

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПОЛЕВОГО ОПЫТА

С.А. Балюк, Н.В. Лисовой, В.Н. Никоненко, Е.В. Карацуба

*Институт почвоведения и агрохимии им. А.Н. Соколовского,
г. Харьков, Украина*

ВВЕДЕНИЕ

В агрохимических исследованиях широко применяются полевые опыты, которые проводятся в естественных условиях на специально выделенных полевых участках для определения количественного влияния различных факторов на урожай, качество продукции и плодородие почвы. Проведение полевого опыта является ответственной работой и требует значительных трудовых и финансовых затрат. До закладки полевого опыта разрабатывается схема вариантов исследований. Первоначально разрабатывались однофакторные простые схемы, в которых определялось действие одного фактора по принципу единственного различия. Впоследствии появилась необходимость изучать взаимодействие между отдельными факторами. Для этого начали разрабатывать факториальные схемы, одной из первых является восьмерная схема Жоржа Виля. Со временем многофакторные схемы и математическое планирование эксперимента получило широкое развитие в трудах Фишера, Финни, Перегудова, Егоршина, Дуды, [1–8].

Преимущество математически спланированного многофакторного полевого опыта в том, что обработка экспериментальных данных проводится современными статистическими методами при помощи компьютерных программ, определяется действие и взаимодействие факторов, оптимальные нормы минеральных удобрений, строятся математические модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований является полевой стационарный опыт, заложенный в 1990 г. на черноземе типичном тяжелосуглинистом на лессе ОП «Граково» Института почвоведения и агрохимии имени А.Н. Соколовского.

Полевой опыт заложен по математически спланированной схеме Егоршина В₃ [4, 7]. Варианты размещаются по блокам (табл. 1).

Таблица 1

Размещение вариантов по блокам (X₁X₂X₃ – изучаемые факторы N, P, K)

№	X ₁ X ₂ X ₃
1	000
2	202
3	022
4	220

№	X ₁ X ₂ X ₃
5	002
6	200
7	020
8	222

№	X ₁ X ₂ X ₃
9	011
10	211
11	101
12	121

№	X ₁ X ₂ X ₃
13	110
14	112
15	111
16	111

Варианты размещены по четырем равноценным блокам по количеству каждого вида удобрения. Всего 14 вариантов, в четвертом блоке добавлены два центральных варианта (15, 16), которые являются не обязательными. Размещение вариантов по блокам дает возможность вычислить пестроту плодородия почвы опытного поля. В данном опыте введен только один центральный вариант – 15. Изучаются факторы N, P, K и три уровня градации – 0–1–2. В 2015 г. выращивали пшеницу озимую по черному пару. Минеральные удобрения вносили в три уровня: N_{0–45–90}, P_{0–60–120}, K_{0–45–90}. Четвертый фактор навоз (H) равен 0 и не учитывался.

Учет урожая зерна в 2015 г. проводили комбайном «Сампо» [6, 7].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Урожайные данные обрабатывались как трехфакторный опыт. Повторность вариантов 4-кратная (табл. 2).

Таблица 2

Схема полевого опыта и урожайность озимой пшеницы

№ п/п	Нормы удобрения, кг/га д.в.				Урожай по повторениям, ц/га				
	N	P	K	H	Y1	Y2	Y3	Y4	Y
1	0	0	0	0	56,2	66,8	56,9	62,7	60,65
2	60	0	90	0	61,6	65,0	62,5	64,3	63,35
3	0	120	90	0	67,4	68,1	61,5	69,9	66,73
4	60	120	0	0	64,8	68,6	68,5	67,6	67,38
5	0	60	45	0	60,0	59,5	66,9	65,0	62,85
6	30	120	45	0	62,2	67,3	65,1	68,7	65,83
7	30	60	90	0	69,1	66,7	63,5	68,1	66,85
8	60	120	90	0	71,8	70,4	69,0	68,3	69,88
9	0	120	0	0	66,4	64,2	72,1	75,0	69,43
10	60	0	0	0	66,6	63,3	66,2	70,4	66,63
11	0	0	90	0	66,3	56,3	61,7	61,0	61,33
12	60	60	45	0	64,6	63,9	61,9	66,8	64,30
13	30	0	45	0	63,6	64,3	67,5	63,2	64,65
14	30	60	0	0	61,5	62,2	63,0	77,0	65,93
15	75	55	45	0	64,7	69,4	63,3	63,5	65,23
Среднее	33,00	59,667	45,0	0	64,45	65,07	64,64	67,43	65,40
дисп	726,00	2401,56	1350,0		13,79	13,43	13,45	18,65	6,51

Где: N – норма азота кг/га;

P – норма фосфора, кг/га д.в.;

K – норма калия, кг/га д.в.

