

Математические модели и инструментальные методы в селекции

УДК 634.11:631.541:575:51-76

doi: 10.15389/agrobiology.2015.5.590rus

ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕНОТИПОВ ПРИВОЯ И ПОДВОЯ ЯБЛОНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ*И.А. ДРАГАВЦЕВА¹, В.А. ДРАГАВЦЕВ¹, И.Л. ЕФИМОВА¹, С.Н. ЩЕГЛОВ²,
В.В. ДОМОЖИРОВА¹, А.С. МОРЕНЕЦ¹

Известно, что у плодовых растений, размножающихся вегетативно, привоя и подвой оказывают взаимное влияние во вновь образованной привойно-подвойной комбинации. При современных интенсивных технологиях, основанных на максимальной реализации биологического потенциала привитых плодовых растений, получение точных знаний о количественных признаках, характеризующих урожайность и биометрические параметры плодовых растений, очень актуально. С целью прогнозирования урожайности у яблони (*Malus domestica* Borkh.) мы исследовали возможность математического моделирования закономерностей влияния привоя и подвоя плодового дерева на формирование количественных признаков привитого растения по формулам, предложенным биометрической генетикой для аналогичных показателей родителей и их гибридов F_1 . Для анализа использовали данные, полученные в Прикубанской зоне Краснодарского края в 1982-2003 годах (всего 22 года). Изучали привойно-подвойные комбинации (ППК), созданные на основе четырех сортов (привоев) яблони (Айдаред, Голден Делишес, Джонатан, Корей) и семи подвоев (I-48-1, I-47-55, I-48-46, M2, M3, M4, M7). Учитывали урожайность, ширину кроны в направлениях с севера на юг и с запада на восток, высоту деревьев, диаметр штамба. С помощью методов математической статистики было доказано влияние года исследований, генотипа сорта (привоя), генотипа подвоя и их взаимодействия во всех сочетаниях на урожайность привойно-подвойных комбинаций. Установлено, что наибольший эффект имеют условия года (37 % от общей дисперсии). Определено, что проявление силы влияния сорта привоя на урожайность ППК характеризуется периодичностью с выраженными интервалами в несколько лет. Доли влияния подвоя и совокупного влияния сорта и подвоя примерно равнозначны. Впервые при работе с биологическими объектами, для которых характерны нелинейные взаимосвязи признаков, выявлено, что при построении модели прогнозирования урожайности ППК более эффективен множественный линейный регрессионный анализ с линеаризованной моделью, который представляется перспективным методическим подходом, учитывающим неадекватность ранее рассмотренных линейных моделей. С помощью построения гистограммы остатков (histogram of residual) доказано, что их распределение соответствует нормальному, что необходимо для корректного применения регрессионного анализа. Это дает основание для построения адекватной нелинейной (квадратичной) модели, описывающей зависимость урожайности деревьев привойно-подвойных комбинаций от морфоанатомических особенностей привитых деревьев. Проведенный теоретический анализ и впервые разработанные подходы к моделированию закономерностей, характеризующих влияние генотипов привоя и подвоя на формирование количественных признаков привитого растения (прежде всего его урожайности), позволят более обоснованно управлять стабильностью и эффективностью продукционного процесса у многолетних сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: математическое моделирование, методы математической статистики, биометрическая генетика, плодовые культуры, яблоня, сорт, подвой, привойно-подвойные комбинации, закономерности влияния привоя и подвоя, количественные признаки привитого растения, прогнозирование урожайности привойно-подвойных комбинаций, управление продуктивностью.

Известно, что у плодовых растений, размножающихся вегетативно, привоя и подвой оказывают взаимное влияние во вновь образованной привойно-подвойной комбинации (1-5). При использовании интенсивных технологий, основанных на максимальной реализации биологического потенциала привитых растений, актуально получение точных знаний о количественных признаках, характеризующих урожайность и биометрические параметры полученных комбинаций. В садоводстве накоплен обширный

* Поддержано грантом № 13-01-96519-р_юг_а РФФИ и администрации Краснодарского края.

экспериментальный материал о влиянии подвоев на жизнеспособность и приспособленность к условиям произрастания, долговечность, продуктивность, качество получаемой продукции и другие свойства привитых растений (6-13). При этом садоводам необходимо знать о количественных изменениях хозяйственно ценных признаков в различных комбинациях (14, 15).

В мировой практике возможность подвоев влиять на размеры растений и повышать урожайность привитого дерева выявляется посредством многолетних дорогостоящих эмпирических испытаний (16-20). Новизна разработанного нами подхода заключается в прогнозировании взаимодействия между генотипами привоя и подвоя с помощью биометрических методов. Анализ литературы (21-37) показывает, что сведения о подобных исследованиях отсутствуют и предлагаемый нами подход используется в садоводстве впервые.

Нашей целью была разработка приемов, позволяющих оценить взаимодействие между генотипами подвоев и привоев яблони на основе анализа биометрических параметров, для выявления наиболее перспективных в хозяйственном отношении комбинаций.

