

УДК 631.421

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПОЛЕВЫХ ОПЫТОВ

© 2019 г. А. Н. Савченко

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
109428 Москва, 1-й Институтский проезд, 5, Россия

E-mail: serebro47@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.08.2018 г.

После доработки 25.09.2018 г.

Принята к публикации 12.10.2018 г.

Учет множества критериев в полевых опытах (не только урожая культур, но и других критериев, характеризующих его качество, а также свойства почвы, влияние вредителей, болезней и сорной растительности) позволяет выбрать лучшие обработки по всем критериям одновременно. Это обеспечивает многокритериальный анализ. Необходимость его применения в агрономии показана на примерах интерпретации данных многолетних полевых опытов со многими критериями.

Ключевые слова: многокритериальный анализ, данные полевых опытов.

DOI: 10.1134/S0002188119010083

ВВЕДЕНИЕ

В полевых опытах агрономии учитывают не только урожай, но и другие критерии, характеризующие его качество, а также свойства почвы, количество вредителей, болезней, сорняков. При интерпретации подобных данных возникает вопрос: какие обработки опытов лучше по урожайности и другим критериям одновременно?

Получить ответ с помощью традиционных методов затруднительно. Например, методике проведения полевых опытов с использованием дисперсионного анализа [1] уделяли большое внимание в зарубежной [2, 3] и отечественной [4, 5] литературе. Однако такой однокритериальный подход дает точный ответ на другой вопрос: что влияет на урожай больше — условия окружающей среды, варианты или их взаимодействие?

В агрономии применяют и методы многомерного анализа, но с другой целью: для редукции данных пассивных наблюдений. Например, в исследованиях биометрических признаков деревьев используют метод главных компонент [6], факторный [7] или дискриминантный [8] анализы.

Ответ на поставленный вопрос дает многокритериальный анализ [9]. Дисперсионный анализ, с точки зрения поиска оптимальных решений, является его частным случаем. При этом число изменяющихся параметров учитывают не более 4-х, а критерий выбора всего один — урожайность различных культур или севооборотов.

Цель работы — показать необходимость применения многокритериального анализа в агрономии на примерах интерпретации данных многолетних

полевых опытов со многими критериями. Использованные результаты были получены с различными целями, в различных условиях. Продолжительность этих исследований также была различной.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении многокритериального анализа все критерии формулируют на минимум. Это делают с целью удобства поиска множества Парето. Но в агрономии на минимум *a priori* сформулировано количество вредителей, болезней и сорняков. Урожайность, содержание гумуса в почве и многие другие критерии сформулированы на максимум.

A posteriori урожайность целесообразно формулировать, на максимум. Но другие критерии, которые *a priori* сформулированы на максимум, необходимо сформулировать на минимум. Для этого удобно использовать критерии типа потерь: например, потери гумуса почвы, потери клейковины зерна и т.п.

Затем необходимо решить 4 задачи.

1. Упорядочение данных. Для этого рассчитывают коэффициенты парной линейной корреляции критериев по формуле:

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X}) \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ijk} - \bar{Y}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ijk} - \bar{Y}_k)^2}},$$

$$k = 1, 2, \dots, p;$$

где x_{ij} — урожайность культур или севооборотов в i -обработке опыта при j — реализации, ц/га; $\bar{X}$ — средняя урожайность культуры или севооборота в опыте, ц/га; y_{ijk} — величины k критерия в i -обработке, при j -реализации, ед.; $\bar{Y}_k$ — средняя величина критерия в опыте, ед.; n_i — количество реализаций в обработке или повторность опыта, шт.; m — количество обработок опыта, шт.; p — количество дополнительных критериев, шт.

Данные упорядочивают по средней урожайности вариантов:

$$\bar{x}_{(1)} \geq \bar{x}_{(2)} \geq \dots \geq \bar{x}_{(m)},$$

где $\bar{x}_{(1)} = \max(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m)$; $\bar{x}_{(m)} = \min(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m)$; a — порядковый номер варианта, соответствующий обработке опыта, $a = (1), (2), \dots, (m)$; в этом случае $a \sim i$.

