

Методический подход к оценке изменчивости признаков продуктивности и качества ягод в генетических коллекциях земляники садовой (*Fragaria × ananassa* Duch.)

В.И. Лапшин¹, В.В. Яковенко¹, С.Н. Щеглов², В.Н. Подорожный³

¹ Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, Краснодар, Россия

² Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

³ Крымская опытно-селекционная станция – филиал Федерального исследовательского центра Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), Крымск, Россия

✉ e-mail: kubansad@kubannet.ru

Для земляники садовой *Fragaria × ananassa* Duch. ($2n = 8x = 56$) – ведущей ягодной культуры в мире – актуально изучение взаимодействия генотип–среда. Сложный геномный состав, разнообразие систем генетического контроля, а также сильное модифицирующее влияние условий выращивания на проявление количественных признаков обуславливают необходимость совершенствования методов анализа генотипической изменчивости хозяйственно ценных признаков, направленных на установление генотипов, характеризующихся стабильностью и адаптивными качествами в широком экологическом диапазоне условий выращивания. В 2016–2018 гг. было изучено 27 сортов земляники садовой в коллекциях Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия и Крымской опытно-селекционной станции – филиала ВИР. Полевые опыты и учеты поставлены и проведены по единой схеме. Изучали следующие признаки: число цветоносов (шт./куст), число ягод (шт./куст), средняя масса ягоды и ягоды первого порядка (г), общий и товарный урожай (г/куст), плотность мякоти ягоды (г), содержание сахаров в ягодах по шкале Брикса ($^{\circ}\text{Bx}$), сахарокислотный индекс. Цель настоящей работы – разработка методического подхода к оценке вклада взаимодействия генотип–среда в изменчивость признаков продуктивности и качества ягод земляники и определение сортов земляники со стабильным генотипом. Для решения поставленной задачи использованы математические модели двух- и трехфакторного дисперсионного и кластерного анализов по методу Уорда. По результатам проведенной работы установлено, что сорта земляники, выращенные в разных климатических условиях, показывают различия в структуре изменчивости признаков продуктивности и качества ягод. Для условий г. Крымска преобладающим оказалось влияние генотипа сорта, а для условий г. Краснодара, кроме влияния генотипа сорта, существенной является и средовая компонента в виде взаимодействия генотип–среда. Статистически достоверное влияние зоны выращивания установлено для признаков продуктивности и качества ягод, за исключением средней массы ягоды. При этом различия средних значений признаков у сортов могут быть как существенными, так и частично или полностью отсутствовать. Для определения перспективных сортов при выращивании в изучаемых зонах рекомендуется использовать кластерный анализ по информативному комплексу признаков с вычислением евклидовых расстояний для сортов, выращенных в разных условиях. Величина евклидова расстояния будет мерой влияния конкретной среды на генотип растений. Чем меньше значение евклидова расстояния у сорта, согласно комплексу изученных признаков, тем большей стабильностью характеризуется этот сорт. Ключевые слова: земляника; генотип; среда; сорта; изменчивость; стабильность; признаки; статистические методы; кластерный анализ; евклидово расстояние.

Для цитирования: Лапшин В.И., Яковенко В.В., Щеглов С.Н., Подорожный В.Н. Методический подход к оценке изменчивости признаков продуктивности и качества ягод в генетических коллекциях земляники садовой (*Fragaria × ananassa* Duch.). Вавиловский журнал генетики и селекции. 2019;23(6):675-682. DOI 10.18699/VJ19.540

A methodical approach for evaluating the variability of productivity and fruit quality in the genetic collections of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.)

V.I. Lapshin¹, V.V. Yakovenko¹, S.N. Shcheglov², V.N. Podorojny³

¹ North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Winemaking, Krasnodar, Russia

² Kuban State University, Krasnodar, Russia

³ Krymsk Experiment Breeding Station – Branch of Federal Research Center the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), Krymsk, Russia

✉ e-mail: kubansad@kubannet.ru

For strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch., $2n = 8x = 56$), which is the leading berry crop in the world, research into the genotype × environment interaction is important. A complicated genomic composition, the diversity of genetic control systems, and a strong modifying effect of growing conditions on the implementation of quantitative traits make it necessary to improve methods for analysis of the genotypic variability of economically valuable traits with the aim of identifying

genotypes that are characterized by stability and adaptive qualities in a wide ecological range of growing conditions. In 2016–2018, twenty-seven strawberry varieties were studied in the collections of North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture and Krymsk Experiment Breeding Station, VIR Branch. Field experiments and data counts were set and carried out according to a single scheme. The following characteristics were studied: the number of inflorescences (units per plant), the number of berries (units per plant), the average weight of berry and berry of the first order (g), total and marketable yield (g per plant), firmness of fruit (g), sugar content in berries on Degrees Brix (°Bx), sugar-acid index. The purpose of this work was the development of a methodical approach to assessing the contribution of the genotype–environment interaction to the variability of the traits of productivity and fruit quality and the determination of strawberry varieties with a stable genotype. To this end, the mathematical models of two- and three-factor analysis of variance and cluster analysis using Ward's method were employed. According to the results of this work, strawberry varieties grown in different climatic conditions show differences in the structure of the variability of the traits of productivity and fruit quality. For the conditions of the city of Krymsk, the influence of the genotype of the variety was predominant, and for the conditions of the city of Krasnodar, in addition to the influence of the genotype of the variety, the environmental component in the form of the genotype–environment interaction is also significant. A statistically significant influence of the growing zone has been established for the traits of productivity and fruit quality, with the exception of the average weight of fruit. At the same time, differences in the mean values of the traits of varieties can be both significant and partially or completely absent. To identify varieties with promise for cultivation in the areas studied, it is recommended to use cluster analysis on the informative complex of traits with the calculation of the Euclidean distances for varieties that were grown under different conditions. The magnitude of the Euclidean distance will be the measure of the influence of a particular environment on the genotype of plants. The smaller the value of the Euclidean distance in a variety, according to the complex of the traits studied, the more stable this variety is.