Методика. Исследования проводили в Прикубанской зоне Краснодарского края (ОПХ «Центральное» Северо-Кавказского зонального НИИ садоводства и виноградарства — СКЗНИИСИВ) в течение 22 лет (1982-2003 годы). Изучали привойно-подвойные комбинации у яблони (*Malus domestica* Borkh.) на основе четырех сортов (привоев) (Айдаред, Голден Делишес, Джонатан, Корей) и семи подвоев (I-48-1, I-47-55, I-48-46, M2, M3, M4, M7). Урожайность привитых деревьев учитывали ежегодно весовым способом. Биометрические исследования выполняли в 1983 и 1985 годах. У комбинаций сортов Корей и Айдаред с подвоями I-48-1, I-47-55, I-48-46, M2, M3, M4, M7 определяли ширину кроны в направлениях с севера на юг и с запада на восток (см), высоту (см), диаметр штамба (см).

Статистические расчеты проводили с помощью программы StatSoft Statistica v. 10.0 и Statgraphics XVI (38). Методом трехфакторного дисперсионного анализа оценили вклады в изменчивость урожайности года исследований, сорта привоя, подвоя и их взаимодействия в различных сочетаниях. Посредством двухфакторного дисперсионного анализа проверялась значимость различий между подвоями, привоями и наличие взаимодействия «подвой—привой» в разные годы исследований. Средние многолетние данные анализировали с помощью графиков Box & Whisker plot. Также методом дисперсионного анализа определяли долю влияния года исследования, сорта привоя, подвоя и их взаимодействия на морфо-анатомические особенности привитых деревьев. Для оценки силы связи изучаемых признаков использовали корреляционный анализ по Спирмену и Пирсону, для построения модели прогнозирования урожайности у привойно-подвойных комбинаций — множественный линейный регрессионный анализ.

Результаты. Дисперсионный анализ — один из самых используемых методов в биологии (39, 40).

Трехфакторный дисперсионный анализ (табл. 1) показал, что условия года, сорт привоя, подвой и их сочетание статистически достоверно влияли на урожайность. Условия года имели наибольший эффект (31,7 %), на сорт и подвой приходилось около 1,0 %. Вторым по значимости было совокупное влияние года и сорта (17,9 %), тогда как совместный эффект года и подвоя оказался почти в 7,5 раз меньше (2,4 %). Удалось обнаружить небольшое, но статистически достоверное влияние сочетания сорта и подвоя (0,5 %). Интересно, что третьим по значимости было совокупное воздействие всех трех факторов (4,9 %). Это еще раз подтверждает слож-

ность математического моделирования закономерностей, описывающих роль привоя и подвоя в формировании количественных признаков.

1. Оценка влияния условий года, привоя и подвоя на урожайность полученных комбинаций яблони методом дисперсионного анализа (ОПХ «Центральное» СКЗНИИСиВ, г. Краснодар, 1982-2003 годы)

Изменчивость	df	mS	F	σ^2	Доля влияния в общей дисперсии, %
Между годами	21	235629,45	394,2*	465,41	31,7
Между сортами	3	38581,43	64,6*	13,68	0,9
Между подвоями	6	22935,62	38,4*	14,07	1,0
Год × сорт	63	33730,03	56,4*	262,43	17,9
Год × подвой	126	3194,65	5,3*	36,00	2,4
Сорт × подвой	18	3671,20	6,1*	7,75	0,5
Год × сорт × подвой	378	1906,06	3,2*	72,54	4,9
Остаточная	10494	597,69		597,69	40,7

Примечание. df — степени свободы, mS — средний квадрат, F — критерий Фишера, σ^2 — дисперсия.
* $p < 0,01$.

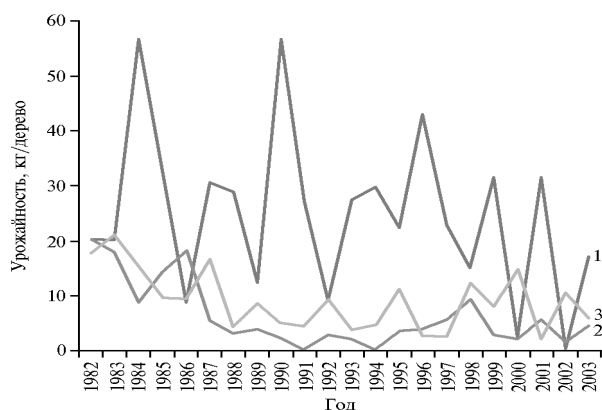


Рис. 1. Доля влияния сорта (привоя) (1), подвоя (2) и взаимодействия этих факторов (3) на урожайность привойно-подвойных комбинаций яблони по годам исследований (ОПХ «Центральное» СКЗНИИСиВ, г. Краснодар, 1982-2003 годы).

у разных привойно-подвойных комбинаций. Эффект подвоя не обнаружили в 1991 и 1994 годах.

Ежегодное влияние сорта привоя на урожайность привойно-подвойных комбинаций имело выраженные интервалы в несколько лет (рис. 1). Возможно, это объясняется периодичностью плодоношения, свойственной яблони, климатическими условиями года и их сочетанием.

