

М.Ф.Дембицкий, В.Н.Босак, кандидаты сельскохозяйственных наук
О.Ф.Смеянович, младший научный сотрудник
Белорусский НИИ почвоведения и агрохимии

УДК 581.1.04:633.162

Оценка роли агрохимических факторов формирования урожая ячменя в полевом опыте

По результатам условных опытов, построенных по данным многофакторного эксперимента методом последовательного наложения факторов, долевое участие известкования в формировании урожая ячменя колебалось в пределах 13,5–43,1%, навоза – 6,2–28,7, фосфорно-калийных удобрений – 5,5–12,3, азотных удобрений – 21,3–44,2% в зависимости от фонов, изучалась их эффективность. Использование разных методов обработки данных позволяет наиболее полно оценить результаты исследований.

Современное научно обоснованное растениеводство базируется на управлении факторами формирования урожая сельскохозяйственных культур с учётом законов земледелия: равнозначности и незаменимости, минимума, оптимума и совокупного действия факторов жизни растений. В практическом плане важно определить значимость отдельных приёмов агротехники в конкретных условиях поля с целью наиболее рационального использования имеющихся ресурсов.

Выявить роль отдельных факторов и их сочетаний в совокупном действии на урожайность и качество продукции можно лишь в многофакторных опытах. При решении этой задачи используются различные методические подходы, которые можно разделить на две группы: первая – последовательное наложение факторов в схеме эксперимента, вторая – их одновременное варьирование в полных факториальных экспериментах (ПФЭ) или в специально организованных из них выборках (“дробных репликах”).

Цель настоящей работы – оценить роль минеральных удобрений, навоза и уровней кислотности почвы в формировании урожая ячменя и долевое участие каждого из них в совокупном действии с использованием

Due to results of conventional experiments which were built on the data of poly-factorial experience by the method of consistent applying of factors, share participation of liming in the forming of barley yield varied within 13,5–43,1%, manure – 6,2–28,7, phosphorous-potash fertilizers – 5,5–12,3, nitrogen – 21,3–44,2% depending on the backgrounds, on which was studied their efficiency and methods of processing of investigation results. The use of various methods of processing of data allows to estimate the experiment results more detailed.

методов расчёта долей прибавок, дисперсионного и регрессионного анализов по результатам стационарного полевого опыта, заложенного в 1992 г. на дерново-подзолистой временно избыточно увлажняемой легкосуглинистой почве в экспериментальной базе “Курасовщина” Минского района (ячмень возделывался в 1993 г.).

Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы: рН_{KCl} известкованного фона – 4,3–4,4, известкованного – 5,8–6,0, содержание гумуса – 1,5–1,6%, подвижного фосфора и калия – 260–280 и 240–260 мг/кг почвы. Схема опыта и урожайность зерна ячменя представлены в таблице 1.

В связи с тем, что эффективность приёмов агротехники зависит от фона, на котором они применяются, нами построены шесть условных опытов, отличающихся последовательностью наложения изучаемых факторов в схеме эксперимента. Результаты подсчёта относительных прибавок урожая от известкования, навоза, РК и азота, выраженных в процентах к урожайности варианта их совокупного действия, в котором вносилось полное минеральное удобрение (N₉₀P₇₀K₁₂₀) на фоне известия и навоза, показаны в таблице 2.

Таблица 1. Урожайность зерна ячменя в зависимости от удобрений и уровней кислотности почвы, ц/га

Уровни факторов		Дозы минеральных удобрений, кг/га д. в.				
известь	навоз	без удобрений	P ₇₀ K ₁₂₀	N ₆₀ P ₇₀ K ₁₂₀	N ₉₀ P ₇₀ K ₁₂₀	N ₁₂₀ P ₇₀ K ₁₂₀
0	0	15,7	23,4	33,6	38,2	41,3
0	1	29,8	34,8	54,5	54,3	57,3
1	0	32,4	36,0	57,0	58,9	58,9
1	1	41,3	44,8	64,9	62,8	62,7

Таблица 2. Долевое участие факторов в формировании урожая, %

Факторы	Варианты наложения факторов (номера условных опытов)					
	1	2	3	4	5	6
Почва	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Известь	18,3	15,9	13,5	26,6	13,5	26,6
Навоз	22,5	22,5	22,5	6,2	25,6	14,1
РК	5,5	7,9	7,9	5,7	12,3	5,6
Азот	28,7	28,7	31,1	36,5	23,6	28,7

Например, условный опыт 1 построен по схеме: 1 – без удобрений, 2 – навоз, 3 – навоз и известь, 4 – $P_{70}K_{120}$ на фоне навоза и извести и 5 – $N_{90}P_{70}K_{120}$ на фоне навоза и извести (последовательность наложения факторов: навоз, известь, РК, азот).