Key words: strawberry; genotype; environment; varieties; variability; stability; traits; statistical methods; cluster analysis; euclidian distance.

For citation: Lapshin V.I., Yakovenko V.V., Shcheglov S.N., Podorojny V.N. A methodical approach for evaluating the variability of productivity and fruit quality in the genetic collections of strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.). Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2019;23(6):675-682. DOI 10.18699/VJ19.540 (in Russian)

Введение

Земляника садовая *Fragaria* × *ananassa* Duch. – ведущая ягодная культура в мире. Количество ее сортов, по разным источникам, составляет от 3 тыс. (Зубов, 2004) до 20 тыс. (Копылов, 2007). По данным Global Conservation Strategy for *Fragaria* (Strawberry) (2008), мировая коллекция земляники насчитывает примерно 15 тыс. образцов, из которых около 12 тыс. – сорта и 3 тыс. – элитные гибриды. В ряде работ исследователей этой культуры (Lopez-Medina et al., 2001; Киртбая, Щеглов, 2003; Матала, 2003; Копылов, 2007; Fontana et al., 2016) отмечено, что для земляники садовой важным критерием ее успешного возделывания является правильный подбор сортов, адаптированных к местным условиям возделывания и системам выращивания. Взаимодействие генотип–среда часто затрудняет определение лучших генотипов в различных условиях выращивания.

Земляника садовая – сложная в изучении культура, что объясняется ее сложным геномным составом, полигенным характером наследования признаков, а также сильным модифицирующим влиянием условий выращивания на проявление количественных признаков. Характер развития растений, выражаемый нормой реакции генотипа на климатические и почвенные условия, различен и изменяется в зависимости от сорта. Поэтому работы по изучению нормы реакции сортов земляники в различных эколого-географических условиях актуальны и в настоящее время (Siczko et al., 2015; Mathey et al., 2017; Gabriel et al., 2018; Singh et al., 2018).

Считается, что если сорт обеспечивает высокую стабильную продуктивность в одном регионе, то он обладает специфической адаптацией. Если же сорт показывает хорошую продуктивность в нескольких различающихся по условиям регионах, имеет большой ареал выращивания,

то у него общая адаптация. Сорта такого типа, как правило, слабо реагируют на изменения окружающей среды и сохраняют основные сортовые признаки, стабильный урожай с типичным качеством плодов, несмотря на ухудшение условий выращивания (Фадеева, 1975).

Современное ягодоводство предъявляет повышенные требования к адаптивности сортов для получения стабильных урожаев. R.W. Allard и A.D. Bradshaw (1964) предложили два пути учета стабильности сортов: индивидуальную буферность – сорт представлен генотипами, каждый из которых приспособлен к ряду сред, и популяционную буферность – каждая особь в сорте приспособлена к определенной среде. В генетически гомогенной популяции земляники садовой (вегетативное потомство одной отборной гибридной формы F₁) преобладает популяционная буферность. Проявление взаимодействия генотип–среда, по мнению этих авторов, значительно осложняет селекцию на адаптивность к непредсказуемым изменениям внешних условий и отбор наиболее перспективных сортов для возделывания в производстве.

Традиционная методология определения ценных генотипов растений строится на трех основных подходах, предусматривающих распознавание генотипов сортов по фенотипу, гибридологический анализ, а также методы молекулярно-генетического анализа специфических полинуклеотидных последовательностей. Однако ни один из указанных подходов не отличается в должной степени сочетанием необходимой адекватности и чувствительности для корректного описания изменчивости исследуемой культуры и установления вкладов генетических эффектов в реализацию изучаемых признаков.

Для определения лучших генотипов земляники в различных условиях выращивания предложено несколько генетико-статистических моделей. По мнению R.W. Zobel

с коллегами (1988), М.М. Nachit с коллегами (1992) и Р. Annicchiarico (1997), взаимодействие генотип–среда можно исследовать с разных сторон, но так как индивидуальные реакции сортов находят свое отражение в изменчивости комплекса признаков, то для изучения указанного взаимодействия более предпочтительны многомерные статистические методы, а не одномерные регрессионные модели. Другая модель была предложена Н.Г. Gauch (1988), Н.Г. Gauch и R. W. Zobel (1988) и предусматривала анализ взаимодействия генотип–среда методом главных компонент.

