

УДК 631.816.1:631.445.25

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ N : P : K В УДОБРЕНИИ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ЯЧМЕНЯ

Б. А. ЯГОДИН, М. В. ВИЛЬЯМС, Н. В. ТИМОЩУК, Т. А. ДЕМЬЯНОВА

(Кафедра агрономической и биологической химии)

Для повышения эффективности удобрений разработана модель, позволяющая определить оптимальное соотношение в них N : P : K.

В полевых опытах с ячменем, возделываемым на серых лесных среднесуглинистых почвах, соотношение N : P : K в удобрении варьировало в широком диапазоне при высокой (12 кг атом/га) и низкой (6 кг атом/га) суммарных дозах этих элементов. Установлено, что соотношение N : P : K, равное 60 : 28 : 12 ат. %, можно принять за оптимальное. Показано, что сочетание этих элементов в удобрении в большей степени зависит от биологических особенностей культуры, конкретных свойств почвы и применяемых удобрений, в меньшей — от общего уровня плодородности почвы и погодных условий.

В связи с ростом обеспеченности сельского хозяйства минеральными удобрениями увеличивается число исследований, посвященных вопросу их рационального использования. В работе, посвященной методам определения доз удобрений [1], справедливо отмечается, что многообразие предложенных подходов требует обобщения, это прежде всего обусловлено увеличением норм удобрений при переходе на интенсивную технологию возделывания сельскохозяйственных культур.

Очевидно, что применение возрастающих норм удобрений, не сбалансированных по содержанию отдельных компонентов, может привести к снижению их эффективности и вызвать ряд негативных последствий, связанных с загрязнением окружающей среды. Ряд авторов полагают, что при высоких нормах удобрений соотношение элементов питания не влияет на урожай [2]. Однако данные опытов с яровой пшеницей [3], кукурузой [4], сахарной свеклой [5] и соей [6] показывают, что урожай и его качество зависят не только от общего уровня плодородности, но и от соотношения азота, фосфора и калия при их неизменном суммарном количестве. В исследованиях с песчаной культурой ячменя [7] отмечается, что поверхность отклика урожая на варьирование соотношения N:P:K в питательной смеси имеет форму купола. Оптимум этого соотношения, соответствующий максимальному урожаю, равен 58:10:32 ат. %. Поскольку в практике применения удобрений особое значение имеют именно эти три элемента, задачей настоящих исследований была разработка модели определения оптимума соотношения N:P:K в питании ячменя, возделываемого на серых лесных среднесуглинистых почвах, при низком и высоком уровнях обеспеченности удобрениями.

Методика

Полевые опыты проводили с ячменем сорта Белогорский в учхозе «Дружба» Ярославской области (1987—1988 гг.) на серых лесных среднесуглинистых почвах. Агрохимические показатели почв следующие: рН_{сол} — 6,3, Н_г — 2,58 мэкв, S — 20,8 мэкв/100 г, P₂O₅ (по Кирсанову) — 10 мг/100 г, K₂O (по Масловой) — 22, СаО — 13, Mg — 3, легкогидролизуемый N — 9,2 мг/100 г.

При изучении соотношения N : P : K за исходный уровень обеспеченности удобрениями принимали норму 90N 270P80K, рассчитанную методом нормативного баланса для получения запланированного урожая зерна ячменя 35—40 ц/га. Количество эле-

ментов в соотношении, выраженное в единицах действующего вещества, делили на соответствующие коэффициенты: N — 90 : 14 = 6,43; P₂O₅ — 270 : 71 = 3,80; K₂O — 80 : 47 = 1,70 кг атом/га. Сумма долей трех элементов составила 11,93, или 12 кг атом/га. Для оптимизации соотношения N : P : K использовали 60-градусную систему координат Шрайнемахера, или треугольную матрицу [7]. В этой системе сумма долей элементов, выраженная в молярных отношениях, всегда постоянная и ее можно принять за 100 %. В опыте 1987 г. оптимум соотношения N : P : K определяли при низком и высоком уровнях плодородности. Первый соответствовал суммарной



Рис. 1. Графическое изображение схем опытов.
Опыт 1987 г.

дозе N+P+K, равной 6 кг атом/га, последний — 12 кг атом/га. В опыте 1988 г.

суммарная доза N+P+K составляла 12 кг атом/га. Соотношение между варьирующими внутри суммарной дозы элементами во всех случаях выражали в атомных процентах.