Критерии упорядочивают в соответствии со степенью их корреляции с урожаем:

$$|r_{(1)}| \leq |r_{(2)}| \leq \dots, |r_{(p)}|,$$

где $r_{(b)}$ — коэффициент корреляции, соответствующий критерию, $b = (1), (2), \dots, (p)$; в этом случае $b \sim k$.

2. Оценка возможности проведения многокритериального анализа.

Многокритериальный анализ возможен, если корреляция критериев находится в пределах $0 < |r_k| < 0.8$; $k = 1, 2, \dots, p$.

Однако если корреляция критериев высока

$$0.8 \leq |r_k| \leq 1.0; \quad k = 1, 2, \dots, p,$$

многокритериальный анализ практически невозможен. Такие критерии не противоречат урожайности. Построить множество Парето по таким данным скорее всего не удастся. Окончательное решение о возможности проведения многокритериального анализа зависит от того, удастся ли построить множество Парето по данным конкретного полевого опыта.

3. Поиск множества Парето.

Множество Парето формируется следующим образом: строка таблицы, отсортированной по урожайности, начиная со второй, удаляется, если она хуже предыдущей по всем дополнительным критериям одновременно. Если строка лучше или не хуже предыдущей хотя бы по одному критерию, она остается. Смысл этой операции заключается в том, что величины критериев в альтернативных вариантах должны быть не меньше.

Очевидно, что с учетом формулировки дополнительных критериев на минимум они должны

иметь меньшие значения. При анализе данных полевых опытов может возникать и равенство всех критериев одновременно.

4. Проведение статистических тестов.

В двухвыборочных тестах с парными сравнениями равенство дисперсий и средней урожайности и других критериев одновременно определяют с помощью статистики Фишера—Снедекора. Для средних используют статистику Стьюдента. Примеры даны в работе [5].

В групповых сравнениях с одинаковым объемом выборки для проверки равенства дисперсий используют другие, менее известные статистики: Cochran W.G. [10], Hartley H.O. [11], Levene H. [12]. Однако если объем сравниваемых выборок различен, для проведения тестов на равенство дисперсий используют статистику Bartlett M.S. [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [14] учитывали более 100 критериев. Но это исследование по ряду причин нельзя считать типичным. Типичные результаты, полученные с помощью многокритериального анализа, представлены 3-мя примерами интерпретации данных полевых опытов: по агрономии [15], земледелию [16] и агрохимии [17].

В первом опыте [15] с системами удобрения в Смоленской обл. в зернотравопропашном севообороте учитывали урожайность и содержание гумуса в почве, а также 3 функциональных ограничения (табл. 1). С их помощью контролировали подвижные формы соединений в почве — азота, фосфора, калия. Не систематически в почве учитывали содержание кадмия, свинца, хрома и цинка. Но эти критерии играли роль справочных характеристик. Этот опыт проводили в течение 23 лет.

Для изучения 48 обработок была использована схема 1/27 реплики полного факторного эксперимента (ПФЭ). При этом варьировали дозы 3-х видов минеральных удобрений: азота, фосфора, калия и одного вида органического удобрения — навоза крупного рогатого скота. Повторность опытов трехкратная.

Содержание гумуса в почве в вариантах учитывали в начале и конце опыта: до опыта — 1.23–1.51% С, после — 0.90–1.35% С, т.е. его содержание уменьшилось при всех обработках, кроме одной. Потери составили от 5.4 до 35.7% С.

Однако корреляция потерь гумуса с урожайностью была средней: $r = 0.48$. Построили множество Парето. В 1-й строке: урожайность — 49.0 ц/га, потери гумуса — 0.23%. Во 2-й строке: урожайность меньше — 48.3 ц/га, потери гумуса не меньше —

Таблица 1. Данные опыта [15]