В настоящее время ни один из перечисленных методических подходов в полной мере не является корректным отражением генетической структуры изменчивости земляники в рамках взаимодействия генотип–среда, поскольку не существует общепринятой стандартной модели, учитывающей весь комплекс аспектов анализа в многофакторных экспериментах с более чем одним фактором. Разработка новых методических подходов к оценке взаимодействия генотип–среда – логическое продолжение имеющихся работ по культуре земляники, выполненных с применением методов многомерной статистики. Целью нашей работы было создание методического подхода к оценке вклада взаимодействия генотип–среда в изменчивость признаков продуктивности и качества ягод земляники и определение сортов земляники со стабильным генотипом.

Материалы и методы

В работе использованы данные, полученные в 2016–2018 гг. на экспериментальной базе Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия (СКФНЦСВВ) – ЗАО Опытно-производственным хозяйстве «Центральное», расположенном в Прикубанской зоне Краснодарского края (окрестности г. Краснодара), и на участке сортоизучения – Крымской опытно-селекционной станции – филиале ВИР (КОСС ВИР), в предгорной зоне Краснодарского края (окрестности г. Крымска).

Краснодар находится в южной части Восточно-Европейской равнины на Прикубанской низменности, практически в центре Краснодарского края, в южной части Прикубанской равнины. Рельеф Краснодара спокойный, ровный, имеет ровный уклон к северо-западу. Высота над уровнем моря колеблется от 19 до 32 м. Краснодар расположен на южной границе умеренных широт и имеет мягкий континентальный климат. Очень редко наблюдаются вторжения арктического воздуха. Для лета характерно вторжение тропического воздуха. Средняя температура воздуха в июле достигает +25.8 °С. Так как Краснодар, находящийся на границе между теплыми морями и холодным континентом, открыт для вторжения различных (и теплых, и холодных) воздушных масс, то для него характерны резкие погодные изменения, особенно температуры воздуха.

Крымск расположен на берегу р. Адагум в предгорьях северо-западной части Главного Кавказского хребта, в 102 км к юго-западу от Краснодара и 53 км к северо-востоку от Новороссийска. Климат в Крымске умеренно континентальный влажный. Средняя температура воздуха в июле составляет +30 °С. Несмотря на то что средние

температуры зимних месяцев в городе положительные, зимой при прохождении холодных атмосферных фронтов нередко температура может опускаться ниже –20 °С.

Объектом исследования стали 27 сортов земляники садовой различного эколого-географического происхождения из коллекции СКФНЦСВВ: Альба, Клери, Сирия, Нелли, Белруби, Азия, Алина, Вима Кимберли, Элегия, Галлия, Роксана, Хоней, Онда, Ирма, Вима Гарда, Гарда Викола, Мармолада, Эльсанта, Елизавета II, Флоренс, Джени, Вима Ксима, Богота, Таира, Кемия, Моллинг Пандора, Вима Занта и 24 сорта коллекции КОСС ВИР: Альба, Клери, Алина, Хоней, Роксана, Дарселект, Камароза, Азия, Нелли, Онда, Майя, Эльсанта, Моллинг Пандора, Флоренс, Сирия, Зенга Зенгана, Аромас, Ирма, Эвью-2, Сискейп, Луиза, Пелагея, Тельма, Елизавета II. Полевые опыты в двух зонах были поставлены по единой схеме. При выращивании сортов в коллекциях применяли 2-строчную посадку растений, схему размещения 130 + 35 × 30 см, одну линию капельного орошения с фертигацией, в качестве мульчи использовали солому.

Изучали следующие признаки: число цветоносов (шт./куст), число ягод (шт./куст), средняя масса ягоды и ягоды первого порядка (г), общий и товарный урожай (г/куст), плотность мякоти ягоды (г), содержание сахаров в ягодах по шкале Брикса (°Bx), сахарокислотный индекс.

Лабораторные исследования осуществляли с использованием лабораторного оборудования: электронные весы Acom JW-1C, рефрактометр ATAGO Pocket Refractometer PAL-α, пенетрометр FT 011 (наконечник Ø 0.50 см²).

Количественная оценка влияния генотипа сорта, условий года выращивания и их совместного действия на изученные признаки в наших исследованиях выполнена с помощью дисперсионного анализа. Влияние среды выращивания на реализацию хозяйственно-биологических признаков генотипов земляники предусматривает воздействие нескольких факторов, в связи с чем в рамках взаимодействия генотип–среда изучали эффекты сорт × год, а также сорт × год × зона выращивания. Наблюдения и учеты проводили по общепринятой в Российской Федерации Программе и методике сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур (1999). Для математической обработки полученных данных использовали ряд специализированных пособий (Мандель, 1988; Лакин, 1990), а также программный пакет Statistica 10.

Результаты

Достижение поставленной цели первоначально предусматривало оценку уровня межсортовой изменчивости в каждом районе возделывания отдельно, с учетом условий года выращивания.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа по факторам «сорт», «год» и взаимодействию сорт–год в условиях опытного участка в окрестностях Краснодара за 2016–2018 гг. показали достоверные различия между изученными сортами по всем признакам для 5 % уровня значимости. По фактору «сорт» полученные значения F составили 8.10–38.30 при стандартном значении критерия Фишера $F_{ст.}$ 1.49; по фактору «год» – 6.90–156.50 при стандартном $F_{ст.}$ – 2.99; по взаимодействию сорт–год – 1.40–10.50 при стандартном $F_{ст.}$ – 1.35.