Поскольку расчёты прибавок и долевого участия факторов в формировании урожая сделаны по результатам одного полевого опыта (по данным табл. 1), их варьирование объясняется различием фонов, на которых они применялись. Урожайность зерна ячменя по вариантам условного опыта 1 составила соответственно 15,7; 29,8; 41,3; 44,8 и 62,8 ц/га. Прибавка от навоза составила 14,1 ц/га (22,5% к урожайности варианта 5), от извести на фоне навоза – 11,5 (18,3%), от фосфорно-калийных удобрений на фоне навоза и извести – 3,5 (5,5%) и от азота на фоне навоза, извести и РК – 18,0 ц/га (28,7%). В таблице 2 эти относительные прибавки показаны в первом столбце. При построении схем остальных пяти условных опытов применена следующая последовательность наложения факторов: 2 – навоз, РК, известь, азот; 3 – навоз, РК, азот, известь; 4 – известь, РК, азот, навоз; 5 – РК, азот, навоз, известь; 6 – известь, навоз, РК, азот. Так как в схеме 2 эффективность навоза и азота определялась на тех же фонах, что и в опыте 1, прибавки от этих факторов получены те же. Однако долевое участие извести снизилось с 18,3 до 15,9%, а доля РК в продуктивности варианта 5 возросла с 5,5 до 7,9%.

По шести условным опытам доля извести изменяется в пределах 13,5–26,6%, навоза – 6,2–25,6, РК – 5,5–12,3, азота – 23,6–36,5%. Причина этой изменчивости в том, что не определяемые непосредственно эффекты взаимодействия в таких схемах опытов присваиваются факторам, налагаемым позднее: в случае положительного взаимодействия их эффективность повышается, а при отрицательном – снижается. Так, в опыте установлено достоверное отрицательное взаимодействие навоза и извести, указывающее на снижение прибавки от извести на фоне навоза по сравнению с фоном без органических удобрений. Поэтому в опыте 6 эффект известкования составил 26,6% (навоза – 14,1%), а в опыте 1 – 18,3% (навоза – 22,5%) при равной сумме этих долей в обоих случаях. Минимальная доля навоза отмечена в

опыте 4, где его эффективность изучалась на фоне сочетания всех остальных факторов, вследствие добавления отрицательного взаимодействия навоза с РК и азотом. Различие долей РК опытов 1 и 2 объясняется небольшим отрицательным взаимодействием РК с известью, а опытов 1 и 5 – РК с навозом.

Поэтому при оценке роли факторов в опытах с их последовательным наложением, ввиду неопределимости взаимодействий, важно указывать фон, на котором изучался тот или иной эффект. При этом выводы из эксперимента справедливы для данных условий, а область применения рекомендаций сужается.

Более подробную оценку роли факторов можно получить по данным полного факторного эксперимента (ПФЭ) или специально спланированной выборки с помощью дисперсионного или регрессионного анализа.

В таблице 3 приведены данные дисперсионного анализа ПФЭ $2 \times 2 \times 4$ (известь – 2 уровня, навоз – 2 уровня, азот – 4 уровня), выделенного из схемы, представленной в таблице 1.

Оценка долевого участия факторов в общем варьировании урожайности обычно проводится путём сопоставления сумм квадратов (по коэффициентам детерминации) или дисперсий [1, 2]. В первом случае, в сумме квадратов вариантов (9892,9) доля извести составляет 29,7%, навоза – 19,9, азота – 44,2, значимого взаимодействия АВ – 4,0 и суммы остальных взаимодействий – 2,2%. Оценка по величине средних квадратов (дисперсий), более отвечающая сущности дисперсионного анализа ввиду выравнивания числа степеней свободы, даёт следующие доли факторов в общем варьировании вариантов опыта: известь – 43,1%, навоз – 28,7, азот – 21,3, взаимодействие навоза с известью – 5,8%. Однако и выравнивание степеней свободы не снимает полностью определённой условности сравнений, так как остаётся неравноценность шага варьирования разных факторов и размерность их значений, на что обращал внимание В.Н.Перегудов [3].