Строка, №	Урожайность, ц к.е./га	Содержание гумуса в конце опыта, % C	Потери гумуса, %	pH _{KCl}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Обработка*
					мг/100 г		
1	49.0	1.03	0.23	5.0	50.0	25.9	2555
2	48.3	1.13	0.23	5.9	40.5	15.7	1444
3	46.9	1.14	0.14	5.0	35.0	14.5	5222
4	46.8	1.15	0.16	5.3	32.0	3.0	2225
5	46.3	0.95	0.44	5.1	24.5	6.3	3330
6	46.3	1.06	0.33	5.6	26.9	15.9	1144
7	46.1	1.10	0.13	5.9	19.0	6.0	4114
8	45.9	0.97	0.43	5.4	50.5	3.7	2522
9	45.7	1.11	0.32	5.4	52.5	12.3	2552
10	45.3	1.11	0.23	5.7	31.5	4.9	1414
11	45.2	1.00	0.32	5.6	15.3	10.0	1141
12	45.0	0.93	0.43	5.1	16.0	7.0	3030
13	45.0	1.13	0.29	5.7	24.5	2.0	4144
14	45.0	1.01	0.28	5.3	30.5	13.0	2252
15	44.8	1.01	0.21	5.8	30.5	12.4	3333
16	44.7	1.02	0.41	5.4	22.5	32.5	4111
17	44.7	1.08	0.32	5.8	26.5	13.0	2222
18	44.7	1.22	0.07	5.3	48.0	13.0	2525
19	44.5	0.94	0.37	5.5	31.0	21.8	1441
20	44.3	1.09	0.27	5.6	19.0	2.0	4414
21	44.3	1.13	0.32	5.8	29.0	4.6	5252
22	44.3	1.02	0.30	5.2	31.0	16.3	5552
23	44.2	1.01	0.34	5.8	8.0	25.2	3033
24	44.1	1.00	0.44	5.0	16.0	9.2	3003
25	44.1	1.05	0.25	5.4	26.9	3.4	1114
26	44.0	1.15	0.16	5.8	43.5	23.9	4444
27	44.0	1.04	0.31	5.3	26.9	13.0	2255
28	43.9	0.95	0.43	5.5	27.0	10.0	1411
29	43.7	1.03	0.30	5.6	24.5	14.2	4141
30	43.7	1.09	0.26	5.2	36.5	23.9	5255
31	43.6	0.92	0.38	5.3	20.0	12.7	1111
32	43.6	0.98	0.31	5.3	44.5	15.0	5525
33	43.2	0.98	0.32	5.8	27.0	23.6	4411
34	43.2	0.91	0.49	5.3	27.5	15.1	4441
35	43.0	1.04	0.40	5.2	43.0	13.0	5522
36	42.9	1.05	0.25	5.7	26.9	19.8	3303
37	42.5	1.07	0.27	5.5	32.0	4.6	5222

Таблица 1. Окончание

Строка, №	Урожайность, ц к.е./га	Содержание гумуса в конце опыта, % С	Потери гумуса, %	рН _{KCl}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Обработка*
					мг/100 г		
38	41.9	1.35	−0.02	4.9	49.5	25.1	5555
39	41.5	0.94	0.44	5.7	23.5	5.4	0303
40	41.3	0.93	0.35	5.7	39.6	25.6	0333
41	40.9	1.08	0.43	5.6	16.0	21.1	0033
42	40.0	1.00	0.34	5.1	21.0	7.0	3300
43	39.9	0.96	0.51	5.3	16.5	4.9	0330
44	39.9	0.90	0.48	5.4	17.0	21.1	0003
45	38.4	0.95	0.44	5.2	8.0	4.0	3000
46	37.2	0.93	0.47	5.7	7.5	4.0	0030
47	35.7	0.95	0.42	5.0	26.0	2.5	0300
48	33.4	0.90	0.50	5.6	7.0	2.5	0000
r _k	—	0.41	−0.48	—	—	—	—

* Дозы азота, фосфора, калия и навоза. Единичная доза: под картофель и озимую рожь — (NPK)45, навоз 20 т/га; под ячмень, овес и горохоовсяную смесь — (NPK)30, навоз 20 т/га; под озимую пшеницу — (NPK)45, навоз 15 т/га.