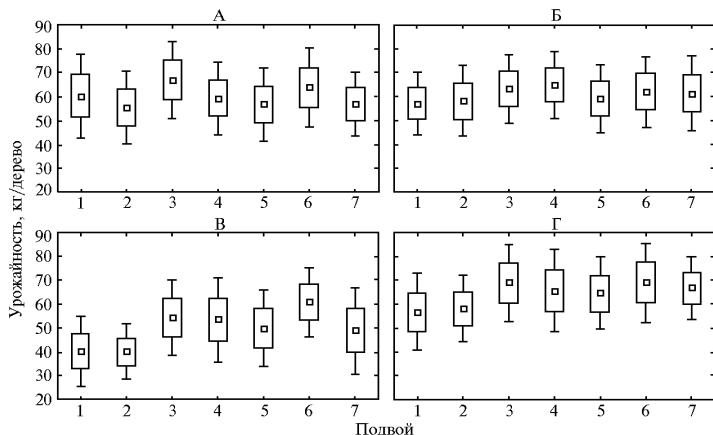


Рис. 2. Распределение статистических характеристик урожайности у привойно-подвойных комбинаций яблони сортов Айдаред (А), Голден Делишес (Б), Джонатан (В), Корей (Г): 1 — I-48-1, 2 — I-47-55, 3 — I-48-46, 4 — М2, 5 — М3, 6 — М4, 7 — М7 (г. Краснодар, ОПХ «Центральное» СКЗНИИСиВ, 1982-2003 годы).

Доли влияния подвоя и взаи-

модействия сорта и подвоя на урожайность комбинаций были примерно равнозначными. Средние многолетние данные мы представили на графиках Box & Whisker plot (рис. 2). На графиках такого типа точка обозначает среднее арифметическое, границы прямоугольника — ошибку среднего, линии за границами прямоугольника — доверительные интервалы, что позволяет наглядно описать статистические характеристики выборок. Видно, что лучшую урожайность сорта Айдаред обеспечили подвои I-48-46, I-48-1 и M4, сорта Голден Делишес — подвои I-48-46, M2 и M4, сорта Джонатан — подвои M4, I-48-46 и M2, сорта Корей — подвои I-48-46, M2 и M4 (см. рис. 2).

Результаты дисперсионного анализа на основе данных биометрических исследований показали очень сильное влияние условий года на все изученные признаки. Доля дисперсии варьировала от 9,9 (высота) до 63,4 % (диаметр штамба). Эффект генотипа сорта также был установлен для всех анализируемых признаков. Изменчивость, обусловленная этим фактором, колебалась от 0,1 (диаметр штамба) до 17,8 % (урожайность). Влияние подвоя оказалось в 3 раза меньше, чем у сорта, но статистически достоверным: от 0,8 (ширина кроны с севера на юг) до 5,9 % (диаметр штамба). Совокупный эффект привоя и условий года составлял от 2,0 (высота) до 32,0 % (урожайность), генотипа подвоя и условий года — от 1,8 (ширина кроны с севера на юг и урожайность) до 5,7 % (высота). Исключением оказалась ширина кроны с запада на восток (влияния на этот признак не установили).

Самым важным, на наш взгляд, было обнаружение статистически достоверных взаимодействий с участием генотипов сорта и подвоя, что показано впервые для всех без исключения признаков. Совокупное влияние генотипов сорта и подвоя составило от 2,1 (ширина кроны с севера на юг и урожайность) до 7,2 % (высота), генотипов сорта, подвоя и условий года — от 0,9 (диаметр штамба) до 14,0 % (высота). Следовательно, эффект генотипа сорта, подвоя и условий среды был примерно одинаковым.

Вызывает интерес влияние года исследований на изученные признаки, оценка которого важна для построения эффективных селекционных программ. Взаимодействие генотипа со средой в популяции (наборе сортов) приводит к изменениям общей фенотипической, генотипической и аддитивной дисперсий, которые могут быть оценены, если испытания проводятся в разных местностях в один год или в течение нескольких лет в одной местности. Если испытываемые генотипы не меняют ранги продуктивности во всех средах, то взаимодействие «генотип—среда» равно нулю (отсутствует). При эксперименте только в одной местности или в течение одного года дисперсия генотипически-средового взаимодействия будет смешана с дисперсией случайных отклонений. Невозможность их разделения приводит к смещению оценок генетических параметров. Даже если дисперсия ошибки оценивается при идеальных условиях эксперимента, генотипическая дисперсия и дисперсия генотипически-средового взаимодействия остаются объединенными, что приводит к неправильным выводам. В связи с этим очевидна необходимость проведения всех генетических и селекционных экспериментов в течение ряда лет или в нескольких местностях.