Эффективным способом интерпретации результатов полевого опыта является регрессионный анализ, позволяющий получить модель зависимости результативного признака от уровней факторов при их любых сочета-

Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа схемы $2 \times 2 \times 4$

Источники варьирования	Сумма квадратов	Степени свободы	Дисперсии	F	
				фактически	05
Общее	11171,04	63			
Повторения	229,06	3			
Известь, А	2943,06	1	2943,06	126,30	4,06
Навоз, В	1964,70	1	1964,70	84,30	4,06
Азот, С	4369,31	3	1456,44	62,48	2,82
АВ	398,01	1	398,01	17,07	4,06
АС	85,91	3	28,64	1,23	-
ВС	57,95	3	19,32	0,83	-
АВС	73,96	3	24,65	1,06	-
Остаток	1049,08	45	23,31	-	-

ниях в изучаемых интервалах. По результатам статистической обработки ПФЭ $2 \times 2 \times 4$ получено следующее уравнение регрессии:

$$Y = 20,07 + 18,58x_1 + 16,10x_2 + 11,75x_3 - 1,707x_3^2 - 10,0x_1x_2,$$

где Y – урожайность зерна ячменя, ц/га, x_1 , x_2 , x_3 – кодированные значения уровней известкования, навоза и азотного удобрения (шаг дозы азота – 30 кг/га). Коэффициенты регрессии непосредственно показывают прибавки урожая зерна ячменя от известкования, навоза и увеличения дозы азота на 30 кг/га.

Часто о степени влияния отдельных факторов на результативный признак судят непосредственно по величине коэффициентов регрессии, так как они дают тот же ряд значимости факторов, что и дисперсии. Разумеется, отмеченная выше условность сравнения не только остаётся, но и усиливается из-за добавления новых слагаемых (в данном случае x_3^2) и отрицательных значений членов уравнения. Однако в связи с тем, что уравнение регрессии, выражая эффективность факторов формирования урожая в натуральных значениях, наиболее полно описывает существующую закономерность, необходимость дополнительного анализа соотношения дисперсий отпадает.

Данное уравнение регрессии не содержит незначимые взаимодействия, которые в полной модели выражались значениями $+0,1629x_1x_3$ и $-0,1714x_2x_3$, что в данном случае практически не отразилось на качестве модели, хотя, в принципе, выбраковка этих коэффициентов устранила зависимость действия азота от применения известки и навоза: рассчитанная по неполному уравнению агрономически оптимальная доза азота одинакова на всех четырёх фонах и составляет 103 кг/га.

Ясно выраженное отрицательное взаимодействие навоза и известки свидетельствует о целесообразности дифференцированного применения этих факторов в зависимости от использования второго: навоз следует вносить в первую очередь на почвах с повышенной кислотностью, а первоочередное известкование нужно планировать на полях, где длительное время не вносились органические удобрения.

Достоинствами регрессионного анализа является возможность компактного выражения результатов опыта (основная информация о связи параметра оптимизации с факторами умещается в одной строке), определения оптимальных значений каждого фактора при любом сочетании других с использованием интерполяции, что значительно расширяет ареал использования рекомендаций [4, 5, 6]. Несмотря на это, внимание исследователей к разработке функций продуктивности в последнее время ослаблено. Одна из причин этого, на наш взгляд, состоит в том, что часто регрессионные модели далеки от адекватного описания реальных зависимостей вследствие неоправданной выбраковки коэффициентов регрессии. Например, одновременное исключение из модели всех незначительных по F_{05} членов может привести к уравнению регрессии с коэффициентом воспроизводимости 0,5–0,7 и менее. В таких случаях стрем-

ление обеспечить высокую достоверность результатов исследований приводит к прямо противоположному парадоксальному итогу, противоречащему сути метода наименьших квадратов. Поэтому необходимо осторожное исключение незначимых коэффициентов по одному, что корректирует значение оставляемых коэффициентов и может изменить оценки их значимости [3, 7].