Таблица 2. Редукция данных опыта [15]

№	Урожайность, ц к.е./га	Потери гумуса, %	рН _{KCl}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Обработка
				мг/100 г		
1	49.0	0.23	5.0	50.0	25.9	2555
2	48.3	0.23	5.9	40.5	15.7	1444
3	46.9	0.14	5.0	35.0	14.5	5222
7	46.1	0.13	5.9	19.0	6.0	4114
18	44.7	0.07	5.3	48.0	13.0	2525
38	41.9	−0.02	4.9	49.5	25.1	5555

0.23%. Строка осталась. В 3-й строке: урожайность меньше — 46.9 ц/га, но и потери гумуса меньше — 0.14%. И эта строка осталась. В результате обработки всего массива данных к строкам 1, 2, 3 (табл. 1) добавилось еще 3 строки: 7, 18 и 38 (табл. 2). Это и есть множество Парето.

Получить преимущество одновременно для 2-х главных критериев на множестве Парето нельзя. Но любой вариант на этом множестве дает выигрыш либо по величине урожайности, либо по содержанию гумуса в почве. Проигрывая по урожайности от 49.0 до 41.9 ц к.е./га, выигрываем при сохранении гумуса от потерь −0.23% С до накопления +0.02% С, и наоборот.

Например, “сегодня” важно получить максимальную урожайность — это варианты 2555, 1444,

5222, 4144, 2525. Однако если урожайность можно получить и “завтра”, то запасы гумуса для этого следует накапливать “сегодня”, решение — вариант 5555. Это вариант самый дорогой, но единственный, обеспечивающий накопление гумуса в почве.

Редукция данных показала: органо-минеральная система удобрения превосходила органическую и минеральную системы по урожайности и потерям гумуса почвы одновременно. Хотя гумус накапливался лишь в одном, наиболее дорогом, варианте внесения удобрений. Вопрос о том, как улучшить оба критерия без больших затрат, в задачу исследования не входил. Следует отметить, что данных для проведения тестов на значимость отличий дисперсий и средних величин урожайно-

Таблица 3. Данные опыта [16]

Строка, №	Урожайность, ц/га	Сорняки, г/м ²	Натура зерна, г/л	Белок в зерне, %	Клейковина, %	Стекловидность, %	ИДК, ед.	Вариант (способ обработки почвы, дозы удобрений, гербицид)
1	66.9	10.2	825	14.0	28.3	65	74	Отвальная, N240P180K120, секатор
2	65.6	12.1	823	14.0	28.2	64	74	Отвальная, N240P180K120, 2.4Д
3	62.8	14.5	821	13.8	27.7	64	73	Отвальная, N240P180K120
4	62.7	11.2	822	13.8	28.4	64	73	Мелкая, N240P180K120, секатор
5	61.9	12.2	821	13.8	28.3	63	73	Мелкая, N240P180K120, 2.4Д
6	59.8	13.9	820	13.5	28.1	61	72	Мелкая, N240P180K120, секатор
7	59.8	26.4	813	13.6	27.9	59	73	Нулевая, N240P180K120
8	59.1	19.4	813	12.9	25.4	61	71	Отвальная, N120P90K60, секатор
9	58.5	27.6	813	13.5	27.6	59	72	Нулевая, N240P180K120, 2.4Д
10	57.6	20.6	813	12.9	25.3	61	70	Отвальная, N120P90K60, 2.4Д
11	56.1	13.6	813	13.1	25.7	61	70	Мелкая, N120P90K60, секатор
12	56.0	31.8	812	13.3	27.5	58	71	Нулевая, N240P180K120, 2.4Д
13	55.5	30.4	812	12.7	24.8	58	68	Отвальная, N120P90K60
14	55.2	15.3	812	13.1	25.7	60	70	Мелкая, N120P90K60, 2.4Д
15	52.7	26.9	811	13.0	25.2	59	68	Мелкая, N120P90K60
16	52.3	33.9	807	12.5	25.4	58	68	Нулевая, N120P90K60, секатор
17	51.4	35.9	806	12.4	25.3	57	68	Нулевая, N120P90K60, 2.4Д
18	49.9	47.3	805	12.3	24.8	56	67	Нулевая, N120P90K60
19	39.0	45.7	805	12.4	23.4	55	65	Отвальная, секатор
20	38.2	32.4	804	12.2	23.5	56	65	Мелкая, секатор
21	37.8	46.8	805	12.2	23.3	55	65	Отвальная, 2.4Д
22	37.5	36.8	804	12.1	23.4	55	65	Мелкая, 2.4Д
23	36.7	86.6	803	12.1	23.1	53	62	Отвальная
24	36.6	45.8	802	12.2	23.3	53	65	Нулевая, секатор
25	35.6	49.4	801	12.1	23.3	53	64	Нулевая, 2.4Д
26	33.6	55.8	803	12.0	23.1	54	64	Мелкая
27	33.4	92.6	800	11.9	23.1	52	63	Нулевая
r_k	—	−0.83	0.92	0.93	0.93	0.94	0.97	—