Вычисление относительных величин различных компонентов генотипически-средовых взаимодействий в практической селекции должно обеспечить более рациональное распределение ресурсов при постановке экспериментов. В частности, оно позволит предсказать, насколько важно устраивать испытания в большом числе мест или в одном месте в течение более

длительного периода времени. Испытания, проведенные в одной среде, но при большом числе повторностей (как в нашем случае), так же информативны для надежного ранжирования генотипов, как и дорогостоящие опыты в различных средах. Кроме того, изучение взаимодействия генотипа и среды помогает отбирать сорта или гибриды с более широкими приспособительными возможностями.

До настоящего времени главными при изучении эффектов взаимодействия «генотип—среда» остаются методы, основанные на дисперсионном и регрессионном анализе, которые обеспечивают достаточно надежную оценку изменчивости. Так, при анализе комбинационной способности в диаллельных скрещиваниях представляется возможным проследить характер изменчивости аддитивного и неаддитивного действия генов в зависимости от условий выращивания. Следует обратить большее внимание на вклад неаддитивной компоненты в эффекты взаимодействия «генотип—среда», поскольку аддитивно функционирующий ген не взаимодействует ни с генным окружением в клетке, ни с варьирующими факторами среды.

Первым шагом при построении математической модели стал поиск корреляции между признаками. Для этого мы использовали объединенную выборку по биометрическим параметрам деревьев различных привойно-подвойных комбинаций. Такая выборка (около 800 деревьев) позволяет считать, что признаки будут подчиняться нормальному распределению (это условие обязательно для применения параметрических методов). Нормальность распределения признаков проверяли при помощи критерия χ^2 (ширина кроны деревьев с севера на юг — $\chi^2 = 561,77$, $p < 0,01$; ширина кроны с запада на восток — $\chi^2 = 1924,13$, $p < 0,01$; высота — $\chi^2 = 50,28$, $p < 0,01$; диаметр штамба — $\chi^2 = 109,83$, $p < 0,01$; урожайность — $\chi^2 = 1594,72$; $p < 0,01$).

2. Коэффициенты корреляции между признаками у привойно-подвойных комбинаций яблони (ОПХ «Центральное» СКЗНИИСиВ, г. Краснодар, 1982-2003 годы)

Признак	Ширина кроны		Высота	Диаметр штамба	Урожайность
	с севера на юг	с запада на восток			
Ширина кроны:					
с севера на юг		0,80*	0,49*	-0,46*	0,47*
с запада на восток	0,76*		0,42*	-0,27*	0,47*
Высота	0,39*	0,39*		-0,07*	0,10*
Диаметр штамба	-0,51*	-0,28*	-0,03		-0,13*
Урожайность	0,39*	0,35*	0,03	-0,08*	

Примечание. Выше диагонали — коэффициенты корреляции Пирсона, ниже — Спирмена.
* Достоверность связи между признаками на уровне значимости 5 %.

Анализ проводили с помощью параметрического критерия корреляции Пирсона и непараметрического критерия ранговой корреляции Спирмена (табл. 2). Коэффициент корреляции Пирсона оказался более эффективным, поскольку предназначен именно для такого распределения. Коэффициент корреляции Спирмена вычисляли для двух предварительно ранжированных переменных. Неадекватный результат, полученный с его помощью, может объясняться часто встречающимися одинаковыми значениями. При их ранжировании возникает проблема связанных рангов (tied ranks). В этом случае действует особое правило: объектам с одинаковыми значениями приписывается один и тот же средний ранг. При наличии одинаковых (связанных) рангов формула ранговой корреляции Спирмена не подходит.

Математическое моделирование для анализа взаимосвязи привоя и подвоя требует обнаружения существенных переменных системы и задания связей между ними, чтобы модель давала такой же результат поведения, как и изучаемый объект. Подобная модель способна предсказывать поведение

системы в разных средах, особенно таких мало изученных, как взаимодействие привоя и подвоя в новом двухкомпонентном плодовом растении. В случаях, когда речь идет о явлениях и процессах с комплексной структурой и многообразием свойственных им связей, такой анализ очень сложен.

Для дальнейших исследований были использованы линейные модели, предполагающие, что наблюдаемые величины связаны между собой зависимостью вида:

$$y_i = b_0 + b_1x_i + c_i, \quad [1]$$

где b_0 , b_1 — неизвестные параметры (коэффициенты уравнения), c_i — независимые нормально распределенные случайные величины с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 . Эта процедура потребовалась для того, чтобы по наблюдениям x_i , y_i наилучшим образом построить модель b_1 , b_0 и доверительные интервалы для b_1 , b_0 , проверить гипотезу о значимости уравнения и коэффициентов регрессии, а также оценить степень адекватности полученной зависимости.

Была использована множественная регрессионная модель с несколькими предикторами:

$$y_i = b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + \dots + b_px_{pi} + b_0 + c_i, \quad [2]$$

где b_0 , b_1 , b_2 , ... b_p — неизвестные параметры модели.

