УДК 519.237:635.21:661.162.6
EDN SBLGLT

Нохрин Д. Ю., Васильев А. А.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНАЛИЗА ИЗБЫТОЧНОСТИ ДЛЯ ОБОБЩЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ПРИМЕРЕ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПРЕПАРАТА «МИВАЛ-АГРО» НА УРОЖАЙНОСТЬ И БОЛЕЗНИ КАРТОФЕЛЯ

ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»

Реферат. *При статистической обработке данных сельскохозяйственных опытов вместе с дисперсионным анализом полезно применять многомерные методы анализа данных, учитывающие согласованное изменение сразу нескольких признаков в ответ на различные средовые и экспериментальные факторы. В статье рассматривается использование в этих целях анализа избыточности (Redundancy analysis, RDA), в ходе которого по результатам полевых опытов 2017–2020 гг. оценено влияние факторов «Год» (4 градации), «Сорт» (5) и «Обработка биостимулятором» (3) на полевую всхожесть, урожайность и болезни (частота и интенсивность альтернариоза, ризоктониоза и фитофтороза) картофеля. Установлено, что фактор «Год» был статистически значим ($F_{(3/76)} = 27,61$; $p < 0,001$) и на 52,15 % определял изменчивость (дисперсию) набора признаков. Анализ ординационных диаграмм позволил связать это влияние с гидротермическим коэффициентом (ГТК) и обнаружить зависимость альтернариоза от низких ГТК в 2019–2020 гг. Сортовые особенности определяли 25,95 % общей дисперсии комплекса признаков ($F_{(4/75)} = 6,57$; $p < 0,001$) и заключались преимущественно в большей всхожести и урожайности сортов Кавалер, Спиридон и Захар, а также большей подверженности заболеванию ризоктониозом и фитофторозом сортов Ицил и, особенно, Розара. Обработка препаратом «Мивал-Агро» семенных клубней (2 г/т) и/или взрослых растений (20 г/га) определяла набор признаков на 8,80 % ($F_{(2/77)} = 3,71$; $p = 0,002$) и заключалась в увеличении всхожести, урожайности и снижении заболеваемости картофеля. В целом, анализ избыточности позволил наглядно представить основные закономерности в большом наборе данных и установить иерархию важности влияния контролируемых («Сорт», «Обработка») и неконтролируемых («Год») факторов на комплекс агробиологических показателей.*

Ключевые слова: *полевой опыт, «Мивал-Агро», многомерные методы, анализ избыточности, альтернариоз, ризоктониоз, фитофтороз, урожайность.*

Для цитирования: *Нохрин Д. Ю., Васильев А. А. Использование анализа избыточности для обобщения результатов факторного эксперимента на примере оценки влияния препарата «Мивал-Агро» на урожайность и болезни картофеля // Таврический вестник аграрной науки. 2022. № 4(32). С. 156–166. EDN: SBLGLT.*

For citation: *Nokhrin D. Yu., Vasiliev A. A. The use of redundancy analysis to generalize the results of the factor experiment on the example of evaluation of the influence of preparation "Mival-Agro" on potato yield and damage caused by diseases // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2022. No. 4(32). P. 156–166. EDN: SBLGLT.*

Введение

Для апробации различных технологических схем выращивания сельскохозяйственных культур традиционно используется эксперимент, а степень достоверности полученных результатов оценивается в ходе многофакторного дисперсионного анализа (ДА) [1, 2]. При небольшом числе контролируемых

агробиологических показателей, таких как урожайность и продуктивность, использование ДА является наиболее информативным и практически безальтернативным методом статистической обработки данных. Вместе с тем, по мере увеличения числа регистрируемых показателей появляется потребность в дополнительных методах анализа. Это обусловлено тем, что, во-первых, многофакторный ДА позволяет проанализировать только один показатель, в результате чего увеличивается как количество расчётов, так и объём описания результатов опыта в отчётах и публикациях. Во-вторых, в ходе серии ДА отдельных показателей не учитывается их возможная взаимная корреляция, а потому, несмотря на независимость самих анализов, полученные результаты будут в неявной форме содержать оценку влияния и других – вмешивающихся – факторов, которая в данном случае не может быть отделена от ошибки по всему дисперсионному комплексу. Поэтому представляется перспективным использование многомерных техник анализа данных, в частности анализа избыточности.

Анализ избыточности (Redundancy analysis, RDA) относится к группе ординационных методов, в основе которых лежит принцип уменьшения размерности (редукции) многомерных данных путём получения из наблюдаемых показателей меньшего числа новых более информативных переменных [3]. Поскольку пространство этих переменных является проекцией многомерного пространства исходных данных, такие статистические методы называют также проекционными. Наиболее распространённым из них является анализ главных компонент (PCA), широко применяемый для обработки данных в самых разных областях науки [4]. В отличие от него, RDA является ограниченной (constrained) техникой, позволяющей анализировать не всю присущую набору данных изменчивость, а лишь ту её часть, которая ограничена влиянием независимых переменных-регрессоров [5]. Таким образом, в отличие от канонической корреляции и подобно множественной регрессии, RDA обрабатывает два блока данных асимметрично: один из них является блоком регрессоров, а второй – блоком зависящих от них откликов [6].