сти и других критериев в публикации оказалось недостаточно.

В опыте [16] по влиянию на урожайность озимой пшеницы сорта “Дельта” способов обработки почвы, доз минеральных удобрений и гербицидов дополнительно учитывали 6 различных критериев: количество сорняков, натура и стекловидность зерна, содержание в зерне белка и клейковины, а также показатель деформации клейковины (**ИДК**). Опыт проведен на Кубани. Данные, упорядоченные по урожайности, приведены в табл. 3.

Корреляция количества сорняков с урожайностью была отрицательной: $r = -0.83$. Другие критерии коррелировали положительно в пределах $r = 0.92-0.97$. При максимальной урожайности 66.9 ц/га количество сорняков составило 10.2 г/м². Во 2-й строке урожайность была меньше — 65.6 ц/га, но меньше было и количество сорняков — 12.1 г/м². Строку исключили. В 3-й строке по сравнению с 1-й и 2-й величины урожайности и количества сорняков также были меньше, поэтому эту строку исключили. То же происходило и далее.

Таблица 4. Данные опыта [17]

Строка, №	Урожайность, ц/га	Корневая гниль, %	Желтая пятнистость, %	Сорняки, шт./м ²	Септориоз, %	Бурая ржавчина, %	Сырой белок, %	Мучнистая роса, %	Клейковина, %	Обработка
1	45.0	2.1	4.1	223	10.1	0.15	17.8	1.60	23.5	N180P60K60
2	43.0	1.6	2.7	265	8.9	0.15	16.2	1.20	22.7	N150P60K60
3	41.2	1.6	2.4	248	8.5	0.05	16.6	0.90	21.5	N120P60K60
4	39.5	1.2	2.3	373	7.9	0.04	12.9	0.30	20.8	N90P60K60
5	36.6	1.1	1.5	325	7.2	0	13.0	0.30	20.1	N60P60K60
6	31.5	1.0	1.6	372	7.3	0	13.6	0.20	19.7	N30P60K60
7	30.1	0.8	1.1	247	5.5	0	13.8	0.06	18.1	Пестициды
8	28.7	0.8	1.6	288	6.0	0	13.3	0.20	18.1	P60K60
9	23.0	2.4	7.9	—	20.0	10.6	12.6	0.30	—	Контроль
r_k	—	0.13	−0.28	−0.32	−0.35	−0.61	0.76	0.78	0.97	—

Очевидно, опыт со многими критериями [16] по сути оказался однокритериальным. Зачем же тогда наряду с урожайностью учитывали именно эти 6 критериев? Даже если в опыте учитывали бы еще 6 подобных критериев, результат был бы тот же самый. Однако если бы учитывали содержание гумуса в почве, результат был бы иным.

Действительно, после оборота пласта гумус поступал в верхний слой из нижнего. При мелкой и нулевой обработках этого не происходило. Урожайность снижалась, но и расход гумуса становится меньше. Значит уровень содержания гумуса был главным фактором формирования урожайности при пахоте.

Очевидно, что процесс накопления и расхода гумуса более сложен. Но результат работы [18], в которой учет содержания гумуса дифференцировали по слоям 0–10, 10–20 и 20–30 см почвы, позволил автору без дорогих опытов с дисперсионным анализом урожайности сформулировать вопрос: пахать или не пахать?