Таблица 1. Влияние факторов «сорт» и «год» на признаки сортов земляники

Признак	Доля влияния, %		
	Сорт	Год	Взаимодействие сорт–год
ЗАО ОПХ «Центральное», СКФНЦСВВ, Краснодар			
Количество цветоносов	18.6	13.3	21.5
Количество цветков	31.5	20.4	12.9
Количество ягод	27.6	6.6	21.1
Средняя масса ягоды	31.6	10.8	27.9
Урожай с куста	20.5	9.3	23.5
Плотность мякоти ягоды	35.3	10.3	26.0
Содержание сахаров в ягодах	46.9	1.1	2.3
Сахарокислотный индекс ягоды	14.8	8.4	14.4
КОСС ВИР, Крымск			
Количество ягод	93.7	1.5	1.1
Средняя масса ягоды	95.0	1.5	1.4
Средняя масса ягоды первого порядка	96.6	1.0	0.3
Общий урожай	85.3	6.7	3.7
Товарный (коммерческий) урожай	88.8	4.3	1.7
Плотность мякоти ягоды	72.1	2.3	0.0
Сахарокислотный индекс ягод	46.3	3.1	0.0

В условиях опытного участка в окрестностях Крымска за 2016–2017 гг. между изученными сортами, согласно обоим факторам, при 5 % уровне значимости установлены достоверные различия по всем учтенным признакам. По взаимодействию сорт–год для плотности мякоти ягод и сахарокислотного индекса в ягодах достоверных различий между сортами не установлено. По фактору «сорт» получены значения $F_{10.10-458.40}$ при стандартном $F_{ст. 1/57}$; по фактору «год» – $8.20-130.20$ при стандартном $F_{ст. 3.89}$. По взаимодействию сорт–год значения F для всех признаков, кроме плотности мякоти ягод и сахарокислотного индекса в ягодах, были $1.70-4.30$ при стандартном $F_{ст. 1.57}$. Вычисленные в ходе дисперсионного анализа доли влияния факторов приведены в табл. 1.

Дисперсионный анализ сортов земляники, выращенных в условиях опытного участка СКФНЦСВВ (окрестности Краснодара), позволил установить, что влияние генотипа сорта всегда выше, чем влияние условий года выращивания. Генотип сорта оказывает максимальное влияние на содержание сахара в ягодах и минимальное – на сахарокислотный индекс ягод; влияние условий года выращивания оказывается максимальным для количества цветоносов и минимальным для содержания сахара в ягодах; максимальное одновременное влияние двух факторов определено для количества цветков. Установлено, что совместное влияние на признаки генотипа сорта и условий года выращивания иногда бывает больше, чем у отдельных факторов. Это дает возможность использовать

анализируемый материал для оценки взаимодействия генотип–среда.

Результаты дисперсионного анализа сортов земляники, выращенных на опытном участке ВИР (окрестности Крымска), указывают на решающий вклад генотипа сорта в общую изменчивость по всем признакам, значительно превышающий, в отличие от данных по Краснодару, суммарный вклад фактора «год» и взаимодействия сорт–год.

Реализация признаков продуктивности и качества ягод растений земляники, выражаемая нормой реакции генотипа на климатические и почвенные условия, различна и изменяется в зависимости от сорта. Поэтому изучение нормы реакции в различных эколого-географических условиях представляется следующим этапом в установлении генотипически обусловленной стабильности и адаптивных свойств сортов земляники.

Взаимодействие генотип–среда определялось изменчивостью комплекса хозяйственно-биологических признаков по изученным факторам для исследуемых объектов. Анализ данных по признакам и годам, совпадающим в изучаемых выборках, полученных на опытных участках в окрестностях Краснодара и Крымска, выполнен с помощью трехфакторного дисперсионного анализа, учитывающего влияние генотипа сорта, климатической зоны, условий года выращивания и их совместного действия (табл. 2).

Данные табл. 2 демонстрируют, что вклад генотипа сорта максимально проявляется по средней массе и плотности мякоти ягоды (доля влияния фактора 29.0 и 26.3 % соответственно). В то же время для изученных сортов влияние климатической зоны выращивания на среднюю массу ягоды не обнаружено. Общий урожай не зависит от года выращивания и взаимодействия сорт–год–зона выращивания. Наибольшее влияние на него оказывают факторы генотипа сорта, зоны выращивания и их взаимодействие. Сахарокислотный индекс ягод также не зависит от эффекта взаимодействия трех факторов.

Полученные результаты согласуются с данными исследований К. W. Finlay и G. N. Wilkinson (1963), установивших, что сорта, специфически приспособленные к определенной среде, имеют много общих морфологических и физиологических признаков.

Так как влияние года выращивания на сорта земляники оказалось невелико, а на общий урожай – вообще отсутствовало, представлялось возможным получить среднегодовые значения признаков и использовать их в дальнейшем анализе для определения наиболее стабильных генотипов по двум зонам выращивания. Выделено 14 сортов, у которых есть совпадение по признакам, измеренным в условиях опытных участков в окрестностях обоих городов. Сравнение средних значений этих признаков с помощью t -критерия Стьюдента для определения реакции сортов на условия климатической зоны приведено в табл. 3.