Концептуально и статистически RDA является сочетанием методов PCA и множественной регрессии. Его разработка была осуществлена в 1960-70-е годы независимо К. Р. Рао, который назвал свой метод «анализом главных компонент с инструментальными переменными» [7] и А. Л. ван ден Волленбергом, разработавшим собственно «анализ избыточности» – метод извлечения факторов, который максимизировал меру избыточности Стюарта и Лове [8]. С появлением в 1988 г. пакета для персонального компьютера CANOCO [9] RDA прочно вошёл в практику экологических исследований для объяснения изменения комплексов биологических признаков и, особенно, состава сообществ организмов набором средовых факторов [5]. Однако он остаётся малоизвестным в других науках, включая сельскохозяйственные: согласно данным критического обзора применения статистических методов в аграрных науках, RDA применялся лишь в 0,8 % научных статей (13 из 1626 изученных) [10]. Вместе с тем, результаты отдельных работ указывают на высокую информативность использования данной статистической техники, в том числе в картофелеводстве [11–13].

Цель исследований – оценка возможностей анализа избыточности применительно к данным классического полевого опыта на картофеле.

Материалы и методы исследований

Исследования проведены в 2017–2020 гг. на опытном поле Южно-Уральского НИИ садоводства и картофелеводства – филиала ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН. Агроклиматические условия и почвенные характеристики в зоне эксперимента описаны в наших предыдущих работах [14–15]. Опыт включал четыре варианта: 1 – контроль, 2 – обработка препаратом «Мивал-Агро» семенных клубней (2 г/т), 3 –

обработка препаратом «Мивал-Агро» растений (20 г/га), 4 – обработка и растений, и клубней. Опыт закладывали в четырехкратной повторности с рандомизированным размещением вариантов, схемой посадки – 75 × 27 см и с фоновым внесением удобрений ($N_{172}P_{196}K_{227}$) из расчёта на урожайность 40 т/га. По гидротермическому коэффициенту Селянинова вегетационный период (май–август) 2017 г. характеризовался как достаточно влажный (ГТК = 1,44), 2018 и 2019 гг. – как недостаточно влажный (ГТК – 1,16 и 0,85 соответственно), а 2020 г. – как засушливый (ГТК = 0,39).

Статистическую обработку данных проводили методом многофакторного дисперсионного анализа [1], а также анализом избыточности RDA [3] с оценкой влияния трёх факторов («Год», «Сорт», «Обработка») на семь агробиологических показателей: полевую всхожесть, урожайность, альтернариоз, ризоктониоз и фитофтороз (оценивалась частота встречаемости и интенсивность поражения). В RDA оценивали влияние всех факторов по отдельности и одновременно. Статистическую значимость зависимости показателей от факторов в RDA проводили в рандомизационном варианте дисперсионного анализа (permutation ANOVA, $n = 999$). Расчёты выполнены в пакете vegan (version 2.6–2 [16]) для программно-статистической среды R. (version 4.0.3 [17]).

Результаты и их обсуждение

Усреднённые по годам и повторностям опыта результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Усреднённые за 2017–2020 гг. агробиологические характеристики пяти сортов картофеля в эксперименте с биостимулятором «Мивал-Агро»

Объект обработки в контроле (К) и эксперименте (Э)		Полевая всхожесть, %	Альтернариоз		Ризоктониоз		Фитофтороз		Урожайность, т/га
клубни	растения		Ч, %	И, %	Ч, %	И, %	Ч, %	И, %	
Розара									
К	К	94,5	22,1	11,6	40,7	16,0	14,3	22,1	29,44
К	Э	96,2	20,7	9,8	32,2	12,2	12,5	20,7	34,19
Э	К	94,8	18,4	7,1	37,4	14,0	9,5	18,4	33,60
Э	Э	96,3	15,6	6,2	27,0	10,6	7,9	15,6	36,03
Спиридон									
К	К	96,5	19,8	8,9	22,8	9,1	7,8	19,8	32,35
К	Э	96,9	18,1	7,7	16,3	6,9	5,9	18,1	37,00
Э	К	96,5	16,8	6,8	20,1	7,6	5,7	16,8	36,57
Э	Э	97,2	14,3	5,4	13,5	5,7	4,9	14,3	40,15
Ицил									
К	К	93,8	20,3	10,6	34,4	16,2	7,3	20,3	32,91
К	Э	95,7	19,6	7,9	25,4	11,7	7,0	19,6	36,88
Э	К	93,9	14,2	6,9	28,8	12,8	6,2	14,2	35,95
Э	Э	94,5	13,1	5,9	16,5	10,2	4,8	13,1	39,15
Кавалер									
К	К	96,6	18,8	9,6	15,7	7,3	6,1	18,8	31,29
К	Э	97,5	16,9	7,0	10,5	5,5	5,1	16,9	35,09
Э	К	96,4	12,5	6,2	12,4	6,0	5,2	12,5	34,52
Э	Э	97,2	11,0	5,5	7,6	4,5	3,9	11,0	37,33
Захар									
К	К	97,0	16,9	8,0	29,5	13,3	5,5	16,9	29,72
К	Э	98,1	13,3	6,8	20,6	9,2	4,5	13,3	33,89
Э	К	97,3	11,8	6,5	25,9	10,4	4,1	11,8	33,81
Э	Э	98,3	9,7	4,4	16,2	7,4	3,3	9,7	36,23
$НСР_{05}$		1,5	0,7	0,3	1,5	0,9	0,8	0,5	2,70

Примечание. *Ч – частота, И – интенсивность.*

В ходе анализа избыточности установлено, что три фактора объясняли в сумме 86,9 % изменчивости (количественно – дисперсии) агробиологических показателей. Рассмотрим вклад каждого фактора в отдельности.