В опыте [17] изучали влияние доз азотных удобрений на фитосанитарное состояние посевов яровой пшеницы сорта Прохоровка в Тамбовской обл. в течение 3-х лет. Дозы азотных удобрений варьировали при постоянном минеральном фоне P60K60. В опыте учитывали содержание сырого белка и клейковины в зерне, 5 критериев болезней растений и количество сорняков. Данные, упорядоченные по урожайности, приведены в табл. 4. Их анализ показал, что содержание клейковины сильно коррелировало с урожайностью: коэффициент корреляции $r = 0.97$. Это не могло повлиять на принятие ключевых решений, поэто-

му показатель содержания клейковины был переведен в разряд справочных критериев. Однако множество Парето удалось сформировать по величине урожайности и 7-ми критериям из 8-ми (табл. 5).

Максимальный результат по урожайности (45.0 ц/га) и количеству сорняков (223 шт./м²) был в варианте 1. Но это далеко не лучший показатель распространения болезней растений. Максимум болезней отмечен в варианте 7, но при этом он был худшим по урожайности (30.1 ц/га) и средним по количеству сорняков (247 шт./м²).

Варианты 2–6 по отношению к вариантам 1 и 7 – промежуточные. Они противоречили друг другу по всем критериям одновременно. Однако если приоритет – урожайность яровой пшеницы, то лучший выбор – варианты 1–3. Но если приоритетом являлась борьба с болезнями растений, это – варианты 4–7.

Таким образом, интерпретация данных показала, что применение многокритериального анализа в агрономии необходимо. Но данных одних только полевых опытов для управления процессами формирования урожая различных культур и севооборотов в различных условиях недостаточно. Оперативные управленческие решения можно рассчитать только по данным актуальных числовых экспериментов с моделями агрофизики.

Однако сегодня подобные расчеты многокритериальных решений затруднены. Дело в том, что модели агрофизики не работают без моделей погоды и климата [19]. Их данные при средне- и долгосрочных метеопрогнозах могут быть только

Таблица 5. Редукция данных опыта [17]

Строка, №	Урожайность, ц/га	Корневая гниль, %	Желтая пятнистость, %	Сорняки, шт./м ²	Септориоз, %	Бурая ржавчина, %	Сырой белок, %	Мучнистая роса, %	Клейковина, %	Обработка
1	45.0	2.1	4.1	223	10.1	0.15	17.8	1.60	23.5	N180P60K60
2	43.0	1.6	2.7	265	8.9	0.15	16.2	1.20	22.7	N150P60K60
3	41.2	1.6	2.4	248	8.5	0.05	16.6	0.90	21.5	N120P60K60
4	39.5	1.2	2.3	373	7.9	0.04	12.9	0.30	20.8	N90P60K60
5	36.6	1.1	1.5	325	7.2	0	13.0	0.30	20.1	N60P60K60
6	31.5	1.0	1.6	372	7.3	0	13.6	0.20	19.7	N30P60K60
7	30.1	0.8	1.1	247	5.5	0	13.8	0.06	18.1	Пестициды

вероятностными. При этом в числовых экспериментах с моделями необходимо рассчитывать не только урожай, но и его качество, свойства почвы, наличие в поле вредителей, болезней, сорняков. Целый ряд таких моделей еще только предстоит разработать [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В полевых опытах учитывают урожай, его качество, свойства почвы, вредителей, болезни, сорняки. Выбор лучших вариантов по всем критериям одновременно обеспечивает многокритериальный анализ.

Частный случай многокритериального анализа с 2-мя главными критериями проиллюстрированы данными многолетнего полевого опыта по изучению система удобрения в Смоленской обл. Множество Парето в зернотравянопропашном севообороте представлено 6-ю вариантами органо-минеральной системы удобрения. Они превосходят 42 варианта органической и минеральной систем по урожаю и потерям гумуса почвы одновременно. Выбор лучшей обработки зависит от выбора приоритетов: урожаю и/или содержанию гумуса в почве.

Однако, если не учитывают содержание гумуса, а критерии коррелируют с урожайностью, многокритериальный анализ не доступен. Это показала обработка данных полевого опыта, проведенного на Кубани, по влиянию способов обработки почвы, доз удобрений и гербицидов на урожайность озимой пшеницы сорта Дельта.