Использование линейной множественной регрессии в пакете программ Statgraphics XVI позволило получить следующую модель:

$$\begin{aligned} \text{Урожайность} = & -30,0149 + 0,183946 \times \text{ширина кроны с севера на юг} + \\ & + 0,137848 \times \text{ширина кроны с запада на восток} - 0,145484 \times \text{высота} + \\ & + 0,564993 \times \text{диаметр штамба}. \end{aligned} \quad [3]$$

Из результатов анализа следует, что связь между откликом и предикторами была слабой ($R^2 = 0,28$), построенная линейная регрессия адекватно описывала связь между откликом и предикторами, свободный член был статистически значимым.

Существует несколько причин предположить линейность связи признаков в регрессионном анализе. Часто такое предположение бывает простейшим, поэтому естественным становится желание начать анализ именно с него. Многие математические методы приспособлены к решению линейных задач, что вынуждает использовать линейные схемы даже в тех случаях, когда есть серьезные основания ожидать, что реальная зависимость значительно отличается от линейной. Более того, как правило, в окружающей нас природе все зависимости нелинейны. Тем не менее, существуют зависимости, линейность которых в рассматриваемой области приложений практически достоверна с любой разумной степенью точности. При построении математических моделей предположение о линейности гораздо чаще имеет отчетливый характер допущения, хотя и далеко не всегда формулируется как таковое. Поэтому при моделировании взаимосвязей, присущих изучаемым процессам и явлениям, наряду с линейными регрессионными моделями целесообразно рассматривать нелинейные регрессионные модели. Обычно необходимость в нелинейной регрессии появляется, если исследователь получает данные о неадекватности линейной модели и для уточнения в ее уравнение добавляются некоторые нелинейные члены (38).

В общем случае регрессионная модель может быть записана в следующем виде:

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad [4]$$

Для моделирования связи между урожайностью и морфофизиологическими особенностями растений-подвоев следует учитывать обнаруженную нами нелинейность связи этих признаков.

Физиологами установлено, что зависимость между производительностью некоторого объекта и степенью его физиологического возбуждения выражается уравнением регрессии:

$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2, \quad [5]$$

где b_0 — свободный член, b_1 и b_2 — коэффициенты регрессии, Y и X — величины, характеризующие соответственно производительность и возбуждение. Нелинейность этой модели выражается членом X^2 . Такая модель называется нелинейной по переменным. Она допускает линеаризацию, которую можно осуществить, произведя замены $X = X_1$, $X^2 = X_2$. Тогда уравнение приобретает вид:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2. \quad [6]$$

С помощью модуля Fixed Nonlinear Regression был проведен множественный линейный регрессионный анализ с линеаризованной моделью. В связи с программными ограничениями по числу переменных пришлось исключить из анализа признак ширина кроны с севера на юг, оставив второй признак этой категории — ширина кроны с запада на восток. Из различных вариантов линеаризующих преобразований лучшим оказался следующий:

$$X = X^2. \quad [7]$$

Для оценки адекватности полученной модели построили гистограмму остатков (histogram of residual) (рис. 3). Остатками называются разности наблюдаемых и подогнанных (или прогнозируемых с помощью модели) величин. Одно из условий корректного применения регрессионного анализа — соответствие полученных остатков закону нормального распределения. Из рисунка 3 видно, что это условие выполнялось, то есть нами была построена адекватная нелинейная (квадратичная) модель зависимости между урожайностью сорто-подвойных комбинаций и морфоанатомическими особенностями привитых деревьев. В результате полученная модель имела следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{Урожайность} = & 171,3953 - 0,4599 \times \text{ширина кроны с запада на восток} - \\ & - 0,7876 \times \text{высота} + 5,5432 \times \text{диаметр штамба} + 0,0008 \times \text{ширина кроны с} \\ & \text{запада на восток}^2 + 0,0009 \times \text{высота}^2 - 0,0628 \times \text{диаметр штамба}^2. \end{aligned} \quad [8]$$

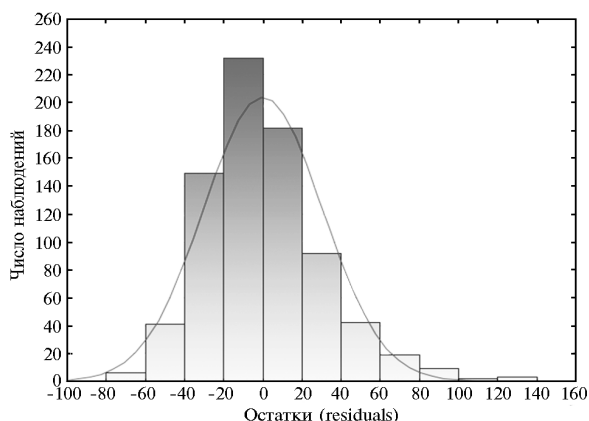


Рис. 3. Гистограмма остатков при оценке корректности регрессионного анализа, примененного для моделирования связи между урожайностью и морфофизиологическими особенностями привитых деревьев яблони по данным многолетних наблюдений (г. Краснодар, ОПХ «Центральное» СКЗНИИСив, 1982-2003 годы).

