой	1	7	5	1		2		16
Минай Шмырева		6		4		3	2	15
Память Мичурина	2	2			7	2		13
Рясная		15	10			3		28
Светлолистная	1	3	1		10	7		22
Сеянец голубки		1	4			2		7
Итого	14	63	49	10	28	25	10	199

Из представленного в таблице распределения листьев по кластерам видно, что полученные кластеры не совпадают с сортами. Сорта получились «размазанными» по разным кластерам.

Обсуждение и выводы

При определении сортов рекомендуется использовать листья, сформированные в середине типичных однолетних побегов. Растения должны быть одного возраста и выращены в одинаковых условиях [19]. Последнее

условие нами соблюдалось: все изучаемые растения были одного возраста и произрастали на одном участке. А вот первое условие не соблюдалось: листья выбирались случайным образом из разных частей разновозрастных побегов, расположенных в разных сторонах куста. При таком выборе изменчивость листьев значительно возросла, и не с одним из сортов нельзя было связать какую-либо одну доминирующую форму. Оказалось, что сорта различаются частотами встречаемости некоторого набора форм. Таким образом, даже подробное описание формы контура листа не дает надежной идентификации сортов.

Считаем, что использование автоматизированных методов сбора информации и совершенствование методов обработки позволит понять законы формообразования и найти надежные способы классификации органических форм.

Список использованной литературы

1. **Исачкин А. В.** Анализ комплекса признаков как основа повышения эффективности селекции косточковых плодовых культур: Автореф. дисс. ... д. с.-х. наук. – М., 1997. – 40 с.
2. **Аникьева Э. Н., Жидёхина Т. В., Федоряка Н. И.** Анализ формы и оценка площади листовых пластин ирги канадской // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета, 2006. – № 2. – С. 37-46.
3. **Щеглов С. Н.** Изменчивость и методы ее изучения в селекции ягодных культур: Автореф. дисс. ... д. б. наук. – Краснодар, 2006. – 44 с.
4. **Киселёва Н. С.** Применение статистических методов для изучения структуры изменчивости морфологических признаков листовой пластинки различных генотипов груши // Современное садоводство, 2010. – № 1. – С. 82-85.
5. **Киселёва Н. С.** Изучение морфо-анатомических особенностей листа различных генотипов груши для отбора на плоидность по коррелятивным признакам // Плодоводство и ягодоводство России, 2012. – Т. 31. – Ч. 1. – С. 265-273.
6. **Журавлева А. В., Сологалов П. В.** Корреляция морфологических и хозяйственно ценных признаков сортов яблони полукультурной // Достижения науки и техники АПК, 2011. – № 2. – С. 30-31.
7. **Федоров А. А., Кирпичников М. Э., Артюшенко З. Т.** Атлас по описательной морфологии высших растений. Лист. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1956. – 303 с.
8. **Семакин В. П., Седов Е. Н., Красова Н. Г., Малыченко В. В., Наумова Л. С., Кандарова Е. Ф., Скривеле М. П.** Определитель сортов яблони европейской части СССР. – М.: Агропромиздат, 1991. – 320 с.
9. **Суботэ А. Е.** О методе автоматизированной классификации листьев высших растений (на примере ископаемых буковых) // Вестник ДВО РАН, 2004. – № 3. – С. 174-177.
10. **Исаков В. Н., Кулитис М. А., Лейшовник Я. Я.** Методика аналитического описания формы листьев древесных растений // Биометрический анализ в биологии. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – С. 38-51.

11. Аникьев А. А., Федоряка Н. И., Аникьева Э. Н. Способ количественной оценки формы листа как уникального сортового признака и его вариабельности у растений земляники // Сельскохозяйственная биология, 2008. – № 1. – С. 116-122.
12. Mosimann J. E. Size allometry: size and shape variables with characterizations of lognormal and generalized gamma distributions // J. of the Amer. Stat. Assoc., 1970. – V. 65. – P. 930-945.
13. Павлинов И. Я., Микешина Н. Г. Принципы и методы геометрической морфометрии // Журнал общей биологии, 2002. – Т. 63. – №6. – С. 473-493.
14. Thompson d'Arcy W. On growth and form. Cambridge: Univ. Press, 1942. – 1116 p.
15. Бутенко А. И. Компьютерная программа для расчета основных морфологических параметров листа высших растений // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета, 2010. – № 2. – С. 63-64.
16. Bookstein F. L., Strauss R. E., Humphries J. M., Chernoff B., Elder R. L., Smith G. R. A comment upon the uses of Fourier methods in systematics // Syst. Zool., 1982. – V.31. – P. 85-92.
17. Mancuso S. Elliptic Fourier Analysis (EFA) and Artificial Neural Networks (ANNs) for the identification of grapevine (*Vitis vinifera* L.) genotypes // Vitis, 1999. – V. 38. – № 2. – P. 73-77.
18. Бутенко А. И. Итерационный метод количественной оценки различия формы листовых пластинок растений // Сборник научных трудов, посвященный 85-летию Мичуринского государственного аграрного университета / Под редакцией В. А. Бабушкина. – Мичуринск, 2016. – С. 288-292.
19. Огольцова Т. П., Баянова Л. В., Володина Е. В., Князев С. Д. Определитель сортов смородины: Справочник. – Орел: Издательство ВНИИСПК, 2000. – 408 с.

A. I. Butenko

Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russia

DIFFERENT APPROACHES TO THE QUANTITATIVE DESCRIPTION OF THE SHAPE OF THE LEAF BLADE OF PLANTS