Для многокритериального анализа были пригодны данные полевого опыта, в котором изучали влияние доз азотных удобрений на фитосанитарное состояние посевов яровой пшеницы сорта Прохоровка в Тамбовской обл. Содержание

клейковины сильно коррелировало с урожайностью. Во множестве Парето можно было выбрать лучший вариант по урожайности и 7-ми критериям из 8-ми одновременно. Эти критерии характеризовали содержание сырого белка в зерне, 5 болезней растений и количество сорняков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фишер Р.А. Статистические методы для исследователей. 11-е изд., пер. с англ. М.: Статистика, 1958. 268 с.
2. Снедекор Дж.У. Статистические методы в применении к исследованиям в сельском хозяйстве и биологии. Пер. с англ. М.: Сельхозиздат, 1961. 503 с.
3. Литтл Т., Хиллз Ф. Сельскохозяйственное опытное дело: Планирование и анализ. Пер. с англ. М.: Колос, 1981. 320 с.
4. Любичев А.А. Дисперсионный анализ в биологии. М.: Изд-во МГУ, 1986. 200 с.
5. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд. доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
6. Jeffers J.N.R. Principal components analysis in taxonomic research // Forest. Commis. Statistic. Section. PaperA, 1965. № 83.
7. Pearce S.C., Holland D.A. Some applications of multivariate methods // Botany Appl. Statist. 1960. № 9. P. 1–7.
8. Press S.J. Applied multivariate analysis. N.Y.: Holt, Rinehart & Winston, 1972. 521 p.
9. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. Уч. пособ. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Дрофа, 2006. 175 с.
10. Cochran W.G. The distribution of the largest of a set of estimated variances as a fraction of their total // Ann. Eugenics. 1941. V. 11. P. 47–52.

11. *Hartley H.O.* The maximum F -ratio as a short-cut test of heterogeneity of variance // *Biometrika*. 1950. V. 37. P. 308–312.
12. *Levene H.* Robust tests for equality of variances // *Contributions to probability and statistics. Essays in Honor of Harold Hotelling*. 1960. p. 278–292.
13. *Bartlett M.S.* Properties of sufficiency of statistical tests // *Proc. Royal Soc. London*, 1937. Ser. A. 160. P. 268–282.
14. *Токарева Н.В.* Влияние удобрений и гербицидов на урожайность и кормовую ценность культур севооборота в Вологодской области: Дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2015. 187 с.
15. *Мерзлая Г.Е., Зябкина Г.А., Фомкина Т.П.* Длительное применение органических и минеральных удобрений при оптимизации их доз и сочетаний на легкосуглинистой почве // *Агрохимия*. 2006. № 10. С. 33–40.
16. *Найденев А.С., Макаренко А.А.* Влияние систем основной обработки почвы, минеральных удобрений и гербицидов на агрофизические показатели выщелоченного чернозема и урожайность озимой пшеницы // *Тр. КубГАУ*. 2008. № 5 (14). С. 97–101.
17. *Лавринова Т.С.* Влияние возрастающих доз азотного удобрения на урожайность, качество и фитосанитарное состояние посевов яровой пшеницы в Северо-Восточной части Центрально-Черноземной зоны: Дис. ... канд. с.-х. наук. М.: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, РАСХН, 2013, 154 с.
18. *Сдобников С.С.* Пахать или не пахать? Изд. 2-е. М., 2000. 294 с.
19. *Дымников В.П.* Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов. М.: ИВМ РАН, 2007. 282 с.
20. *Hoogenboom G.* Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications // *Agricult. Forest Meteorol.* 2000. V. 103. P. 137–157.

Multi-Criteria Analysis of Field Experimental Data

A. N. Savchenko[#]

*Federal agricultural research centre VIM
1st Institutsky proezd 5, Moscow 109428, Russia
[#]E-mail: serebro47@yandex.ru*

In agronomic field experiments not only crop yields, but also other criteria characterizing its quality are taken into account, as well as soil properties, pests, diseases and weed vegetation are investigated. The choice of the best treatments for all criteria simultaneously provides by multi-criteria analysis. The necessity of its application in agronomy was shown on the examples with processing of long-term field experimental data based on multi-criteria.

Key words: multi-criteria analysis, field experimental data.