Схема опытов представлена в табл. 1. Схема опытов, как показывает ее графическое изображение (рис. 1), состояла из 3 серий вариантов. В каждой серии варьировали парные соотношения элементов при постоянной доле третьего элемента. Таким образом, схема опытов позволила определить оптимумы парных соотношений долей элементов (P : K, N : K, N : P) в удобрении и с их помощью найти оптимум соотношения N : P : K. Удобрения после соответствующего пересчета на их физическую массу вносили в форме аммиачной селитры, двойного суперфосфата и хлористого калия. Повторность опытов 4-кратная, площадь одной делянки 50 м², учетная площадь 10 м². Полученные результаты были обработаны статистически с помощью дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализов.

Результаты

В опыте 1987 г. при суммарной дозе элементов 12 кг атом/га урожайность была практически в 2 раза выше, чем при дозе 6 кг атом/га (табл. 2). При варьировании соотношения элементов внутри каждой суммарной дозы N+P+K различия в урожае зерна также оказались достоверными, но более четко они были выражены при суммарной дозе 12 кг атом/га.

Как показывают результаты графического определения оптимумов парных соотношений долей элементов (рис. 2), зависимость урожая зерна от соотношения N:P:K характеризуется одновершинными кривыми. Максимум каждой этой кривой соответствует оптимуму (пунктирные стрелки) парного соотношения элементов. Аналогичная форма зависимости обнаружена и для урожая зерна ячменя в опыте 1988 г. (табл. 2, рис. 2). Численные значения оптимумов парных соотношений долей элементов даны в табл. 3. Оптимальные парные соотношения P:K, N:K и N:P, выраженные в процентах к сумме двух соответствующих элементов, оказались довольно близкими, несмотря на то что полевые

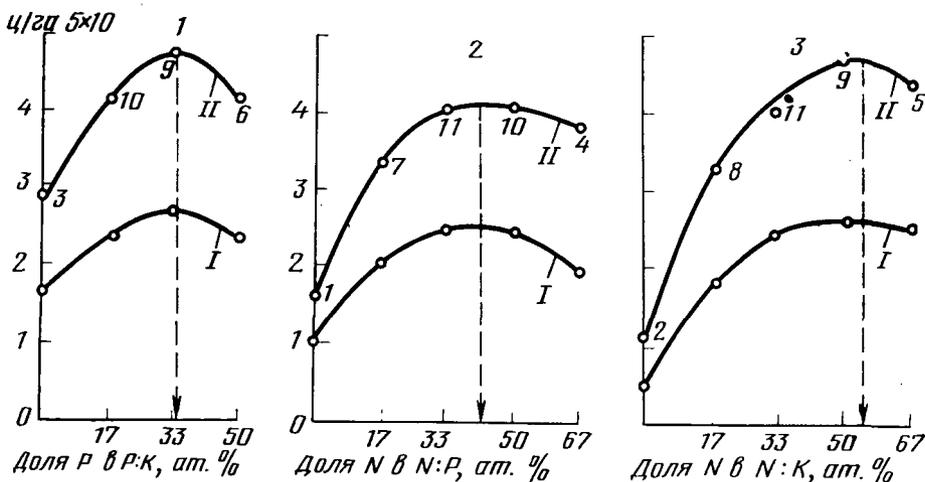


Рис. 2. Зависимость урожая зерна ячменя от парного соотношения P : N (I), N : P (2) и N : K (3) в удобрении при неизменной суммарной дозе N + P + K = 6 кг атом/га (I) и 12 кг атом/га (II) в опыте 1987 г.

Таблица 1

Схема опытов 1987 и 1988 гг. (содержание N, P и K в удобрении)