Фактор «Год исследования» более чем на половину определял изменчивость рассматриваемых агробиологических показателей – 52,15 % общей дисперсии; его вклад был высоко статистически значим ($F_{(3/76)}$ = 27,61; p < 0,001). Первая каноническая ось RDA объясняла 38,7 % общей изменчивости зависимых показателей или 74,3 % дисперсии, задаваемой фактором «Год». Из ординационной диаграммы на рисунке 1 видно, что по этой оси наблюдалось разделение 2017–2018 гг., векторы которых направлены в правую положительную область графика, и 2019–2020 гг., векторы которых направлены в левую отрицательную область.

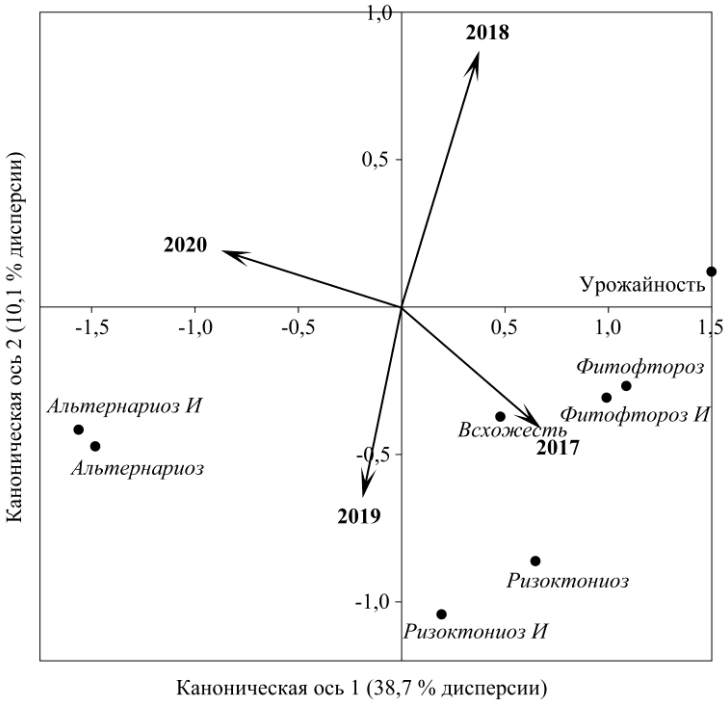

Рисунок 1 – Годы (векторы) и зависимые показатели (точки) в пространстве двух первых осей анализа избыточности

Исходя из проекций этих векторов на ось 1, представляющих собой факторные нагрузки, следует заключить, что максимальные различия во влиянии на зависимые показатели отмечались между 2017 г. (крайнее правое положение, нагрузка равна 0,662) и 2020 г. (крайнее левое положение, нагрузка равна -0,851). Так как важнейшим фактором, объясняющим влияние климатических условий года, является ГТК, нами были сопоставлены его значения с нагрузками на ось 1 (рисунок 2). Видно, что наблюдалось хорошее соответствие между значениями этих двух характеристик, имеющее в данном случае нелинейную, но монотонную и статистически значимую связь: коэффициент корреляции Кендалла τ = 1,0; p = 0,042. Это даёт основания связать ось 1 с погодными условиями и в первую очередь – с ГТК.

Из ординационной диаграммы рисунка 1 видно, что в годы высоких ГТК наблюдалась высокая урожайность: факторная метка этого показателя расположена в правой области, куда направлены векторы 2017–2018 гг.; и напротив, наименьшая урожайность отмечалась в 2020 г. Действительно, усреднённая по всем сортам урожайность составила в 2017–2020 гг.: 42,7, 39,9, 31,7 и 25,0 т/га соответственно.

Урожайность коррелировала с полевой всхожестью, на что указывает расположение меток этих показателей по одну сторону от оси 1, а также с поражённостью растений фитофторозом и ризоктониозом, Распространённость и интенсивность последнего была максимальна в 2017 и 2019 гг.

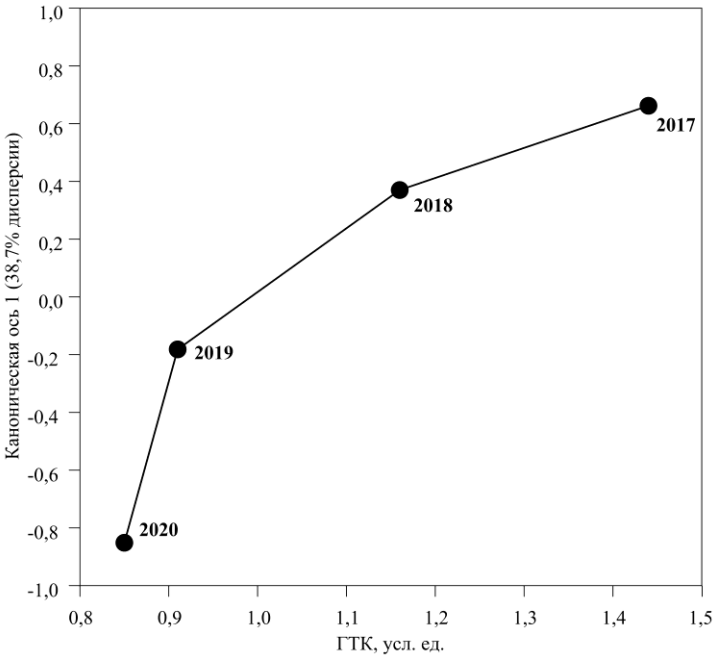

Рисунок 2 – Связь между гидротермическим коэффициентом и нагрузками показателя «Год» на ось 1 анализа избыточности