жду генотипами подвоя и привоя у сортов яблони. Установлено, что на изученные признаки существенно влияют условия года (37 % от общей

Отметим, что скорректированное уравнение множественной регрессии с линеаризованной моделью имеет коэффициент детерминации $R^2 = 0,53$, что уже относится к средней силе связи между откликом и предикторами. Другими словами, предложенная модель описывает 53 % исходной изменчивости, что позволяет дополнительно повысить эффективность прогнозов урожайности привитых плодовых деревьев.

Таким образом, нами впервые использованы биометрические методы для выявления взаимодействия между

дисперсии). Сила влияния привитого сорта на урожайность привойно-подвойных комбинаций имеет выраженные интервалы в несколько лет. Доли влияния подвоя и совокупного влияния сорта и подвоя на анализируемые признаки примерно равнозначны. Впервые при работе с биологическими объектами, для которых характерны нелинейные взаимосвязи признаков, выявлено, что при построении модели прогнозирования урожайности привойно-подвойных комбинаций более эффективен множественный линейный регрессионный анализ с линеаризованной моделью. Он представляется перспективным методическим подходом, учитывающим неадекватность ранее рассмотренных линейных моделей. Корректность применения регрессионного анализа была подтверждена с помощью построения гистограммы остатков (histogram of residual). Доказано, что их распределение соответствует нормальному. Это дает основание для построения адекватной нелинейной (квадратичной) модели зависимости урожайности деревьев привойно-подвойных комбинаций от морфоанатомических особенностей привитых деревьев. Подход к математическому моделированию закономерностей, описывающих влияние генотипов привоя и подвоя на формирование количественных признаков у привитого растения (прежде всего его урожайности), который был нами впервые теоретически обоснован и разработан с использованием данных 22-летних наблюдений, позволит точнее и аргументированнее управлять стабильностью и эффективностью продукционного процесса у многолетних сельскохозяйственных культур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трусевич Г.В. Подвои плодовых пород. М., 1964.
2. Бережной И.П. Вегетативно размножаемые подвои яблони в садах Ростовской области. В сб.: Клоновые подвои в интенсивном садоводстве. М., 1973: 84-92.
3. Kosina J. Effect of dwarfing and semi dwarfing apple rootstocks on growth and productivity of selected apple cultivars. Horticultural Science (Prague), 2010, 37: 121-126.
4. Takács F., Hrotky K. Effect of apple rootstocks on growth and productivity. Proc. Int. Conf. on Perspectives in European Fruit Growing. Lednice, 2006: 161-164.
5. Ефимова И.Л., Ермоленко В.Г. Подвои яблони. В сб.: Современные методологические аспекты организации селекционного процесса в садоводстве и виноградарстве. Краснодар, 2012: 301-312.
6. Упадышева Г.Ю., Минаева Г.Ю. Изменение ростовых процессов и продуктивности у сливы домашней под влиянием подвоя. Садоводство и виноградарство, 2011, 2: 20-24.
7. Григорьева Л.В., Балашов А.А., Ершова О.А. Урожай и рост привойно-подвойных комбинаций яблони в интенсивном саду. Достижения науки и техники АПК, 2010, 11: 59-61.
8. Кузнецова А.П., Романенко А.С. Выявление влияния подвоев на адаптационный потенциал привойно-подвойных комбинаций сливы с помощью анатомо-морфологических исследований. Плодоводство и ягодоводство России (М.), 2013, XXXVII(1): 215-221.
9. Доможирова В.В., Ефимова И.Л., Щеглов С.Н. Оценка влияния подвоев на урожайность привитых деревьев яблони. Плодоводство и ягодоводство России (М.), 2014, XXXIX: 76-79.
10. Beckman T.C., Okie W.R., Myers S.C. Rootstocks affect bloom date and fruit maturation of Redhaven peach. J. Am. Soc. Hort. Sci., 1992, 117: 377-379.
11. Webster A.D., Hollands M.S. Apple rootstock studies: Comparison of Polish, Russian, USA and UK selections as rootstocks for the apple cultivar Cox's Orange Pippin (*Malus domestica* Borkh.). J. Hort. Sci. Biotech., 1999, 74(3): 367-374.
12. Czynczyk A., Bielicki P., Bartosiewicz B. Performance of three apple cultivars on 17 dwarfing and semi-dwarfing rootstocks during eight season. Proc. Int. Sem. Warsaw, 1999: 21-22.
13. Kviklys D. Apple rootstock research in Lithuania with aspect to fruit quality and tree productivity. Horticulture and Vegetable Growing, 2002, 21(3): 3-13.
14. Kviklys D., Kviklien N., Bite A., Lepsis J., Univer T., Univer N., Uselis N., Lanaukas J., Buskien L. Baltic fruit rootstock studies: evaluation of 12 apple rootstocks in North-East Europe. Horticultural Science (Prague), 2012, 39(1): 1-7.
15. El-Shammaa M.S., Mansour A.E.M., Cimpoiu G.P., Nageib M.M., Ma-