Соотношение ат. %			Суммарная доза N + P + K, кг атом/га						Соотношение, ат. %			Суммарная доза N + P + K, 12 кг атом/га		
N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
1987 г.														
0	67	33	0	4	2	0	8	4	10	10	80	1,2	1,2	9,6
0	33	67	0	2	4	0	4	8	30	10	60	3,6	1,2	7,2
50	0	50	3	0	3	6	0	6	50	10	40	6,0	1,2	4,8
67	0	33	4	0	2	8	0	4	70	10	20	8,4	1,2	2,4
67	33	0	4	2	0	8	4	0	80	10	10	9,6	1,2	1,2
50	50	0	3	3	0	6	6	0	70	20	10	8,4	2,4	1,2
17	50	33	1	3	2	2	6	4	50	40	10	6,0	4,8	1,2
17	33	50	1	2	3	2	4	6	30	60	10	3,6	7,2	1,2
50	33	17	3	2	1	6	4	2	10	80	10	1,2	9,6	1,2
50	17	33	3	1	2	6	2	4	50	20	30	6,0	2,4	3,6
33	33	33	2	2	2	4	4	4	50	25	25	6,0	3,0	3,0
Контроль (без удобрений)									50	30	20	6,0	3,6	2,4
1988 г.														
0	67	33	0	4	2	0	8	4	10	10	80	1,2	1,2	9,6
0	33	67	0	2	4	0	4	8	30	10	60	3,6	1,2	7,2
50	0	50	3	0	3	6	0	6	50	10	40	6,0	1,2	4,8
67	0	33	4	0	2	8	0	4	70	10	20	8,4	1,2	2,4
67	33	0	4	2	0	8	4	0	80	10	10	9,6	1,2	1,2
50	50	0	3	3	0	6	6	0	70	20	10	8,4	2,4	1,2
17	50	33	1	3	2	2	6	4	50	40	10	6,0	4,8	1,2
17	33	50	1	2	3	2	4	6	30	60	10	3,6	7,2	1,2
50	33	17	3	2	1	6	4	2	10	80	10	1,2	9,6	1,2
50	17	33	3	1	2	6	2	4	50	20	30	6,0	2,4	3,6
33	33	33	2	2	2	4	4	4	50	25	25	6,0	3,0	3,0
Контроль (без удобрений)									50	30	20	6,0	3,6	2,4

Таблица 2

Урожай зерна ячменя при разных соотношениях N:P:K в удобрении
(масса зерна рассчитана на стандартную влажность 14 %)

Серия 1		Серия 2		Серия 3	
Соотношение N: P: K, ат. %	Масса зерна, д/га	Соотношение N: P: K, ат. %	Масса зерна, ц/га	Соотношение N: P: K, ат. %	Масса зерн Ц/га
1987 Г.					
N + P + K = 6 атом/га]					
0:33:66	10,4	50:0:50	16,5	0:67:33	10,1
17:33:50	18,1	50:17:33	23,6	17:50:33	20,0
33:33:33	24,1	50:33:17	26,2	33:33:33	24,1
50:33:17	26,2	50:50:0	23,6	50:17:33	23,6
67:33:0	24,9	Контроль	11,0	Контроль	11,0
Контроль	11,0				
HCP _w	7,0		8,4		6,3
N + P + K = 12 кг атом/га					
0:33:66	13,1	50:0:50	27,1	0:67:33	16,2
17:33:50	32,7	50:17:33	42,3	17:50:33	32,3
33:33:33	39,8	50:33:17	46,9	33:33:33	39,8
50:33:17	46,9	50:50:0	41,4	50:17:33	42,3
67:33:0	43,7	Контроль	11,0	67:0:33	38,2
Контроль	11,0			Контроль	11,0
HCP _{„6}	4,7		4,3		5,5
1988 г.					
N + P + K = 12 кг атом/га					
10:10:80	28,6	50:10:40	36,5	80:Ю:Ю	39,9
30:10:60	31,9	50:40:10	45,1	70:20:10	42,4
50:10:40	36,5	50:20:30	40,0	50:40:10	45,1
70:10:20	41,4	50:25:25	42,8	30:60:10	39,8
80:10:10	39,9	50:30:10	44,4	10:80:10	35,5
Контроль	28,0	Контроль	28,0	Контроль	28,0
HCP ₀₅	6,4		10,5		5,4

опыты проводили в разные годы и при разных уровнях обеспеченности удобрениями.

Нанеся значения оптимумов на треугольную матрицу и соеди-

Оптимальные парные соотношения долей N, P и K (числитель — соотношение долей варьирующих элементов, знаменатель — доля постоянного элемента в тройном соотношении)

Год	N + P + K, кг атом/га	Оптимальные соотношения долей					
		% от суммы трех элементов			% от суммы двух элементов		
		P:K	$\frac{N:K}{P}$	$\frac{N:P}{K}$	P:K	N:K	N:P
1987	6	$\frac{33:17}{50}$	$\frac{60:7}{33}$	$\frac{50:17}{33}$	66:34	90:10	75:25
	12	$\frac{33:17}{50}$	$\frac{56:11}{33}$	$\frac{42:25}{33}$	66:34	84:16	63:37
1988	12	$\frac{35:15}{50}$	$\frac{70:20}{10}$	$\frac{57:33}{10}$	70:30	78:22	59:41
Среднее					67:33	66:34	84:16

нив эти точки с противоположащими вершинами, получим небольшой внутренний треугольник, геометрический центр которого с наибольшей вероятностью будет соответствовать тройному оптимуму (рис. 1). В опыте 1987 г. оптимальное соотношение N:P:K при суммарной дозе этих элементов 6 кг атом/га составило 69:22:9 ат. %, а при 12 кг атом/га — 58:30:12 ат. %. В опыте 1988 г. оптимум тройного соотношения элементов был равен 54:31:15 ат. %.