Различия средних значений признаков у сортов, выращенных в разных климатических зонах, могут быть весьма существенными или частично либо полностью отсутствовать, например, как у сорта Альба. Такая ситуация существенно осложняет анализ изменчивости признаков продуктивности и качества ягод. Для решения возникше-

Таблица 2. Результаты дисперсионного анализа сортов земляники по изученным признакам на опытных участках в окрестностях Краснодара и Крымска

Изменчивость	df	Количество ягод				Средняя масса ягоды			
		mS	F	σ^2	Доля влияния, %	mS	F	σ^2	Доля влияния, %
Между сортами	13	2359.00	10.9**	71.43	11.6	142.12	31.5**	4.59	29.0
Между зонами	1	17556.00	81.4**	82.57	13.4	9.96	2.2	0.00	0.0
Между годами	1	2520.00	11.6**	10.97	1.8	98.57	21.9**	0.45	2.8
Сорт × зона	13	1387.00	6.4**	78.07	12.7	52.90	11.7**	3.23	20.4
Сорт × год	13	752.00	3.5**	35.73	5.8	16.11	3.6**	0.77	4.9
Зона × год	1	5974.00	27.7**	54.84	8.9	48.98	10.9**	0.42	2.7
Сорт × год × зона	13	711.00	3.3**	66.00	10.7	18.38	4.1**	1.85	11.7
Остаточная	364	216.00	–	216.00	35.1	4.50	–	4.50	28.5
Изменчивость	df	Общий урожай				Плотность мякоти ягоды			
		mS	F	σ^2	Доля влияния, %	mS	F	σ^2	Доля влияния, %
Между сортами	13	434030.00	7.6**	12569.57	11.6	93287.00	37.4**	3026.50	26.3
Между зонами	1	3164835.00	55.6**	14799.49	13.7	286524.00	114.9**	1352.53	11.8
Между годами	1	17798.00	0.31	0.00	0.0	111846.00	44.9**	520.73	4.5
Сорт × зона	13	297261.00	5.2**	16021.20	14.8	21585.00	8.7**	1272.87	11.1
Сорт × год	13	124834.00	2.3**	4526.07	4.2	15913.00	6.4**	894.73	7.8
Зона × год	1	396694.00	7.0**	3235.72	3.0	41738.00	16.7**	373.77	3.3
Сорт × год × зона	13	98839.00	1.7	0.00	0.0	14206.00	5.7**	1561.87	13.6
Остаточная	364	56943.00	–	56943.00	52.7	2492.0	–	2492.00	21.7
Изменчивость	df	Сахарокислотный индекс ягод							
		mS	F	σ^2	Доля влияния, %				
Между сортами	13	20.01	8.2**	0.59	9.6				
Между зонами	1	250.48	102.0**	1.18	19.3				
Между годами	1	168.35	68.6**	0.79	12.9				
Сорт × зона	13	9.13	3.7**	0.44	7.3				
Сорт × год	13	1.75	0.7	0.00	0.0				
Зона × год	1	72.76	29.6**	0.67	10.9				
Сорт × год × зона	13	3.21	1.3	0.00	0.0				
Остаточная	364	2.45	–	2.46	40.1				

Примечание. df – число степеней свободы; mS – средний квадрат; F – критерий Фишера; σ^2 – дисперсия; ** 1 % уровень значимости по критерию Фишера.

го затруднения применен многомерный статистический метод – кластерный анализ, адекватный решаемой задаче.

Полученные среднегодовые значения пяти признаков – количества ягод, средней массы ягоды, общего урожая, плотности мякоти ягоды, сахарокислотного индекса ягод – составили информативный комплекс признаков для каждого из сортов, учтенных в разных городах, проанализированный при помощи кластерного анализа по методу Уорда (рисунок). Это метод кластеризации предусматривает группировку объектов по критерию максимума межгрупповой и минимума внутригрупповой дисперсии. Такой подход позволяет надеяться на выделение наиболее различающихся групп сортов.

Результаты кластеризации показывают, что на уровне 40 усл. ед. выделяются три группы сортов (в первой – 6,

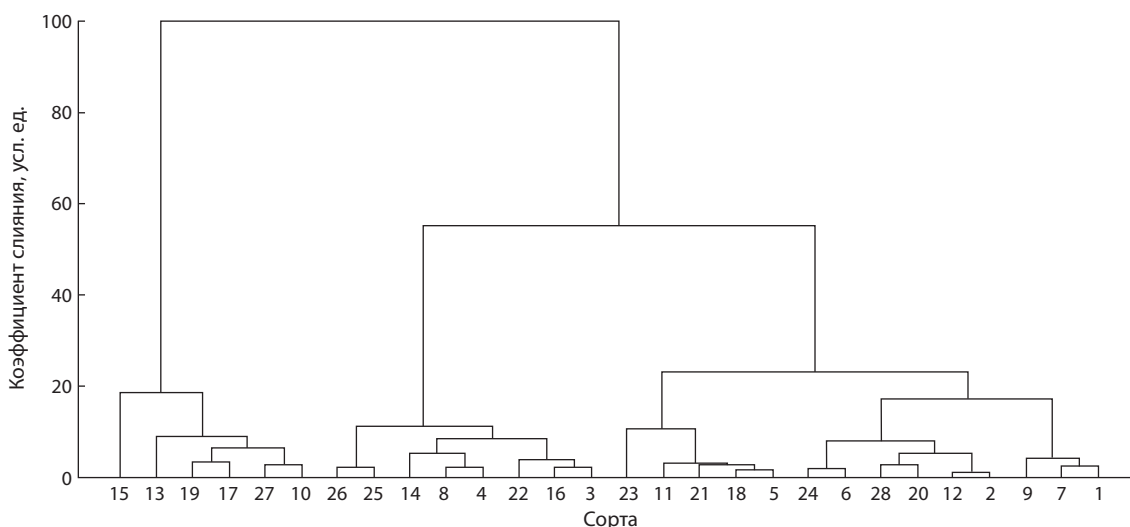
во второй – 8, в третьей – 14). Средние значения признаков для каждой из выделенных групп сортов собраны в табл. 4.