- 1ака S. Effect of rootstocks on flowering, yield and fruit quality of Anna apple trees (*Malus domestica* Borkh). Research Journal of Agriculture and Biological Sciences, 2011, 7(2): 190-195.
16. Дьяков А.Б., Драгавцева И.А., Ефимова И.Л., Доможирова В.В. Модели оценки комбинационной способности привоев и подвоев для прогноза урожайности у привитых деревьев яблони. Сельскохозяйственная биология, 2014, 5: 55-65 (doi: 10.15389/agrobiology.2014.5.55rus, doi: 10.15389/agrobiology.2014.5.55eng).
 17. Шафоростова Н.К., Драгавцева И.А., Дьяков А.Б. Влияние генотипов привоя и подвоя на стабильность плодоношения яблони. Плодоводство и ягодоводство России (М.), 2004, XI: 70-84.
 18. Дьяков А.Б., Драгавцева И.А., Шафоростова Н.К. Оценка экологической стабильности плодношения. Садоводство и виноградарство, 2007, 1: 5-7.
 19. Tworkoski T., Miller S. Rootstock effect on growth of apple scions with different growth habits. Sci. Hort., 2007, 111(4): 335-343 (doi: 10.1016/j.scienta.2006.10.034).
 20. Russo N.L., Robinson T.L., Fazio G., Aldwinckle H.S. Field evaluation of 64 apple rootstocks for orchard performance and fire blight resistance. Hort. Sci., 2007, 42(7): 1517-1525.
 21. Hunter D. Rootstocks [Electronic resource]. USA, 1997 (<http://www.appleman.ca/korchard/rootstok.htm> (Accessed 19.12.2014)).
 22. O'Brien D. Geneva rootstock program aiding the U.S. apple industry [Electronic resource]. USA, 2015 (<http://fruitgrowersnews.com/index.php/magazine/article/geneva-rootstock-program-aiding-the-u.s.-apple-industry>) (Accessed 17.01.2015).
 23. Kviklys D., Lanauskas J., Sakalauskait J., Kviklien N., Uselis N. Soil exhaustion and rootstock effect on the growth of apple planting material. Agronomy Research, 2008, 6(2): 511-516.
 24. Григорьева Л.В., Ершова О.А. Подбор привойно-подвойных комбинаций — фактор повышения продуктивности интенсивных садов. Плодоводство и ягодоводство России (М.), 2012, XXIX(1): 129-138.
 25. Григорьева Л.В., Ершова О.А. Урожайность и ростовая активность сортов яблони на клоновых подвоях в интенсивном саду. Плодоводство и ягодоводство России (М.), 2012, XXXI(1): 96-104.
 26. Григорьева Л.В., Ершова О.А., Балашов А.А. Урожайность яблони в интенсивном саду на разных по силе роста подвоях. Мат. Межд. науч.-практ. конф. «Ботанические сады в 21-м веке: сохранение биоразнообразия, стратегия развития и инновационные решения». Белгород, 2009: 172-174.
 27. Григорьева Л.В., Ершова О.А., Балашов А.А. Плодоношение и рост привойно-подвойных комбинаций яблони в интенсивном саду. Мат. Межд. науч.-практ. конф. «Совершенствование сортимента и технологий возделывания плодовых и ягодных культур». Орел, 2010: 65-67.
 28. Григорьева Л.В., Муханин И.В. Потенциальная и хозяйственная продуктивность яблони в зависимости от подвоя. Мат. Межд. симп. «Экологическая оценка типов высокоплотных плодовых насаждений на клоновых подвоях». Минск-Самохваловичи, 1997: 94-96.
 29. Григорьева Л.В., Муханин И.В. Развитие листовой поверхности в интенсивном садовом саду. Мат. Межд. науч.-практ. конф. «Интенсивное садоводство». Мичуринск, 2000, II: 58-59.
 30. Goedegebuure J. Economic aspects of HDP developments in the Netherlands. Acta Horticulturae, 1989, 243: 389-397 (doi: 10.17660/ActaHortic.1989.243.55).
 31. Grigor'eva L.V., Mukhanin I.V. Peculiarities of water regime of apple scion-rootstocks combinations. Proc. Int. Conf. «Fruit production and fruit breeding». Tartu, 2000: 107-108.
 32. Grigor'eva L.V., Mukhanin I.V. Potential productivity of apple clonal rootstocks mother plantation. Proc. Int. Conf. «Fruit production and fruit breeding». Tartu, 2000: 109-110.
 33. Sansavini S., Belfanti E., Costa F., Donati F. European apple Breeding Programs turn to biotechnology. Chronica Horticulturae, 2005, 45(2): 16-19.
 34. Martinez-Ballesta M.C., Alcaraz-Lopez C., Muries B., Mota-Cadenas C., Carvajal M. Physiological aspects of rootstock—scion interactions. Sci. Hort., 2010, 127(2): 112-118 (doi: 10.1016/j.scienta.2010.08.002).
 35. Kviklys D. Apple and pear rootstock research in Lithuania. Sodininkystė Ir Daržininkystė, 2006, 25(3): 3-12.
 36. Ercisli S., Esitken A., Orhan E., Ozdemir O. Rootstocks used for temperate fruit trees in Turkey: an overview. Sodininkystė Ir Daržininkystė, 2006, 25(3): 27-33.
 37. Коерке Т., Дхингра А. Rootstock scion somatogenetic interactions in perennial composite plants. Plant Cell Rep., 2013, 32: 1321-1337 (doi: 10.1007/s00299-013-1471-9).
 38. Халафян А.А. СТАТИСТИКА 6. Статистический анализ данных. М., 2008.
 39. Щеглов С.Н. Применение биометрических методов для ускорения селекционного процесса плодовых и ягодных культур. Краснодар, 2005: 106.
 40. Драгавцев В.А., Цильке Р.А., Рейтер Б.Г., Воробьев В.А., Дубровская А.Г.,