Напротив, максимальная заболеваемость растений альтернариозом наблюдалась в наиболее засушливый 2020 год (ГТК – 0,85), что хорошо согласуется с литературными данными о связи этого заболевания с высокой температурой воздуха [18]. Известно, что альтернариоз, или ранняя сухая пятнистость широко распространён в районах выращивания картофеля и томатов, но особенно в тропическом и умеренном климате, а заболеваемость растений сильно зависит от конкретных климатических условий [19–20]. Наибольшая концентрация спор *Alternaria* в воздухе наблюдалась при средней температуре выше 20 °С и средней относительной влажности ниже 70 % [21], а вклад высокой температуры и низкой относительной влажности в развитие заболевания составляет до 97 % [22]. В наших исследованиях 2013–2016 гг. в лесостепи Южного Урала наибольшая вредоносность альтернариоза отмечена в условиях жаркого и недостаточно влажного 2016 г. [23].

Таким образом, анализ избыточности позволил быстро и наглядно интерпретировать влияние фактора «Год» на агробиологические показатели и выйти на положения, согласующиеся с нашими предыдущими исследованиями и литературными данными.

Фактор «Сорт» стоял на втором месте по силе влияния на урожайность и заболеваемость картофеля: он определял 25,95 % общей дисперсии и был высоко статистически значим: $F_{(4/75)} = 6{,}57$; $p < 0{,}001$.

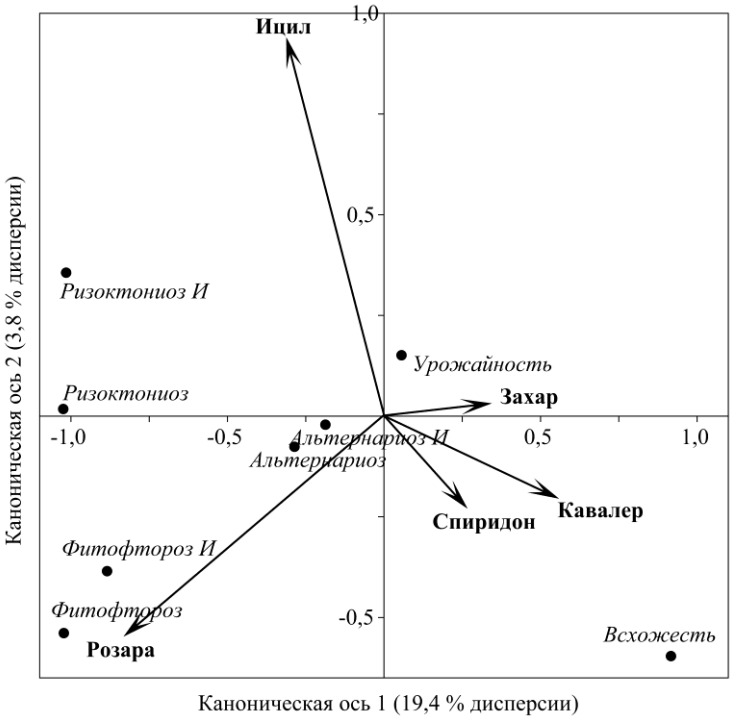

Рисунок 3 – Сорта картофеля (векторы) и зависимые показатели (точки) в пространстве двух первых осей анализа избыточности

Из рисунка 3 видно, что сорта слабо различались по урожайности: метка этого показателя близка к точке начала координат. Это хорошо согласуется с данными таблицы 1: в разных вариантах опыта урожайность изученных сортов варьировала в узких пределах 30–40 т/га. Также слабо сортовые особенности проявились по заболеваемости альтернариозом; тем не менее, видно, что поражаемость им сортов Захар, Кавалер и Спиридон должна быть несколько ниже, чем сортов Ицил и Розара. Действительно, усреднённые по вариантам опыта значения для частоты и интенсивности альтернариоза из табл.1 составили: для сорта Захар – 12,9 и 6,4, Кавалер – 14,8 и 7,1 %, Спиридон – 17,3 и 7,2 %, Ицил – 16,8 и 7,8 %, Розара – 19,2 и 8,7 %. Таким образом, даже для такого слабого влияния интерпретация графика оказалась близка к расчётам по таблице.

Ожидаемо сильнее она проявилась для крайних вариантов: видно, что сорт Розара имел максимальное поражение фитофторозом (11,1 % – частота и 19,2 % – интенсивность) и ризоктониозом (34,3 и 13,2 %), что почти в два раза превосходило аналогичные значения для сортов Захар, Кавалер и Спиридон. Для сорта Ицил была характерна меньшая полевая всхожесть (вектор этого сорта находится по другую сторону от нуля по оси 2 от метки «всхожесть») и высокая поражаемость ризоктониозом. Также низкой полевой всхожестью отличался сорт Розара и, напротив, максимальная всхожесть наблюдалась для сортов Кавалер и Захар, векторы которых направлены в сторону метки этого показателя. Подтверждение этим закономерностям легко обнаружить в таблице 1. Таким образом, и в отношении сортовых особенностей анализ избыточности предоставил компактную и правильную информацию.