Y1, Y2, Y3, Y4 – урожай по повторениям, ц/га;

Y – средний урожай, ц/га.

Фактические данные урожайности полевого опыта не всегда дают возможность установить четкие закономерности влияния удобрений. Поэтому, прежде чем проводить статистическую обработку данных фактических урожаев выравнивают при помощи специальной программы. Получение данных показано в табл. 3.

Таблица 3

Урожайность озимой пшеницы после дополнительной обработки фактических данных урожайности

№ п/п	Нормы удобрения, кг/га д.в.				Урожай, ц/га
	N	P	K	H	y
1	0	0	0	0	61,406
2	60	0	90	0	65,392
3	0	120	90	0	67,662
4	60	120	0	0	68,17
5	0	60	45	0	63,009
6	30	120	45	0	67,166
7	30	60	90	0	66,433
8	60	120	90	0	68,17
9	0	120	0	0	67,662
10	60	0	0	0	65,392
11	0	0	90	0	61,406
12	60	60	45	0	65,256
13	30	0	45	0	62,649
14	30	60	0	0	66,433
15	75	55	45	0	64,769
Среднее	33	59,667	45	0	65,398
дисп					5,0963

Нормы: минимальные – (0; 0; 0; 0), максимальные – (75; 120; 90; 0), средние – (33; 59; 67; 45; 0).

Текстовая информация полученной математической модели приведена в табл. 4.

Таблица 4

Текстовая информация о результатах математической обработки расчетных урожайных данных

Уравнение регрессии									
$y_p = b_0 + (b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4) + (b_5 \cdot x_{11} + b_6 \cdot x_{22} + b_7 \cdot x_{33} + b_8 \cdot x_{44}) + (b_9 \cdot x_{12} + b_{10} \cdot x_{13} + b_{11} \cdot x_{14} + b_{12} \cdot x_{23} + b_{13} \cdot x_{24} + b_{14} \cdot x_{34})$									
Коэффициенты регрессии b и статистики Стьюдента tb									
	b0	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8
b =	65,0	0,0324	0,0362			-0,0009		0,0008	
tb =	72,488	2,17779	4,4505			-1,0922		1,7922	
	b9	b10	b11	b12	b13	b14			
b =	-0,0005								
tb =	-1,6042								

Переменные						
X1 = N	x1 = X1 – X1ср	x11 = x1*x1	x12 = x1*x2	x23 = x2*x3		
X2 = P	x2 = X2 – X2ср	x22 = x2*x2	x13 = x1*x3			
X3 = K	x3 = X3 – X3ср	x33 = x3*x3				
X1ср = 33	X2ср = 59,667	X3ср = 45,0				
Коэффициент детерминации		R2 = 0,7831				
78,3% изменчивость Y объясняется принятой квадратичной моделью						
Коэффициент отношения Фишера			F = 6,4984			
Табличные значения:		F05 = 3,4817	F01 = 6,0569			
Поскольку F > F01, то модель значима по критерию Фишера						
Табличные значения статистики Стьюдента			t05 = 2,262	t01 = 3,250		
Коэффициент b значим по Стьюденту, если tb > t05						

Модель значима по критерию Фишера, но ряд ее членов не значимы по критерию Стьюдента (tb < 2,1).

Окончательная модель урожайности озимой пшеницы имеет вид:

$$\begin{aligned}
 Y_p = & 65 + 0,03244 \cdot (N - 33,0) + 0,0362 \cdot (P - 59,667) - 0,0008612 \cdot (N - 33,0)^2 + \\
 & + 0,000753 \cdot (K - 45,0)^2 - 0,000483 \cdot (N - 33,0) \cdot (P - 59,667)
 \end{aligned}$$

(2,2)
(2)
(4,5)
(1,1)

(1,8)
(1,6)

При помощи математической модели рассчитывается эффективность отдельных видов удобрений (N, P, K) при средних и нулевых значениях двух других (табл. 5, 6, 7, 8).