Теперь следует убедиться в том, что найденные с помощью треугольной матрицы тройные соотношения элементов действительно оптимальны. Если это так, то чем больше отклоняются соотношения от оптимального, тем ниже должен быть урожай зерна в соответствующих вариантах. Иными словами, урожайность должна отрицательно коррелировать с удаленностью от рассчитанного оптимума соотношения. В качестве меры отклонения соотношения N:P:K от оптимального мы использовали полусумму разностей долей N, P и K. в опытных вариантах, с одной стороны, и в оптимальном — с другой (без учета знака). Как и следовало ожидать, по мере удаления соотношения N:P:K в удобрении от оптимума урожай зерна закономерно снижался (рис. 3). Связь между урожаем и отклонением долей элементов от оптимума можно считать как сильную: в опыте 1987 г. при суммарной дозе N + P + K 6 кг атом/га коэффициент корреляции составил — 0,96 при стандартной ошибке $\pm 1,63$ ц/га; при суммарной дозе 12 кг атом/га он был равен — 0,94 при стандартной ошибке $\pm 3,93$ ц/га; в опыте 1988 г. он составил — 0,94 при стандартной ошибке $\pm 1,73$ ц/га. Форма связи характеризовалась соответствующими уравнениями линейной регрес-

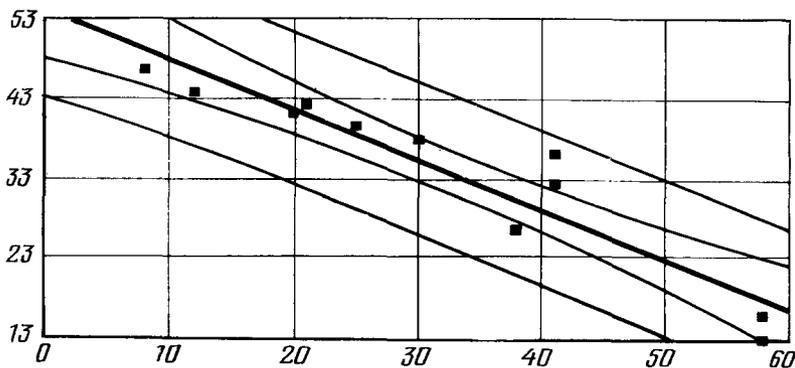


Рис. 3. Связь между урожаем зерна ячменя и суммарным отклонением долей элементов от оптимума N : P : K (Опыт 1987 г., N + P + K = 12 кг атом/га).

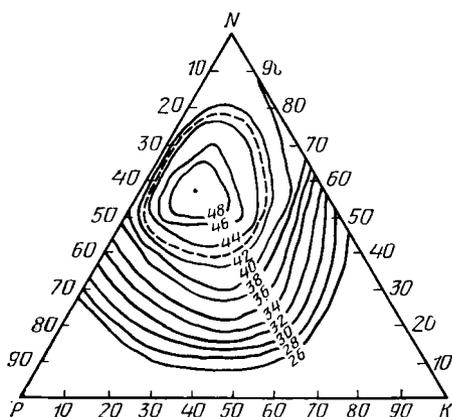


Рис. 4. «Купол отклика урожая» зерна ячменя как функция соотношения N : P : K в удобрении. (Опыт 1987 г., N+P+K=6 кг атом/га).

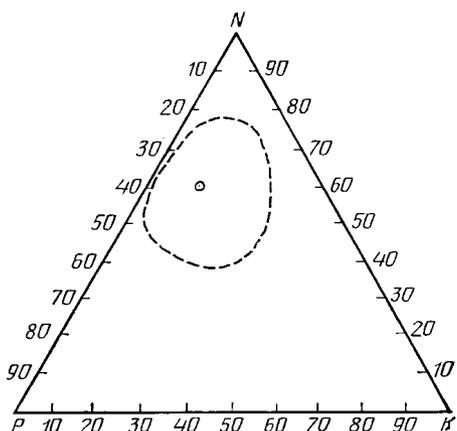


Рис. 5. Общее плато оптимума N : P : K для всех опытов.