Средние значения признаков в разных кластерах были подвергнуты попарному сравнению с помощью *t*-критерия Стьюдента. Оказалось, что значения таких признаков, как средняя масса ягоды, плотность мякоти ягоды и сахарокислотный индекс, не имеют статистически значимых различий между кластерами. Признак количество ягод различается между первым и вторым кластерами ($t = 4.34$ при $p < 0.01$), а также между первым и третьим кластерами ($t = 4.01$ при $p < 0.01$). Общий урожай имеет статистически значимые различия между первым и вторым кластерами ($t = 10.99$ при $p < 0.01$), первым и третьим кластерами ($t = 6.91$ при $p < 0.01$), вторым и третьим кластерами ($t = 6.70$ при $p < 0.01$).

Таблица 3. Сравнение средних значений сортов земляники, выращенных в разных климатических зонах

Сорт (зона)	Признак					Сорт (зона)	Признак				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
Азия (а)	55.15*	14.91*	827.59	281.00*	6.80*	Нелли (а)	75.95*	16.41	1241.21*	468.50	5.40
Азия (b)	41.60*	18.22*	758.53	317.00*	5.25*	Нелли (b)	39.90*	15.19	606.23*	388.00	4.05
Алина (а)	44.20*	12.72*	558.71	391.50*	6.74*	Онда (а)	78.05*	12.97*	1019.21*	391.00	8.44
Алина (b)	35.50*	17.06*	606.54	308.00*	4.20*	Онда (b)	43.50*	17.24*	749.35*	402.00	7.10
Альба (а)	48.00	15.83	747.36	438.00	5.66	Роксана (а)	56.30*	17.02*	950.93*	382.50*	6.33*
Альба (b)	47.10	14.72	693.08	378.00	5.25	Роксана (b)	34.30*	20.05*	687.70*	290.00*	4.35*
Елизавета II (а)	69.00	12.07*	818.79*	328.42	8.92*	Сирия (а)	62.95*	12.40	782.44*	450.50*	7.34
Елизавета II (b)	70.90	8.87*	629.06*	320.90	5.22*	Сирия (b)	43.40*	12.50	546.08*	328.00*	6.20
Ирма (а)	58.15	15.45	895.62	300.50	7.00*	Флоренс (а)	66.00	13.69*	898.45*	468.50*	7.57*
Ирма (b)	65.90	14.63	979.40	323.00	5.20*	Флоренс (b)	58.00	11.54*	669.87*	344.00*	4.65*
Клери (а)	54.10	12.76	706.70	446.00*	8.34*	Хоней (а)	53.35*	9.40*	498.56	291.50*	5.98
Клери (b)	59.60	12.56	748.20	304.00*	6.35*	Хоней (b)	42.70*	11.46*	489.05	248.00*	7.15
Моллинг Пандора (а)	79.30*	16.00*	1117.47*	288.00*	5.92	Эльсанта (а)	82.80*	12.02	991.02*	267.00	7.57*
Моллинг Пандора (b)	53.80*	11.13*	598.53*	223.00*	4.85	Эльсанта (b)	54.90*	12.98	712.55*	245.00	5.35*

Примечание. Признаки: 1 – количество ягод (шт.); 2 – средняя масса ягоды (г); 3 – общий урожай (г/куст); 4 – плотность мякоти ягоды (г); 5 – сахаро-кислотный индекс ягод; латинскими буквами обозначены опытные участки: а – окрестности Краснодара, б – окрестности Крымска; * – различия сортов, выращенных в разных климатических зонах, достоверны при 5 % уровне значимости.



Результаты кластерного анализа сортов земляники в условиях опытных участков в окрестностях Краснодара и Крымска.

Опытные участки: а – окрестности Краснодара, б – окрестности Крымска; сорта: 1 – Азия (а), 2 – Азия (b), 3 – Алина (а), 4 – Алина (b), 5 – Альба (а), 6 – Альба (b), 7 – Елизавета II (а), 8 – Елизавета II (b), 9 – Ирма (а), 10 – Ирма (b), 11 – Клери (а), 12 – Клери (b), 13 – Моллинг Пандора (а), 14 – Моллинг Пандора (b), 15 – Нелли (а), 16 – Нелли (b), 17 – Онда (а), 18 – Онда (b), 19 – Роксана (а), 20 – Роксана (b), 21 – Сирия (а), 22 – Сирия (b), 23 – Флоренс (а), 24 – Флоренс (b), 25 – Хоней (а), 26 – Хоней (b), 27 – Эльсанта (а), 28 – Эльсанта (b).