Фактор «Обработка» занимал последнее место по доле объясняемой дисперсии (8,80 %), но также был высоко статистически значим ($F_{(2/77)}$ = 3,71; p = 0,002). Как видно из рис. 4, эффект обработки проявился вдоль первой оси. Судя по направлениям векторов и положению меток показателей можно заключить, что

обработка препаратом «Мивал-Агро» увеличивала полевую всхожесть и урожайность клубней, одновременно снижая распространённость и интенсивность болезней растений. При этом ось 2 показала специфику обработки клубней и растений: при обработке клубней увеличивалась всхожесть.

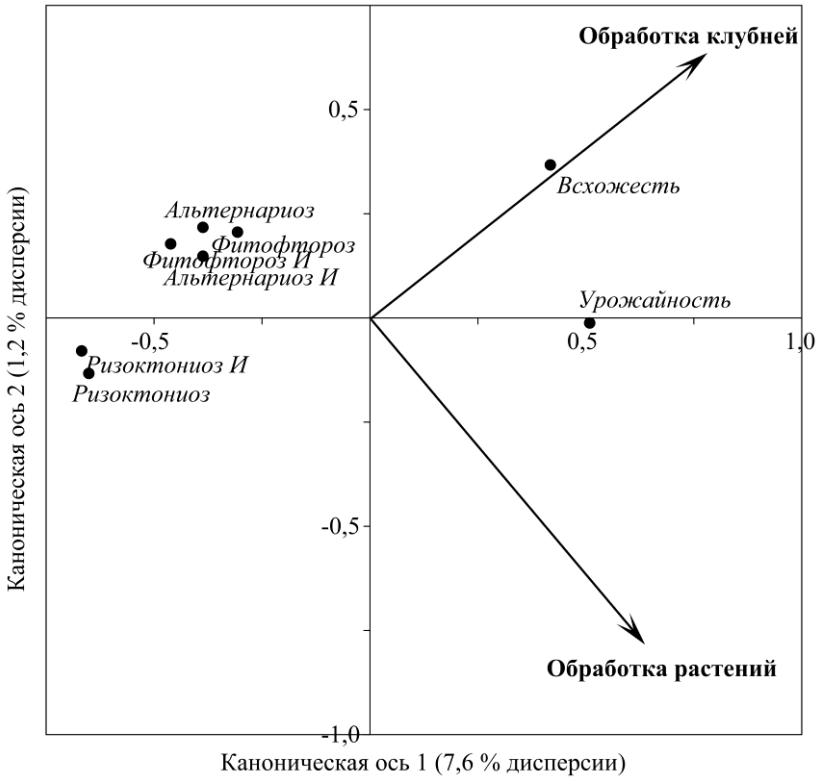

Рисунок 4 – Обработки препаратом «Мивал-Агро» (векторы) и зависимые показатели (точки) в пространстве двух первых осей анализа избыточности

Подытоживая результаты проведённых анализов, отметим, что анализ избыточности, будучи техникой разведочного или эксплораторного анализа данных, ценен, прежде всего, своими графическими результатами, которые помогают быстро определить основные закономерности в большом массиве данных. Кроме того, в сочетании с рандомизационным ДА, существует возможность статистической оценки значимости тестируемых эффектов. И, наконец, RDA позволяет выстроить иерархию степени влияния факторов на комплекс анализируемых признаков по доле объясняемой дисперсии (таблица 2).

Таблица 2 – Иерархия влияния факторов на урожайность и болезни картофеля

Фактор	Доля объяснённой дисперсии, %	Оценка значимости фактора
Год	52,15	$F_{(3/76)} = 27{,}61$; $p < 0{,}001$
Сорт	25,95	$F_{(4/75)} = 6{,}57$; $p < 0{,}001$
Обработка	8,80	$F_{(2/77)} = 3{,}71$; $p = 0{,}002$
Всего	86,90	$F_{(9/70)} = 27{,}61$; $p < 0{,}001$
Ошибка	13,1	–

Из таблицы 2 видно, что три фактора объясняли в сумме 86,9 % общей дисперсии агробиологических показателей. Это означает, что на случайную изменчивость и взаимодействия «генотип × среда» приходилось только 13,1 % дисперсии. Климатические условия, находящие отражение в факторе «Год»,

немногим более чем на половину определяли вариабельность рассматриваемых показателей, а сортовые особенности – примерно четверть. Следует отметить, что значение 25,95 % близко к величине 30 %, которая часто рассматривается в качестве нижней границы при оценке важности вклада фактора в корреляцию или регрессию на практике [24]. Несмотря на высокую статистическую значимость, обработка препаратом «Мивал-Агро» определяла изменчивость набора признаков только на 8,8 %, что в 2,9 раз меньше влияния сорта. Это говорит о том, что, по крайней мере, в изученных нами условиях правильный выбор сорта картофеля может примерно в три раза сильнее сказаться на устойчивости растений к болезням и на урожае, т.е. перекрыть эффект внесения биостимулятора. Это ещё раз подчеркивает первостепенную роль сорта в повышении урожайности и качества продукции, что отмечается многими исследователями [25–26].

Выводы

Анализ избыточности является высокоинформативной многомерной техникой статистического анализа данных, которая позволяет оценить влияние изучаемых факторов на весь комплекс интересующих признаков и дополнить результаты классического дисперсионного анализа.