Прогнозный урожай при оптимальных нормах удобрений по данным полевого опыта составляет 68,16 ц/га:

$$\begin{aligned}
 Y_p = & 65 + 0,03244 \cdot 32 + 0,0362 \cdot 60,3 + 0,0008612 \cdot 1024 + 0 - (0,000483 \cdot 32) \cdot 60,333; \\
 Y_p = & 65 + 1,038 + 2,18 + 0,88 + 0 + 69,09 - 0,93 = 68,16 \text{ ц/га.}
 \end{aligned}$$

Основной показатель в математической модели – это свободный член, который равен 65 ц/га. Влияние факторов и их взаимодействие повышает урожайность озимой пшеницы на черноземах типичных Лесостепи Украины на 3,16 ц/га.

Таблица 5

Влияние азотных удобрений на урожайность озимой пшеницы

Нормы удобрения, кг/га д.в				Урожай, ц/га	Расчет		
N	P	K	H		UCUT	-95%	+95%
0	59,67	45	0	62,992	0,3744	60,869	65,115
16	59,67	45	0	64,2	0,3024	62,292	66,108

Окончание табл. 5

Нормы удобрения, кг/га д.в				Урожай, ц/га	Расчет		
32	59,67	45	0	64,967	0,3429	62,935	66,999
48	59,67	45	0	65,293	0,2708	63,487	67,099
64	59,67	45	0	65,178	0,2766	63,353	67,003
80	59,67	45	0	64,623	0,9664	61,212	68,034
N	P	K	H	У0	UCUT	-95%	+95%
0	0	0	0	61,406	0,4402	59,104	63,708
16	0	0	0	63,075	0,2994	61,176	64,974
32	0	0	0	64,303	0,3441	62,268	66,339
48	0	0	0	65,091	0,3421	63,061	67,12
64	0	0	0	65,437	0,4766	63,042	67,832
80	0	0	0	65,343	1,3466	61,316	69,369

Таблица 6

Влияние фосфорных удобрений на урожайность озимой пшеницы

Нормы удобрения, кг/га д.в				Урожай, ц/га	Расчет		
N	P	K	H	Ур	UCUT	-95%	+95%
33	0	45	0	62,841	0,4435	60,53	65,151
33	24	45	0	63,709	0,3785	61,575	65,844
33	48	45	0	64,578	0,3459	62,537	66,619
33	72	45	0	65,447	0,3457	63,406	67,487
33	96	45	0	66,315	0,3779	64,182	68,448
33	120	45	0	67,184	0,4425	64,876	69,492
N	P	K	H	У0	UCUT	-95%	+95%
0	0	0	0	61,406	0,4402	59,104	63,708
0	24	0	0	62,657	0,2962	60,769	64,546
0	48	0	0	63,908	0,2243	62,265	65,552
0	72	0	0	65,16	0,2243	63,516	66,803
0	96	0	0	66,411	0,2963	64,522	68,3
0	120	0	0	67,662	0,4404	65,36	69,965

Таблица 7

Влияние калийных удобрений на урожайность озимой пшеницы

Нормы удобрения, кг/га д.в				Урожай, ц/га	Расчет		
N	P	K	H	Ур	UCUT	-95%	+95%
33	59,67	0	0	66,525	0,2405	64,823	68,227
33	59,67	20	0	65,471	0,2449	63,754	67,188
33	59,67	40	0	65,019	0,3368	63,005	67,033
33	59,67	60	0	65,17	0,3001	63,269	67,071
33	59,67	80	0	65,923	0,207	64,344	67,501
33	59,67	100	0	67,278	0,4175	65,036	69,52

Окончание табл. 7

Нормы удобрения, кг/га д.в				Урожай, ц/га	Расчет		
N	P	K	H		У0	UCUT	-95%
0	0	0	0	61,406	0,4402	59,104	63,708
0	0	20	0	60,352	0,4862	57,932	62,771
0	0	40	0	59,9	0,596	57,221	62,579
0	0	60	0	60,05	0,5534	57,469	62,632
0	0	80	0	60,803	0,4305	58,527	63,08
0	0	100	0	62,159	0,5874	59,5	64,818