Наиболее высоким урожаем обладают сорта, вошедшие в первый кластер: Нелли (Краснодар), Моллинг Пандора (Краснодар), Роксана (Краснодар), Онда (Краснодар), Эльсанта (Краснодар), Ирма (Крымск). Наименьший урожай показали сорта из второго кластера: Хоней (Крымск), Хоней (Краснодар), Моллинг Пандора (Крымск), Елизавета II (Крымск), Алина (Крымск), Сирия (Крымск), Нелли (Крымск), Алина (Краснодар). Средний урожай

имели сорта из третьего кластера: Флоренс (а), Клери (а), Сирия (а), Онда (b), Альба (а), Флоренс (b), Альба (b), Эльсанта (b), Роксана (b), Клери (b), Азия (b), Ирма (а), Елизавета II (а), Азия (а).

Полученные данные свидетельствуют о том, что сорта Нелли, Моллинг Пандора, Роксана, Онда, Эльсанта дают максимальный урожай в климатических условиях Краснодара, а сорт Ирма – в условиях Крымска. Сорта Хоней

Таблица 4. Средние значения признаков в выделенных группах сортов

Признак	Кластер		
	1	2	3
Количество ягод, шт.	73.05	47.96	53.73
Средняя масса ягод, г	14.84	12.30	14.60
Общий урожай, г/куст	1049.87	566.59	764.01
Плотность мякоти ягоды, г	353.33	312.36	356.63
Сахарокислотный индекс ягод	6.47	5.55	6.42

и Алина имели невысокий урожай в обеих климатических зонах. В климатических условиях Крымска не смогли полностью реализовать свой потенциал урожая такие сорта, как Моллинг Пандора, Елизавета II, Сирия и Нелли.

Один из способов оценки генотипических различий сортов, выращенных в разных климатических зонах, – измерение евклидова расстояния между ними по результатам проведенного кластерного анализа. Информативный комплекс, который в нашем случае состоял из пяти признаков, позволяет получить интегральную характеристику изучаемых сортов. Так как кластерный анализ проводится с учетом евклидовых расстояний между объектами, по этой величине можно судить о потенциальных генетически обусловленных различиях между сортами, отражающихся во взаимодействии генотип–среда. Чем больше вклад этого взаимодействия в общую изменчивость, тем больше различия между сортами.

При реализации этого алгоритма мы получили следующие евклидовы расстояния для сортов, выращенных в разных климатических условиях, в порядке возрастания: Хоней – 46, Азия – 79, Альба – 81, Ирма – 87, Алина – 97, Клеры – 148, Елизавета II – 190, Флоренс – 260, Сирия – 267, Онда – 272, Роксана – 280, Эльсанта – 281, Моллинг Пандора – 524, Нелли – 641. Отмечаются значительные различия для сортов Нелли и Моллинг Пандора, реализующих свой потенциал урожайности в разных климатических условиях. Евклидово расстояние для сортов Хоней и Алина, не реализовавших свой потенциал в обоих изученных климатических зонах, оказалось небольшим. Довольно значительными были евклидовы расстояния для сортов Флоренс, Сирия, Онда, Роксана, Эльсанта, выращенных в условиях Краснодара и Крымска.

Результаты изучения сортов земляники, выращенных в разных климатических условиях, свидетельствуют, что им свойственны различия в структуре изменчивости признаков продуктивности и качества ягод. Для условий Крымска преобладающим оказалось влияние генотипа сорта, а для условий Краснодара, кроме влияния генотипа сорта, оказывается существенной и средовая компонента в виде взаимодействия генотип–среда. Статистически достоверное влияние зоны выращивания установлено для признаков продуктивности и качества ягод, за исключением средней массы ягоды. При этом различия средних значений признаков у сортов могут быть как существенными, так и частично или полностью отсутствующими.

Для выявления перспективных сортов при выращивании в изучаемых зонах рекомендуется использовать кластерный анализ по информативному комплексу признаков с вычислением евклидовых расстояний между сортами, выращенными в разных условиях. Величина евклидова расстояния будет являться мерой влияния конкретной среды на генотип растений. Чем меньше значение евклидова расстояния у сорта, согласно комплексу изученных признаков, тем большей стабильностью характеризуется этот сорт.

Заключение

Предложенный методический подход, основанный на алгоритме многомерной математической статистики, можно использовать в качестве инструмента оценки влияния взаимодействия генотип–среда на комплекс хозяйственно-биологических признаков, определяющих продуктивность и качество ягод сортов земляники садовой в разнообразных экологических условиях выращивания с учетом их стабильности. Он позволит повысить эффективность методов оценки адаптивного и продукционного потенциала сортов земляники и может быть использован для определения генотипов земляники с высокими биометрическими характеристиками хозяйственно ценных признаков для селекционно-генетических исследований и промышленного производства.