С использованием анализа избыточности оценено влияние факторов «Год», «Сорт» и «Обработка препаратом «Мивал-Агро»» на распространённость и интенсивность болезней картофеля, всхожесть и урожайность. Установлено, что вклад этих факторов был высоко статистически значим, и определял комплекс признаков на 52,15 %, 25,95 % и 8,80 % соответственно.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН № 0773-2019-0024 «Создание и усовершенствование адаптивных технологий возделывания экономически значимых сельскохозяйственных культур на основе оптимизации биотических и абиотических факторов».

Литература

1. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
2. Gomez K. A., Gomez A. A. Statistical procedures for agricultural research. NY: John Wiley & Sons, 1984. 680 p.
3. Palmer M. W. Ordination Methods – an overview 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ordination.okstate.edu/overview.htm org (дата обращения: 20.06.2022)
4. Jolliffé I. T. Principal component analysis. NY: Springer-Verlag, 2002. 486 p.
5. Legendre P., Legendre L. Numerical Ecology. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 1998. 853 p.
6. Desarbo W. S., Jedidi K. Redundancy analysis // Encyclopedia of statistical sciences. Vol. 11 (Rectangular distribution to Sequential estimation). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. P. 7031–7035.
7. Rao C. R. The use and interpretation of principal component analysis in applied research // Sankhya. 1964. Ser. A. Vol. 26. P. 329–359.
8. Van den Wollenberg A.L. Redundancy analysis, an alternative for canonical correlation analysis // Psychometrika. 1977. Vol. 42. No. 2. P. 207–219. DOI: 10.1007/BF02294050.
9. Braak C.J.F. ter. CANOCO – a FORTRAN program for canonical community ordination by [partial] [detrended] [canonical] correspondence analysis, principal components analysis and redundancy analysis (version 2.1). Technical report LWA-88-02. Wageningen: Ministerie van Landbouw en Visserij, Groep Landbouwwiskunde MLV, 1988. 95 p.
10. Honfo S. H, Houetohossou A., Assogbadjo A., Kakaï R. G. Effective use of statistical tools in agricultural sciences: a critical review of multivariate modelling methods // Journal of Applied Biosciences. 2019. Vol. 142. P. 14564–14574. DOI: 10.4314/jab.v142i1.10.
11. Tétard-Jones C., Edwards M. G., Rempelos L., Gatehouse A. M. R., Eyre M., Wilcockson S. J., Leifert C. Effects of previous crop management, fertilization regime and water supply on potato tuber proteome and yield // Agronomy. 2013. Vol. 3. P. 59–85. DOI: 10.3390/agronomy3010059.
12. Wang X., Duan Yu, Zhang J., Ciampitti I. A., Cui J., Qiu S., Xu X., Zhao S., He P. Response of potato yield, soil chemical and microbial properties to different rotation sequences of green manure-potato

cropping in North China // Soil and Tillage Research. 2022. Vol. 217. Art. No. 105273. DOI: 10.1016/j.still.2021.105273.

13. Zhao J., Zhang D., Yang Y., Pan Y., Zhao D., Zhu J. Dissecting the effect of continuous cropping of potato on soil bacterial communities as revealed by high-throughput sequencing // PLoS ONE. 2020. Vol. 15 (5). Art. No. e0233356. DOI: 10.1371/journal.pone.0233356.

14. Васильев А. А., Горбунов А. К. Проблемы получения планируемых урожаев картофеля на Южном Урале // Российская сельскохозяйственная наука. 2018. № 5. С. 17–21. DOI: 10.31857/S250026270000629-6.

15. Глаз Н. В., Васильев А. А., Горбунов А. К., Мушинский А. А. Влияние биостимулятора Мивал-Агро на урожайность и семенную продуктивность картофеля // Дальневосточный аграрный вестник. 2019. Т. 52. № 4. С. 23–31. DOI: 10.24411/1999-6837-2019-14048.

16. Oksanen J., Blanchet F. G., Friendly M., Kindt R., Legendre P. Package ‘vegan’. Community Ecology Package Version 2.6-2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/vegandevs/vegan (дата обращения: 20.06.2022).

17. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Austria, Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.R-project.org (дата обращения: 20.06.2022)

18. Васильева С. В., Зейрук В. Н., Белов Г. Л., Деревягина М. К., Мальцев С. В. Альтернариоз картофеля в условиях Московской области и меры борьбы с ним // Агрохимический вестник. 2022. № 2. С. 62–66. DOI: 10.24412/1029-2551-2022-2-012.

19. Escuredo O., Seijo M. C., Fernández-González M., Iglesias I. Effects of meteorological factors on the levels of Alternaria spores on a potato crop // Int. J. Biometeorol. 2011. Vol. 55. P. 243–252. DOI: 10.1007/s00484-010-0330-4.

20. Van der Waals J. E., Korsten L., Aveling T. A. S. A review of early blight of potato // African Plant Protection. 2001. Vol. 7. No. 2. P. 91–102.

21. Escuredo O., Seijo-Rodríguez A., Meno L. Seasonal dynamics of Alternaria during the potato growing cycle and the influence of weather on the early blight disease in North-West Spain // American Journal of Potato Research. 2019. Vol. 96. No. 6. P. 532–540. DOI: 10.1007/s12230-019-09739-2.

22. Hussain R., Gupta V., Arora J.K. Weather based prediction of early blight of potato caused by *Alternaria solani* // Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America. 2022. Vol. 53. No 2. P. 351–6360.