сии: для опыта 1987 г. при суммарной дозе 6 кг атом/га $y = 29,90 - 0,317x$, при суммарной дозе 12 кг атом/га $y = 54,27 - 0,623x$; для опыта 1988 г. $y = 45,86 - 0,260x$, где y — урожай зерна, ц/га, x — отклонение соотношения N:P:K от оптимума (ат. %). Это доказывает реальность найденных нами оптимумов тройного соотношения элементов в удобрении.

Другим способом, подтверждающим оптимальность найденного нами соотношения, может служить построение поверхности отклика, или «купола урожая», на триангулярной матрице. Форму купола реконструировали (рис. 2). Определив по кривым урожая соотношения N:P:K, соответствующие определенным уровням урожайности (с интервалом 2 ц/га, считая от максимума), наносили найденные точки на триангулярную матрицу и соединяли их плавными линиями. Полученные изоурожайные линии представляют собой контуры, ограничивающие горизонтальное сечение купола отклика при определенных уровнях урожайности. Серия таких контуров позволяет составить наглядное представление о форме «купола урожая» как функции соотношения N:P:K в удобрении (рис. 4).

Соотношения N:P:K, найденные по оптимальным парным отношениям долей элементов, соответствуют вершинам «куполов урожая», поэтому рассчитанные нами соотношения можно считать близкими к реальному оптимуму. Изоурожайные линии, соответствующие урожаям, которые меньше максимального (рис. 4), пересекают достаточно широкий диапазон соотношений N:P:K, т. е. при различных соотношениях N:P:K можно получить одинаковые урожаи, но они будут тем ниже, чем больше отличаются доли N, P и K от их оптимального тройного соотношения. Однако характер кривых «соотношение — урожай» (рис. 2) свидетельствует о том, что вблизи максимумов их крутизна невелика, поэтому при небольших отклонениях соотношения N:P:K от найденного оптимума урожай снижался незначительно и недостоверно. Это хорошо подтверждается значениями $НСР_{05}$ (табл. 2).

Часть поверхности отклика урожая, в пределах которой продуктивность растений недостоверно отличалась от максимальной, можно считать «плато» оптимума соотношения элементов. На рис. 4 площадь, в пределах которой удаление соотношения N:P:K от точки оптимума по любому элементу еще не приводит к достоверному снижению урожая, выделена пунктиром.

На рис. 5 на одной триангулярной матрице совмещены изокорреляты, соответствующие области оптимума соотношения N:P:K в удобрении. Плато оптимума во всех трех случаях имеет некоторую взаим-

ную площадь наложения (заштрихованная часть), которую можно считать усредненным плато оптимума наилучших соотношений N:P:K, расположенных в верхней части «купола урожая», что соответствует 60:28: 12 ат. %. При суммарной дозе N, P и K 12 кг азот/га этосоставляет 7,2N3, 4P1, 4K кг атом/га, а при выражении в единицах действующего вещества — 100N240P65K. кг/га.

Таким образом, результаты полевых опытов с ячменем сорта Белогорский, возделываемым на серых лесных среднесуглинистых почвах, показали правомерность использования треугольной матрицы для определения оптимума соотношения N:P:K в удобрении. Соотношение этих элементов существенно влияло на урожай. Зависимость урожая зерна от соотношения элементов, так же как и в вегетационных опытах с песчаной культурой [7], характеризовалась «куполоткликом», проекция высшей точки которого (максимальный урожай) на треугольную матрицу дает оптимум соотношения N:P:K. Результаты статистической обработки данных об урожае показали, что в условиях полевых опытов оптимум соотношения элементов в удобрении соответствовал области, в пределах которой урожай достоверно не изменялся. За пределами этого «плато» оптимума изменение соотношения N:P:K (любого элемента внутри их суммарной дозы) приводило к снижению урожайности.

Соотношения N:P:K в удобрении ячменя, определенные в разные годы исследований и при разных уровнях удобрённости, находятся в верхней части «купола урожая», поэтому можно предположить, что все они близки к реальному оптимуму. Поскольку все три соотношения близки между собой, среднее из них (60:28:12 ат. %) можно принять за общий оптимум соотношения N:P:K в удобрении ячменя при его возделывании на серых лесных среднесуглинистых почвах. Если дальнейшие исследования подтвердят правильность обнаруженного нами оптимума, то можно будет сделать вывод, что оптимальное сочетание трех основных элементов в удобрении в большей мере зависит от биологических особенностей культуры, конкретных свойств почвы и применяемых удобрений и в меньшей от общего уровня удобрённости и погодных условий.