Список литературы / References

- Зубов А.А. Теоретические основы селекции земляники. Мичуринск, 2004.
[Zubov A.A. The Theoretical Basis of Strawberry Breeding. Michurinsk, 2004. (in Russian)]
- Киртбая Е.К., Щеглов С.Н. Земляника. Краснодар, 2003.
[Kirtbaya E.K., Shcheglov S.N. Strawberry. Krasnodar, 2003. (in Russian)]
- Копылов В.И. Земляника. Симферополь, 2007.
[Kopylov V.I. Strawberry. Simferopol, 2007. (in Russian)]
- Лакин Г.Ф. Биометрия. М., 1990.
[Lakin G.F. Biometrics. Moscow, 1990. (in Russian)]
- Мандель И.Д. Кластерный анализ. М., 1988.
[Mandel I.D. Cluster Analysis. Moscow, 1988. (in Russian)]
- Матала В. Выращивание земляники. СПб., 2003.
[Matala V. Strawberry Cultivation. St. Petersburg, 2003. (in Russian)]
- Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Орел, 1999.
[Program and Methodology of the Study of Fruit, Small Fruit, and Nut-bearing Crop Varieties. Orel, 1999. (in Russian)]
- Фадеева Т.С. Генетика земляники. Л.: ЛГУ, 1975.
[Fadееva T.S. Strawberry Genetics. Leningrad: LGU Publ., 1975. (in Russian)]
- Allard R.W., Bradshaw A.D. Implications of genotype-environment interactions in applied plant breeding. *Crop Sci.* 1964;4:503-508.
- Annicchiarico P. Additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) analysis of genotype-location interaction in variety trials repeated over years. *Theor. Appl. Genet.* 1997;94:1072-1077. DOI 10.1007/s001220050517.
- Finlay K.W., Wilkinson G.N. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Aust. J. Agric. Res.* 1963;14:742-754. DOI 10.1071/AR9630742.
- Fontana D.C., Cocco C., Diel M.I., Pretto M.M., Holz E., Werner A., Testa V., Caron B.O., Stolze J., Pinheiro M.V.M., Schmidt D. The performance of strawberry cultivars in Southern Brazil. *Int. J. Curr. Res.* 2016;08(07):33889-33893.

- Gabriel A., Resende J.T.V., Zeist A.R., Resende L.V., Resende N.C.V., Galvão A.G., Zeist R.A., Lima Filho R.B., Corrêa J.V.W., Camargo C.K. Phenotypic stability of strawberry cultivars assessed in three environments. *Gen. Mol. Res.* 2018;17(3):1-11. DOI 10.4238/gmr18041.
- Gauch H.G. Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics.* 1988;44:705-715. DOI 10.2307/2531585.
- Gauch H.G., Zobel R.W. Predictive and postdictive success of statistical analysis of yield trials. *Theor. Appl. Genet.* 1988;76:1-10. DOI 10.1007/BF00288824.
- Global Conservation Strategy for *Fragaria* (Strawberry). *Scripta Horticulturae.* 2008;4:1-87. Available at http://www.actahort.org/chronica/pdf/sh_6.pdf
- López-Medina J., Vazquez E., Medina J.J., Dominguez F., Lopez-Aranda J.M., Bartual R., Flores F. Genotype × environment interaction for planting date and plant density effects on yield characters of strawberry. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 2001;76(5):564-568.
- Mathey M.M., Mookerjee S., Mahoney L.L., Gündüz K., Rosyara U., Hancock J.F., Stewart P.J., Whitaker V.M., Bassil N.V., Davis T.M., Finn C.A. Genotype by environment interactions and combining ability for strawberry families grown in diverse environments. *Euphytica.* 2017;213(5):112-123. DOI 10.1007/s10681-017-1892-6.
- Nachit M.M., Nachit G., Ketata H., Gauch H.G., Zobel R.W. Use of AMMI and linear regression models to analyse genotype-environmental interaction in durum wheat. *Theor. Appl. Genet.* 1992;83:597-601. DOI 10.1007/BF00226903.
- Sieczko L., Masny A., Pruski K., Żurawicz E., Mądry W. Multivariate assessment of cultivars' biodiversity among the Polish strawberry core collection. *Hort. Sci. (Prague).* 2015;42(2):83-93. DOI 10.17221/123/2014-HORTSCI.
- Singh G., Kachwaya D.S., Kumar R., Vikas G., Singh L. Genetic variability and association analysis in strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch). *Electronic J. Plant Breed.* 2018;9(1):169-182. DOI 10.5958/0975-928X.2018.00021.2.
- Zobel R.W., Wright M.J., Gauch H.G. Statistical analysis of a yield trial. *Agron. J.* 1988;80(3):388-393. DOI 10.2134/agronj1988.00021962008000030002x.

ORCID ID

V.I. Lapshin orcid.org/0000-0002-9343-1082
V.V. Yakovenko orcid.org/0000-0002-4075-2130
S.N. Shcheglov orcid.org/0000-0003-3919-8168
V.N. Podorojny orcid.org/0000-0003-3654-116x

Благодарности. Работа выполнена на коллекции генетических ресурсов растений ВИР в рамках государственного задания ВИР (бюджетный проект № 0662-2019-0004) и на исследовательско-селекционной коллекции генетических ресурсов садовых культур ФГБНУ СКФНЦСВВ в рамках государственного задания СКФНЦСВВ (бюджетный проект № 0689-2019-0003).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.05.2019. После доработки 24.06.2019. Принята к публикации 25.06.2019.