23. Васильев А. А., Мушинский А. А., Горбунов А. К. Влияние биостимулятора Мивал-Агро на урожайность картофеля на Южном Урале // АПК России. 2016. Т. 23. № 4. С. 773–777.

24. Дергилёв В. П. Создание и оценка гибридного материала для селекции картофеля на Южном Урале. Дис. … канд. с.-х. наук. Омск: Южно-уральский научно-исследовательский институт плодоовощеводства и картофелеводства. 2004. 151 с.

25. Логинов Ю. П., Гайзатлин А. С. Сорт картофеля – основной элемент в развитии органического земледелия // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. Т. 82. № 2. С. 87–92.

26. Молявко А. А., Жевора С. В., Марухленко А. В., Борисова Н. П., Ториков В. Е. Адаптивность сортов картофеля – важный фактор урожайности // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. Т. 89. № 1. С. 17–23. DOI: 10.52691/2500-2651-2022-89-1-17-23.

References

1. Dospekhov B. A. Methods of field research. Moscow: Agropromizdat, 1985. 351 p.

2. Gomez K. A., Gomez A. A. Statistical procedures for agricultural research. NY: John Wiley & Sons, 1984. 680 p.

3. Palmer M. W. Ordination Methods – an overview 2022. [Electronic resource]. Access point: http://ordination.okstate.edu/overview.htm org (reference’s date 20.06.2022)

4. Jolliffé I. T. Principal component analysis. NY: Springer-Verlag, 2002. 486 p.

5. Legendre P., Legendre L. Numerical Ecology. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 1998. 853 p.

6. Desarbo W. S., Jedidi K. Redundancy analysis // Encyclopedia of statistical sciences. Vol. 11 (Rectangular distribution to Sequential estimation). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. P. 7031–7035.

7. Rao C. R. The use and interpretation of principal component analysis in applied research // Sankhya. 1964. Ser. A. Vol. 26. P. 329–359.

8. Van den Wollenberg, A.L. Redundancy analysis, an alternative for canonical correlation analysis // Psychometrika. 1977. Vol. 42. No. 2. P. 207–219. DOI: 10.1007/BF02294050.

9. Braak, C.J.F. ter. CANOCO – a FORTRAN program for canonical community ordination by [partial] [detrended] [canonical] correspondence analysis, principal components analysis and redundancy analysis (version 2.1). Technical report LWA-88-02. Wageningen: Ministerie van Landbouw en Visserij, Groep Landbouwwiskunde MLV, 1988. 95 p.

10. Honfo S. H., Houetohossou A., Assogbadjo A., Kakaï R. G. Effective use of statistical tools in agricultural sciences: a critical review of multivariate modelling methods // Journal of Applied Biosciences. 2019. Vol. 142. P. 14564–14574. DOI: 10.4314/jab.v142i1.10.

11. Tétard-Jones C., Edwards M. G., Rempelos L., Gatehouse A. M. R., Eyre M., Wilcockson S. J., Leifert C. Effects of previous crop management, fertilization regime and water supply on potato tuber proteome and yield // Agronomy. 2013. Vol. 3. P. 59–85. DOI: 10.3390/agronomy3010059.

12. Wang X., Duan Yu, Zhang J., Ciampitti I. A., Cui J., Qiu S., Xu X., Zhao S., He P. Response of potato yield, soil chemical and microbial properties to different rotation sequences of green manure-potato cropping in North China // Soil and Tillage Research. 2022. Vol. 217. Art. No. 105273. DOI: 10.1016/j.still.2021.105273.

13. Zhao J., Zhang D., Yang Y., Pan Y., Zhao D., Zhu J. Dissecting the effect of continuous cropping of potato on soil bacterial communities as revealed by high-throughput sequencing // PLoS ONE. 2020. Vol. 15. No. 5. Art. No. e0233356. DOI: 10.1371/journal.pone.0233356.

14. Vasiliev A. A., Gorbunov A. K. Problems of obtaining planned potato crops in the Southern Urals // Russian Agricultural Science. 2018. No. 5. P. 17–21. DOI: 10.31857/S250026270000629-6.

15. Glaz N. V., Vasiliev A. A., Gorbunov A. K., Mushinsky A. A. Effect of biostimulant Mival-Agro on potato yield and seed productivity // Far Eastern Agrarian Herald. 2019. Vol. 52. No. 4. P. 23–31. DOI: 10.24411/1999-6837-2019-14048.

16. Oksanen J., Blanchet F. G., Friendly M., Kindt R., Legendre P. Package 'vegan'. Community Ecology Package Version 2.6-2. [Electronic resource]. Access point: https://github.com/vegandevs/vegan (reference's date 20.06.2022).

17. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Austria, Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016 [Electronic resource]. Access point: https://www.R-project.org (reference's date 20.06.2022)

18. Vasilyeva S. V., Zeyruk V. N., Belov G. L., Derevyagina M. K., Maltsev S. V. Potato alternariosis under conditions of the Moscow region and measures for control it // Agrochemical Herald. 2022. No. 2. P. 62–66. DOI: 10.24412/1029-2551-2022-2-012.

19. Escuredo O., Seijo M. C., Fernández-González M., Iglesias I. Effects of meteorological factors on the levels of Alternaria spores on a potato crop // Int. J. Biometeorol. 2011. Vol. 55. P. 243–252. DOI: 10.1007/s00484-010-0330-4.