Таблица 8

Влияние азотных, фосфорных, калийных удобрений на урожайность озимой пшеницы

Нормы удобрения, кг/га д.в				Урожай, ц/га	Расчет		
N	P	K	H		Ур	UCUT	-95%
33	59,67	45	0	65	0,3418	62,972	67,029
33	59,67	45	0	65	0,3418	62,972	67,029
33	59,67	45	0	65	0,3418	62,972	67,029
33	59,67	45	0	65	0,3418	62,972	67,029
33	59,67	45	0	65	0,3418	62,972	67,029
33	59,67	45	0	65	0,3418	62,972	67,029
N	P	K	H	У0	UCUT	-95%	+95%
0	0	0	0	61,406	0,4402	59,104	63,708
0	0	0	0	61,406	0,4402	59,104	63,708
0	0	0	0	61,406	0,4402	59,104	63,708
0	0	0	0	61,406	0,4402	59,104	63,708
0	0	0	0	61,406	0,4402	59,104	63,708
0	0	0	0	61,406	0,4402	59,104	63,708

На основании расчетных данных построены графики (рис. 1).

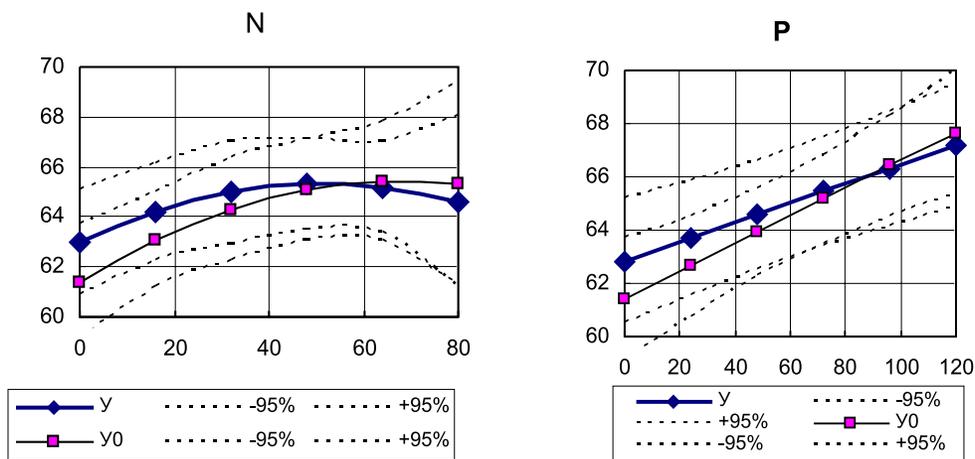


Рис. 1 (начало). Влияние отдельных видов удобрений на урожай озимой пшеницы

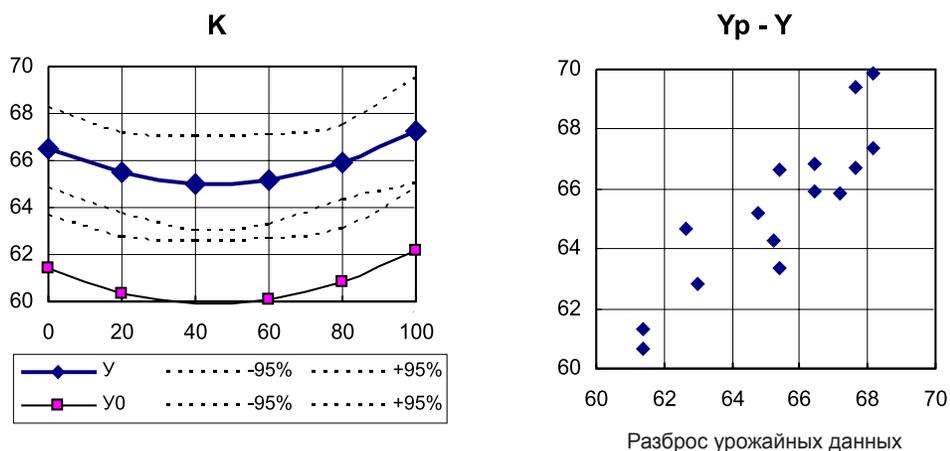


Рис. 1 (окончание). Влияние отдельных видов удобрений на урожай озимой пшеницы

На графиках по азоту оптимум 65 кг/га, по фосфору – 120 кг/га, калию – 0.