Во-вторых, браковка отдельных членов, относящихся к одному фактору, не вполне обоснована и с теоретической точки зрения. Например, члены модели x_3 , x_3^2 , x_1x_3 , x_2x_3 , описывающие действие одного фактора (азота), не являются факторами в полном смысле этого понятия. Исключение любого из них связано с потерей определённой части информации о действии фактора в разных условиях. Кроме того, незначимость эффектов не всегда означает отсутствие той или иной закономерности в действительности, так как она может быть замаскирована случайными ошибками эксперимента и способна проявиться в повторных опытах [3]. Как отмечают О.М. Дукарский и А.Г. Закурдаев, “вопрос об отсеве несущественно влияющих аргументов является одним из наиболее сложных и удовлетворительного решения его пока не найдено”. Предлагается различный подход к решению этого вопроса в зависимости от того, с какой целью предполагается использовать модель: для анализа действия отдельных факторов или с целью поиска оптимальных условий. В последнем случае от выбраковки можно воздержаться, так как исключение любых коэффициентов регрессии с F больше 1,0 сопровождается увеличением доверительного интервала. Использование неполных моделей, кроме того, затрудняет обобщение результатов полевых опытов, выраженных в форме производственных функций, так как только усреднение коэффициентов регрессии полных моделей даёт те же результаты, что и обработка многолетних средних, требующая больших затрат труда на вычисления [3].

Схема проведённого нами полевого опыта не предусматривала изучение взаимодействия фосфорно-калийных удобрений с азотными, но позволяет выделить известную восьмерную схему 2^3 с факторами: известь, навоз, РК. По её результатам получено следующее уравнение регрессии:

$$Y = 16,37 + 16,05x_1 + 12,75x_2 + 6,35x_3 - 3,9x_1x_2 - 2,8x_1x_3,$$

где x_1 , x_2 и x_3 – соответственно шифрованные значения известкования, навоза и РК.

Уравнение отражает действие трёх названных факторов на урожайность ячменя при отсутствии азотного удобрения. Обращает на себя внимание отрицательное взаимодействие РК с известью. Обычно это связывают с повышением подвижности фосфатов под влиянием известкования. Вместе с тем имеются и факты отрицательного взаимодействия калия с доломитовой мукой, что, в частности, отмечалось и в нашем полевом опыте в условиях супесчаных почв Воложинского района Минской области. Поэтому необходимы дальнейшие исследования взаимодействия с известью как фосфорных, так и калийных удобрений.

Следует отметить, что уравнения регрессии, включающие линейные и квадратичные эффекты, в принципе не могут полностью описать реально существующие закономерности и результаты полевых опытов многоуровневых схем даже в случае подбора наиболее адекватной модели (исключение, как известно [3, 5], составляют двухуровневые схемы, несмотря на случайные погрешности результатов исследований).

Поскольку качество модели можно улучшать, например, введением членов более высоких степеней, необоснованна практикуемая замена фактических результатов полевого опыта "теоретическими", полученными по уравнению регрессии. Поэтому нельзя абсолютизировать и регрессионные модели, позволяющие лишь с определенным приближением описать существующие закономерности, относясь к ним, как к инструменту в руках исследователя.

Выводы

1. Долевое участие агрохимических факторов в формировании урожая ячменя зависело от фонов, на которых изучалась их эффективность, а также методов обработки результатов исследований и составляло: для известкования – 13,5–43,1%, навоза – 6,2–28,7, фосфорно-калийных удобрений – 5,5–12,3, азота – 21,3–44,2%.

2. Учитывая разную эффективность факторов формирования урожая при их различных сочетаниях (взаимодействие факторов), решение задачи по выявлению их роли в многообразных условиях производства возможно только с помощью правильно спланированных

многофакторных опытов, позволяющих использовать математический аппарат, в частности, метод регрессионного анализа, с целью максимального приближения к описанию реально существующих закономерностей.

Использование разных методов обработки данных позволяет наиболее полно оценить результаты эксперимента. При использовании с этой целью дисперсионного анализа вместо индексов детерминации следует предпочесть доли дисперсий отдельных факторов в их сумме.

Литература

1. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. – Москва: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
2. Иванова Т.И. Прогнозирование эффективности удобрений с использованием математических моделей. – Москва: Агропромиздат, 1989. – 235 с.
3. Перегудов В.Н. Планирование многофакторных полевых опытов с удобрениями и математическая обработка их результатов. – Москва: Колос, 1978. – 184 с.
4. Богдевич И.М., Шаталова Р.В., Шыбеко Е.А. Методические указания по математико-статистическому анализу многофакторных опытов. – БелНИИПиА. Минск, 1985. – 34 с.
5. Егоршин А.А. Планирование и обработка данных сельскохозяйственного эксперимента. – Вильнюс, 1978. – 106 с.
6. Терехов Л.Л. Производственные функции. – Москва: Статистика, 1974. – 126 с.
7. Дукаркий О.М., Закурдаев А.Г. Статистический анализ и обработка результатов на ЭВМ "Минск-22". – Москва: Статистика, 1971. – 244 с.