20. Van der Waals J. E., Korsten L., Aveling T. A. S. A review of early blight of potato // African Plant Protection. 2001. Vol. 7. No. 2. P. 91–102.

21. Escuredo O., Seijo-Rodríguez A., Meno L. Seasonal dynamics of Alternaria during the potato growing cycle and the influence of weather on the early blight disease in North-West Spain // American Journal of Potato Research. 2019. Vol. 96. No. 6. P. 532–540. DOI: 10.1007/s12230-019-09739-2.

22. Hussain R., Gupta V., Arora J.K. Weather based prediction of early blight of potato caused by *Alternaria solani* // Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America. 2022. Vol. 53(2). P. 6351–6360.

23. Vasiliev A. A., Mushinsky A. A., Gorbunov A. K. The influence of biostimulator Mival-Agro on potato yield in the South Ural // Agro-Industrial Complex of Russia. 2016. Vol. 23. No. 4. P. 773–777.

24. Dergilev V. P. Creation and evaluation of hybrid material for potato breeding in the Southern Urals. Diss. … Cand. Sc. (Agr.). Omsk: South Ural Research Institute of Horticulture and Potato Growing, 2004. 151 p.

25. Loginov Yu. P., Gayzatlin A. S. Potato variety is a key element in the development of organic farming // Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2020. Vol. 82. No. 2. P. 87–92.

26. Molyavko A. A., Zhevora S. V., Marukhlenko A. V., Borisova N. P., Torikov V. E. Adaptability of potato varieties as an important factor of sod-podzolic sandy loam soil // Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2022. Vol. 89. No. 1. P. 17–23. DOI: 10.52691/2500-2651-2022-89-1-17-23.

UDC 519.237:635.21:661.162.6

Nokhrin D. Yu., Vasiliev A. A.

THE USE OF REDUNDANCY ANALYSIS TO GENERALIZE THE RESULTS OF THE FACTOR EXPERIMENT ON THE EXAMPLE OF EVALUATION OF THE INFLUENCE OF PREPARATION "MIVAL-AGRO" ON POTATO YIELD AND DAMAGE CAUSED BY DISEASES

Summary. *In the statistical analysis of the data from agricultural experiments, together with ANOVA, it is efficient to use multivariate methods, since they take into account the correlated change in several characteristics in response to various environmental and*

experimental factors. For this purpose, the article discussed the use of redundancy analysis (RDA). We analyzed the results of field experiments conducted in 2017-2020 and evaluated the influence of factors "Year" (4 gradations), "Variety" (5) and "Treatment with biostimulant" (3) on germination capacity of potato plants, their yield and susceptibility to diseases (frequency and intensity of early blight (Alternaria), Rhizoctonia disease and late blight). Factor "Year" was statistically significant ($F_{(3/76)}$ = 27.61; P < 0.001) and determined the variability (variance) of the set of features by 52.15 %. An analysis of the ordination diagrams made it possible to relate this effect to the Selyaninov Hydrothermal Coefficient (HTC) and to reveal the dependence of potato early blight on low HTC in 2019–2020. Factor "Variety" determined 25.95 % of the total variance of the complex of traits ($F_{(4/75)}$ = 6.57; P < 0.001). Main varietal features were as follows: higher germination capacity and yield of varieties 'Kavaler', 'Spiridon' and 'Zakhar'; greater susceptibility to Rhizoctonia disease and late blight of varieties 'Itsil' and, especially, 'Rosara'. Treatment of seed tubers (2 g/t) and/or "adult" plants (20 g/ha) with preparation "Mival-Agro" determined the set of traits by 8.80 % ($F_{(2/77)}$ = 3.71; P = 0.002) and consisted in increasing germination capacity of potato plants and their yield, as well as reducing the amount of damage caused by diseases. In general, redundancy analysis made it possible to visualize the key patterns in a large dataset and establish a hierarchy of controlled ("Variety", "Treatment") and uncontrolled ("Year") factors on a set of agrobiological indicators.

Keywords: *field experiment, "Mival-Agro", multivariate methods, redundancy analysis, early blight (Alternaria), Rhizoctonia disease of potato, late blight of potato, yield.*

Нохрин Денис Юрьевич, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории инструментальных методов исследований Южно-Уральского научно-исследовательского института садоводства и картофелеводства – филиала ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»; 620142, Россия, Екатеринбург, ул. Белинского, 112-а; e-mail: nokhrin8@mail.ru.

Васильев Александр Анатольевич, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник отдела картофелеводства Южно-Уральского научно-исследовательского института садоводства и картофелеводства – филиала ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»; 620142, Россия, Екатеринбург, ул. Белинского, 112-а; e-mail: kartofel_chel@mail.ru.

Nokhrin Denis Yurievich, Cand. Sc. (Biol.), leading researcher of the Laboratory of instrumental research methods, South Ural Research Institute of Horticulture and Potato Growing – branch of the FSBSI "Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences"; 112-a, Belinsky str. Yekaterinburg, 620142, Russia; e-mail: nokhrin8@mail.ru.

Vasiliev Aleksandr Anatolievich, Dr. Sc. (Agr.), chief researcher of the Department of potato growing, South Ural Research Institute of Horticulture and Potato Growing – branch of the FSBSI "Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences"; 112-a, Belinsky str. Yekaterinburg, 620142, Russia; kartofel_chel@mail.ru.

Дата поступления в редакцию – 27.07.2022.
Дата принятия к печати – 21.08.2022.