Коробейников Н.И., Новохатин В.В., Максименко В.Н., Бабакишев А.Г., Илющенко В.Г., Калашник Н.А., Зуйков Ю.И., Федотов А.М. Генетика признаков продуктивности яровых пшениц в Западной Сибири /Под ред. Д.К. Беляева. Новосибирск, 1984: 230.

¹ФГБНУ Северо-Кавказский зональный НИИ садоводства и виноградарства,

350901 Россия, г. Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39,
e-mail: i_d@list.ru, dravial@mail.ru, vetch-dv@yandex.ru, efimiril@mail.ru;

²ФГБОУ ВПО Кубанский государственный университет,

350040 Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149,
e-mail: gold_finch@mail.ru

Поступила в редакцию
16 февраля 2015 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2015, V. 50, № 5, pp. 590-599

THE ASSESSMENT OF THE VARIETY AND ROOTSTOCK GENOTYPES INTERACTION IN APPLE (*Malus domestica* Borkh.) GRAFTED TREES USING BIOMETRIC METHODS

I.A. Dragavtseva¹, V.A. Dragavtsev¹, I.L. Efimova¹, S.N. Shcheglov²,
V.V. Domozhirova¹, A.S. Morenets¹

¹North-Caucasian Zonal Research Institute of Orchard and Viticulture, Federal Agency of Scientific Organizations, 39, ul. 40 let Pobedy, Krasnodar, 350901 Russia, e-mail i_d@list.ru, dravial@mail.ru, vetch-dv@yandex.ru, efimiril@mail.ru;

²Kuban State University, 149, ul. Stavropol'skaya, Krasnodar, 350040 Russia, e-mail gold_finch@mail.ru

Acknowledgements:

Supported by Russian Foundation for Basic Research (grant № 13-01-96519-r_yug_a) and the Administration of Krasnodar Krai

Received February 16, 2015

doi: 10.15389/agrobiology.2015.5.590eng

Abstract

In grafted fruit plants with vegetative propagation the scion (variety) and rootstock influence each other in newly-formed variety-rootstock combination. Under intensive technologies of fruit production based on maximal realization of grafted fruit plants' bio potential it is very important to obtain accurate knowledge about quantitative traits which characterize productivity and biometrical parameters of fruit plants. To forecast the productivity of apple (*Malus domestica* Borkh.) trees, we studied the possibility of math modeling for the prediction of variety and rootstock influence on formation of quantitative traits in grafted plants using formulas offered by biometric genetics to estimate the same indexes in parent forms and their F₁ hybrids. The data of apple trees productivity obtained in Prikubanskaya zone of Krasnodar region in 1983 to 2003 years (a total of 22 years) were analyzed. We studied the variety-rootstock combinations (VRC) of four apple varieties (Idared, Golden Delicious, Jonathan, Korah) as scions and seven rootstocks (I-48-1, I-47-55, I-48-46, M2, M3, M4, M7) with regard to yields, the width of the crown from North to South and from West to East, the tree height and trunk diameter. An impact of the year conditions, the genotypes of the variety and the rootstock and their interaction on the yield of the variety-rootstock combinations was proven using math statistics. It was shown that the conditions of the year have the greatest effect (37 % of the total variance). Strength of the variety influence on the VRC yield was determined to be expressed with a several years interval. The rate of the rootstock impact and the cumulative effect of the scion and the rootstock were found to be roughly equal. For the first time for biological objects, which are characterized by non-linear relationship of traits, it is revealed that the forecasting models of VRC productivity based on multiple linear regression analysis with a linearized model is more effective and promising approach which takes into account the inadequacy of linear models previously considered. The histogram of residuals showed their normal distribution that is in conformity with correct use of the applied regression analysis. It provides a basis for adequate non-linear (quadratic) model of the yield production in each variety-rootstock combination as related to morphological and anatomical characteristics of grafted trees. Thus, based on theoretical analysis and the 22 year survey, we suggested the mathematical models for the variety and rootstock genotypes influence on quantitative traits in a grafted plant, primarily its productivity. It has been developed for the first time. This model enables more accurate control of stable and effective yield production in perennial crops.

Keywords: math modeling, methods of the math statistics, biometric genetics, fruit crops, apple tree, variety, rootstock, variety-rootstock combinations, regularities of the influence of variety and rootstock, the quantitative traits of the grafted plant, the yield forecast for variety-rootstock combinations, productivity, management.