Наилучшее соотношение N:P:K, найденное в этой работе, заметно отличается от оптимума, полученного в песчаной культуре [7]. При практически одинаковой доле азота отношение долей фосфора и калия обратно пропорционально и может различаться более чем в 2 раза. Сопоставление этих результатов позволяет сделать предположение о том, что приводимые в литературе коэффициенты использования фосфора из почвы и удобрений несколько завышены.

Выводы

1. Результаты полевых опытов с ячменем, возделываемым на серых лесных среднесуглинистых почвах, показали правомерность использования треугольной матрицы для определения оптимума соотношения N:P:K в удобрении.

2. Соотношение N:P:K в удобрении существенно влияло на урожай. Зависимость урожая зерна ячменя от соотношения этих элементов характеризовалась «куполоткликом», проекция высшей точки которого на треугольную матрицу соответствовала оптимальному соотношению N:P:K.

3. По мере удаления соотношения N:P:K в удобрении от найденного оптимума (60:28:12 ат.%) урожай зерна закономерно снижался. Коэффициент корреляции между урожайностью и удаленностью от рассчитанного оптимума составил —0,96.

4. С помощью изоурожайных линий на треугольной матрице было установлено, что удаление от точки найденного оптимума по любому из трех исследуемых элементов приводит к уменьшению урожайности. При этом различные соотношения N:P:K, расположенные на одной и той же изоурожайной линии, обеспечивают статистически одина-

ковые урожаи, но меньше максимально возможного в опыте.

5. Предложенная на основе триангулярной матрицы модель поиска оптимального соотношения трех основных элементов минерального питания может быть использована для разработки нормативной основы применения удобрений. Для интенсивной технологии возделывания ячменя на серых лесных среднесуглинистых почвах рекомендуется норма 100N:240P:65K.

ЛИТЕРАТУРА

1. Державин Л. М., Литвак Ш. И., Седова Е. В. Современные методы определения доз минеральных удобрений. — Обзорная информация. М.: Госагропром СССР. ВНИИТЭИ, 1988. — 2. Ниловская Н. Т., Арбузова И. Н. Об оптимальном соотношении элементов минерального питания растений. — *Агрохимия*, 1978, № 5, с. 138—147. — 3. Вахмистров Д. В., Пахомова Л. М., Балахонцев Е. Н., Исхаков Ф. Ф. Раздельное определение оптимумов суммарной дозы N+P+K и соотношения N : P : K в удобрении. — *Агрохимия*, 1983, № 9, с. 3—10. — 4. Вахмистров Д. Б., Вильямс М. В., Шарма Г., Ягодин Б. А. Соотношение N:P:K в среде и урожай: анализ формы купола отклика. — *Агрохимия*, 1986, № 11, с. 30—37. — 5. Вахмистров Д. Б., Пахомова Л. М., Балахонцев Е. Н. и др. Раздельное определение оптимумов суммарной дозы N+P+K и соотношения N : P : K в удобрении. Сообщение 7. Продуктивность сахарной свеклы. — *Агрохимия*, 1983, № 8, с. 15—27. — 6. Вахмистров Д. Б., Федоров А. А. Раздельное определение оптимумов суммарной дозы и соотношения N : P : K в удобрении. — *Агрохимия*, 1982, № 5, с. 3—11. — 7. Вильямс М. В., Шарма Г., Ягодин Б. А., Вахмистров Д. Б. Оптимизация соотношения N : P : K в питательной смеси для песчаной культуры ячменя. — *Физиология и биохимия культурных растений*, 1986, т. 18, № 3, с. 222—231.

Статья поступила 1 июня 1989 г.

SUMMARY

To increase efficiency of fertilizers, a model allowing to determine optimum proportion of N : P : K in them has been developed.

In field experiments with barley cultivated on grey forest loams the proportion of N : P : K in the fertilizer varied greatly at high (12 kg•atom/ha) and low (6 kg•atom/ha) total doses of these elements. It has been established that proportion of N : P : K which equals 60:28:12 at % may be considered as optimum. It is shown that combination of these elements in fertilizer more depends on biological characteristics of the crop, specific properties of the soil and on fertilizers applied, and less — on total level of fertilizing the soil and on weather conditions.