Определение оптимальных вариантов проводится при помощи компьютерной программы – методом полного перебора данных урожайности (Y ц/га), прибыли (U, грн/ц), энергоёмкости (V, тыс. МДж) и определение комплексного показателя W (табл. 9).

Таблица 9

Оптимальные варианты удобрений за разными показателями

Оптимальный вариант	X ₁	X ₂	X ₃	Y	U	V
Максимальный урожай Y	33,75	120	0	68,711	14346	185397
Максимальная прибыль U	41,25	0	0	64,812	14935	182167
Уровень энергоёмкости V	7,5	120	0	68,065	14477	187248
Комплексный показатель W	15	120	0	68,371	14468	187071

ВЫВОДЫ

1. Исследования проводились в математически спланированном полевом опыте с озимой пшеницей на черноземе типичном Лесостепи Украины.

2. В результате статистической обработки данных построены графики влияния отдельных видов удобрений (азот, фосфор, калий) на урожайность озимой пшеницы и определены оптимальные нормы азота (65 кг/га) и фосфора (120 кг/га P₂O₅).

3. На данных полевого опыта разработана математическая модель прогноза урожайности озимой пшеницы. Основной показатель в математической модели – это свободный член, который равен 65 ц/га, влияние факторов (N, P, K) и их взаимодействие повышает урожайность на 3,16 ц/га.

4. Определены оптимальные нормы азота и фосфора для получения максимальной урожайности озимой пшеницы, максимальной прибыли от удобрений и уровня энергоёмкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фишер, Р.А.* Статистические методы для исследований / Р.А. Фишер; перевод с англ. В.Н. Перегудов. – М.: Госстатиздат, 1958. – 268 с.
2. *Финни, Д.* Введение в теорию планирования эксперимента / Д. Финни; перевод с англ.– М.: Наука, 1970. – 207 с.
3. *Перегудов, В.Н.* Планирование многофакторных полевых опытов с удобрениями и математическая обработка их результатов / В.Н. Перегудов. – М.: Колос, 1978.– 182 с.
4. *Егоршин, А.А.* Математическое планирование полевых опытов статистическая обработка экспериментальных данных / А.А. Егоршин, Н.В. Лисовой. – Харьков, 2005. – 192 с. (на укр. языке).
5. *Егоршин, А.А.* Методика статистической обработки экспериментальной информации длительных стационарных полевых опытов с удобрениями / А.А. Егоршин, Н.В. Лисовой. – Харьков, 2007. – 45 с. (на укр. языке).
6. *Егоршин, А.А.* Планирование и математическая обработка трёхфакторных опытов: метод. указания / А.А. Егоршин, Н.В. Лисовой. – Харьков, 2008. – 30 с. (на укр. языке).
7. *Егоршин, А.А.* Планирование и математическая обработка многофакторных опытов / А.А. Егоршин, Н.В. Лисовой. – Харьков, 2009. – 30 с. (на укр. языке).
8. *Дуда, Г.Г.* Планирование эксперимента для агрохимических исследований / Г.Г. Дуда. – Нью-Йорк, 2015. – 304 с.

PLANNING OF AN EXPERIMENT AND STATISTICAL PROCESSING
OF FIELD EXPERIMENT DATA

S.A. Baliuk, N.V. Lisovoy, V.N. Nikonenko, E.V. Karatsyuba

The article presents the results of studies of the effect of mineral fertilizers on yield of winter wheat cultivated on typical chernozemic soils of forest steppe in Ukraine. A scheme of a field experiment was mathematically planned, that made it possible to process the data with modern statistical methods by a computer program. The optimum rate of fertilizer for winter wheat was the following: nitrogen – 65 kg/ha, phosphorus – 120 kg/ha P_2O_5 .

The authors developed a mathematical model of winter wheat yield forecasting for the typical chernozemic soils of forest steppe in Ukraine. The main indicator of the mathematical model is an absolute term, which is equal to 65 kg/ha. Effect of factors (N, P, K) and their interaction increases the yield by 3.16 c/ha.

The optimum rates of fertilizers for maximum yield, maximum profit, cost of power consumption and integrated indicator are determined.

Поступила 03.08.16